DAR BİR KANALDA YÜZEYE MONTE EDİLMİŞ ISITILMIŞ BLOKLAR ÜZERİNDEN OLAN AKIŞ VE ISI TRANSFERİ ÜZERİNE GEOMETRİK FAKTÖRLERİN, TÜRBÜLANS GİRİŞ PARAMETRELERİNİN VE BASINÇ GRADYENİNİN ETKİSİ

Dildar GÜRSES

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAR BİR KANALDAYÜZEYE MONTE EDİLMİŞ ISITILMIŞ BLOKLAR ÜZERİNDEN OLAN AKIŞ VE ISI TRANSFERİ ÜZERİNE GEOMETRİK FAKTÖRLERİN, TÜRBÜLANS GİRİŞ PARAMETRELERİNİN VE BASINÇ GRADYENİNİN ETKİSİ

Dildar GÜRSES
0000-0002-1517-1692

Prof. Dr. Erhan PULAT
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

DAR BİR KANALDAYÜZEYE MONTE EDİLMİŞ ISITILMIŞ BLOKLAR ÜZERİNDEN OLAN AKIŞ VE ISI TRANSFERİ ÜZERİNE GEOMETRİK FAKTÖRLERİN, TÜRBÜLANS GİRİŞ PARAMETRELERİNİN VE BASINÇ GRADYENİNİN ETKİSİ

Dildar GÜRSES

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erhan PULAT

Bu çalışmada, alt yüzeye monte edilmiş dört adet blok gibi elektronik yongadan olan ısı transferi üzerine blok yerleşimlerinin, blok yüksekliğinin, kanal yüksekliğinin, giriş türbülans şiddetinin, basınç gradyeninin ve eşlenik (conjugate) durumun etkileri hesaplamalı olarak olarak araştırılmıştır. Tüm geometrik faktörler ve giriş türbülans şiddeti 3 farklı durum için incelenmiştir. Basınç gradyeni üst plaka üzerine verilen ve ilk bloktan hemen önce başlayan eğimle sağlanmıştır. -2°, 0°, 2°, 4° ve 6° eğim açıları kullanılmıştır. Eşlenik (conjugate) etki için bakalit ve FR-4 olmak üzere iki farklı malzemenin etkisi incelenmiştir. Elektronik elemanları simule eden bloklar kanalın alt yüzeyine yerleştirilmiştir ve bloklara sabit sıcaklık tanımlanmıştır. Akışkan olarak hava kullanılmakta ve hava kanala düzgün hız profilinde sabit hızla girmektedir. Hesaplamalar kanal yüksekliğine göre tanımlanmış Re sayıları (Re= 6000, 9015 ve 11993) için yapılmıştır. Bu amaçla iki ve üç boyutlu akış, sıkıştırılamaz ve türbülanslı durum göz önüne alınarak korunum ve SST k-ω türbülans model denklemleri ANSYS-Fluent yazılımı kullanılarak çözülmüştür. İncelenen tüm durumlar için hız, sıcaklık, basınç ve türbülans kinetik enerji dağılımları elde edilerek karşılaştırılmıştır. Değişen tüm durumların, ısı transferi üzerine olan etkileri de yerel ve ortalama Nusselt değerleri hesaplanarak tartışılmış, son bloktan sonraki yeniden birleşme uzunlukları çizdirilerek hesaplanmış ve ayrıca blok üstünde, kanal ortasında ve kanal üstünde basınç değerleri çizdirilerek karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüzeye monte edilmiş bloklar, elektronik soğutma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, türbülanslı akış, türbülans şiddeti, basınç gradyeni, eşlenik (conjugate) etki

2022, xxxv+421 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

EFFETCS OF GEOMETRICAL FACTORS, TURBULENCE INLET PARAMETERS AND PRESSURE GRADIENT ON FLOW AND HEAT TRANSFER FROM SURFACE MOUNTED HEATED BLOCKS IN A NARROW CHANNEL

Dildar GÜRSES

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Erhan PULAT

In this study, effects of block placements, block height, channel height, inlet turbulence intensity, pressure gradient and conjugate state on heat transfer from block-like electronic chips are investigated computationally. All geometric factors and inlet turbulence intensity were examined for 3 different cases. The pressure gradient has been ensured with the inclined upper plate that starts just before the first block. Inclination angles of -2°, 0°, 2°, 4°, and 6° have used. The effect of two different materials, Bakelite and FR-4, was investigated for the conjugate effect. Blocks simulating electronic elements are placed to the lower surface of the canal and a constant temperature is defined for the blocks. Air is used as the fluid and the air enters the duct at a constant velocity in a uniform velocity profile. Calculations were made for Re numbers (Re= 6000, 9015 ve 11993) defined according to channel height. For this purpose, conservation and SST k-ω turbulence model equations are solved by using ANSYS-Fluent software for two-dimensional, incompressible, and turbulent flow conditions. Velocity, temperature, pressure, and kinetic energy distributions have been computed and compared for considered inclination angles. The effects of all changing conditions on the heat transfer were also discussed by calculating the local and average Nusselt values, and the recombination lengths after the last block were calculated by plotting and also comparisons were made by plotting pressure values on the block, in the middle of the channel and above the channel.

Key words: Surface mounted blocks, electronic cooling, computational fluid dynamics, turbulent flow, turbulent intensity, pressure gradient, conjugate effect
2022, xxxv +421 sayfa.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, yol gösteren, sonsuz hoşgörü ve anlayışıyla bu çalışmanın ortaya çıkmasında bana destek olan saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Erhan PULAT'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez izleme komitesi üyesi hocalarım Prof. Dr. Abdulvahap YİĞİT, Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN, jüri üyelerim Prof. Dr. İbrahim ATMACA, Dr. Öğr. Üyesi K. Furkan SÖKMEN, süreçte emeğini ve desteğini esirgemeyen Dr. Ebubekir BEYAZOĞLU'na ve lisans eğitimimden bu yana üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve bu desteği sevgileriyle birleştiren çok değerli aileme, eğitim hayatımın her döneminde büyük özveri ile bana destek olan ağabeyim Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ'a en derin teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında ilgi ve anlayışıyla bana her zaman destek olan sevgili eşim Fatih GÜRSES'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nihayetinde bu çalışmayı "Anne hala bilgisayarların nasıl en iyi soğutulacağını bulamadın mı? Anne bana da anlatsan da yardım etsem, çabucak bitse tezin!" diye her gün farklı bir soruyla yanımda olan ve bu süreçte en çok ihmal ettiğim biricik kızım Hafsa Betül'üme armağan ediyorum.

.

Dildar GÜRSES
17/08/2022

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
c_p	Sabit basınçta özgül ısı (J/kgK)
D,H	Kanal giriş yüksekliği
ε	Türbülans kinetik enerji yayılımı
$\dot{E}_{giriş}$	Sisteme giren enerji
$\dot{E}_{çıkış}$	Sistemden çıkan enerji
h	Yonga yüksekliği
k	Isı iletim katsayısı
k_s	Katı malzeme ısı iletim katsayısı
k_f	Akışkan (hava) ısı iletim katsayısı
KTF	Kullanıcı tanımlı fonksiyon
l	Paketleme yoğunluğu
L	Kanal uzunluğu
Nu	Nusselt Sayısı
P	Basınç
p'	Modifiye basınç
Re	Reynolds
s	Yongalar arası mesafe
St	Stanton sayısı
S_M	Sisteme etki eden dış kuvvetler
T	Sıcaklık
Tg	Giriş sıcaklığı
T_f	Akışkan sıcaklığı
Ts	Yongalar üzerindeki sıcaklık, katı yüzey üzerindeki sıcaklık
Tu	Türbülans şiddeti
u	x yönündeki hız bileşeni
ū	Ortalama hız bileşeni
u′	Çalkantı bileşeni
UDF	User defined function (Bkz. KTF)
v	y yönündeki hız bileşeni
y+	Cidardan boyutsuz uzaklık
ν	Kinematik viskozite
w	z yönündeki hız bileşeni
ω	Türbülans frekansı
q	Yerel ısı akısı
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
ρ	Yoğunluk (kg/m3)
Φ	Viskoz dağılım fonksiyonu
γ	Intermittency
β	Standard k-ω türbülans modeli sabiti
μ_t	Türbülans viskositesi
μ_{eff}	Efektif vizkozite
σ_k	Standard k-ω türbülans modeli sabiti
σ_ω	Standard k-ω türbülans modeli sabiti

Kısaltmalar	**Açıklama**
2B	2 Boyutlu
3B	3 Boyutlu
Bkz.	Bakınız
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Doğrudan Sayısal Simulasyon (Direct Numerical Simulation)
cfm	Cubic feet per minute
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ITX	Information Technology Extended
LES	Büyük Girdap Simulasyonu (Large Eddy Simulation)
Ort.	Ortalama
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier Stokes Denklemleri
SIMPLE	Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı Kapalı Yöntem (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)
SST	k-ω Türbülans Modeli
vb.	Ve benzeri

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....iii
ABSTRACT....iv
TEŞEKKÜR....v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....vi
ŞEKİLLER DİZİNİ....x
ÇİZELGELER DİZİNİ....xxxiii
1 . GİRİŞ....1
1.1 . Elektronik Sistemlerin Soğutulması ve Isıl Tasarımı....2
2 . KAYNAK ÖZETLERİ....5
3 . MATERYAL VE YÖNTEM....18
3.1 . HAD Tarihi....18
3.2 . HAD İşleyişi....19
3.3 . Korunum Denklemleri....22
3.4 . Türbülans ve Türbülans Modelleme....24
3.5 . Kullanılan Temel Denklemler....29
3.6 . Bloklar Üzerinden Akış....31
3.7 Eşlenik (İletim + Taşınım, Conjugate) Isı Transferi....34
3.8 . Çalışmada Kullanılan Geometriler....36
3.9 . Sınır Şartları....39
3.9.1. Isı transferi analizi (Sadece taşınım)....39
3.9.2. Eşlenik ısı transferi analizi (Taşınım+iletim)....40
3.10 . Akışkan ve Kullanılan Malzemelerin Özellikleri....42
3.11 . Ağdan Bağımsızlık Çalışması....43
3.11.1 . 2 boyutlu model....43
3.11.2 . 3 boyutlu model....45
3.12 . y^+ Değerlendirmesi....47
3.13 . Sayısal Yöntem....48
3.14 . Validasyon (Doğrulama) Çalışması....50
3.15 . 2 ve 3 Boyutlu Geometrilerde Analiz Sonuçlarının Elde Edilmesi....52
4 . BULGULAR VE TARTIŞMA....54
4.1 2 Boyutlu Geometride Yapılan İncelemeler....54
4.1.1 . 2 Boyutlu geometride bloklar arası mesafenin incelenmesi....54
4.1.2 . 2 Boyutlu geometride blok boyunun değişiminin incelenmesi....76
4.1.3 . 2 Boyutlu geometride blok yüksekliğinin incelenmesi....98
4.1.4 . 2 Boyutlu geometride kanal yüksekliğinin incelenmesi....120
4.1.5 . 2 boyutlu geometride türbülans giriş parametrelerinin incelenmesi....142
4.1.6 . 2 boyutlu geometride basınç gradyeninin etkisinin incelenmesi....163
4.1.7 . 2 boyutlu geometride baskı devre kartı malzemesinin etkisinin incelenmesi (Eşlenik ısı transferi)....195
4.1.8 . 2 boyutlu geometride bakır sıvamanın etkisinin incelenmesi....212
4.1.9 . Deneysel çalışma ile 2 boyutlu baz geometrinin karşılaştırması....229
4.2 . 3 Boyutlu Geometride Yapılan İncelemeler....230
4.2.1 . 3 boyutlu geometride bloklar arası mesafenin incelenmesi....230
4.2.2 . 3 boyutlu geometride blok boyunun etkisinin incelenmesi....252
4.2.3 . 3 boyutlu geometride blok yüksekliğinin incelenmesi....273
4.2.4 . 3 boyutlu geometride kanal yüksekliğinin incelenmesi....295

4.2.5 . 3 boyutlu geometride türbülans giriş parametrelerinin incelenmesi 316
4.2.6 . 3 boyutlu geometride basınç gradyeninin etkisinin incelenmesi 336
4.2.7 . 3 boyutlu geometride baskı devre kartı malzemesinin etkisinin incelenmesi (Eşlenik ısı transferi).....364
4.2.8 . 3 boyutlu geometride bakır sıvamanın etkisinin incelenmesi.....382
5. SONUÇ 403
KAYNAKLAR 408
EKLER.....414
EK1 2B Eşlenik Isı Transferinde Sıcaklık Dağılımlarının Gösterilmesi 414
ÖZGEÇMİŞ 421

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Elektronik cihazlarda meydana gelen hataların sıcaklık ile değişimi 1
Şekil 1.2. ITX anakartların zaman içerisindeki boyutlarındaki değişim 2
Şekil 1.3. Elektronik cihazların soğutulması 2
Şekil 3.1. Had İşleyiş Algoritması 19
Şekil 3.2. Sayısal ağ eleman sayısı ve çözüm süresi arasındaki ilişki 20
Şekil 3.3. Sayısal ağ eleman sayısı ve sonuç arasındaki ilişki 21
Şekil 3.4. Ortalama hız ve ortalama çalkantı terimlerinin şematik gösterimi 25
Şekil 3.5. SST k-ω modelinin farklı yüzeylerdeki hesap şekli 28
Şekil 3.6. Bloklar üzerinde akışta akış bölgeleri 32
Şekil 3.7. Ön (ileri) basamak akışının gösterimi. 32
Şekil 3.8. Boşluk akışının gösterimi 32
Şekil 3.9. Geri basamak akışının yapısı 33
Şekil 3.10. Ardışık bloklu yüzeyin şematik gösterimi 33
Şekil 3.11. Eşlenik ısı transferinin tek blok üzerinden gösterimi 35
Şekil 3.12. 2 boyutlu analizlerde kullanılan baz geometri (Ölçüler mm'dir.) 36
Şekil 3.13. 2 boyutlu analizlerde basınç gradyenlerinin gösterimi a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° (Ölçüler mm'dir.) 37
Şekil 3.14. 3 boyutlu analizlerde kullanılan baz geometriden xy düzleminden görüntü 38
Şekil 3.15. 3 boyutlu analizlerde kullanılan baz geometriden zx düzleminde üstten görüntü 38
Şekil 3.16. 3 boyutlu analizlerde kullanılan baz geometriden yz düzleminde görüntü 38
Şekil 3.17. Analizlerde kullanılan sınır şartları 39
Şekil 3.18. Eşlenik analizlerde kullanılan yaklaşımlar a) Ağlara bölünmüş duvar yaklaşımı (Bu çalışmada kullanılan) b) İnce duvar yaklaşımı 42
Şekil 3.19. 2 boyutlu analizlerde ağdan bağımsızlık çalışması 44
Şekil 3.20. 2 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı görünümü 44
Şekil 3.21. 2 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı yakın görünümü 45
Şekil 3.22. 3 boyutlu analizlerde ağdan bağımsızlık çalışması 46
Şekil 3.23. 3 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı görünümü 46
Şekil 3.24. 3 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı görünümü -2 46
Şekil 3.25. 3 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı yakın görünümü 47
Şekil 3.26. 3 boyutlu analizlerde hızın iterasyonla değişimi 50
Şekil 3.27. 3 boyutlu analizlerde basıncın iterasyonla değişimi 50
Şekil 3.28. 3 boyutlu analizlerde türbülans kinetik enerjinin iterasyonla değişimi 50
Şekil 3.29. Validasyon çalışması geometrisi (Vogel ve Eaton 1985) 51
Şekil 3.30. k-w türbülans modellerinin doğrulama çalışmasına uygulanması 52
Şekil 3.31. k-Ɛ türbülans modellerinin doğrulama çalışmasına uygulanması 52
Şekil 3.32. 3 boyutlu geometride karşıdan görünüm 53
Şekil 3.33. 3 boyutlu geometride üstten görünüm 53
Şekil 3.34. Basınç grafiği çizdirilen konumların gösterilmesi 53
Şekil 3.35. Kayma gerilmesi çizdirilen konumun gösterilmesi 53
Şekil 4.1. Bloklar arası mesafenin değişiminin gösterimi 54
Şekil 4.2. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 55

Şekil 4.3. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 55
Şekil 4.4. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi 56
Şekil 4.5. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 56
Şekil 4.6. 0,635 cm bloklar arası mesafe için basınç grafiği 57
Şekil 4.7. 1,27 cm bloklar arası mesafe için basınç grafiği 57
Şekil 4.8. 1,905 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi 57
Şekil 4.9. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 58
Şekil 4.10. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 58
Şekil 4.11. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 59
Şekil 4.12. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 60
Şekil 4.13. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 61
Şekil 4.14. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 61
Şekil 4.15. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi 61
Şekil 4.16. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 62
Şekil 4.17. 0,635 cm bloklar arası için basınç değişimi 62
Şekil 4.18. 1,27 cm bloklar arası için basınç değişimi 62
Şekil 4.19. 1,905 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi 63
Şekil 4.20. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 64
Şekil 4.21. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 64
Şekil 4.22. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c)1,905 cm bloklar arası mesafe 65
Şekil 4.23. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 66
Şekil 4.24. Re=11993 (V=7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 67
Şekil 4.25. Re=11993 (V=7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 67
Şekil 4.26. Re=11993 (V=7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin değişimi 67
Şekil 4.27. Re=11993 (V=7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 68
Şekil 4.28. 0,635 cm bloklar arası için basınç değişimi 69
Şekil 4.29. 1,27 cm bloklar arası için basınç değişimi 69
Şekil 4.30. 1,905 cm bloklar arası için basınç değişimi 69
Şekil 4.31. Re=11993 (V=7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 70

Şekil 4.32. Re=11993 (V=7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 71
Şekil 4.33. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 71
Şekil 4.34. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 72
Şekil 4.35. 0,635 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 74
Şekil 4.36. 0,635 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 74
Şekil 4.37. 1,27 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 74
Şekil 4.38. 1,27 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 74
Şekil 4.39. 1,905 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 75
Şekil 4.40. 1,905 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 75
Şekil 4.41. Blok boyunun değişiminin gösterimi 76
Şekil 4.42. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 77
Şekil 4.43. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 77
Şekil 4.44. Re=6000 (3,607 m/s) i için kayma gerilmelerinin gösterimi 77
Şekil 4.45. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 78
Şekil 4.46. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi 79
Şekil 4.47. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi 79
Şekil 4.48. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi 79
Şekil 4.49. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 80
Şekil 4.50. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 80
Şekil 4.51. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 81
Şekil 4.52. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 82
Şekil 4.53. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b)1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 83
Şekil 4.54. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 83
Şekil 4.55. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi 84
Şekil 4.56. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 85
Şekil 4.57. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi 85
Şekil 4.58. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi 85
Şekil 4.59. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi 85
Şekil 4.60. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 86
Şekil 4.61. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 87

Şekil 4.62. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 87
Şekil 4.63. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları.....88
Şekil 4.64. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 89
Şekil 4.65. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 89
Şekil 4.66. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi.....90
Şekil 4.67. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 91
Şekil 4.68. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi 91
Şekil 4.69. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi 91
Şekil 4.70. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi 91
Şekil 4.71. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm...92
Şekil 4.72. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri),
c) 1,905 cm blok boyu mesafesi.....93
Şekil 4.73. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 94
Şekil 4.74. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları.....94
Şekil 4.75. 0,635 cm blok boyu için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları.....96
Şekil 4.76. 0,635 cm blok boyu için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 96
Şekil 4.77. 1,27 cm blok boyu için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları.....96
Şekil 4.78. 1,27 cm blok boyu için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 96
Şekil 4.79. 1,905 cm blok boyu için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları.....97
Şekil 4.80. 1,905 cm blok boyu için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 97
Şekil 4.81. Blok yüksekliği değişiminin gösterimi 98
Şekil 4.82. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri),
b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 99
Şekil 4.83. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri),
b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 99
Şekil 4.84. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi.....100
Şekil 4.85. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..101
Şekil 4.86. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....101
Şekil 4.87. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....101
Şekil 4.88. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....101
Şekil 4.89. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..102
Şekil 4.90. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..103
Şekil 4.91. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki
yerel Nusselt sayılarının gösterimi 103
Şekil 4.92. Re=6000 (3,607 m/s) için ortalama Nusselt sayılarının gösterimi 104
Şekil 4.93. Re=9015 (5,42 m/s) hız kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..105
Şekil 4.94. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri),
b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 105
Şekil 4.95. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi.....106

Şekil 4.96. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..107
Şekil 4.97. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....107
Şekil 4.98. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....107
Şekil 4.99. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....108
Şekil 4.100. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..109
Şekil 4.101. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..109
Şekil 4.102. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 110
Şekil 4.103. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları .110
Şekil 4.104. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..111
Şekil 4.105. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri),
b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 112
Şekil 4.106. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi.....112
Şekil 4.107. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği.113
Şekil 4.108. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....113
Şekil 4.109. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....113
Şekil 4.110. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....114
Şekil 4.111. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..115
Şekil 4.112. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği.115
Şekil 4.113. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 116
Şekil 4.114. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları116
Şekil 4.115. 0,635 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 118
Şekil 4.116. 0,635 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları.....118
Şekil 4.117. 1,27 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları.....119
Şekil 4.118. 1,27 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 119
Şekil 4.119. 1,905 cm blok yüksekliği için yerel Nu sayısının değişimi.....119
Şekil 4.120. 1,905 cm blok yüksekliği için ortalama Nu sayısının değişimi.....119
Şekil 4.121. Kanal yüksekliği değişiminin gösterimi 121
Şekil 4.122. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri
a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 122
Şekil 4.123. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri
a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 122
Şekil 4.124. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için kayma
gerilmelerinin gösterimi 123
Şekil 4.125. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri
a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 124
Şekil 4.126. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 124
Şekil 4.127. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 124
Şekil 4.128. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 124
Şekil 4.129. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri
a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 125

Şekil 4.130. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 126
Şekil 4.131. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının gösterimi 126
Şekil 4.132. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısının gösterimi 127
Şekil 4.133. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 128
Şekil 4.134. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 129
Şekil 4.135. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar kayma gerilmelerinin gösterimi 129
Şekil 4.136. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 130
Şekil 4.137. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 130
Şekil 4.138. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 131
Şekil 4.139. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 131
Şekil 4.140. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 131
Şekil 4.141. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans enerji kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 132
Şekil 4.142. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 132
Şekil 4.143. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 133
Şekil 4.144. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 134
Şekil 4.145. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 135
Şekil 4.146. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için kayma gerilmeleri 135
Şekil 4.147. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 136
Şekil 4.148. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 136
Şekil 4.149. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 137
Şekil 4.150. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 137
Şekil 4.151. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 137
Şekil 4.152. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans kinetik enerji kontürleri a)1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 138
Şekil 4.153. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 138
Şekil 4.154. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 139
Şekil 4.155. 1,27 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 141
Şekil 4.156. 1,27 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 141
Şekil 4.157. 1,905 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 141
Şekil 4.158. 1,905 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 141

Şekil 4.159. 2,54 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 142
Şekil 4.160. 2,54 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 142
Şekil 4.161. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 143
Şekil 4.162. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 144
Şekil 4.163. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi 144
Şekil 4.164. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 145
Şekil 4.165. Tu %1 için basınç değişimi 145
Şekil 4.166. Tu % 4 için basınç değişimi 145
Şekil 4.167. Tu % 12 için basınç değişimi 146
Şekil 4.168. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 146
Şekil 4.169. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 147
Şekil 4.170. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 148
Şekil 4.171. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 148
Şekil 4.172. Re=9015 (5,42 m/s) hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 149
Şekil 4.173. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 150
Şekil 4.174. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmeleri değişimi 150
Şekil 4.175. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 151
Şekil 4.176. Tu % 1 için basınç değişimi 151
Şekil 4.177. Tu % 4 için basınç değişimi 151
Şekil 4.178. Tu % 12 için basınç değişimi 151
Şekil 4.179. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 152
Şekil 4.180. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12, ... 153
Şekil 4.181. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 153
Şekil 4.182. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 154
Şekil 4.183. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 155
Şekil 4.184. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 155
Şekil 4.185. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı türbülans şiddetlerinde kayma gerilmeleri 155
Şekil 4.186. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 156
Şekil 4.187. Tu % 1 için basınç değişimi 157
Şekil 4.188. Tu % 4 için basınç değişimi 157
Şekil 4.189. Tu % 12 için basınç değişimi 157
Şekil 4.190. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 158

Şekil 4.191. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 158
Şekil 4.192. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 159
Şekil 4.193. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 160
Şekil 4.194. Tu % 1 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 161
Şekil 4.195. Tu % 1 için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 161
Şekil 4.196. Tu % 4 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 162
Şekil 4.197. Tu % 4 için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 162
Şekil 4.198. Tu % 12 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 163
Şekil 4.199. Tu % 12 için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 163
Şekil 4.200. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 165
Şekil 4.201. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 165
Şekil 4.202. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmesi değerleri 166
Şekil 4.203. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmesi değerleri 166
Şekil 4.204. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 167
Şekil 4.205. α= -2° için basınç değişimi 167
Şekil 4.206. α= 2° için basınç değişimi 167
Şekil 4.207. α= 4° için basınç değişimi 168
Şekil 4.208. α= 6° için basınç değişimi 168
Şekil 4.209. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 169
Şekil 4.210. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 169
Şekil 4.211. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri karşılaştırılması) 171
Şekil 4.212. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Yakınsayan geometri ve baz geometri karşılaştırılması) 171
Şekil 4.213. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri karşılaştırılması) 172
Şekil 4.214. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları
(Yakınsayan geometri ve baz geometri karşılaştırılması) 172
Şekil 4.215. Re=9015 (3,607 m/s) için hız kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 174
Şekil 4.216. Re=9015 (3,607 m/s) için hız çizgileri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 174
Şekil 4.217. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi
(Iraksayan geometriler ve baz geometri) 175
Şekil 4.218. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi
(Yakınsayan geometri ve baz geometri) 175
Şekil 4.219. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 176
Şekil 4.220. α= -2° için basınç değişimi 177
Şekil 4.221. α= 2° için basınç değişimi 177
Şekil 4.222. α= 4° için basınç değişimi 177
Şekil 4.223. α= 6° için basınç değişimi 177

Şekil 4.224. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 178
Şekil 4.225. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 179
Şekil 4.226. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri) 180
Şekil 4.227. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Yakınsayan geometri ve baz geometri) 180
Şekil 4.228. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri) 181
Şekil 4.229. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları
(Yakınsayan geometri ve baz geometri) 181
Şekil 4.230. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 183
Şekil 4.231. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 183
Şekil 4.232. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi
(Iraksayan geometriler ve baz geometri) 184
Şekil 4.233. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi
(Yakınsayan geometri ve baz geometri) 184
Şekil 4.234. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 185
Şekil 4.235. α= -2° için basınç değişimi 186
Şekil 4.236. α= 2° için basınç değişimi 186
Şekil 4.237. α= 4° için basınç değişimi 186
Şekil 4.238. α= 6° için basınç değişimi 186
Şekil 4.239. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 187
Şekil 4.240. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 188
Şekil 4.241. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri) 189
Şekil 4.242. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Yakınsayan geometri ve baz geometri) 189
Şekil 4.243. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri) 190
Şekil 4.244. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları
(Yakınsayan geometri ve baz geometri) 190
Şekil 4.245. α=-2° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 191
Şekil 4.246. α=-2° için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 191
Şekil 4.247. α=2° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 192
Şekil 4.248. α= 2° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 192
Şekil 4.249. α=4° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 192
Şekil 4.250. α= 4° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 192
Şekil 4.251. α=6° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 193
Şekil 4.252. α= 6° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 193
Şekil 4.253. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı 195

Şekil 4.254. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....196
Şekil 4.255. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....196
Şekil 4.256. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi 197
Şekil 4.257. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi.....197
Şekil 4.258. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller
üstteki şekillerin büyütülmüşüdür) a)Bakalit baskı devre kartı
b) FR-4 baskı devre kartı.....197
Şekil 4.259. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....198
Şekil 4.260. Re=6000 (3,607 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzemeleri
için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin
taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları 198
Şekil 4.261. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin
taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları.....199
Şekil 4.262. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....200
Şekil 4.263. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....201
Şekil 4.264. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....201
Şekil 4.265. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi 202
Şekil 4.266. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi.....202
Şekil 4.267. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri
(Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür)
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....202
Şekil 4.268. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....203
Şekil 4.269. Re=9015 (5,42 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzemeleri
için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin
taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları 203
Şekil 4.270. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin
taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları.....204
Şekil 4.271. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....205
Şekil 4.272. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....206
Şekil 4.273. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....207
Şekil 4.274. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi 207
Şekil 4.275. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi.....207
Şekil 4.276. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller
üstteki şekillerin büyütülmüşüdür) a)Bakalit baskı devre kartı
b) FR-4 baskı devre kartı.....208
Şekil 4.277. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....208

Şekil 4.278. Re=11993 (7,21 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları 209
Şekil 4.279. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları 210
Şekil 4.280. Bakalit baskı devre kartı için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 211
Şekil 4.281. Bakalit baskı devre kartı için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 211
Şekil 4.282. FR-4 baskı devre kartı için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 211
Şekil 4.283. FR-4 baskı devre kartı için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları 211
Şekil 4.284. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 213
Şekil 4.285. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 213
Şekil 4.286. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 214
Şekil 4.287. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi 214
Şekil 4.288. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi 214
Şekil 4.289. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür)
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 215
Şekil 4.290. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 215
Şekil 4.291. Re=6000 (3,607 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları 216
Şekil 4.292. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları 217
Şekil 4.293. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 218
Şekil 4.294. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 218
Şekil 4.295. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 219
Şekil 4.296. Bakalit altına bakır sıvama için basınç değişimi 219
Şekil 4.297. FR-4 altına bakır sıvama için basınç değişimi 219
Şekil 4.298. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür)
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 220

Şekil 4.299. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 220
Şekil 4.300. Re=9015 (5,42 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları 221
Şekil 4.301. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 222
Şekil 4.302. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 223
Şekil 4.303. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 223
Şekil 4.304. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 224
Şekil 4.305. Bakalit altına bakır sıvama için basınç değişimi 224
Şekil 4.306. FR-4 altına bakır sıvama için basınç değişimi 224
Şekil 4.307. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür)
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 225
Şekil 4.308. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması
b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 225
Şekil 4.309. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve blok aralarındaki yerel Nusselt sayıları 226
Şekil 4.310. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 227
Şekil 4.311. Bakalit altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi 228
Şekil 4.312. Bakalit altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki ort. Nu sayısının değişimi 228
Şekil 4.313. FR-4 altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi 228
Şekil 4.314. FR-4 altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki ort. Nu sayısının değişimi 228
Şekil 4.315. Baz geometri için blok başına ortalama ısı transfer katsayılarının benzer deneysel sonuçlarla karşılaştırılması 230
Şekil 4.316. Plaka üzerindeki bloklar arası mesafe değişimi 230
Şekil 4.317. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 231
Şekil 4.318. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 232
Şekil 4.319. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi 232

Şekil 4.320. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 233
Şekil 4.321. 0,635 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi 233
Şekil 4.322. 1,27 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi 233
Şekil 4.323. 1,905 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi 233
Şekil 4.324. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 234
Şekil 4.325. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 235
Şekil 4.326. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 235
Şekil 4.327. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 236
Şekil 4.328. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 237
Şekil 4.329. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 237
Şekil 4.330. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi 238
Şekil 4.331. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 238
Şekil 4.332. 0,635 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi 239
Şekil 4.333. 1,27 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi 239
Şekil 4.334. 1,905 bloklar arası mesafe için basınç değişimi 239
Şekil 4.335. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 240
Şekil 4.336. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 240
Şekil 4.337. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 241
Şekil 4.338. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 242
Şekil 4.339. Re=11993 (V=7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 243
Şekil 4.340. Re=11993 (V=7,21 m/s) için 0.0127 m xy düzleminde hız çizgileri 243
Şekil 4.341. Re=11993 (V=7,21 m/s) için 0.0254 m xy düzleminde hız çizgileri 243
Şekil 4.342. Re=11993 (V=7,21 m/s) için 0.03175 m zx ekseninde hız çizgileri 244
Şekil 4.343. Re=11993 (V=7,21 m/s) için 0.0635 m zx ekseninde hız çizgileri 244
Şekil 4.344. Re=11993 (V=7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 244
Şekil 4.345. Re=11993 (V=7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin değişimi 245
Şekil 4.346. Re=11993 (V=7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 245
Şekil 4.347. 0,635 cm bloklar arası için 246
Şekil 4.348. 1,27 cm bloklar arası için basınç değişimi 246
Şekil 4.349. 1,905 cm bloklar arası için basınç değişimi 246
Şekil 4.350. Re=11993 (V=7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 247
Şekil 4.351. Re=11993 (V=7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe 247

Şekil 4.352. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 248
Şekil 4.353. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları.....249
Şekil 4.354. 0,635 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları.....250
Şekil 4.355. 0,635 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 250
Şekil 4.356. 1,27 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları.....251
Şekil 4.357. 1,27 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 251
Şekil 4.358. 1,905 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları....252
Şekil 4.359. 1,905 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 252
Şekil 4.360. Blok boyunun etkisinin incelenmesi.....253
Şekil 4.361. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 253
Şekil 4.362. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 254
Şekil 4.363. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi.....254
Şekil 4.364. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 255
Şekil 4.365. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi 255
Şekil 4.366. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi 255
Şekil 4.367. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi 255
Şekil 4.368. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 256
Şekil 4.369. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri),
c) 1,905 cm blok boyu mesafesi.....257
Şekil 4.370. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 257
Şekil 4.371. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları.....258
Şekil 4.372. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 259
Şekil 4.373. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 259
Şekil 4.374. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi.....260
Şekil 4.375. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 261
Şekil 4.376. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi 261
Şekil 4.377. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi 261
Şekil 4.378. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi 261
Şekil 4.379. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 262
Şekil 4.380. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 263
Şekil 4.381. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 263
Şekil 4.382. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları.....264
Şekil 4.383. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 265
Şekil 4.384. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm,
b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 265
Şekil 4.385. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi.....266

Şekil 4.386. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 267
Şekil 4.387. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi 267
Şekil 4.388. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi 267
Şekil 4.389. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi 267
Şekil 4.390. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 268
Şekil 4.391. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi 269
Şekil 4.392. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 269
Şekil 4.393. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 270
Şekil 4.394. 0,635 cm blok boyunda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 271
Şekil 4.395. 0,635 cm blok boyunda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 271
Şekil 4.396. 1,27 cm blok boyunda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları
Şekil 4.397. 1,27 cm blok boyunda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 272
Şekil 4.398. 1,905 cm blok boyunda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 273
Şekil 4.399. 1,905 cm blok boyunda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 273
Şekil 4.400. Blok yüksekliği değişiminin gösterimi 274
Şekil 4.401. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 274
Şekil 4.402. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 275
Şekil 4.403. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi 275
Şekil 4.404. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 276
Şekil 4.405. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi 276
Şekil 4.406. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi 276
Şekil 4.407. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi 277
Şekil 4.408. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 277
Şekil 4.409. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 278
Şekil 4.410. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayılarının gösterimi 278
Şekil 4.411. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayılarının gösterimi 279
Şekil 4.412. Re=9015 (5,42 m/s) hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 280
Şekil 4.413. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 280
Şekil 4.414. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi 281
Şekil 4.415. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 282
Şekil 4.416. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi 282
Şekil 4.417. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi 282
Şekil 4.418. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi 282

Şekil 4.419. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..283
Şekil 4.420. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..284
Şekil 4.421. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 284
Şekil 4.422. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları .285
Şekil 4.423. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri),
b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 286
Şekil 4.424. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri),
b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği 286
Şekil 4.425. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi.....287
Şekil 4.426. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..288
Şekil 4.427. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....288
Şekil 4.428. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....288
Şekil 4.429. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi.....288
Şekil 4.430. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği..289
Şekil 4.431. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği.289
Şekil 4.432. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 290
Şekil 4.433. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları.....291
Şekil 4.434. 0,635 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki
yerel Nu sayısının değişimi 293
Şekil 4.435. 0,635 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki
ort. Nu sayısının değişimi.....293
Şekil 4.436. 1,27 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları.....293
Şekil 4.437. 1,27 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 293
Şekil 4.438. 1,905 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları.....294
Şekil 4.439. 1,905 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları.....294
Şekil 4.440. Kanal yüksekliğinin değişiminin gösterimi 295
Şekil 4.441. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri
a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği .296
Şekil 4.442. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a)1,27 cm,
b)1,905 cm, c)2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 296
Şekil 4.443. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için
kayma gerilmelerinin gösterimi.....297
Şekil 4.444. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri
a)1,27 cm, b) 1,905 cm,c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği ...298
Şekil 4.445. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 298
Şekil 4.446. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 298
Şekil 4.447. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 298
Şekil 4.448. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri
a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği..299
Şekil 4.449. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans kinetik enerji
kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm,
c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 300

Şekil 4.450. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 300
Şekil 4.451. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayısının gösterimi 301
Şekil 4.452. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 302
Şekil 4.453. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a)1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 302
Şekil 4.454. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar kayma gerilmelerinin gösterimi 303
Şekil 4.455. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a)1,27 cm, b)1,905 cm, c)2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 304
Şekil 4.456. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 304
Şekil 4.457. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 304
Şekil 4.458. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 304
Şekil 4.459. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a)1,27 cm, b)1,905 cm, c)2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 305
Şekil 4.460. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans enerji kontürleri a)1,27 cm, b)1,905 cm, c)2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği ... 306
Şekil 4.461. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 306
Şekil 4.462. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 307
Şekil 4.463. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği . 308
Şekil 4.464. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği. 308
Şekil 4.465. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için kayma gerilmeleri 308
Şekil 4.466. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a)1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği .. 309
Şekil 4.467. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 310
Şekil 4.468. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 310
Şekil 4.469. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi 310
Şekil 4.470. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a)1,27 cm, b)1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 311
Şekil 4.471. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği 311
Şekil 4.472. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 312
Şekil 4.473. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için ort. Nusselt sayıları 312
Şekil 4.474. 1,27 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 314
Şekil 4.475. 1,27 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 314
Şekil 4.476. 1,905 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 314
Şekil 4.477. 1,905 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 314
Şekil 4.478. 2,54 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 315
Şekil 4.479. 2,54 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 315

Şekil 4.480. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 316
Şekil 4.481. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 317
Şekil 4.482. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmeleri gösterimi 317
Şekil 4.483. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 318
Şekil 4.484. Tu % 1 için basınç değişimi 318
Şekil 4.485. Tu % 4 için basınç değişimi 318
Şekil 4.486. Tu % 12 için basınç değişimi 318
Şekil 4.487. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 319
Şekil 4.488. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 320
Şekil 4.489. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 320
Şekil 4.490. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 321
Şekil 4.491. Re=9015 (5,42 m/s) hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 322
Şekil 4.492. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 322
Şekil 4.493. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmeleri değişimi 322
Şekil 4.494. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 323
Şekil 4.495. Tu % 1 için basınç değişimi 324
Şekil 4.496. Tu % 4 için basınç değişimi 324
Şekil 4.497. Tu % 12 için basınç değişimi 324
Şekil 4.498. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 325
Şekil 4.499. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 325
Şekil 4.500. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 326
Şekil 4.501. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 326
Şekil 4.502. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 327
Şekil 4.503. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 328
Şekil 4.504. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı türbülans şiddetlerinde kayma gerilmeleri 328
Şekil 4.505. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c)Tu % 12 329
Şekil 4.506. Tu % 1 için basınç değişimi 329
Şekil 4.507. Tu % 4 için basınç değişimi 329
Şekil 4.508. Tu % 12 için basınç değişimi 329
Şekil 4.509. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 330
Şekil 4.510. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12 331
Şekil 4.511. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 331

Şekil 4.512. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 332
Şekil 4.513. Tu % 1 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 334
Şekil 4.514. Tu % 1 için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 334
Şekil 4.515. Tu % 4 için yerel Nusselt sayıları 334
Şekil 4.516. Tu % 4 için ortalama Nusselt sayıları 334
Şekil 4.517. Tu % 12 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 335
Şekil 4.518. Tu % 12 için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları 335
Şekil 4.519. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 337
Şekil 4.520. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 337
Şekil 4.521. Re=6000 (3,607 m/s) için ıraksayan açılarda ve baz geometride
kayma gerilmesi değerleri 338
Şekil 4.522. Re=6000 (3,607 m/s) için yakınsayan açıda ve baz geometride
kayma gerilmesi değerleri 338
Şekil 4.523. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 339
Şekil 4.524. α= -2° için basınç değişimi 339
Şekil 4.525. α= 2° için basınç değişimi 339
Şekil 4.526. α= 4° için basınç değişimi 340
Şekil 4.527. α= 6° için basınç değişimi 340
Şekil 4.528. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 341
Şekil 4.529. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 341
Şekil 4.530. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri karşılaştırılması) 342
Şekil 4.531. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Yakınsayan geometri ve baz geometri karşılaştırılması) 343
Şekil 4.532. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları
(Yakınsayan, ıraksayan geometriler ve baz geometri karşılaştırılması) 343
Şekil 4.533. Re=9015 (3,607 m/s) için hız kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 345
Şekil 4.534. Re=9015 (3,607 m/s) için hız çizgileri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 345
Şekil 4.535. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi
(Iraksayan geometriler ve baz geometri) 346
Şekil 4.536. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi
(Yakınsayan geometri ve baz geometri) 346
Şekil 4.537. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 347
Şekil 4.538. α= -2° için basınç değişimi 348
Şekil 4.539. α= 2° için basınç değişimi 348
Şekil 4.540. α= 4° için basınç değişimi 348
Şekil 4.541. α= 6° için basınç değişimi 348
Şekil 4.542. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° 349

Şekil 4.543. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°.....349
Şekil 4.544. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri).....350
Şekil 4.545. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Yakınsayan geometri ve baz geometri).....351
Şekil 4.546. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları .351
Şekil 4.547. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°.....353
Şekil 4.548. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°.....353
Şekil 4.549. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi
(Iraksayan geometriler ve baz geometri).....354
Şekil 4.550. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi
(Yakınsayan geometri ve baz geometri).....354
Şekil 4.551. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°.....355
Şekil 4.552. α= -2° için basınç değişimi 356
Şekil 4.553. α= 2° için basınç değişimi.....356
Şekil 4.554. α= 4° için basınç değişimi.....356
Şekil 4.555. α= 6° için basınç değişimi.....356
Şekil 4.556. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), α=2°, d) α=4°, e) α=6°.....357
Şekil 4.557. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°.....358
Şekil 4.558. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri).....359
Şekil 4.559. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları
(Yakınsayan geometri ve baz geometri).....359
Şekil 4.560. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları
(Iraksayan geometriler ve baz geometri).....360
Şekil 4.561. α=-2° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 362
Şekil 4.562. α=-2° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları.....362
Şekil 4.563. α=2° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 362
Şekil 4.564. α= 2° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 362
Şekil 4.565. α=4° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 363
Şekil 4.566. α= 4° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 363
Şekil 4.567. α=6° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları 363
Şekil 4.568. α= 6° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları 363
Şekil 4.569. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....365
Şekil 4.570. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı.....365
Şekil 4.571. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı baskı devre kartı malzemesi için
kayma gerilmeleri.....365
Şekil 4.572. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı..... 366
Şekil 4.573. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi 366

Şekil 4.574. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi....366
Şekil 4.575. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....367
Şekil 4.576. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....367
Şekil 4.577. Re=6000 (3,607 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzeme cinsleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları....368
Şekil 4.578. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları....369
Şekil 4.579. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....370
Şekil 4.580. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....370
Şekil 4.581. Re=9015 (5,42 m/s)'de farklı baskı devre kartı malzemesi için kayma gerilmeleri....371
Şekil 4.582. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....371
Şekil 4.583. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi....372
Şekil 4.584. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi....372
Şekil 4.585. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....372
Şekil 4.586. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....373
Şekil 4.587. Re=9015 (5,42 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzeme cinsleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları....373
Şekil 4.588. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları....374
Şekil 4.589. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....375
Şekil 4.590. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri
a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....376
Şekil 4.591. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı baskı devre kartı malzemesi için kayma gerilmeleri....376
Şekil 4.592. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....377
Şekil 4.593. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi....377
Şekil 4.594. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi....377
Şekil 4.595. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....378
Şekil 4.596. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri
a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı....378
Şekil 4.597. Re=11993 (7,21 m/s) 'de baskı devre kartının farklı malzeme cinsleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları....379
Şekil 4.598. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları....380

Şekil 4.599. Bakalit baskı devre kartının bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının farklı hızlardaki yerel Nu sayıları 381
Şekil 4.600. Bakalit baskı devre kartının bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının farklı hızlardaki ort. Nu sayıları 381
Şekil 4.601. FR-4 baskı devre kartının bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının farklı hızlardaki yerel Nu sayıları 382
Şekil 4.602. FR-4 baskı devre kartının bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının farklı hızlardaki ort. Nu sayıları 382
Şekil 4.603. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 383
Şekil 4.604. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 384
Şekil 4.605. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama için kayma gerilmeleri 384
Şekil 4.606. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 385
Şekil 4.607. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi 385
Şekil 4.608. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi 385
Şekil 4.609. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 386
Şekil 4.610. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 386
Şekil 4.611. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları 387
Şekil 4.612. Re=6000 (3,607 m/s) için bakır sıvama durumunda bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları 388
Şekil 4.613. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 389
Şekil 4.614. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 389
Şekil 4.615. Re=9015 (5,42 m/s)'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama için kayma gerilmeleri 389
Şekil 4.616. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 390
Şekil 4.617. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi 390
Şekil 4.618. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi 390
Şekil 4.619. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 391

Şekil 4.620. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 391
Şekil 4.621. Re=9015 (5,42 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları 392
Şekil 4.622. Re=9015 (5,42 m/s) için bakır sıvama durumunda bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları 393
Şekil 4.623. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 394
Şekil 4.624. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 394
Şekil 4.625. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama için kayma gerilmeleri 394
Şekil 4.626. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 395
Şekil 4.627. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi 395
Şekil 4.628. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi 395
Şekil 4.629. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 396
Şekil 4.630. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması 397
Şekil 4.631. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları 397
Şekil 4.632. Re=11993 (7,21 m/s) için bakır sıvama durumunda bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları 398
Şekil 4.633. Bakalit altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 400
Şekil 4.634. Bakalit altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 400
Şekil 4.635. FR-4 altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları 401
Şekil 4.636. FR-4 altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları 401
Şekil 4.637. Baz geometri için blok başına ortalama ısı transfer katsayılarının benzer deneysel sonuçlarla karşılaştırılması 402

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Sınır şartları 40
Çizelge 3.2. Eşlenik ısı transferi sınır şartları 41
Çizelge 3.3. 2 boyutlu analizlerde baz geometrideki eleman sayıları 44
Çizelge 3.4. 3 boyutlu analizlerde baz geometrideki eleman sayıları 45
Çizelge 3.5. 2 boyutlu analizler de hız U=7,21 m/s için y^+ değerleri 47
Çizelge 3.6. 3 boyutlu analizler de hız U=7,21 m/s için y^+ değerleri 48
Çizelge 3.7. 2 boyutlu analizlerde her bir parametre için ayarlanan yakınsama kriteri 49
Çizelge 3.8. 3 boyutlu analizlerde her bir parametre için ayarlanan yakınsama kriteri 49
Çizelge 4.1. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar arası mesafe ile bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayısının değişimi 60
Çizelge 4.2. Re=9015 (5,42 m/s) için dört bloğun ortalama Nusselt sayıları 66
Çizelge 4.3. Re=11993 (7,21 m/s) için dört bloğun ortalama Nusselt sayıları 72
Çizelge 4.4. Farklı hızlarda ve geometrilerde yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırması 73
Çizelge 4.5. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm blokların ortalama Nusselt sayıları 82
Çizelge 4.6. Re=9015 (5,42 m/s) için dört bloğun ortalama Nusselt sayıları 88
Çizelge 4.7. Re=11993 (7,21 m/s) için blokların ortalama Nusselt sayıları 95
Çizelge 4.8. Farklı hızlarda ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 95
Çizelge 4.9. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayılarının gösterimi 104
Çizelge 4.10. Re=9015 (5,42 m/s) için blokların ortalama Nusselt sayıları 111
Çizelge 4.11. Re=11993 (7,21 m/s) tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları 117
Çizelge 4.12. Farklı hız ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 117
Çizelge 4.13. Re sayısına göre kanal yüksekliğinin değişimiyle belirlenen hızlar 121
Çizelge 4.14. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayısının gösterimi 127
Çizelge 4.15. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları 133
Çizelge 4.16. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları 139
Çizelge 4.17. Farklı kanal yüksekliği ve hızlarda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 140
Çizelge 4.18. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 149
Çizelge 4.19. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 154
Çizelge 4.20. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 160
Çizelge 4.21. Tüm türbülans şiddetlerinde ve tüm hızlarda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 161
Çizelge 4.22. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 172
Çizelge 4.23. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 182
Çizelge 4.24. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 191

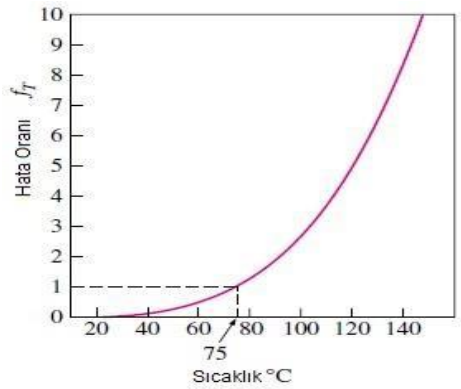
Çizelge 4.25. Farklı açılarda farklı hızların yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 194
Çizelge 4.26. Re=6000 (3,607 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlarda tüm yongaların ortalama Nu sayıları 200
Çizelge 4.27. Re=9015 (5,42 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlarda tüm blokların ortalama Nusselt sayıları 205
Çizelge 4.28. Re=11993 (7,21 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlarda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 210
Çizelge 4.29. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı baskı devre kartı malzemesi altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 217
Çizelge 4.30. Re=9015 (5,42 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 222
Çizelge 4.31. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 227
Çizelge 4.32. Baz geometri ve deneysel çalışma için geometrik faktörler 230
Çizelge 4.33. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar arası mesafe değişimi ile tüm blokların ortalama Nusselt sayısı 236
Çizelge 4.34. Re=9015 (5,42 m/s)) için bloklar arası mesafe değişimi ile tüm blokların ortalama Nusselt sayıları 242
Çizelge 4.35. Re=11993 (7,21 m/s)) için bloklar arası mesafe değişimi ile tüm blokların ortalama Nusselt sayıları 249
Çizelge 4.36. Farklı hızlarda ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırması 249
Çizelge 4.37. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 258
Çizelge 4.38. Re=9015 (5,42 m/s) için her dört yonganın ort. Nusselt sayıları 264
Çizelge 4.39. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 270
Çizelge 4.40. Farklı hızlarda ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 271
Çizelge 4.41. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 279
Çizelge 4.42. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 285
Çizelge 4.43. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 291
Çizelge 4.44. Farklı hız ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 292
Çizelge 4.45. Re sayısına göre kanal yüksekliğinin değişimiyle belirlenen hızlar 295
Çizelge 4.46. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları 301
Çizelge 4.47. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayısının gösterimi 307
Çizelge 4.48. Re=11993 (7,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayısının gösterimi 313
Çizelge 4.49. Farklı kanal yüksekliği ve hızlarda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 313
Çizelge 4.50. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 321
Çizelge 4.51. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 327
Çizelge 4.52. Re=11993 (7,42 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 332

Çizelge 4.53. Tüm türbülans şiddetlerinde ve tüm hızlarda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 333
Çizelge 4.54. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 344
Çizelge 4.55. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 352
Çizelge 4.56. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayıları 360
Çizelge 4.57. Farklı açılarda farklı hızların yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 361
Çizelge 4.58. Re=6000 (3,607 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlardatüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 369
Çizelge 4.59. Re=9015 (5,42 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlarda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 375
Çizelge 4.60. Re=11993 (7,21 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlar için tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 380
Çizelge 4.61. Farklı malzemeler için farklı hızların yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 381
Çizelge 4.62. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 388
Çizelge 4.63. Re=9015 (5,42 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 393
Çizelge 4.64. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması 398
Çizelge 4.65. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması 399
Çizelge 4.66. Baz geometri ve deneysel çalışma için geometrik faktörler 402
Çizelge 5.1. Tüm çalışmalarda elde edilen ortalama Nusselt sayıları (s: Bloklar arası mesafe, w: Blok boyu, h: Blok yüksekliği, H: Kanal yüksekliği, Tu: Türbülans şiddeti α:Açı) 406

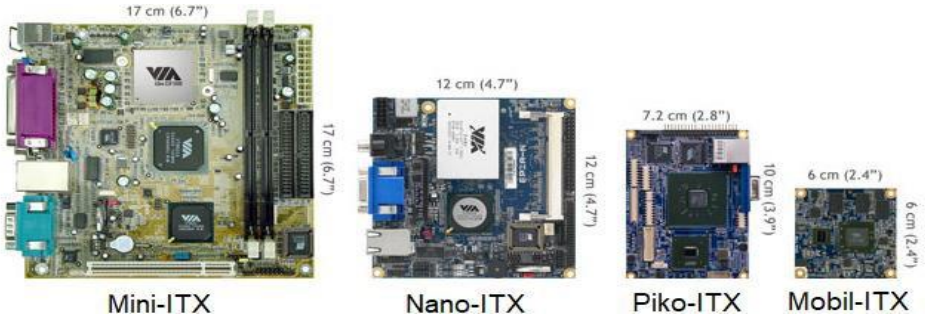
1. GİRİŞ

Elektronik alanındaki gelişmeler günlük hayatımızı doğrudan ve dolaylı olarak etkilemektedir. Geliştirilen bu sistemlerin uygulama alanlarının çokluğu onların daha kusursuz bir şekilde çalışmasını zorunlu kılmaktadır. Bu gereksinim beraberinde kompakt tasarımı zorunlu kılarken; artan performans ihtiyacı kompakt tasarıma bağlı olarak birim alandaki ısı üretiminde belirgin bir artışa neden olmaktadır. Bu nedenle cihazların tasarımında ortaya çıkan ısının kontrol edilebilmesi, sistem elemanlarının daha randımanlı çalışabilmesi için oldukça önemlidir.

Entegre devre elemanlarının sıcaklıkları mümkün olan en düşük seviyede tutulurken, sistem içerisinde eşit sıcaklık dağılımı sağlanmalıdır. Elektronik cihazların hata oranı sıcaklık arttıkça artmaktadır. Aşırı sıcaklık artışından kaynaklanan termomekanik gerilmeler, lehim bağlantılarında kırılma, düşük sıcaklıklarda çalışması gereken malzemelerde erime ya da yanma gibi arızalara neden olabilir. Ayrıca, aşırı ısınmanın sonucu olarak, yarı iletken malzemelerde işlevsel düzensizlikler meydana gelebilir (Bar-Cohen, Watwe ve Prasher, 2007). Bu yüzden yüksek çalışma sıcaklıklarında meydana gelebilecek performans azalmasını önlemek için etkin soğutmanın ve ısıl yönetimin sağlanması, sistemin sürekli ve güvenilir şekilde çalışması açısından oldukça önemlidir. Bu ihtiyaç soğutma sistemlerinin geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Şekil 1.1'de elektronik soğutmanın sıcaklık değişimine bağlı olarak ortaya çıkan hata oranına yer verilmektedir.



Şekil 1.1. Elektronik cihazlarda meydana gelen hataların sıcaklık ile değişimi (Çengel, 2010).

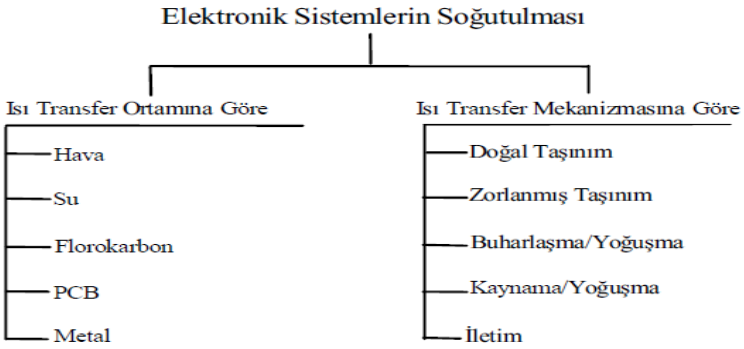


Şekil 1.2. ITX anakartların zaman içerisindeki boyutlarındaki değişim (Sarper, 2018).

Şekil 1.2'de çeşitli elektronik mekanizmalarda kullanılan ITX (information technology extended) anakartaların yıllar içerisinde boyutlarında meydana gelen değişime yer verilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere anakart boyutları zamanla hemen hemen üçte iki oranında küçülme sağlamıştır. Küçülen boyutlar beraberinde birim hacimdeki ısıyı artırmaktadır ve artan ısı ile birlikte Şekil 1.1'de görüldüğü üzere hata oranı artmaktadır. Bu durumda yapılabilecek iyileştirme ısı kaynağından ısıyı alıp daha düşük sıcaklıktaki diğer bir kaynağa (çevreye) atmaktır (Sarper, 2018).

1.1. Elektronik Sistemlerin Soğutulması ve Isıl Tasarımı

Ana devre kartları üzerine yerleştirilen silikon çiplerin soğutulması için farklı soğutma yöntemleri ve soğutucu akışkanlar kullanılabilir. Şekil 1.3'de ısı transfer ortamına ve ısı transfer mekanizmasına göre elektronik cihazların soğutma yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Elektronik cihazların soğutulması (Etemoğlu ve diğerleri, 2004).

Elektronik sistemlerin ısıl açıdan kontrol altında tutulmak istenmesinin hedefi, bileşenlerin sıcaklığını belirlenen sınırlar içerisinde tutabilmektir. Çalışma sıcaklığının limitleri aşması, performansın azalmasına ve sistemsel hataların oluşmasına sebep olur. İstenmeyen bu çalışma ortamının oluşmasını önlemek için sistemin yapısına ve işlevine uygun bir soğutma metodu kullanılmalıdır. Genel olarak, mikroelektronik elemanların yüzey sıcaklıklarının 50-100°C arasında olması kart üzerindeki üniformluğu ve güvenirliği sağlamaktadır (Sözbir, Sözbir, Ekmekçi, Saraç ve Çallı, 1997).

Doğal taşınımla ısı transferi, pek çok alanda uygulaması olan bir transfer çeşididir. Dolayısıyla özellikle kapalı ortamlarda ısıl konforun sağlanmasında, elektronik cihazların soğutulmasında, güneş enerjisi sistemleri gibi alanlarda doğal taşınımla ısı transferinden faydalanılmaktadır (Şahin, 2009). Bu ısı transfer mekanizması, ısı üreten devre elemanlarında, yoğunluk farkı nedeniyle oluşan kaldırma kuvvetinin akışkanı hareketlendirmesi ve bu doğal hareket sonucunda akışkanın tahliye edilmesi esasına dayanır. Akışkan hareketi için ek bir donanım gerektirmemesi ve gürültü oluşturmaması, ilgili mekanizmanın tüketici elektroniğine yönelik cihazların soğutma sistemlerinde tercih edilmesinin en önemli sebeplerindendir. Yüksek miktarda ısı üreten devre elemanlarının bulunduğu sistemlerde ise zorlanmış taşınımla soğutma yöntemi tercih edilmektedir. Yüksek ısı üreten devre elemanlarının soğutulabilmesi için yüksek akışkan hızlarına ihtiyaç duyulduğundan doğal taşınıma göre ısı transfer katsayısı daha yüksek olan zorlanmış taşınım tercih edilir. Fakat, zorlanmış taşınımla soğutma sistemlerinde ekipman ihtiyacından dolayı titreşim ve gürültü gibi sıkıntılar meydana gelmektedir (Sarper, 2018).

Yonga, silikonun bir dikdörtgen dilimi olup, elektronik devre içermektedir. Soğutulacak sistem tek bir yongadan (chip) oluşabileceği gibi birden fazla yongadan da oluşabilir. Her iki durumda da yonga veya yongalar baskı devre kartı üzerine, baskı devre ile aynı hizada olacak şekilde ya da baskı devre üzerinde çıkıntı oluşturacak şekilde monte edilebilirler. Buradan hareketle, gerçek sisteme benzer olarak, fiziksel sistemdeki yongaları simüle eden bloklar, düzlem levha üzerinde modellenebilirler. Böylece birer ısı kaynağı olan ve levhalardan biri üzerine monte edilmiş bloklar için, iki paralel levha arasındaki akış halinde ısı transferi analizi yapılabilir. Bloklarda ve blokların monte edildiği levhada

iletimle olan ısı transferi de dikkate alınacaksa, analizde bu etkinin de ilave edilmesi gerekmekte ve o zaman bu özel ısı transferi analizi "eşlenik (conjugate)" ısı transferi analizi olarak adlandırılmaktadır. Çünkü bloklarda üretilen ısının bir bölümü, taşınım yanında iletimle çekilmektedir. Birinci durumda ısıtılmış bloklardan olan ısı kaybı sadece soğutucu akışkana taşınımla olmakta, ancak eşlenik durumda monte edildiği levhaya iletim ile de olmaktadır. Bu nedenle elektronik devreler tasarlanırken devrelerle birlikte, bu devrelerin yapıldığı malzemeler ve monte edildiği plakaların yapıldığı malzemeler de önem kazanmaktadır. Böylece daha önce elektronik imalatında kullanılmayan malzeme ve metotlar elektronik sistemlerin soğutulmaları önem kazandıkça birer birer bu sahaya girmektedir (Etemoğlu, İşman, Pulat ve Can, 2004).

Bu amaçla bu tez çalışmasında öncelikle literatürdeki durumu tespit etmek maksadıyla konu üzerine kuramsal ve deneysel araştırmalar hakkında literatür taraması yapılmıştır. Devamında materyal ve yöntem başlığı altında çalışma kapsamında kullanılacak olan yöntemler ve denklemlere yer verilmiştir. Bulgular ve tartışma başlığı altında ise çalışma kapsamında elde edilen bulgulara ve bulguların literatürden hareketle karşılaştırılması yapılmıştır. Son olarak sonuç başlığı altında ise bulguların genellenerek konuya ilişkin önerilerin geliştirilmesi suretiyle çalışma nihayete erdirilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, literatürdeki gömülü ve yüzeyden çıkıntılı ısı kaynaklarında yapılan çalışmalara kronolojik olarak yer verilmiştir.

Choi ve Ortega (1993), tek yüzeyine ayrık ısı kaynağı yerleştirilen eğimli bir kanalda karma taşınımı nümerik olarak incelemişlerdir. Isıtıcı eleman yalıtılmış yüzeye gömülü olup kanalın diğer yüzeyi sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Reynolds (Re) sayısı arttıkça, kanal eğim açısının, Nusselt (Nu) sayısının ve ısıtıcı eleman maksimum sıcaklığının üzerindeki etkisinin azaldığı ve yok olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek Grashof sayılarında ve düşük Reynolds sayılarında Nusselt sayısının arttığını incelemişlerdir.

Yücel, Hasnaoui, Robillard ve Bilgen (1993), üç adet ısıtıcı elemanın eşit aralıklarla yalıtılmış yüzeye gömülmüş eğimli bir kanal içerisinde laminer akışta, karışık konveksiyonla olan ısı transferini nümerik olarak incelemişlerdir. Kanalın diğer yüzeyi ise uniform olarak soğutulmaktadır. Nusselt sayısının ve ısıtıcı eleman sıcaklığının değişimini incelemek için Reynolds ve Rayleigh sayılarını, farklı ısıtıcı eleman uzunluklarını, kanal eğim açılarını ve kanal genişliklerini değiştirmişlerdir. Isı transferindeki doğal konveksiyonun etkinliğinin artmasında Re sayısının azalması ve Rayleigh sayısının artmasının etkin olduğu görülmüştür. Kanal genişliği değişmediğinde, ısıtıcı eleman uzunlukları arttırıldığında ortalama Nusselt sayısının önce artan bir eğilim gösterip en tepe noktaya çıktıktan sonra azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

Poulikakos ve Wietrzak (1994), yaptıkları nümerik çalışmalarında sıkıştırılamaz bir akış için analizlerini 2 boyutlu ve k-ε türbülans modelini kullanarak yapmışlardır. Konjugate (eşlenik) ısı transferi incelenerek sıcaklık dağılımları üzerinde durulmuştur.

Türkoğlu ve Yücel (1995), bir yüzeyine ısıtıcı eleman gömülmüş dikey bir kanalda, karışık konveksiyonla olan ısı transferini ve akışkan akışını incelemişlerdir. Soğutucu akışkan olarak hava kullanılmıştır. Kanal genişliğinin, ısıtıcı elemanın konumunun, Grashof sayısının ve Reynolds sayısının, ortalama Nusselt sayısına ve ısıtıcı eleman sıcaklığına etkilerini incelenmiştir. Dar kanallarda, yüksek Reynolds sayılarında daha

etkin soğutma sağlanabildiğini ve ısı kaynağının konumunun ısı transferi üzerindeki etkisinin az olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca düşük Reynolds sayılarında kanal genişliğinin artmasıyla daha etkin soğutma gerçekleştirildiğini gözlemlemişlerdir. Ancak yüksek Reynolds sayılarında dar kanallarda daha etkili soğutma elde edildiğini ortaya koymuşlardır.

Barton (1997), bir geri basamak akışında giriş etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Akış laminer, iki boyutlu, sürekli rejimde, sıkıştırılamaz kabul edilmiştir. Hesaplamalarda SIMPLE yöntemi, QUICK algoritması kullanılmıştır. Giriş kısmı uzun tutulduğunda deneysel verilerden alınan sonuçlarla daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Pulat (1997), çalışmasında paralel iki levhadan alttaki üzerine monte edilen ve blok ve bloklar üzerinden olan akış ve ısı transferi inceleyerek ve hız ve sıcaklık dağılımları hakkında bilgi vermişlerdir. Tek bloklu durumda akışkanın cinsi su olup çok bloklu durumda akışkan hava alınmıştır. Hem laminer, hem türbülanslı durumlar farklı Re sayılarında incelenmiştir. Türbülanslı akışta Re sayısı artınca yeniden birleşme uzunluğunun azaldığını gözlemlemiştir. Laminer akışta ise Re sayısının artmasıyla yeniden birleşme uzunluğunun arttığını tespit etmiştir.

Chen ve Wang (1998), ardışık olarak ısıtılan 2 adet bloğun monte edildiği yatay bir kanalda zorlanmış akışı deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, blok aralıkları 2, 4, 6, 8, 12, 16 ve 22 olarak ve Reynolds sayıları 1300 ve 10^4 olarak alınmıştır. İncelenen sonuçlar Laminer durumda Sherwood sayısının monoton olarak arttığını veya azaldığını göstermektedir. Sherwood sayısındaki keskin artışın türbülanslı durumda bulunabileceğini ortaya koymuşlardır. Laminer durumda ve türbülanslı durumdaki blokların ön ve üst yüzeylerinde Nu sayısı dağılımları için nümerik ve deneysel sonuçların birbiri ile uyum halinde olduğu gözlemlenmiştir. Blok aralığının yerel ısı transferine etkisinin türbülanslı durumda önemli olduğuna dikkat çekmişlerdir.

Meinders, Van Der Meer ve Hanjalic (1998), birden fazla ısı yayan bloğun soğutulması üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Reynolds sayısının artmasıyla blokların özellikle üst yüzeyinde akış ayrılmalarının meydana geldiğini ve akışın düzensiz bir yapıda

olduğunu ve düşük Reynolds sayılarında akışın doğal taşınım gibi davrandığını gözlemlemişlerdir.

Xu, Tou ve Tso (1998), bir yüzeyinde ayrık ısı kaynakları bulunan iki paralel levha arasındaki zorlanmış taşınımı nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada akışkan olarak FC-72 ve su kullanılmış olup, kanal genişliğinin ısı kaynağının uzunluğuna (blok boyu) oranı ve ısı kaynağının (blok) yerleşiminin ısı transferi üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Isı kaynağı boyunca yüzey sıcaklığının arttığını, kanal yüksekliğinin daha az olduğu durumda kanalda ısı transferinin daha fazla olduğunu, kanal genişliğinin ısı kaynağının uzunluğuna (blok boyu) oranı arttıkça ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Meinders ve Hanjalić (1999) düzlemsel bir levhada alt kısıma yüzeyden çıkıntılı olacak şekilde monte edilen 25 adet ayrık ısıtıcıdan olan ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Kızılötesi termografi, yerel ısı transfer katsayısının dağılımının olduğu küp duvarlarındaki yüzey sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. Hız alanı ve yapısı, Lazer Doppler Anemometri (LDA) aracılığıyla yapılmıştır. Çalışma, akışın yalnızca küpün hemen yakınında belirgin bir girdap yapısına sahip olduğunu göstermiş olup küp ve akış yönündeki koridorlarda, yüksek düzeyde türbülans yoğunluğu olduğu gözlemlenmiştir. Üst ve yan kenarlarda akış ayrımı fark edilmiş olup akış devirdaimlerinin bu yüzlerde akışın yeniden birleşmesine sebep olduğu görülmüştür.

Leung, Chen ve Chan (2000), yatay iki paralel levha arasında laminer zorlanmış akışta baskı devre kartı üzerine monte edilen 2 adet yongadan olan ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Levhanın üst yüzeyi yalıtılmıştır. Alt yüzeyine ise mikroelektronik sistemi simule eden 2 adet yonga yerleştirilmiştir. Çalışmada yongaların boyutları ve yongalar arasındaki mesafenin ısı transferine etkisi incelenmiştir. Yongaların boyu arttıkça ısı transferinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Pulat (2000), iki paralel levhadan alttaki levha üzerine ayrık olarak yüzeyle aynı hizada monte edilmiş yongalardan olan ısı transferini incelemiştir. Akış 2 boyutlu ve türbülanslıdır, akışkan olarak hava alınmıştır. Türbülans modeli olarak k-Ɛ kullanılmıştır.

Akışkan özellik değişiminin, kaldırma kuvveti etkilerinin ve giriş türbülans şiddetinin değişiminin ısı transferine olan etkileri incelenmiştir. Giriş türbülans şiddetinin etkilerinin akışkan özellik değişimlerinde göze çarptığı gözlemlenmiştir.

Pulat, Öge ve Karagöz (2000), yatay paralel iki levhadan alt levhaya monte edilen bir adet blok üzerinden olan akış ve ısı transferini 3 boyutlu olarak incelemişlerdir. Çalışma laminer akış şartlarında incelenmiş olup Re sayısı kanal yüksekliğine göre hesaplanmıştır. Farklı akışkan giriş sıcaklıklarında incelemeler yapılmış olup akışkan sudur. Çalışmada farklı özellikteki hız ve sıcaklık kontörleri karşılaştırılmıştır. Re değerinin artmasının yeniden birleşme uzunluğunu artırdığı gözlemlenmiştir. 2B (2 boyutlu) analizlerde bu değerin deneysel çalışmadan biraz yüksek olmasıyla beraber 3B (3 boyutlu) analizlerde bu değerin deneysel çalışmada elde edilen değerin daha altında fakat deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu gözlemlemişlerdir.

Chen, Liu, Chan, Leung ve Chan (2001), paralel iki levhadan alttaki üzerinde beş adet ısı kaynağı bulunan bir elektronik devrede ısı kaynaklarının yerleşiminin soğutma performansını nasıl etkilediğini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyleri farklı Reynolds sayıları için yapmışlardır. En iyi ısı transferi için en uygun ısı kaynağı yerleşiminin son iki kaynağın yer değiştirmediği diğer kaynakların ise eşit aralıklarla yerleştiği durumda olduğu gözlemlenmiştir.

Iaccarino, Ooi, Durbin ve Behnia'nın (2002) çalışmalarında alt levhasında engeller bulunan yatay bir kanalda ısıl sınır koşullarının ısı transferine olan etkisi nümerik olarak araştırılmıştır. Araştırma türbülanslı akış için yapılmıştır. Nümerik analizlerini Fluent yazılımı aracılığıyla RANS (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes Denklemleri) türbülans modelini ve SIMPLE algoritmasını kullanarak yapmışlardır. 3 faklı araştırmanın ilkinde sadece alt duvar kısmından ısı akısı uygulanmıştır. İkincisinde tüm duvarlardan ayrıca buna ek olarak yonga altından da ısı akısı uygulanmıştır. Üçüncü durumda da yongaların her yüzeyine ve alt duvara ısı akısı uygulanmıştır. Nu sayısının çeşitli korelasyonlarda değişimi incelenmiştir.

Etemoğlu ve diğerleri (2004), iki paralel levhadan alttaki levha üzerine monte edilmiş tek bir blok üzerinden akış ve sıcaklık dağılımını hesaplamalı olarak analiz edip blok üzerindeki yerel ısı transfer katsayısını hesaplamışlardır. Hesaplamalarını hem laminer hem de türbülanslı akış durumlarında yapmışlardır. Geometrik faktörler sabit tutulmuş ve sabit ısı akısı verilmiştir. Sonuç olarak Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığını ve maksimum sıcaklığın bloğun arka yüzünün dibinde oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

İşman (2005), elektronik kartı simule eden yatay bir levhada üst levhaya dik olarak çarpan hava jetinin soğutmaya olan etkilerini araştırmıştır. Levhanın alt yüzeyi sabit ısı akısıyla ısıtılmaktadır. Akış 2 boyutlu ve türbülanslı olarak kabul edilmiş olup analizlerde k-Ɛ türbülans modeli kullanılmıştır. Akışkan olarak hava kullanılmış olup farklı Re sayılarında analizler yapılmıştır. Tekli jet yerine çoklu jet kullanmanın Nu sayısını ve ortalama ısı taşınım katsayısını % 21 arttırdığını, dolayısıyla ısı transferinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Mathews ve Balaji (2006), türbülanslı akış için, 2 boyutlu düşey bir kanalda, karşılıklı her iki yüzeyinde de gömülü ısıtıcı bulunan karma taşınımı k-Ɛ türbülans modelini kullanarak sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada Reynolds sayısının, duvarın ısı iletim katsayısının, ısı kaynaklarının iletim katsayısının, düzeltilmiş Richardson sayısının ve kanalın en/boy oranının etkileri ele alınmıştır.

Korichi ve Oufer (2007), alt ve üst tarafında ısıtılmış bloklardan oluşan bir dikdörtgen kanalda, laminer akış şartlarında, Re (3 farklı hızda) ve Nu sayısının değişiminin akış üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Re 50 ve Re 500 sayılarında sürekli ve kararlı bir akış saptanmış, Re sayısının artmasıyla (Re 1000) akışın kararsız yapısının olduğu ve vortekslerin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Dur (2007), çalışmasında çiplerdeki ısı iletimini 2 ve 3 boyutlu incelemiştir. Çalışmasında silikon çipin üzerinde altın ve bakır kaplama kullanmıştır. Malzemelerin kalınlıkları değiştirilerek sıcaklık, deformasyon, gerilme ve gerinme üzerine etkileri incelenmiştir. Silikon malzemenin kalınlığının artması ile maksimum sıcaklığın arttığı, üst yüzey

malzemesi olarak altın yerine bakır kullanıldığında ise elde edilen maksimum sıcaklıkların hemen hemen aynı olduğunu saptamıştır. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Ratnam ve Vengadesan (2008), baskı devre kartı üzerine monte edilen bir adet mikroelektronik çipten olan akış ve ısı transferini incelemişlerdir. Hesaplamalı kısımlar için Fluent kullanılmıştır. Akış 3 boyutlu ve sıkıştırılamaz olarak alınmıştır. Hesaplamalarda k-Ɛ ve k-ω türbülans modelleri ve SIMPLE algoritması kullanılmıştır. En iyi sonucun k-ω türbülans modelinde elde edildiği görülmüştür. Oluşan maksimum ısı transfer katsayısının yeniden birleşme noktasının yakınında minimumunun ise devirdaim bölgesinde olduğu görülmüştür.

Elsaadawy, Mortazavi ve Hamed (2008), çalışmalarında paralel iki levha arasından alt kısımdakine yerleştirilen 6 adet ribden oluşan ısı transferini incelemişlerdir. 2 boyutlu incelenen analizde çalışmalar ANSYS CFD kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada standart k-Ɛ, SST k-ω ve Reynolds stress türbülans modelleri kullanılmış olup, algoritma olarak SIMPLE tercih edilmiştir. Yakınsama şartı 10^{-6} olarak alınmıştır. Çalışmada farklı türbülans modellerinde hız ve sıcaklık kontörleri karşılaştırılmıştır. SST k-ω türbülans modelinin deneysel datalarla en uyumlu sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

Yemenici (2010), yaptığı tez çalışmasında düz ve bloklu yüzeylerden olan akış ve ısı transferini akış tipine ve blok geometrisine bağlı olarak araştırmıştır. Deneysel çalışmalar düz ve bloklu yüzeyler için 3, 5, 10, 15 m/s hız değerlerinde yapılmıştır. Ayrıca blok yüksekliğinin ve Re sayısının da akış ve ısı transferi üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışma laminer, geçiş ve türbülanslı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Chatterjee ve Mondal (2012), yaptığı çalışmalarında doğal ve zorlanmış taşınımla iki eşit izotermal kare silindir etrafındaki akış ve ısı transferini 2 boyutlu olarak incelemişlerdir. Sayısal hesaplamaları PISO algoritması aracılığıyla yapmışlardır. Prandtl ve Reynolds sayılarının ısı transferi üzerine etkilerini numerik olarak sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. İki farklı senaryo üzerinde çalışma yapmışlardır. Re sayısı 50 ile 150

arasında alınarak laminer akış incelemesi yapılmıştır. Nu sayısının, Re sayısı ve boşluk oranıyla arttığı gözlemlenmiştir.

Demircan (2012), deneysel ve sayısal çalışmalar yaparak, osilasyonun kanal içindeki ısı transferine ve akış yapısına etkisi incelemiştir. Çalışmada ısıtıcı bloklardan olan akış ve transfer laminer ve türbülanslı olarak incelenmiştir. Akışkan olarak hava kullanılmış olup giriş hızını zamana bağlı olarak değiştirmiştir. Analizleri 2 boyutlu, zamana bağlı, k-Ɛ türbülans modeli ve SIMPLE algoritmasını kullanarak yapmıştır. Laminer ve türbülanslı akış durumunda yüzey sıcaklığı birinci blokta en düşük iken blok numarası ilerledikçe sıcaklığın da arttığını gözlemlemiştir. Nu sayısı ise birinci blokta en yüksek iken, bloklarda ilerledikçe düşmüş ve son blokta en düşük değerini almıştır. Ayrıca Reynolds sayısının artması ile kanal boyunca tüm bloklarda yüzey sıcaklığının azaldığını ve Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir.

Gavara (2012), düşey bir kanalda karşılıklı yüzeylerde 6 adet ayrık ve gömülü olarak yerleştirilen ısıtıcı kaynaklardan doğal taşınımı üç boyutlu sayısal olarak analiz etmiştir. Bu çalışmada, duvarlar arasındaki uzaklığın, ısıtıcılar arasındaki uzaklığın ve duvarların ısıl iletkenliğinin akış ve ısı transferine olan etkileri incelenmiştir. Isıtıcı kaynaklar arasındaki uzaklık artışının maksimum sıcaklığı azalttığı ortaya koyulmuştur. Optimum duvar arası uzaklığın akış ve ısı transferi için birbirlerinden farklı olduğu, maksimum kütlesel debi için gereken uzaklığın maksimum ısı transferi için gereken uzaklıktan fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.

Pırasacı ve Sivrioğlu (2012), yatay bir kanalda alt ve üst yüzeyine 32 adet yüzeyden çıkıntı olarak yerleştirilen ayrık ısıtıcılardan olan ısı transferini laminer olarak Fluent aracılığıyla incelemişlerdir. Her bir ısıtıcıya eşit olmak üzere ısı akısı uygulanmıştır. Çalışma 3B olarak incelenmiş olup akışkan havadır. Havanın sıkıştırılamaz olduğu kabul edilmiş ve kaldırma kuvvetinin etkileri dikkate alınmıştır. Re sayısının artmasının ısı transferini artırdığını dolayısıyla ısıtıcı sıcaklıklarının düştüğünü gözlemlemişlerdir. Alt ısıtıcılara göre üst ısıtıcılarda bu etkinin daha fazla olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak üst levhaya yerleştirilen ısıtıcı kaynakların daha yüksek sıcaklıklara dayanabildiği gözlemlenmiştir.

Güldemir (2015), yaptığı tez çalışmasında alt yüzeyi ondüleli yatay bir kanalda üst yüzeye yerleştirilen iki adet bloktan olan akış ve ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Elektronik ekipmanları temsil eden bloklara 250 W/m^2 sabit ısı akısı uygulanmıştır. Alt ve üst duvarlar yalıtılmıştır. Çalışmada akışkan olarak hava kullanılmış olup, 2 boyutlu laminer akış olarak incelenmiştir. Ondüleli yüzeyin dalga uzunluğu ve dalga genişliği değiştirilerek incelemeler yapılmıştır. Re sayısının artmasıyla yerel ve ortalama Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. En yüksek değerin blokların alt yüzeyinde elde edildiğini ortaya koymuştur.

Tan, Canbolat, Türkan ve Yüce (2015), elektronik devre kartını simule eden dört adet yonganın zorlanmış taşınımla soğutulmasının hız ve sıcaklık dağılımlarını ve lokal ısı transferinin etkisini Fluent programında 2 ve 3 boyutlu olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında akışın sürekli rejimde ve sıkıştırılamaz kabulü yapılmış ve farklı türbülans modellerinin ve duvar yaklaşımlarının çözüme olan etkileri araştırılmıştır.

Aylı, Bayer ve Aradağ (2016), türbülanslı tam gelişmiş akış şartlarında alt yüzeyine dikdörtgen kesitli kanatçıklar monte edilen bir kanaldaki zorlanmış taşınımı deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Akışkan olarak hava kullanılmışlardır. Kanal alt yüzeyi uniform olarak ısıtılmaktadır. Geometrik parametreler değiştirilerek akış ve ısı transferi üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda Nu sayısı için yeni bir korelasyon geliştirilmiştir.

Dhingra ve Ghoshdastidar (2016), düşey bir kanalda sol yüzeyinde dört adet silikon çip bulunan birleşik karma taşınımı 2 boyutlu ve laminer akış olarak incelemişlerdir. Levhalar bakır-epoksi ile kaplanmıştır. Kanal girişinde hız uniform olarak kabul edilmiştir. Çalışmada çiplerin yüksekliği, genişliği ve arasındaki mesafenin, çip ve cidarların ışınım yayma oranlarının, Reynolds sayısı ve Grashof sayısının ısı transferini nasıl etkilediği incelenmiştir. Blok boyu arttıkça sağ duvardaki sıcaklığın arttığını ve bloklar arası mesafe artıkça sol duvardaki sıcaklığın azaldığını gözlemlemişlerdir.

Wang, Chen ve Gao (2016), geometrik parametrelerin akış üzerindeki etkisini araştırmak için dikdörtgen, ikizkenar yamuk ve üçgen şekilli mikro kanal ısı alıcıları kullanarak

sayısal simülasyonlar yapmıştır. Akışkan olarak su kullanmışlardır. Su viskozitesinin sıcaklıkla değişimi hesaba katıldığında, nümerik sonuçlar ile deneysel veriler arasında benzerlik olduğu vurgulanmıştır. Karşılaştırılan kanallar arasında, dikdörtgen mikro kanalının en düşük termal dirence ve üçgen mikro kanalın ise en yüksek termal dirence sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kanal sayısının termal direnç ve basınç düşüşünü de etkilediği gözlemlenmiştir. Kanal sayısının artmasının termal direnci azalttığı görülmüştür.

Kılıç ve Başkaya (2017), alt yüzeyinde sabit ısı akısı olan paralel bir kanalda ısı transferini iyileştirmek için çarpan akışkan jet ve farklı kesitli yönlendiriciler kullanmışlardır. Türbülanslı akış şartlarında k-Ɛ türbülans modelini kullanmışlardır. Önce akış yönlendirici kullanmadan farklı Re sayılarında inceleme yapılmış olup daha sonra farklı geometrilerde yönlendiriciler eklenerek ısı transferine olan etkileri incelenmiştir. Re sayısının artmasıyla ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Üçgen akış yönlendiricinin; kare akış yönlendiriciye göre %7, silindirik akış yönlendiriciye göre %12 ve akış yönlendirici olmaması durumuna göre ise %28 oranında ortalama Nu değerinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

Durgam, Venkateshan ve Sundararajan (2017), hem yatay hem de düşey olarak konumlandırılan ve üzerinde ayrık ısı kaynakları bulunan baskı devre kartı üzerinden olan doğal ve zorlanmış taşınımı deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmanın amacı ısı kaynaklarının sıcaklığını azaltmak için kaynaklarının konumunun hangi geometride optimum soğutmayı sağlayacağını tespit etmektir.

Sarper, Sağlam, Aydın ve Avcı (2017), çalışmalarında, ayrık olarak ısıtılan dikey bir kanalda radyasyonlu veya radyasyonsuz üç boyutlu doğal taşınımı deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Kanal duvarlarından biri dört adet gömme ısıtıcı ile ayrık olarak ısıtılmakta, diğeri ise yalıtılmıştır. Çalışma, yüzey radyasyonunun çıkıştaki ters akış ve ısıtıcı yüzeylerden konveksiyonla ısı transferi üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Grashof sayısı aralığı 3.82x106 ile 1.53x107 değerleri arasında değişmektedir. Deneysel çalışmada sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Hesaplamalı analizde ANSYS Fluent yazılımı

kullanılmaktadır. Modifiye Grashof sayısının çeşitli değerleri için Nusselt sayısı ile hız ve sıcaklık profillerini elde etmişlerdir.

Umur, Yemenici, Umur ve Sakin (2017), alt yüzeyinde 4 adet blok bulunan bir kanalda akış ve ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal inceleme Fluent kullanılarak yapılmış olup akış laminer, geçiş bölgesi ve türbülanslı olduğu durumlar için incelenmiştir. İncelenen sonuçlar özellikle ilk blokta ve son bloklardan sonra akış ayrılmasının oluştuğunu göstermiştir. Akış ayrımı ve blok kalınlığı değişiminin laminer akışta daha yüksek türbülans ve ısı transferi ile sonuçlandığını gözlemlemişlerdir. En yüksek türbülans değerini ters akışın olduğu bloklar arasında gözlemlemişlerdir. Sayısal çalışmada elde edilen Stanton sayılarının deneysel çalışmada elde edilen değerlerden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Çelik (2019), çalışmasında bir baskı devre kartının üzerinde bulunan yongaların soğutma performansını sayısal olarak iki farklı yöntemle incelemiştir. Termoelektrik soğutucu ile yapılan incelemede en düşük yonga sıcaklığı değerleri akım 3 A ve fan debisi 22 cfm (cubic feet per minute) olduğunda elde edilmiştir. Isı borusu ile yapılan incelemede ise en düşük yonga sıcaklığı değerleri ısı iletkenlik katsayısı k=50000 W/mK, uzunluk 144 mm ve fan debisi 22 cfm olduğu durumda elde edilmiştir.

Demircan ve Özdemir (2019) askeri sistemlerde kullanılan elektronik devre elemanlarının soğutulması için çalışma yapmışlardır. Elektronik devre elemanını temsil eden bir adet blok bir kanal içine yerleştirilerek modelleme yapılmıştır. Bu çalışmada çapraz ve jet akış yöntemi kullanılarak soğutma yapılmıştır. Dört farklı Reynolds sayısı ve laminer durum için analiz gerçekleştirilmiştir. Jet hava giriş hızının kanal girişindeki çapraz akış hava hızına oranı değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Bu oranın ve Reynolds sayısının artmasıyla birlikte ısı transferinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Gupta, Ravat ve Kukreja (2019) yaptığı bu çalışmada zorlanmış taşınımla ısı transferini daha etkili hale getirebilmek amacıyla fanları farklı şekilde yerleştirmişlerdir. Üç farklı konumlandırma için inceleme yapmışlardır. Analizde geometriler iki boyutlu modellenmiştir. Fanın yongaların üstüne monte edildiği durumda ısı transfer katsayısının

diğer iki duruma göre yüksek olduğu görülmüştür. Geometri ICEM CFD (Computational Fluid Dynamics) kullanılarak modellenmiştir.

Güngör (2020) yaptığı tez çalışmasında Ansys Fluent aracığıyla 2 boyutlu, laminer bir akışta düz, dikdörtgen, üçgen, yamuk ve yarım daire kesitli bloklardan olan ısı transferini incelemiştir. Stanton sayısının farklı kesitlerdeki etkileri karşılaştırılmıştır. Re sayısının artışının her kesitte Stanton sayısını azalttığı gözlemlenmiştir. Üçgen kesitli bloklarda ısı transferinin en fazla olduğu gözlemlenmiştir. Farklı kesitteki yongalarda maksimum sıcaklığın her bloğun üst yüzeyinde oluştuğunu incelemiştir. En yüksek ısı transferi birinci bloğun en üst başlangıç köşesinde elde edilirken, en düşük ısı transferi ise son bloğun arka yüzeyinde elde edilmiştir.

Karabulut ve Alnak (2020) bilgisayarda kullanılan mikroçiplerin soğutulması için bir iyileştirme çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada üç tarafı kapalı bir tarafı açık bir kanal içerisindeki iki farklı desene sahip, sabit ısı akılı bakır plaka yüzeylerin hava jeti ile soğutulması üç boyutlu olarak k-ε türbülans modeli ile ANSYS Fluent ortamında analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan jet akışkanını hava almışlardır. Çalışmalarında farklı Re sayılarında dikdörtgen ve sur desenli yüzeye sahip kanal yapıları incelenmiştir. Genel olarak, dikdörtgen ve sur yapılı kanallar için Re sayısının artışı Nu sayısını da arttırmaktadır. Bununla birlikte, özellikle desen aralarında oluşan yeniden dolaşım bölgelerine bağlı olarak Nu sayısı değerlerinin dalgalandığını gözlemlemişlerdir.

Bayraktar (2021), bu çalışmasında ters basamak üzerine konumlanan kare, daire ve eşkenar üçgen kesitli engellerin akış üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Akış sıkıştırılamaz, daimi, türbülanslı olarak düşünülmüş, modifiye k-ω türbülans modeli kullanılmış ve üç-boyutlu olarak çözdürülmüştür. Akış önünde engel teşkil eden şekillerin yüksekliklerinin, basamak yüksekliği ile boyutsuzlaştırılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Üzerinde hiçbir engel bulunmayan ters basamak için elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ters basamak üzerine konulan engellerin geometri şeklinden bağımsız olarak herhangi bir engel bulunması durumunun ayrılmış akış bölgesi uzunluğunun arttırıldığı sonucuna varılmıştır. Ters basamak

geometrisi üzerine eşkenar üçgen kesitli engelin konulması durumunda en uzun akış ayrılması bölgesi oluşturmuştur.

Amghar ve diğerleri (2021), yatay bir levha üzerine yerleştiren 2 adet ve 4 adet blok üzerinden olan ısı transferini araştırmışlardır. Çalışma 2 boyutlu ve türbülanslı olarak incelenmiştir. Çalışma Fluent aracılığıyla k-Ɛ türbülans modelini ve SIMPLEC algoritmasını kullanarak yapılmıştır. Bloklar arasının ve blok boyunun akış yapısı üzerine etkileri incelenmiştir. Aradaki boşluğun artmasının ısı transfer hızını ve sürtünme katsayısını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Enine mesafede ise aradaki boşluğun azalmasının ısı transfer hızını ve sürtünme katsayısını artırdığını gözlemlemişlerdir. Yan yana sıralanmış dört kare blok için enine aralıklı olması durumunda ısı transfer hızı iki bloklu durumdan daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Gürses ve Pulat (2021), çalışmalarında iki paralel levha arasına monte edilen 3 adet bloktan olan akış ve ısı transferini basınç gradyeninin etkisi bağlamında incelemişlerdir. Basınç gradyeni oluşturmak için üst levhaya çeşitli açılar vermişlerdir. Analizlerini ANSYS Fluent kullanarak, iki boyutlu, türbülanslı durum için SST k-ω türbülans modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada hız, basınç, sıcaklık ve türbülans kinetik enerji değişimleri incelenmiştir. Sonuç olarak yakınsama durumunda ısı transferinin arttığını, ıraksama durumunda ise ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Literatürde mevcut problemi konu alan birçok çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmalarda farklı akışkanların ısı transferine olan etkileri doğal, zorlanmış ve karma taşınım rejimlerinde incelenmiştir. Isı kaynaklarının yüzeye gömülü olduğu ya da yüzeyden çıkıntılı olduğu durumlardaki ısı transferi ve akış alanı üzerine etkilerini inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Fakat sınırlı sayıda geometrik faktörler araştırılmış olup giriş türbülans parametrelerinin ve basınç gradyeninin etkilerine odaklanan çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bağlamda bu tez çalışmasının amacı, geometrik faktörlerin, belirli geometrik faktörler için giriş türbülans şiddetinin, eşlenik (conjugate) etkinin ve basınç gradyeninin dar bir kanalda alt yüzeye monte edilmiş elektronik yongaları temsil eden

ısıtılmış bloklar üzerinden olan akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerine etkilerini sayısal olarak hesaplamaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Akışkanlar mekaniği ve ısı transferinin olduğu problemlerin çözümünde ve analizinde iki farklı yöntem kullanılır. Bunlar hesaplamalı olarak çözüm ve deney yaparak çözümdür (Çengel ve Cimbala 2006). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi vb. akışkanlar dinamiğini kapsayan problemlerin çözümü için ve akışının değişik koşullardaki analizini yapmaya yarayan bir yöntemdir. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) temel olarak süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini esas alarak akış içindeki sıcaklık, hız, basınç, enerji gibi birçok veriyi elde etmeye yarar. Bu tez çalışmasında sayısal yöntem olarak HAD metodu kullanılmıştır. Türbülans, enerji ve momentum denklemleri ticari bir yazılım olan ANSYS Fluent 20.1 aracılığıyla çözülmüştür. Sonlu hacimler yöntemini kullanan Fluent bir HAD yazılımıdır. 19. yy başlarından bu yana hızla gelişen ve birçok alanda kullanılan Fluent, uygulayıcıların problemlerine kısa sürede çözüm sunmasıyla ön plana çıkmaktadır.

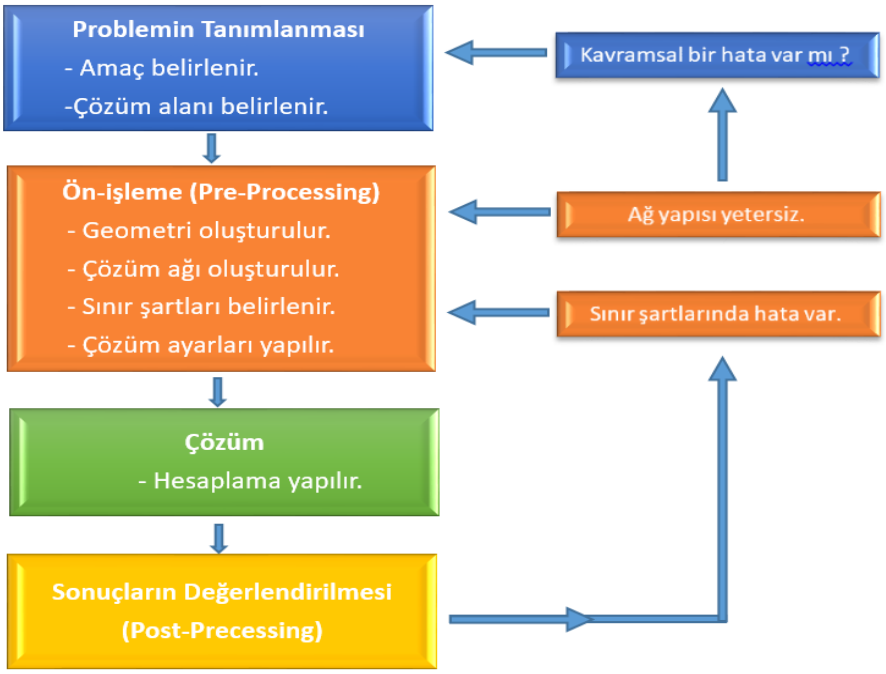
3.1. HAD Tarihi

Akışkan hareketlerinin matematiksel denklemlerinin ortalama olarak hesaplama düşüncesi bilgisayarların dahi icat edilmediği döneme dayanmaktadır. Bilgisayarın icadıyla çok uzun süren hesaplamalar kısa sürede yapılır hale gelmekle birlikte problemlere yaklaşık çözümler getirme işi daha kolaylaşmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin deneysel testlere nazaran tekrar edilemeyen akış koşullarını tekrar tekrar kolayca yapabilmesi ve düşük enerji tüketimiyle sonuç vermesi diğer yöntemlere göre tercih edilmesini sağlamıştır (Fletcher, 1998). 1970'lerin ortalarında karmaşık matematiksel problemlerini çözmek için farklı algoritmalar geliştirilmeye başlanmıştır. HAD çözücüleri tam da bu süreçte geliştirilmiştir. 1980'lerde, akışkanlar mekaniğinin çalışma alanının fazla olması sebebiyle yüksek performans gerektiren bilgisayar ihtiyacı ortaya çıkmıştır. O süreçte bilgisayarların pahalı olması sebebiyle HAD sadece laboratuvar ve enstitülerde kullanılabiliyordu. Bilgisayar alanındaki gelişmeler yapılan HAD analizlerinin çok daha kısa sürelerde sonuçlandırılmasını sağlamıştır. Dolayısıyla ürün geliştirme maliyetleri de oldukça düşmüştür. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte çözücülerinde gelişmesi HAD'ni sanayide vazgeçilmez hale getirmiştir.

Günümüzde HAD hem araştırma merkezlerinde hem üniversitelerde tasarım doğrulama amacıyla oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.2. HAD İşleyişi

Bir HAD probleminin modellenmesine ilk olarak çözüm hacminin bir CAD (Computer Aided Design) yazılımı aracılığıyla çizilmesi ile başlanır. Daha sonra bu hacim ufak hacimlere bölünerek çözüm ağ yapısı oluşturulur. Ve çözümü başlatmadan önce problemdeki sınır şartları tanımlanır. Çözüm tamamlandığında ise sonuçlar görsel ve tablo olarak elde edilir ve değerlendirilir. Sonuçları değerlendirerek gerekirse çözüm ağı ve sınır koşullarında gerekli iyileştirmeler yapılarak tekrar çözüm yapılır. Bir HAD probleminin temel olarak 4 aşaması vardır. Bkz. Şekil 3.1'de bu aşamalar gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Had İşleyiş Algoritması (Introduction to Ansys Fluent, 15.0 Realese)

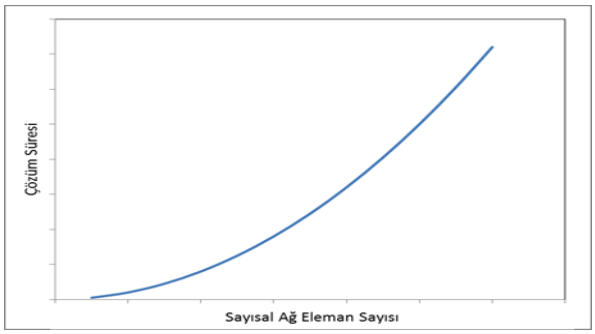
1) Problemin tanımlanması
2) Ön İşlemler (Pre-Processing)
3) Çözüm (Solve)
4) Son İşlemler (Post-Processing)

Problemin tanımlanması

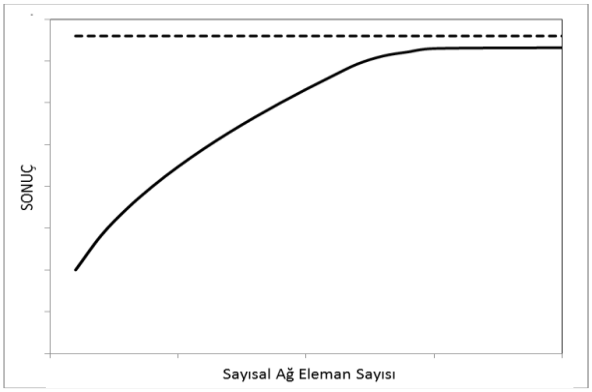
Bu aşamada problemden istenen çıktıların belirlenmesi gerekir. Daha sonra bu çıktıları değiştirebilecek parametreler ortaya çıkacaktır. Bu çıktılara göre yapılacak analizdeki basitleştirmeler hakkında bir ön görüde bulunulabilir. Mesela sonucu etkilemeyecek olan kısımlar ihmal edilebilir. Ayrıca bu kısımda analizde kullanılacak yöntemlere karar verilir.

Ön İşlemler

Bu aşamada öncelikle geometri oluşturulur. Günümüzde HAD yazılımlarında da geometri oluşturma kısmında epey güçlü modüller vardır. Fakat bazı karmaşık geometriler için daha gelişmiş CAD yazılımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Geometri oluşturulduktan sonraki adım çözüm ağı oluşturmaktır. Bu kısımda ağ oluşturulacak bölge küçük küçük elemanlara bölünür. 2 boyutlu analizlerde bu bölgeler alanlardır, 3 boyutlu analizlerde ise hacimlerdir. Bir HAD çözümünün doğruluğu büyük oranda ağ yapısının niteliği ile doğru orantılıdır. Eleman sayısının fazla olması gerçek sonuçlara yakın sonuçlar elde etmemizi sağlar. Bu durum aynı zamanda çözüm süresinin uzamasına sebep olacaktır (Şekil 3.2). Ağ yapısı arttıkça belli noktadan sonuçların değişmediği görülür (Şekil 3.3). Bu noktadaki eleman sayısına bağımsız eleman sayısı denmektedir.



Şekil 3.2. Sayısal ağ eleman sayısı ve çözüm süresi arasındaki ilişki (Versteeg ve Malalasekera, 1995)



Şekil 3.3. Sayısal ağ eleman sayısı ve sonuç arasındaki ilişki (Versteeg ve Malalasekera 1995)

Ağ yapısının oluşturulmasının ardından belirlenen sınır şartları giriş, çıkış ve duvar durumları için tanımlanır. Akışkan özellikleri ve olacaksa katı malzemenin özellikleri sisteme tanımlanır. Daha sonra sayısal parametreler ve uygulanacak algoritma seçilir ve bir başlangıç değeri atanarak çözüm aşamasına geçilir.

Çözüm (Solve)

Çözüm kısmında programa tanımladığımız sınır şartları ve diğer girdiler doğrultusunda analizi yapar. Çözüm yakınsadığında analizden görülmek istenen parametrelerin grafikleri çizdirilebilir.

Son İşlemler (Post-Processing)

Bu kısımda analizden elde edilen sonuçlar görselleştirilir. Ve sonuçlar değerlendirilerek ağ yapısının yeterliliği, sınır koşullarının uygunluğu gibi parametrelerin sonucu nasıl etkilediği hakkında değerlendirmeler yapılıp analizin yeterli olup olmadığına karar verilir. Eğer analiz yeterli değilse değiştirilmesi gereken durumlar değiştirilerek tekrardan analiz yapılır.

3.3. Korunum Denklemleri

HAD yazılımlarının çözüme ulaşmak için kullandıkları denklemler: Kütlenin korunumu (süreklilik), Newton'un 2. yasası ve termodinamiğin birinci yasasını uygulayarak türetilen Navier-Stokes denklemleri olarak adlandırılan denklemlerdir. Sürekli rejimde, üç boyutlu sıkıştırılamaz, Newton tipi, laminer akışkanlar için kartezyen koordinatlarda korunum denklemleri Denklem 3.1 ile gösterilmiştir. Kütlenin korunumu veya süreklilik olarak adlandırılan bu denklem, bir kontrol hacmi için sisteme giren ve çıkan kütlenin toplamının sıfır olması gerektiğini ifade eder. Burada u; x yönündeki hız bileşeni v; y ekseni yönündeki hız bileşeni ve w; z yönündeki hız bileşeni olarak ifade edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla.\left(\rho\vec{V}\right)=0 \tag{3.1}$$

Sıkıştırılamaz bir akışta ρ=sabittir ve eşitlik 3.1'de hız vektörünü açık halde yazılınca;

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{3.2}$$

x-momentum denklemi:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P'}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x}+\frac{\partial^2 u}{\partial^2 y}+\frac{\partial^2 u}{\partial^2 z}\right)+F_x \tag{3.3}$$

y- momentum denklemi:

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P'}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial^2 x}+\frac{\partial^2 v}{\partial^2 y}+\frac{\partial^2 v}{\partial^2 z}\right)+F_y \tag{3.4}$$

z- momentum denklemi:

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P'}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial^2 x}+\frac{\partial^2 v}{\partial^2 y}+\frac{\partial^2 v}{\partial^2 z}\right)+F_z \tag{3.5}$$

Denklemlerde u, v, w akışkanın x, y, z doğrultusundaki hızlarını, ρ yoğunluğunu, μ dinamik viskozitesini gösterir.

Momentum denklemleri akış alanına Newton'un ikinci kanununun uygulanmasıyla bulunur. Buna göre, bir cisme etki eden toplam kuvvetler, o cismin kütlesi ile ivmesinin çarpımına eşit olmaktadır. Bir akışkana etki eden iç ve dış kuvvetler mevcuttur. Dış kuvvetler olarak yer çekimi, savurma kuvveti, elektro manyetik alan olarak incelenebilir. İç kuvvetler ise basınç ve viskoz kuvvetler olarak adlandırılan kuvvetlerdir. Bu eşitliklerin, fiziksel anlamı ise şe şekilde ifade edilebilir. Sol tarafındaki terim atalet kuvvetlerini, sağ tarafındaki ilk terim basınç kuvvetlerini, ikinci terim viskoz kuvvetlerini ve son terim ise dış kuvvetleri göstermektedir.

Enerji denklemi;
Bir sistemde enerji dengesi bir işlem süresince enerji giriş ve enerji çıkış arasındaki farka eşittir. Sürekli akış durumunda ise kontrol hacminin toplam enerji değişimi sabit kalır yani sisteme giren ve sitemden çıkan enerji miktarı birbirine eşittir. Sürekli akış için birim zamana göre genel enerji denklemi şu şekilde yazılır.

$$\dot{E}_{giriş} - \dot{E}_{çıkış} = 0 \tag{3.6}$$

Sabit özellikli 3 boyutlu bir akışkan için enerji denklemi genel haliyle aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\rho c_p \left(u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial P}{\partial t} + u\frac{\partial P}{\partial x} + v\frac{\partial P}{\partial y} + w\frac{\partial P}{\partial z} \right) + k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu\phi \tag{3.7}$$

Sol taraftaki terim taşınım, sağ taraftaki ilk terim basınç tarafından yapılan işle ortaya çıkan enerjiyi, ikinci terim iletim ile ve üçüncü terim ise viskoz kayma gerilmeleri sonucunda açığa çıkan enerjiyi gösterir.

Çalışmada türbülanslı akışlar incelendiğinden bu denklemlere ek olarak seçilen türbülans modelinin denklemi de çözülmektedir.

3.4. Türbülans ve Türbülans Modelleme

Türbülans bir akışkanın hareket halinde iken oluşturduğu düzensizlik olarak tanımlanır. Türbülanslı akış durumu atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere baskın olduğu durumda gerçekleşir. Deneysel çalışmalarda türbülansın kritik Re sayısından sonra belirginleştiği ve akış üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

Günümüz şartlarında en çok kullanılan türbülans modelleri istatistiksel türbülans modelleridir. Büyük girdap simülasyonu (LES) ve doğrudan sayısal simülasyonu (DNS) bilgisayarlarda daha fazla kapasite gerektirdiğinden daha az tercih edilmektedir. Bu çalışmada istatistiksel türbülans modeli olan SST k-ω modeli kullanılmıştır.

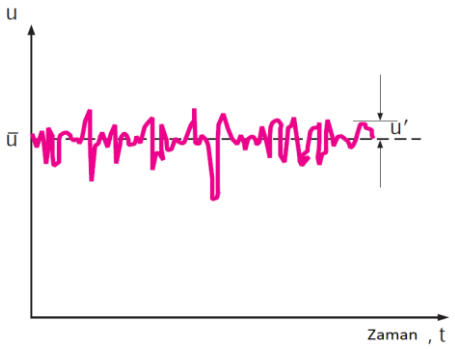
Türbülanslı akış şartlarında dalgalanmaları ölçmek için araştırmacılar türbülans modellerini geliştirmişlerdir.

Genel olarak türbülans modellerini 3 kategori halinde inceleyebiliriz.
1 Reynolds Ortalamalı Navier Stokes Denklemleri
1.1.Eddy viskozitesi Modelleri
1.1.1 Tek denklemli modeller
1.1.1.1 Spalart-Allmaras Model
1.1.2 İki denklemli modeller
1.1.2.1 k-Ɛ modelleri
1.1.2.2 k-ω modelleri
1.2.Reynolds Gerilme Modelleri (RSM)
2 Büyük Girdap Simülasyonu (LES)
3 Doğrudan Sayısal Simülasyon (DNS)

Reynolds ortalamalı Navier Stokes denklemleri (RANS)

RANS modelleri türbülanslı akışta meydana gelen dalgalanmalar ve bunların özelliklerini inceler. Reynolds ortalamalı denklemlerde ilave terimler ortaya çıkar. RANS modelinde, Navier Stokes denklemlerine, ortalama ve dalgalanma terimleri ile yazılarak yeniden

oluşturulurlar. Şekil 3.4'de hız değerine eklenen ortalama ve dalgalanma hız bileşenlerini görebiliriz.



Şekil 3.4. Ortalama hız ve ortalama çalkantı terimlerinin şematik gösterimi (Çengel ve Cimbala 2006)

$$u_i=\overline{u_i}+u_i' \tag{3.8}$$

Bu denklemde u_i hız, $\overline{u_i}$ ortama hız ve u_i' çalkantı bileşeninin toplamı olarak ifade edilir. Basınç ve diğer skaler birimler için ise;

$\Phi = \overline{\Phi} + \Phi'$ şeklinde yazılabilir. Yani bir özelliğin belirli bir konumdaki ortalama değeri, zaman ortalamasının sabit bir değere ulaşmasına yetecek kadar uzun bir zaman aralığı boyunca ortalamasının alınmasıyla bulunur (Çengel ve Cimbala, 2006).

Bunlar süreklilik ve momentum denklemlerinde sırasıyla yerine yazılırsa;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{3.9}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j\right)=\frac{\partial \rho}{\partial x_i}+\frac{\partial \rho}{\partial x_j}\left(\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\,\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\,\overline{u_i' u_j'}\right) \tag{3.10}$$

Bu eşitlikler RANS denklemi olarak adlandırılır. Burada Reynolds gerilmesi $R_{ij} = (\rho\,\overline{u_i' u_j'})$ teriminin modellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Eddy viskozitesi modelleri

Reynolds gerilmelerinin, türbülans viskozitesi ve ortalama hız gradyenine bağlı olarak hesaplanmasıyla eddy viskozitesi modelleri oluşur.

$$\overline{(-\rho u_i u_j)} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (3.11)$$

μ_t eddy veya türbülans viskozitesi olarak bilinmektedir. Bunu kullanarak Reynolds ortalamalı denklemler bu şekilde yazılır;

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_i u_j \right) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + S_M \quad (3.12)$$

μ_{eff} efektif viskozitedir türbülans viskozitesini de içermektedir. S_M ise sisteme etki eden toplam dış kuvvetleri temsil etmektedir. p' ise modfiye basıncı ifade etmektedir.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.13)$$

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (3.14)$$

Tek denklemli modeller

Spalart-Allmaras model

Bu model tek denklemli türbülans modeli olarak geçmektedir. Genellikle havacılık sektöründe kullanılır. Ters basınç gradyanı ve düşük Re olduğu durumlarda daha iyi sonuç vermektedir. Bunun yanında yüksek Re sayılı akış durumlarında da kullanılabilmektedir.

İki denklemli modeller

Endüstride ve araştırmalarda iki denklemli modeller pratik kullanımı ve çok iyi sonuç vermesi açısından en yaygın kullanılan modellerdir. Eddy vizkozitesi yaklaşımı kullanılır ve Reynolds gerilmelerini hesaplarlar. Ayrıca çözümlerde iki farklı transport denklemini kullandıkları için bu isimle adlandırılmışlardır. Bu modeller k-ω (k-omega) ve k-ε (k-epsilon) olmak üzere ikiye ayrılırlar.

k-Ɛ modelleri

Literatürde en çok araştırma yapılan türbülans modelidir. k −ε modeli; standart k−ε, renormalizasyon grup teorisi (RNG) ve k −ε realize edilebilir (realizable) k −ε modeli olmak üç farklı şekilde gruplandırılır. k −ε türbülans modelleri türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yayınım oranına (ε) dayalıdır (Launder ve Spalding 1972). Tam gelişmiş akış durumlarında daha iyi sonuç vermektedir.

k-ε modellerinin dezavantajları ise, ters basınç gradyeni ve sınır tabakası ayrılmaları durumunda elde edilen sonuçlarda bir miktar sapma olmasıdır. k−ε modelleri genellikle daha zayıf bir ayrılma öngörürler. Bu nedenle bu modeller difüzörler vb. gibi ayrılan akışlar için doğru sonuç vermeyebilir. Bu sebeple k-ε modelleri dış aerodinamikte tercih edilmemektedir.
k- ε modelleri türbülans viskozitesini aşağıdaki gibi modelleyerek bulmaktadır.

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.15}$$

Burada c_μ model sabitidir. Denklemdeki k ve ε terimleri iki farklı diferansiyel transport denklemi ile hesaplanırlar.

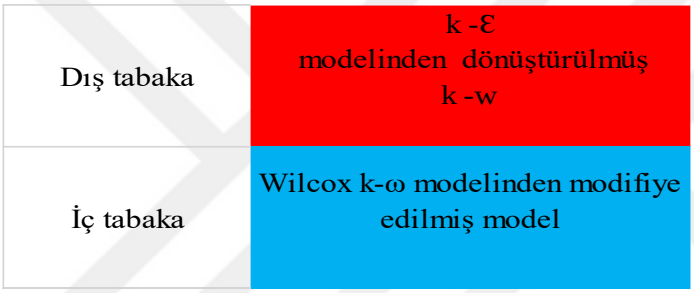
k-ω modelleri

k−ω türbülans modeli Wilcox (1998) tarafından geliştirilmiş 2 denklemli bir türbülans modelidir. Düşük Reynolds sayılarında ve duvar yakınında yüksek hassasiyetle doğru sonuçlar vermektedir. Bunun sebebi ω değerinin ε değerine göre daha yavaş değişmesidir. Duvara yakın kısımlarda yüksek ağ hassasiyeti oluşturarak sınır tabaka içerisinde hız dağılımlarını çözen bir model tipidir. Bu model gerek gördüğünde duvar fonksiyonlarını kullanabilir. Duvara yakın kaba bir ağ yapısı oluşturulduğu durumlarda otomatik olarak duvar fonksiyonları devreye girer. *k*−ω türbülans modeli standart *k*−ω ve kayma gerilmesi taşınımı (Shear Stress Transport) SST *k*−ω olmak üzere 2 grupta

incelenir. Bu çalışmada SST *k*–ω modeli kullanılmıştır. Bu nedenle bu modelin açılımı detaylı olarak incelenmiştir.

SST *k* –ω Modeli

SST *k* –ω modeli Menter (1994) tarafından geliştirilmiştir. SST *k* –ω modeli yakın bölgelerde Wilcox'un modelini kullanırken uzak bölgede Launder ve Spalding'in (1972) *k* –ε modelini kullanmaktadır. Bu model standart *k* –ω ile aynı yapıda olması ile birlikte burada k-ε modeli, k-ω ya dönüştürülmüştür. Bu model standart k-ω ya göre daha geniş akış şartlarında güvenilir ve hassastır (Pulat, İşman, Etemoğlu ve Can, 2011).



Şekil 3.5. SST k-ω modelinin farklı yüzeylerdeki hesap şekli (Turbulence Modeling using ANSYS Fluent, 15.0 Realease)

İç yüzey için

Türbülans Kinetik Enerjisi;

$$\rho\frac{D_k}{D_t}=\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\beta^{*}k\rho\omega+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{k1}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) \tag{3.16}$$

Türbülans yayınım oranı;

$$\rho\frac{D_w}{D_t}=\frac{\gamma_1}{v_t}\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\beta_1\rho\omega^2+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{w1}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)+2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{3.17}$$

$\beta_1=0.075$

$\sigma_{k1}=1.176$

$\sigma_{w1}=2.0$

$\beta^{*}=0.09$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\kappa^2}{\left(\sqrt{\beta^*}\sigma_{w1}\right)} \tag{3.18}$$

κ=0.41

Türbülans viskozitesi;

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega_1 \Omega F_2)} \tag{3.19}$$

$$F_2 = \tanh(arg_2^2)$$

$$arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500v}{y^2\omega}\right) \tag{3.20}$$

Üst yüzey için

Türbülans kinetik enerjisi;

$$\rho \frac{D_k}{D_t} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* k\rho\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k2}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) \tag{3.21}$$

Türbülans yayınım oranı;

$$\rho \frac{D_w}{D_t} = \frac{\gamma_1}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta_1 \rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{w2}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + 2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{3.22}$$

β_2=0.0828

σ_{k2}=1.0

σ_{w2}=1.168

β^*=0.09

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\kappa^2}{\left(\sqrt{\beta^*}\sigma_{w2}\right)} \tag{3.23}$$

κ=0.41

Türbülans viskozitesi;

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{3.24}$$

3.5. Kullanılan Temel Denklemler

Hesaplamalar üç farklı Reynolds sayısı için yapılmış olup Reynolds sayısı kanal giriş hızı ve kanal yüksekliğine (H) göre aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$Re = \frac{U_x H}{\nu} \tag{3.25}$$

Wu, Wang ve Perng (1998), Tsay, Cheng ve Chang (2003), Moussaoui, Jami, Mezrhab ve Naji (2009) ve Bouttout, Benissaad ve Bessaih (2014), yüzeye monte edilmiş ısıtılmış bloklardan olan ısı transferi çalışmalarında Re sayısını kanal yüksekliğine göre tanımlamışlardır.

Isı kaynakları üzerinden olan taşınımla ısı transfer katsayısı Newton'un soğuma kanunundan aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$q=h\,(T_s-T_f) \tag{3.26}$$

Blok yüzey sıcaklığı sabit olduğundan ısı taşınım katsayısı yerel ısı akısı q'dan Fourier'in ısı iletim kanunun yüzeydeki ilk ağ tabakasına (Hava ve cidar arayüzü) uygulanmasıyla aşağıdaki denklemden elde edilir.

$$q=k\frac{\Delta T}{\Delta y} \tag{3.27}$$

Denklem 3.26 ve 3.27'deki ısı akıları birbirine eşitlenirse

$$h=\frac{k\frac{\Delta T}{\Delta y}}{(T_s-T_f)} \tag{3.28}$$

h ısı transfer katsayıları bulunur. Burada $\Delta T = T_s - T_f$ katı yüzey sıcaklığı ile katı yüzeyin hemen üstündeki ağ noktasındaki akışkanın sıcaklıkları arasındaki farktır. h ısı transfer katsayısı aşağıdaki gibi boyutsuzlaştırarak Nu sayısına dönüştürülebilir. Burada L_C karakteristik uzunluktur ve bu tezde karakteristik uzunluk yukarıda aynen Re sayısının tanımında olduğu gibi kanal yüksekliği (H) olarak alınmıştır. Yüzeyle aynı hizada (gömülü) monte edilmiş izotermal küçük ısı kaynaklarından olan eşlenik (Taşınım + iletim) ısı transferini inceleyen Ramadhyani, Moffatt ve Incropera (1985) karakteristik uzunluk olarak kanal yüksekliğinin iki katını (Yani D_h hidrolik çap) kullanmışlardır.

Cukurel ve Arts (2013) da karakteristik uzunluk olarak hidrolik çapı kullanmışlardır. Chung ve Li (1995), Tsay vd. (2003) ve He, Liu ve Jacobi (2011) ise çalışmalarında karakteristik uzunluk olarak kanal yüksekliğini kullanmışlardır.

$$Nu=h\frac{H}{k}=\frac{\text{Akışkanın taşınım ile aktardığı ısı}}{\text{Akışkanın iletim ile aktardığı ısı}} \tag{3.29}$$

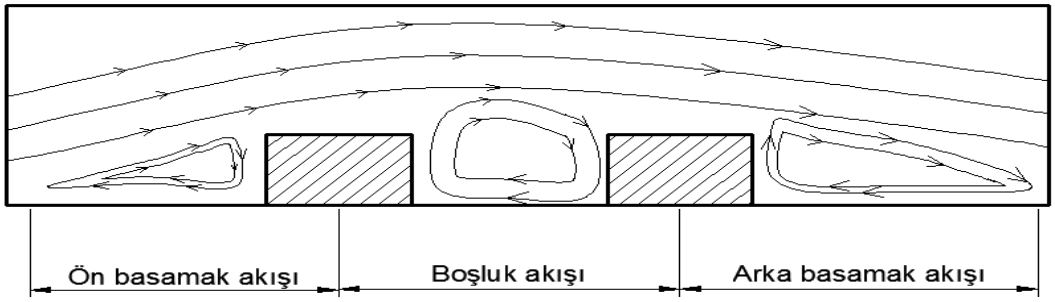
Nu sayısı denklem 3.29'deki şekilde tanımlanır. h ısı taşınım katsayısı, H kanal giriş yüksekliği ve k ısı iletim katsayısıdır.

3.6. Bloklar Üzerinden Akış

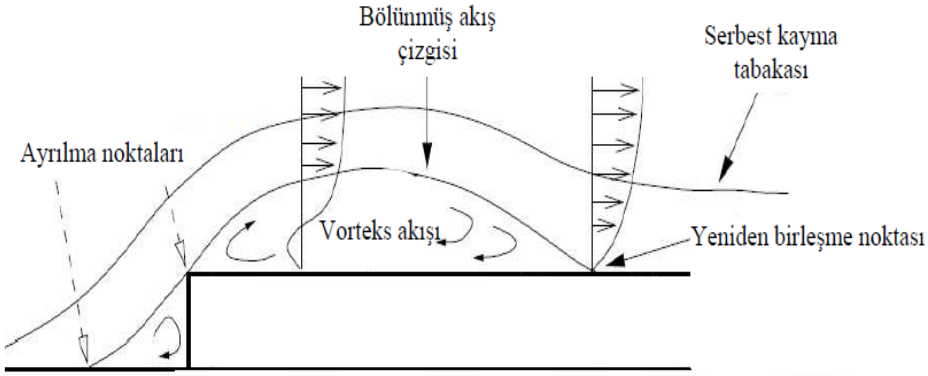
Viskoz bir akışkan incelendiğinde hareketi boyunca büyük oranda katı yüzey ile temas halinde olduğu görülmüştür. Bu katı yüzey üzerinde, viskoz kuvvetlerin oluştuğu laminer ya da türbülanslı bir sınır tabaka meydana gelir. Sınır tabaka dışında kalan kısımdaki akış ideal ve sürtünmesiz akıştır. Sınır tabaka içerisinde akışkanın yüzeyden sapmasına sınır tabaka ayrılması denir. Akış süresince ters basınç gradyanının oluştuğu bölgelerde enerji kaybından dolayı akış yüzeyden ayrılmaktadır. Ayrılma noktasında hız gradyanları yüzeydeki kayma gerilmeleri sıfırdır.

Ardışık bloklardaki akışlar incelendiğinde, girdaplardan ötürü ölü bölgeler oluştuğu gözlemlenmiştir. Bloklar olması sebebiyle, gelen akış çizgilerinde bozulmalar görülür. Akış yüzeyden ayrılır ve daha sonra tekrar birleşir. Ayrılmış akış durumu titreşim, basınç salınımı vb.'ye sebep olurken akışkanın karışmasını sağladığından ve ısı ve kütle transferini artırdığı için tercih edilirler. Bloklarda oluşan yüzey pürüzlülüğü, ısı transfer yüzey alanının artırdığı için ısı transferinin de artmasını sağlamaktadır.

Ardışık olarak konumlandırılmış bloklardaki akış analizinde Şekil 3.6'da görüldüğü üzere ilk olarak ön(ileri) basamak akışı sonra arada boşluk akışı ve en son arka (geri) basamak akışı olmak üzere üç farklı akış bölgesine ayrılabilir. Bu bloklar tam gelişmiş akış bölgesi içerisinde olabileceği gibi gelişmekte olan akış bölgesi içerisin de de olabilirler.

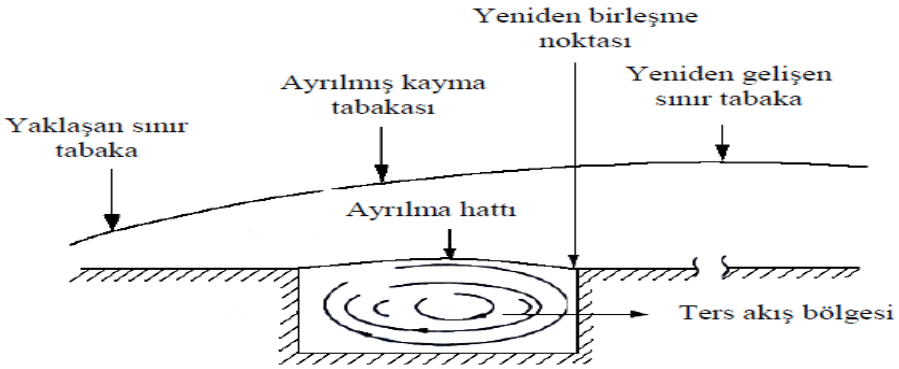


Şekil 3.6. Bloklar üzerinde akışta akış bölgeleri (Güldemir, 2015).



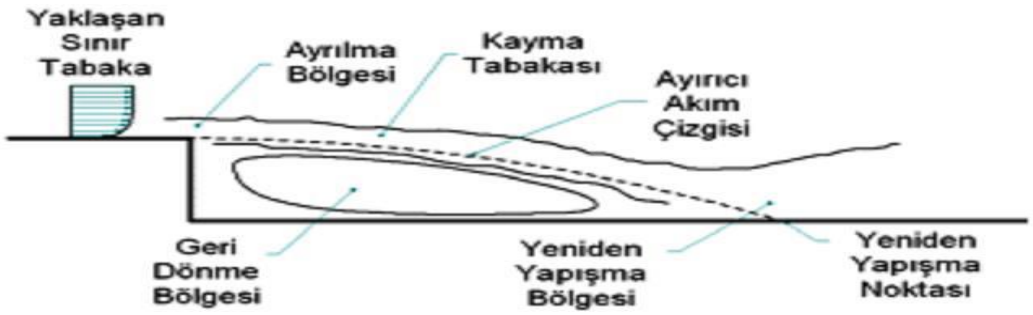
Şekil 3.7. Ön (ileri) basamak akışının gösterimi (Sherry, Jacono ve Sheridan, 2009).

İleri basamak akışında Şekil 3.7' de görüldüğü üzere serbest kayma tabakası bölgesinde basamak ön yüzünde ve basamak üzerinde akışa ters yönde girdaplar oluşmaktadır. Bölünmüş akış çizgisinin alt bölgesinde ise yeniden birleşme noktası oluşmaktadır.



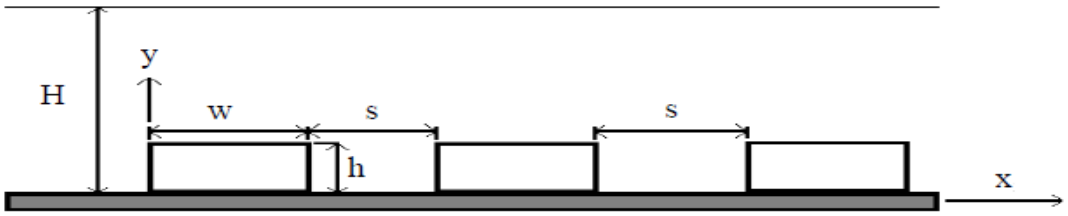
Şekil 3.8. Boşluk akışının gösterimi (Aung, 1983).

Boşluk akışında sınır tabaka boşluğa ilk düştüğü andan itibaren ayrılır ve akış karşı duvara ulaştığında yeniden birleşir. Boşluk içine düşen akış ise akışa ters yönde vorteksler oluşturur (Şekil 3.8).



Şekil 3.9. Geri basamak akışının yapısı (İlday ve Atlı, 2006).

Geri basamak akışında sınır tabaka basamak kenarında ayrılır ve basamağın alt yüzeyinde yeniden birleşir. Ayrılmış akış çizgisi ile basamak yüzeyi arasında Şekil 3.9'da görüldüğü üzere vorteks akış bölgesi oluşmaktadır. Bu bölgeden ayırıcı bir akım çizgisi ile ayrılan bir kayma tabakasından oluşmaktadır (İlday ve Atlı, 2006). Geri basamak akışında en karakteristik değişken yeniden birleşme uzunluğudur. Eaton ve Johnston (1981) çalışmalarında farklı deneylerle yeniden birleşme uzunlukları üzerine farklı değişkenlerin etkisini ortaya koymuşlardır.



Şekil 3.10. Ardışık bloklu yüzeyin şematik gösterimi

Akış ve ısı transferi analizinde kullanılan çok bloklu kanal geometrisi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Tropea ve Gackstatter (1985) çalışmalarında yüzeye monte edilen blok üzerinden olan akış ve ısı transferini bu tarz geometrilerde en genel haliyle incelemişlerdir. Bloklu yüzeyler için geometrik faktörler en genel halde aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$\frac{h}{H}$ = Blok yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranı (Blokaj oranı)

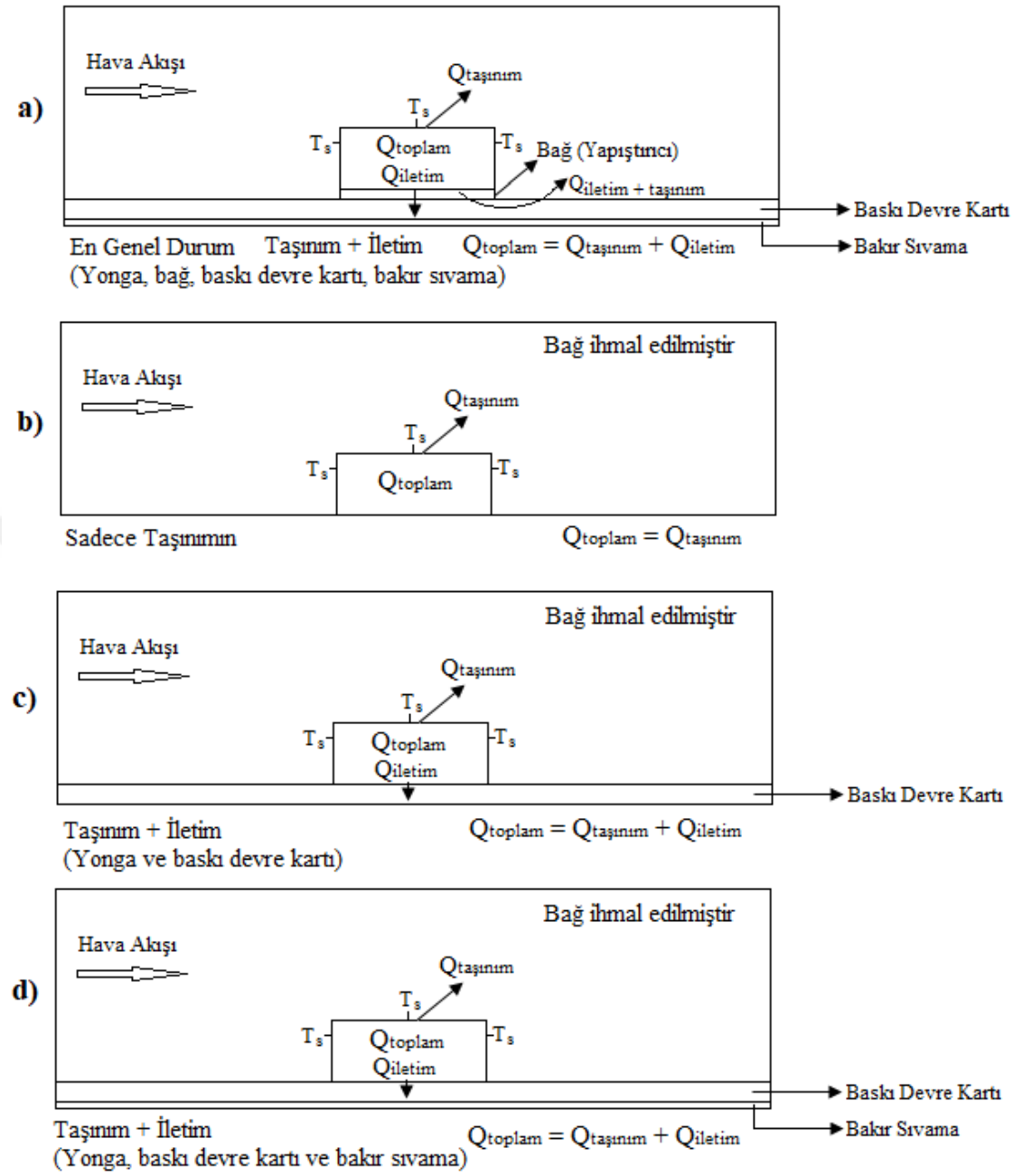
$\frac{w}{h}$ = Blok uzunluğunun blok yüksekliğine oranı

$\frac{H}{H-h}$ = Kanal genişleme oranı (Channel expansion ratio)

$\frac{s}{w}$ = Bloklar arası mesafenin blok uzunluğuna oranı (Aspect ratio)

3.7 Eşlenik (İletim + Taşınım, Conjugate) Isı Transferi

Eşlenik ısı transferi problemi, bir katı cisimle onun üzerinden akan bir akışkan arasındaki ısıl etkileşimi dikkate alır. Sabit yüzey sıcaklığı durumunda, bu etkileşimi ara yüzey üzerindeki belirli bir ısı akısı dağılımı belirler. Bu ısı akısı alanı da sıcaklık dağılımına ve buna bağlı olarak da yerel ısı transferine neden olur. Sabit ısı akısı durumunda ise bu etkileşimi ara yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı belirler. Bu sıcaklık alanı da ısı akısı dağılımına ve buna bağlı olarak da yerel ısı taşınımına neden olur (Cukurel ve Arts., 2013). Elektronik sistemlerin soğutulmasında eşlenik ısı transferi yongayı baskı devre kartına bağlayan bağ malzemesi, yonga pinleri (ayakları), baskı devre kartı gibi iletimle ısı transferinin de olduğu taşınım çalışmalarında (Ramadhyani vd., 1985) oldukça önem arz etmektedir ve eşlenik ısı transferi analizinin uygulamalı ve teorik yönleri John, Senthilkumar ve Sadasivan (2019) tarafından gözden geçirilmiştir. Bu tezde ele alınan eşlenik olmayan (sadece taşınım) ve eşlenik olan durumlar (taşınım + iletim) aşağıda tek bloklu durum üzerinden Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Dört bloklu durum için de eşlenik ısı transferi için aynı işlemlerin geçerli olduğu aşikardır. Bu çalışmada dikkate alınan tüm durumlarda (Şekil 3.11 b, c, d) yongayı baskı devre kartına bağlayan ya da yapıştıran bağ malzemesi ihmal edilmiştir. Literatürde birçok çalışmada bağ malzemesi ihmal edilmektedir. Yalnızca taşınımın olduğu durumda (Şekil 3.11 b) yongada üretilen ve yonga yüzeyinde sabit sıcaklığa sebep olan ısı daha düşük sıcaklıktaki akışkana transfer olmaktadır. Halbuki eşlenik durumda üretilen ısı daha düşük sıcaklıktaki akışkana transfer olmakla birlikte ayrıca yonga tabanından baskı devre kartına (Şekil 3.11 c) ve oradan da bakır sıvamaya (Şekil 3.11 d) transfer olmaktadır.



Şekil 3.11. Eşlenik ısı transferinin tek blok üzerinden gösterimi a) En genel durum, b) Eşlenik olmayan durum (Bu çalışma) c) Sadece baskı devre kartının bulunduğu eşlenik durum (Bu çalışma) ve d) Baskı devre kartı ve bakır sıvamanın bulunduğu durum (Bu çalışmada bağ ihmal edilmiştir.)

3.8. Çalışmada Kullanılan Geometriler

Çalışmada kullanın baz geometri ölçüleri aşağıdaki Şekil 3.12'de verilmiştir. Yapılacak olan değişiklikler bu geometri üzerinden yapılacaktır.

Kanal giriş yüksekliği (H) = 2,54 cm,

Her 4 yonga için: Yonga yüksekliği (h) = 0,635 cm,

Yonga uzunluğu (w) = 1,27,

Yongalar arası mesafe (s) = 1,27 cm,

Kanal girişinde itibaren ilk yongaya olan uzaklık 10,16 cm,

Son yongadan kanal çıkışına kadar uzaklık 26,67cm,

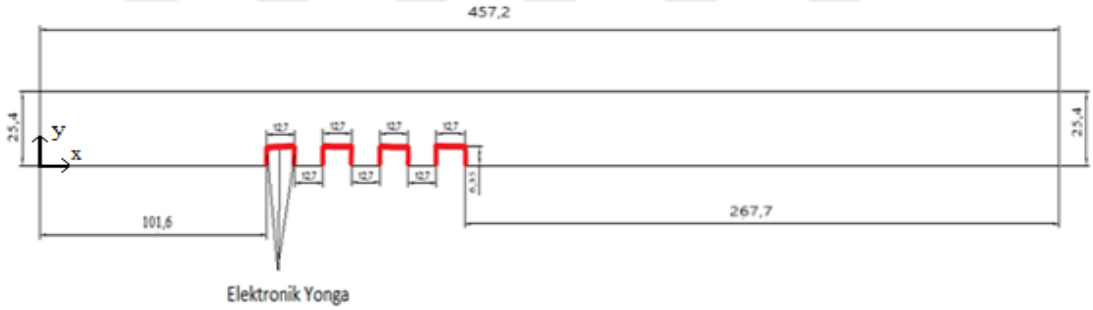
Kanal uzunluğu (L) =45,72 cm

Blokaj oranı [h/H]= 0,25

Genişleme oranı [H/(H-h)]= 0,33

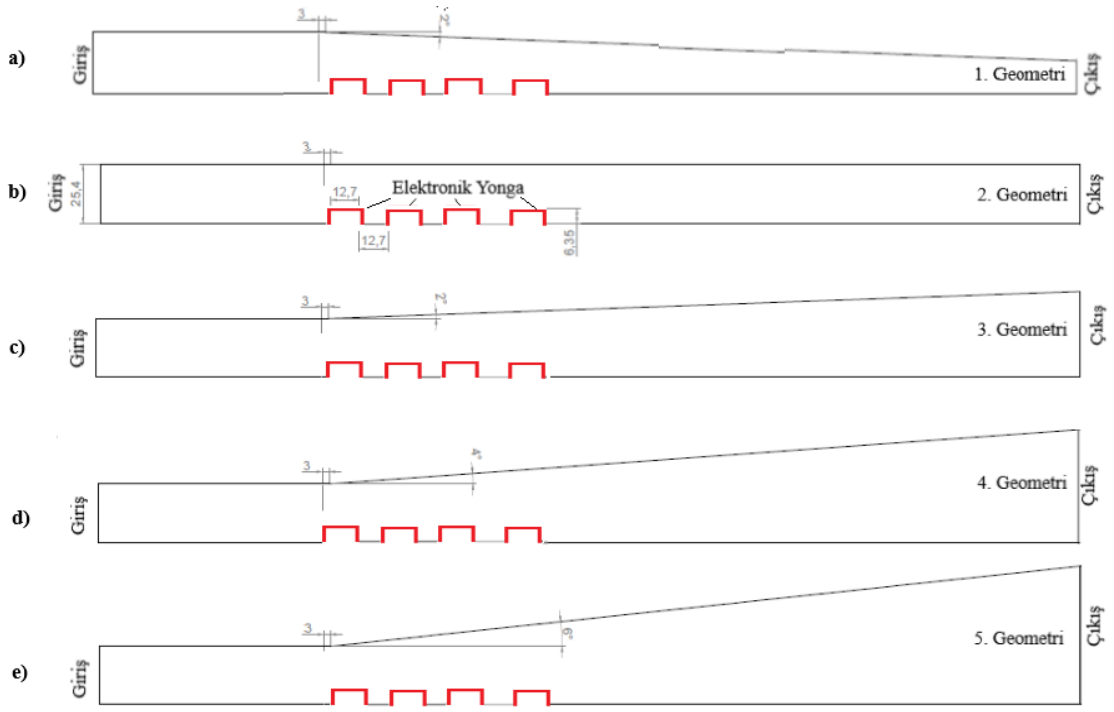
Görünüş oranı [w/h]= 2,

Paketleme yoğunluğu [s/w]= 1



Şekil 3.12. 2 boyutlu analizlerde kullanılan baz geometri (Ölçüler mm'dir.)

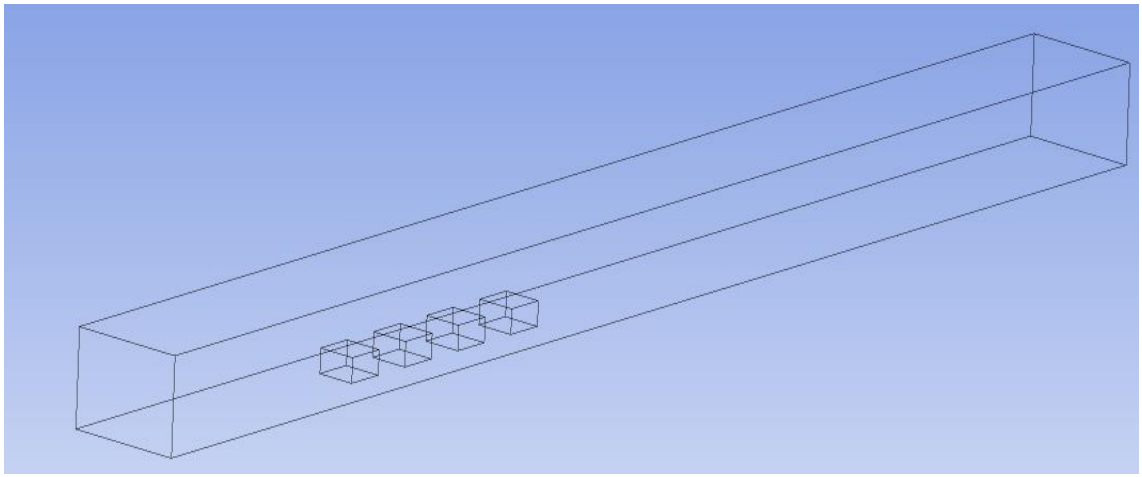
Şekil 3.13'de çalışmada basınç gradyeni elde etmek için verilen açılar ve elde edilen geometriler verilmiştir. 2. Geometri üst levhaya açı vermeden incelenen baz geometrisidir. Açı verme işlemine tüm geometrilerde ilk yongadan 0,3 cm önce başlanmıştır. 1. geometride üst levhaya -2 derece açı verilerek, 3. geometride 2 derece açı verilerek, 4. geometride 4 derece açı verilerek ve 5. geometride de 6 derece açı verilerek incelenmiştir.



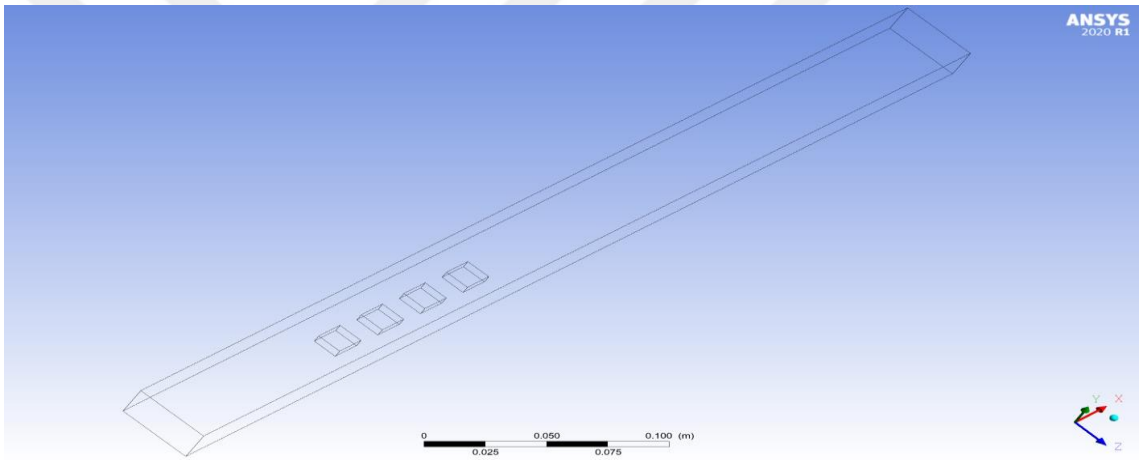
Şekil 3.13. 2 boyutlu analizlerde basınç gradyenlerinin gösterimi a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6° (Ölçüler mm'dir.)

Geometriler ve sınır şartları Davalath ve Bayazıtoglu (1987), Defraeye, Blocken, Carmeliet (2010), Meinders, Meer, Hanjalic ve Lasance (1997) ve Meinders ve diğerleri (1998) çalışmalarından esinlenerek ve uyarlanarak oluşturulmuştur.

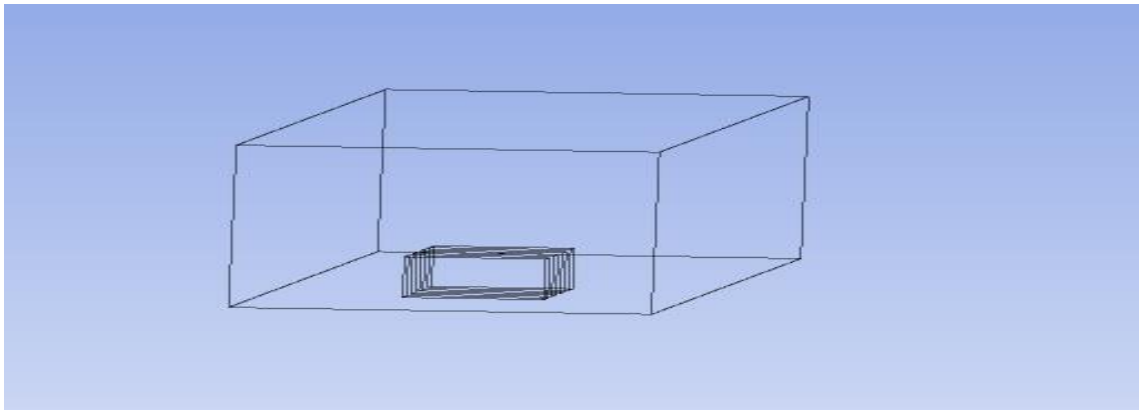
3 boyutlu analizlerde 2 boyutlu geometri 1,27 cm extrude edilmiştir. Ve ön ve arka kısmına da 1,27 cm'lik birer kanal boşluğu ilave edilmiştir. Şekil 3.14, 3.15 ve 3.16'da 3 boyutlu geometrinin farklı açılardan görünümü verilmiştir.



Şekil 3.14. 3 boyutlu analizlerde kullanılan baz geometriden xy düzleminden görüntü



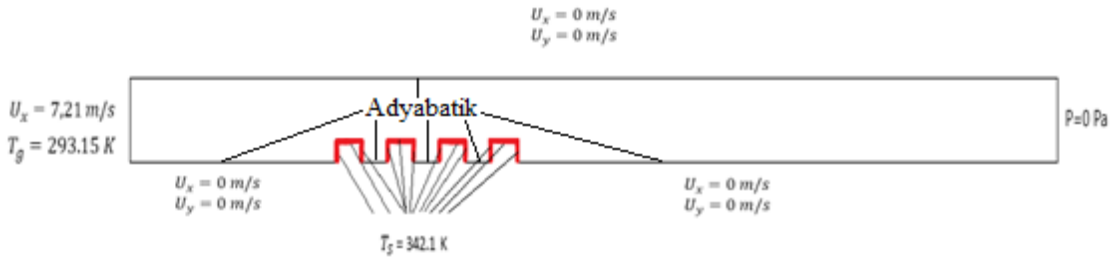
Şekil 3.15. 3 boyutlu analizlerde kullanılan baz geometriden zx düzleminde üstten görüntü



Şekil 3.16. 3 boyutlu analizlerde kullanılan baz geometriden yz düzleminde görüntü

3.9. Sınır Şartları

3.9.1. Isı transferi analizi (Sadece taşınım)



Şekil 3.17. Analizlerde kullanılan sınır şartları

Şekil 3.17'de çalışmada kullanılan sınır şartları verilmiştir. Akışkan hava kanala tüm durumlarda 293,15 K üniform sıcaklıkta girmektedir (Giriş sıcaklığı Tg =293,15 K).

Yongalar üzerindeki sıcaklık sabit ve Ts= 342,1 K (70 °C) olarak alınmıştır. Bu sıcaklık genellikle elektronik yongaların soğutma çalışmalarında karşılaşılan bir değerdir. Meinders vd., (1998) elektronik yongalardaki soğutma problemini deneysel olarak analiz ettikleri çalışmalarında ve bu çalışmadan faydalanan Shaeri vd. (2009) blok yüzey sıcaklığını sabit ve 75 °C olarak almışlardır. Diğer bütün katı yüzeylerde, yani üst yüzey ve blok ön, üst ve arka yüzeyleri hariç tüm alt yüzeyler adyabatik olarak kabul edilmiştir.

Girişte düzgün hız profili alınmış olup,
U_{x1}=7,21 m/s (Re_1=11993)
U_{x2}=5,42 m/s (Re_2=9015)
U_{x3}=3,607 m/s (Re_3=6000)
olmak üzere 3 farklı hız değerinde analizler yapılarak karşılaştırılmıştır. Bütün katı yüzeylerde hız sıfır alınmış olup cidar şartı yani kaymama şartı (no-slip condition) geçerlidir.

Re sayısı kanal giriş yüksekliğine (H) göre tanımlanmıştır (Bkz. Denklem 3.25).
Çıkış sınır şartı olarak basınç sıfır (P = 0 Pa) alınmıştır. Giriş türbülans parametreleri ANSYS-Fluent'de türbülans şiddeti-uzunluk ölçeği, türbülans şiddeti-viscosite oranı

veya türbülans-hidrolik çap ikilisinden biri cinsinden girilmektedir. Bu çalışmada türbülans şiddeti-hidrolik çap ikilisi girilmiştir. Çizelge 3.1'de sınır şartları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Sınır şartları

	Isı Transferi Analizi (Sadece Taşınım)				
	Giriş	**Blok Yüzeyi**	**Kanal Üst Yüzeyi**	**Kanal Alt Yüzeyi**	**Çıkış**
Hız (Düzgün hız profili)	7,21-5,42-3,607 m/s	0	0	0	-
Sıcaklık (Düzgün sıcaklık profili)	293 K	342 K	Adyabatik	Adyabatik	-
Basınç	-	-	-	-	0
Türbülans şiddeti (Tu)	0,04	-	-	-	-
Hidrolik Çap (Dh)	0,0508m	-	-	-	-

3.9.2 Eşlenik ısı transferi analizi (Taşınım+iletim)

Katılardaki ısı iletimini akışkandaki taşınımla birleştirerek birlikte çözmek için eşlenik ısı transferi (conjugate heat transfer) analizi kullanılır. Eşlenik analizlerde ise, katı/akışkan ara yüzeyinde enerji dengesinden aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$k_s \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0} = k_f \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0} \tag{3.30}$$

Yüzeyden taşınımla olan ısı transferinin denklem 3.26'dan $q = h\,(T_S - T_f)$ olduğu hatırlanırsa ısı taşınım katsayıları akışkan-katı ara yüzeylerinde

$$h = \frac{k_f \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0}}{(T_s - T_f)} \tag{3.31}$$

eşitliği ile hesaplanır.

Burada k_s katı malzemenin ısı iletim katsayısı, k_f 'de akışkanın ısı iletim katsayısı olup eşlenik etkiler literatürde (Ramadhyani vd., 1985; Sugavanam, Ortega ve Choi, 1995 ve

Cole, 2008) genellikle bu iki değerin oranı şeklinde ifade edilir ve ısıl iletim oranı olarak adlandırılır. Bu çalışmada,

Bakalit için ısıl iletim oranı: $k_s / k_f = 57$

FR-4 için ısıl iletim oranı: $k_s / k_f = 14$ olarak belirlenmiştir.

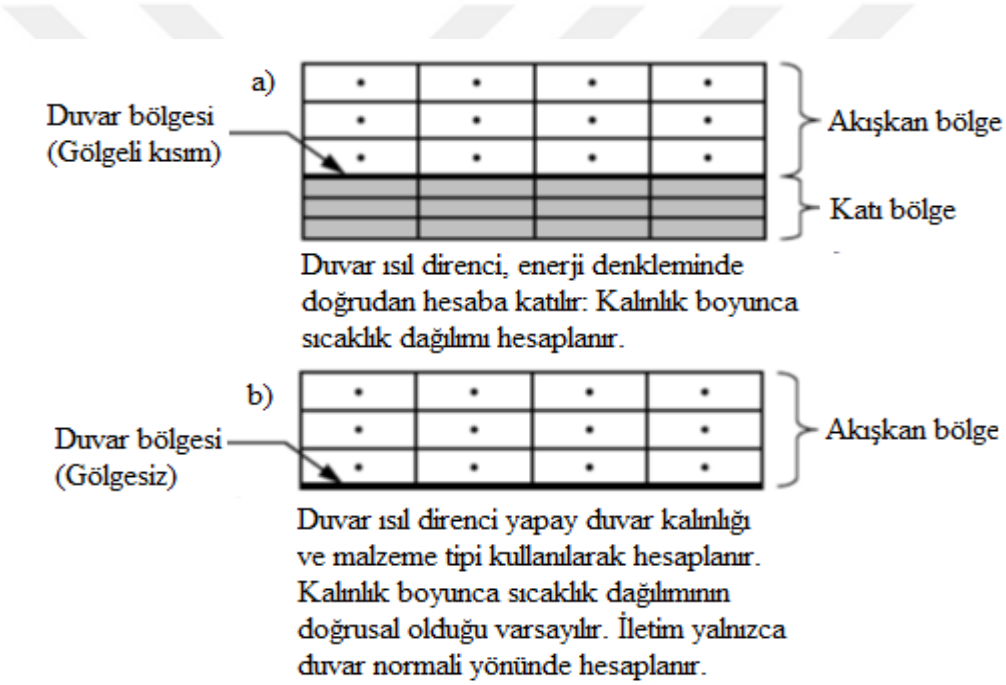
Eşlenik ısı transferi analizinde sadece ısı transferi analizinden farklı olarak blok dışındaki alt yüzeylerde (girişten birinci bloğa kadar olan giriş alt yüzeyi, bloklar arası alt yüzeyler ve son bloktan kanal çıkışına kadar olan çıkış alt yüzeyi) adyabatik sınır şartı uygulanmamış olup bu yüzeylerde ve bu yüzeylerin altındaki katı malzemelerde sıcaklık dağılımı hesaplanmaktadır. Ayrıca bloklar da katı malzeme olarak alındığından bloklar içindeki sıcaklık dağılımı da hesaplanmaktadır. Sınır şartları genel olarak Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Eşlenik ısı transferi sınır şartları

	Eşlenik Isı Transferi Analizi (Taşınım+İletim)				
	Giriş	**Blok Yüzeyi**	**Kanal Üst Yüzeyi**	**Kanal Alt Yüzeyi**	**Çıkış**
Hız (Düzgün hız profili)	7,21-5,42-3,607 m/s	0	0	0	-
Sıcaklık (Düzgün sıcaklık profili)	293 K	342 K	Adyabatik	-	-
Basınç	-	-	-	-	0
Türbülans şiddeti (Tu)	0,04	-	-	-	-
Hidrolik Çap (Dh)	0,0508m	-	-	-	-

ANSYS Fluent 2B analizlerde duvar ısı transferi için Ağlara Bölünmüş Duvar (Meshed Wall) ve İnce Duvar (Thin Wall) olmak üzere Şekil 3.18'deki gibi iki yaklaşım kullanmaktadır. Bu çalışmada Ağlara Bölünmüş Duvar modeli kullanılmıştır. Bu modelde duvarı temsil eden katı bölgede enerji denklemi çözülmekte, bu yüzden de duvar kalınlığı ağlara bölünmek zorundadır. Duvarın hem akışkan hem de katı tarafında ağlar bulunduğu için bu modelde daima birleşik (coupled) ısıl sınır şartı kullanılır. Böylece bu modelde akışkan tarafı ile beraber katı tarafındaki sıcaklık dağılımı da hesaplanabilmektedir. Bu çalışmanın eşlenik ısı transferi bölümünde hem akışkan hem de katı içerisindeki sıcaklık dağılımları görülebilir.

ANSYS Fluent'de 3B analizlerde 2B analizlerdeki yaklaşımlara ek olarak bir de duvar ısı transferi için Kabuk İletim Opsiyonu (Shell Conduction Option) bulunmaktadır. Bu yaklaşım, 3B analizde düzlemde iletim hesaplarını yapabilmek için kullanılır. Ek olarak duvar içerisinde iletim ağları oluşturulmasına rağmen görüntülenemezler ve Kullanıcı Tanımlı Fonksiyonlar (KTF – UDF - User Defined Function) kullanılarak da görüntülenmesi sağlanamaz. İletim bölgesinde (Katı duvarda) katı özellikleri sabit olmalıdır ve sıcaklığa bağlı olarak tanımlanmamalıdır. Bu çalışmada 3B analizlerde hesaplama zamanında önemli azalmalara sebep olduğu için Kabuk İletim Opsiyonu kullanılmıştır. Bu yaklaşımda katı içerisindeki iletim dikkate alınmasına rağmen sıcaklık dağılımları görüntülenememektedir. Çünkü bu yaklaşımda katı ağlara bölünmemektedir.



Şekil 3.18. Eşlenik analizlerde kullanılan yaklaşımlar a) Ağlara bölünmüş duvar yaklaşımı (Bu çalışmada kullanılan) b) İnce duvar yaklaşımı (ANSYS fluent Release 13.0, December 2010)

3.10. Akışkan ve Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Akışkan olarak kullanılan havanın 293,15 K 'deki özellikleri aşağıdaki gibidir.

k=0.0245 W/mK

ρ =1.204 kg/m^3

$c_p = 1007\ j/kgK$ (Çengel, 2010)

Silikon malzemenin özellikleri aşağıdaki gibidir.

k=148 W/mK

ρ =2330 kg/m^3

$c_p = 712\ j/kgK$ (Adams, Joshi ve Blackburn, 1999)

Bakalit malzemenin özellikleri aşağıdaki gibidir.

k=1.4 W/mK

ρ =1300 kg/m^3

$c_p = 1465\ j/kgK$ (Incropera ve Dewitt, 2001)

FR-4 malzemenin özellikleri aşağıdaki gibidir.

k=0.35 W/mK

ρ =1900 kg/m^3

$c_p = 930\ j/kgK$ (Adams ve diğerleri, 1999)

3.11. Ağdan Bağımsızlık Çalışması

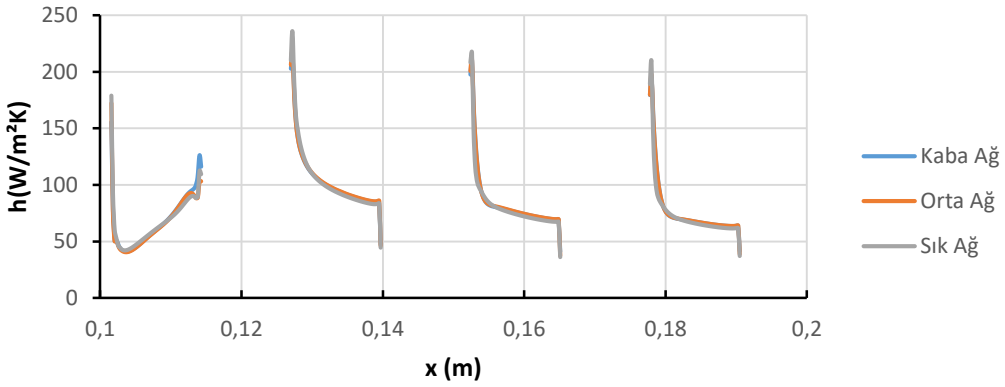
3.11.1. 2 boyutlu model

Baz geometri için çözüm alanı kaba, orta ve sık ağlara bölünerek ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Çalışılan ağlar için eleman sayıları Çizelge 3.3'de verilmiştir. Ağlar oluşturulurken yongalar üst yüzeyi ve cidarlar sık ağlara bölünmüş olup baz geometrinin sık ağ yapısı Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de, yüzey ısı taşınım katsayıları üzerinden ağdan bağımsızlık çalışması ise Şekil 3.19'da gösterilmiştir. Şekil 3.19'dan görüldüğü gibi orta ve sık ağlarda elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakın, kaba ağ da ise birinci yongadaki değerler onlardan farklı olduğu için sık ağ yapısı seçilmiştir. Ayrıca SST k-ω türbülans modeli y^+ değerini daha düşük değerde isteği için sık ağ yapısının seçilmesi uygun görülmüştür.

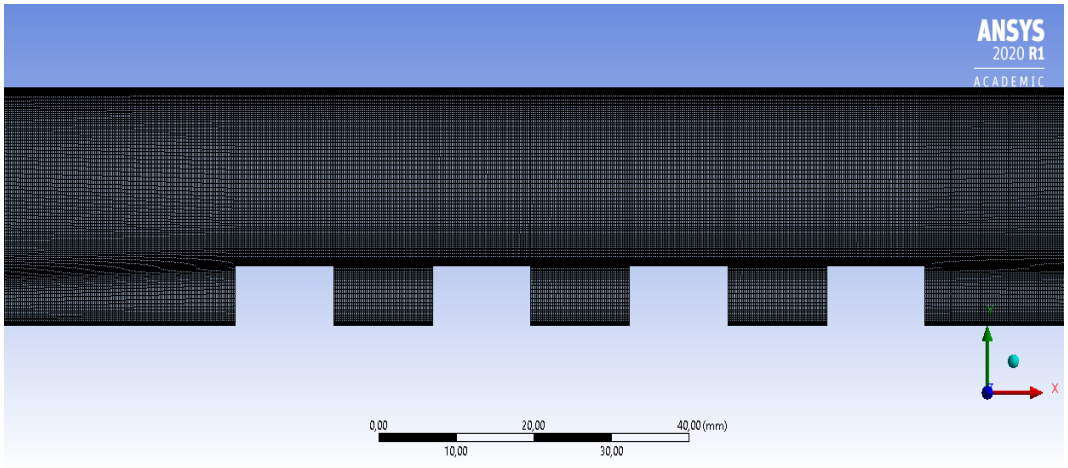
Ağ yapısı oluşturulurken her kenar ayrı ayrı number of division yöntemiyle bölünmüştür. Dikdörtgen mesh elemanları elde edebilmek amacıyla face meshing yöntemi uygulanmıştır.

Çizelge 3.3. 2 boyutlu analizlerde baz geometrideki eleman sayıları

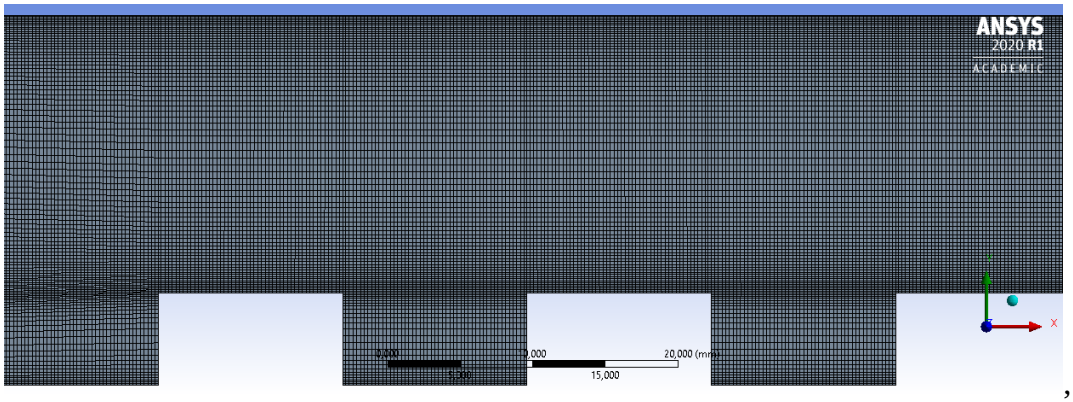
Kanal genişleme oranı ve ağ yapısı		**Geometri**
Kanal genişleme oranı	$\frac{H}{H-h}$	1,33
Ağ Yapısı	Kaba	96387
	Orta	141317
	Sık (Seçilen)	**194892**



Şekil 3.19. 2 boyutlu analizlerde ağdan bağımsızlık çalışması



Şekil 3.20. 2 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı görünümü



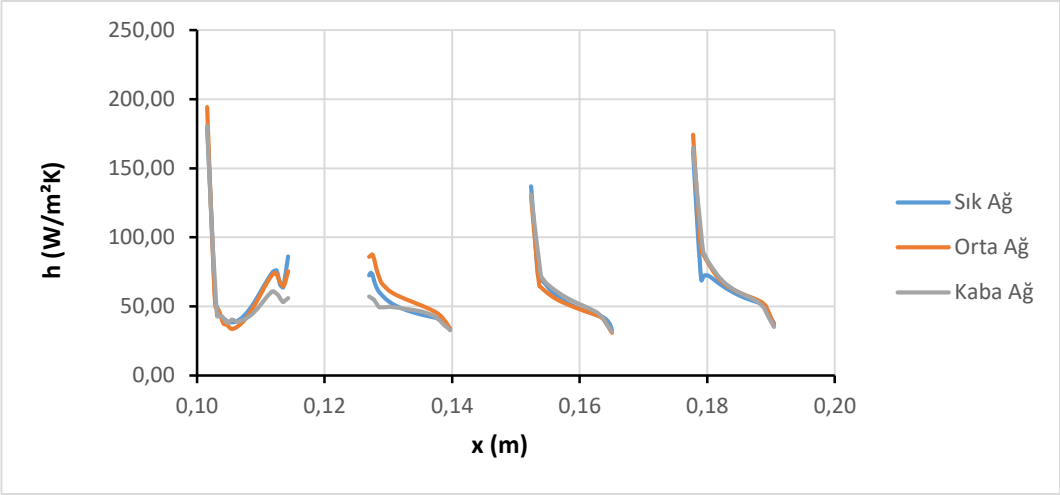
Şekil 3.21. 2 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı yakın görünümü

3.11.2. 3 boyutlu model

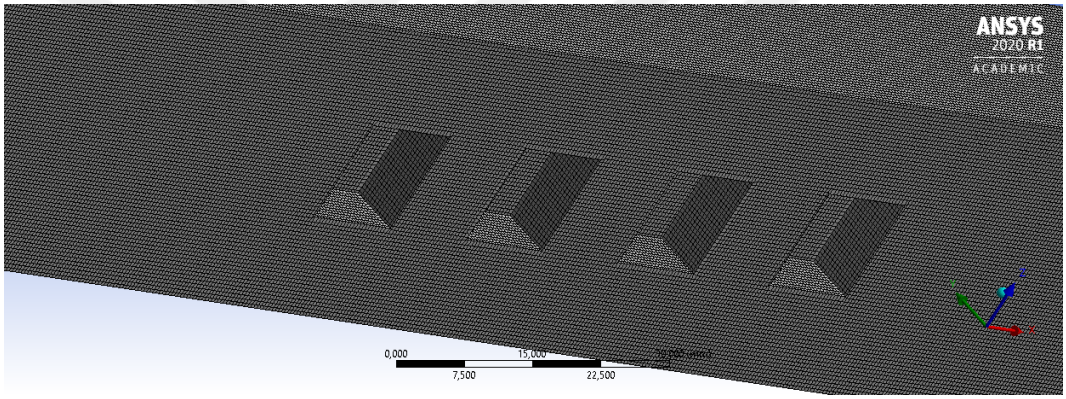
3 boyutlu analizde cutcell mesh yöntemi kullanılmış olup her eleman karelerden oluşmaktadır. Burada da yongalar civarında ve duvar kısımlarda sık mesh uygulaması yapılmıştır. Bu uygulama inflation metodu kullanılarak yapılmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışması yapılırken ise body size boyutu değiştirilerek farklı eleman sayısı elde edilmiştir. Şekil 3.22'de 3 boyutlu modelin ısı taşınım katsayısı üzerinden ağdan bağımsızlık çalışması verilmiştir. Şekil 3.23, 3.24 ve 3.25'de 3 boyutlu geometrinin sık ağ yapısındaki elemanlara bölünmüş hali verilmiştir. Çizelge 3.4'de baz geometride ağdan bağımsızlık çalışmasında elde edilen eleman sayıları verilmiştir.

Çizelge 3.4. 3 boyutlu analizlerde baz geometrideki eleman sayıları

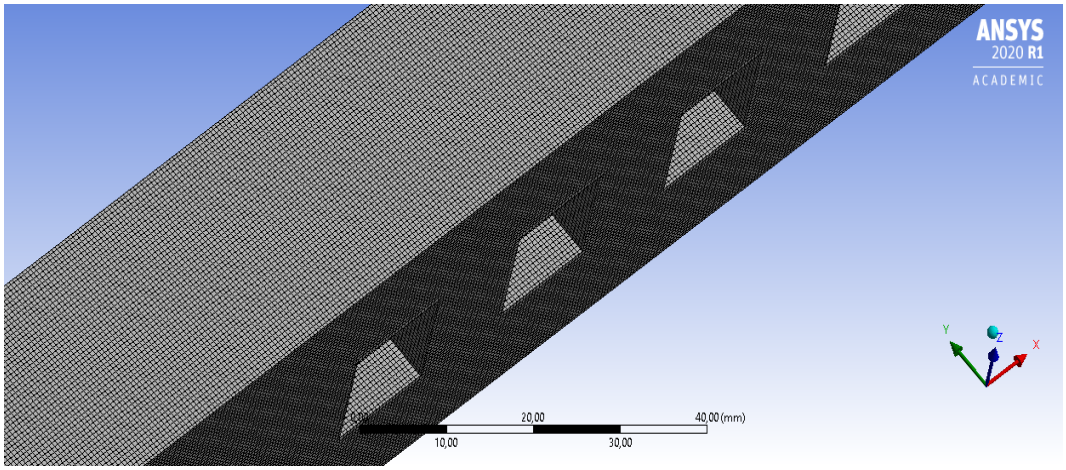
Kanal genişleme oranı ve ağ yapısı		**Geometri**
Kanal genişleme oranı	$\frac{H}{H-h}$	1,33
Ağ Yapısı	Kaba	1272832
	Orta	2380000
	Sık (Seçilen)	**4408944**



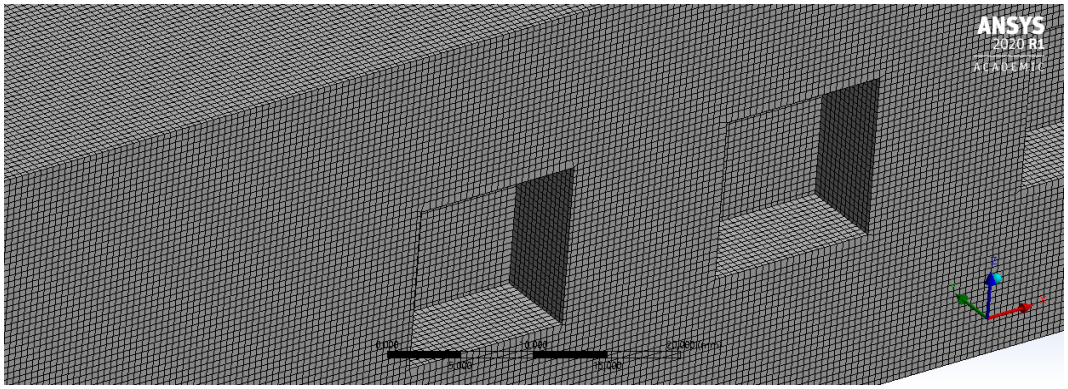
Şekil 3.22. 3 boyutlu analizlerde ağdan bağımsızlık çalışması



Şekil 3.23. 3 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı görünümü



Şekil 3.24. 3 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı görünümü -2



Şekil 3.25. 3 boyutlu analizlerde kullanılan mesh yapısı yakın görünümü

3.12. y^+ Değerlendirmesi

Türbülans modeli ve kullanılan ağın uygunluğu için tüm geometrilerde y^+ değerleri de elde edilmiştir. Park, Choi, Yoo ve Kim (2003) ve Jaramillo, Pérez-Segarra, Oliva ve Claramunt (2007), k-ω ve k-ω tabanlı modellerde y^+ değerinin 2.5'in altında olması gerektiğini önermişlerdir. Çizelge 3.5'de 2 boyutlu analizlerde elde edilen ortalama, minimum ve maksimum y^+ değerleri verilmiştir. Çizelge 3.6'da ise 3 boyutlu analizlerde elde edilen ortalama, minimum ve maksimum y^+ değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. 2 boyutlu analizler de hız U=7,21 m/s için y^+ değerleri

	y^+_{ort}	y^+_{min}	y^+_{max}
Sık Ağ	1,525959	0,0297	4,99845
Orta Ağ	2,704431	0,625079	6,41723
Kaba Ağ	3,567	0,8237	7,3537

Çizelge 3.6. 3 boyutlu analizler de hız U=7,21 m/s için y^+ değerleri

	y^+_{ort}	y^+_{min}	y^+_{max}
Sık Ağ	0,48103	0,040568	1,09
Orta Ağ	0,502324	0,06996	1,25694
Kaba Ağ	0,588846	0,078097	1,33

3.13. Sayısal Yöntem

Sürekli rejimde, türbülanslı, sıkıştırılamaz, iki ve üç boyutlu korunum denklemleri ANSYS-Fluent 20.0 kullanılarak çözülmüştür. Türbülans modeli olarak SST k-ω kullanılmıştır. Menter (1994) tarafından geliştirilen bu model hem k- ε modelini hem de k-ω modelini kullanan hybrid bir model olup, k- ε modelini ε = k ω formülasyonu kullanılarak k-ω modeline dönüştürür. Bu dönüştürmeyle elde edilen özellikler SST k-ω modelini ters basınç gradyenli akışlar için oldukça hassas ve güvenilir kıldığı için basınç gradyeninin etkilerinin de araştırıldığı bu çalışmada bu model kullanılmıştır. Defraeye ve diğerleri (2010) bloklar üzerinden yaptığı bir conjugate analizde SST k-ω modelinin deneysel sonuca en yakın değeri verdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca Changcharoen ve Eiamsa-ard (2011) bir kanala ribler yerleştirerek onlar üzerinden ısı transferini hesapladığı çalışmasında SST k-ω modelinin k-ε modelinden daha doğru sonuçlar verdiğini vurgulamıştır. Korunum denklemlerinin çözümünde hız ve basınç SIMPLE algoritması kullanılarak birbirine bağlanmıştır. Gupta ve diğerleri (2019) yaptığı bloklar üzerinden akış çalışmasında ve Anwar-ul-Haque, Yamuda ve Chaudhry (2007) yaptığı geri basamak akışı çalışmasında SIMPLE algoritması uygulayarak en uygun sonucu verdiğini bildirmişlerdir. Uzaysal ayrıklaştırmada (spatial discrezation) gradient için en küçük kareler hücre tabanlı, basınç için ikinci derece, momentum için ikinci derece upwind ve enerji için ikinci derece upwind kullanılmıştır.

Çizelge 3.7'de iki boyutlu analizlerdeki yakınsama kriterleri ve Çizelge 3.8'de ise üç boyutlu analizler için belirlenen yakınsama kriterleri verilmiştir.

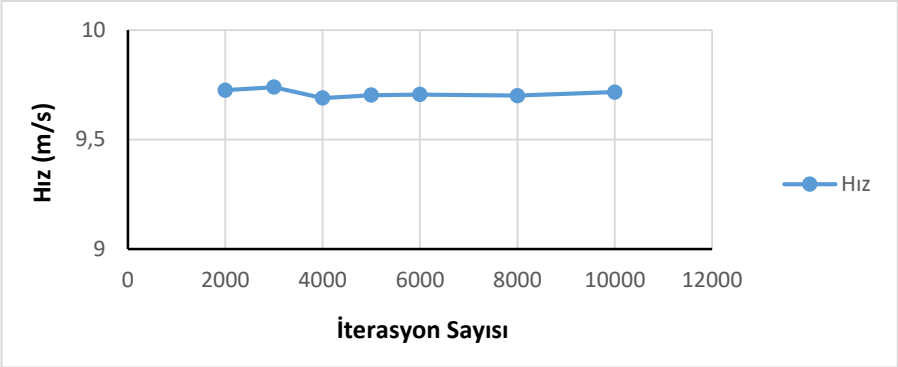
Çizelge 3.7. 2 boyutlu analizlerde her bir parametre için ayarlanan yakınsama kriteri

Parametreler	Yakınsama Kriteri
Süreklilik	1.10^{-5}
x yönündeki hız	1.10^{-5}
y yönündeki hız	1.10^{-5}
z yönündeki hız	1.10^{-5}
Enerji	1.10^{-6}
k	1.10^{-5}

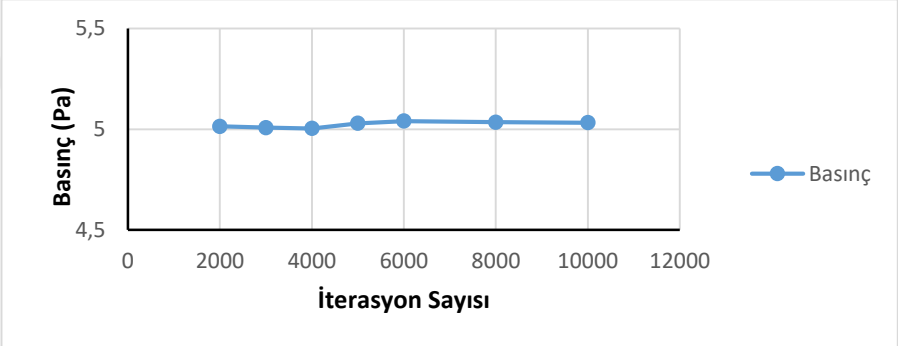
Çizelge 3.8. 3 boyutlu analizlerde her bir parametre için ayarlanan yakınsama kriteri

Parametreler	Yakınsama Kriteri
Süreklilik	1.10^{-4}
x yönündeki hız	1.10^{-4}
y yönündeki hız	1.10^{-4}
z yönündeki hız	1.10^{-4}
Enerji	1.10^{-6}
k	1.10^{-4}

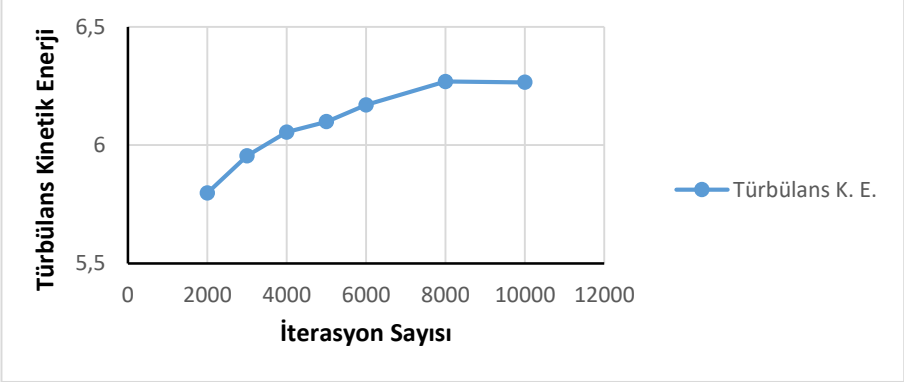
3 boyutlu analizlerde 2 boyutlu analizdeki gibi yakınsama 10^{-5}'e kadar ulaşmadığı için burada iterasyondan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Yapılan iterasyondan bağımsızlık çalışmasında hızın ve basıncın değişiminin 5000 iterasyondan, türbülans kinetik enerjinin değişiminin ise 8000 iterasyondan itibaren değişmediği görülmüştür. Bu değişimler Şekil 3.26, 3.27 ve 3.28 yardımıyla görülebilir. Bu nedenle yapılan tüm 3 boyutlu analizlerde iterasyon sayısı 8000 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.26. 3 boyutlu analizlerde hızın iterasyonla değişimi



Şekil 3.27. 3 boyutlu analizlerde basıncın iterasyonla değişimi

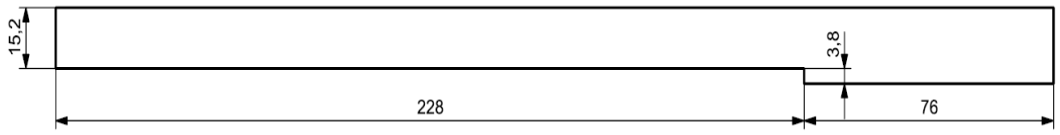


Şekil 3.28. 3 boyutlu analizlerde türbülans kinetik enerjinin iterasyonla değişimi

3.14. Validasyon (Doğrulama) Çalışması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı programlar ile yapılan çalışmaların güvenilir olup olmadığını kontrol etmek için doğrulama (validasyon) işlemi yapılması çok önemlidir. Bu çalışmada da doğrulama testi için Vogel ve Eaton'ın (1985) geri basamak

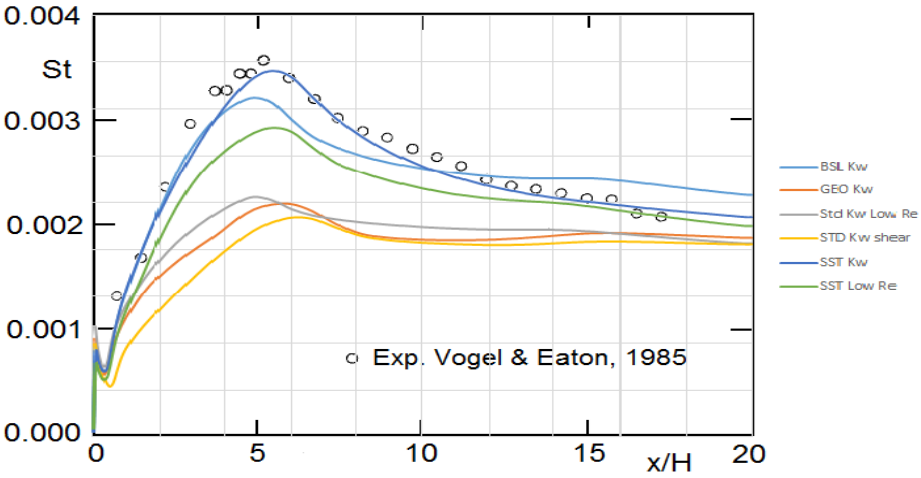
akışını ve ısı transferini inceledikleri deneysel çalışmaları kullanılmıştır. Onların çalışmaları ısıtılmış bloklu yüzeylerden akışlarda karşılaşılan ayrılmış akışlara örnek teşkil ettiği için ve bu çalışmada da ayrılmış akışlar bulunduğu için tercih edilmiştir. Doğrulama testinde kullanılan geometrik model Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



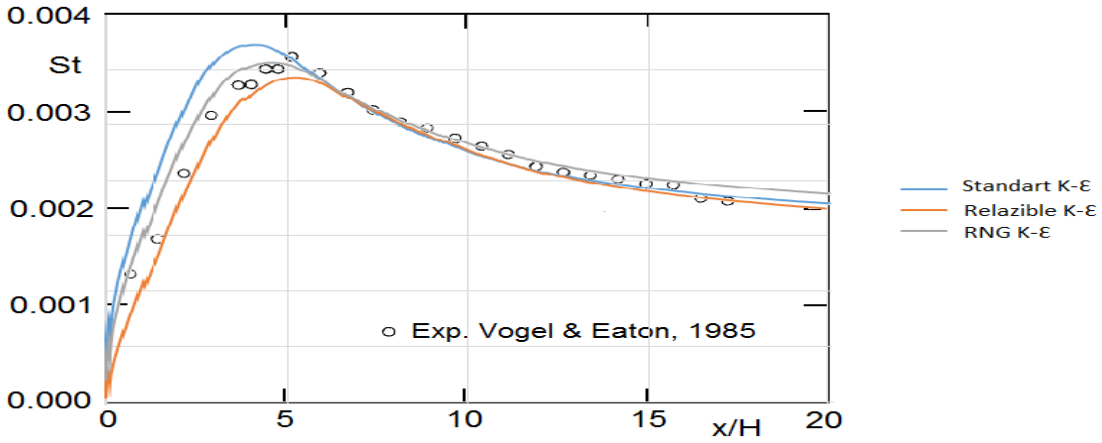
Şekil 3.29. Validasyon çalışması geometrisi (Vogel ve Eaton 1985)

Vogel ve Eaton'ın (1985) çalışmasında kullandıkları model, aynı ölçülerle 2 boyutlu olarak modellenmiştir ve aynı sınır şartları girilerek ANSYS Fluent aracılığıyla çözdürülüp sonuçlar alınmıştır. Çalışmada sabit bir hız girişi tanımlanmıştır. Basamaktan sonra ise sabit ısı akısı uygulanmış olup çıkışta basınç çıkışı tanımlanmıştır. Diğer duvarlar adyabatik olarak alınmıştır.

Stanton (St) sayısı literatürde (Incorepara ve DeWitt, 2001) değiştirilmiş Nu sayısı olarak adlandırılır ve $h/(\rho V c_p) = Nu/Re * Pr$ olarak tanımlanır. Vogel ve Eaton (1985) çalışmalarında Stanton sayısı kullandıkları için aşağıdaki Şekil 3.30 ve 3.31'de gösterilen doğrulama çalışmasında da Stanton sayısı kullanılmıştır. Ayrıca bu doğrulama çalışması en uygun türbülans modelinin belirlenmesinde de göz önüne alınmıştır. Stanton sayısı hesabında Vogel ve Eaton'ın (1985) yaptığı deneysel çalışma ile türbülans modelleri karşılaştırıldığında SST k-ω modelinin en yakın sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Defraeye ve diğerleri (2010) ve Changcharoen ve Eiamsa-ard (2011)'de yukarıda Sayısal Yöntem bölümünde (Bölüm 3.12) belirtildiği gibi bloklar ve uzunlamasına bloklar (rib) üzerinden olan akış ve ısı transferi analizlerinde bu modeli yani SST k-ω modelini önermişlerdir.



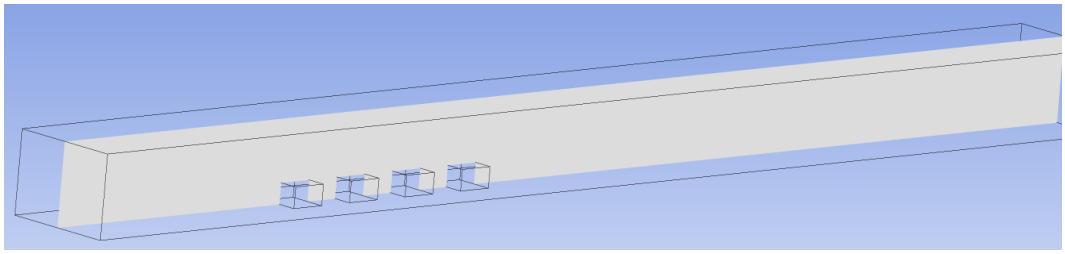
Şekil 3.30. k-w türbülans modellerinin doğrulama çalışmasına uygulanması



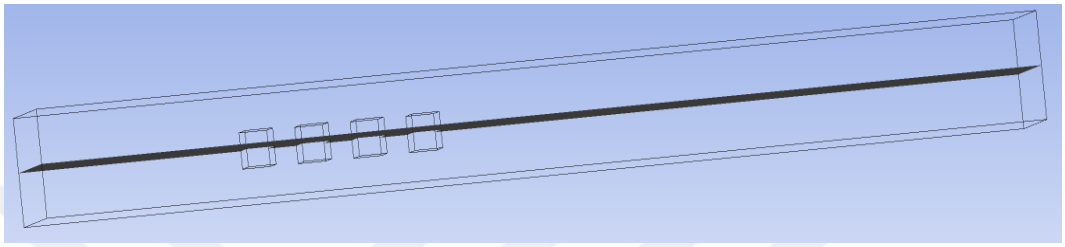
Şekil 3.31. k-Ɛ türbülans modellerinin doğrulama çalışmasına uygulanması

3.15. 2 ve 3 Boyutlu Geometrilerde Analiz Sonuçlarının Elde Edilmesi

3 boyutlu analizlerde elde edilen veriler lokal plaka üzerinden alınmıştır. Tüm kontür ve grafik verileri bu plaka üzerindeki veriler alınarak değerlendirilmiştir. Bu plakanın konumunun farklı görünümleri Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'den görülebilir.



Şekil 3.32. 3 boyutlu geometride karşıdan görünüm



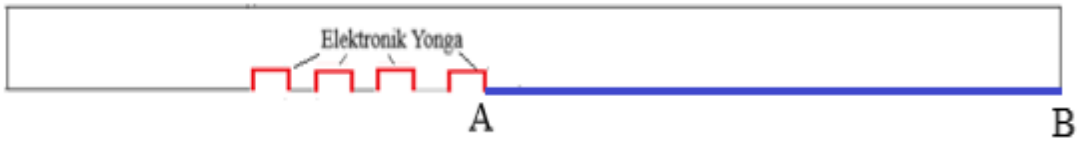
Şekil 3.33. 3 boyutlu geometride üstten görünüm

2 ve 3 boyutlu geometrilerde basınç grafiği çizdirilirken Şekil 3.34'de gösterildiği konumda çizdirilmiştir. A-B arasında blok üstü değerler, C-D arasında kanal ortası değerler ve E-F arasında kanal üstü değerler çizdirilmiştir.



Şekil 3.34. Basınç grafiği çizdirilen konumların gösterilmesi

2 ve 3 boyutlu geometrilerde kayma gerilmesi grafiği çizdirilirken Şekil 3.35'de gösterildiği gibi A-B arasında çizdirilmiştir.



Şekil 3.35. Kayma gerilmesi çizdirilen konumun gösterilmesi

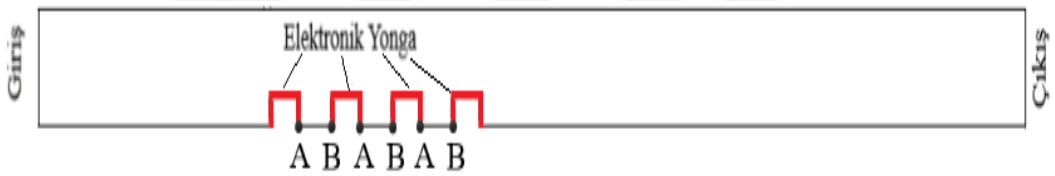
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 2 Boyutlu Geometride Yapılan İncelemeler

4.1.1. 2 Boyutlu geometride bloklar arası mesafenin incelenmesi

Bu çalışma 3 farklı hızda 3 farklı bloklar arası mesafe için yapılmıştır.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi bloklar arası mesafenin değişimini incelemek amacıyla Şekil 4.1'deki A-B aralığı yani bloklar arası mesafe baz geometride alınan değer dışında 2 değer daha alınarak 3 farklı hızda inceleme yapılmıştır. Baz geometride A-B aralığı 1,27 cm olmakla beraber, her 4 yonga arası için 0,635 cm ve 1,905 cm alınarak analiz yapılmıştır. Bloklar arası mesafenin değişimini incelemek için toplam 9 adet analiz yapılmıştır.

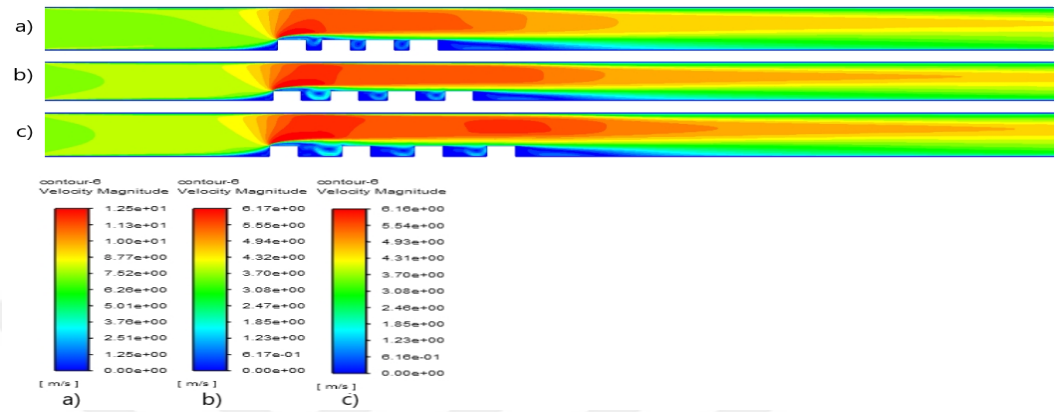


Şekil 4.1. Bloklar arası mesafenin değişiminin gösterimi

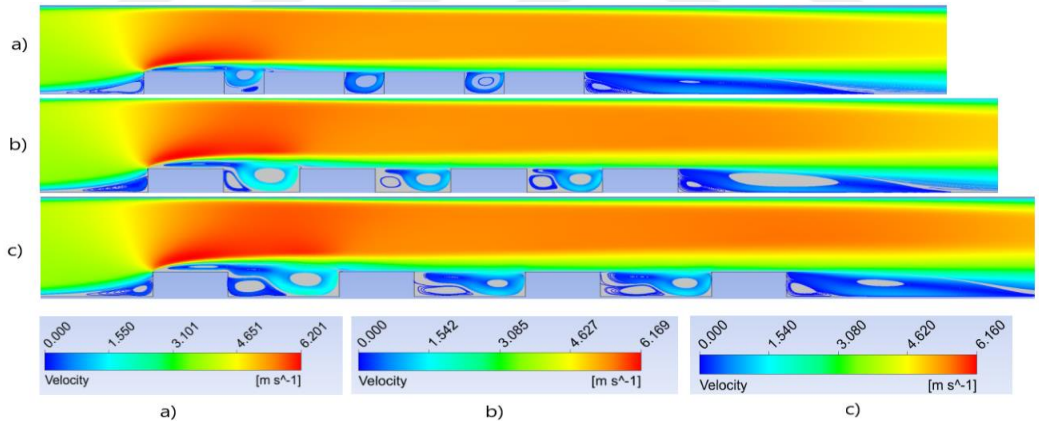
Re= 6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.2 ve 4.3 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmekte ve maksimum sıcaklık birinci bloğun üstünde oluşmaktadır. Bütün bloklar arası mesafeler için ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde küçük bir girdap oluşmaktadır. En küçük bloklar arası mesafede ilk çukurun sağ alt köşesinde küçük bir saat yönünün tersinde girdap oluşmakta diğer iki çukurda oluşmamaktadır. Bloklar arası mesafe arttıkça bütün çukurların ön tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmakta ve mesafe arttıkça girdap boyu artmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bütün bloklar arası mesafeler için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.4). Ayrıca son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. En büyük bloklar arası mesafede birinci bloğun

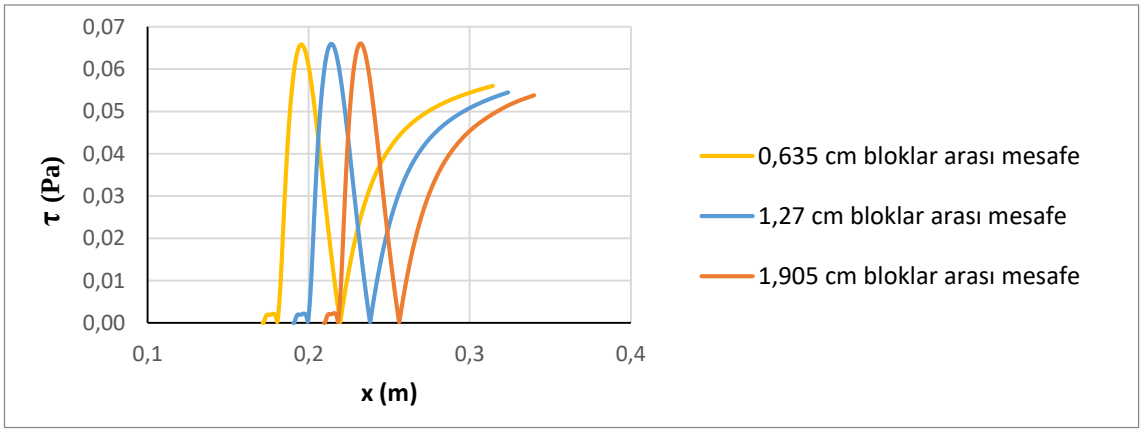
arkasında olan saat yönündeki 1. girdap birinci bloğun üzerindeki akışı etkilemektedir. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.4'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

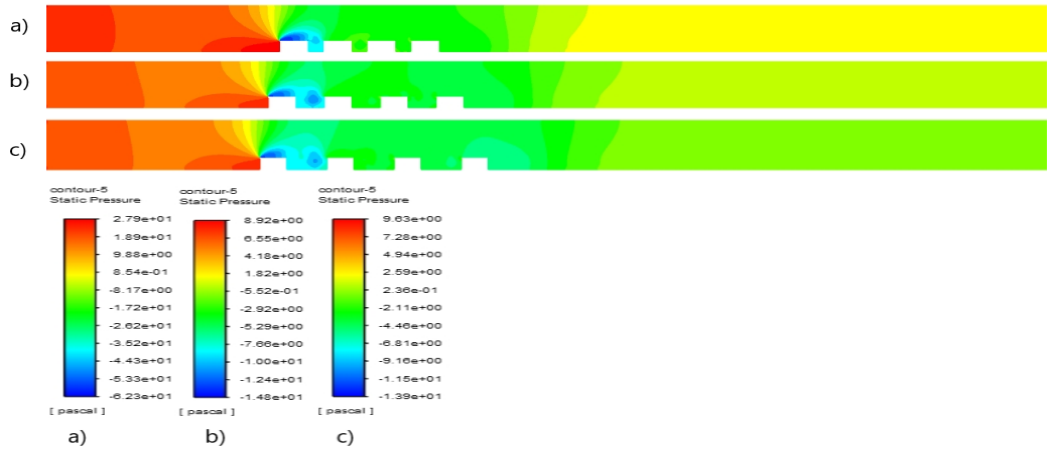


Şekil 4.3. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

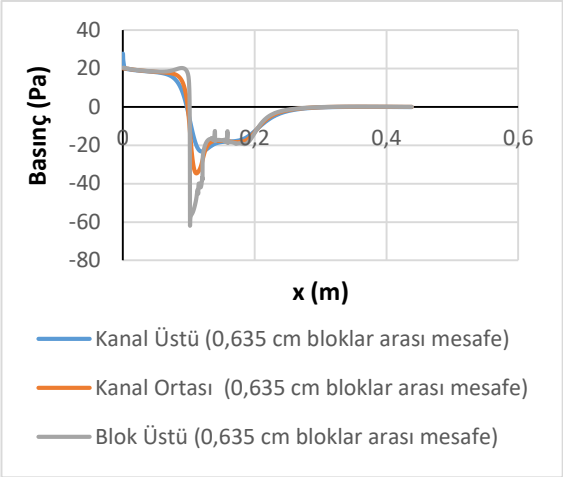


Şekil 4.4. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

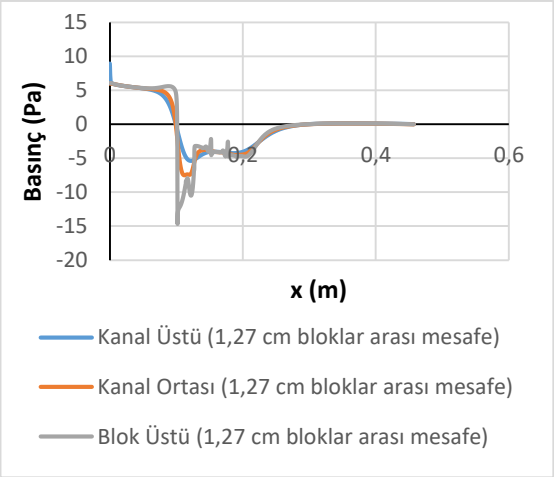
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.5'te verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstünde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın düşmesine yorulmalıdır. Bloklar arası mesafe arttıkça Şekil 4.2'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız a için 12,5 m/s'den b ve c'de 6,17 ve 6,16 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.5'te b ve c'deki basınçlarda a'dakinden daha az düşmüştür (a'daki minimum basınç -62,3 Pa b ve c'deki minimum basınçlar ise -14,8 ve -13,9 Pa olarak hesaplanmıştır).



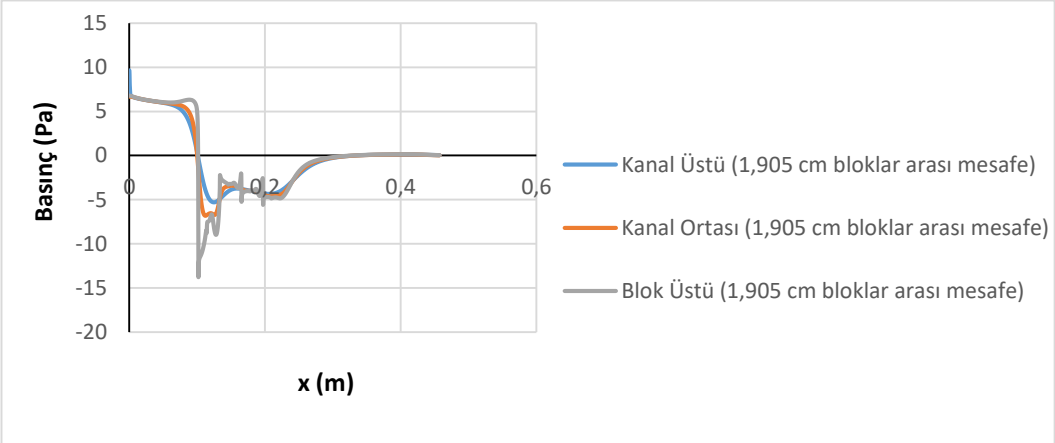
Şekil 4.5. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe



Şekil 4.6. 0,635 cm bloklar arası mesafe için basınç grafiği



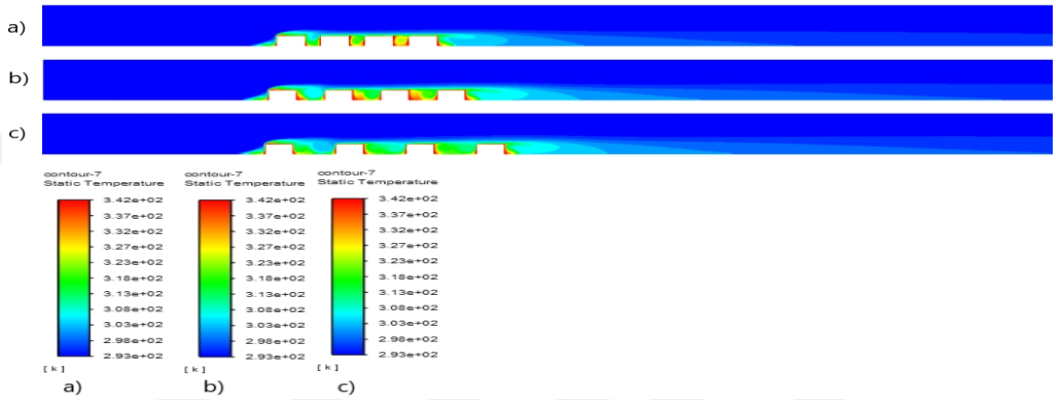
Şekil 4.7. 1,27 cm bloklar arası mesafe için basınç grafiği



Şekil 4.8. 1,905 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi

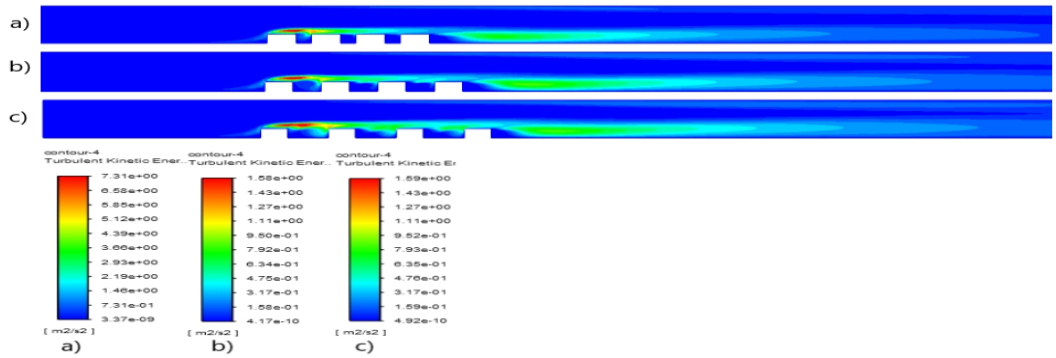
Şekil 4.9'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Bloklar arası mesafenin daha az olduğu Şekil 4.9 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu

görülmektedir. Bloklar arası mesafenin en az olduğu Şekil 4.9 a durumunda Şekil 4.3'den de görülebileceği gibi bloklar arasında öndeki küçük ikincil girdap oluşmadığı için bu etki hemen hemen yok gibidir. Fakat son çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurda sıcaklık artmaktadır. Ancak bu etki yongalar arası mesafe arttığında Şekil 4.9 c'den de görülebileceği gibi azalmaktadır. Bu azalma buradaki çukurlardaki ilk girdapların daha uzun olduğundan dolayı bu girdap akışlarının ikincil girdapla daha fazla temaslarına yorulabilir.



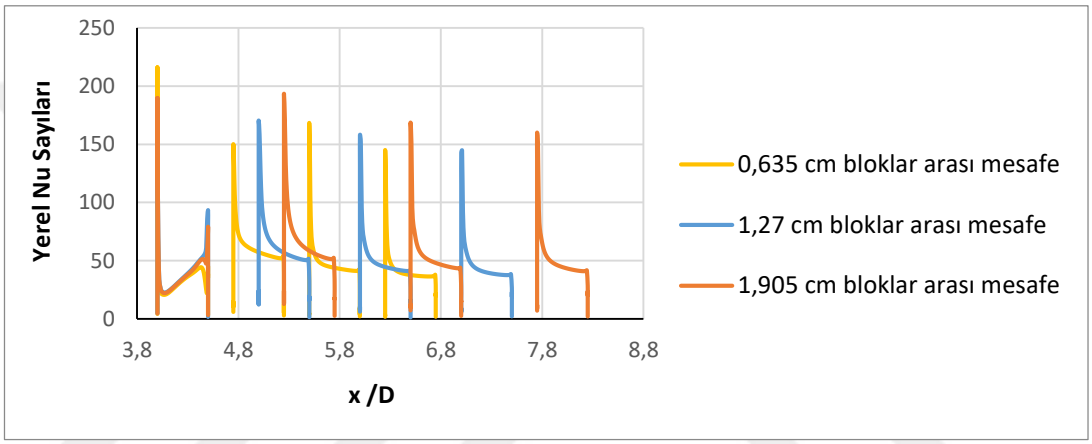
Şekil 4.9. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

Şekil 4.10'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup bloklar arası mesafe attıkça maksimum etki alanı yayılmaktadır. Ayrıca blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup bloklar arası mesafe arttıkça çıkışa ve üst duvara doğru yayılmaktadır.



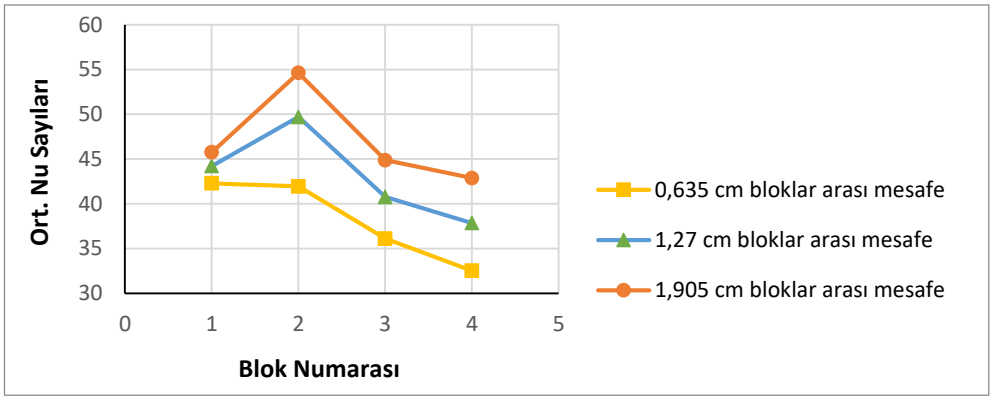
Şekil 4.10. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

Şekil 4.11'de farklı bloklar arası mesafe için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı bloklar arası mesafenin en az olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülürken üçüncü yonga üzerinde tekrar bir artış gözlenmiştir. Bloklar arası mesafe arttıkça elde edilen maksimum Nusselt sayısı ikinci blok üzerinde elde edilmiş olup en düşük Nu sayısı ise en son yonga üzerindedir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.11. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.12'de tüm geometriler için, yani bloklar arası mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.12'de ilk göze çarpan nokta bloklar arası mesafe arttıkça ortalama Nu sayısının sayısının da artmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı bloklar arası mesafenin daha az olduğu durumda birinci yonga üzerinde edilirken, bloklar arası mesafe arttıkça ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Her üç durumda da en düşük değer son yonga üzerinde elde edilmiştir. Bloklar arası mesafenin artmasıyla maksimum ortalama Nu sayısının artması Şekil 4.10'dan da görülebileceği gibi türbülansın ikinci bloğa doğru artmasına yorulabilir. Çizelge 4.1'de de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayıları bulunmuştur. Çizelge 4.1'den de görülebileceği gibi bloklar arası mesafenin artması ortalama ısı transferini artmıştır.



Şekil 4.12. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

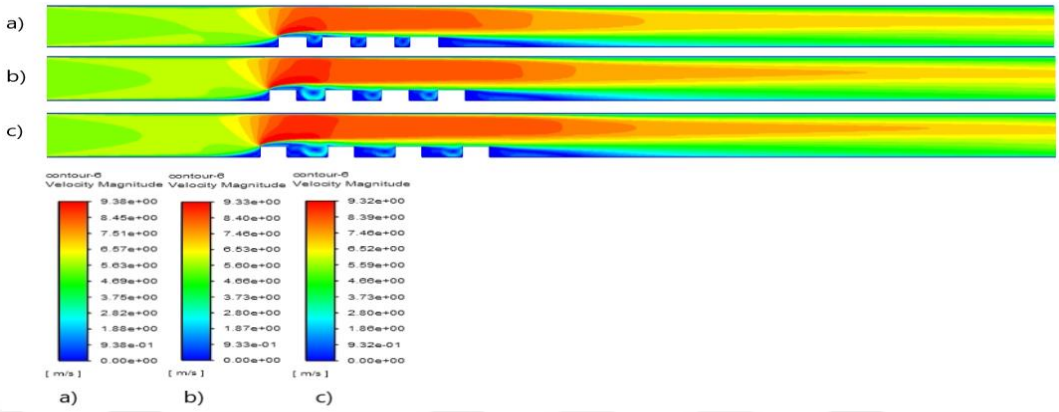
Çizelge 4.1. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar arası mesafe ile bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayısının değişimi

Bloklar Arası Mesafe	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	38,2
1,27 cm	43,12
1,905 cm	47,02

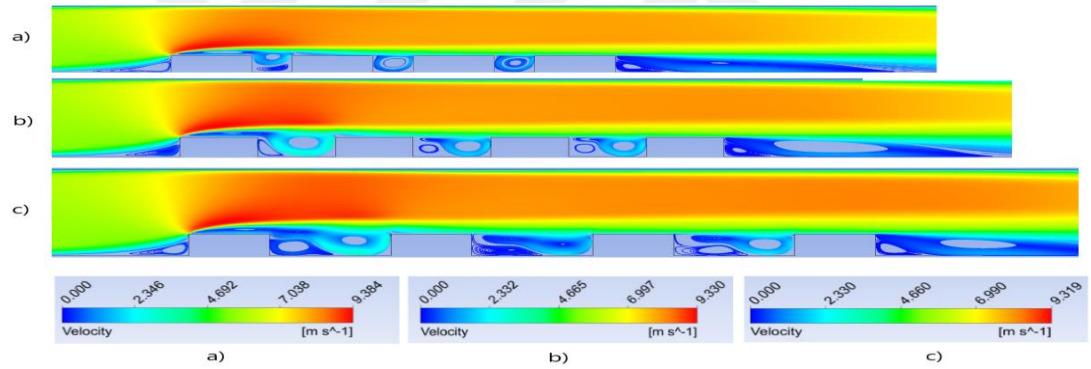
Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.13 ve 4.14 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün bloklar arası mesafeler için ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde küçük bir girdap oluşmaktadır. Young ve Vafai (1998), bloklardan dolayı ilk bloğun ön alt köşesinde bir vorteks oluşur. Re sayısının artmasıyla bu vorteksin arttığını gözlemlemişlerdir. En küçük bloklar arası mesafede ilk çukurun altında saat yönünün tersinde bir girdap oluşmakta ve diğer iki çukurda oluşmamaktadır. Bloklar arası mesafe arttıkça bütün çukurların ön tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmakta ve mesafe arttıkça girdap boyu artmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bütün bloklar arası mesafeler için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.4). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. En büyük bloklar arası mesafede birinci bloğun arkasında olan saat yönündeki 1. girdap birinci bloğun üzerindeki akışı etkilemektedir. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunlukları, son

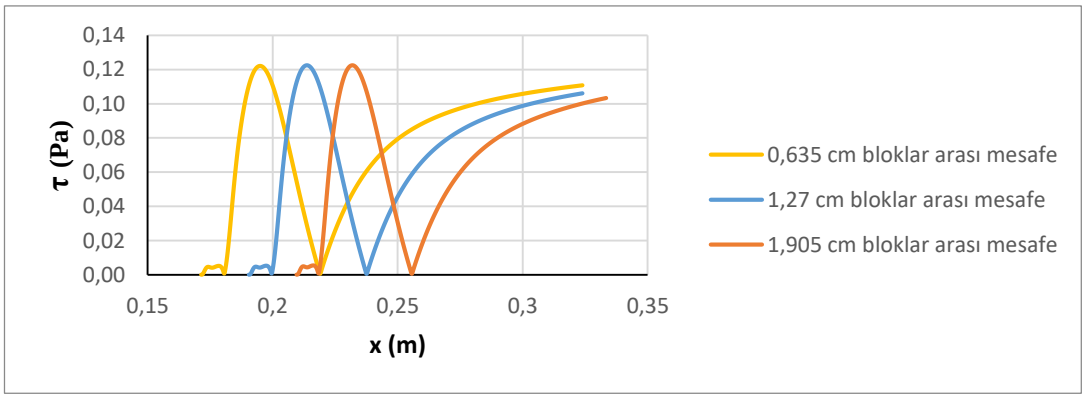
bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.15'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

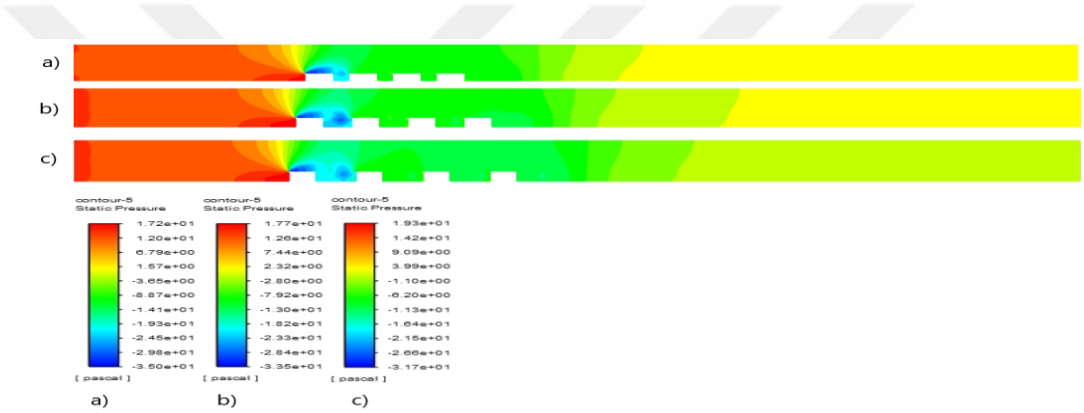


Şekil 4.14. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

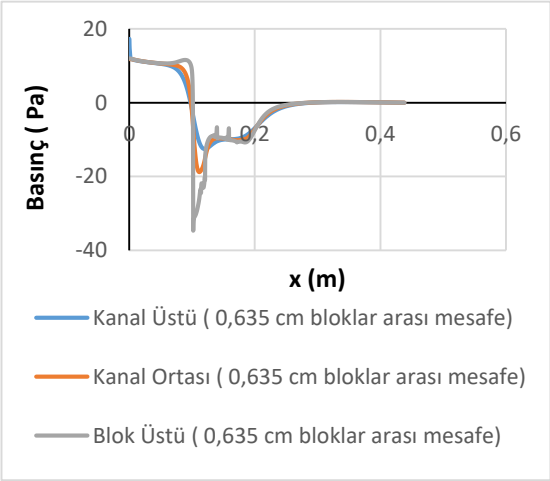


Şekil 4.15. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

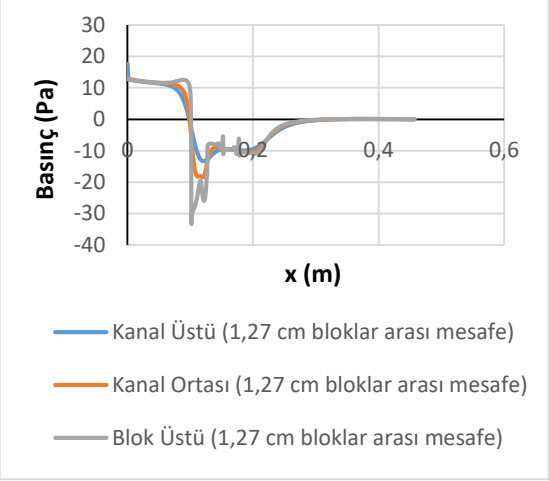
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.16'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.17, 4.18 ve 4.19'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Bloklar arası mesafe arttıkça Şekil 4.13'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.13 a için 9,38 m/s'den b ve c'de 9,33 ve 9,32 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.16 b ve c'de basınçlarda Şekil 4.16 a'dakinden daha az düşmüştür (Şekil 4.16 a'daki minimum basınç -35 Pa b ve c'deki minimum basınçlar ise -33.5 ve -31.1 Pa olarak hesaplanmıştır).



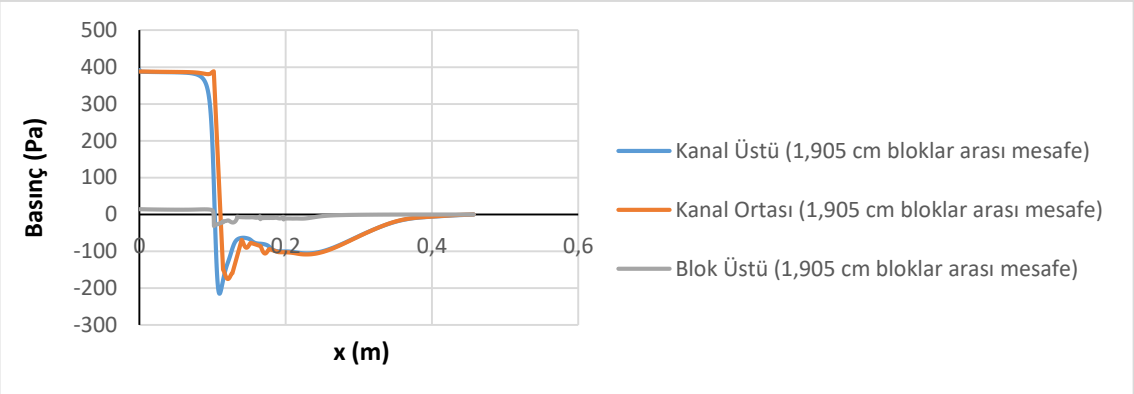
Şekil 4.16. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe



Şekil 4.17. 0,635 cm bloklar arası için basınç değişimi

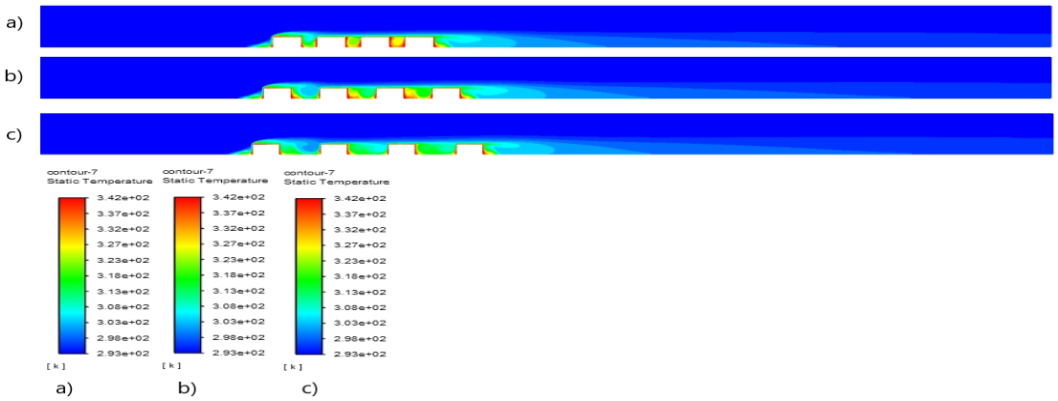


Şekil 4.18. 1,27 cm bloklar arası için basınç değişimi



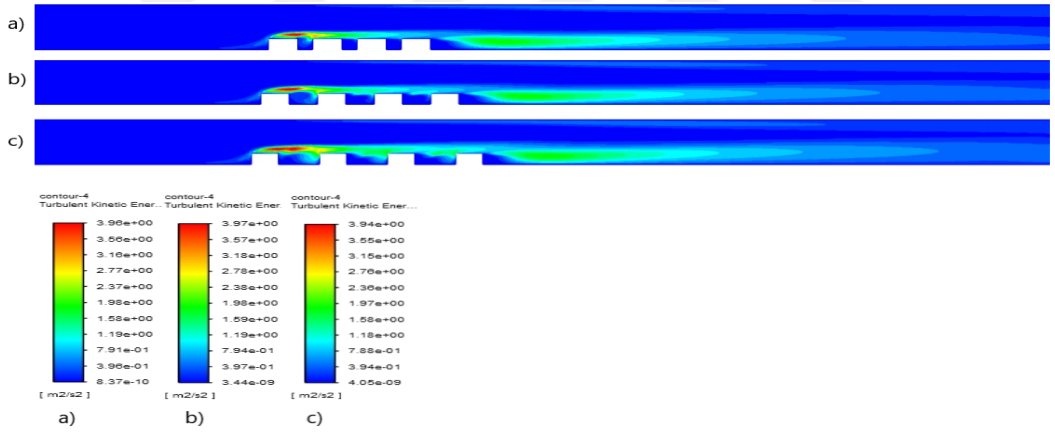
Şekil 4.19. 1,905 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi

Şekil 4.20'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Bloklar arası mesafenin daha az olduğu Şekil 4.20 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bloklar arası mesafenin en az olduğu Şekil 4.20 a durumunda Şekil 4.14'den de görülebileceği gibi bloklar arasında öndeki küçük ikincil girdap oluşmadığı için bu etki hemen hemen yok gibidir. Fakat son çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurda sıcaklık artmaktadır. Ancak bu etki yongalar arası mesafe arttığında Şekil 4.20 c'den de görülebileceği gibi azalmaktadır. Bu azalma buradaki çukurlardaki ilk girdapların daha uzun olduğundan dolayı bu girdap akışlarının ikincil girdapla daha fazla temaslarına yorulabilir.



Şekil 4.20. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

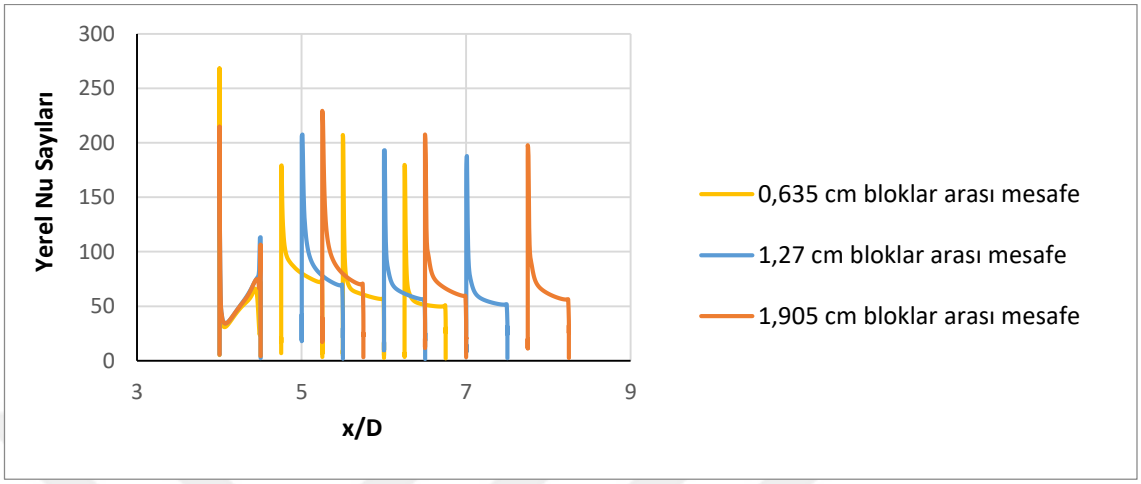
Şekil 4.21'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup bloklar arası mesafe attıkça maksimum etki alanı yayılmaktadır. Ayrıca blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup bloklar arası mesafe arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır



Şekil 4.21. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

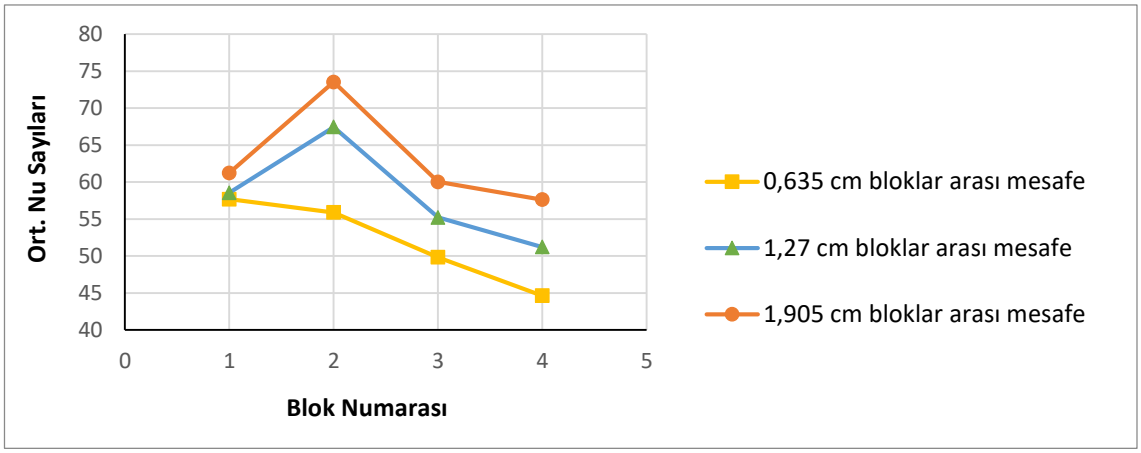
Şekil 4.22'de farklı bloklar arası mesafe için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı bloklar arası mesafenin en az olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülürken üçüncü yonga üzerinde tekrar bir artış gözlenmiştir. Bloklar arası mesafe arttıkça elde edilen maksimum Nusselt sayısı ikinci blok üzerinde elde edilmiş olup en düşük Nu sayısı ise en son yonga üzerindedir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı

transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.22. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

Şekil 4.23'de tüm geometriler için, yani bloklar arası mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.23'de ilk göze çarpan nokta bloklar arası mesafe arttıkça ortalama Nu sayısının da artmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı bloklar arası mesafenin daha az olduğu durumda birinci yonga üzerinde edilirken, bloklar arası mesafe arttıkça ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Her üç durumda da en düşük değer son yonga üzerinde elde edilmiştir. Bloklar arası mesafenin artmasıyla maksimum ortalama Nu sayısının artması Şekil 4.21'den de görülebileceği gibi türbülansın ikinci bloğa doğru artmasına yorulabilir. Çizelge 4.2'de de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.2'den de görülebileceği gibi bloklar arası mesafenin artması ortalama ısı transferini artmıştır.



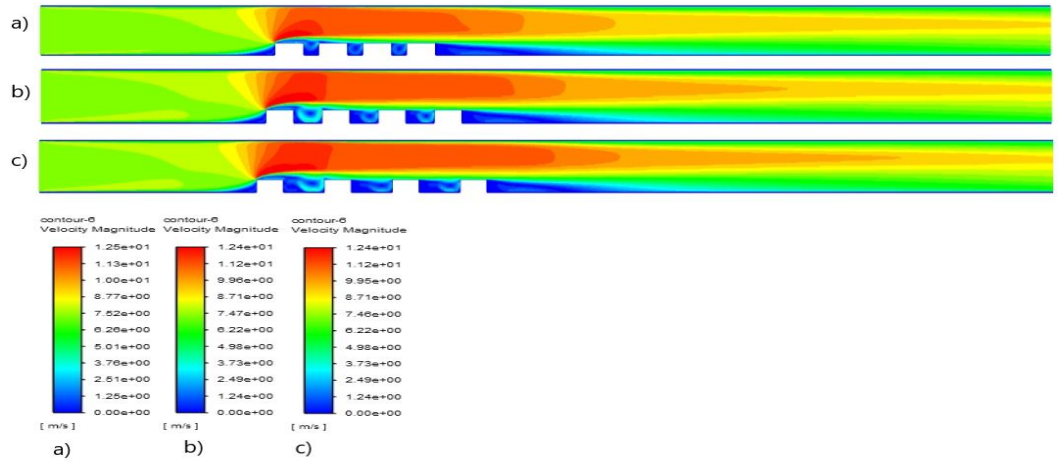
Şekil 4.23. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.2. Re=9015 (5,42 m/s) için dört bloğun ortalama Nusselt sayıları

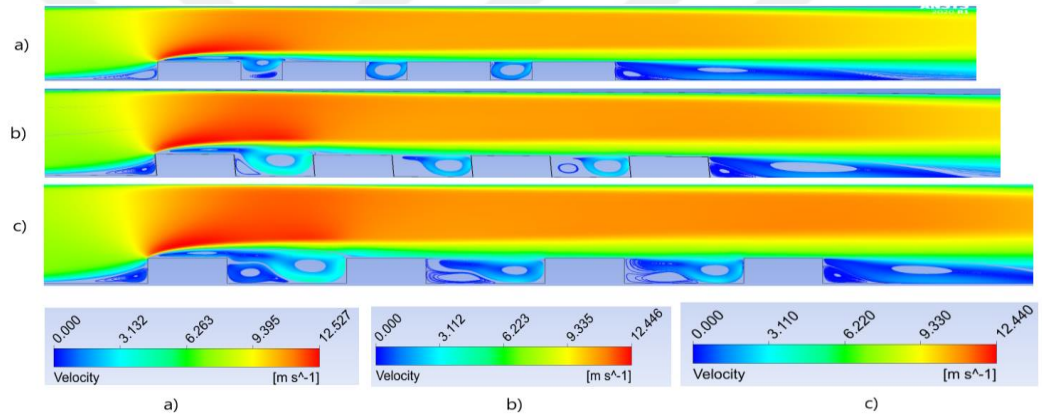
Bloklar Arası Mesafe	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	52,01
1,27 cm	58,1
1,905 cm	63,1

Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

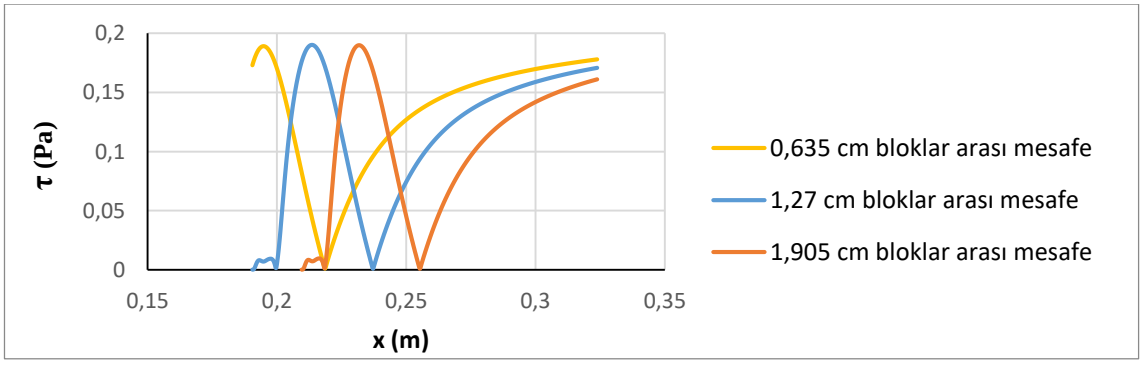
Şekil 4.24 ve 4.25 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün bloklar arası mesafeler için ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde küçük bir girdap oluşmaktadır. En küçük bloklar arası mesafede ilk çukurun altında saat yönünün tersinde bir girdap oluşmakta ve diğer iki çukurda oluşmamaktadır. Bloklar arası mesafe arttıkça baz geometrinin ikinci çukuru hariç tüm çukurların ön tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmakta ve mesafe arttıkça girdap boyu artmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bütün bloklar arası mesafeler için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.4). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. En büyük bloklar arası mesafede birinci bloğun arkasında olan saat yönündeki 1.girdap birinci bloğun üzerindeki akışı etkilemektedir. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunlukları, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.26'daki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.24. Re=11993 (V=7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

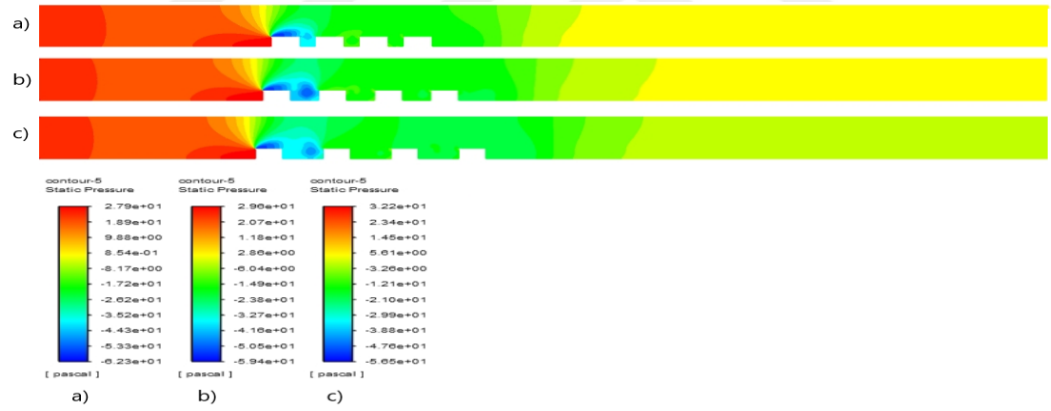


Şekil 4.25. Re=11993 (V=7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

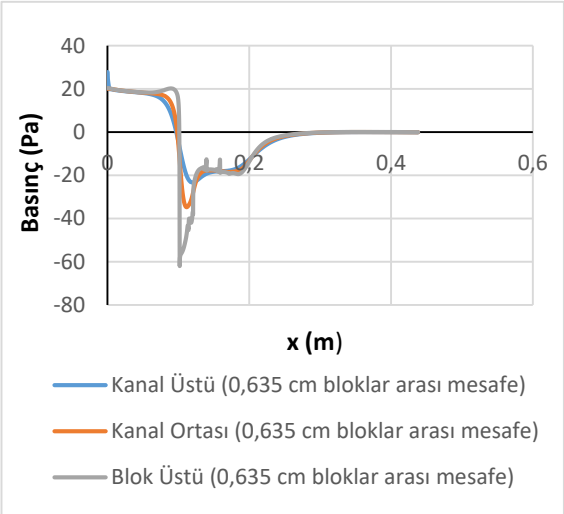


Şekil 4.26. Re=11993 (V=7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin değişimi

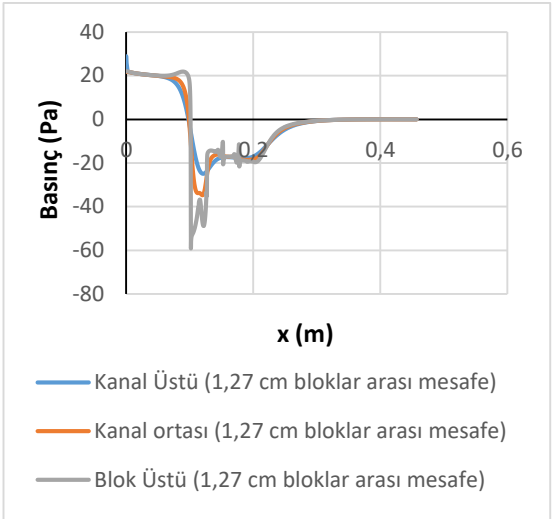
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.27'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Bloklar arası mesafe arttıkça Şekil 4.24'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.24 a için 12,5 m/s, b ve c'de değişmeyerek 12,4 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.27 a'daki minimum basınç -62,3 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -59,4 ve -56,5 Pa olarak hesaplanmıştır. Bloklar arası mesafe arttıkça Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'dan görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. 0,635 cm bloklar arası mesafe için 20,13 Pa, 1,27 cm bloklar arası mesafe için 21,78 Pa ve 1,905 cm bloklar arası mesafe için 24,45 Pa elde edilmiştir. Yani basınçtaki bu artış bloklar arası mesafenin artması ile soğutma için kullanılması gereken fan gücünün de artması gerektiğini vurgulamaktadır.



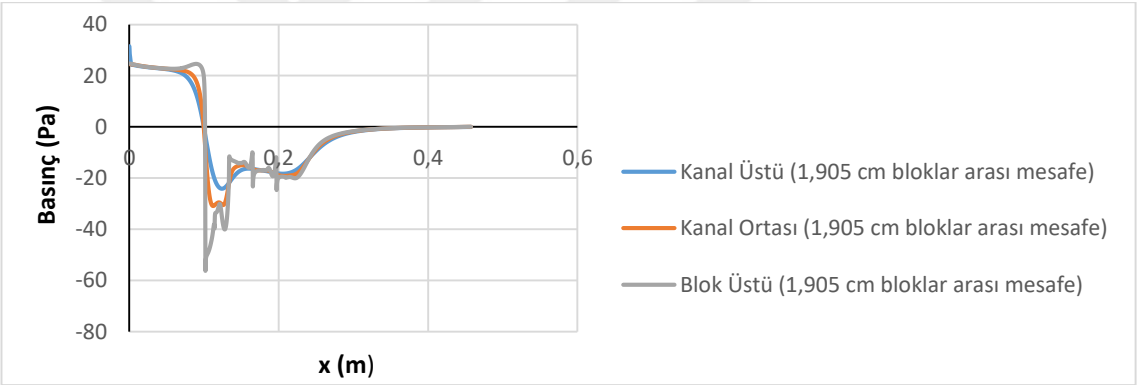
Şekil 4.27. Re=11993 (V=7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe



Şekil 4.28. 0,635 cm bloklar arası için basınç değişimi



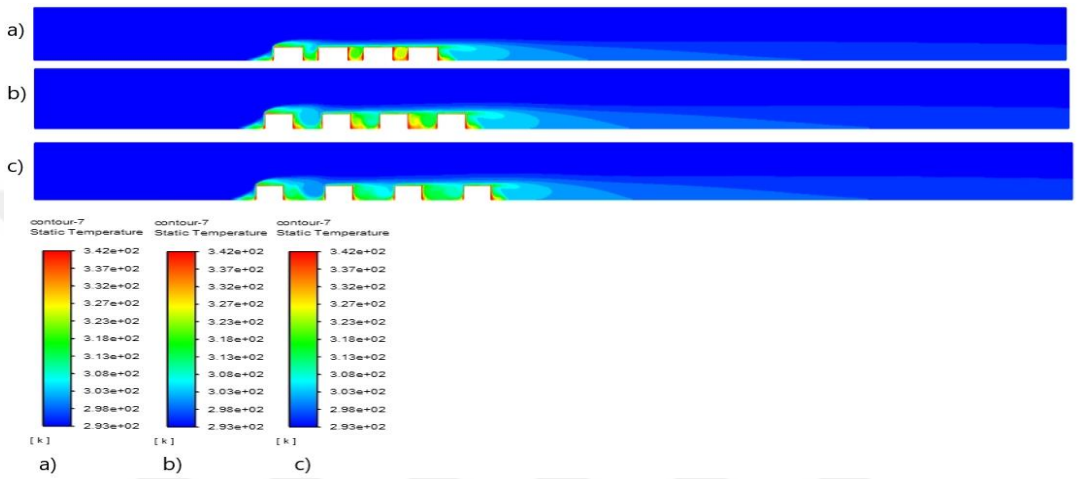
Şekil 4.29. 1,27 cm bloklar arası için basınç değişimi



Şekil 4.30. 1,905 cm bloklar arası için basınç değişimi

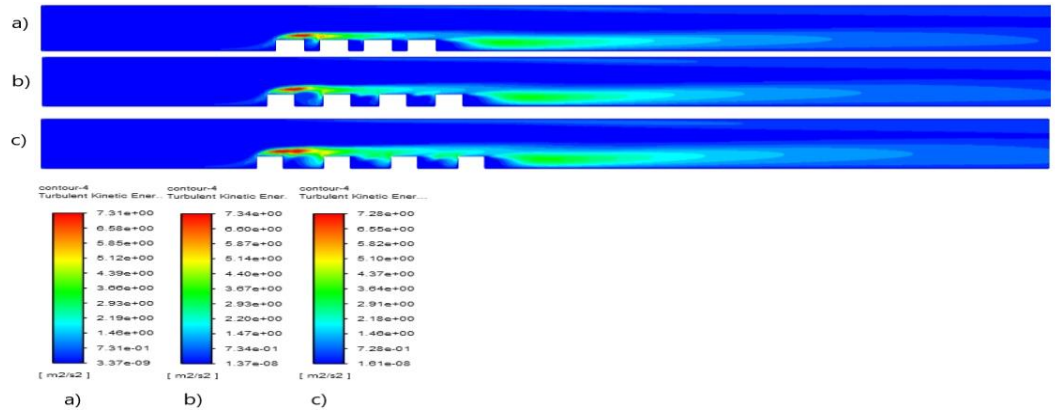
Şekil 4.31'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Bloklar arası mesafenin daha az olduğu Şekil 4.31 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bloklar arası mesafenin en az olduğu Şekil 4.31 a durumunda Şekil

4.25’den de görülebileceği gibi bloklar arasında öndeki küçük ikincil girdap oluşmadığı için bu etki hemen hemen yok gibidir. Fakat son çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurda sıcaklık artmaktadır. Ancak bu etki yongalar arası mesafe arttığında Şekil 4.31 c’den de görülebileceği gibi azalmaktadır. Bu azalma buradaki çukurlardaki ilk girdapların daha uzun olduğundan dolayı bu girdap akışlarının ikincil girdapla daha fazla temaslarına yorulabilir.



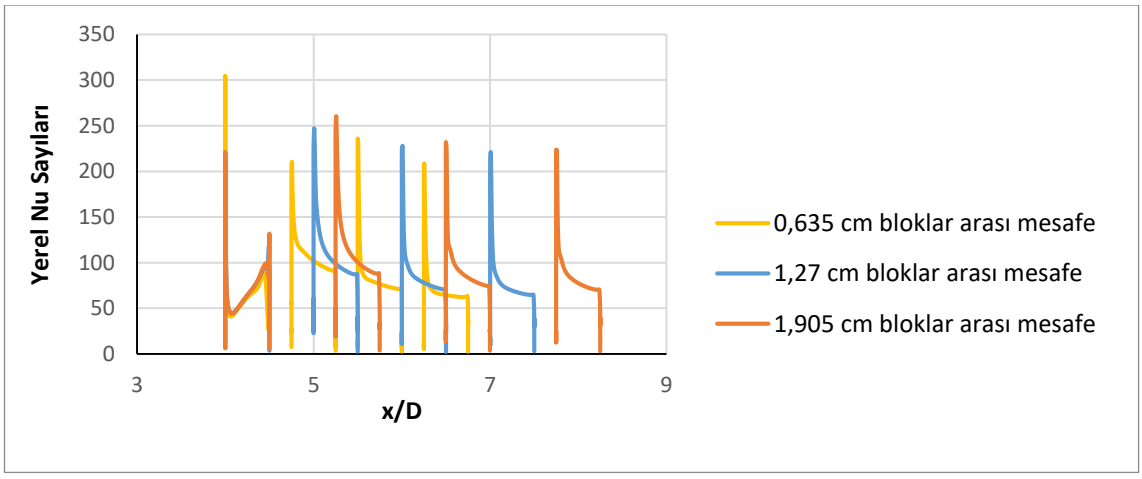
Şekil 4.31. Re=11993 (V=7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

Şekil 4.32’den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup bloklar arası mesafe attıkça maksimum etki alanı yayılmaktadır. Ayrıca blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup bloklar arası mesafe arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



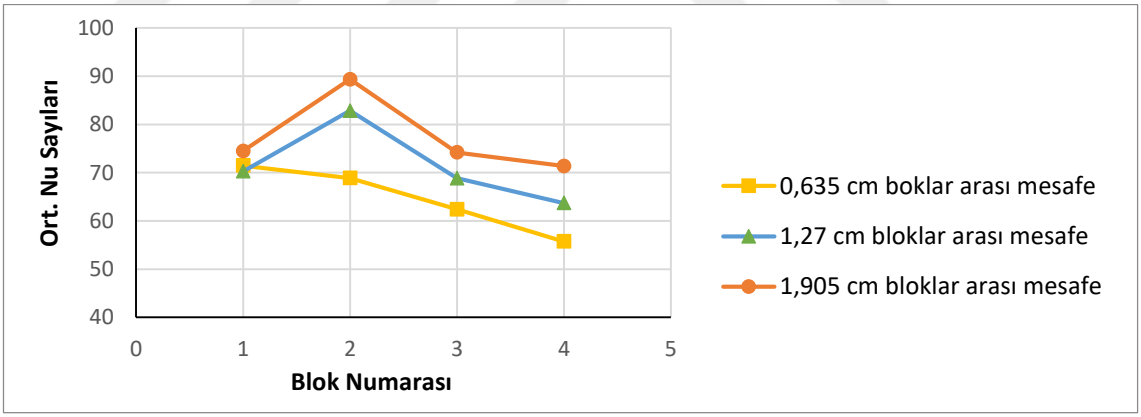
Şekil 4.32. Re=11993 (V=7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

Şekil 4.33'de farklı bloklar arası mesafe için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı bloklar arası mesafenin en az olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülürken üçüncü yonga üzerinde tekrar bir artış gözlenmiştir. Bloklar arası mesafe arttıkça elde edilen maksimum Nusselt sayısı ikinci blok üzerinde elde edilmiş olup en düşük Nu sayısı ise en son yonga üzerindedir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.33. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

Şekil 4.34'de tüm geometriler için, yani bloklar arası mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.34'de ilk göze çarpan nokta bloklar arası mesafe arttıkça ortalama Nu sayısının da artmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı bloklar arası mesafenin daha az olduğu durumda birinci yonga üzerinde edilirken, bloklar arası mesafe arttıkça ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Ayrıca 0,635 cm bloklar arası mesafe de ilk yonganın ortalama Nu sayısı 1,27 cm bloklar arası mesafedeki ilk yonganın ortalama Nu sayısından yüksek çıkmaktadır. Her üç durumda da en düşük değer son yonga üzerinde elde edilmiştir. Bloklar arası mesafenin artmasıyla maksimum ortalama Nu sayısının artması Şekil 4.32'den de görülebileceği gibi türbülansın ikinci bloğa doğru artmasına yorulabilir. Çizelge 4.3'de de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.3'den de görülebileceği gibi bloklar arası mesafenin artması ortalama ısı transferini artmıştır.



Şekil 4.34. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

Çizelge 4.3. Re=11993 (7,21 m/s) için dört bloğun ortalama Nusselt sayıları

Bloklar Arası Mesafe	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	64,6
1,27 cm	71,4
1,905 cm	77,33

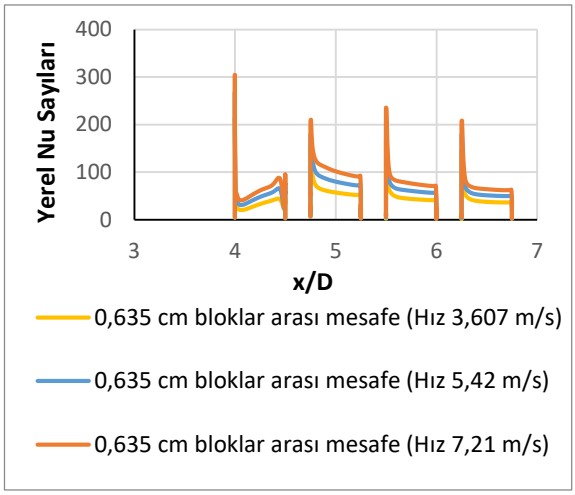
Bloklar arası mesafe için farklı hızlarda karşılaştırma

Çizelge 4.4 incelendiğinde bloklar arası mesafe arttığında yeniden birleşme uzunluklarında bir miktar azalma olmaktadır. Re sayısı arttığında yeniden birleşme uzunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır.

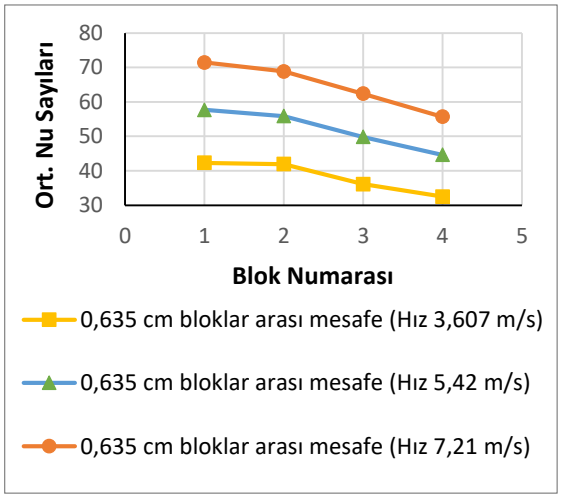
Çizelge 4.4. Farklı hızlarda ve geometrilerde yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırması

Hız (m/s)	Bloklar Arası Mesafe(cm)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	0,635	0,008699	0,047734
	1,27	0,008534	0,047152
	1,905	0,008321	0,046513
5,42	0,635	0,008736	0,049477
	1,27	0,008534	0,046726
	1,905	0,008321	0,045659
7,21	0,635	-	0,028113
	1,27	0,008964	0,046728
	1,905	0,008534	0,045445

0,635 cm bloklar arası mesafede hızın artması Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken blok numarası arttıkça yerel ve ortalama Nu sayısı azalmaktadır.

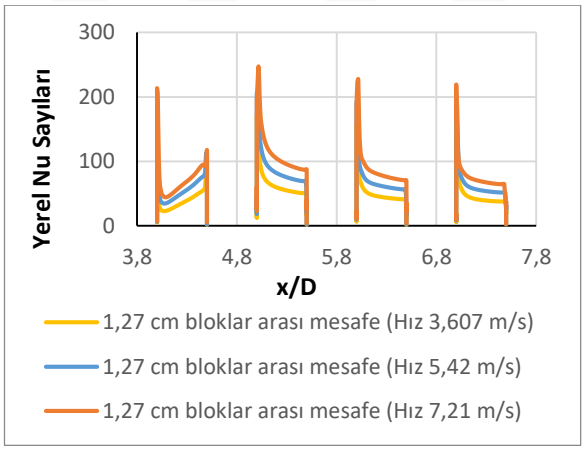


Şekil 4.35. 0,635 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

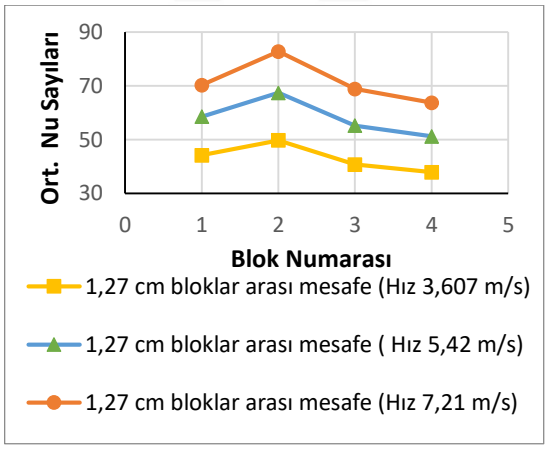


Şekil 4.36. 0,635 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları

1,27 cm bloklar arası mesafede hızın artması Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilirken ikinci bloktan sonra yerel ve ortalama Nu sayısı azalmaktadır.

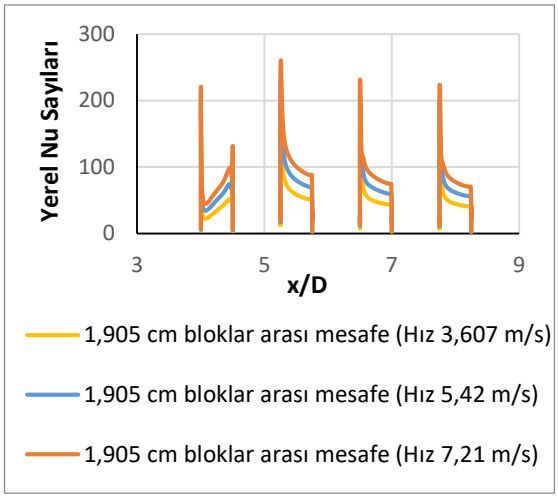


Şekil 4.37. 1,27 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

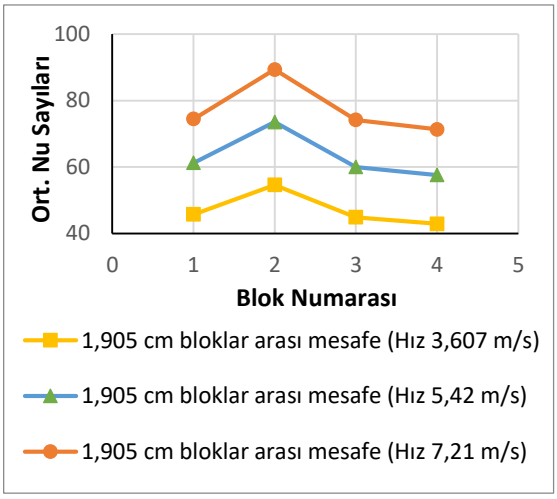


Şekil 4.38. 1,27 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,905 cm bloklar arası mesafede Re sayısının artması (hızın artması) Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir.



Şekil 4.39. 1,905 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

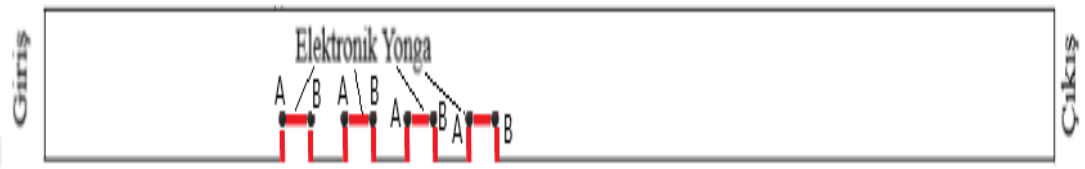


Şekil 4.40. 1,905 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilirken ikinci bloktan sonra yerel ve ortalama Nu sayısı azalmaktadır. Yapılan 9 adet analiz, Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3 incelendiğinde en yüksek ortalama Nu sayısının 1,905 cm bloklar arası mesafede Re=11993 (Hız 7,21 m/s) 77,33 olduğu görülmüştür. Yani en fazla ısı transferinin 7,21 m/s hızda 1,905 cm bloklar arası mesafede olduğu tespit edilmiştir. Chatterjee ve Mondal (2012)'de yaptığı laminer akışlı çalışmasında bloklar arasındaki mesafenin artmasının ortalama Nu sayısını artırdığını gözlemlemişlerdir. Amghar ve diğerleri (2021), ise yatay bir levhada yaptığı türbülanslı çalışmada bloklar arası mesafenin artırılmasının ısı transferini artırdığını gözlemlemişlerdir. Dhingra ve Ghoshdastidar (2016), dikey bir kanalda yaptıkları çalışmada bloklar arası mesafenin artırılmasıyla sol duvardaki sıcaklığın azaldığını dolayısıyla ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bilen ve Yapıcı (2001), akış yönünde bloklar arasındaki mesafenin artırılmasının ısı transferini artırdığını gözlemlemişlerdir.

4.1.2. 2 Boyutlu geometride blok boyunun değişiminin incelenmesi

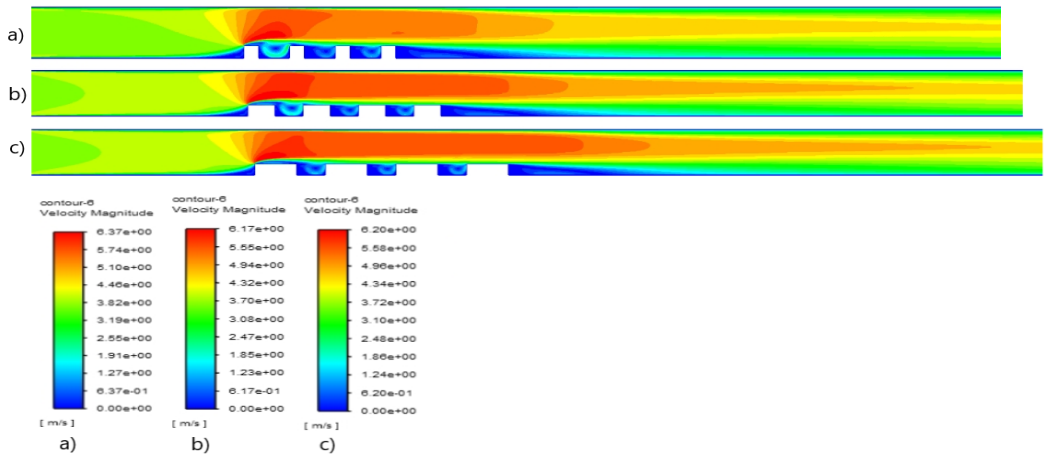
Şekil 4.41'de görüldüğü gibi blok boyu değişimini incelemek amacıyla Şekil 4.41'deki A-B aralığı yani blok boyu mesafesi baz geometride alınan değer dışında 2 değer daha alınarak 3 farklı hızda inceleme yapılmıştır. Baz geometride A-B aralığı 1,27 cm olmakla beraber, her 4 yonga için 0,635 cm ve 1,905 cm alınarak analiz yapılmıştır. Blok boyu mesafesinin değişimini incelemek için toplam 9 adet analiz yapılmıştır.



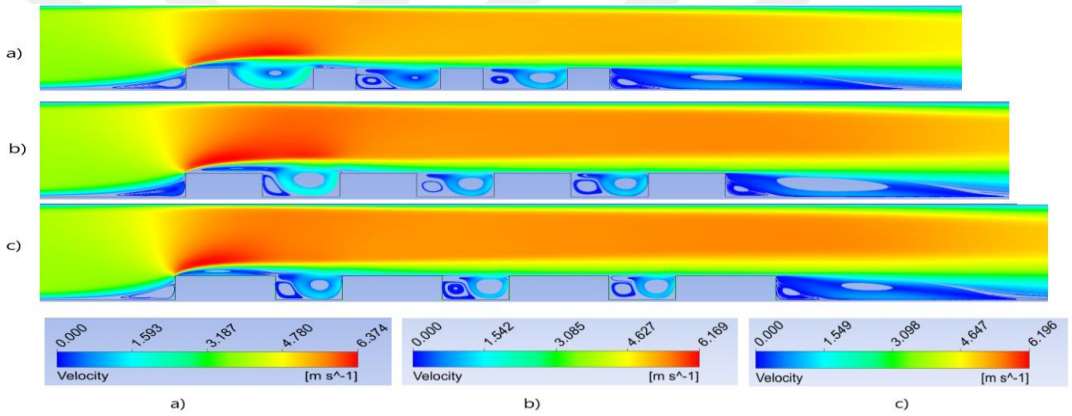
Şekil 4.41. Blok boyunun değişiminin gösterimi

Re= 6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

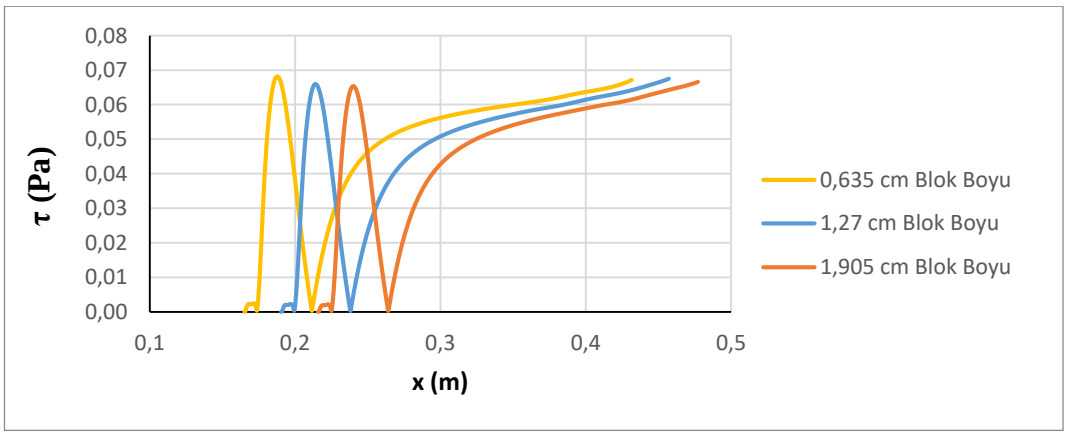
Şekil 4.42 ve 4.43 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün blok boyu mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En küçük blok boyu mesafesinde ilk çukurun ön alt ucunda bir girdap oluşmazken diğer iki çukurda saat yönünün tersinde bir girdap oluşmaktadır. Blok boyu mesafesi arttıkça bütün çukurların ön tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bütün blok boyu mesafesi için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.8). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. En büyük blok boyu mesafesinde birinci bloğun arkasında olan saat yönündeki 1.girdap birinci bloğun üzerindeki akışı etkilemektedir. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunlukları son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.44'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.42. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

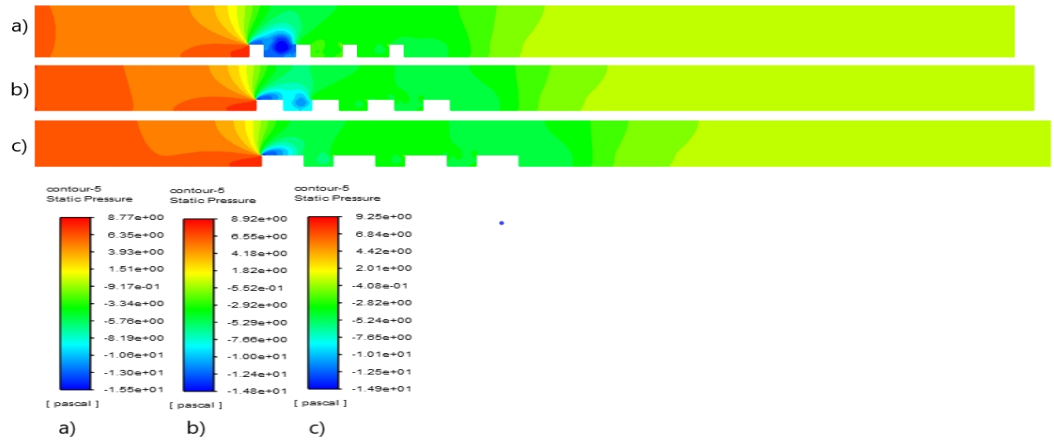


Şekil 4.43. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

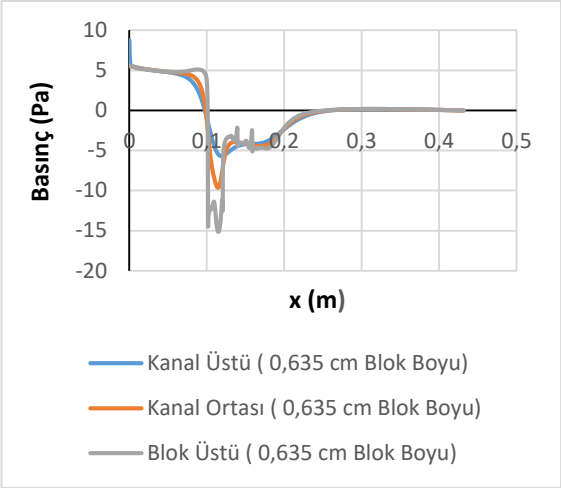


Şekil 4.44. Re=6000 (3,607 m/s) i için kayma gerilmelerinin gösterimi

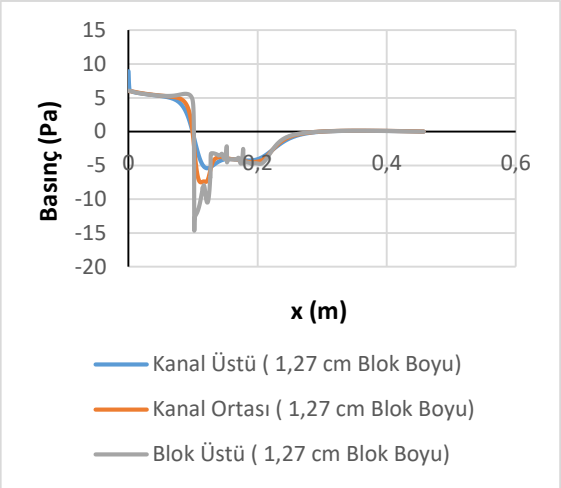
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.45'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.46, 4.47 ve 4.48'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Blok boyu arttıkça düşük basıncın birinci blok üzerindeki etkisi blok sonuna kadar gelmemektedir. Blok boyu mesafesinin artması Şekil 4.42'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.42 a için 6,37 m/s, b ve c'de azalarak 6,17 m/s ve 6,20 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.45 a'daki minimum basınç -15,5 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -14,8 ve -14,9 Pa olarak hesaplanmıştır. Blok boyu mesafe arttıkça Şekil 4.46, 4.47 ve 4.48'den görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. 0,635 cm blok boyu mesafesi için 5,48 Pa, 1,27 cm blok boyu mesafesi için 5,97 Pa ve 1,905 cm blok boyu mesafe için 6,3 Pa elde edilmiştir.



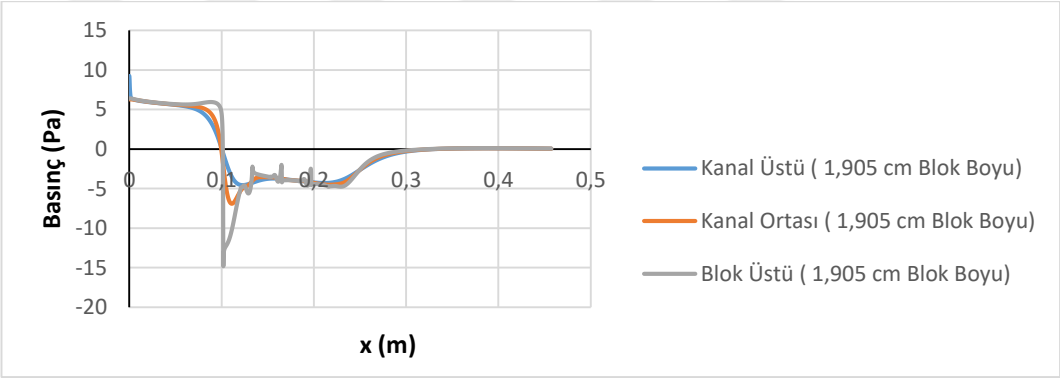
Şekil 4.45. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi



Şekil 4.46. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi



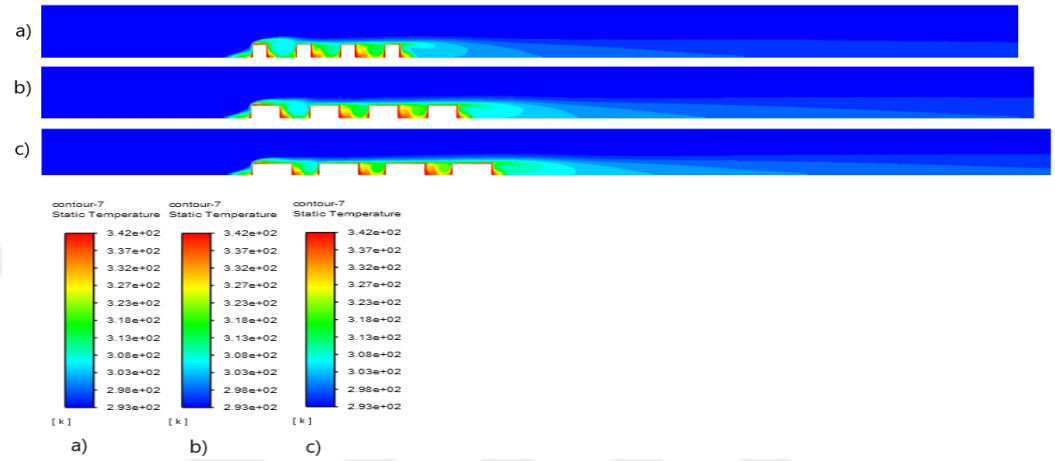
Şekil 4.47. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi



Şekil 4.48. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi

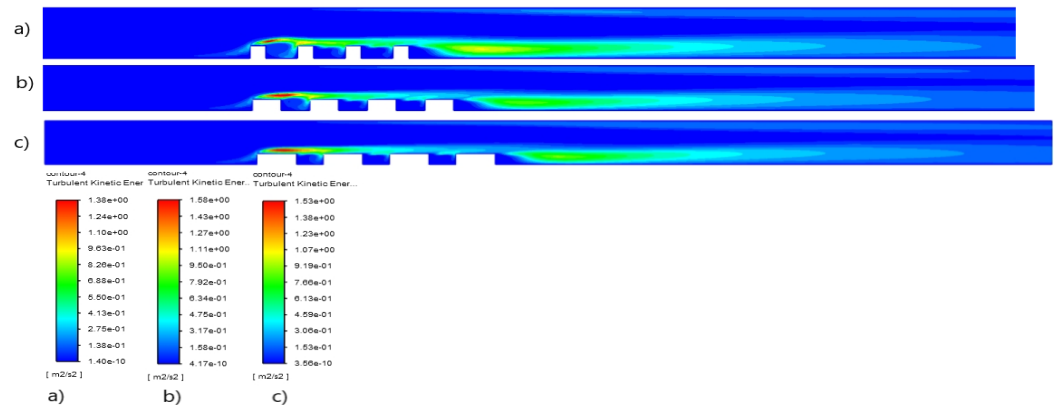
Şekil 4.49'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok boyu mesafesinin daha az olduğu Şekil 4.49 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Blok boyu mesafesinin en az olduğu Şekil 4.49 a durumunda Şekil 4.43'den de görülebileceği gibi birinci bloktan sonra öndeki küçük ikincil girdap

oluşmadığı için bu etki hemen hemen yok gibidir. Fakat diğer iki çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurlarda sıcaklık artmaktadır. Bu etki blok boyu mesafesi arttığında çok fazla bir değişime uğramamaktadır. Bu benzerliğin buradaki bloklar arasındaki mesafenin aynı olmasıyla çukurlarda oluşan girdap boyunun benzer olmasına yorulabilir.



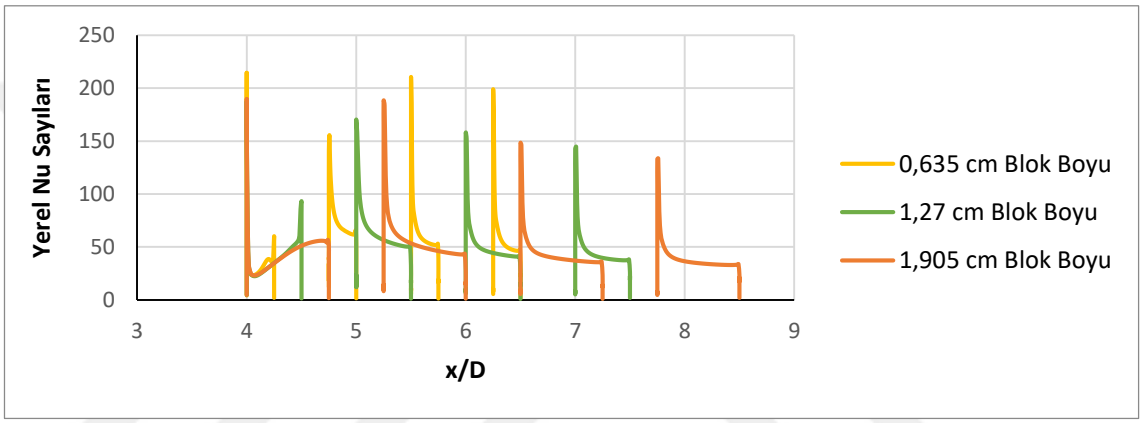
Şekil 4.49. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

Şekil 4.50'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok boyu mesafesi attıkça maksimum etki alanı yayılmaktadır. Ayrıca blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



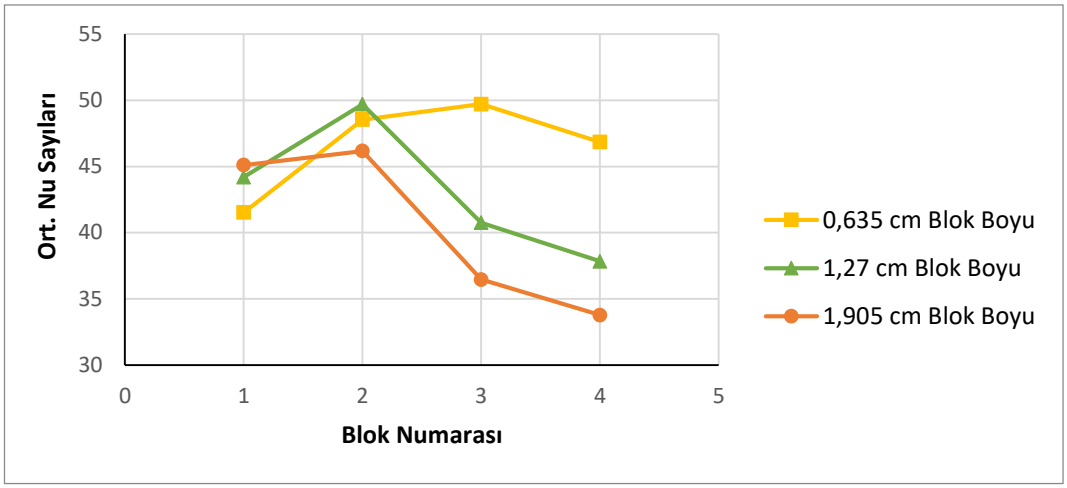
Şekil 4.50. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

Şekil 4.51'de farklı blok boyu mesafesi için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok boyu mesafenin en az olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülürken üçüncü yonga üzerinde tekrar bir artış gözlenmiştir. Blok boyu mesafesi arttıkça elde edilen maksimum Nusselt sayısı ikinci blok üzerinde elde edilmiş olup, en düşük Nu sayısı ise en son yonga üzerindedir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.51. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.52'de tüm geometriler için, yani blok boyu mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı blok boyu mesafenin daha az olduğu durumda üçüncü yonga üzerinde edilirken, blok boyu mesafesi arttıkça ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Blok boyu mesafesinin az olduğu durumda en düşük ortalama Nu sayısı birinci yongada elde edilmiş olmakla beraber diğer iki durumda en son yongada elde edilmektedir. Blok boyu mesafesinin artışı Çizelge 4.5'den de görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini azaltmaktadır.



Şekil 4.52. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

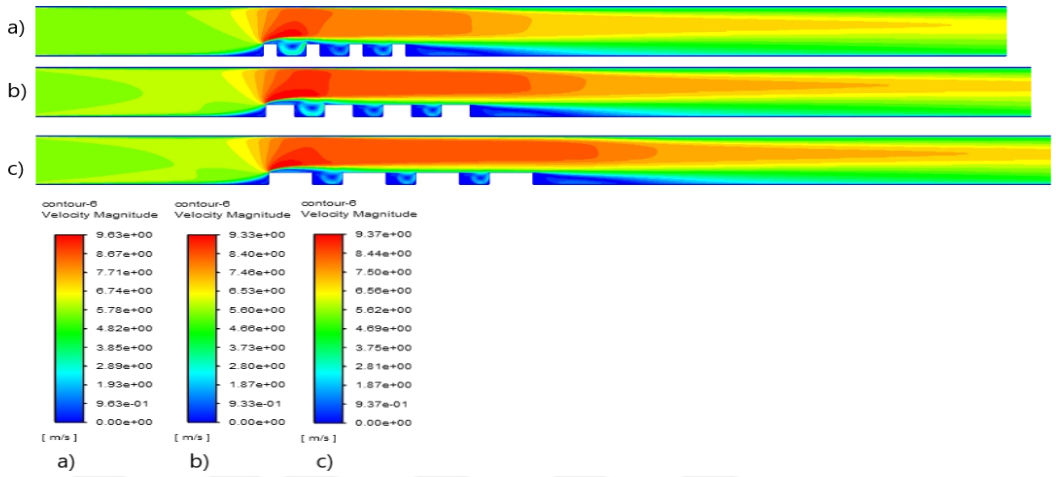
Çizelge 4.5. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm blokların ortalama Nusselt sayıları

Blok Boyu Mesafesi	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	46,65
1,27 cm	43,12
1,905 cm	40,37

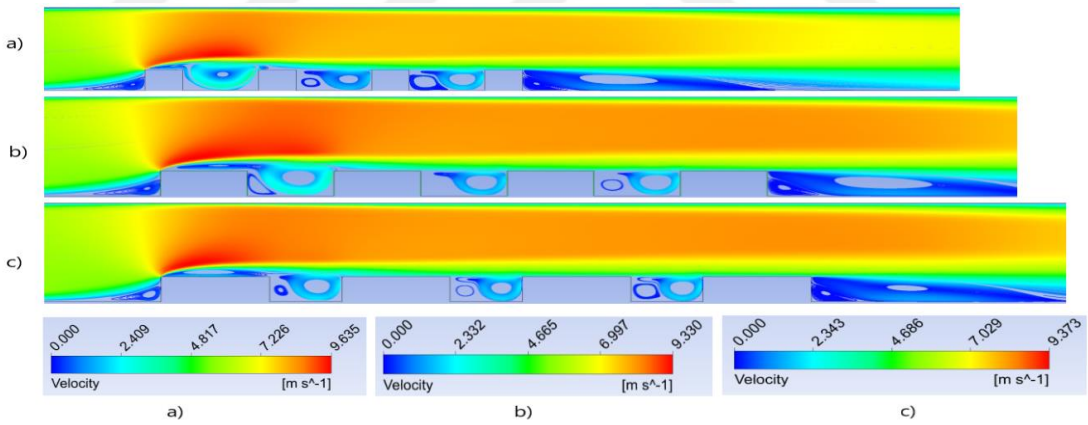
Re= 9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.53 ve 4.54 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün blok boyu mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Young ve Vafai (1998), bloklardan dolayı ilk bloğun ön alt köşesinde bir vorteks oluşur. En küçük blok boyu mesafesinde ilk çukurun altında bir girdap oluşmazken diğer iki çukurda saat yönünün tersinde bir girdap oluşmaktadır. Blok boyu mesafesi arttıkça baz geometrinin ikinci çukuru hariç bütün çukurların ön alt tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bütün blok boyu mesafesi için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.8). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. En büyük blok boyu mesafesinde birinci bloğun arkasında olan saat yönündeki 1.girdap birinci

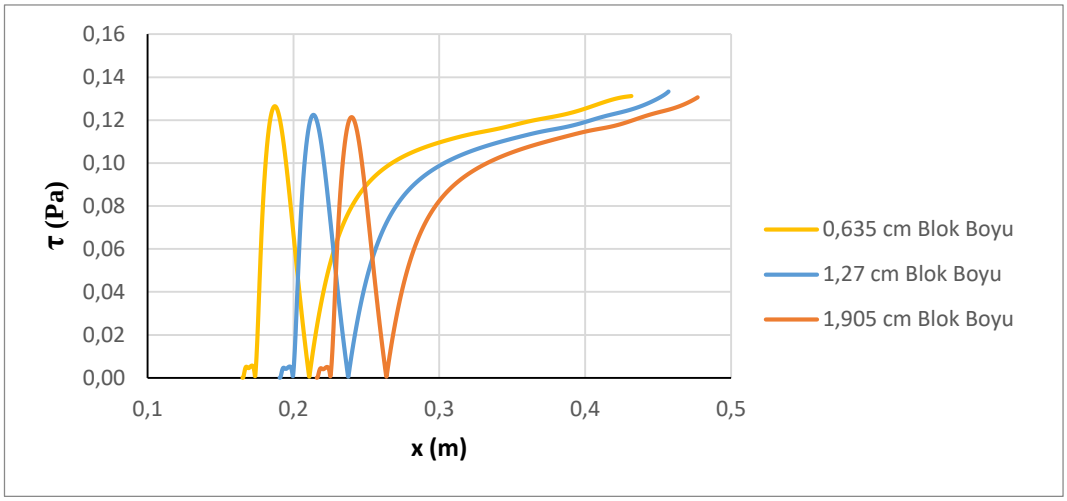
bloğun üzerindeki akışı etkilemektedir. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.55'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.53. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b)1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

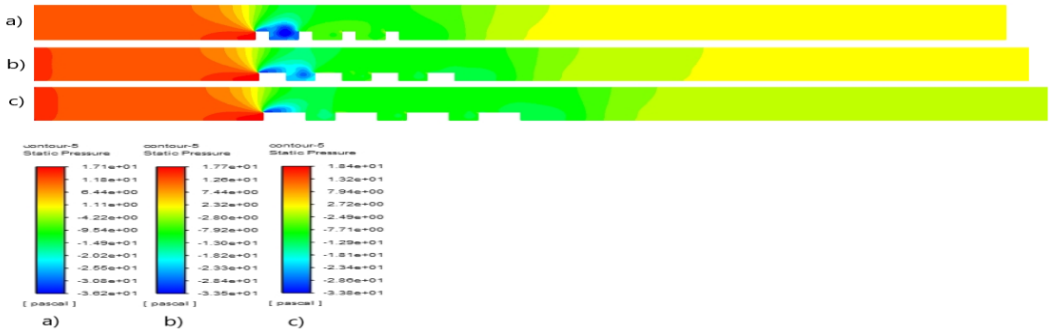


Şekil 4.54. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

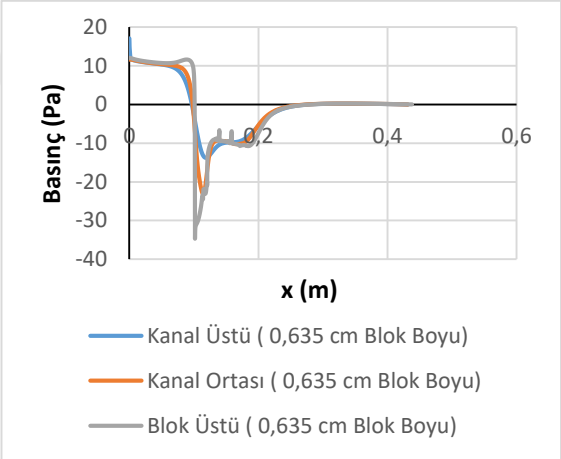


Şekil 4.55. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

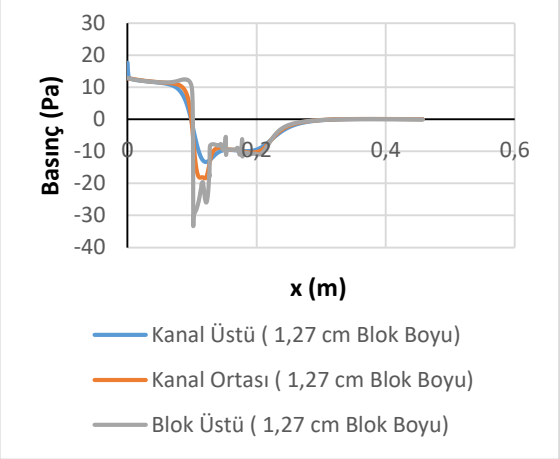
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.56'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.57, 4.58 ve 4.59'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Blok boyu arttıkça düşük basıncın birinci blok üzerindeki etkisi blok sonuna kadar gelmemektedir. Blok boyu mesafesinin artmasıyla Şekil 4.53'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.53 a için 9,63 m/s, b ve c'de azalarak 9,33 m/s ve 9,37 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.56 a'daki minimum basınç -36,2 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -33,5 ve -33,8 Pa olarak hesaplanmıştır. Blok boyu mesafe arttıkça Şekil 4.57, 4.58 ve 4.59'dan görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. Giriş basınçları, 0,635 cm blok boyu mesafesi için 11,63 Pa, 1,27 cm blok boyu mesafesi için 12,73 Pa ve 1,905 cm blok boyu mesafe için 13,41 Pa elde edilmiştir.



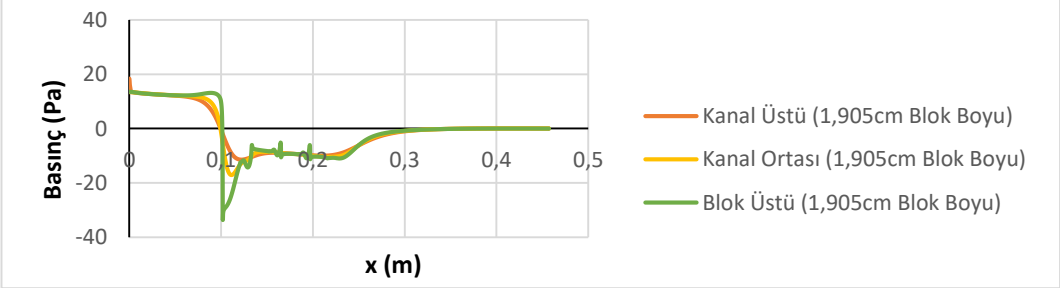
Şekil 4.56. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi



Şekil 4.57. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi



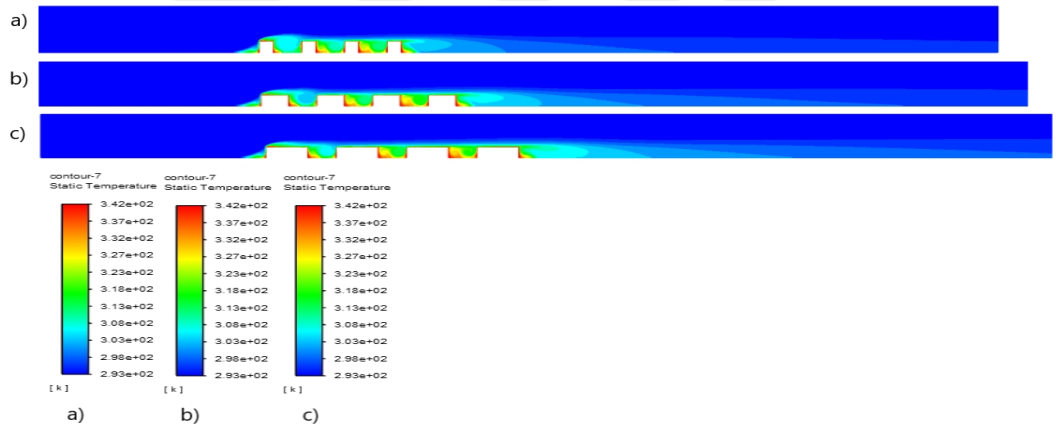
Şekil 4.58. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi



Şekil 4.59. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi

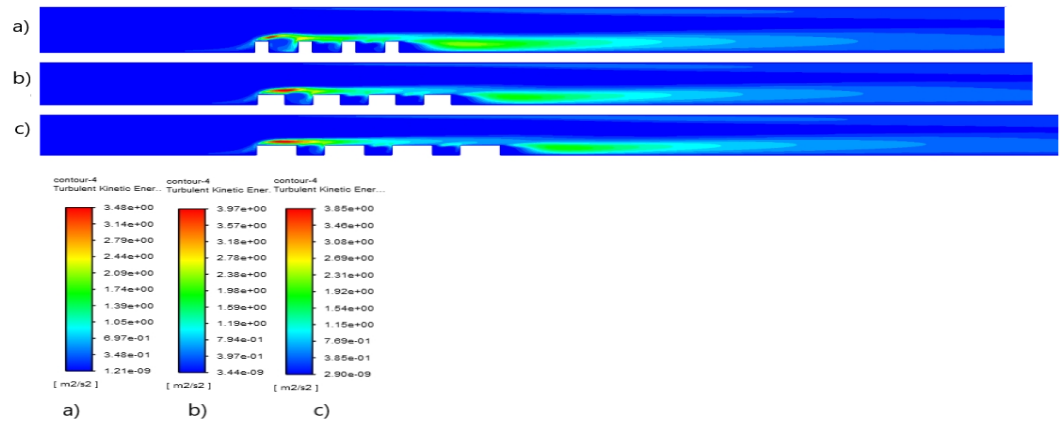
Şekil 4.60'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı

akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok boyu mesafesinin daha az olduğu Şekil 4.60 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Blok boyu mesafesinin en az olduğu Şekil 4.60 a durumunda Şekil 4.54' den de görülebileceği gibi birinci bloktan sonra öndeki küçük ikincil girdap oluşmadığı için bu etki hemen hemen yok gibidir. Fakat diğer iki çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurlarda sıcaklık artmaktadır. Bu etki blok boyu mesafesi arttığında çok fazla bir değişime uğramamaktadır. Bu benzerliğin buradaki bloklar arasındaki mesafenin aynı olmasıyla çukurlarda oluşan girdap boyunun benzer olmasına yorulabilir.



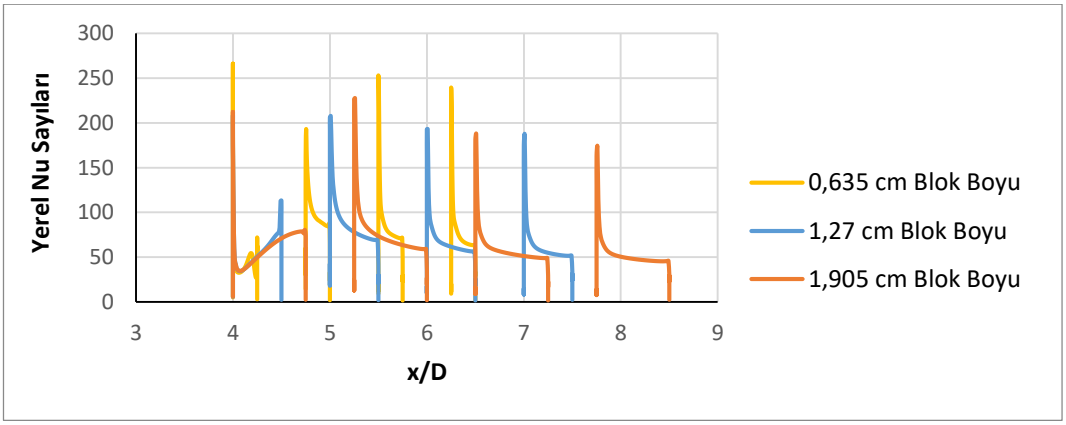
Şekil 4.60. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

Şekil 4.61'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok boyu mesafesi attıkça maksimum etki alanı yayılmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.61. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

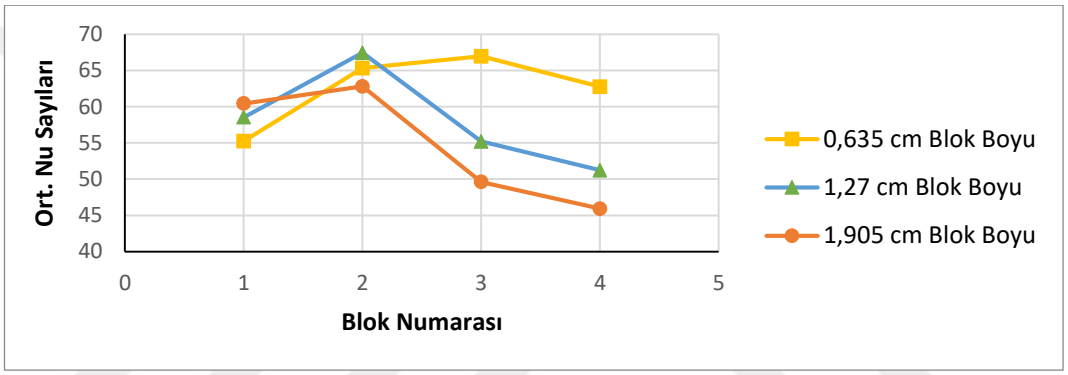
Şekil 4.62'de farklı blok boyu mesafesi için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok boyu mesafenin en az olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülürken üçüncü yonga üzerinde ikinci yongaya göre tekrar bir artış gözlenmiştir. Blok boyu mesafesi arttıkça elde edilen maksimum Nusselt sayısı ikinci blok üzerinde elde edilmiş olup, en düşük Nu sayısı ise en son yonga üzerindedir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.62. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.63'de tüm geometriler için, yani blok boyu mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların

sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı blok boyu mesafenin daha az olduğu durumda üçüncü yonga üzerinde edilirken, blok boyu mesafesi arttıkça en yüksek ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Blok boyu mesafesinin az olduğu durumda en düşük ortalama Nu sayısı birinci yongada elde edilmiş olmakla beraber diğer iki durumda en son yongada elde edilmektedir. Blok boyu mesafesinin artışı Çizelge 4.6'dan da görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini azaltmaktadır.



Şekil 4.63. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

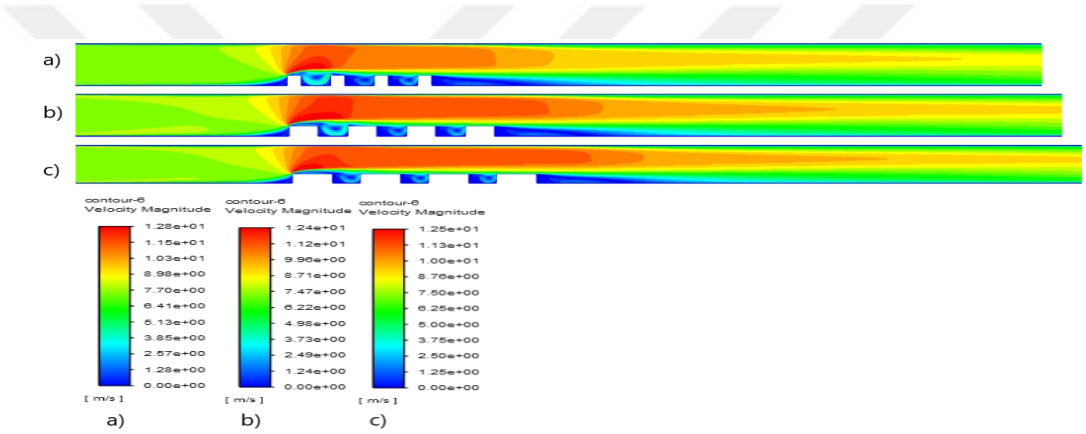
Çizelge 4.6. Re=9015 (5,42 m/s) için dört bloğun ortalama Nusselt sayıları

Blok Boyu Mesafesi	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	62,58
1,27 cm	58,1
1,905 cm	54,7

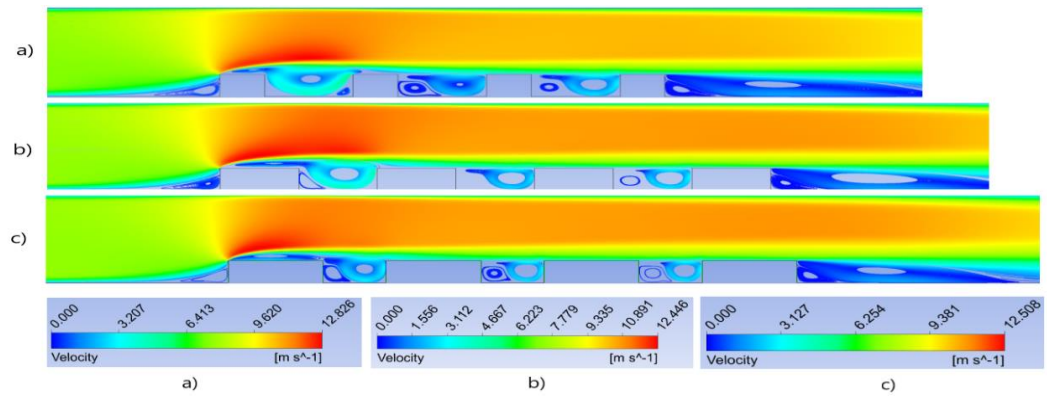
Re= 11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.64 ve 4.65 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün blok boyu mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En küçük blok boyu mesafesinde ilk çukurun arka alt ucunda saat yönünün tersinde bir girdap oluşurken diğer iki çukurun ön

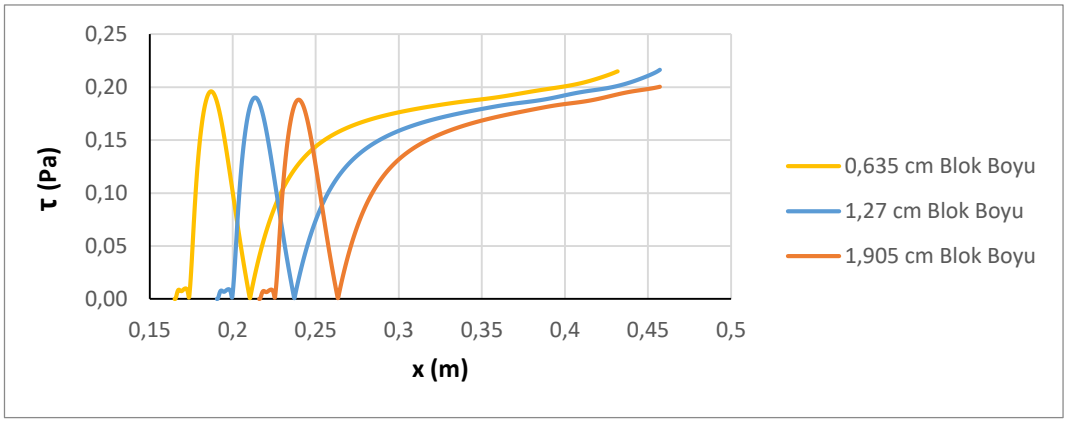
alt kısmında saat yönünün tersinde bir girdap oluşmaktadır. Blok boyu mesafesi arttıkça baz geometrinin ikinci çukuru hariç bütün çukurların ön alt tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bütün blok boyu mesafesi için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.8). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. En büyük blok boyu mesafesinde birinci bloğun arkasında olan saat yönündeki 1.girdap birinci bloğun üzerindeki akışı etkilemektedir. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.66'daki gibi çizilerek hesaplanmış ve bu uzunluklar Çizelge 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.64. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

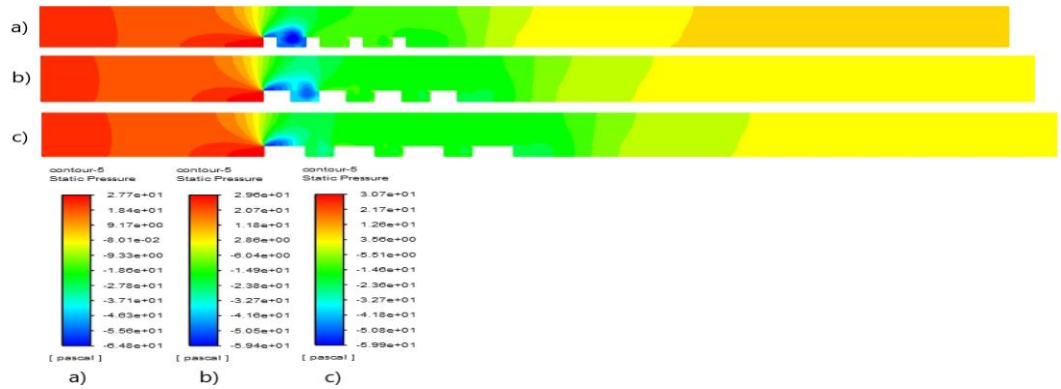


Şekil 4.65. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

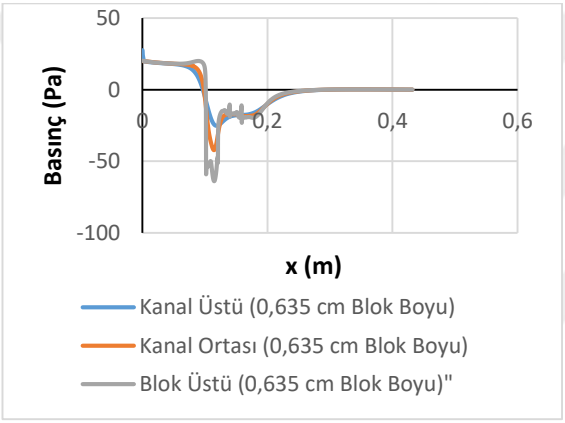


Şekil 4.66. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

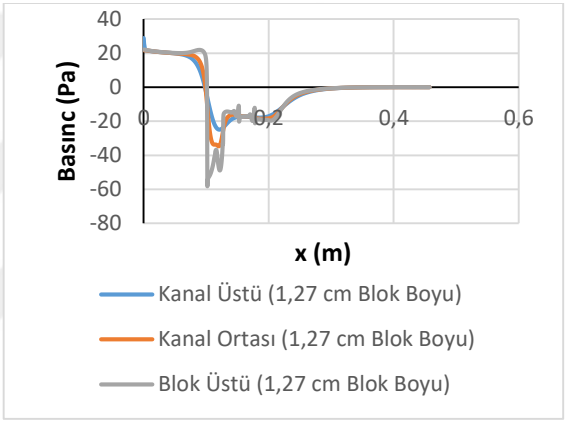
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.67'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.68, 4.69 ve 4.70'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Blok boyu arttıkça düşük basıncın birinci blok üzerindeki etkisi blok sonuna kadar gelmemektedir. Şekil 4.67 a ve b durumunda yani blok boyunun daha az olduğu durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Blok boyu mesafesinin artmasıyla Şekil 4.64'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.64 a için 12,8 m/s, b ve c'de azalarak 12,4 m/s ve 12,5 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.67 a'daki minimum basınç -64,8 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -59,4 ve -59,9 Pa olarak hesaplanmıştır. Blok boyu mesafe arttıkça Şekil 4.68, 4.69 ve 4.70'den görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. Giriş basınçları, 0,635 cm blok boyu mesafesi için 19,82 Pa, 1,27 cm blok boyu mesafesi için 21,77 Pa ve 1,905 cm blok boyu mesafe için 22,97 Pa olarak elde edilmiştir. Blok boyu mesafesi arttıkça basınç değişimindeki bu artış kullanılacak fanın gücünü artırılması gerektiğini vurgulamaktadır.



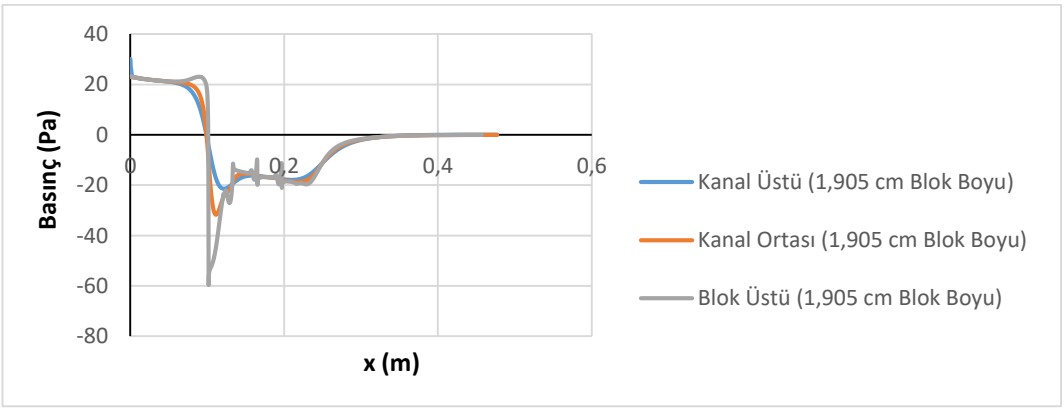
Şekil 4.67. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi



Şekil 4.68. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi

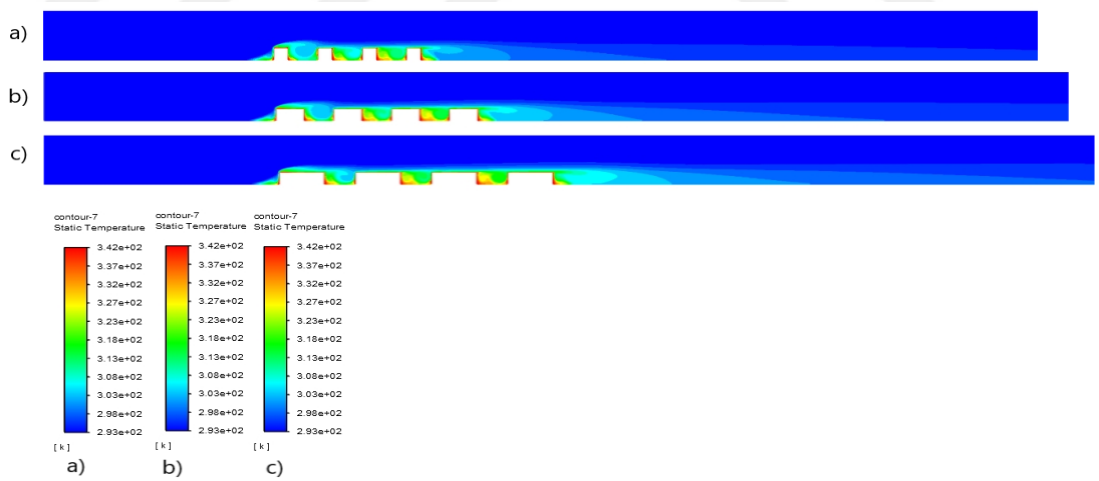


Şekil 4.69. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi



Şekil 4.70. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi

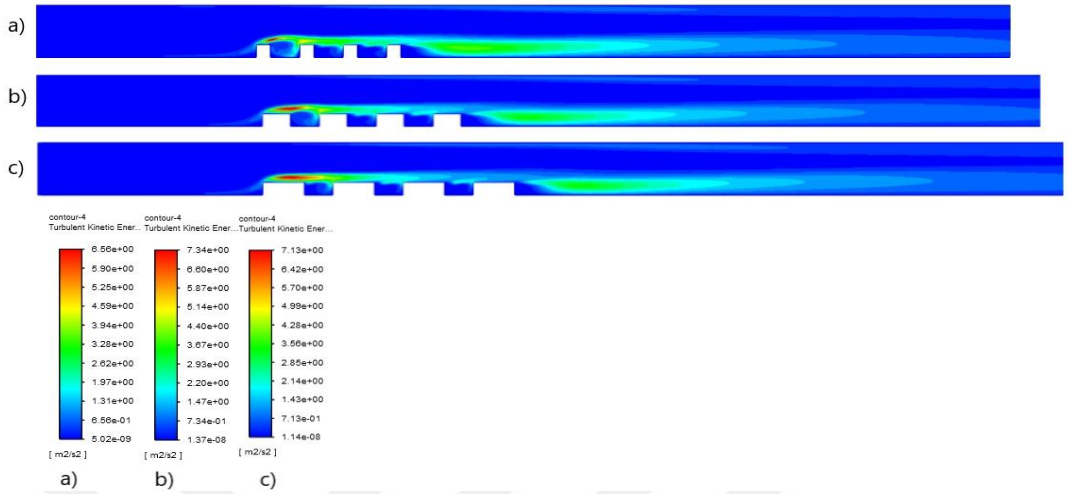
Şekil 4.71'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok boyu mesafesinin daha az olduğu Şekil 4.71 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Blok boyu mesafesinin en az olduğu Şekil 4.71 a durumunda Şekil 4.65'den de görülebileceği gibi birinci bloktan sonra öndeki küçük ikincil girdap oluşmadığı için ilk çukurda bu etki hemen hemen yok gibidir. Fakat diğer iki çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurlarda sıcaklık artmaktadır. Bu etki blok boyu mesafesi arttığında çok fazla bir değişime uğramamaktadır. Bu benzerliğin buradaki bloklar arasındaki mesafenin aynı olmasıyla çukurlarda oluşan girdap boyunun benzer olmasına yorulabilir.



Şekil 4.71. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

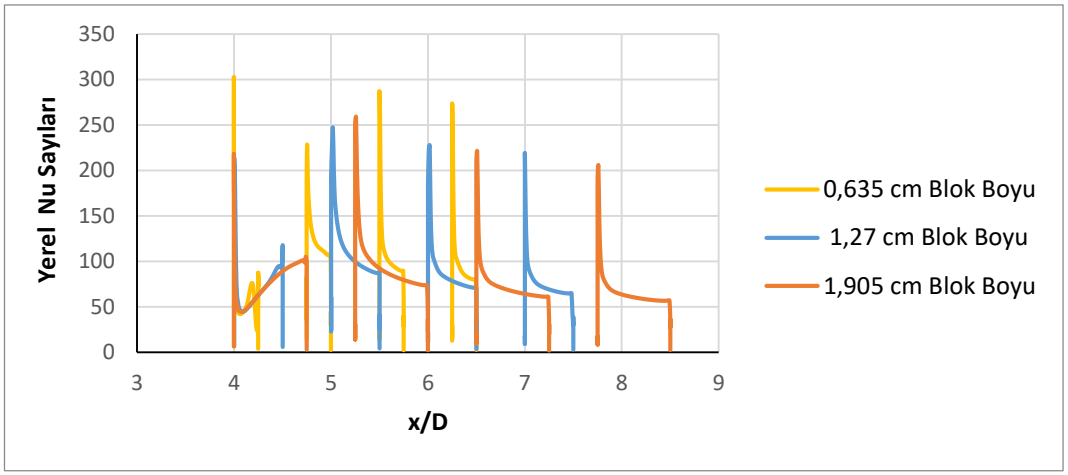
Şekil 4.72'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok boyu mesafesi attıkça maksimum etki alanı yayılmaktadır. Ayrıca son blok

arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



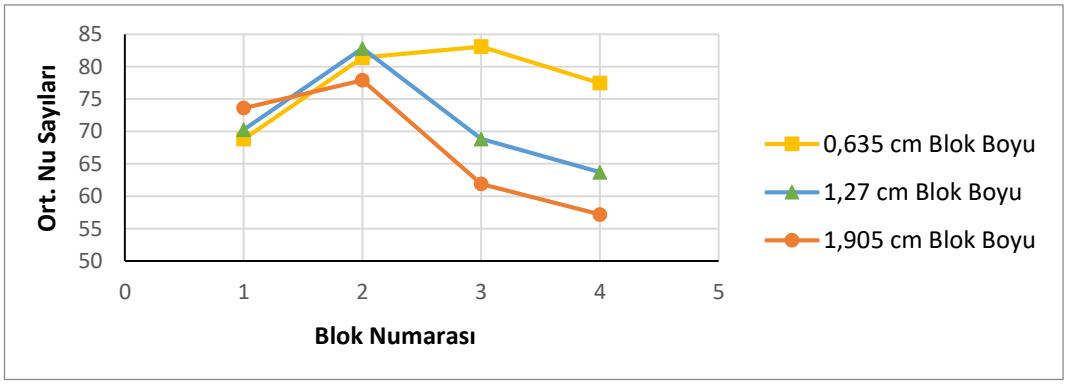
Şekil 4.72. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

Şekil 4.73'de farklı blok boyu mesafesi için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok boyu mesafenin en az olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülürken üçüncü yonga üzerinde ikinci yongaya göre tekrar bir artış gözlenmiştir. Blok boyu mesafesi arttıkça elde edilen maksimum Nusselt sayısı ikinci blok üzerinde elde edilmiş olup, en düşük Nu sayısı ise en son yonga üzerindedir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.73. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.74'de tüm geometriler için, yani blok boyu mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı blok boyu mesafenin daha az olduğu durumda üçüncü yonga üzerinde edilirken, blok boyu mesafesi arttıkça en yüksek ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Blok boyu mesafesinin az olduğu durumda en düşük ortalama Nu sayısı birinci yongada elde edilmiş olmakla beraber diğer iki durumda en son yongada elde edilmektedir. Blok boyu mesafesinin artışı Çizelge 4.7'den de görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini azaltmaktadır.



Şekil 4.74. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.7. Re=11993 (7,21 m/s) için blokların ortalama Nusselt sayıları

Blok Boyu Mesafesi	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	77,69
1,27 cm	71,41
1,905 cm	67,65

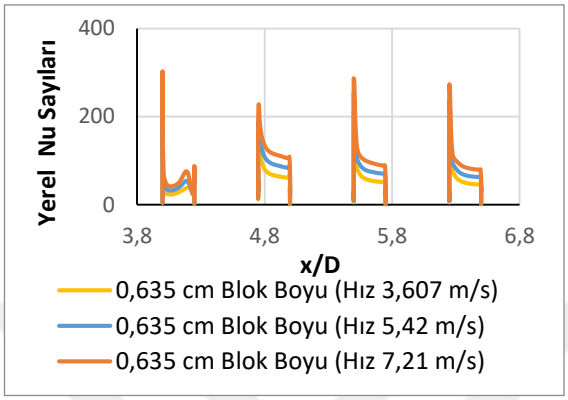
Blok boyu için farklı hızlarda karşılaştırma

Çizelge 4.8 incelendiğinde blok boyu arttığında yeniden birleşme uzunluklarında ufak bir miktar artma olmaktadır. Re sayısı arttığında aynı geometri için yeniden birleşme uzunlukları çok az bir miktar azalmaktadır. Pulat (1997), Türbülanslı akışta, Reynolds sayısının artmasıyla yeniden birleşme uzunluğunun azalmakta ve 20000 Reynolds sayısından sonra yeniden birleşme uzunluğunun değişmediğini gözlemlemiştir.

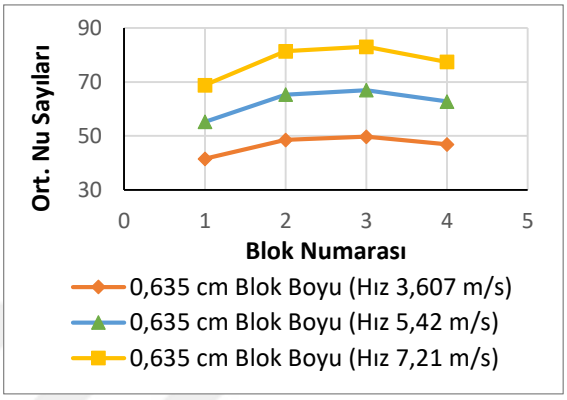
Çizelge 4.8. Farklı hızlarda ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Blok Boyu(cm)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	0,635	0,008	0,046634
	1,27	0,009	0,048079
	1,905	0,009	0,048333
5,42	0,635	0,008	0,045781
	1,27	0,0085	0,046539
	1,905	0,0089	0,047393
7,21	0,635	0,008316	0,045004
	1,27	0,008673	0,046299
	1,905	0,0087	0,046966

0,635 cm blok boyu mesafesinde hızın artması Şekil 4.75 ve Şekil 4.76'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı üçüncü blok üzerinde elde birinci blokta en düşük değerini almaktadır.

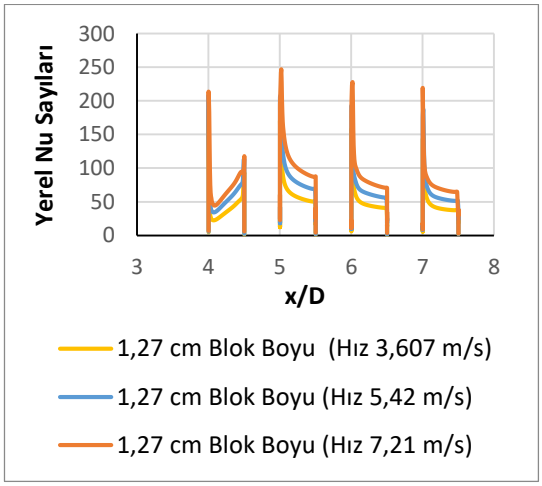


Şekil 4.75. 0,635 cm blok boyu için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

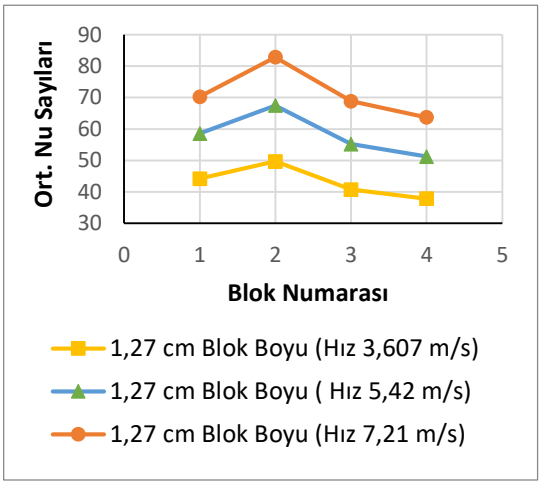


Şekil 4.76. 0,635 cm blok boyu için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,27 cm blok boyu mesafesinde hızın artması Şekil 4.77 ve Şekil 4.78'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilirken en düşük dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.

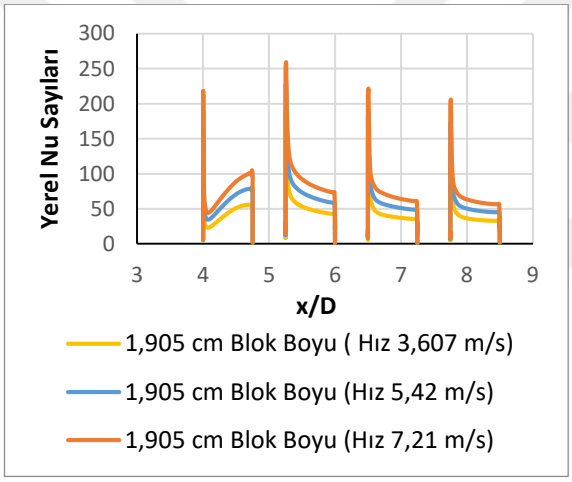


Şekil 4.77. 1,27 cm blok boyu için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

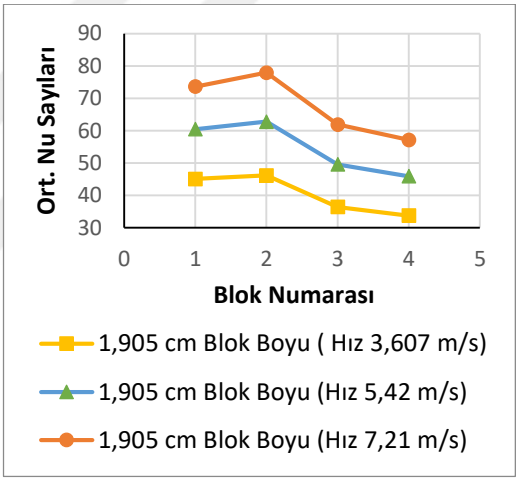


Şekil 4.78. 1,27 cm blok boyu için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,905 cm blok boyu mesafesinde Re sayısının artması (hızın artması) Şekil 4.79 ve Şekil 4.80'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilirken en düşük dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.79. 1,905 cm blok boyu için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları



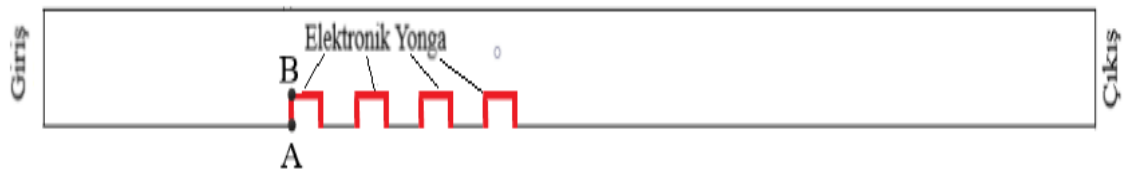
Şekil 4.80. 1,905 cm blok boyu için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

Yapılan 9 adet analiz, Çizelge 4.5, 4.6 ve 4.7 incelendiğinde bloklar üzerindeki en yüksek ortalama Nu sayısının 0,635 cm blok boyu mesafesinde Re=11993 (Hız 7,21 m/s) 77,69 olduğu görülmüştür. Yani en fazla ısı transferinin 7,21 m/s hızda 0,635 cm blok boyu mesafesinde olduğu tespit edilmiştir. Yücel ve diğerleri (1993), dikey bir kanalda çok düşük Re sayılarında yaptıkları çalışmada blok boyu artırıldığında ortalama Nu sayısının önce artan bir eğilim gösterip en tepe noktaya çıktıktan sonra azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Türkoğlu ve Yücel (1995), dikey bir kanalda düşük Re sayılarında yaptıkları çalışmada, blok boyunun artmasıyla ortalama Nu sayısının önce düştüğünü, sonra bu düşme eğiliminin azalarak devam ettiğini gözlemlemişlerdir. Xu ve diğerleri

(1998), dikey bir kanalda akışkan olarak FC-72 ile yaptıkları çalışmalarında kanal genişliğinin ısı kaynağının uzunluğuna (blok boyu) oranı arttıkça ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Leung ve diğerleri (2000), yatay bir kanalda laminer akışta yaptıkları çalışmalarında yongaların boyu arttıkça ısı transferinin azaldığını tespit etmişlerdir. Dhingra ve Ghoshdastidar (2016), dikey bir kanalda yaptıkları çalışmada blok boyunun artırılmasıyla sağ duvardaki sıcaklığın arttığını dolayısıyla ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

4.1.3. 2 Boyutlu geometride blok yüksekliğinin incelenmesi

Şekil 4.81'de görüldüğü gibi blok yüksekliğinin değişimini incelemek amacıyla Şekil 4.81'deki A-B aralığı yani blok yüksekliği baz geometride alınan değer dışında 2 değer daha alınarak 3 farklı hızda inceleme yapılmıştır. Baz geometride A-B aralığı 0,635 cm olmakla beraber, her 4 yonga için 1,27 cm ve 1,905 cm de alınarak analiz yapılmıştır. Blok yüksekliği değişimini incelemek için toplam 9 adet analiz yapılmıştır.

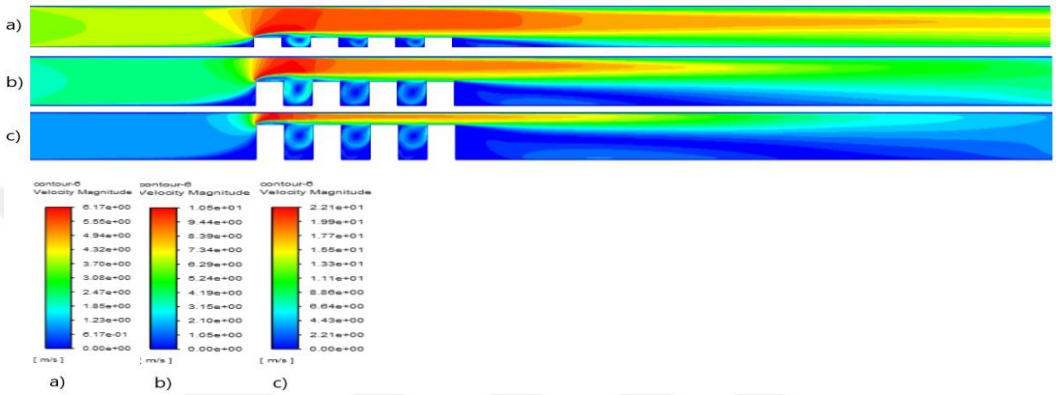


Şekil 4.81. Blok yüksekliği değişiminin gösterimi

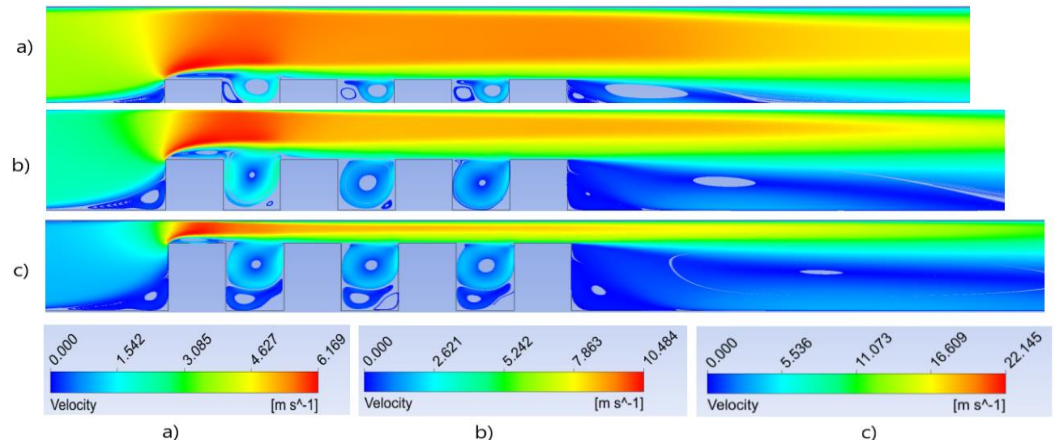
Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.82 ve 4.83 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En yüksek blok yüksekliği mesafesinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün blok yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En küçük blok yüksekliği mesafesinde saat yönünün tersinde oluşan girdaplar bloğun ön tarafında oluşurken blok yüksekliği arttıkça bu girdaplar bloğun arkasına ve bloğun en altına doğru yayılmaktadır. Blok yüksekliği arttıkça Şekil 4.83 b'nin son çukuru hariç bütün çukurlarda saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri

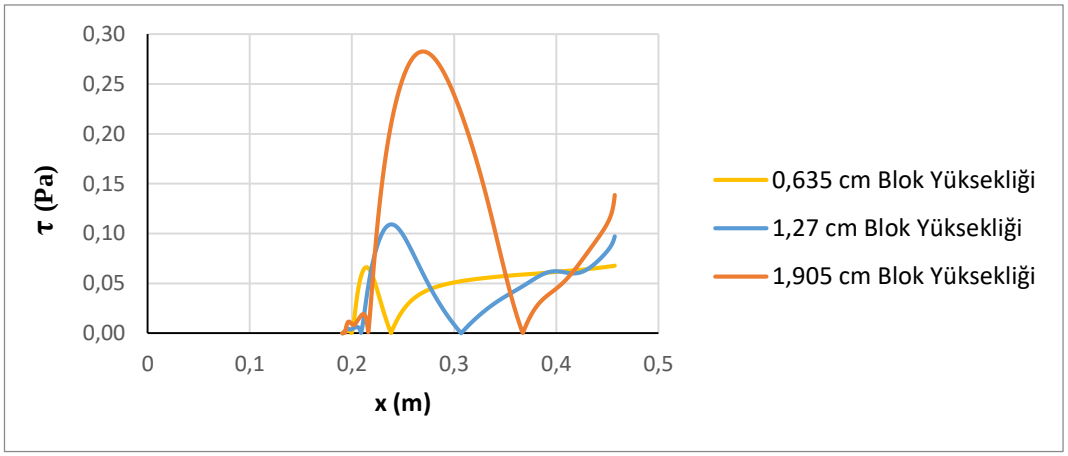
basamak akışına benzemekte ve blok yüksekliği arttıkça yeniden birleşme uzunlukları da artmaktadır (Bkz. Çizelge 4.12). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.84'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve yeniden birleşme uzunluklarının farklı hızlarda karşılaştırması Çizelge 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.82. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

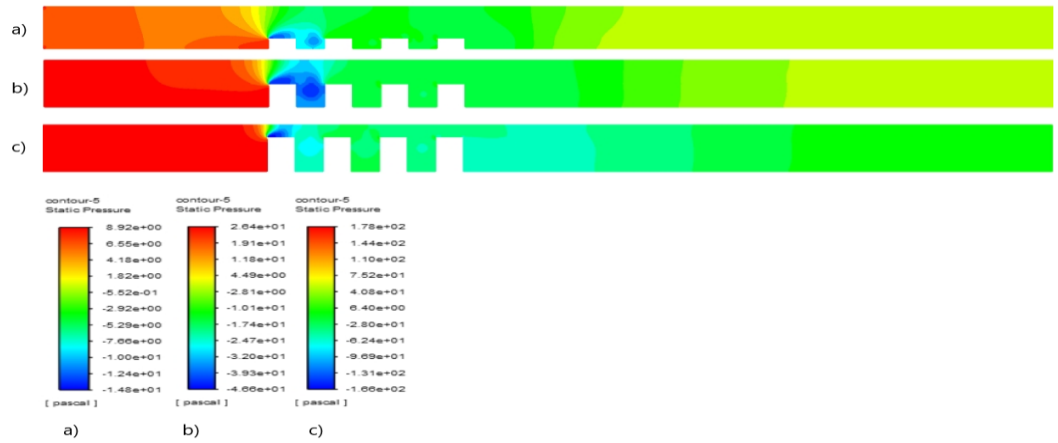


Şekil 4.83. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

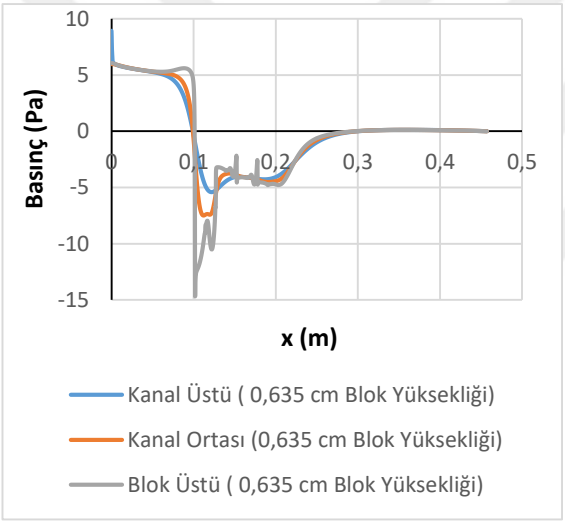


Şekil 4.84. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

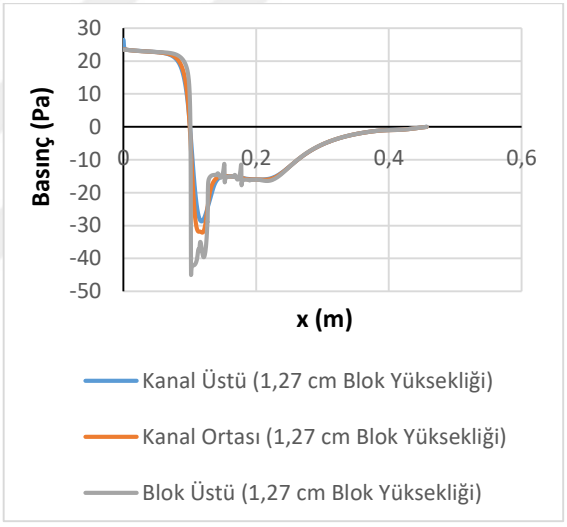
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.85'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.86, 4.87 ve 4.88'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Şekil 4.85 a ve b durumunda yani blok yüksekliğinin daha az olduğu durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Blok yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.82'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.82 a için 6,17 m/s, b ve c'de artarak 10,5 m/s ve 22,1 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.85 a'daki minimum basınç -14,8 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -46,6 ve -166 Pa olarak hesaplanmıştır. Blok yüksekliği arttıkça Şekil 4.86, 4.87 ve 4.88'den görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. Giriş basınçları, 0,635 cm yüksekliği mesafesi için 5,97 Pa, 1,27 cm blok yüksekliği için 23,53 Pa ve 1,905 cm yüksekliği için 175 Pa olarak elde edilmiştir. Blok yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu artış soğutma için kullanılacak fanın gücünün artırılması gerektiğini vurgulamaktadır.



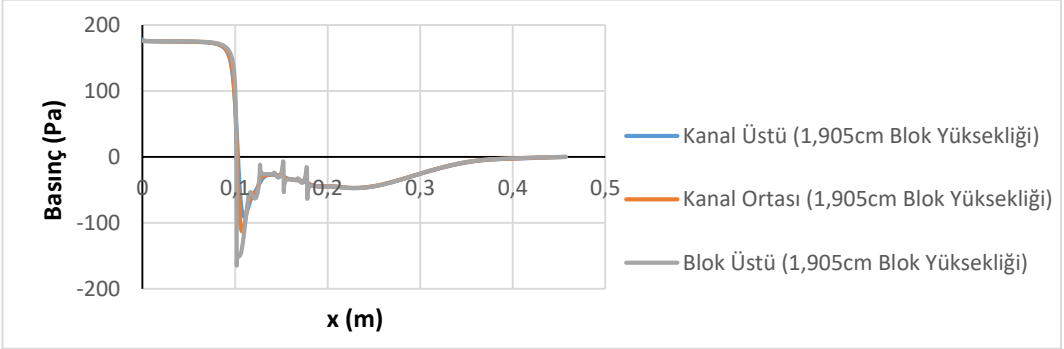
Şekil 4.85. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



Şekil 4.86. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

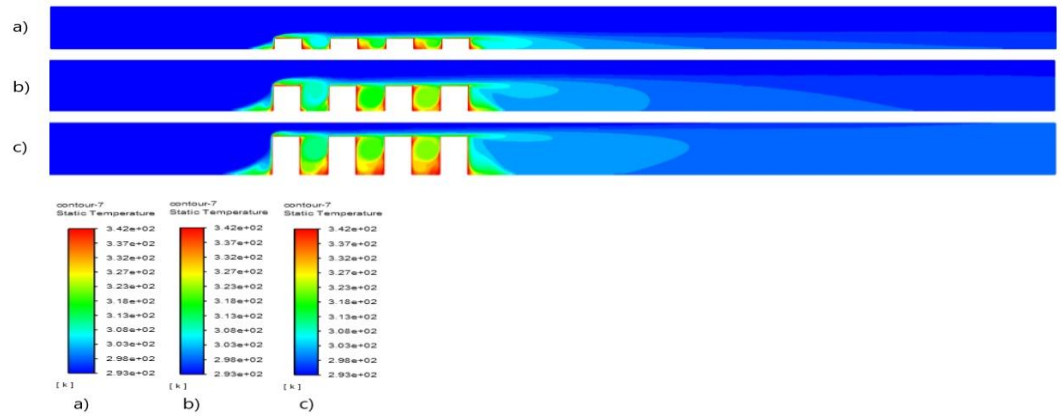


Şekil 4.87. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi



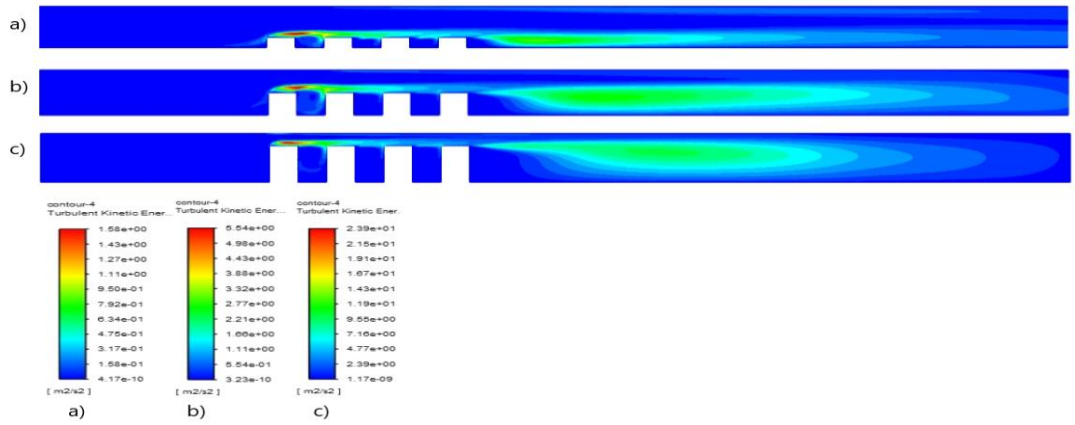
Şekil 4.88. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.89'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok yüksekliğinin daha fazla olduğu Şekil 4.89 c durumda giriş havası birinci blokta daha fazla ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca bu durum Şekil 4.83 c'den de görülebileceği gibi ters yönde oluşan girdapların uzunluğunun daha fazla olmasına yorulabilir. Bu durum blok yüksekliği azaldıkça etkisini azaltmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı blok yüksekliği arttıkça artmaktadır. Çünkü blok yüksekliği arttıkça kesit daraldığından akışkan daha fazla hızlanmakta daha yüksekten gelerek etki alanını artırmaktadır.



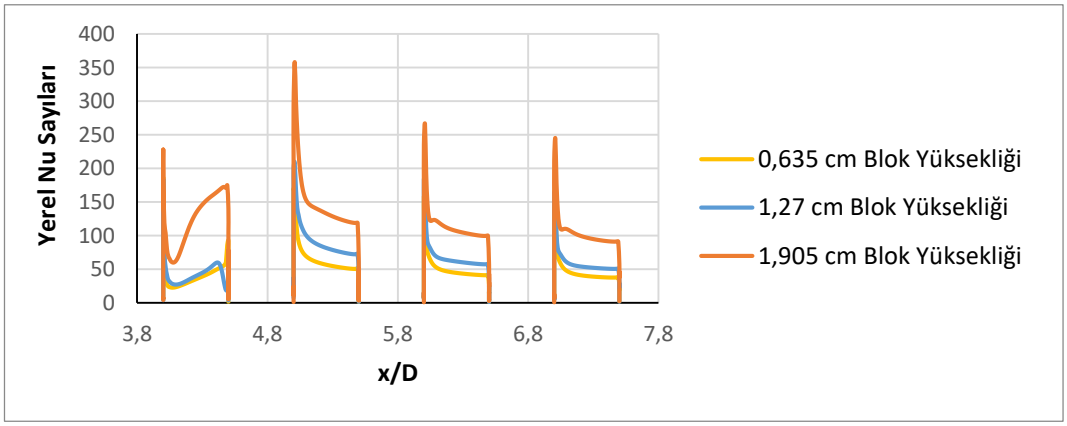
Şekil 4.89. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.90'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok yüksekliği attıkça maksimum etki alanı azalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.90. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

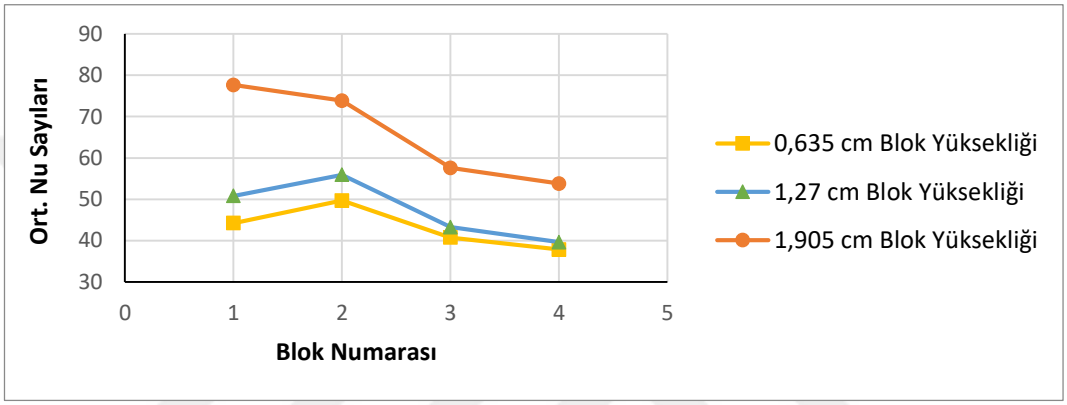
Şekil 4.91'de farklı blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok yüksekliğinin en az olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülürken son yongaya doğru yerel Nu sayısı azalmaktadır. Blok yüksekliği arttıkça yerel maksimum Nusselt sayısı ikinci blok üzerinde elde edilmiş olup, en düşük Nu sayısı ise en son yonga üzerinde gözlemlenmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.91. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayılarının gösterimi

Şekil 4.92'de tüm geometriler için, yani blok yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların

sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı blok yüksekliğinin daha fazla olduğu durumda birinci yonga üzerinde edilirken, blok yüksekliği azaldıkça en yüksek ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Tüm blok yükseklikleri için en düşük ortalama Nu sayısı son yonga da elde edilmektedir. Blok yüksekliğinin artışı Çizelge 4.9'dan da görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini artırmaktadır.



Şekil 4.92. Re=6000 (3,607 m/s) için ortalama Nusselt sayılarının gösterimi

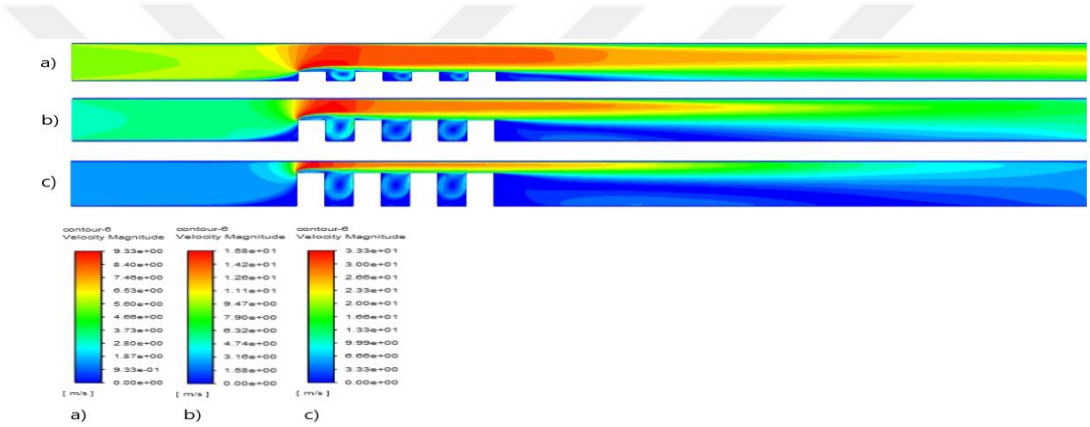
Çizelge 4.9. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ort. Nusselt sayılarının gösterimi

Blok Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	43,125
1,27 cm	47,39
1,905 cm	65,71

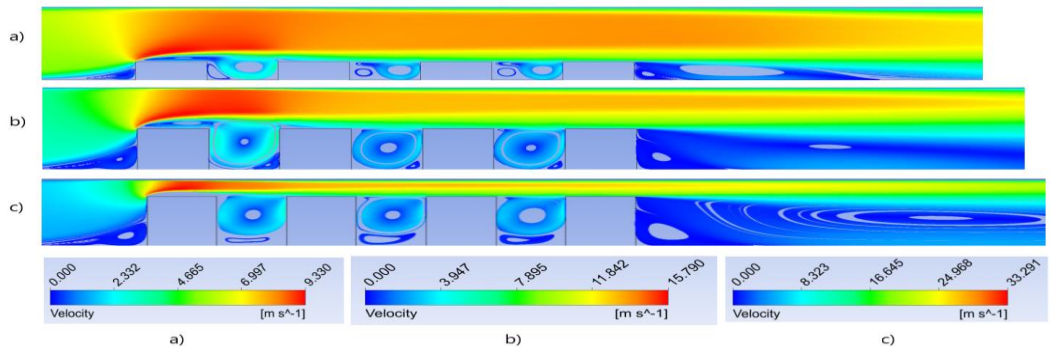
Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.93 ve 4.94 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En yüksek blok yüksekliği mesafesinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün blok yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En küçük blok yüksekliği mesafesinde saat yönünün tersinde oluşan girdaplar bloğun ön

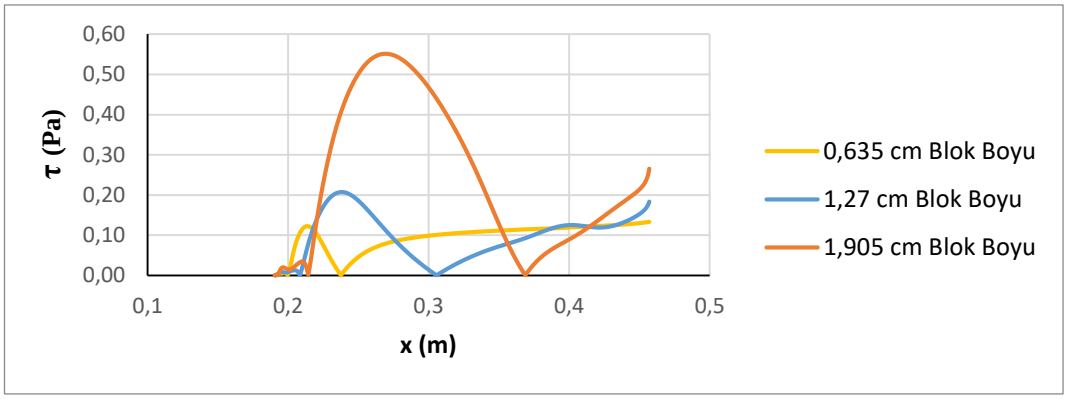
tarafında oluşurken blok yüksekliği arttıkça bu girdaplar bloğun arkasına ve bloğun en altına doğru yayılmaktadır. Blok yüksekliği arttıkça saat yönünün tersinde oluşan girdapların boyu da artmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve blok yüksekliği arttıkça yeniden birleşme uzunlukları da artmaktadır (Bkz. Çizelge 4.12). Aung (1983) ve Armaly ve diğerleri (2001), sabit giriş hızında blok yüksekliği arttıkça yeniden birleşme uzunluğunun arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.95'teki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırması Çizelge 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.93. Re=9015 (5,42 m/s) hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

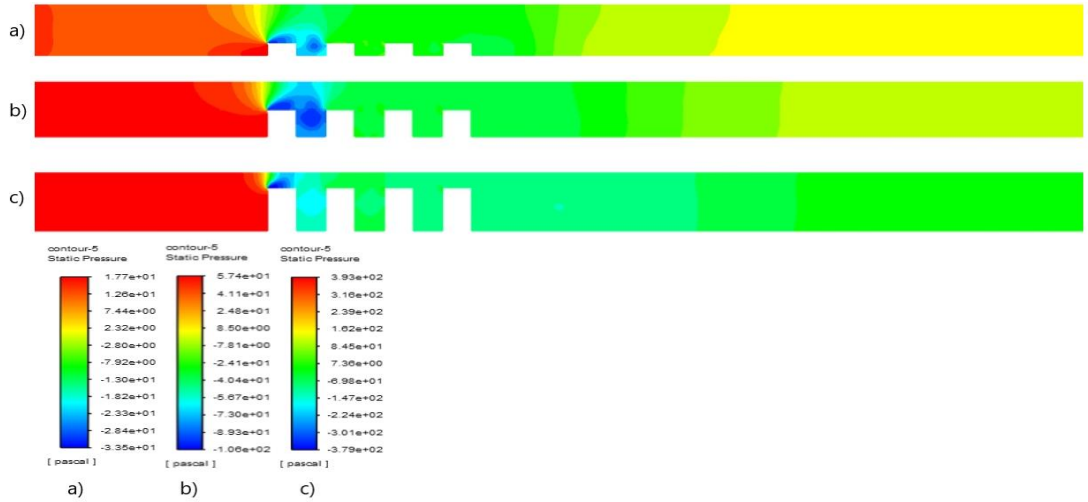


Şekil 4.94. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

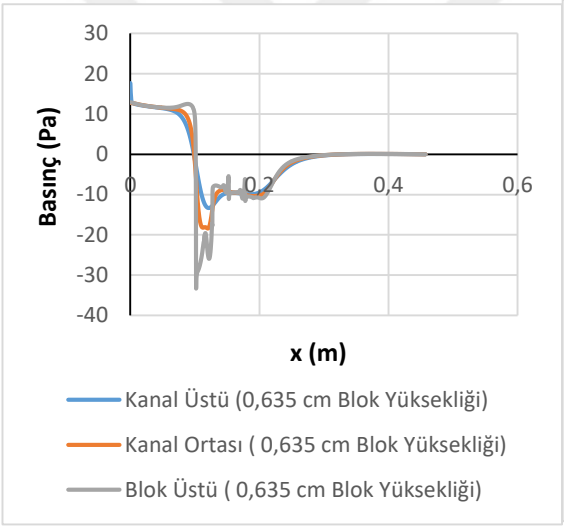


Şekil 4.95. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

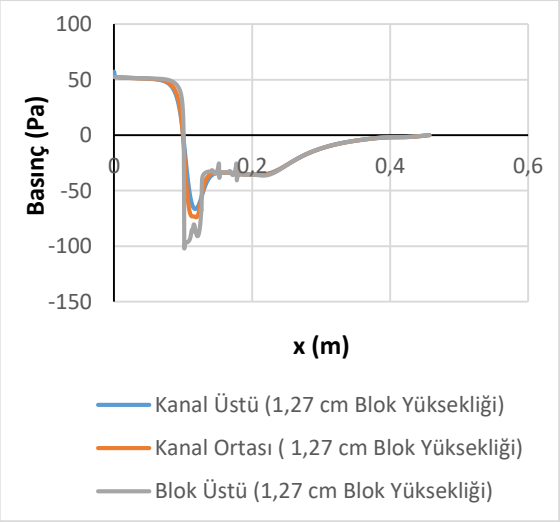
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.96'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.97, 4.98 ve 4.99'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Şekil 4.96 a ve b durumunda yani blok yüksekliğinin daha az olduğu durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Blok yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.93'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.93 a için 9,33 m/s, b ve c'de artarak 16,8 m/s ve 33,3 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.96 a'daki minimum basınç -33,5 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -106 Pa ve -379 Pa olarak hesaplanmıştır. Blok yüksekliği arttıkça Şekil 4.97, 4.98 ve 4.99'dan görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. Giriş basınçları, 0,635 cm yüksekliği için 12,73 Pa, 1,27 cm blok yüksekliği için 52,41 Pa ve 1,905 cm blok yüksekliği için 388,18 Pa olarak elde edilmiştir. Blok yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu artış soğutma için kullanılacak fanın gücünün artırılması gerektiğini vurgulamaktadır.



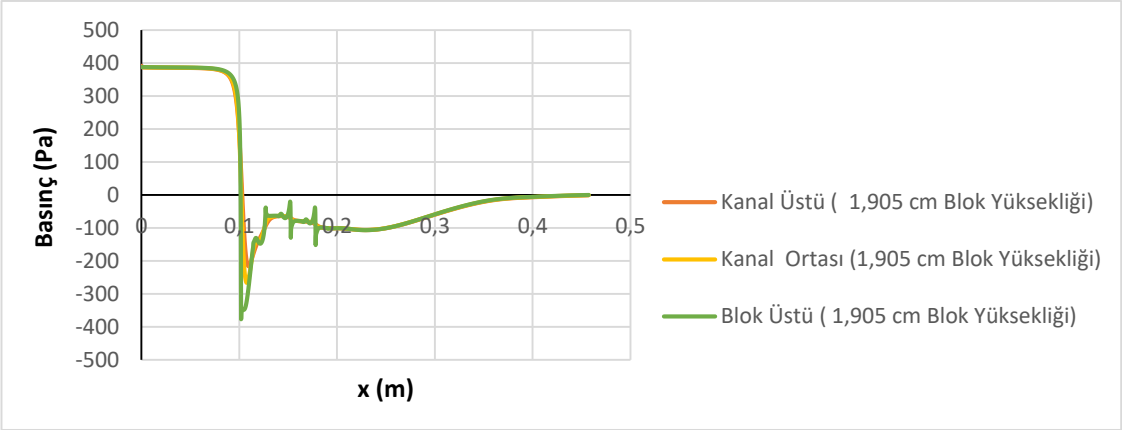
Şekil 4.96. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



Şekil 4.97. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

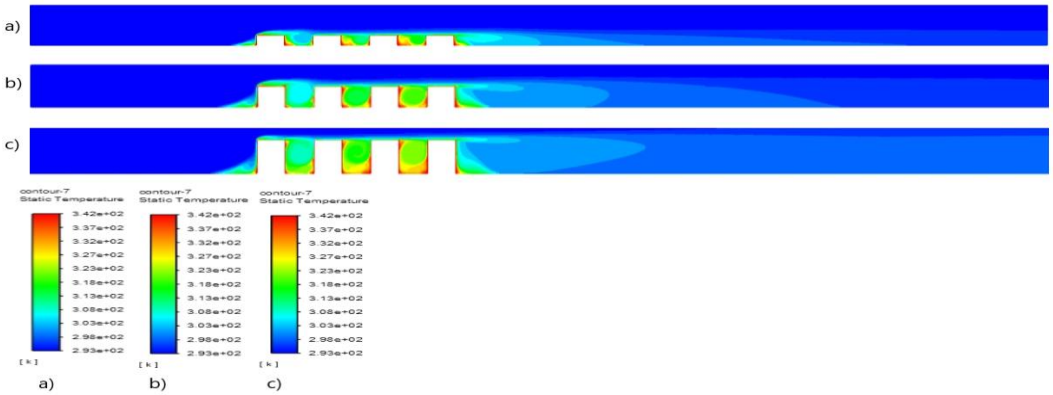


Şekil 4.98. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi



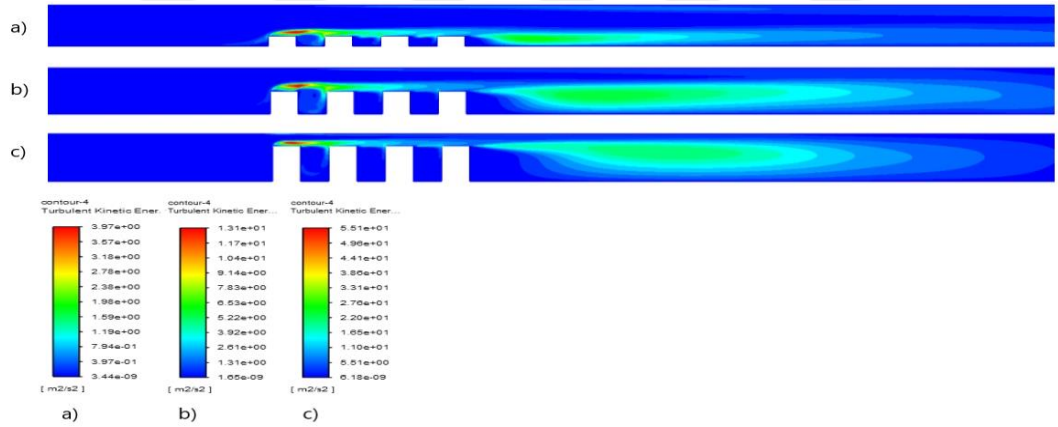
Şekil 4.99. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.100'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok yüksekliğinin daha fazla olduğu Şekil 4.100 c durumda giriş havası birinci blokta daha fazla ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca bu durum Şekil 4.94 c'den de görülebileceği gibi ters yönde oluşan girdapların uzunluğunun daha fazla olmasına yorulabilir. Bu durum blok yüksekliği azaldıkça etkisini azaltmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı blok yüksekliği arttıkça artmaktadır. Çünkü blok yüksekliği arttıkça kesit daraldığından akışkan daha fazla hızlanmakta daha yüksekten gelerek etki alanını artırmaktadır.



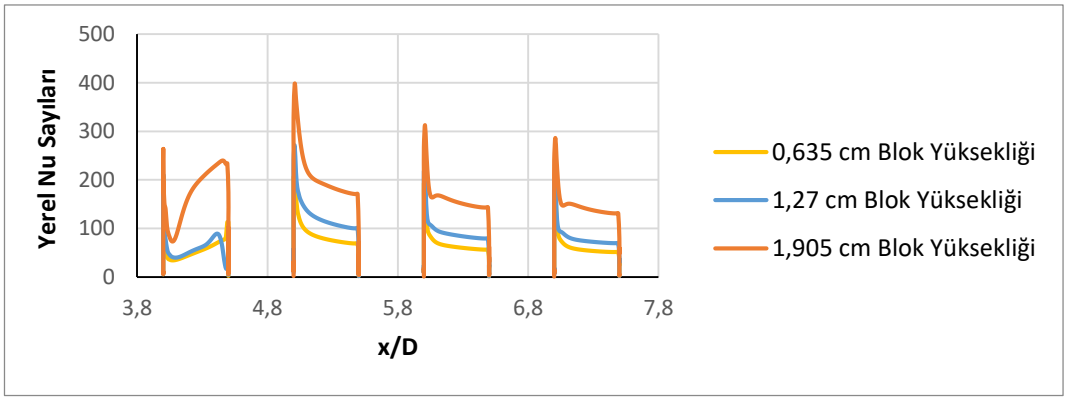
Şekil 4.100. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.101'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok yüksekliği attıkça maksimum etki alanı azalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok yüksekliği arttıkça çıkış duvarına doğru yayılmaktadır.



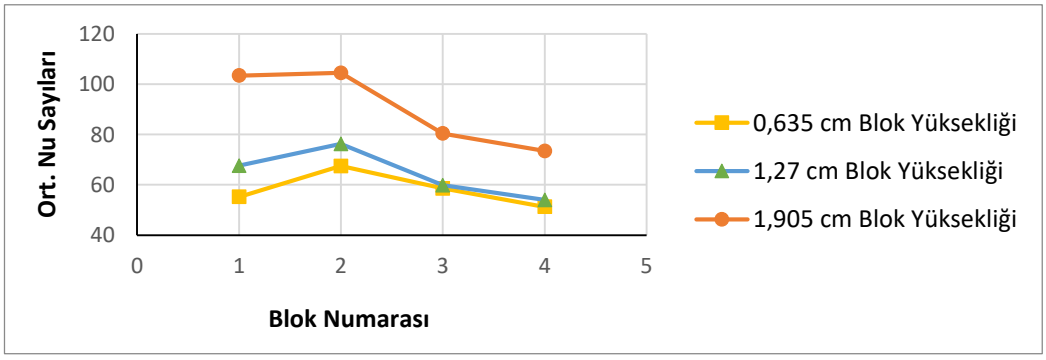
Şekil 4.101. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.102'de farklı blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm blok yüksekliklerinde ikinci yonga üzerinde görülürken son yongaya doğru yerel Nu sayısı azalmaktadır. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.102. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.103'de tüm geometriler için, yani blok yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu değeri tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm blok yükseklikleri için en düşük ortalama Nu sayısı son yonga da elde edilmektedir. Blok yüksekliğinin artışı Çizelge 4.10'dan da görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini artırmaktadır.



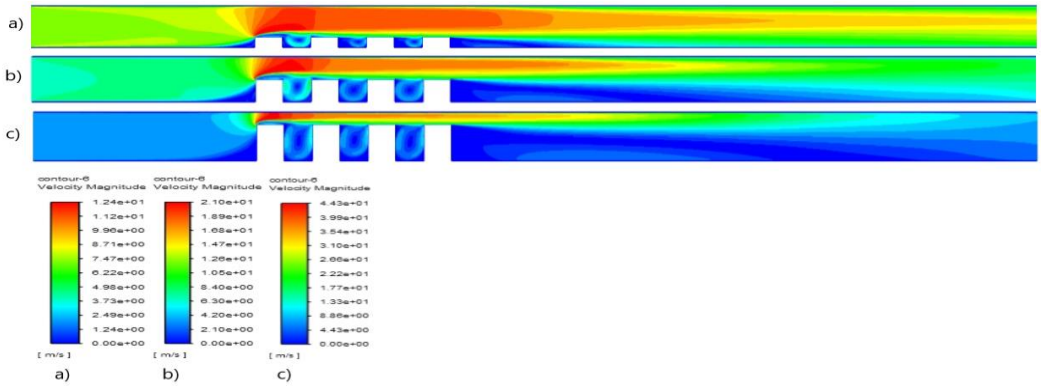
Şekil 4.103. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.10. Re=9015 (5,42 m/s) için blokların ortalama Nusselt sayıları

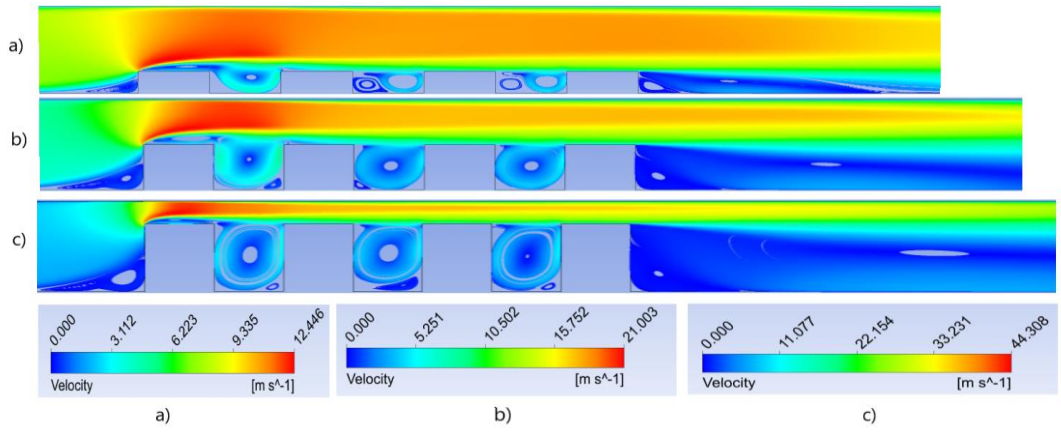
Blok Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	58,21
1,27 cm	64,43
1,905 cm	90,44

Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

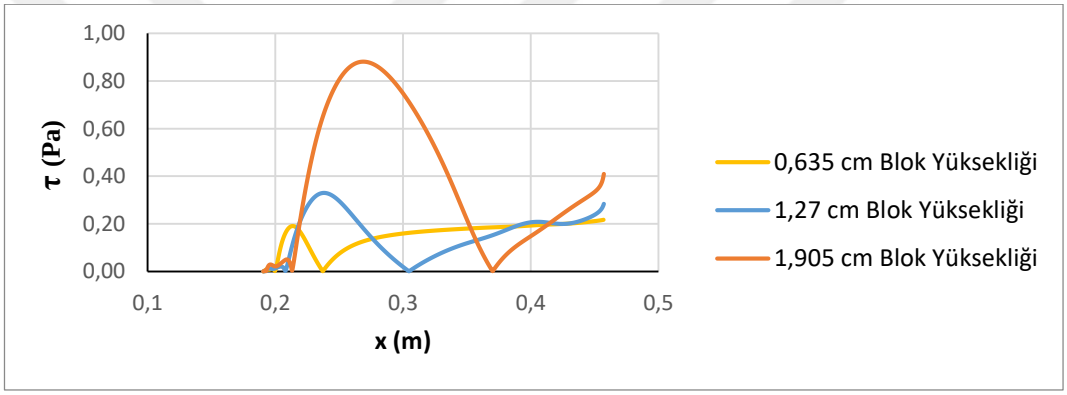
Şekil 4.104 ve 4.105 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En yüksek blok yüksekliği mesafesinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün blok yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En küçük blok yüksekliği mesafesinde saat yönünün tersinde oluşan girdaplar bloğun ön tarafında oluşurken blok yüksekliği arttıkça bu girdaplar bloğun arkasına ve bloğun en altına doğru yayılmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve blok yüksekliği arttıkça yeniden birleşme uzunlukları da artmaktadır (Bkz. Çizelge 4.12). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.106'daki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.104. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



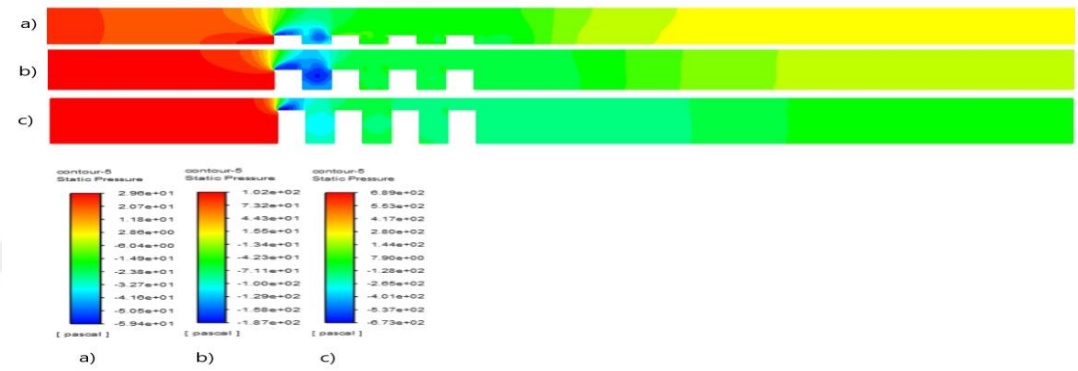
Şekil 4.105. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



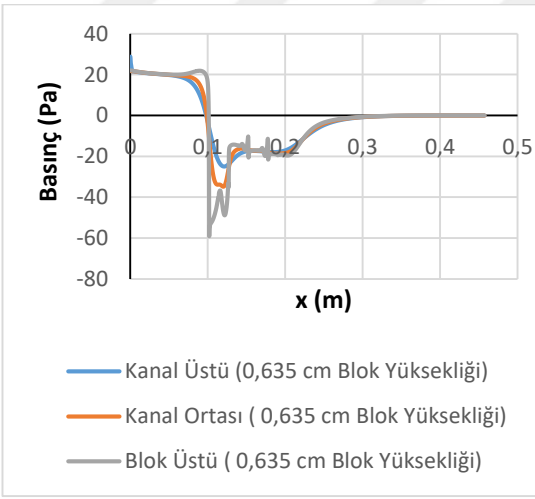
Şekil 4.106. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.107'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.108, 4.109 ve 4.110'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Şekil 4.107 a ve b durumunda yani blok yüksekliğinin daha az olduğu durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Blok yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.104'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.104 a için 12,4 m/s, b ve c'de artarak 21 m/s ve 44,3 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.107 a'daki minimum basınç -59,4 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -187 Pa ve -673 Pa olarak hesaplanmıştır. Blok yüksekliği arttıkça Şekil 4.108, 4.109 ve 4.110'dan

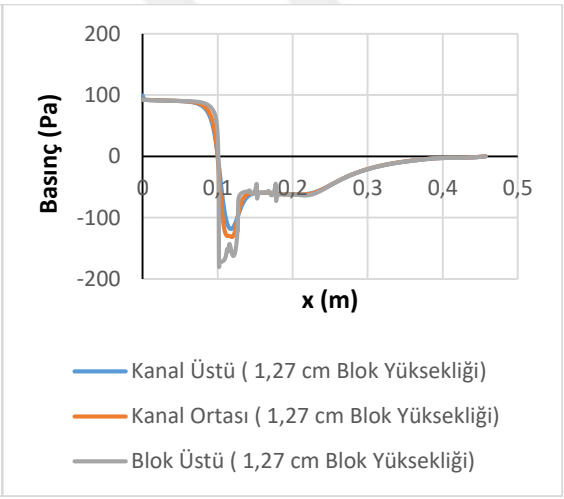
görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. Giriş basınçları, 0,635 cm blok yüksekliği için 21,7 Pa, 1,27 cm blok yüksekliği için 92,4 Pa ve 1,905 cm blok yüksekliği için 679 Pa olarak elde edilmiştir. Blok yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu artış soğutma için kullanılacak fanın gücünün artırılması gerektiğini vurgulamaktadır.



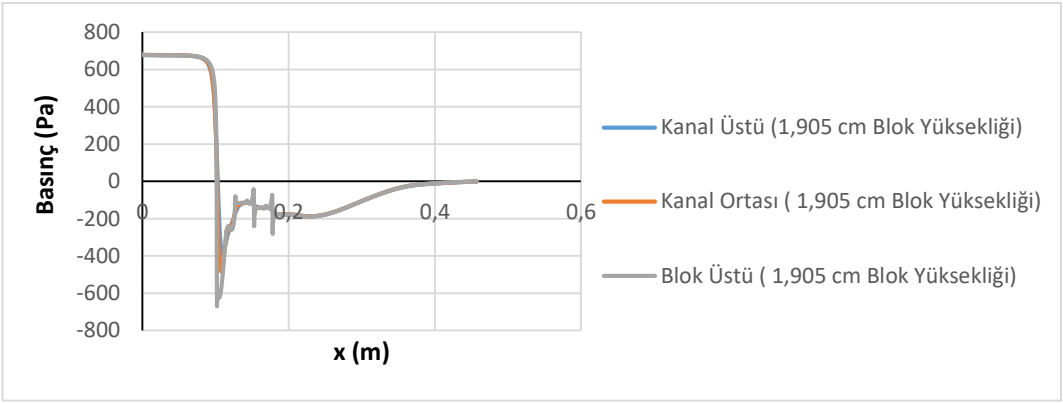
Şekil 4.107. 107 Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



Şekil 4.108. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

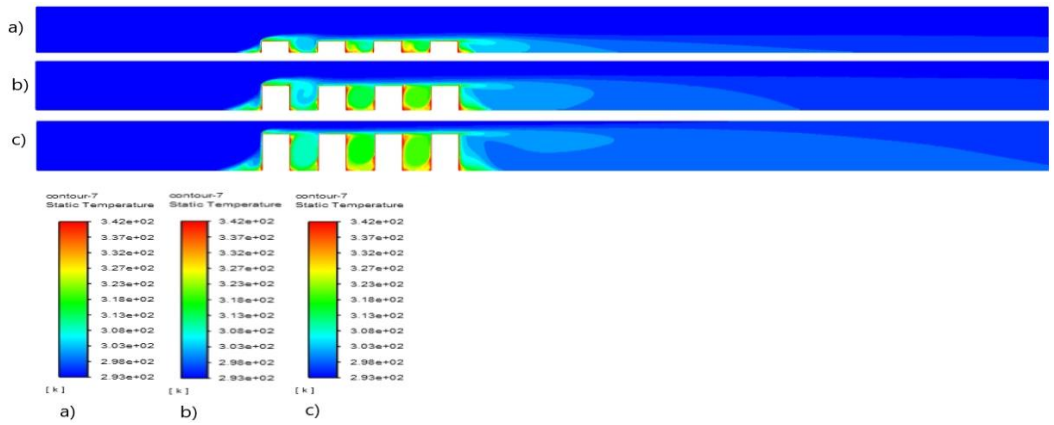


Şekil 4.109. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi



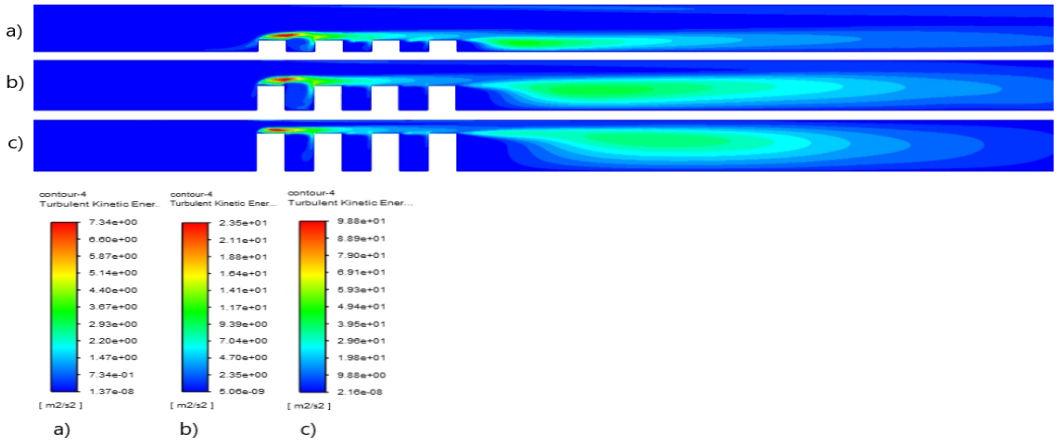
Şekil 4.110. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.111'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok yüksekliğinin daha fazla olduğu Şekil 4.111 b ve c durumda giriş havası birinci blokta daha fazla ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı blok yüksekliği arttıkça artmaktadır. Çünkü blok yüksekliği arttıkça kesit daraldığından akışkan daha fazla hızlanmakta daha yüksekten gelerek etki alanını artırmaktadır.



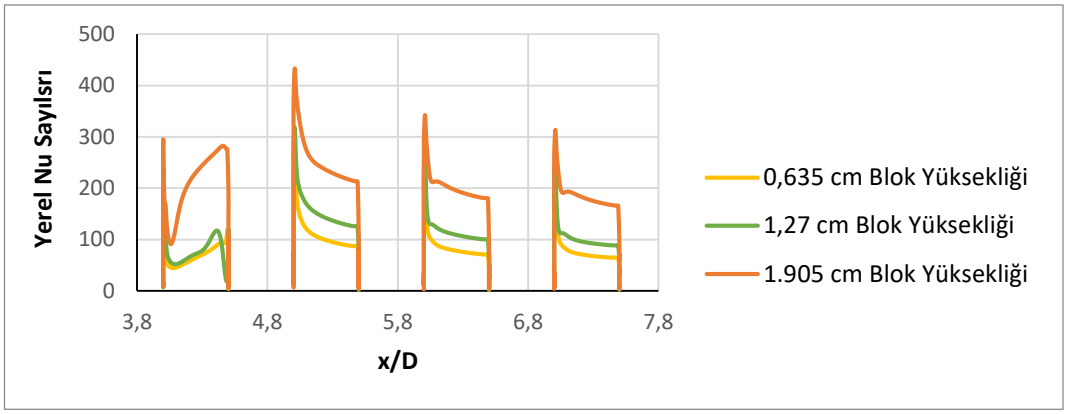
Şekil 4.111. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.112'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok yüksekliği attıkça maksimum etki alanı azalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok yüksekliği arttıkça çıkış duvarına doğru yayılmaktadır.



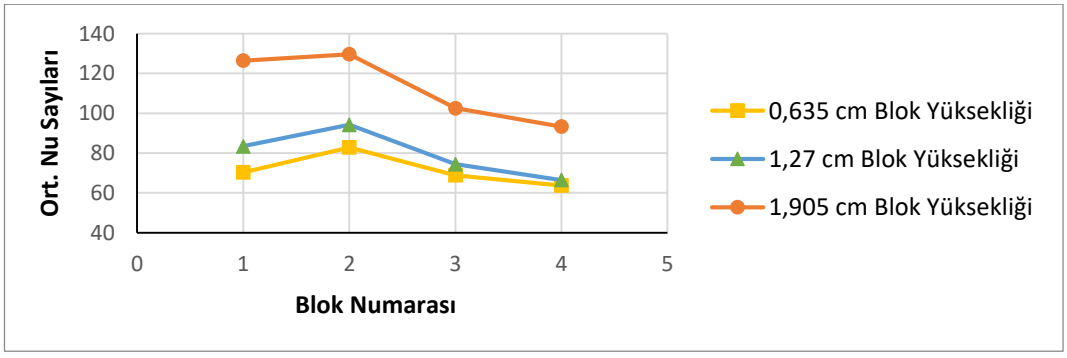
Şekil 4.112. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.113'de farklı blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm blok yüksekliklerinde ikinci yonga üzerinde görülürken son yongaya doğru yerel Nu sayısı azalmaktadır. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.113. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.114'de tüm geometriler için, yani blok yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm blok yükseklikleri için en düşük ortalama Nu sayısı son yonga da elde edilmektedir. Blok yüksekliğinin artışı Çizelge 4.11'den de görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini artırmaktadır.



Şekil 4.114. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.11. Re=11993 (7,21 m/s) tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Blok Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	71,4
1,27 cm	79,6
1,905 cm	112,96

Blok yüksekliğinin farklı hızlarda karşılaştırılması

Çizelge 4.12'den görüldüğü üzere blok yüksekliğinin artması son yongadan sonra oluşan yeniden birleşme uzunluğunu artırmıştır. Nie ve Armaly (2002), yaptığı çalışmalarında basamak yüksekliğini artırmanın yeniden birleşme uzunluğunu artırdığını gözlemlemişlerdir. Re sayısının artmasıyla da yeniden birleşme uzunluklarında aynı geometri için çok fazla bir değişim olmamaktadır.

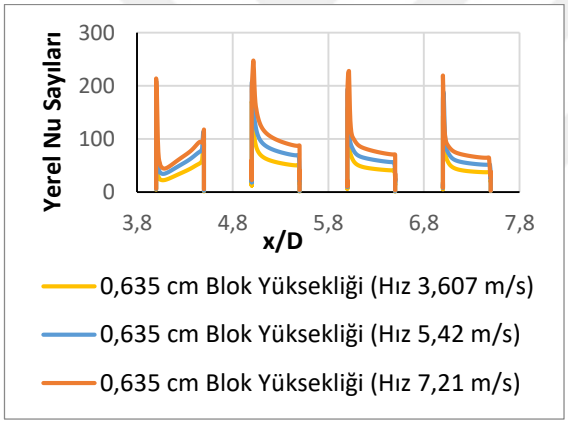
Çizelge 4.12. Farklı hız ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Blok Yüksekliği (cm)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	0,635	0,008961	0,047579
	1,27	0,018349	0,116281
	1,905	0,02539	0,176662
5,42	0,635	0,009175	0,047153
	1,27	0,017709	0,115214
	1,905	0,023896	0,178369

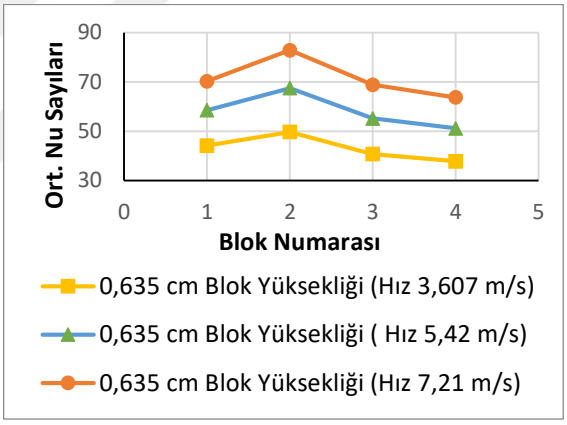
Çizelge 4.12. Farklı hız ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması (devam)

7,21	0,635	0,009175	0,046726
	1,27	0,017282	0,114148
	1,905	0,022616	0,179649

0,635 cm blok yüksekliğinde hızın artması Şekil 4.115 ve Şekil 4.116'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilirken en düşük dördüncü blok üzerinde elde edilmiştir.

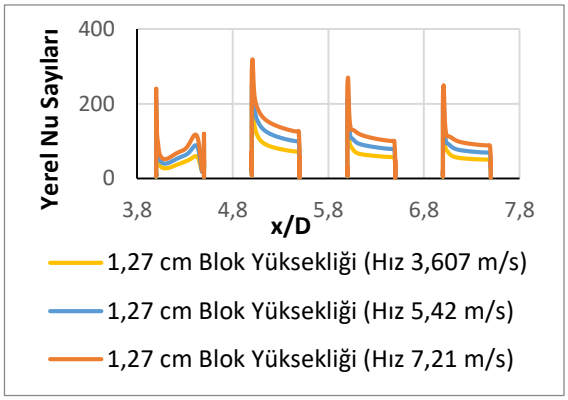


Şekil 4.115. 0,635 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

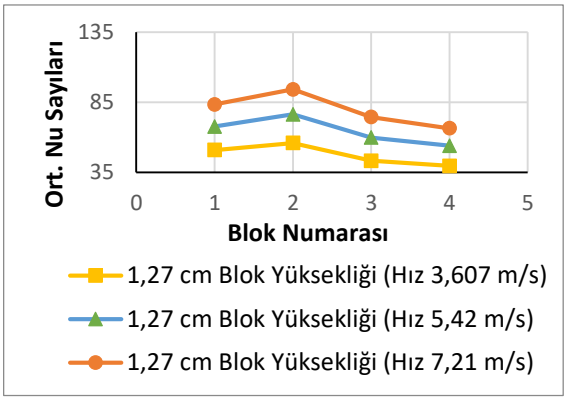


Şekil 4.116. 0,635 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,27 cm blok yüksekliğinde hızın artması Şekil 4.117 ve Şekil 4.118'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilirken en düşük dördüncü blok üzerinde elde edilmiştir.

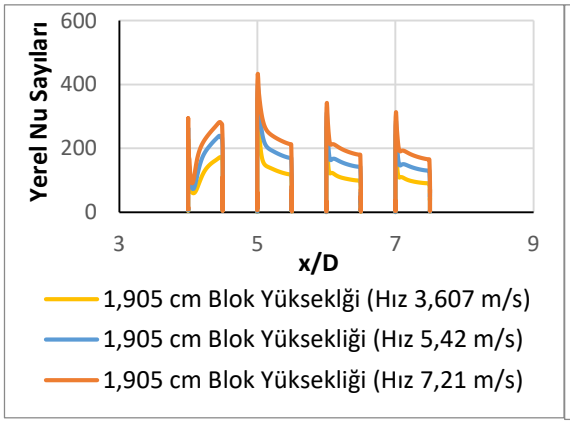


Şekil 4.117. 1,27 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

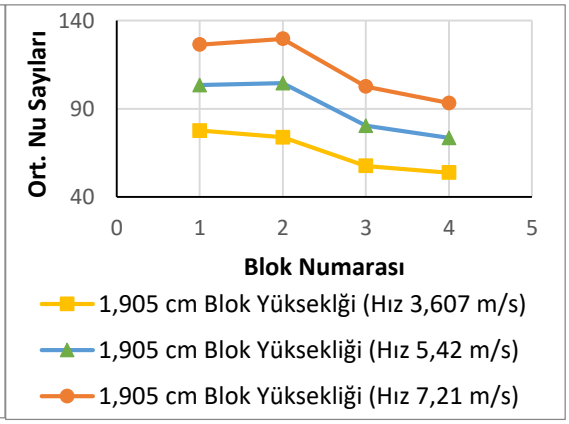


Şekil 4.118. 1,27 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,905 cm blok yüksekliğinde hızın artması (Re sayının artması) Şekil 4.119 ve Şekil 4.120'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. En düşük hızda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken hız arttıkça en yüksek ortalama Nu sayısı ikinci bloğa kaymaktadır. Her üç durumda da en düşük ortalama Nu sayısı son blok üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.119. 1,905 cm blok yüksekliği için yerel Nu sayısının değişimi

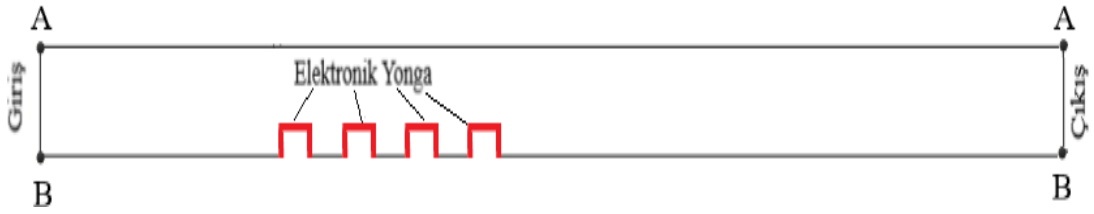


Şekil 4.120. 1,905 cm blok yüksekliği için ortalama Nu sayısının değişimi

Yapılan 9 adet analizle blok yüksekliğinin ısı transferine etkisi incelendiğinde; Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11 incelendiğinde en yüksek ortalama Nu sayısı Re=11993 (Hız 7,21m/s) de ve 1,905 cm blok yüksekliğinde 112,96 olarak tespit edilmiştir. Aung (1983), yaptığı geri basamak akışını inceleyen çalışmasında basamak yüksekliğinin azalmasıyla, basamak arkasında oluşan ve vorteks akışının hakim olduğu bölgenin küçülerek daha az girdaplı hale geldiğini ve böylece ısı transferinin düştüğünü gözlemlemiştir. Naik, Probert ve Bryden (1999), blok yüksekliğini artırmanın ısı transferini arttırdığının sonucuna varmışlardır. Nie ve Armaly (2002), bir kanalda geri basamak üzerine laminer akışta basamak yüksekliği arttıkça Nu sayısının da arttığını gözlemlemişlerdir. Mohammed (2006), yaptığı çalışmasında modülün yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranı arttıkça ortalama Nusselt sayısının arttığını gözlemlemiştir. Tsay ve Cheng (2008), iki boyutlu laminer akışta blok yüksekliği arttıkça ortalama Nusselt sayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Yemenici (2010), çalışmasında blok yüksekliğini artırmanın ısı transferini artırdığını tespit etmiştir.

4.1.4. 2 Boyutlu geometride kanal yüksekliğinin incelenmesi

Şekil 4.121'de görüldüğü gibi kanal yüksekliğinin değişimini incelemek amacıyla Şekil 4.121'deki A-B aralığı yani kanal yüksekliği baz geometride alınan değer dışında 2 değer daha alınarak 3 farklı hızda inceleme yapılmıştır. Baz geometride A-B aralığı 2,54 cm olmakla beraber, 1,27 cm ve 1,905 cm alınarak analiz yapılmıştır. Kanal yüksekliği mesafesinin değişimini incelemek için toplam 9 adet analiz yapılmıştır. Kanal yüksekliği hesabı yaparken kanalı daralttığımızdan dolayı giriş hızları artmıştır. Hız hesabı gerekli formüller ile yapılarak analizler o şekilde yapılmıştır. Re=11993 için 1,27 cm kanal yüksekliğinde hız 14,42 m/s 1,905 cm için hız 9,61 m/s ve 2,54 cm (baz geometri) için hız 7,21 m/s dir. Re=9015 için 1,27 cm kanal yüksekliğinde hız 10,84 m/s 1,905 cm kanal yüksekliğinde hız 7,22 m/s ve 2,54 cm (baz geometri) için hız 5,42 m/s'dir. Re=6000 için 1,27 cm kanal yüksekliğinde hız 7,21 m/s 1,905 cm kanal yüksekliğinde hız 4,73 m/s ve 2,54 cm (baz geometri) için hız 3,607 m/s dir. Bu değişiklikler Çizelge 4.13 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.121. Kanal yüksekliği değişiminin gösterimi

Çizelge 4.13. Re sayısına göre kanal yüksekliğinin değişimiyle belirlenen hızlar

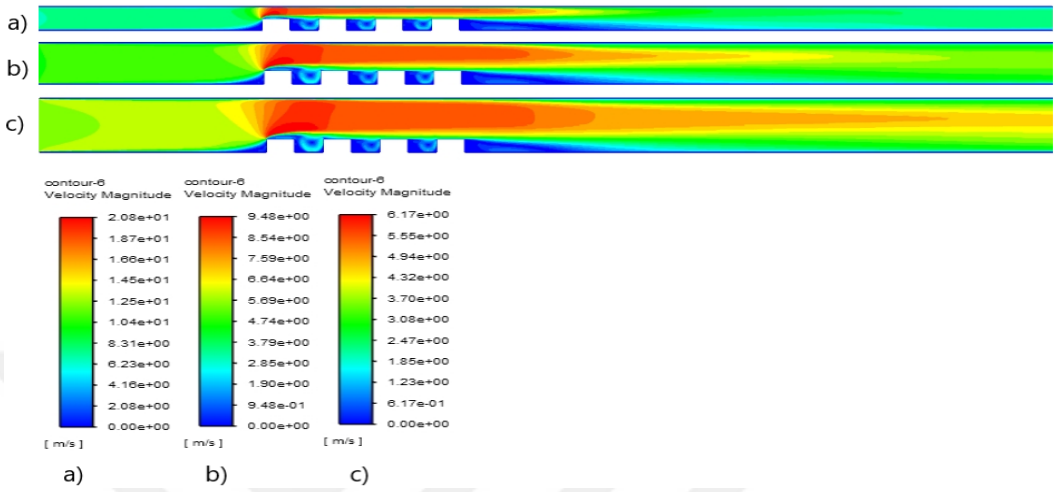
	Kanal Yüksekliği		
	1,27 cm	**1,905 cm**	**2,54 cm**
Re=6000	7,21 m/s	4,73 m/s	3,607 m/s
Re=9015	10,84 m/s	7,22 m/s	5,42 m/s
Re=11993	14,42 m/s	9,61 m/s	7,21 m/s

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

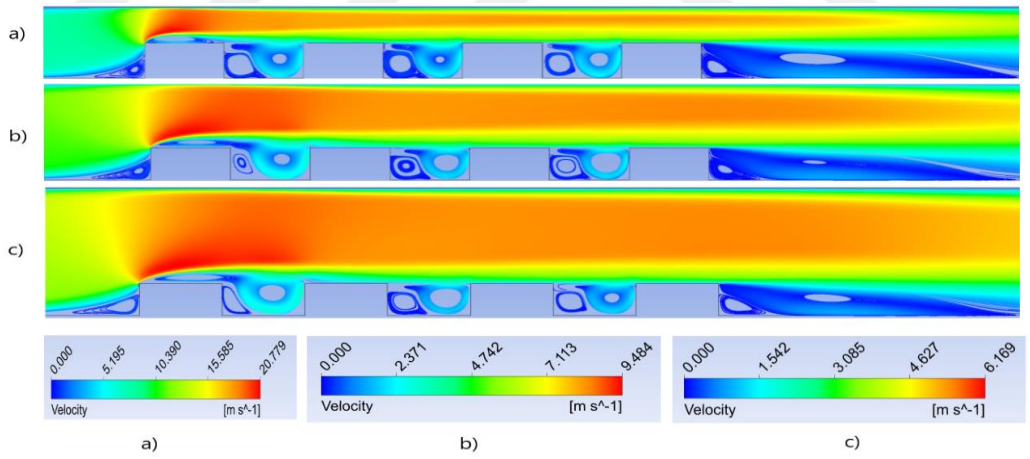
Re değeri kanal yüksekliğine göre tanımlandığı için kanal yüksekliği değiştikçe aynı Re sayısında giren kütle değişeceğinden dolayı hızlar da değişecektir. 1,27 cm kanal yüksekliği için 7,21 m/s, 1,905 cm kanal yüksekliği için 4,73 m/s ve 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği için hız 3,607 m/s alınmıştır.

Şekil 4.122 ve 4.123 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En düşük kanal yüksekliğinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün kanal yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Tüm kanal yüksekliklerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve kanal yüksekliğinin artmasıyla yeniden birleşme uzunluklarında bir miktar azalma görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.17). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit

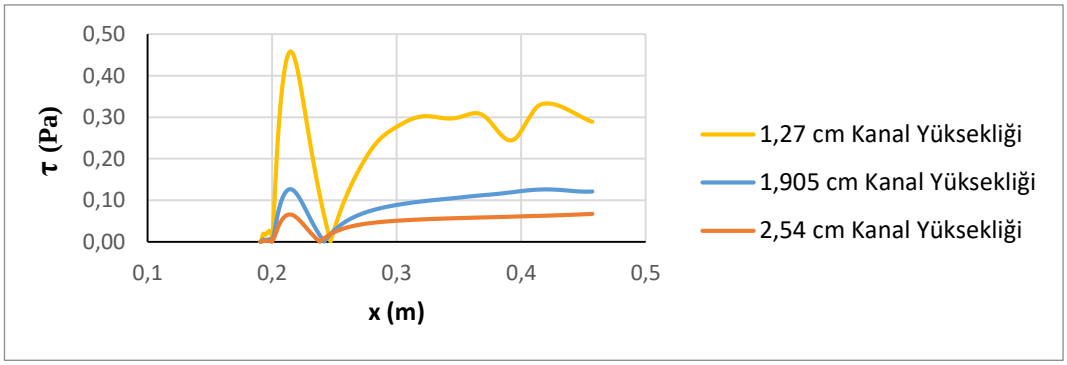
etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.124'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlarda yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.122. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

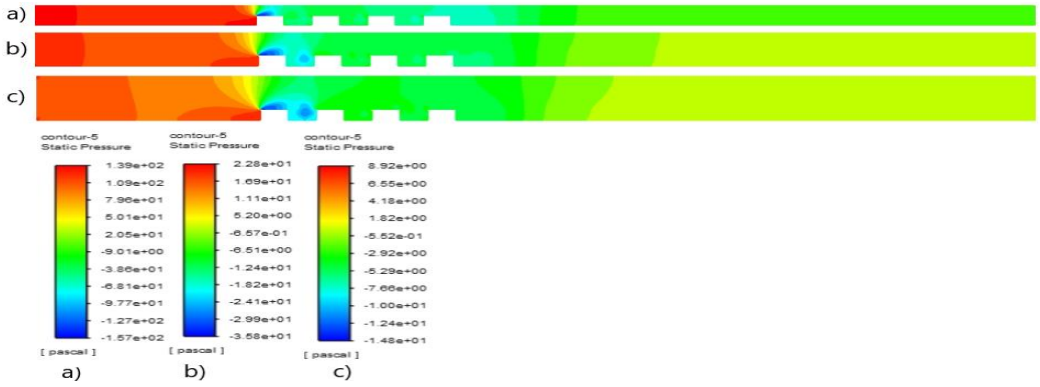


Şekil 4.123. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

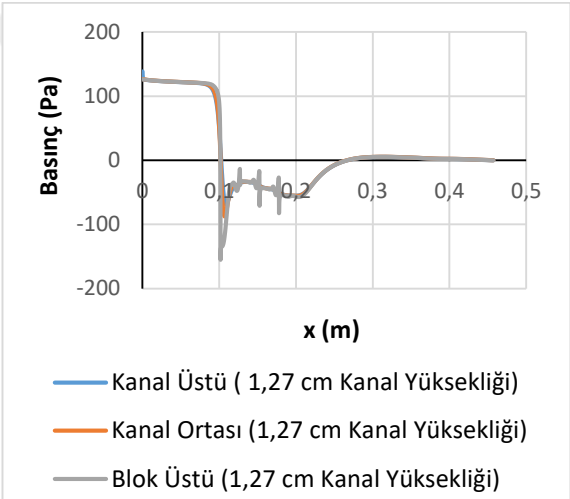


Şekil 4.124. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için kayma gerilmelerinin gösterimi

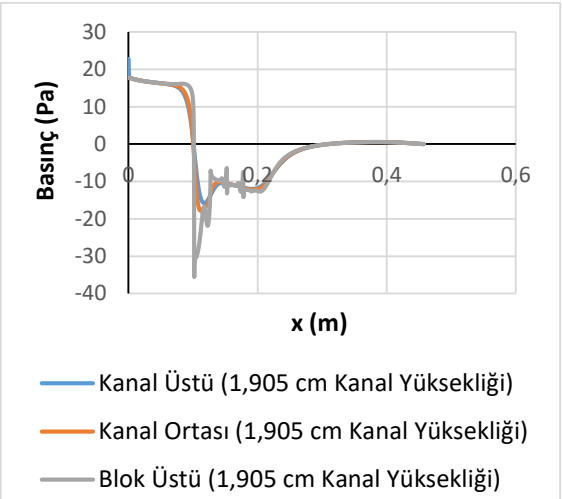
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.125'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.126, 4.127 ve 4.128'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Şekil 4.125 b ve c durumunda yani kanal yüksekliğinin daha fazla olduğu durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Kanal yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.122'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.122 a için 20,8 m/s, b ve c'de azalarak 9,48 m/s ve 6,17 m/s düştüğünden dolayı Şekil 4.125 b ve c'deki minimum basınçlarda Şekil 4.125 a'dakinden daha az düşmüştür. Şekil 4.125 a'daki minimum basınç -157 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -35,8 Pa ve -14,8 Pa olarak hesaplanmıştır. Kanal yüksekliği arttıkça Şekil 4.126, 4.127 ve 4.128'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da azalmaktadır. Giriş basınçları, 1,27 cm kanal yüksekliği için 126,56 Pa, 1,905 cm kanal yüksekliği için 17,75 Pa ve 2,54 cm kanal yüksekliği için 5,97 Pa olarak elde edilmiştir. Kanal yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu azalma soğutma için kullanılacak fanın gücünün azalması gerektiğini vurgulamaktadır.



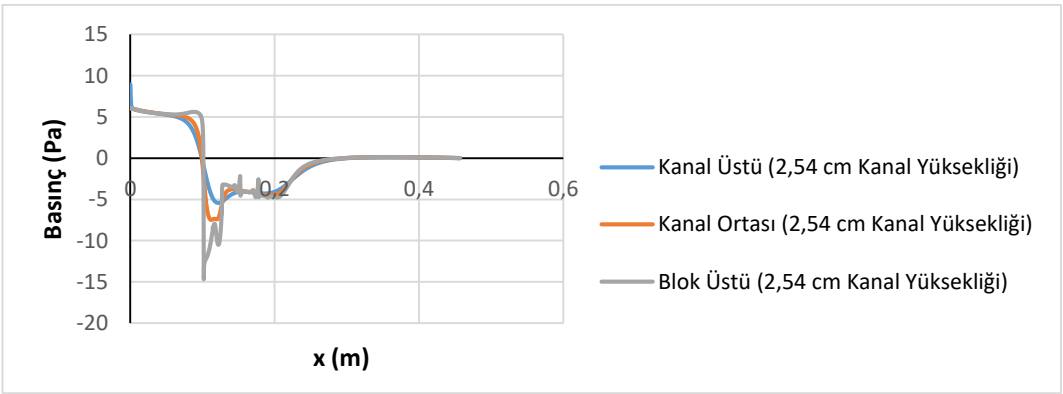
Şekil 4.125. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



Şekil 4.126. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

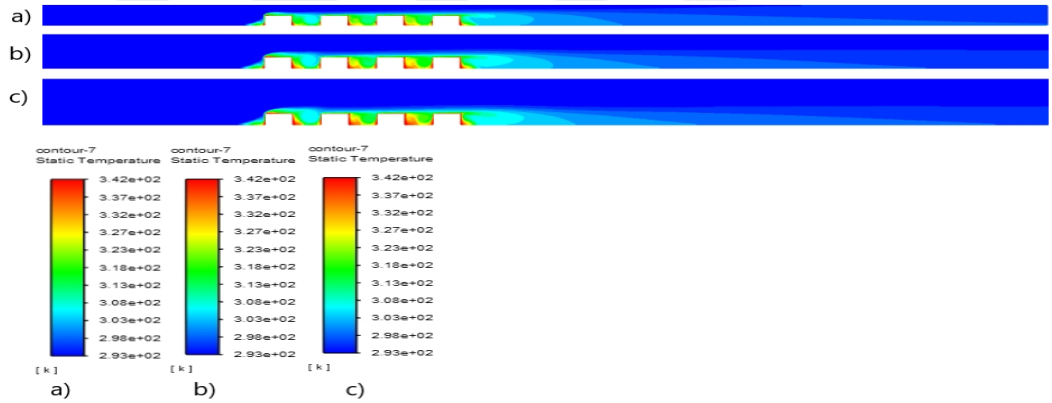


Şekil 4.127. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi



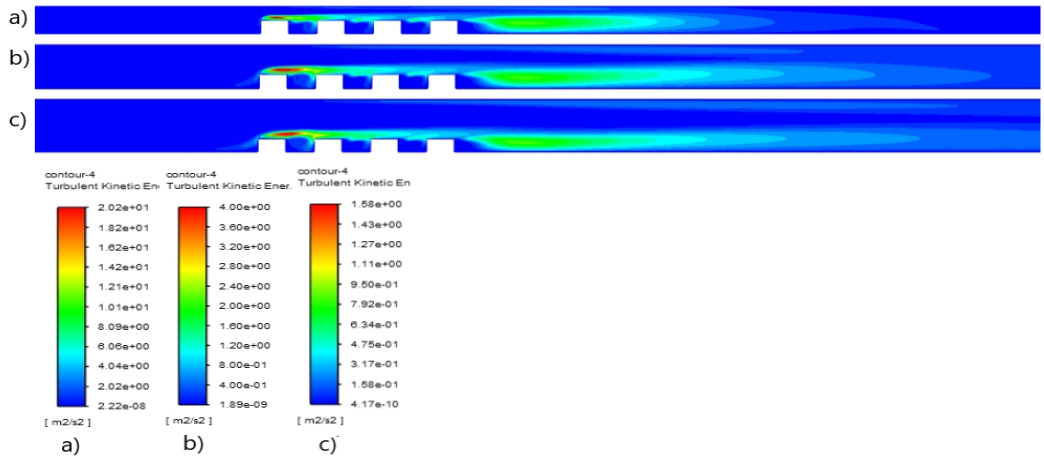
Şekil 4.128. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.129'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Kanal yüksekliğinin artması ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durum Şekil 4.123 b ve c'de saat yönünün tersinde oluşan girdapların uzunluğunun daha fazla olmasına yorulabilir. Bu durum kanal yüksekliği azaldıkça etkisini azaltmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı kanal yüksekliğiyle pek değişmemektedir.



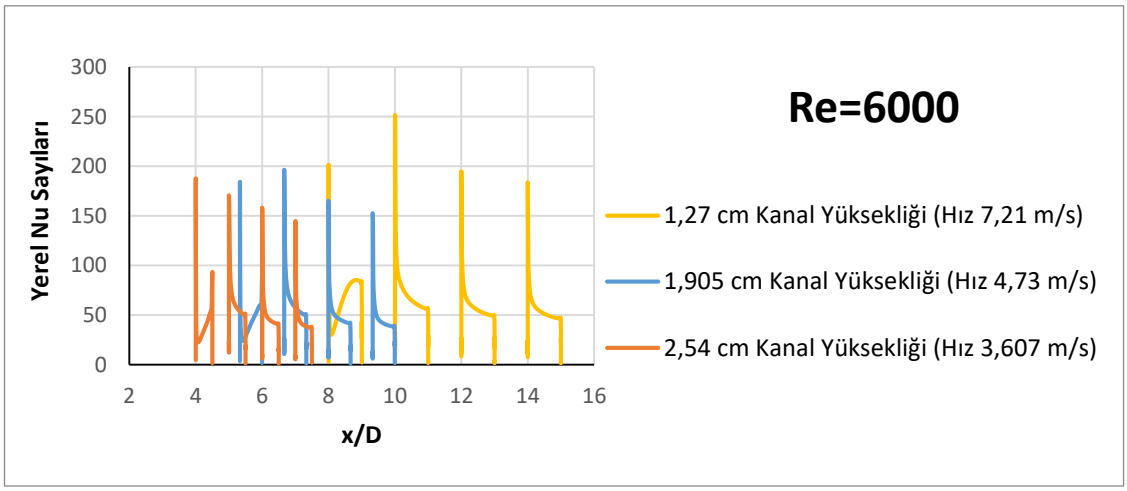
Şekil 4.129. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.130'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup kanal yüksekliği attıkça maksimum etki alanı artmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup kanal yüksekliği arttıkça çıkış duvarına doğru yayılmaktadır.



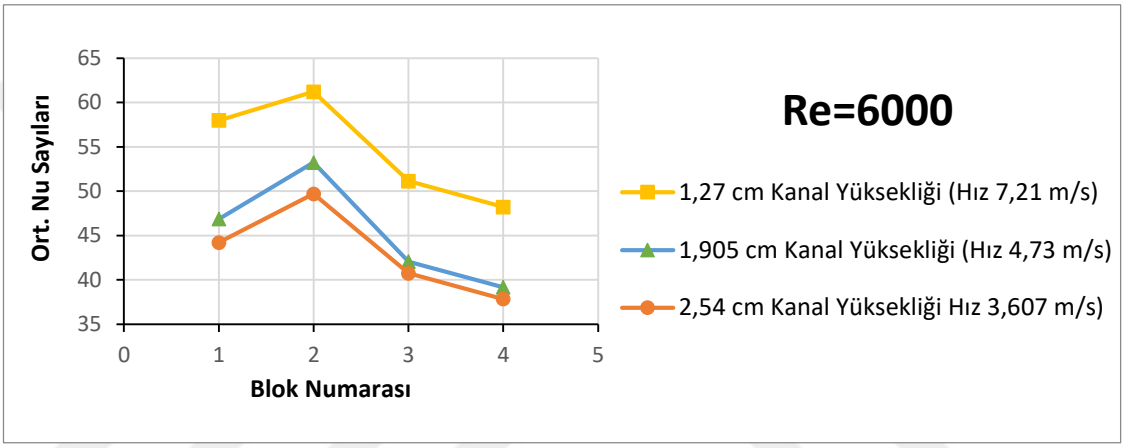
Şekil 4.130. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.131'de farklı kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı en küçük kanal yüksekliği hariç diğer geometrilerde ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Kanal yüksekliğinin en az olduğu durumda en yüksek yerel Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.131. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının gösterimi

Şekil 4.132'de tüm geometriler için, yani kanal yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm kanal yükseklikleri için en düşük ortalama Nu sayısı son yonga da elde edilmektedir. Kanal yüksekliğinin artışı Çizelge 4.14'den de görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini azaltmaktadır.



Şekil 4.132. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısının gösterimi

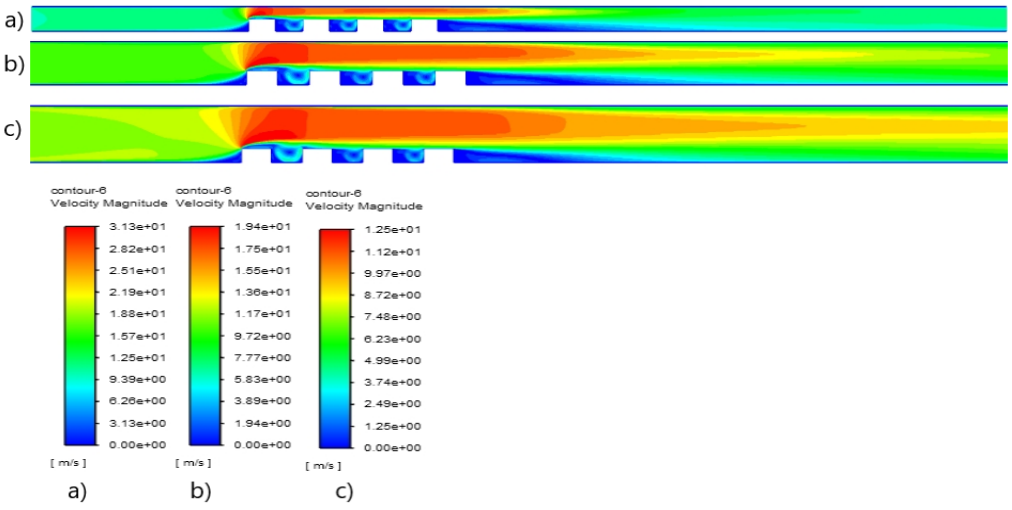
Çizelge 4.14. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayısının gösterimi

Kanal Yükseliği	Ortalama Nusselt Sayısı
1,27 cm	54,63
1,905 cm	45,33
2,54 cm	43,12

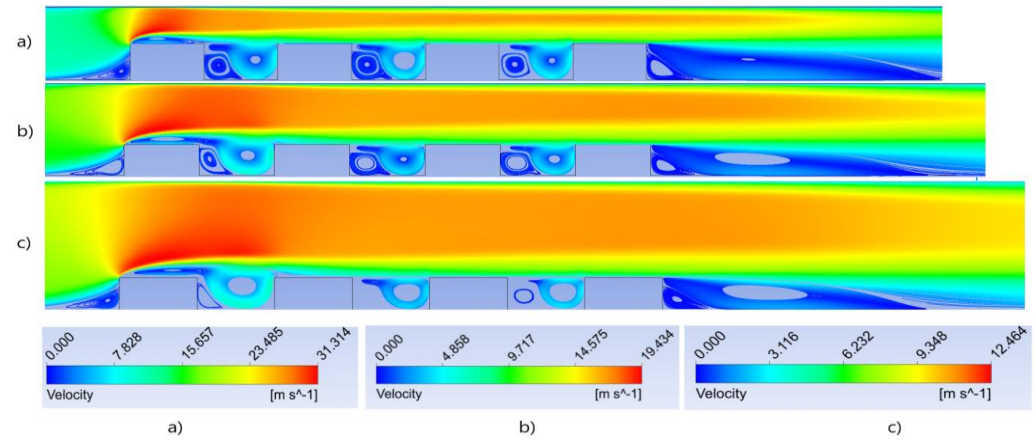
Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Re değeri kanal yüksekliğine göre tanımlandığı için geometri değiştikçe hızlarda değişmektedir. 1,27 cm kanal yüksekliği için 10,84 m/s, 1,905 cm kanal yüksekliği için 7,22 m/s ve 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği için hız 5,42 m/s alınmıştır.

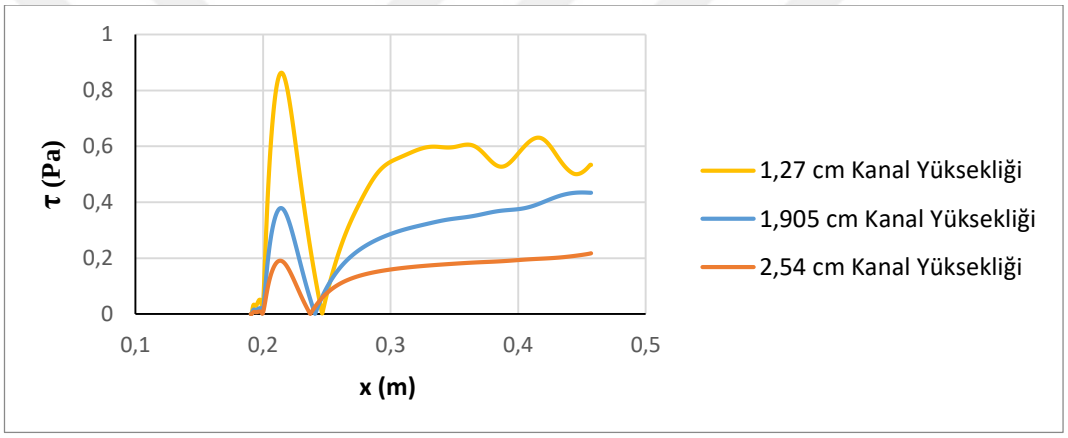
Şekil 4.133 ve 4.134 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En düşük kanal yüksekliğinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün kanal yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En yüksek kanal yüksekliğinin ikinci çukuru hariç diğer tüm çukurlarda blokların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve kanal yüksekliğinin artmasıyla yeniden birleşme uzunluklarında bir miktar azalma görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.17). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.135'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlarda yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.133. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



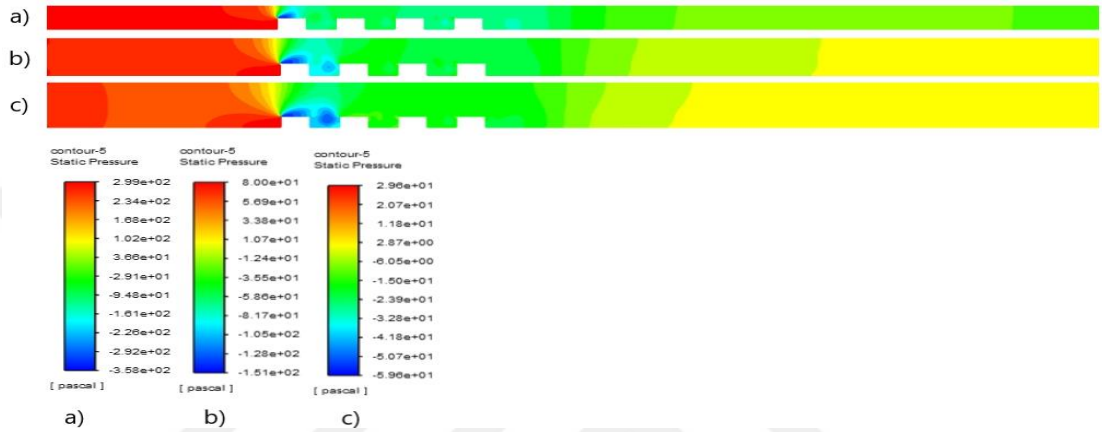
Şekil 4.134. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



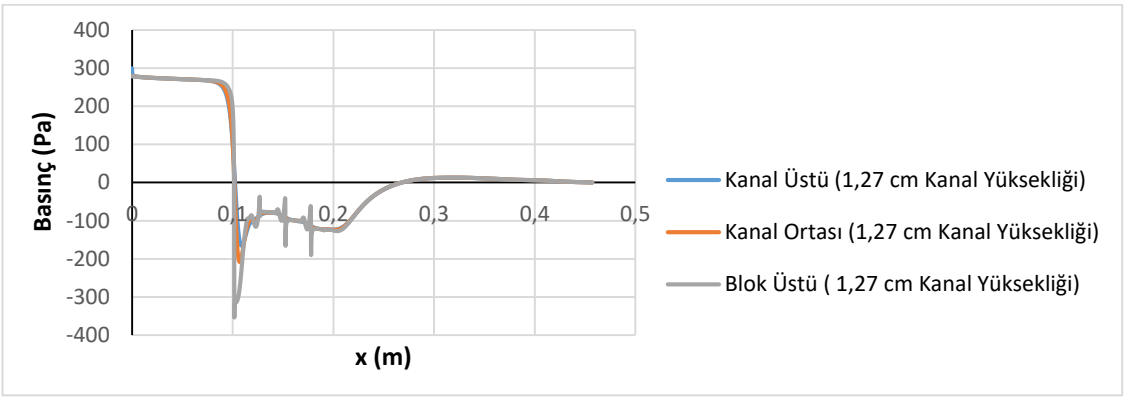
Şekil 4.135. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar kayma gerilmelerinin gösterimi

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.136'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.137, 4.138 ve 4.139'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Şekil 4.136 b ve c durumunda yani kanal yüksekliğinin daha fazla olduğu durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Kanal yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.133'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.133 a için 31,3 m/s, b ve c'de azalarak 19,4 m/s ve 12,5 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.136 b ve c'deki basınçlarda Şekil 4.136 a'dakinden daha az düşmüştür. Şekil 4.136 a'daki minimum basınç -358 Pa, b ve c deki minimum basınçlar ise -151 Pa

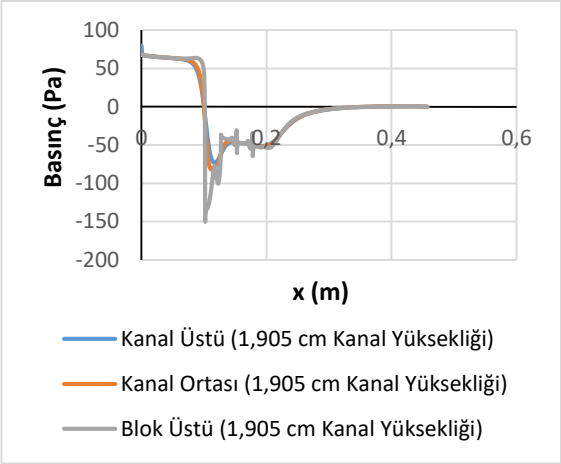
ve -59,6 Pa olarak hesaplanmıştır. Kanal yüksekliği arttıkça Şekil 4.137, 4.138 ve 4.139'dan da görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da azalmaktadır. Giriş basınçları, 1,27 cm kanal yüksekliği için 279 Pa, 1,905 cm kanal yüksekliği için 67,7 Pa ve 2,54 cm kanal yüksekliği için 21,83 Pa olarak elde edilmiştir. Kanal yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu azalma soğutma için kullanılacak fanın gücünün azalması gerektiğini vurgulamaktadır.



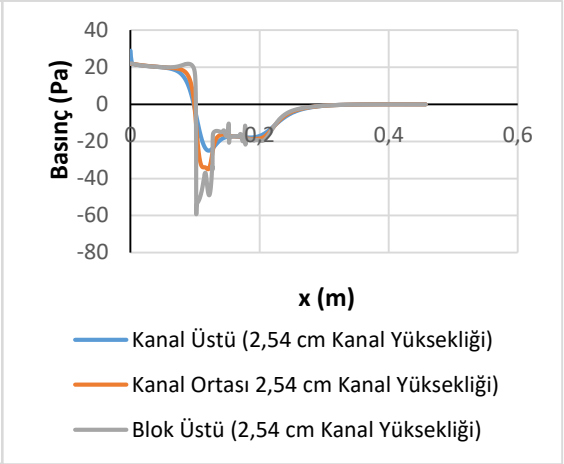
Şekil 4.136. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



Şekil 4.137. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

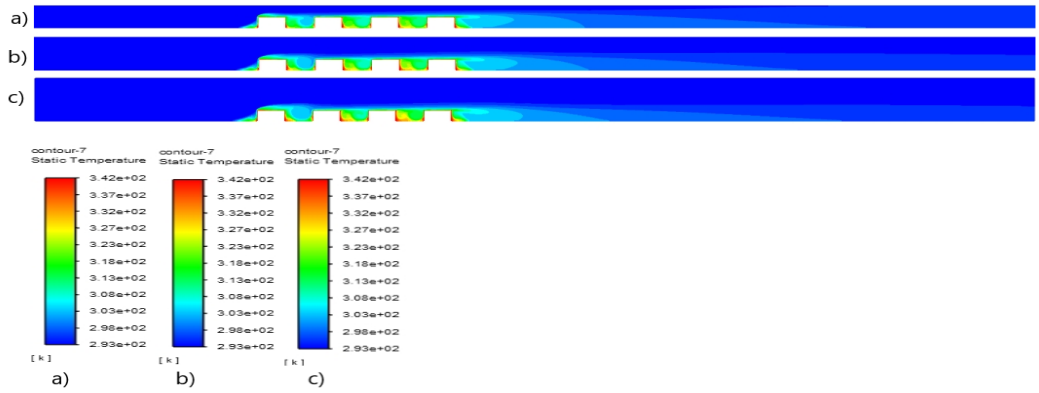


Şekil 4.138. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi



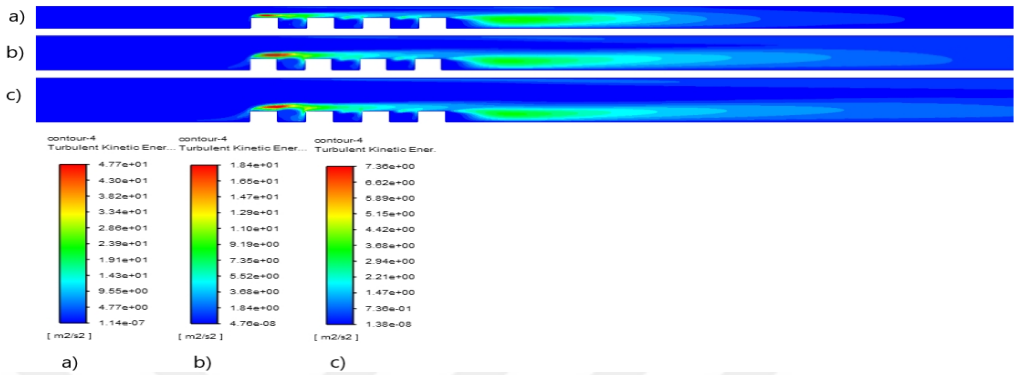
Şekil 4.139. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.140'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Kanal yüksekliğinin artması ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durum kanal yüksekliği azaldıkça etkisini azaltmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı kanal yüksekliğiyle pek değişmemektedir.



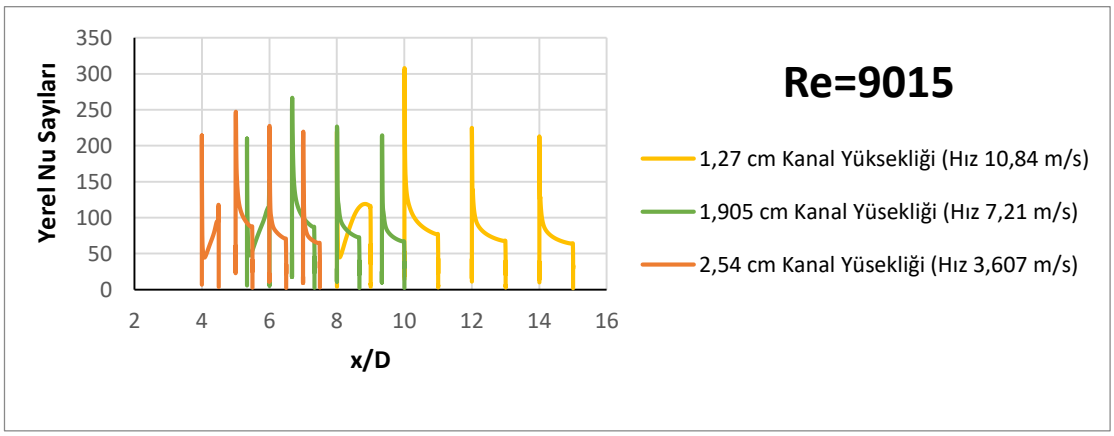
Şekil 4.140. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.141'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup kanal yüksekliği attıkça maksimum etki alanı artmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup kanal yüksekliği arttıkça çıkış duvarına doğru yayılmaktadır.



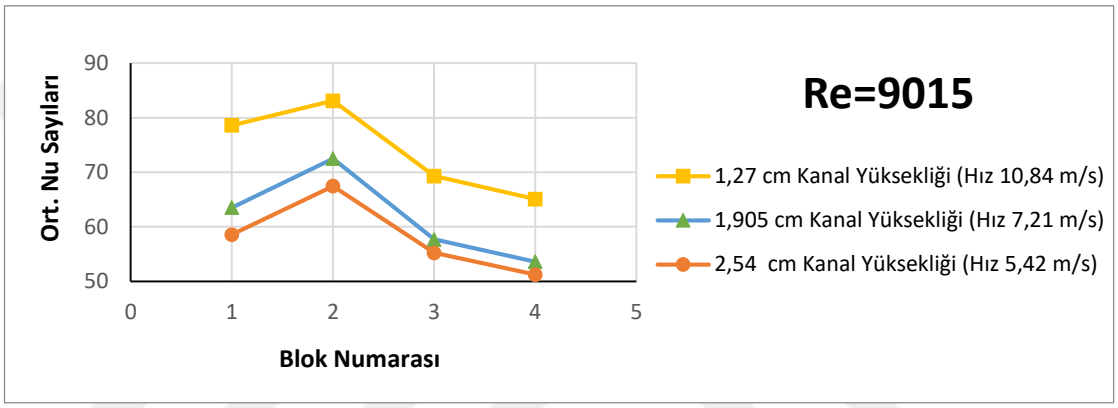
Şekil 4.141. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans enerji kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.142'de farklı kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.142. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.143'de tüm geometriler için, yani kanal yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm kanal yükseklikleri için en düşük ortalama Nu sayısı son yonga da elde edilmektedir. Kanal yüksekliğinin artmasıyla ortalama Nu sayısının azaldığı Çizelge 4.15 yardımıyla da görülebilir.



Şekil 4.143. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları

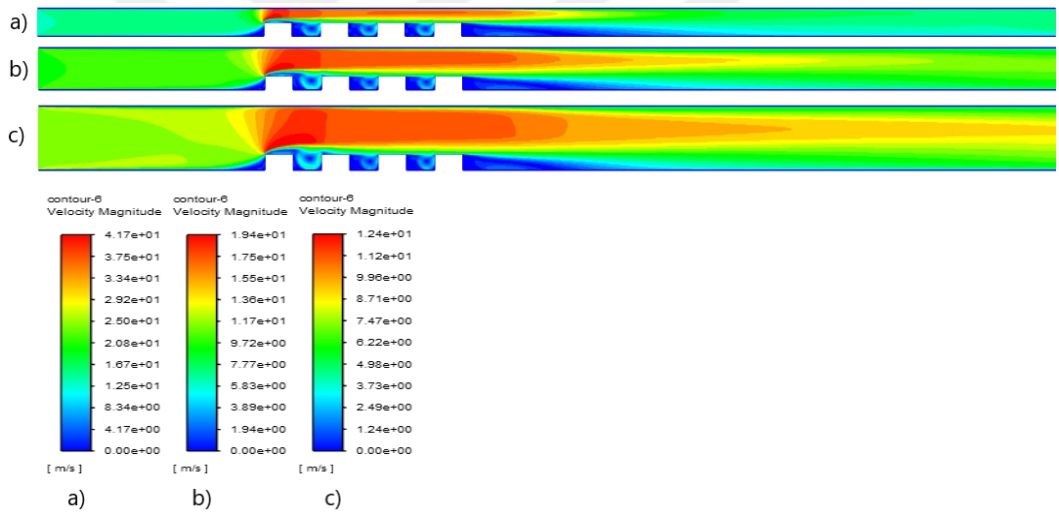
Çizelge 4.15. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Kanal Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
1,27 cm	74,02
1,905 cm	61,82
2,54 cm	58,1

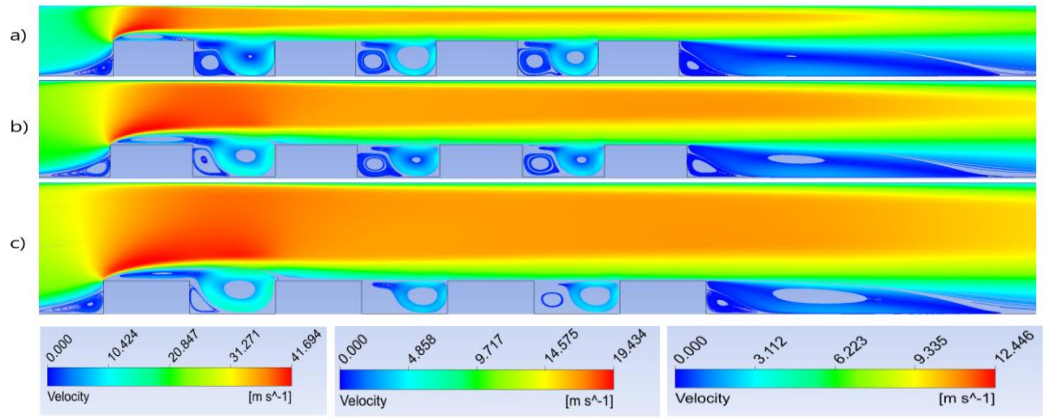
Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

Re değeri kanal yüksekliğine göre tanımlandığı için geometri değiştikçe hızlarda değişmektedir. 1,27 cm kanal yüksekliği için 14,42 m/s, 1,905 cm kanal yüksekliği için 9,61 m/s ve 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği için hız 7,21 m/s alınmıştır.

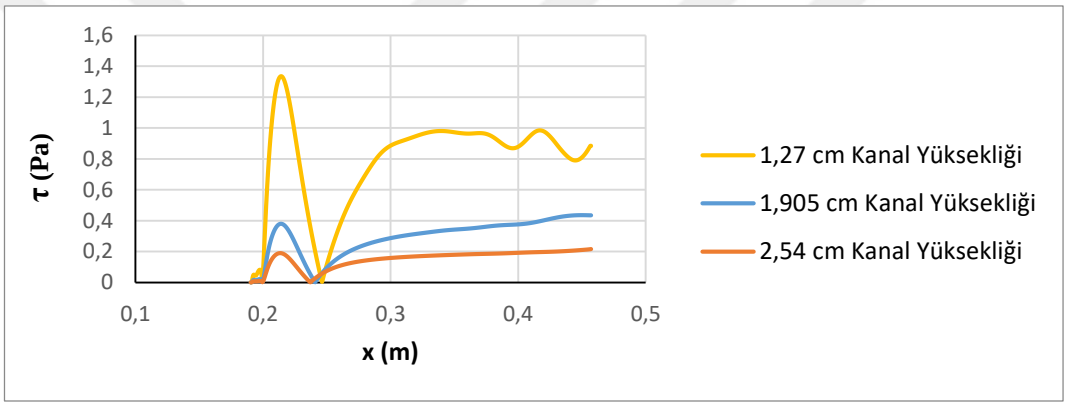
Şekil 4.144 ve 4.145 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En düşük kanal yüksekliğinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün kanal yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En yüksek kanal yüksekliğinin ikinci çukuru hariç tüm çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve kanal yüksekliğinin artmasıyla yeniden birleşme uzunluklarında bir miktar azalma görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.17). Ayrıca her üç durumda da son bloğun arka alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.146'daki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.144. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



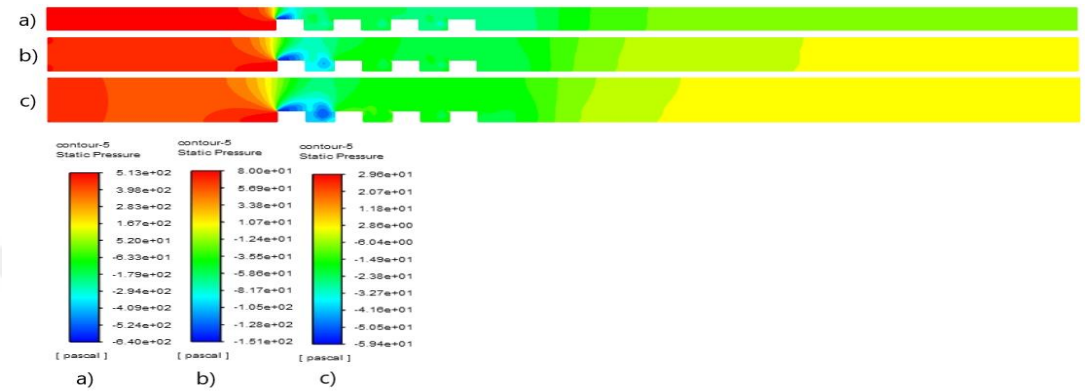
Şekil 4.145. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



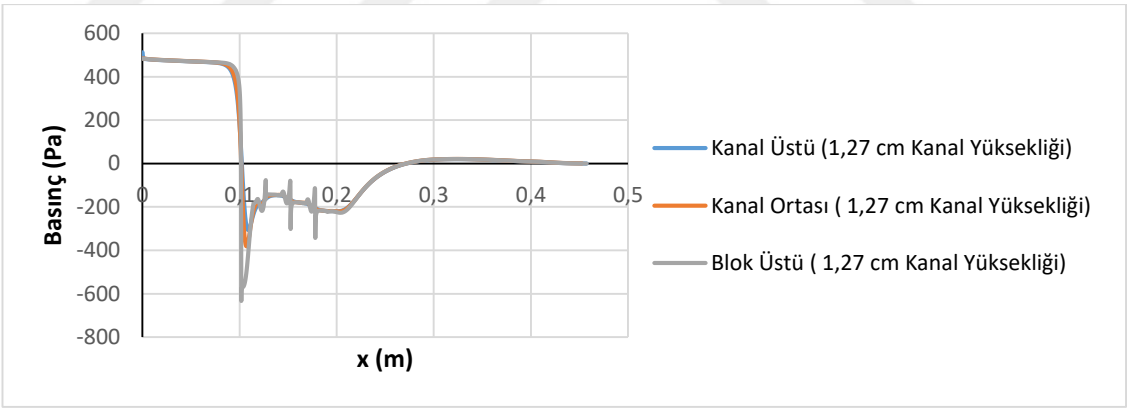
Şekil 4.146. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için kayma gerilmeleri

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.147'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.148, 4.149 ve 4.150'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Şekil 4.147 b ve c durumunda yani kanal yüksekliğinin daha fazla olduğu durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Kanal yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.144'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.144 a için 41,7 m/s, b ve c'de azalarak 19,4 m/s ve 12,4 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.147 b ve c'deki basınçlarda Şekil 4.147 a'dakinden daha az düşmüştür. Şekil 4.147 a'daki minimum basınç -640 Pa, b ve c'deki basınçlar ise -151 Pa ve -59,4 Pa olarak hesaplanmıştır. Kanal yüksekliği arttıkça Şekil 4.148, 4.149 ve 4.150'den de

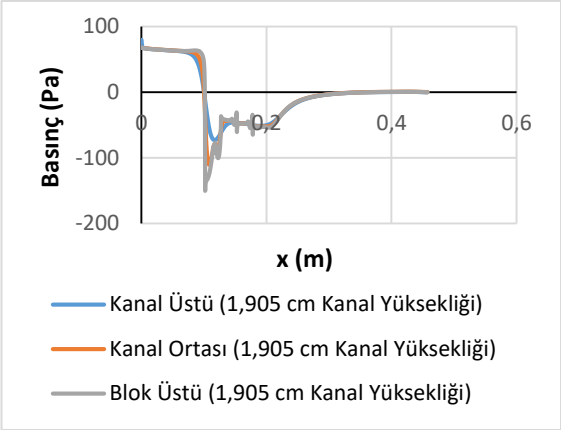
görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da azalmaktadır. Giriş basınçları, 1,27 cm kanal yüksekliği için 484 Pa, 1,905 cm kanal yüksekliği için 67,5 Pa ve 2,54 cm kanal yüksekliği için 21,77 Pa olarak elde edilmiştir. Kanal yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu azalma soğutma için kullanılacak fanın gücünün azalması gerektiğini vurgulamaktadır.



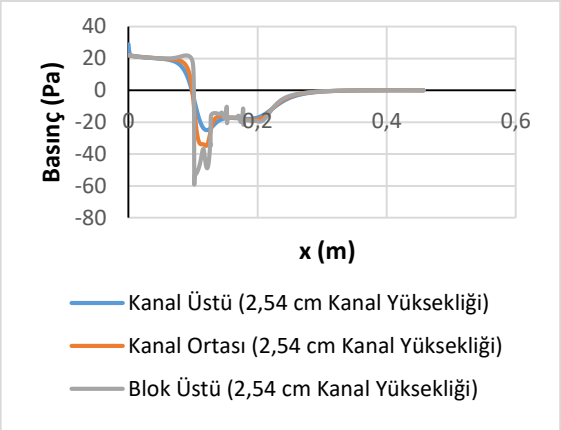
Şekil 4.147. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



Şekil 4.148. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

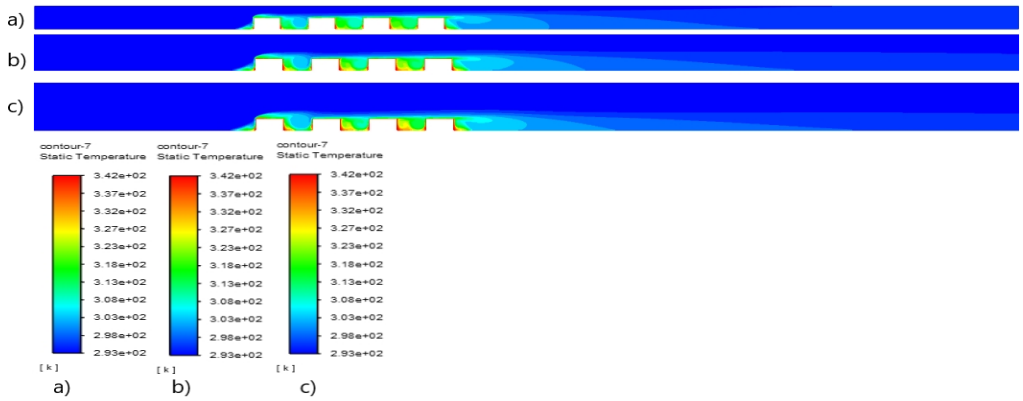


Şekil 4.149. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi



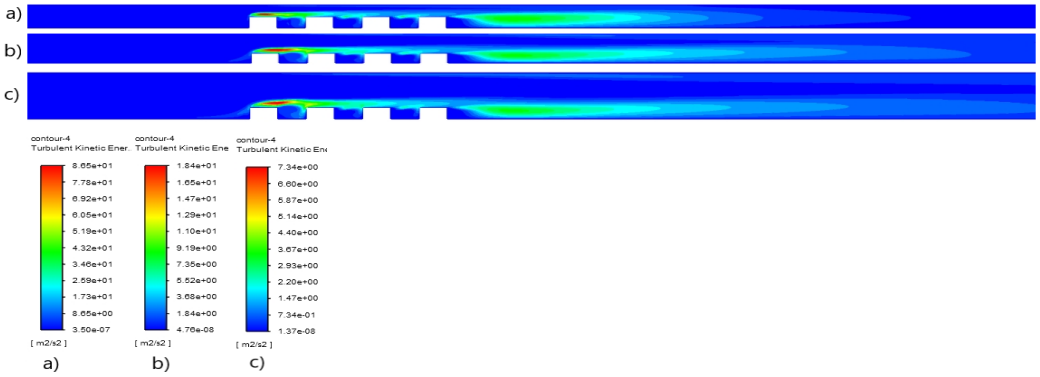
Şekil 4.150. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.151'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Kanal yüksekliğinin artması ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı kanal yüksekliğiyle pek değişmemektedir.



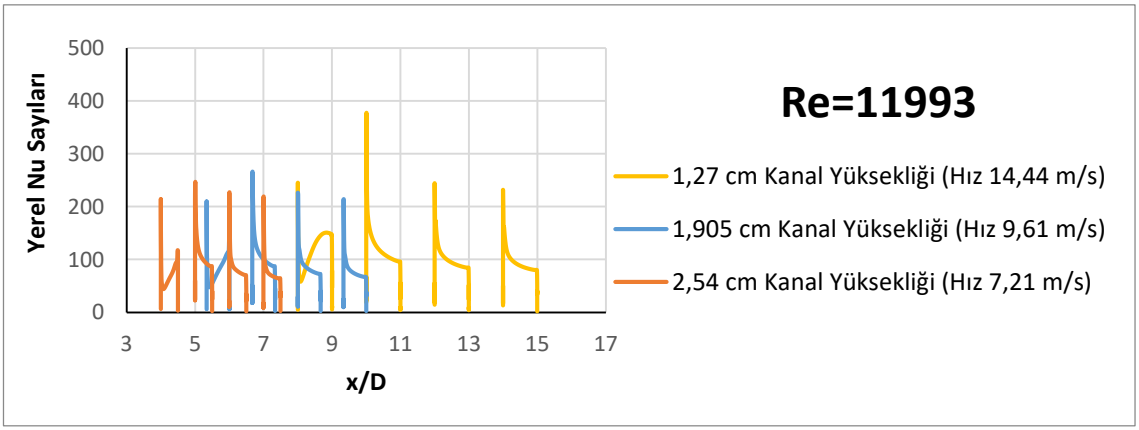
Şekil 4.151. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.152'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup kanal yüksekliği attıkça maksimum etki alanı artmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup kanal yüksekliği arttıkça çıkış duvarına doğru yayılmaktadır.



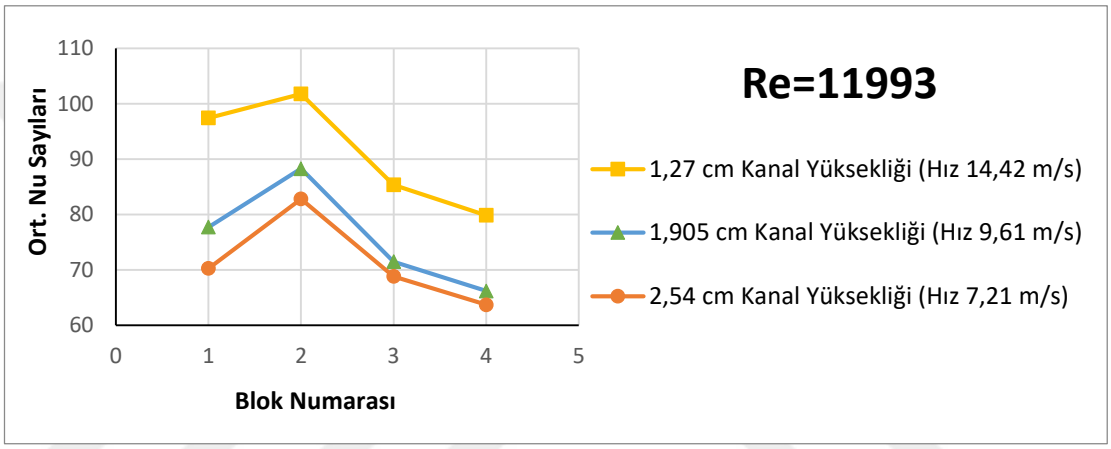
Şekil 4.152. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans kinetik enerji kontürleri a)1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.153'de farklı kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998).



Şekil 4.153. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.154'de tüm geometriler için, yani kanal yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm kanal yükseklikleri için en düşük ortalama Nu sayısı son yonga da elde edilmektedir. Kanal yüksekliğinin artmasıyla ortalama Nu sayısının azaldığı Çizelge 4.16 yardımıyla da görülebilir.



Şekil 4.154. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.16. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Kanal Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
1,27 cm	91,11
1,905 cm	75,93
2,54 cm	71,41

Kanal yüksekliğinin farklı hızlarda karşılaştırılması

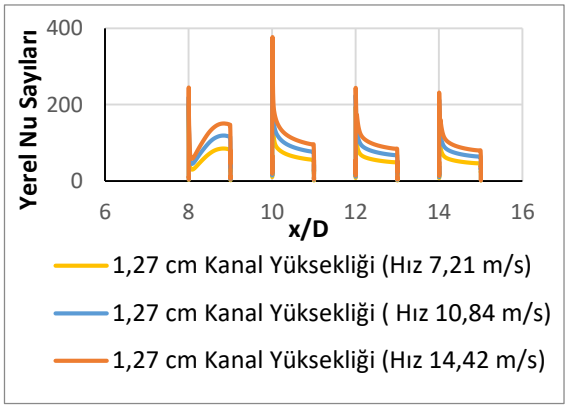
Çizelge 4.17'den görüldüğü üzere kanal yüksekliğini artırmak yeniden birleşme uzunluğunu azaltmıştır. Aynı geometride Re sayısının artması ise yeniden birleşme uzunluklarında çok az bir miktar azalmaya sebep olmuştur. Pulat (1997), çalışmasında

türbülanslı akışta, Reynolds sayısının artmasıyla yeniden birleşme uzunluğunun azaldığını ve 20000 Reynolds sayısından sonra yeniden birleşme uzunluğu değişmediğini gözlemlemiştir.

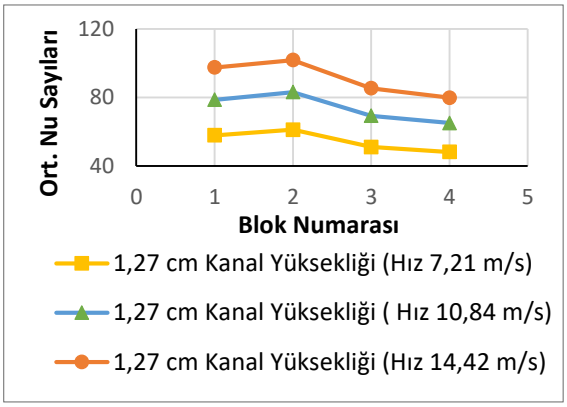
Çizelge 4.17. Farklı kanal yüksekliği ve hızlarda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Kanal Yüksekliği (cm)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	1,27 cm	0,009281	0,056415
	1,905 cm	0,009111	0,051131
	2,54 cm	0,008961	0,047579
5,42	1,27 cm	0,009281	0,055988
	1,905 cm	0,009111	0,050491
	2,54 cm	0,00903	0,046726
7,21	1,27 cm	0,009067	0,055775
	1,905 cm	0,009111	0,050278
	2,54 cm	0,009175	0,046726

1,27 cm kanal yüksekliğinde hızın artırılması Şekil 4.155 ve Şekil 4.156'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük yerel ve Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.

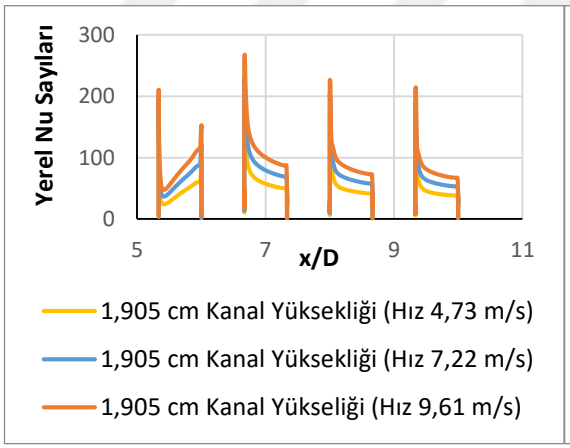


Şekil 4.155. 1,27 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

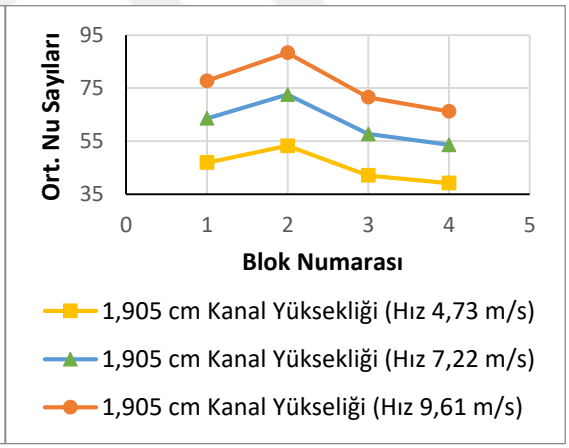


Şekil 4.156. 1,27 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,905 cm kanal yüksekliğinde hızın artırılması Şekil 4.157 ve Şekil 4.158'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük yerel ve Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.



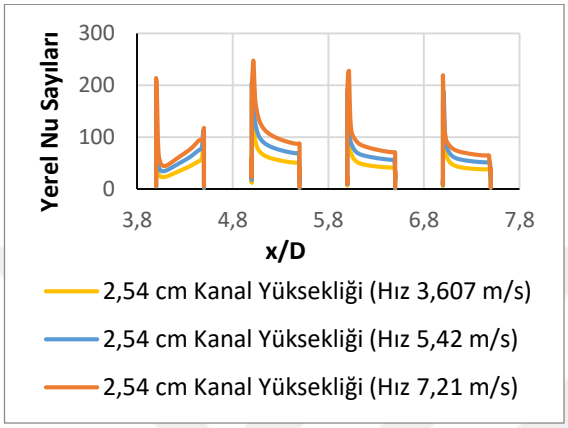
Şekil 4.157. 1,905 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları



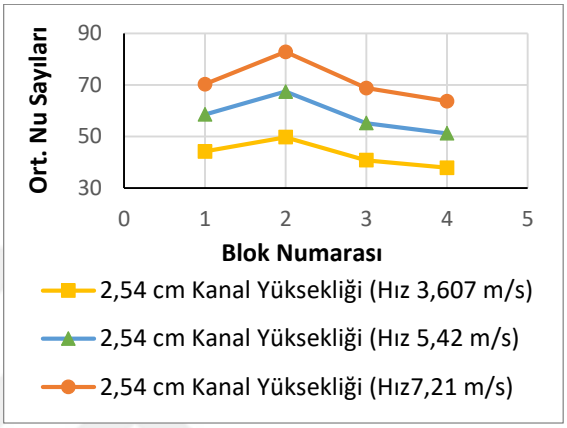
Şekil 4.158. 1,905 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

2,54 cm kanal yüksekliğinde hızın artırılması (Re sayısının artırılması) Şekil 4.159 ve Şekil 4.160'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı

taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük yerel ve Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.159. 2,54 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları



Şekil 4.160. 2,54 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

Yapılan 9 adet analizle kanal yüksekliğinin ısı transferine etkisi incelendiğinde; Çizelge 4.14, 4.15 ve 4.16 incelendiğinde en yüksek ortalama Nu sayısı Re=11993 (Hız 7,21m/s) de ve 1,27 cm kanal yüksekliğinde 91,11 olarak tespit edilmiştir. Türkoğlu ve Yücel (1995), dar kanallarda, yüksek Reynolds sayılarında daha etkin soğutma sağlanabildiğini tespit etmişlerdir. Xu ve diğerleri (1998), kanal genişliğinin ısı kaynağının uzunluğuna (blok boyu) oranı arttıkça ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Mohammed (2006), yaptığı çalışmasında modül yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranı arttıkça (yani kanal yüksekliği azaldıkça) ısı transferinin arttığını tespit etmiştir.

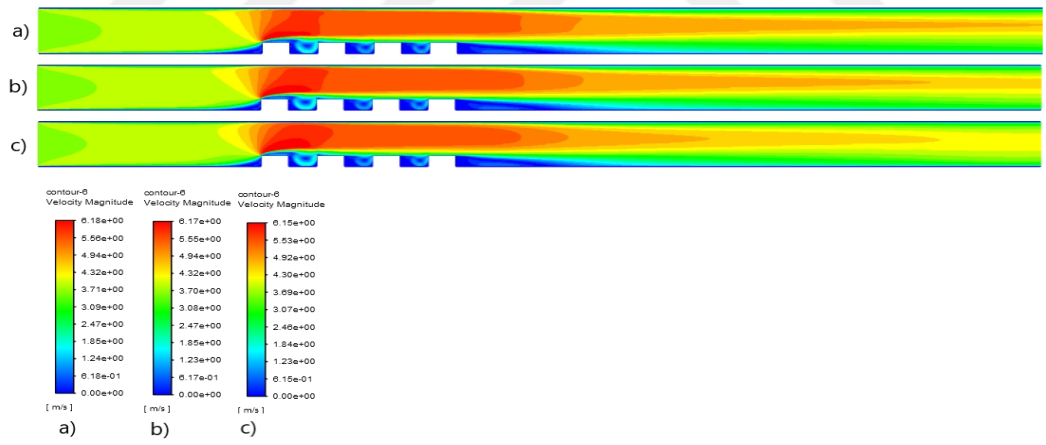
4.1.5. 2 boyutlu geometride türbülans giriş parametrelerinin incelenmesi

Bilindiği üzere türbülans, ısı transferini arttırıcı bir unsurdur. Türbülanslı bir akışta kendi içerisinde ne denli türbülanslı olduğunun göstergesi türbülans şiddetidir. Bu bölümde türbülans giriş parametrelerinden türbülans şiddetinin akış ve ısı transferi üzerine etkileri incelenmiştir. Türbülans şiddeti baz geometri de % 4 alınırken karşılaştırma amaçlı buna

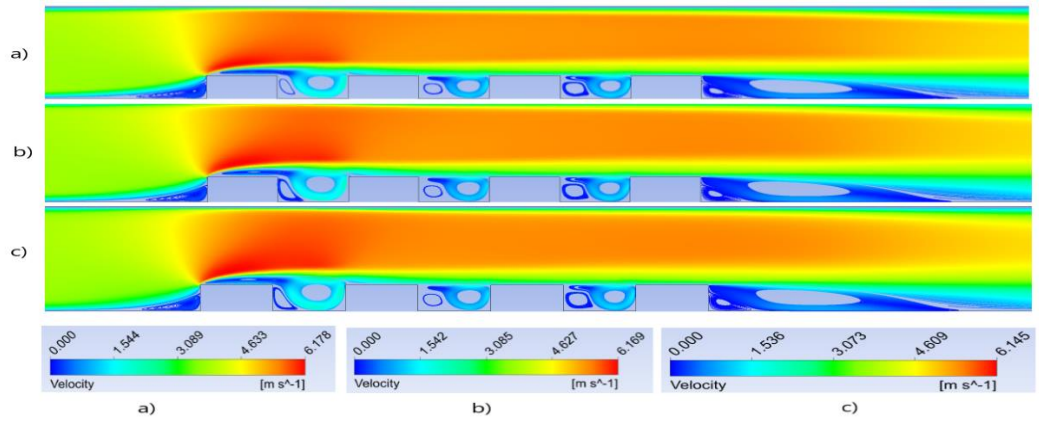
ek olarak % 1 ve % 12'de alınmıştır. Bu analizlerin tamamı 3 farklı hız için yapılmış olup bu kısımda da toplam 9 adet analiz yapılmıştır.

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

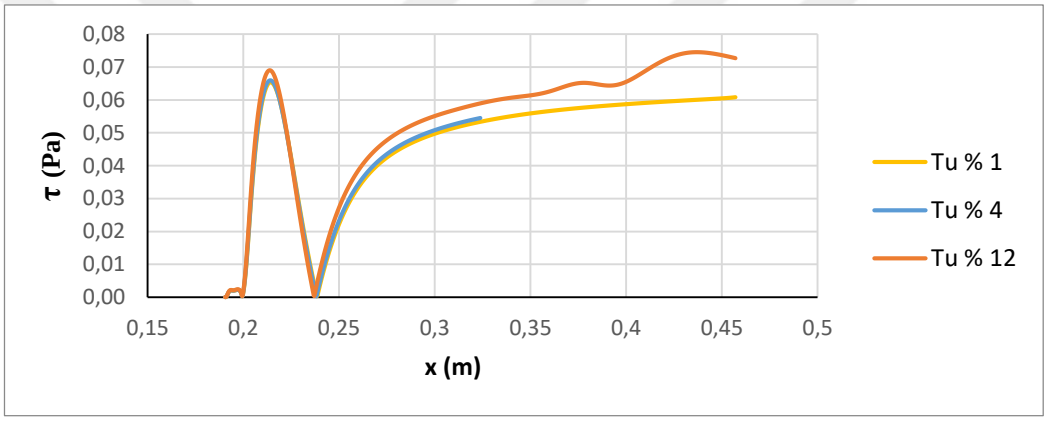
Şekil 4.161 ve 4.162 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün türbülans şiddetlerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Tüm türbülans şiddetlerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve türbülans şiddetinin artmasıyla yeniden birleşme uzunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.21). Ayrıca her üç durumda da son bloğun arka alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarının tespiti için son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.163'daki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.161. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



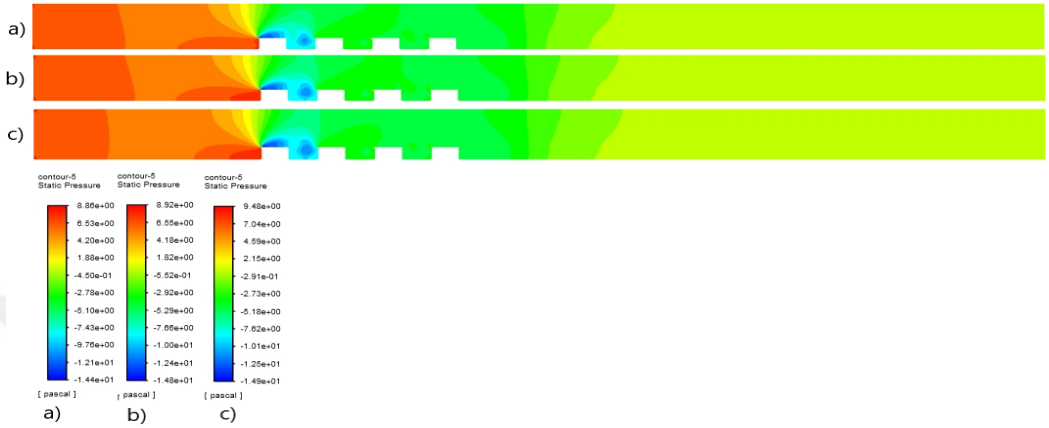
Şekil 4.162. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



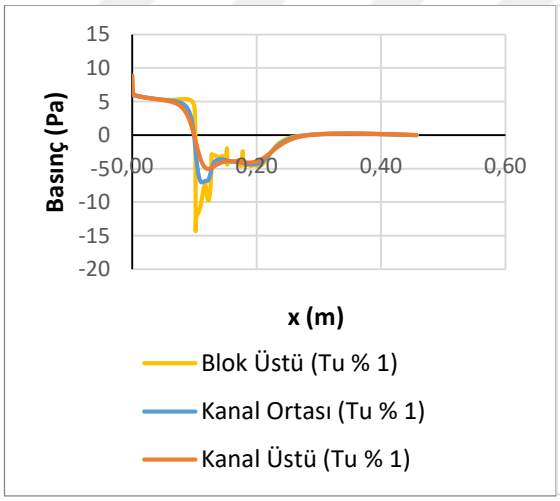
Şekil 4.163. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.164'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.165, 4.166 ve 4.167'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Tüm durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Türbülans şiddetinin artmasıyla Şekil 4.161'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.161 a için 6,18 m/s, b ve c'de azalarak 6,17 m/s ve 6,15 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.164 b ve c'deki basınçlarda Şekil 4.161 a'dakiyle hemen hemen aynı oranda azalmıştır. Şekil 4.164 a'daki minimum basınç -14,4 Pa, b ve c'deki basınçlar ise -14,8 Pa ve -14,9 Pa olarak hesaplanmıştır. Türbülans şiddeti arttıkça

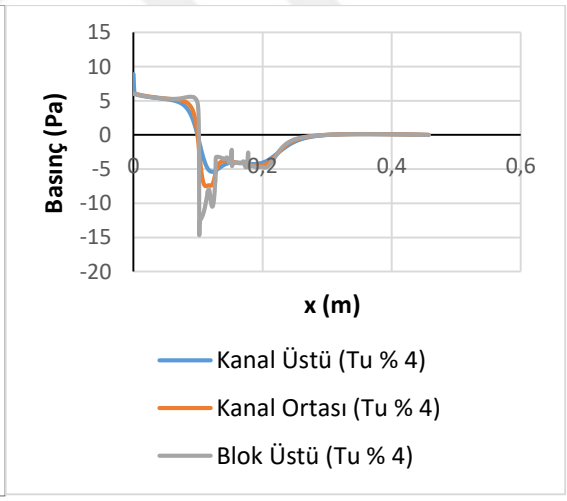
Şekil 4.165, 4.166 ve 4.167'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da çok fazla bir değişim olamamaktadır. Giriş basınçları, % 1 türbülans şiddeti için 5,95 Pa, % 4 türbülans şiddeti için 5,97 Pa ve % 12 türbülans şiddeti için 6,28 Pa olarak elde edilmiştir.



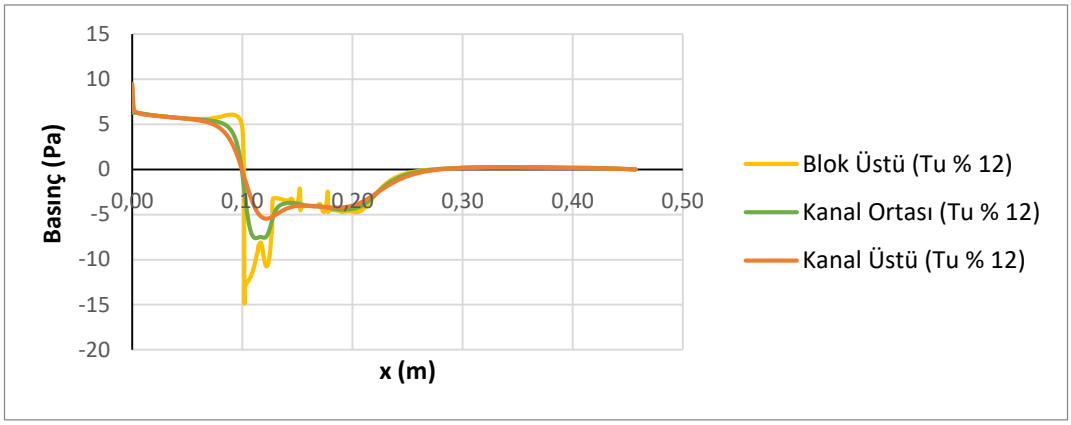
Şekil 4.164. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



Şekil 4.165. Tu %1 için basınç değişimi

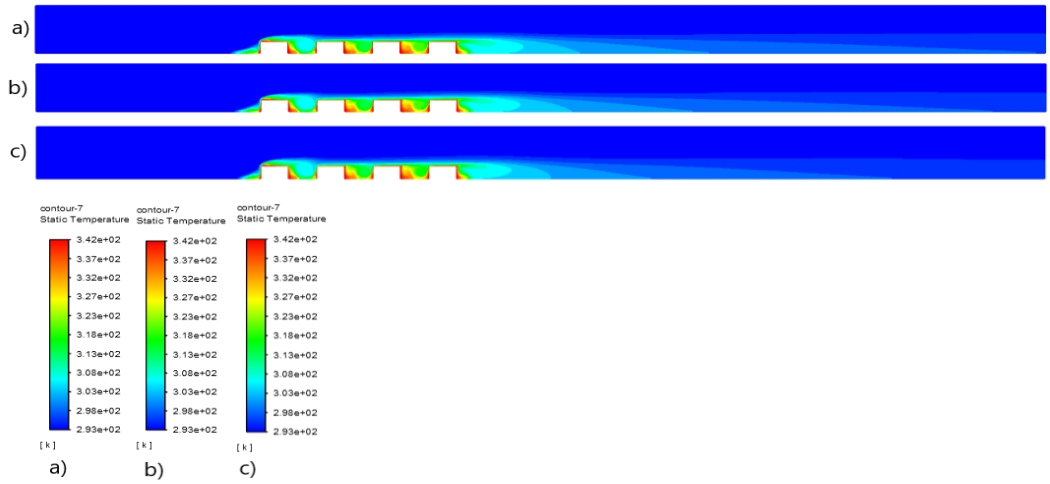


Şekil 4.166. Tu % 4 için basınç değişimi



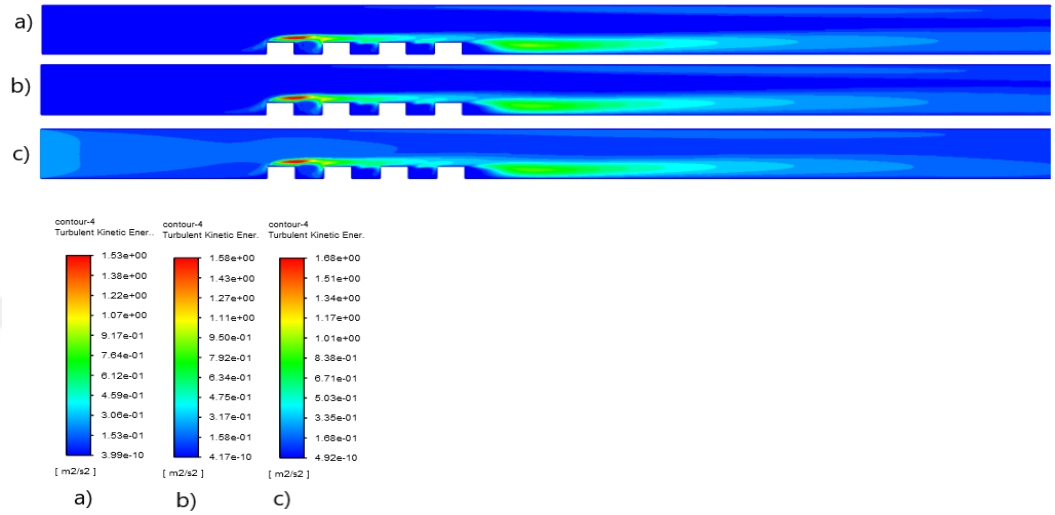
Şekil 4.167. Tu % 12 için basınç değişimi

Şekil 4.168'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazladır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı türbülans şiddetinin değişimiyle pek değişmemektedir.



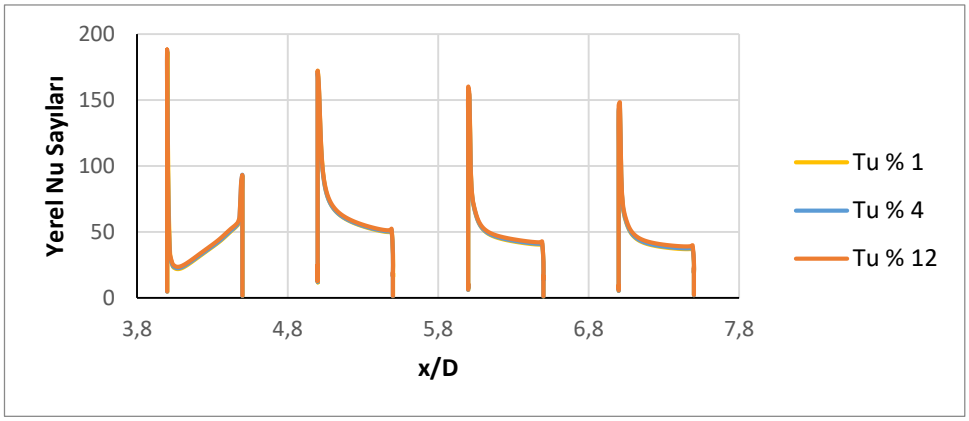
Şekil 4.168. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

Şekil 4.169'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup türbülans şiddeti attıkça maksimum etki alanı hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksektir. Tüm durumlarda bu etki hemen hemen aynı kalmaktadır.



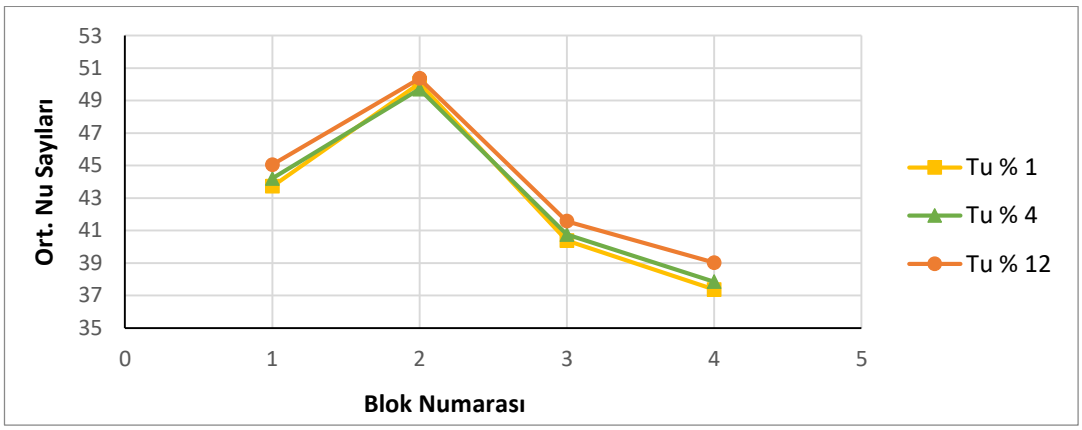
Şekil 4.169. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

Şekil 4.170'de farklı türbülans şiddetleri için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Türbülans şiddetinin değişimi yerel Nu sayılarında pek fazla değişime neden olmamıştır. Bu durum kanal girişinden bloklara kadar türbülans etkinin azalmasına yorulabilir.



Şekil 4.170. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.171'de tüm geometriler için, yani türbülans şiddeti değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu değeri tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm durumlarda için en düşük ortalama Nu sayısı son yonga da elde edilmektedir. Türbülans şiddetinin artmasıyla ortalama Nu sayısının çok az miktarda arttığı Çizelge 4.18 yardımıyla da görülebilir.



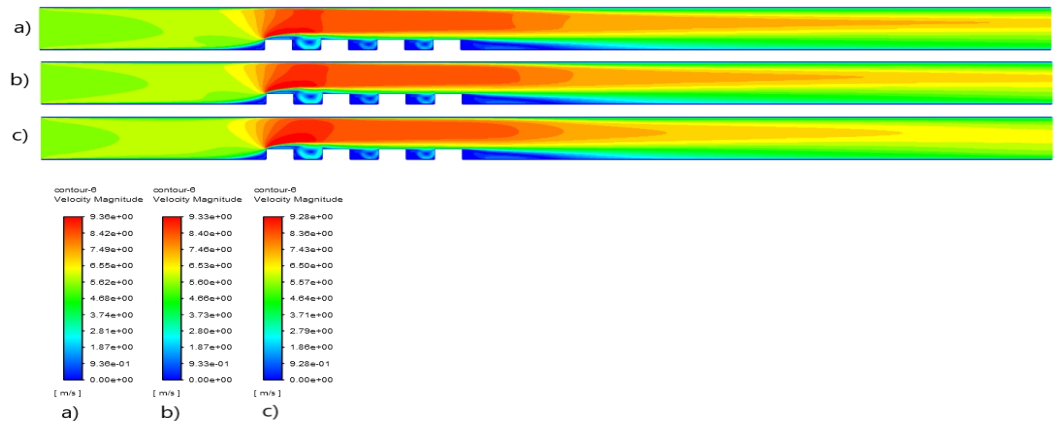
Şekil 4.171. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.18. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

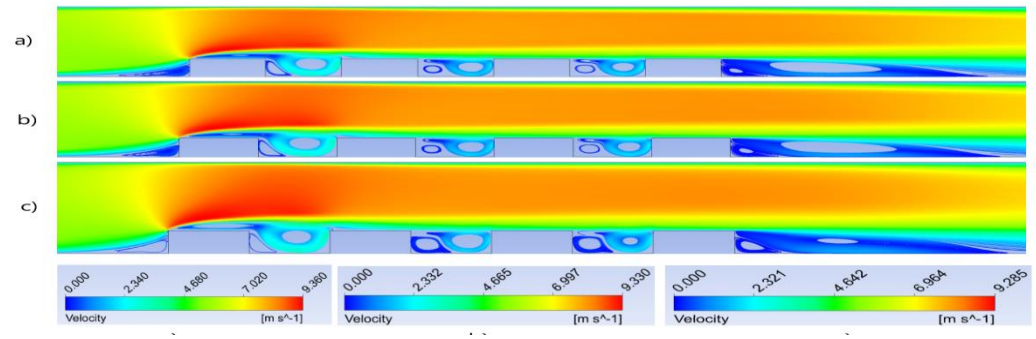
Türbülans Şiddeti	Ortalama Nusselt Sayısı
% 1	42,88
% 4	43,12
% 12	43,99

Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

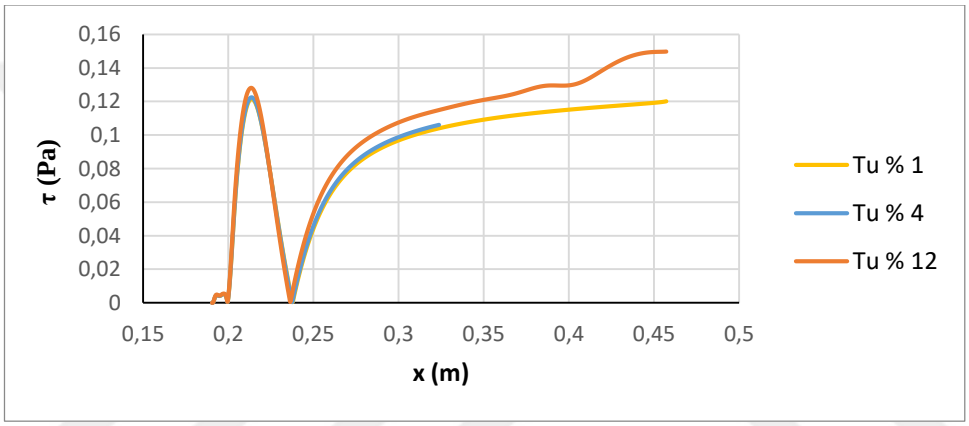
Şekil 4.172 ve 4.173 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Tüm türbülans şiddetlerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Ayrıca tüm türbülans şiddetlerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve türbülans şiddetinin artmasıyla yeniden birleşme uzunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.21). Ayrıca her üç durumda da son bloğun arka alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.174'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.172. Re=9015 (5,42 m/s) hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



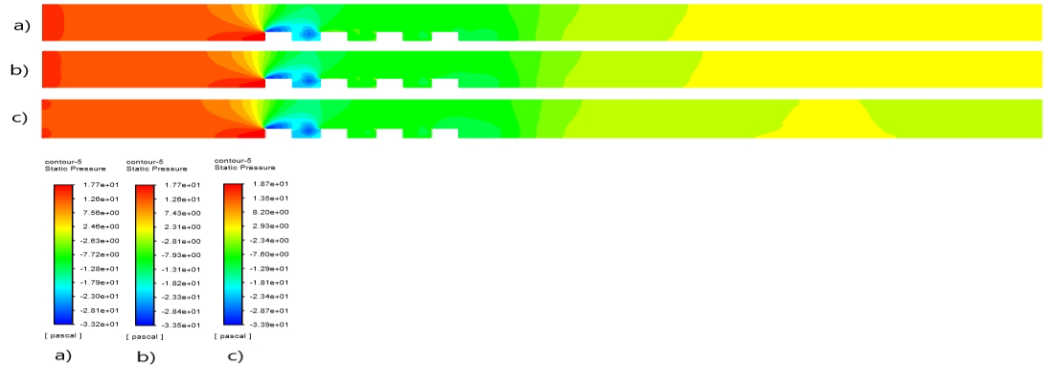
Şekil 4.173. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



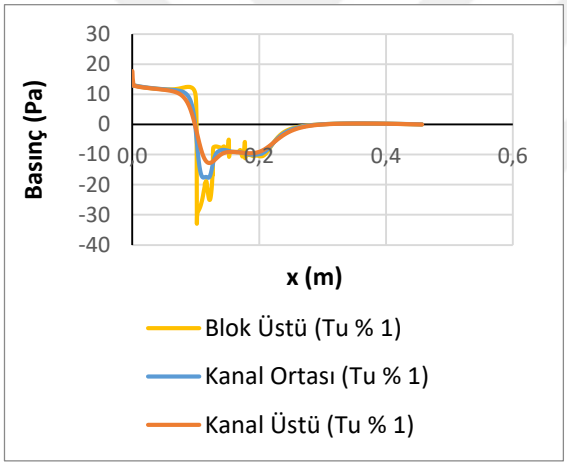
Şekil 4.174. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmeleri değişimi

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.175'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.176, 4.177 ve 4.178'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Tüm durumlar da düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Türbülans şiddetinin artmasıyla Şekil 4.172'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.172 a için 9,36 m/s, b ve c'de azalarak 9,33 m/s ve 9,28 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.175 a, b ve c'deki basınçlarda Şekil 4.172 a, b ve c' dekiyle hemen hemen aynı oranda azalmıştır. Şekil 4.175 a'daki minimum basınç -33,2 Pa, b ve c'deki basınçlar ise -33,5 Pa ve -33,9 Pa olarak hesaplanmıştır. Türbülans şiddeti arttıkça Şekil 4.176, 4.177 ve 4.178'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçların da çok fazla bir değişim olmamaktadır. Giriş basınçları, % 1 türbülans şiddeti

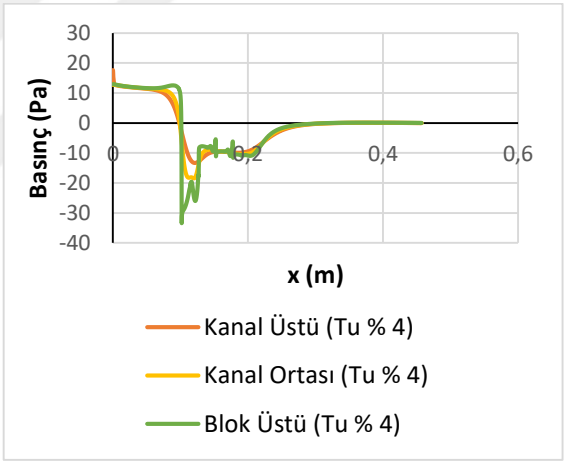
için 12,87 Pa, % 4 türbülans şiddeti için 12,73 Pa ve % 12 türbülans şiddeti için 13,31 Pa olarak elde edilmiştir.



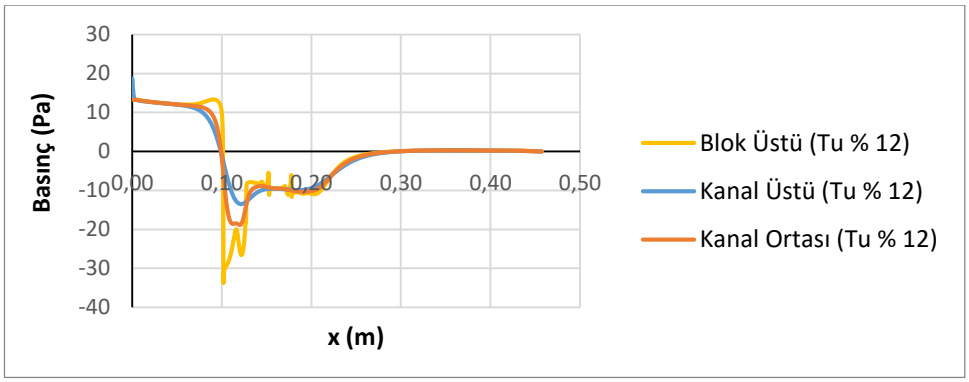
Şekil 4.175. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



Şekil 4.176. Tu % 1 için basınç değişimi

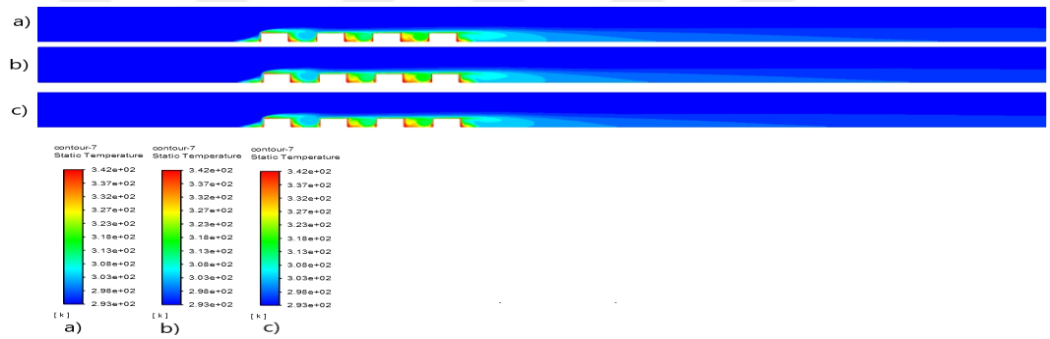


Şekil 4.177. Tu % 4 için basınç değişimi



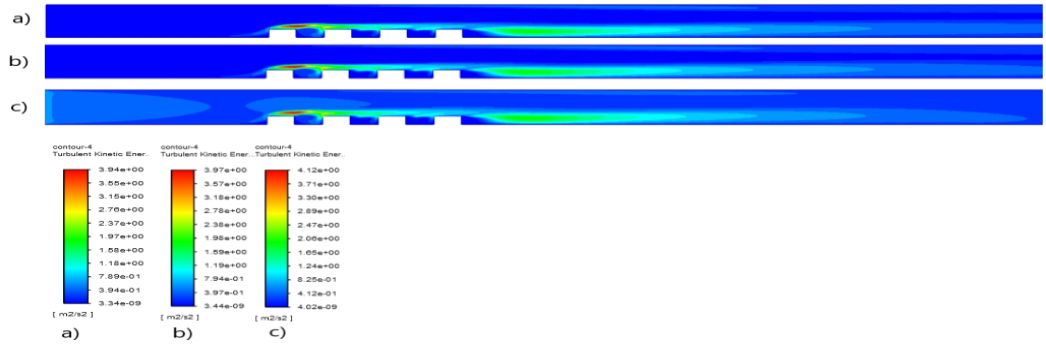
Şekil 4.178. Tu % 12 için basınç değişimi

Şekil 4.179'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisi daha fazladır. Bu durum giriş havasının birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü yongalardan sonra gelen çukurda etkisinin daha fazla olmasına yorulabilir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı türbülans şiddetinin değişimiyle pek değişmemektedir.



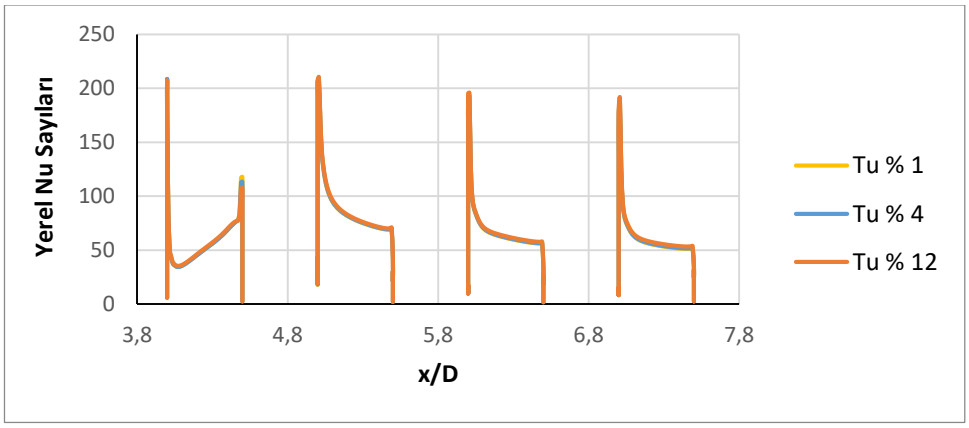
Şekil 4.179. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

Şekil 4.180'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup türbülans şiddeti attıkça maksimum etki alanı hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksektir. Tüm durumlarda bu etki hemen hemen aynı kalmaktadır.



Şekil 4.180. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

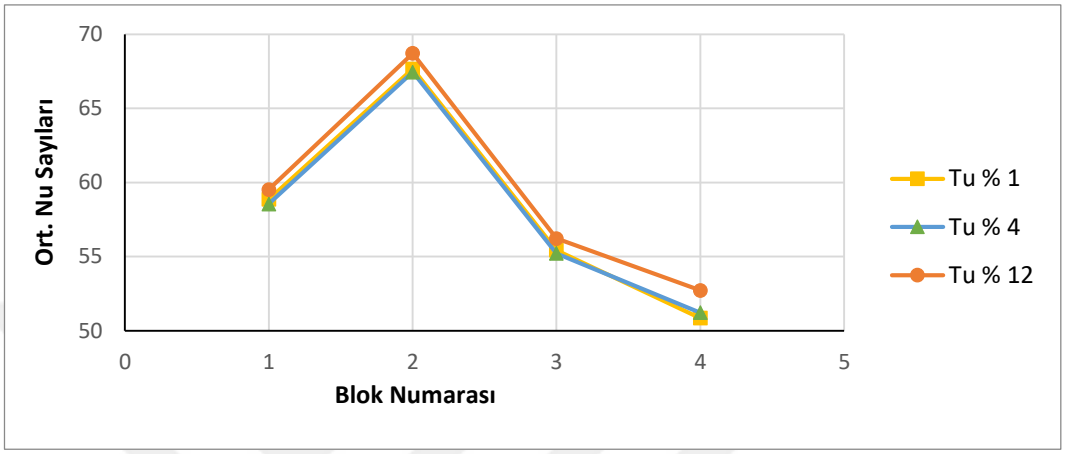
Şekil 4.181'de farklı türbülans şiddetleri için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı türbülans şiddetinin en yüksek olduğu durum hariç diğer durumlarda birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Türbülans şiddetinin en fazla olduğu durumda en yüksek yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir. Türbülans şiddetinin değişimi yerel Nu sayılarında pek fazla değişime neden olmamıştır. Bu durum kanal girişinden bloklara kadar türbülans etkinin azalmasına yorulabilir.



Şekil 4.181. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.182'de tüm geometriler için, yani türbülans şiddeti değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması

alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm durumlarda için en düşük ortalama Nu sayısı son yonga da elde edilmektedir. Türbülans şiddetinin artmasıyla ortalama Nu sayısının çok az miktarda arttığı Çizelge 4.19 yardımıyla da görülebilir.



Şekil 4.182. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

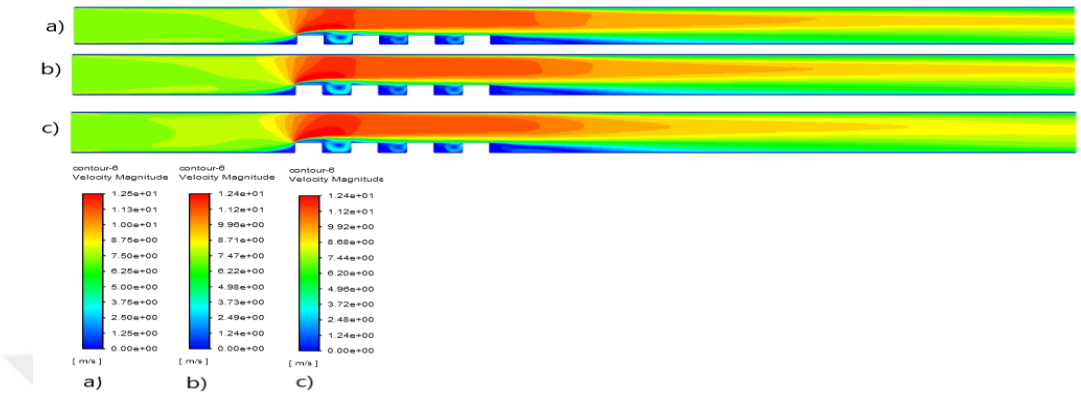
Çizelge 4.19. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Türbülans Şiddeti	Ortalama Nusselt Sayısı
% 1	58,01
% 4	58,12
% 12	59,2

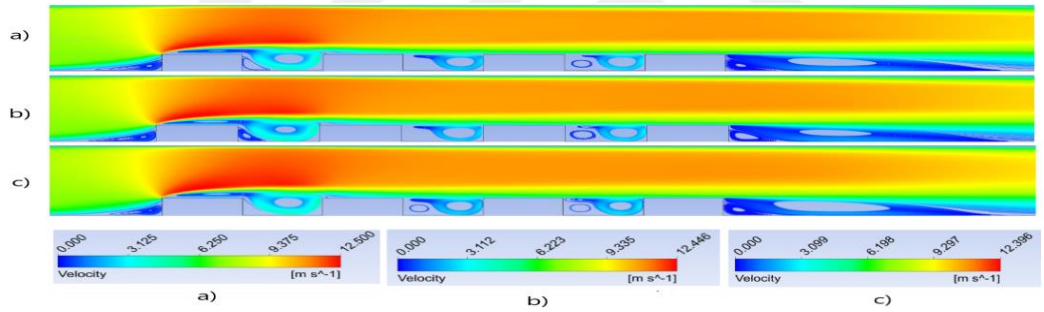
Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.183 ve 4.184 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Tüm türbülans şiddetlerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Ayrıca tüm türbülans şiddetlerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve türbülans şiddetinin artmasıyla yeniden birleşme uzunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.21). Ayrıca her üç durumda da son bloğun arka alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son

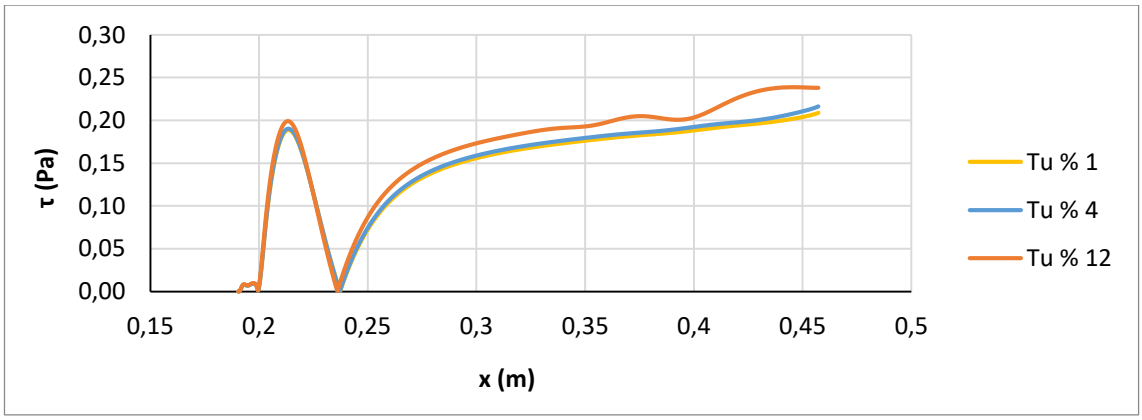
blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.185'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.183. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

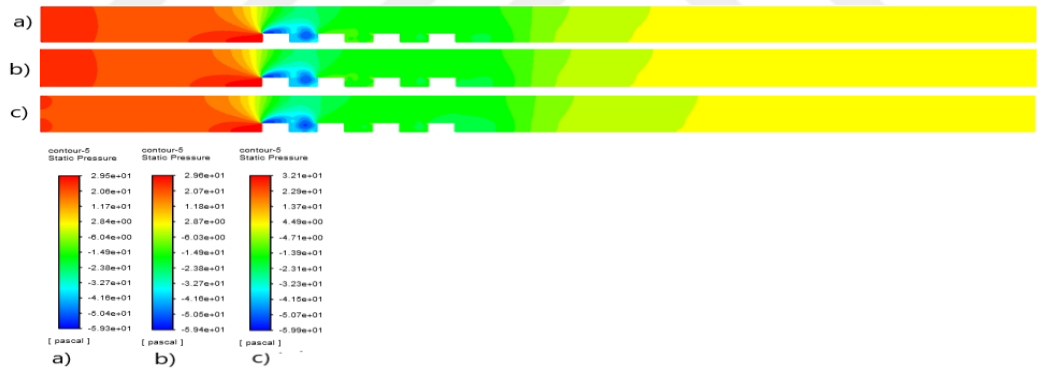


Şekil 4.184. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

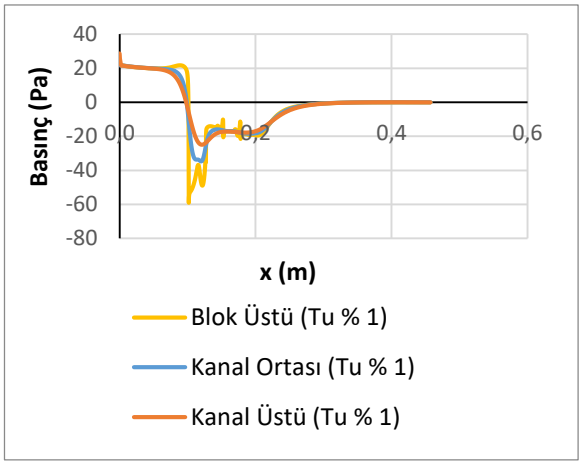


Şekil 4.185. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı türbülans şiddetlerinde kayma gerilmeleri

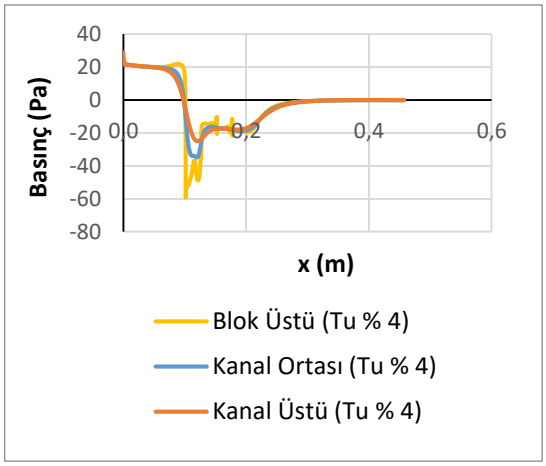
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.186'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.187, 4.188 ve 4.189'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Tüm durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Türbülans şiddetinin artmasıyla Şekil 4.183'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.183 a için 12,5 m/s, b ve c'de azalarak 12,4 m/s ve 12,4 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.186 a, b ve c'deki basınçlarda Şekil 4.183 a, b ve c'dekiyle hemen hemen aynı oranda azalmıştır. Şekil 4.186 a'daki minimum basınç -59,3 Pa, b ve c'deki basınçlar ise -59,4 Pa ve -59,9 Pa olarak hesaplanmıştır. Türbülans şiddeti arttıkça Şekil 4.187, 4.188 ve 4.189'dan da görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçların da çok fazla bir değişim olmamaktadır. Giriş basınçları, % 1 türbülans şiddeti için 21,7 Pa, % 4 türbülans şiddeti için 21,78 Pa ve % 12 türbülans şiddeti için 22,84 Pa olarak elde edilmiştir.



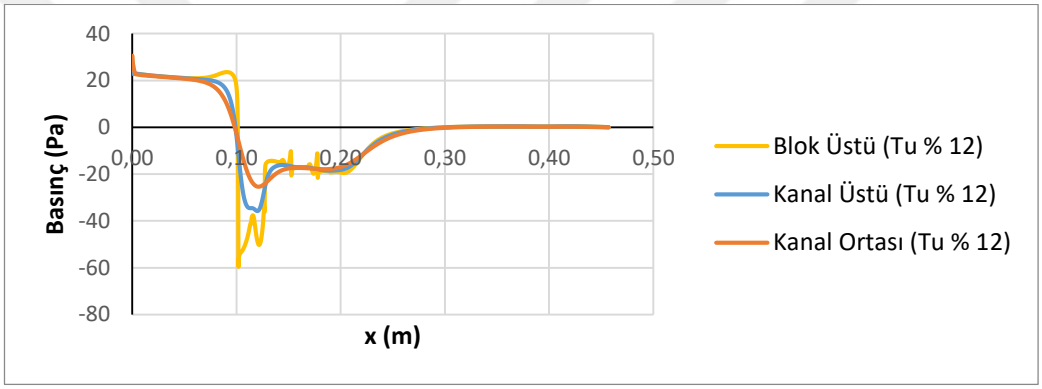
Şekil 4.186. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



Şekil 4.187. Tu % 1 için basınç değişimi

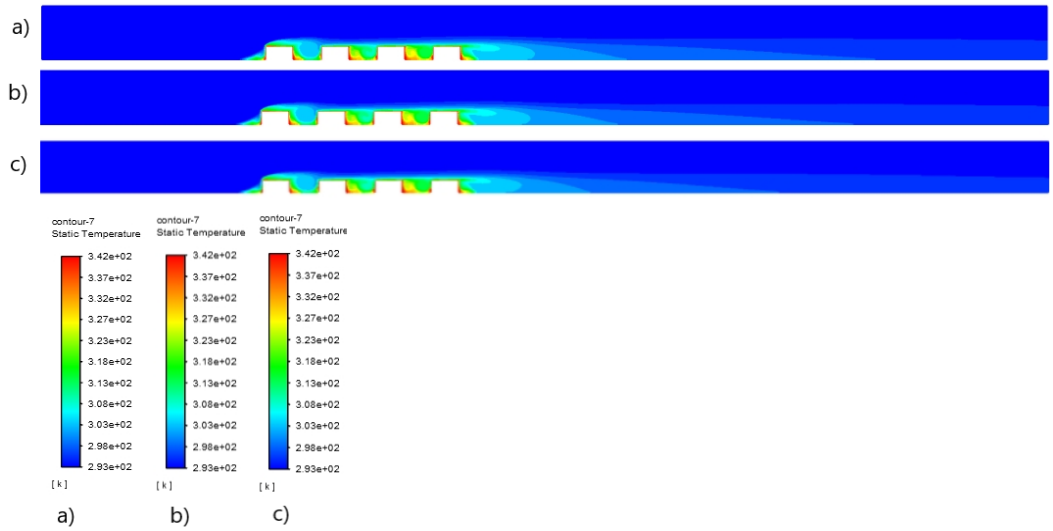


Şekil 4.188. Tu % 4 için basınç değişimi



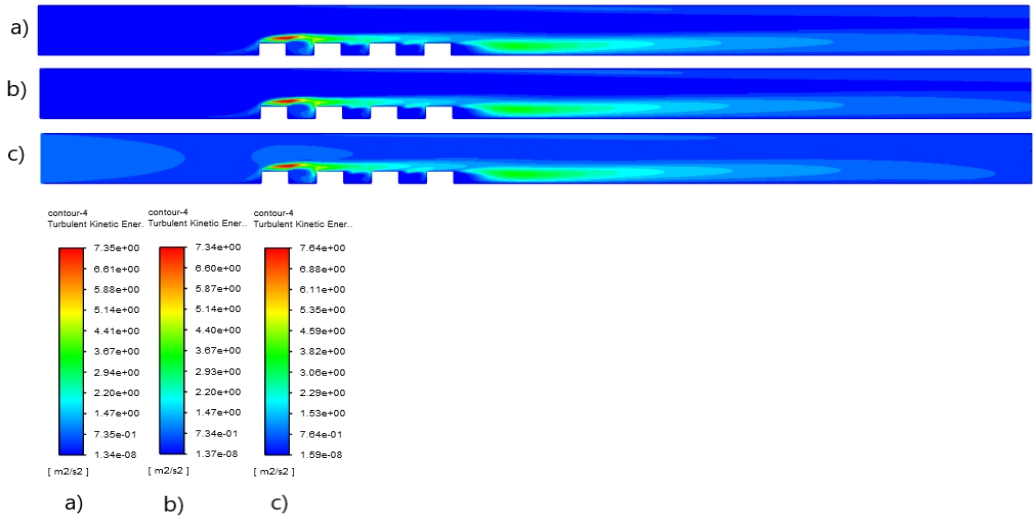
Şekil 4.189. Tu % 12 için basınç değişimi

Şekil 4.190'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisi daha fazladır. Bu durum giriş havasının birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü yongalardan sonra gelen çukurda etkisinin daha fazla olmasına yorulabilir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı türbülans şiddetinin değişimiyle pek değişmemektedir.



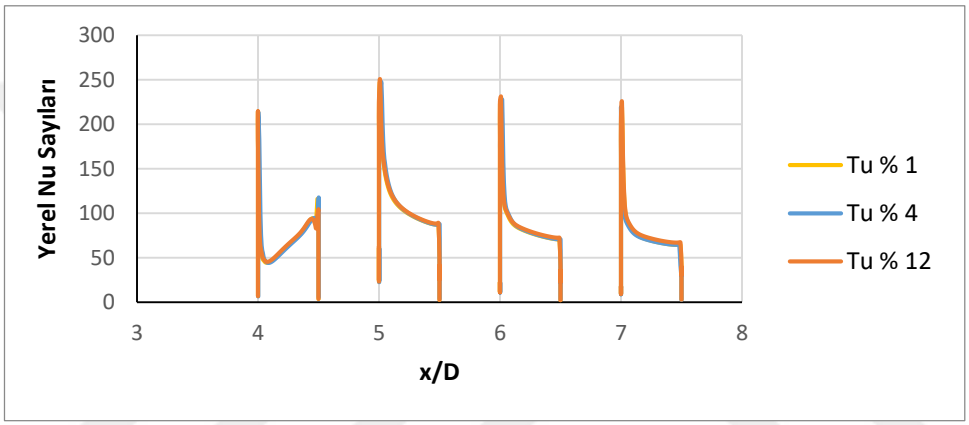
Şekil 4.190. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

Şekil 4.191'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup türbülans şiddeti attıkça maksimum etki alanı hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksektir. Tüm durumlarda bu etki hemen hemen aynı kalmaktadır.



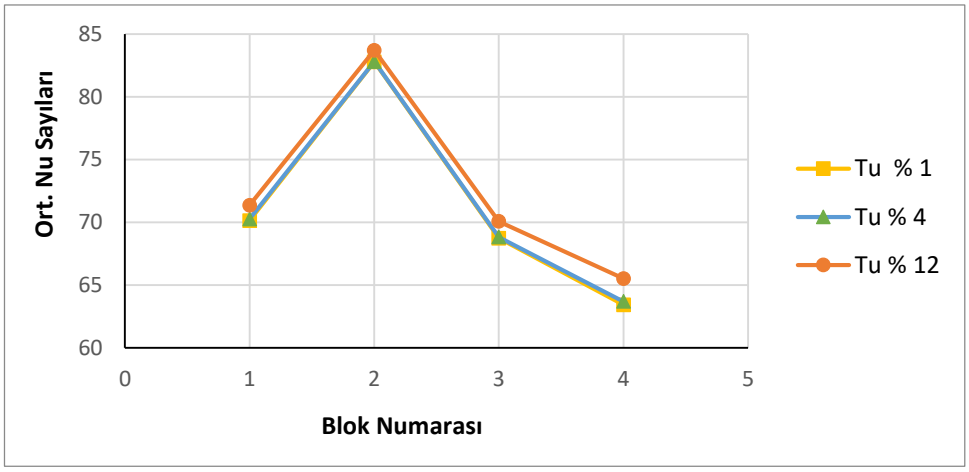
Şekil 4.191. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

Şekil 4.192'de farklı türbülans şiddetleri için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998). Türbülans şiddetinin değişimi yerel Nu sayılarında pek fazla değişime neden olmamıştır. Bu durum kanal girişinden bloklara kadar türbülans etkinin azalmasına yorulabilir.



Şekil 4.192. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.193'de tüm geometriler için, yani türbülans şiddeti değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm durumlarda için en düşük ortalama Nu sayısı son yonga da elde edilmektedir. Türbülans şiddetinin artmasıyla ortalama Nu sayısının çok az miktarda arttığı Çizelge 4.20 yardımıyla da görülebilir.



Şekil 4.193. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.20. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Türbülans Şiddeti	Ortalama Nusselt Sayısı
% 1	71,27
% 4	71,41
% 12	72,67

Türbülans giriş parametrelerinin farklı hızlarda incelenmesi

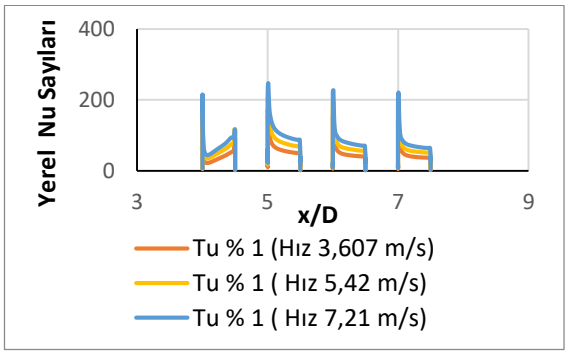
Çizelge 4.21'den görüldüğü üzere türbülans şiddeti arttıkça yeniden birleşme uzunluklarında çok az bir miktar azalma olmaktadır. Aynı geometride Re sayısının artması yeniden birleşme uzunluklarında çok fazla bir değişime sebep olmamaktadır. Isomoto ve Honami (1989), yaptıkları deneysel çalışmada türbülans şiddeti attıkça yeniden birleşme uzunluklarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Ateş (2015), yaptığı tez çalışmasında geri basamak akışında türbülans şiddeti arttıkça yeniden birleşme uzunluğunun azaldığını gözlemlemiştir.

Aynı türbülans şiddetinde farklı hızlarda yeniden birleşme uzunluğunda çok az bir miktar azalma görülmüştür. Aynı hızda da türbülans şiddeti attıkça yeniden birleşme uzunluklarında bir miktar azalma olmaktadır.

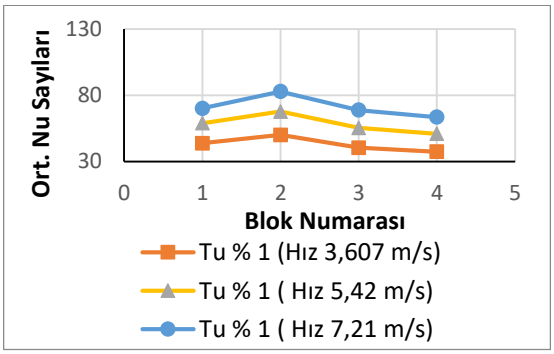
Çizelge 4.21. Tüm türbülans şiddetlerinde ve tüm hızlarda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Türbülans Şiddeti	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	% 1	0,008961	0,048006
	% 4	0,008961	0,047579
	% 12	0,008961	0,046513
5,42	% 1	0,009175	0,047153
	% 4	0,009175	0,047153
	% 12	0,008961	0,046086
7,21	% 1	0,009175	0,046726
	% 4	0,009175	0,046726
	% 12	0,008961	0,045659

Türbülans şiddeti % 1 için hızın artırılması Şekil 4.194 ve Şekil 4.195'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.

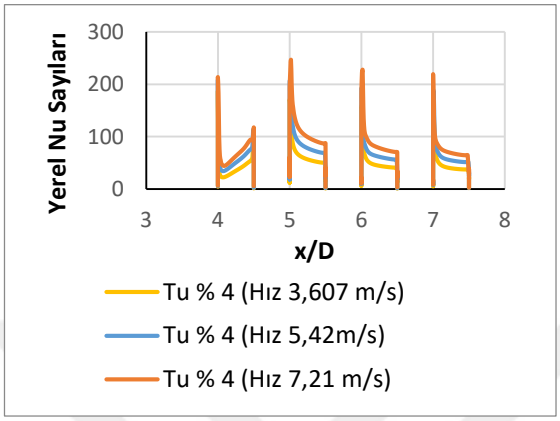


Şekil 4.194. Tu % 1 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

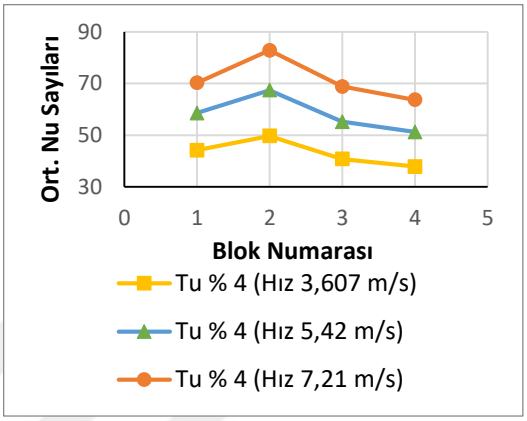


Şekil 4.195. Tu % 1 için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Türbülans şiddeti % 4 için hızın artırılması Şekil 4.196 ve Şekil 4.197'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.

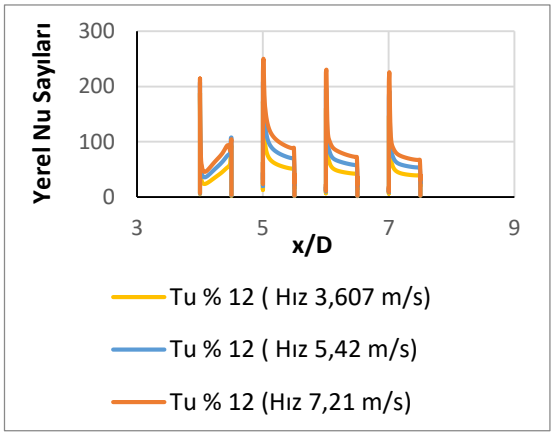


Şekil 4.196. Tu % 4 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

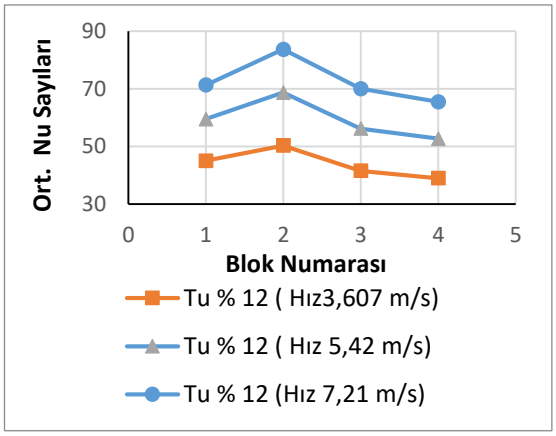


Şekil 4.197. Tu % 4 için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Türbülans şiddeti % 12 için hızın artırılması (Re sayısının arttırılması) Şekil 4.198 ve Şekil 4.199'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm hızlarda en yüksek ortalama ve yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.198. Tu % 12 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları



Şekil 4.199. Tu % 12 için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

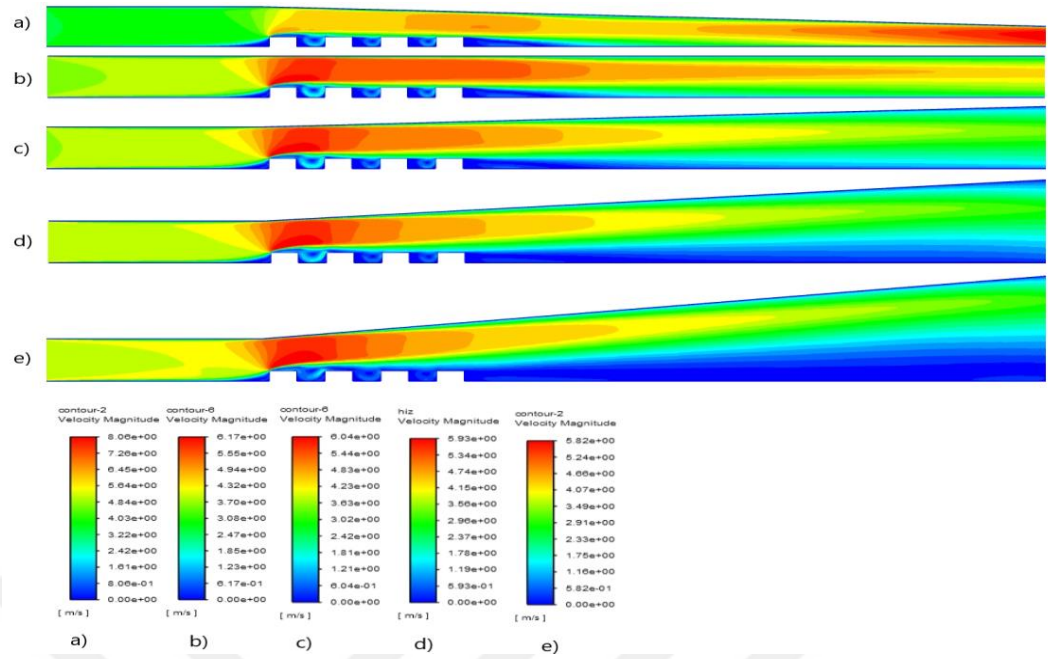
Yapılan 9 adet analizle türbülans şiddetindeki değişimin ısı transferine etkisi araştırılığında; Çizelge 4.18, 4.19 ve 4.20 incelendiğinde en yüksek ortalama Nu sayısının, Re=11993 (Hız 7,21 m/s) de ve türbülans şiddeti % 12 olduğu durumda 72,67 olduğu tespit edilmiştir. Pulat (2000), yaptığı çalışmasında, türbülans şiddetinin arttırılmasının ısı transferi üzerine dikkat çekici bir etkisinin olmadığını vurgulamıştır. Bunun nedenini ilk ısı kaynağının önünde uzunca bir mesafe olmasına dayandırmaktadır (Türbülans şiddeti % 1,2, 6,9 ve 13 dür.). Özellik değişimi ve kaldırma kuvvetinin etkisi hesaba katıldığında bile türbülans şiddetinin etkisini açıkça gözlemleyememiştir. Wang ve Mujumdar (2005), yaptıkları iki boyutlu jet çalışmalarında giriş türbülans şiddetini arttırmanın yüzey boyunca ısı transferini çok az bir miktar artırdığını gözlemlemişlerdir (Türbülans şiddeti % 1, 2, 4 ve 6'dır.). İşman, Pulat, Etemoğlu ve Can (2008), yaptıkları jet çalışmalarında 2 farklı türbülans modelinde de türbülans şiddetini artırmanın ısı transferini artırdığını gözlemlemişlerdir.

4.1.6. 2 boyutlu geometride basınç gradyeninin etkisinin incelenmesi

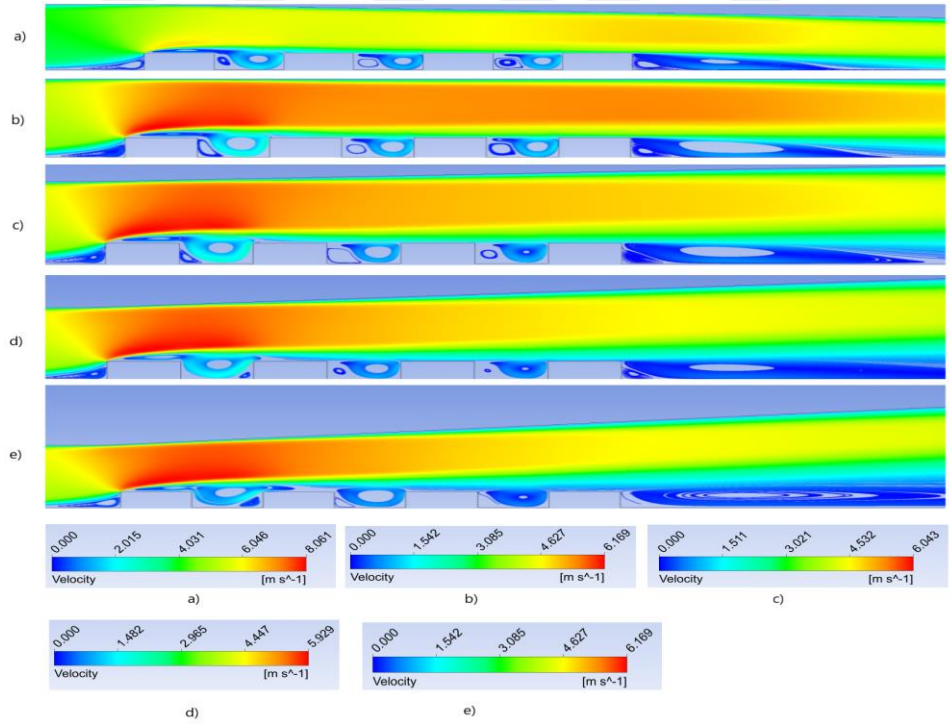
Basınç gradyeni üst plaka üzerine verilen ve ilk bloktan 3 mm önce başlayan eğimle sağlanmıştır. -2°, 0°, 2°, 4° ve 6° ° açı verilerek ısı transferi üzerine basınç gradyeninin etkisi araştırılmıştır.

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

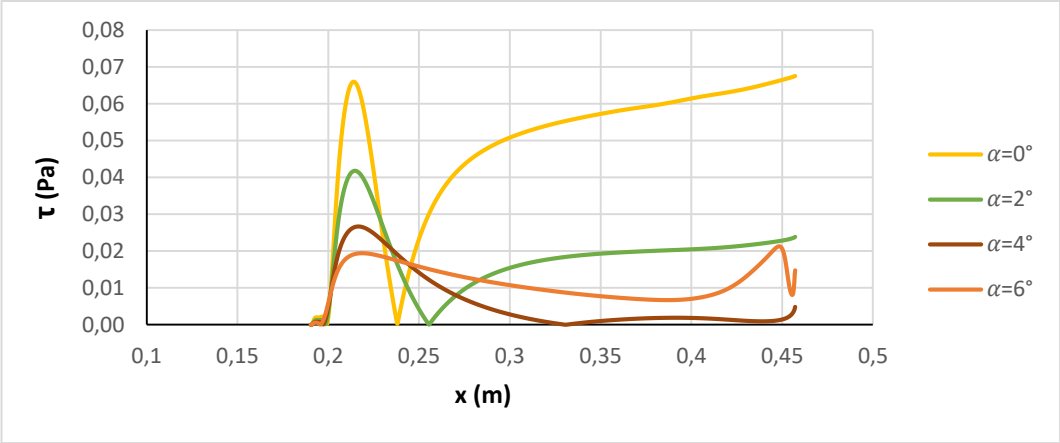
Şekil 4.200 ve 4.201'den de görülebileceği gibi yakınsayan geometri hariç (Şekil 200 a) tüm geometrilerde 1. bloktan sonra kesit daralmasından sonra hız artmakta ve hız artış oranı açı arttıkça azalmaktadır. Bu azalma 2° den sonra yavaşlamaktadır. Şekil 4.200 b' de 0° de maksimum hız 6,17 m/s olarak akış ilk yongaya çarptıktan sonra 1. yonga üzerinde gözlemlenmiştir. 2°, 4° ve 6° deki maksimum hızlar sırasıyla 6,04 m/s, 5,93 m/s ve 5,82 m/s olarak hesaplanmıştır. Yakınsayan geometride ise (α= -2°) maksimum hız kesit daralmasının daha fazla olduğu çıkışta elde edilmiş olup 8,06 m/s değerindedir. Şekil 4.201'den görülebileceği tüm geometrilerde ilk bloktan önce saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Yakınsayan geometri ve baz geometrideki bloklardan sonra saat yönü ve saat yönünün tersindeki blokların boyu benzerdir. Fakat ıraksayan geometrilerde açı arttıkça saat yönünün tersinde oluşan girdap boyu azalmaktadır. Şekil 4.202'den de görülebileceği gibi açının artması yeniden birleşme uzunluğunu artırmıştır. Şekil 4.203'de ise yakınsayan geometri yeniden birleşme uzunluğunu azaltmıştır (Bkz. Çizelge 25). Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. α=6° hariç diğer tüm durumlarda son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.202 ve Şekil 4.203'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.25'de verilmiştir.



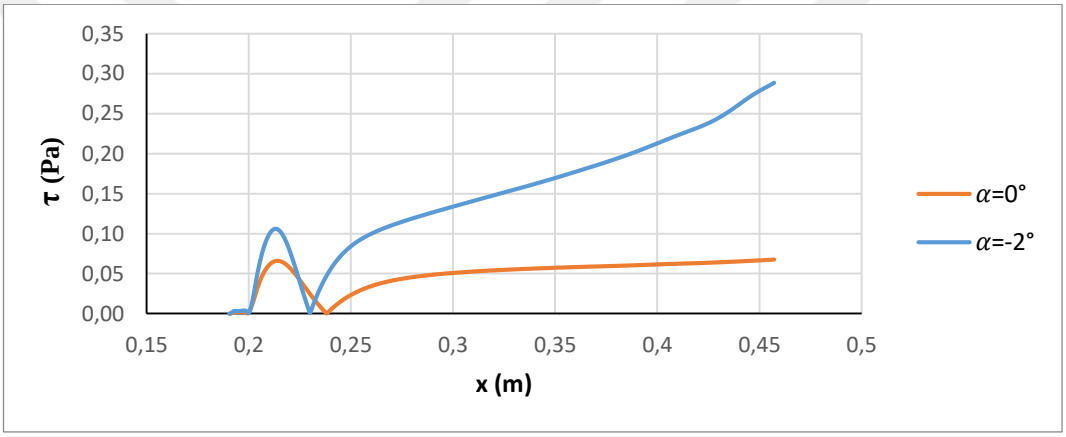
Şekil 4.200. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



Şekil 4.201. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



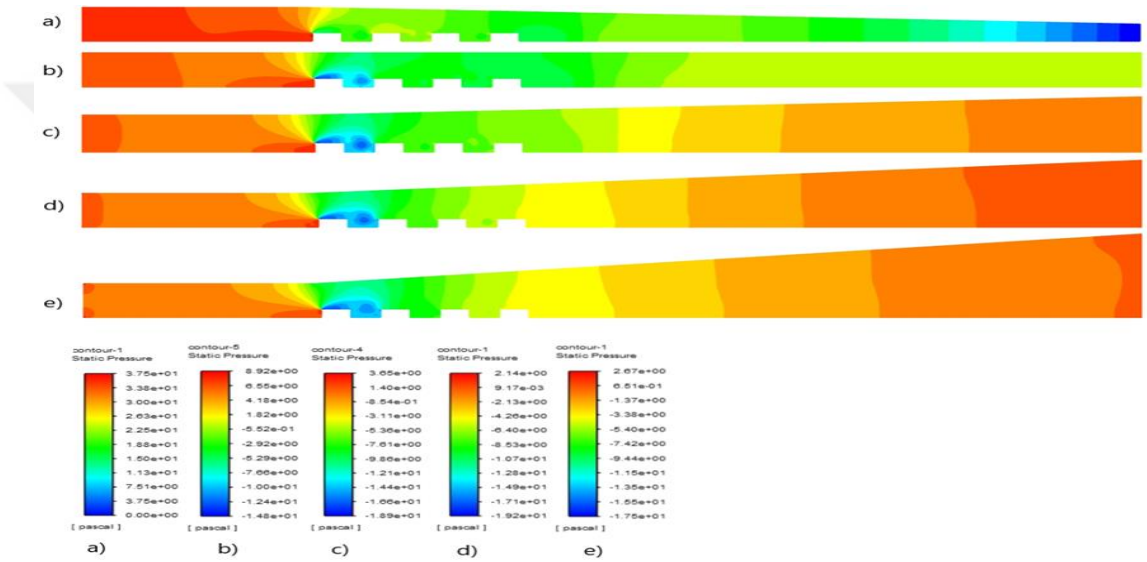
Şekil 4.202. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmesi değerleri



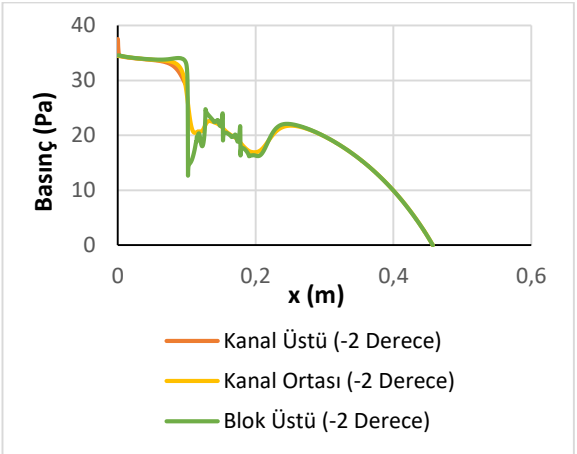
Şekil 4.203. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmesi değerleri

Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.204'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.205, 4.206, 4.207 ve 4.208'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar yakınsayan geometri hariç birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Yakınsayan geometride en düşük basınç hızın en yüksek olduğu kanal çıkışında elde edilmiştir. Yakınsayan geometride ise bloklar çevresinde oluşan basınç gradyeni daha homojen olup, ıraksayan geometrilerdeki 1. blokla 2. blok arasında oluşan düşük basınç bölgeleri oluşmamaktadır. Açının artmasıyla Şekil 4.200'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.200 c için 6,04 m/s, d ve e'de azalarak 5,93 m/s ve 5,82 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.204 c, d ve e'deki

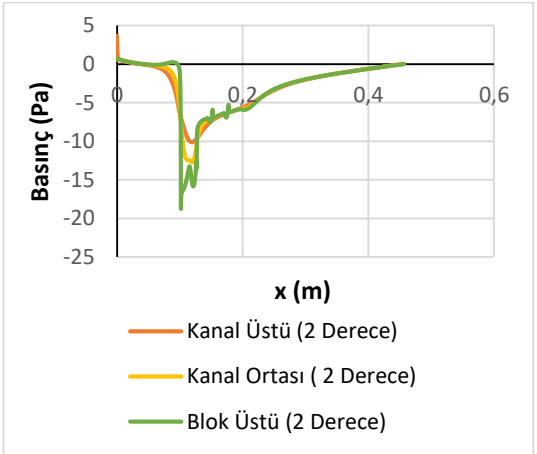
basınçlarda Şekil 4.200 c, d ve e'dekiyle hemen hemen aynı oranda değişmiştir. Şekil 4.204 c'deki minimum basınç -18,9 Pa, d ve e'deki basınçlar ise -19,2 Pa ve -17,5 Pa olarak hesaplanmıştır. Açı arttıkça Şekil 4.205, 4.206, 4.207 ve 4.208'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçların da çok fazla bir değişim olmamaktadır. Giriş basınçları, α= 2° için 0,56, α= 4° Pa için -0,94 Pa ve α= 6° için -0,41 Pa olarak elde edilmiştir. Fakat açı azaldıkça giriş basıncı artmaktadır (α= -2° için 34,46 elde edilmiştir). Baz geometride yani α= 0° de bu değer 5,97 Pa'dır (Bkz. Şekil 4.205, 4.206, 4.207 ve 4.208).



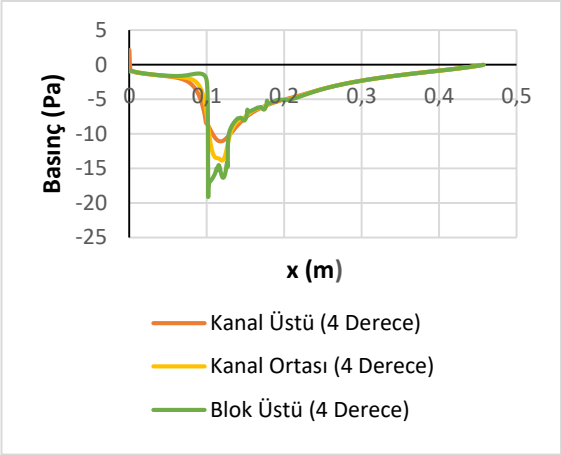
Şekil 4.204. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



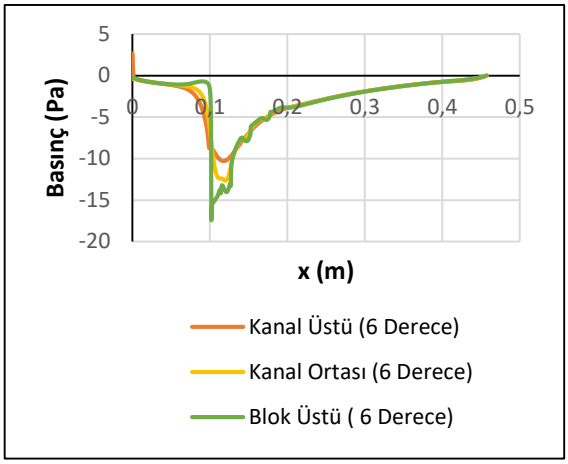
Şekil 4.205. α= -2° için basınç değişimi



Şekil 4.206. α= 2° için basınç değişimi

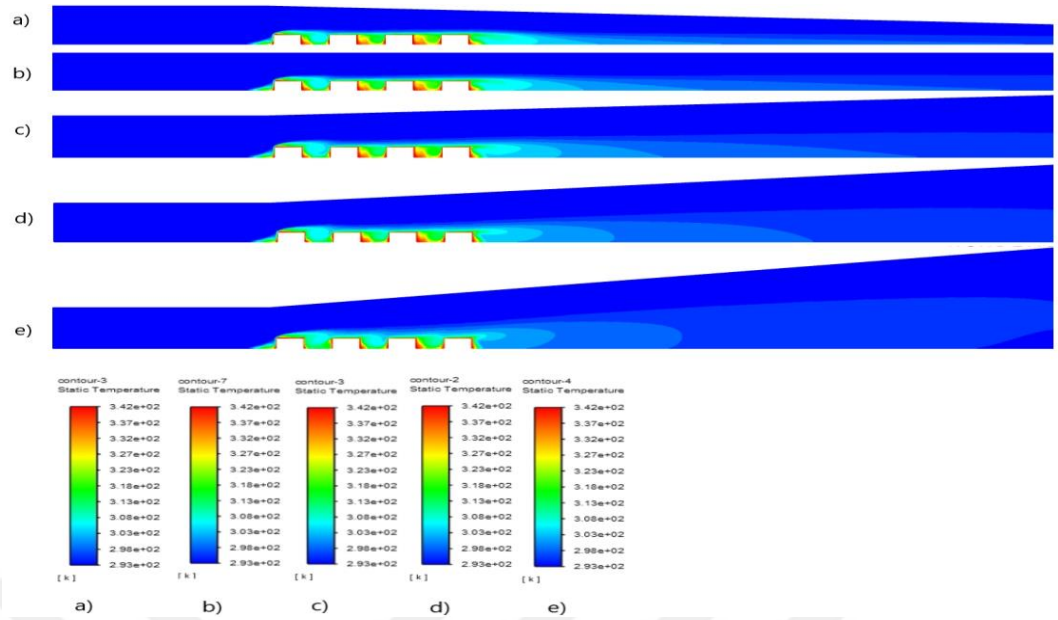


Şekil 4.207. α= 4° için basınç değişimi



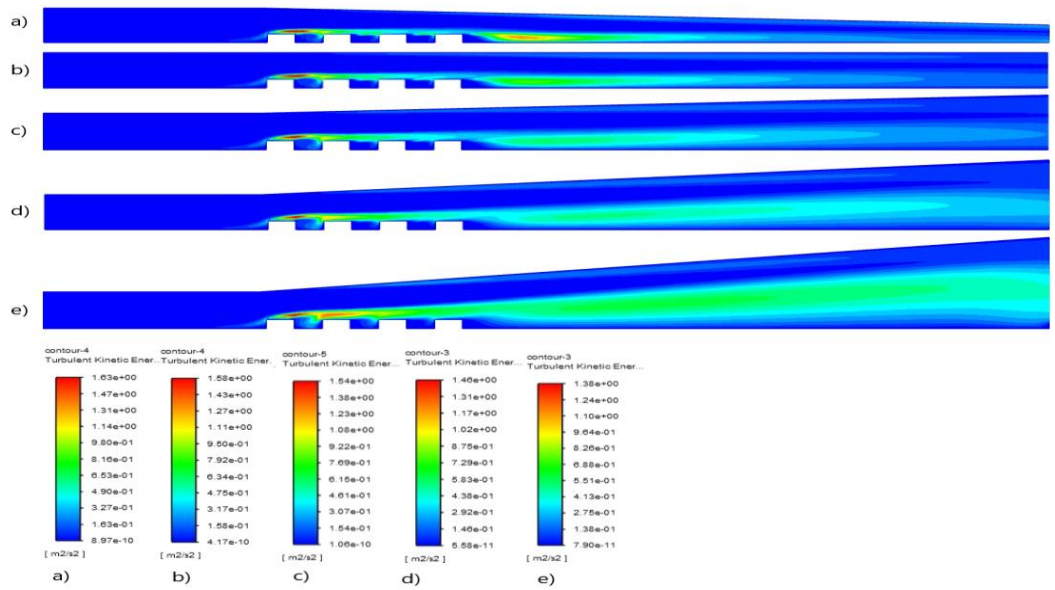
Şekil 4.208. α= 6° için basınç değişimi

Şekil 4.209'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Ayrıca α=6°'deki sıcaklık etkisi çıkışa kadar ulaşamamaktadır. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisi daha fazladır. Bu durum giriş havasının birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü yongalardan sonra gelen çukurda etkisinin daha fazla olmasına yorulabilir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı açının artmasıyla azalmaktadır.



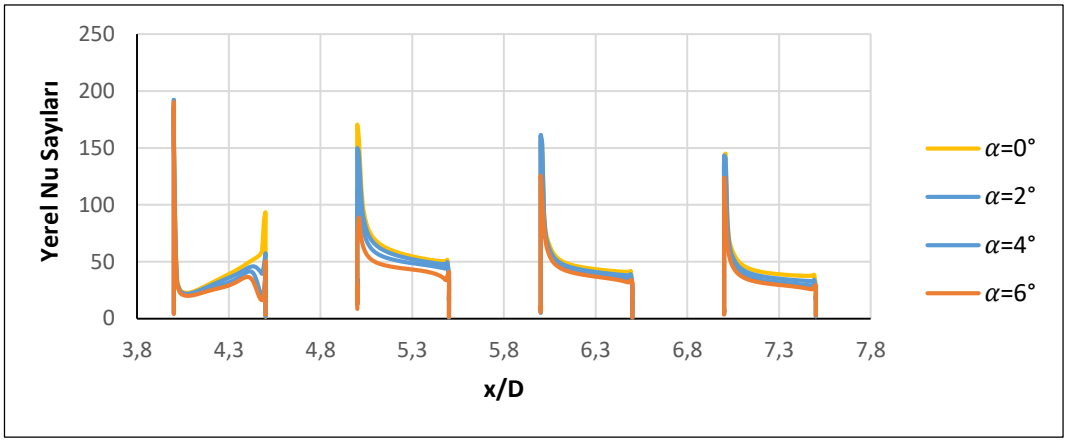
Şekil 4.209. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) α=-2°, b) α=0°(baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

Şekil 4.210'dan da görülebileceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup açı arttıkça 2. bloğun üstüne doğru yayılmaktadır. Ayrıca blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup açı arttıkça çıkışa ve üst duvara doğru yayılmaktadır.

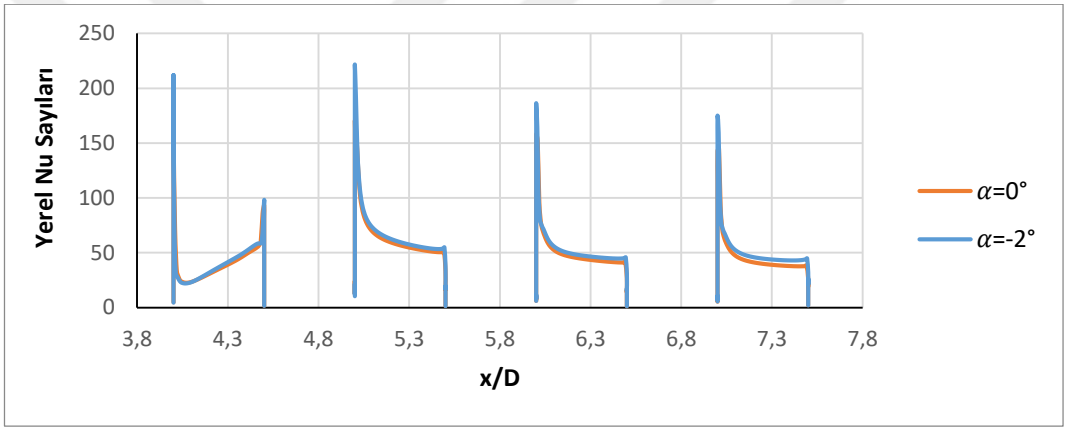


Şekil 4.210. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

Yakınsayan ($\alpha = -2°$) ve baz ($\alpha = 0°$) baz geometri için yerel ısı transfer katsayıları Şekil 4.212'de ve baz geometri ve ıraksayan ($\alpha = 2°$, $4°$ ve $6°$) geometriler için de Şekil 4.211'de gösterilmiştir. Şekil 4.211'de bloklar üzerindeki maksimum yerel Nu sayısı ıraksayan geometriler için birinci bloğun ön ucunda elde edilmiştir. Şekil 4.212'de bloklar üzerindeki maksimum yerel Nu sayısı yakınsayan geometri için ikinci blok üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998). Birinci blok üzerinde blok sonuna doğru yakınsayan geometride ısı taşınım katsayısı artmakta, baz geometride de tam benzer bir eğilim sergilemektedir. Yani şiddetli akış ayrılmasının olduğu yerler zayıf taşınımla ısı transferi sergilemekte, tersi olarak akış yeniden birleşmesinin olduğu yerler ise kuvvetli taşınımla ısı transferi sergilemektedirler. İkinci ve üçüncü ve dördüncü blokların üstünde ise yerel ısı taşınım katsayısı dağılımları beklendiği gibi düzlem levha üzerindeki akış durumuna benzemekte, bloklar üzerinde blok sonuna doğru akışkan sıcaklığındaki çok hafif düşüşün neden olduğu çok hafif bir yükselme göze çarpmaktadır. Tüm bloklar için üst plakadaki negatif açı (yakınsama) blok yüzeyinde blok ucundan sonra yerel ısı transfer katsayısını arttırmaktadır. Şekil 4.211'den de görüldüğü gibi ıraksayan geometrilerde ($\alpha = 2°$, $4°$ ve $6°$), ıraksama açısı arttıkça lokal ısı taşınım katsayısı dağılımı da monoton bir biçimde azalmaktadır. Iraksayan geometrilerde birinci bloğun arka ucundaki ısı taşınım katsayısının arttıktan sonra keskin bir şekilde düşüp yine keskin bir biçimde artması olayı açı arttıkça şiddetini daha da arttırmakta ve yakınsayan geometride rastlamadığımız şekilde aynı yapı ikinci blokta da gözlenmekte, çok az biçimde de üçüncü ve dördüncü blok yüzeyinde de ortaya çıkmaktadır.



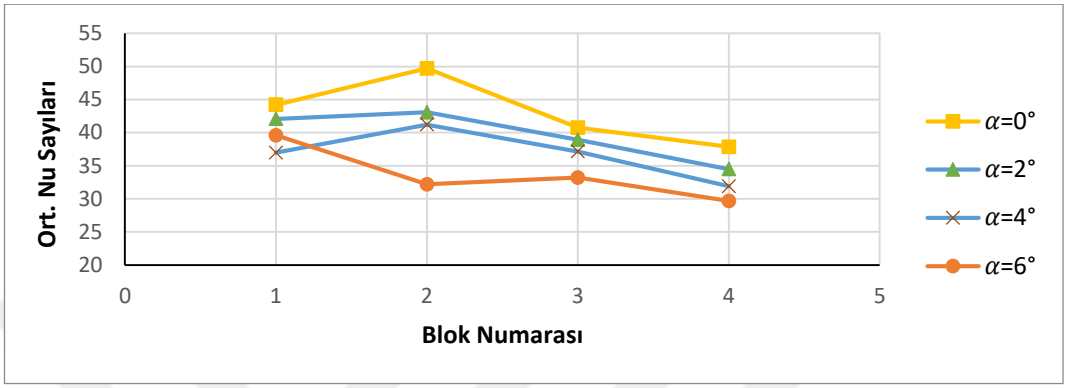
Şekil 4.211. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri karşılaştırılması)



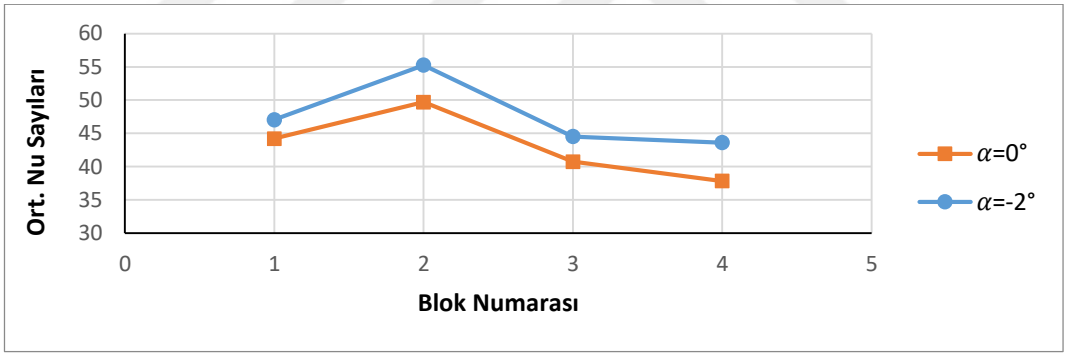
Şekil 4.212. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Yakınsayan geometri ve baz geometri karşılaştırılması)

Şekil 4.213'de ıraksayan geometriler için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.213'de ilk göze çarpan nokta baz geometriye göre açının artması durumunda artan ıraksama açısıyla birlikte ortalama Nu sayısının düşmesidir. Baz geometride, α = 2° ve α = 4° için en yüksek Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilirken, α = 6° de en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilmektedir. Tüm durumlarda en düşük Nu sayısı son yonga üzerinde elde edilmiştir. Şekil 4.214'de yakınsayan geometri için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Yakınsama açısı baz geometriyle benzer bir

eğilim sergilemektedir. En yüksek ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Yakınsayan açı ortalama Nu sayısını artırmıştır. Çizelge 4.22'de tüm açılarda ortalama Nu sayısı verilmiştir buradan da görülebileceği gibi en yüksek ısı transferi α= -2° de elde edilmiştir.



Şekil 4.213. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri karşılaştırılması)



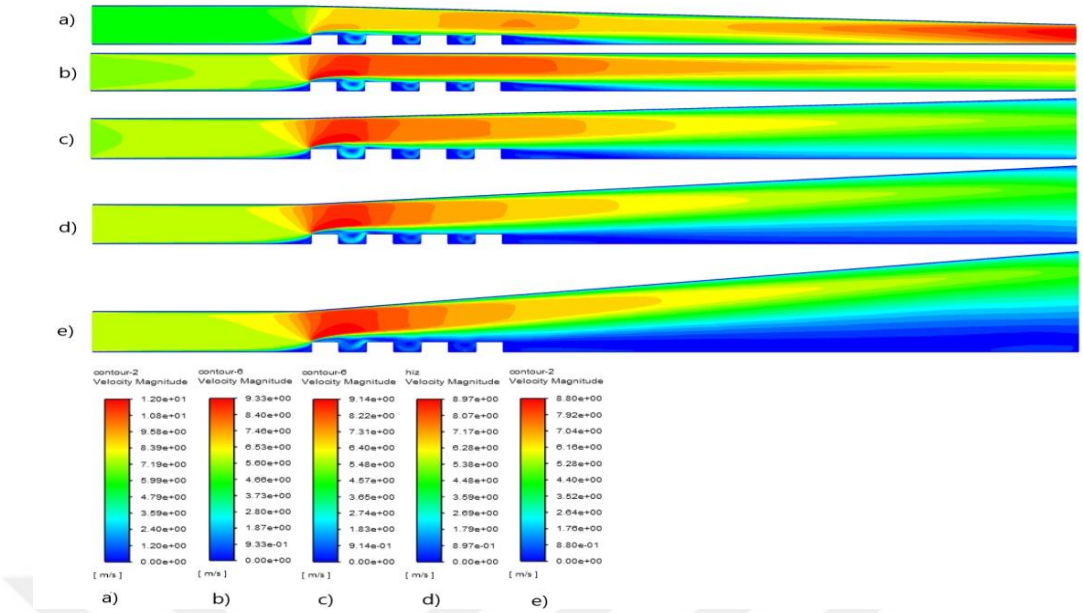
Şekil 4.214. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları (Yakınsayan geometri ve baz geometri karşılaştırılması)

Çizelge 4.22. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

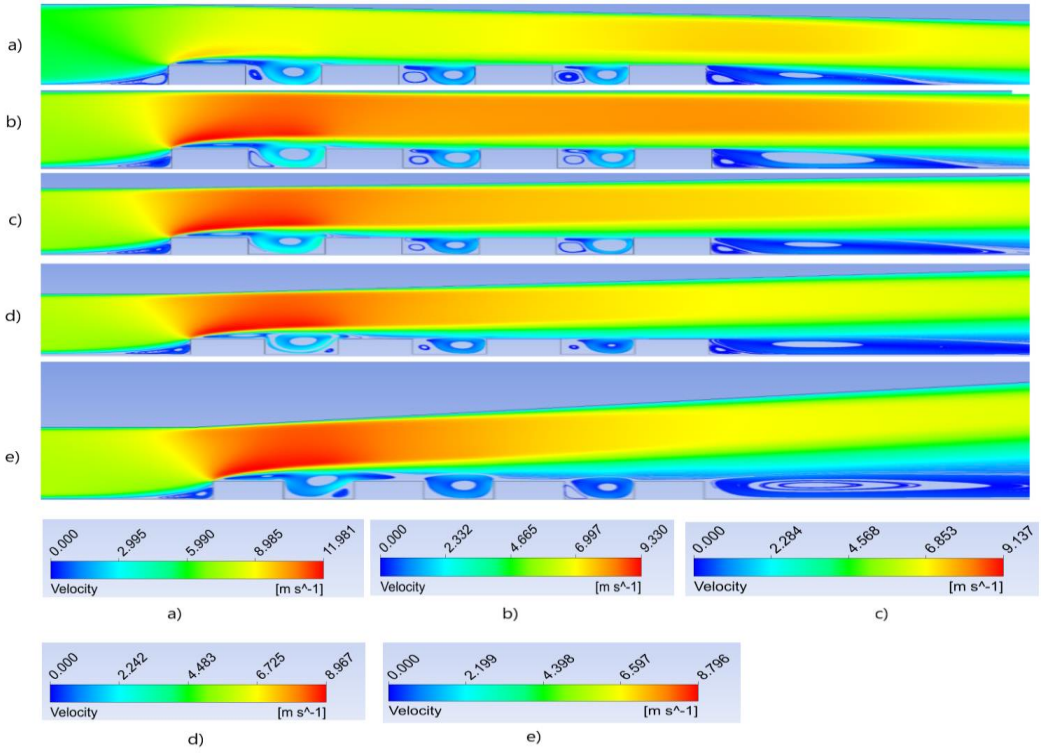
Açı	**Ortalama Nusselt Sayısı**
α=-2°	47,6
α=2°	39,64
α=4°	36,8
α=6°	33,65

Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

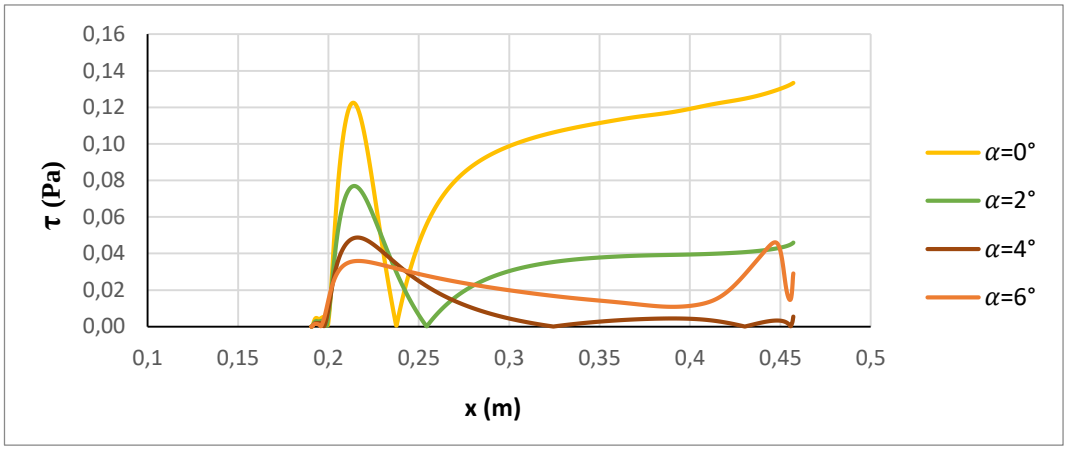
Şekil 4.215 ve 4.216'dan da görülebileceği gibi yakınsayan geometri hariç (Şekil 215 a) tüm geometrilerde 1. bloktan sonra kesit daralmasından sonra hız artmakta ve hız artış oranı açı arttıkça azalmaktadır. Bu azalma 2°'den sonra yavaşlamaktadır. Şekil 4.215 b' de 0°'de maksimum hız 9,33 m/s olarak akış ilk yongaya çarptıktan sonra 1. yonga üzerinde gözlemlenmiştir. 2°, 4° ve 6°'deki maksimum hızlar sırasıyla 9,14 m/s, 8,97 m/s ve 8,80 m/s olarak hesaplanmıştır. Yakınsayan geometride ise (α= -2°) maksimum hız kesit daralmasının daha fazla olduğu çıkışta elde edilmiş olup 12 m/s değerindedir. Şekil 4.216'dan görülebileceği tüm geometrilerde ilk bloktan önce saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Yakınsayan geometri ve baz geometrideki bloklardan sonra saat yönü ve saat yönünün tersindeki blokların boyu benzerdir. Fakat ıraksayan geometrilerde açı arttıkça saat yönünün tersinde oluşan girdap boyu azalmaktadır. Şekil 4.217'den de görülebileceği gibi açının artması yeniden birleşme uzunluğunu artırmıştır. Şekil 4.218' de ise yakınsayan geometri yeniden birleşme uzunluğunu azaltmıştır (Bkz. Çizelge 25). Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. α=6° hariç diğer tüm durumlarda son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.217 ve Şekil 4.218'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.25'de verilmiştir.



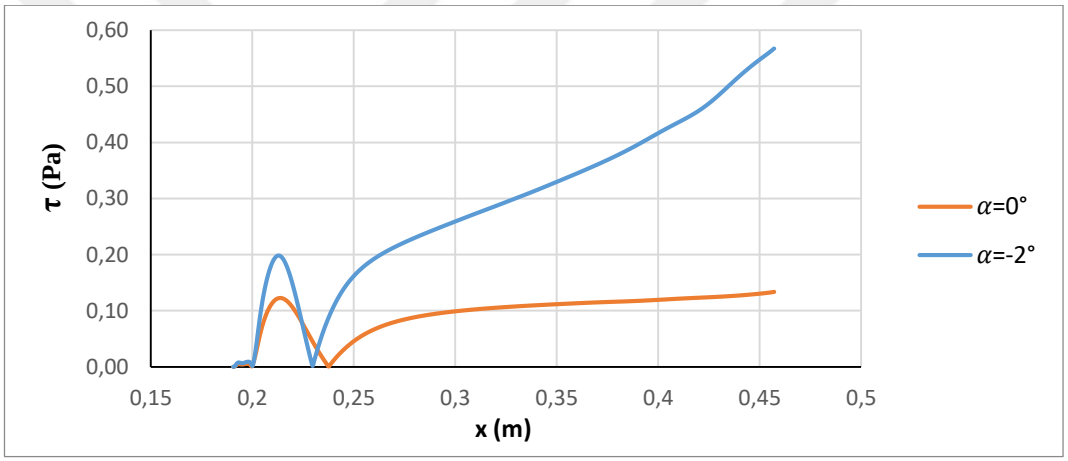
Şekil 4.215. Re=9015 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



Şekil 4.216. 216 Re=9015 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



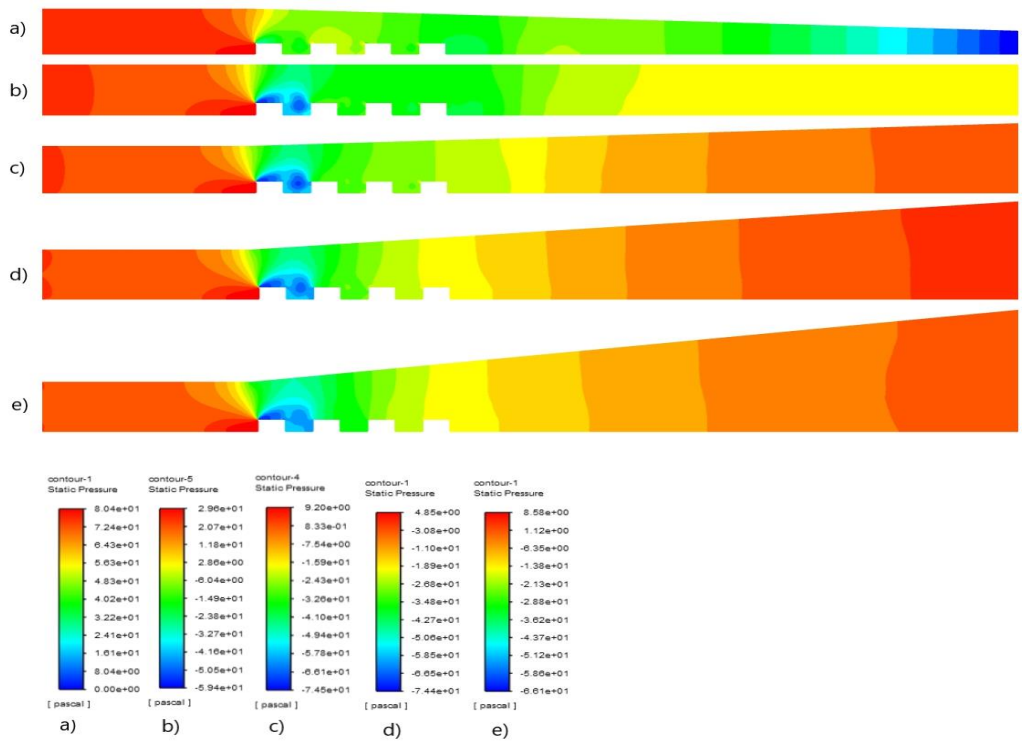
Şekil 4.217. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



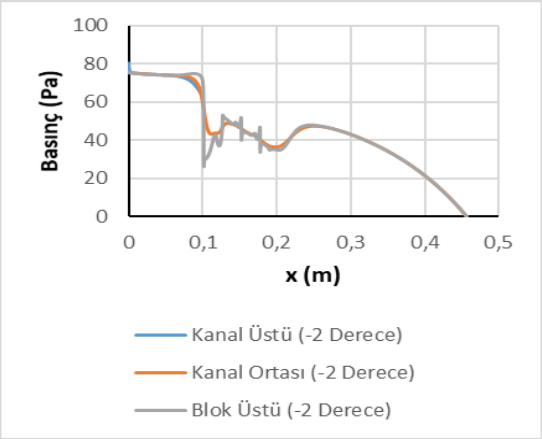
Şekil 4.218. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.219'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.220, 4.221, 4.222 ve 4.223'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar yakınsayan geometri hariç birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Yakınsayan geometride en düşük basınç hızın en yüksek olduğu kanal çıkışında elde edilmiştir. Yakınsayan geometride ise bloklar çevresinde oluşan basınç gradyeni daha homojen olup, ıraksayan geometrilerdeki 1. blokla 2. blok arasında oluşan düşük basınç bölgeleri oluşmamaktadır. Açının artmasıyla Şekil 4.215'den de

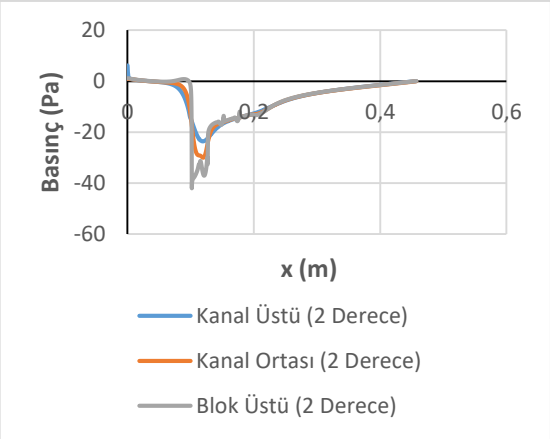
görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.215 c için 9,14 m/s, d ve e'de azalarak 8,97 m/s ve 8,80 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.219 c, d ve e'deki basınçlarda Şekil 4.215 c, d ve e'dekiyle hemen hemen aynı oranda değişmiştir. Şekil 4.219 c'deki minimum basınç -74,5 Pa, d ve e'deki basınçlar ise -74,4 Pa ve -66,1 Pa olarak hesaplanmıştır. Açı arttıkça Şekil 4.220, 4.221, 4.222 ve 4.223'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçların da çok fazla bir değişim olmamaktadır. Giriş basınçları, α= 2° için 0,92, α= 4° Pa için -1,95 Pa ve α= 6° için -0,21 Pa olarak elde edilmiştir. Fakat açı azaldıkça giriş basıncı artmaktadır (α= -2° için 75,32 elde edilmiştir). Baz geometride yani α= 0° de bu değer 12,73 Pa'dır (Bkz. Şekil 4.220, 4.221, 4.222 ve 4.223). Açının azalmasıyla basınçtaki artış kullanılması gereken fan gücünü artırmaktadır.



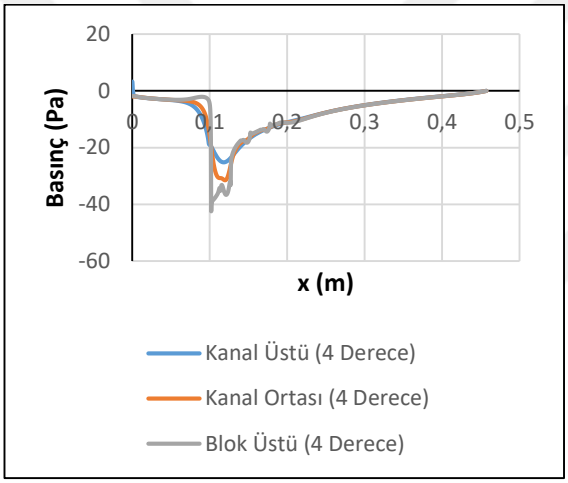
Şekil 4.219. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



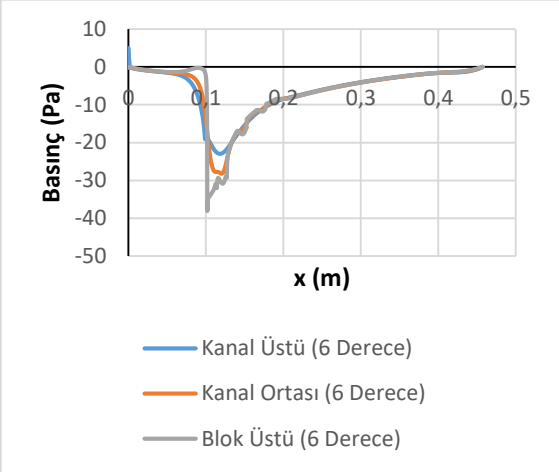
Şekil 4.220. α= -2° için basınç değişimi



Şekil 4.221. α= 2° için basınç değişimi



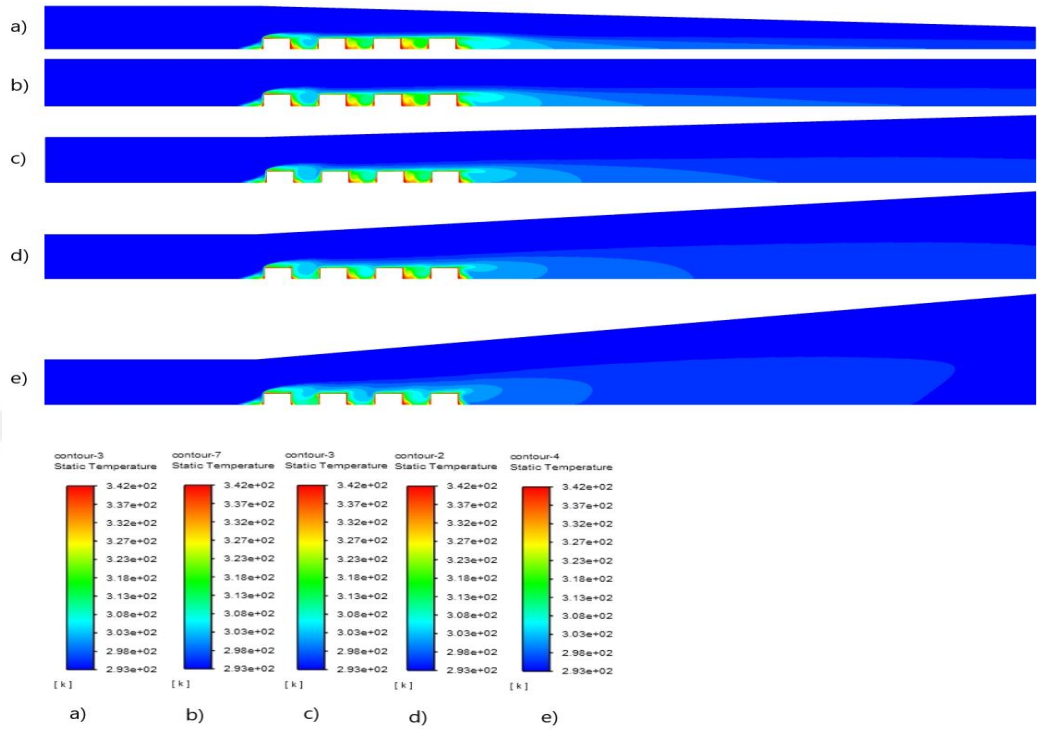
Şekil 4.222. α= 4° için basınç değişimi



Şekil 4.223. α= 6° için basınç değişimi

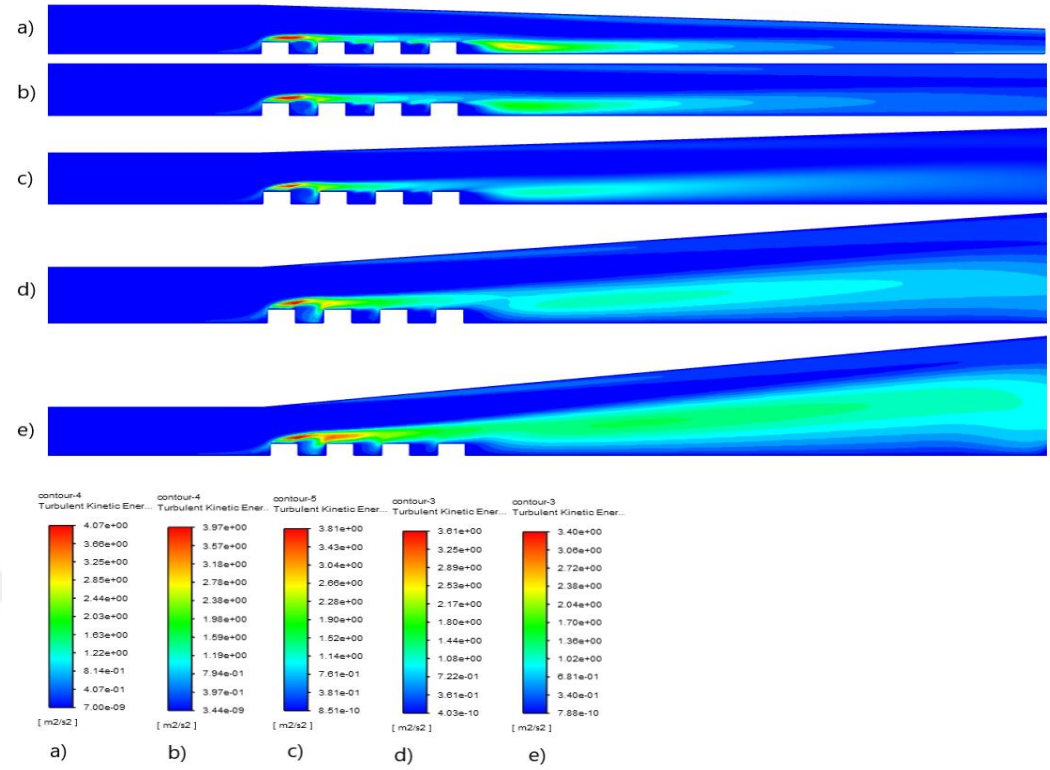
Şekil 4.224'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Ayrıca α=6°'deki sıcaklık etkisi çıkışa kadar ulaşamamaktadır. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisi daha fazladır. Bu durum giriş havasının birinci blokta ısındığından

dolayı ikinci ve üçüncü yongalardan sonra gelen çukurda etkisinin daha fazla olmasına yorulabilir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı açının artmasıyla azalmaktadır.



Şekil 4.224. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

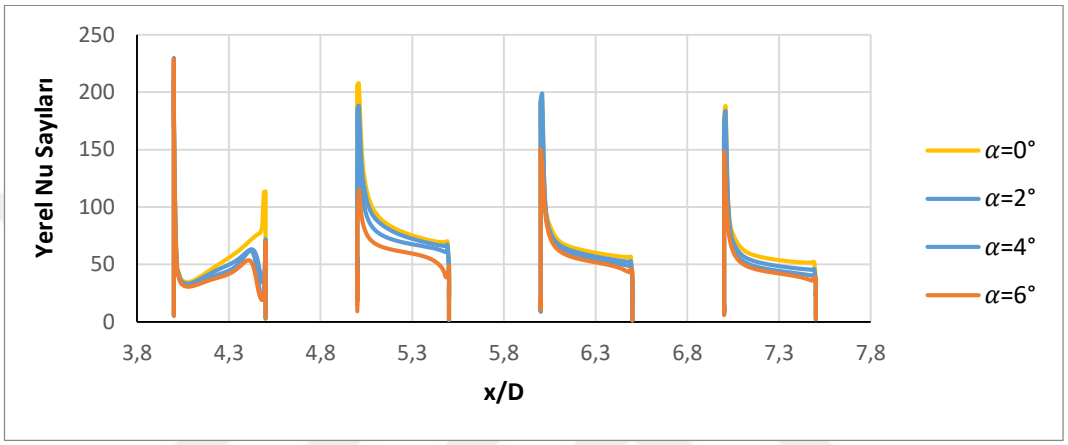
Şekil 4.225'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup açı arttıkça 2. bloğun üstüne doğru yayılmaktadır. Ayrıca blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup açı arttıkça çıkışa ve üst duvara doğru yayılmaktadır.



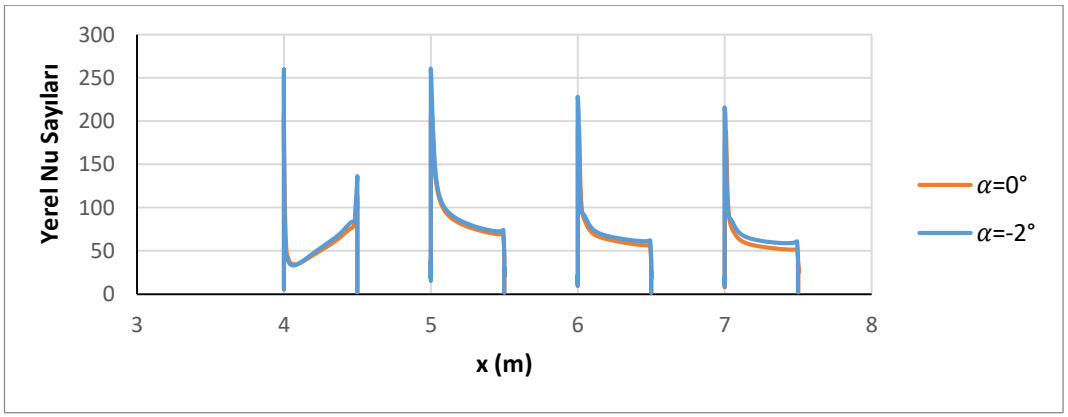
Şekil 4.225. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

Yakınsayan (α = -2°) ve baz (α = 0°) baz geometri için yerel ısı transfer katsayıları Şekil 4.227'de ve baz geometri ve ıraksayan (α= 2°, 4° ve 6°) geometriler için de Şekil 4.226'da gösterilmiştir. Şekil 4.226'da bloklar üzerindeki maksimum yerel Nu sayısı ıraksayan geometriler için birinci bloğun ön ucunda elde edilmiştir. Şekil 4.227'de bloklar üzerindeki maksimum yerel Nu sayısı yakınsayan geometri için ikinci blok üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998). Birinci blok üzerinde blok sonuna doğru yakınsayan geometride ısı taşınım katsayısı artmakta, baz geometride de benzer bir eğilim sergilemektedir. İkinci ve üçüncü ve dördüncü blokların üstünde ise yerel ısı taşınım katsayısı dağılımları beklendiği gibi düzlem levha üzerindeki akış durumuna benzemekte, bloklar üzerinde blok sonuna doğru akışkan sıcaklığındaki çok hafif düşüşün neden olduğu çok hafif bir yükselme göze çarpmaktadır. Yani şiddetli akış ayrılmasının olduğu yerler zayıf taşınımla ısı transferi sergilemekte, tersi olarak akış yeniden birleşmesinin olduğu yerler ise kuvvetli taşınımla ısı transferi sergilemektedirler. Şekil 4.226'dan da

görüldüğü gibi ıraksayan geometrilerde (α = 2°, 4° ve 6°), ıraksama açısı arttıkça lokal ısı taşınım katsayısı dağılımı da monoton bir biçimde azalmaktadır. Iraksayan geometrilerde birinci bloğun arka ucundaki ısı taşınım katsayısının arttıktan sonra keskin bir şekilde düşüp yine keskin bir biçimde artması olayı açı arttıkça şiddetini daha da arttırmakta ve yakınsayan geometride rastlamadığımız şekilde aynı yapı ikinci blokta da gözlenmekte, çok az biçimde de üçüncü ve dördüncü blok yüzeyinde de ortaya çıkmaktadır.



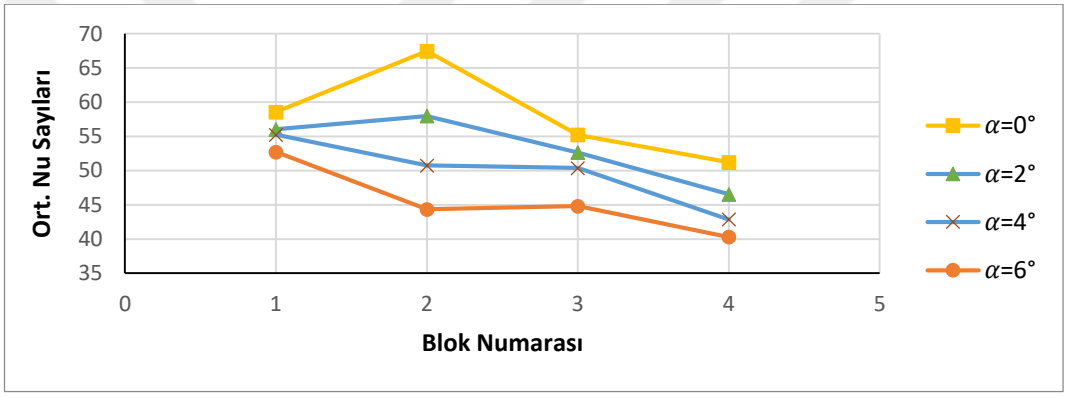
Şekil 4.226. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



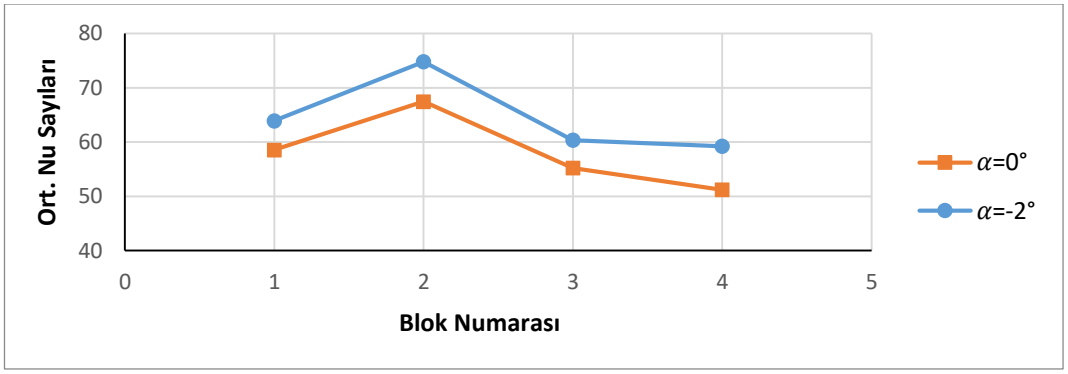
Şekil 4.227. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Şekil 4.228'de ıraksayan geometriler için, Şekil 4.229'da ise yakınsayan geometrinin bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik

ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.228'de ilk göze çarpan nokta baz geometriye göre açının artması durumunda artan ıraksama açısıyla birlikte ortalama Nu sayısının düşmesidir. Baz geometride ve α = 2° için en yüksek Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilirken, α = 4° ve α = 6°'de en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilmektedir. Tüm durumlarda en düşük Nu sayısı son yonga üzerinde elde edilmiştir. Şekil 4.229'da yakınsayan geometri için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Yakınsama açısı baz geometriyle benzer bir eğilim sergilemektedir. En yüksek ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Yakınsayan açı ortalama Nu sayısını artırmıştır. Çizelge 4.23'de tüm açılarda ortalama Nu sayısı verilmiştir buradan da görülebileceği gibi en yüksek ısı transferi (64,57) α=-2°'de elde edilmiştir.



Şekil 4.228. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



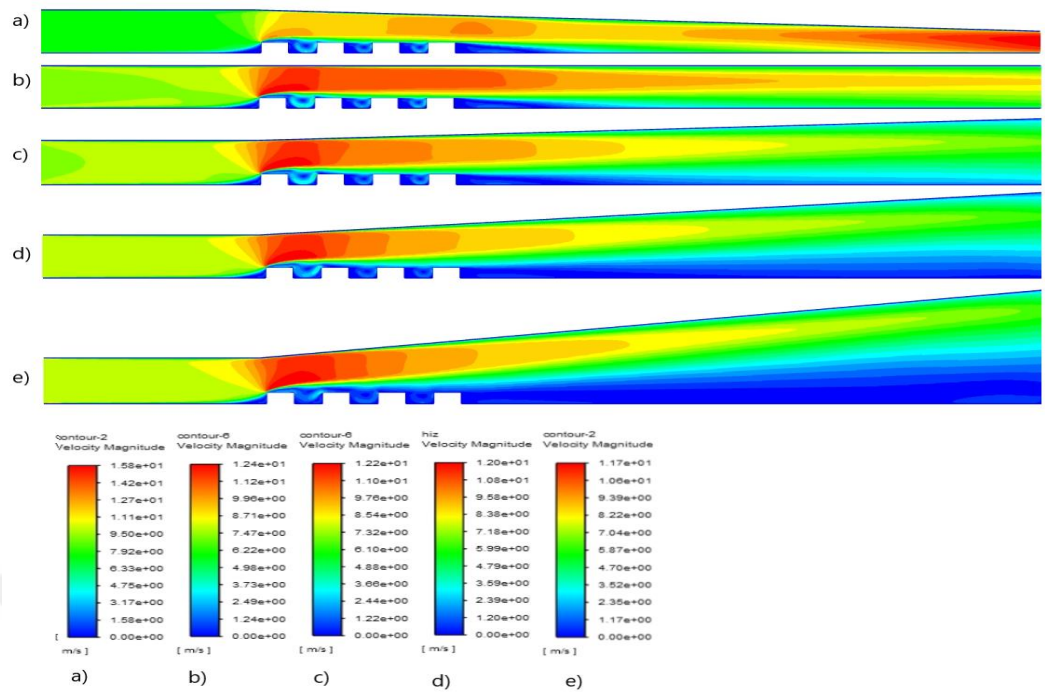
Şekil 4.229. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Çizelge 4.23. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

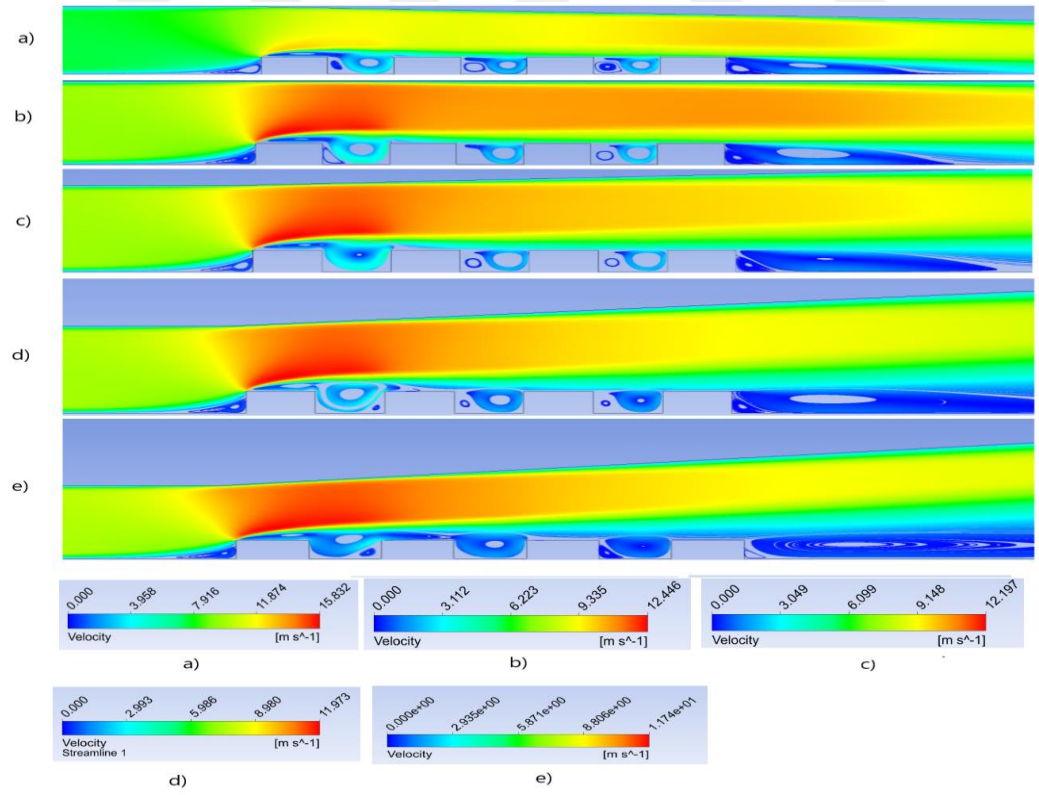
Açı	Ortalama Nusselt Sayısı
α=-2°	64,57
α=2°	53,29
α=4°	49,8
α=6°	45,53

Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

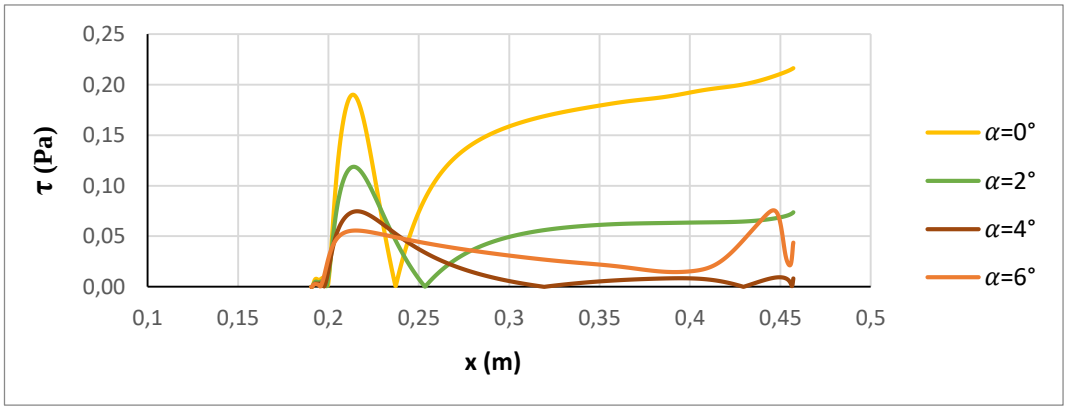
Şekil 4.230 ve 4.231'den de görülebileceği gibi yakınsayan geometri hariç (Şekil 230 a) tüm geometrilerde 1. bloktan sonra kesit daralmasından sonra hız artmakta ve hız artış oranı açı arttıkça azalmaktadır. Bu azalma 2° den sonra yavaşlamaktadır. Şekil 4.230 b' de 0°'de maksimum hız 12,4 m/s olarak akış ilk yongaya çarptıktan sonra 1. yonga üzerinde gözlemlenmiştir. 2°, 4° ve 6°'deki maksimum hızlar sırasıyla 12,2 m/s, 12 m/s ve 11,7 m/s olarak hesaplanmıştır. Yakınsayan geometride ise (α= -2°) maksimum hız kesit daralmasının daha fazla olduğu çıkışta elde edilmiş olup 15,8 m/s değerindedir. Şekil 4.231'den görülebileceği gibi tüm geometrilerde ilk bloktan önce saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Yakınsayan geometri ve baz geometrideki bloklardan sonra saat yönündeki blokların boyu benzerdir. Şekil 4.232'den de görülebileceği gibi açının artması yeniden birleşme uzunluğunu artırmıştır. Şekil 4.233'de ise yakınsayan geometri yeniden birleşme uzunluğunu azaltmıştır (Bkz. Çizelge 4.25). Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Tüm durumlarda son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.232 ve Şekil 4.233'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.25'de verilmiştir.



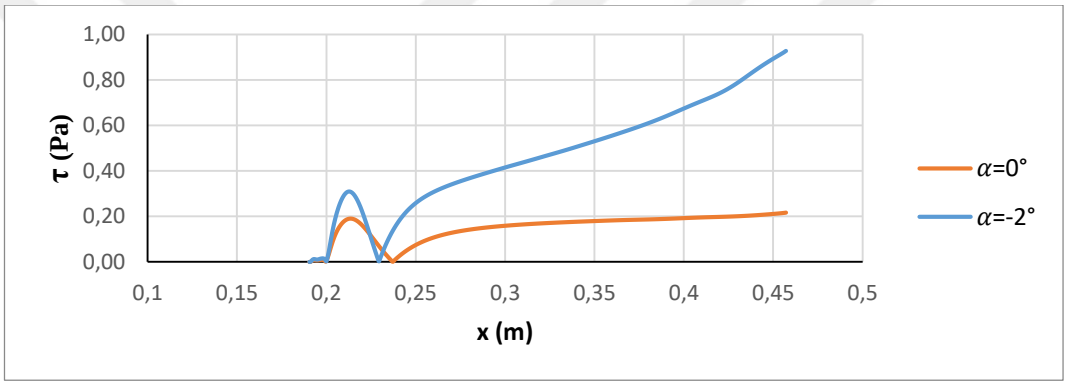
Şekil 4.230. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



Şekil 4.231. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



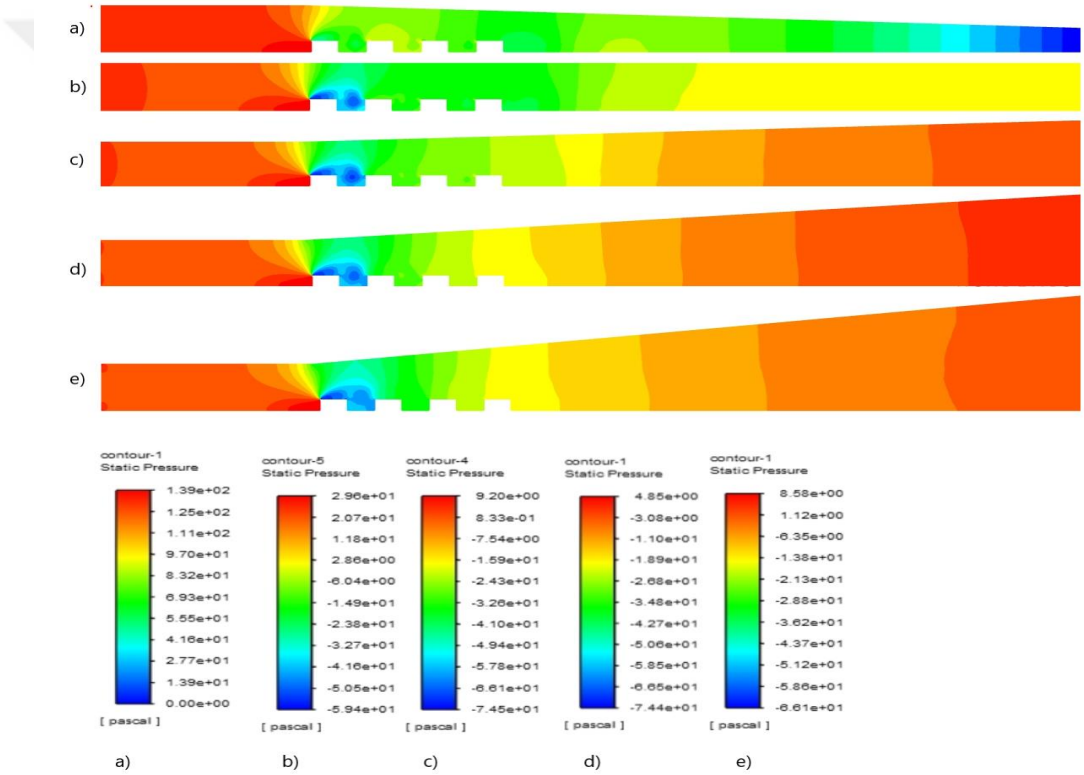
Şekil 4.232. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



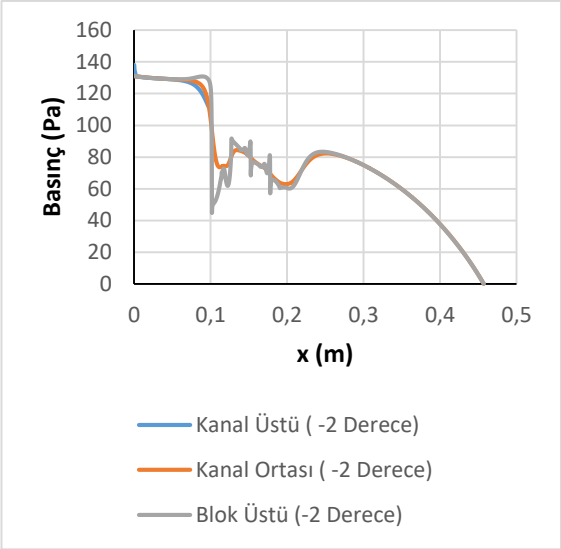
Şekil 4.233. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.234'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.235, 4.236, 4.237 ve 4.238'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar yakınsayan geometri hariç birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Yakınsayan geometride en düşük basınç hızın en yüksek olduğu kanal çıkışında elde edilmiştir. Yakınsayan geometride ise bloklar çevresinde oluşan basınç gradyeni daha homojen olup, ıraksayan geometrilerdeki 1. blokla 2. blok arasında oluşan düşük basınç bölgeleri oluşmamaktadır. Açının artmasıyla Şekil 4.230'dan da görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.230 c için 12,2 m/s, d ve e'de azalarak 12 m/s ve 11,7 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.234 c, d ve e'deki

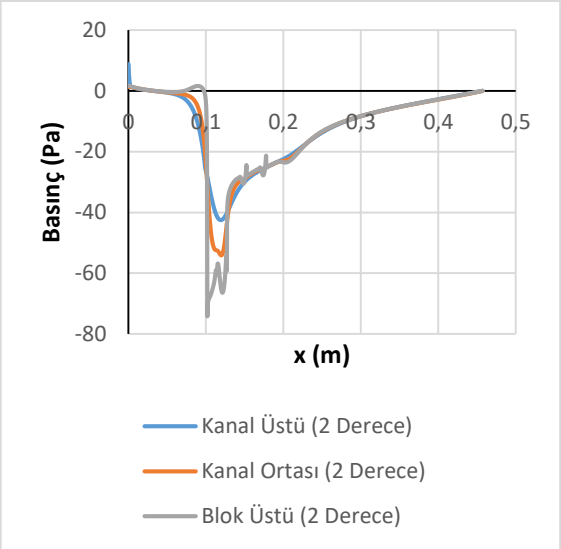
basınçlarda Şekil 4.230 c, d ve e'deki hızlarla hemen hemen aynı oranda değişmiştir. Şekil 4.234 c'deki minimum basınç -74,5 Pa, d ve e'deki basınçlar ise -74,4 Pa ve -66,1 Pa olarak hesaplanmıştır. Açı arttıkça Şekil 4.235, 4.236, 4.237 ve 4.238'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçların da çok fazla bir değişim olmamaktadır. Giriş basınçları, α= 2° için 1,34 , α= 4° Pa için -3,08 Pa ve α= 6° için 0,6 Pa olarak elde edilmiştir. Fakat açı azaldıkça giriş basıncı artmaktadır (α= -2° için 130,91 elde edilmiştir). Baz geometride yani α= 0° de bu değer 1,34 Pa'dır (Bkz. Şekil 4.235, 4.236, 4.237 ve 4.238). Açının azalmasıyla basınçtaki artış kullanılması gereken fan gücünü artırmaktadır.



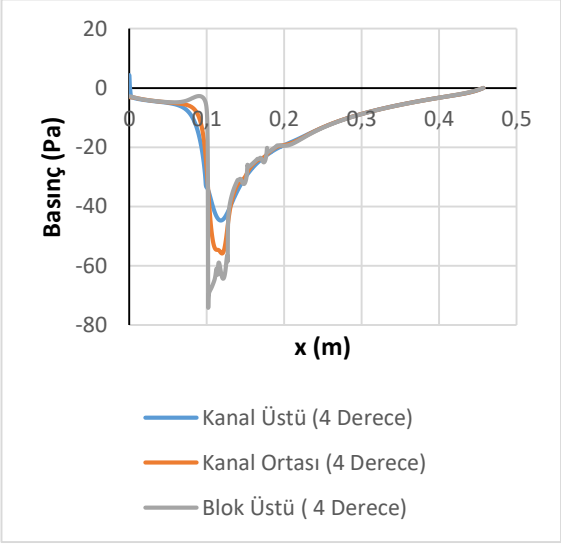
Şekil 4.234. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



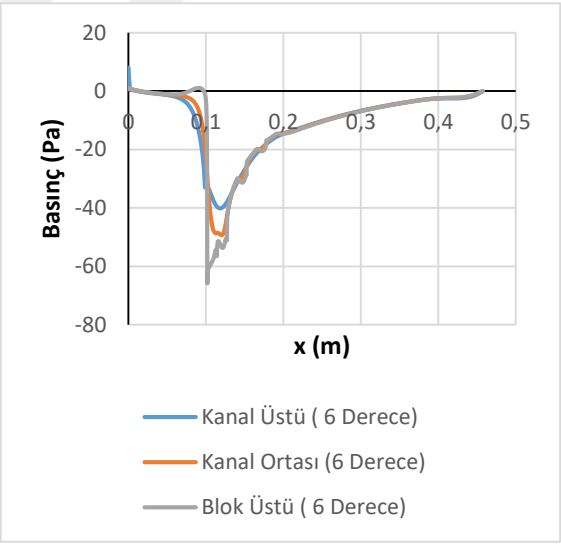
Şekil 4.235. α= -2° için basınç değişimi



Şekil 4.236. α= 2° için basınç değişimi



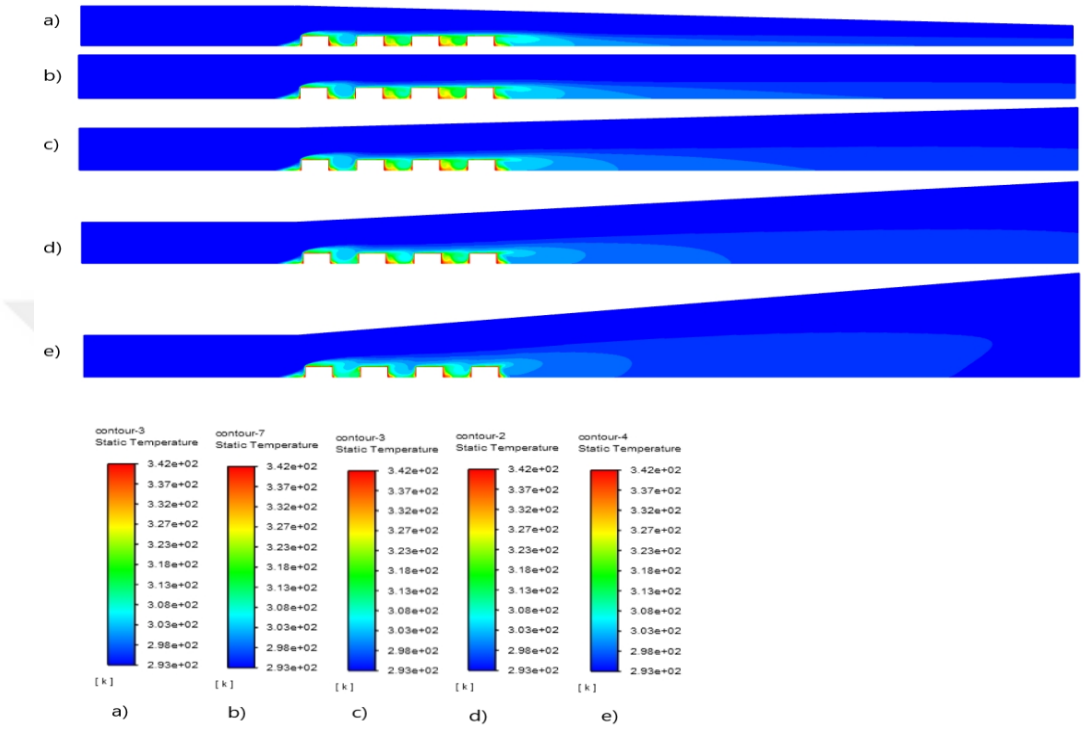
Şekil 4.237. α= 4° için basınç değişimi



Şekil 4.238. α= 6° için basınç değişimi

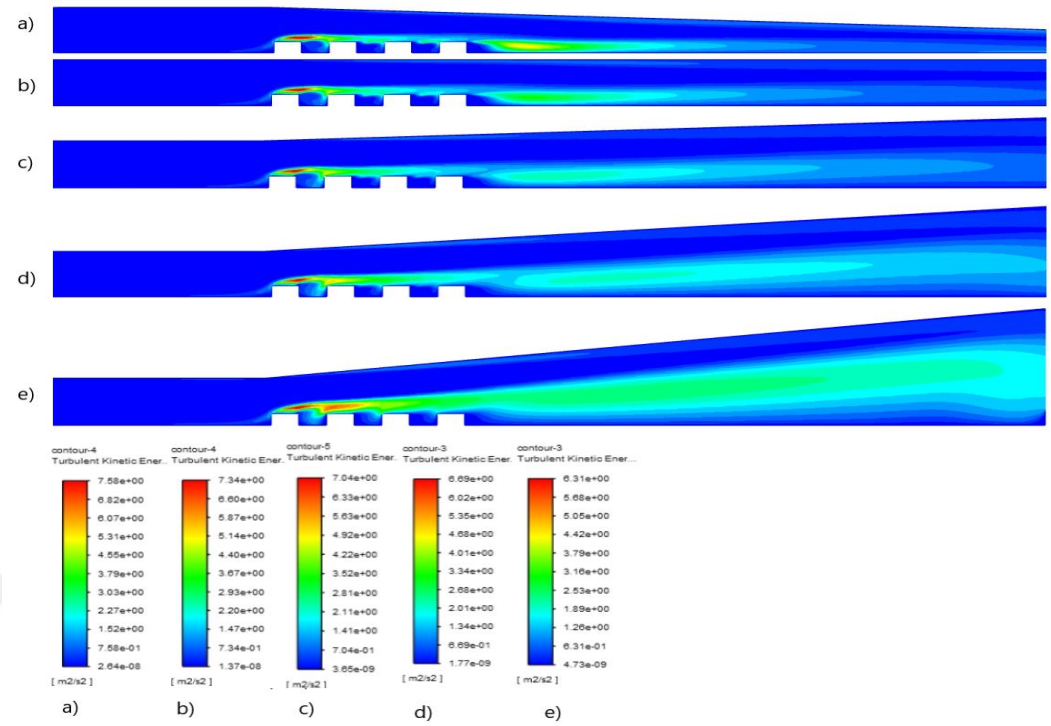
Şekil 4.239'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Ayrıca α=6°'deki sıcaklık etkisi çıkışa

kadar ulaşamamaktadır. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisi daha fazladır. Bu durum giriş havasının birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü yongalardan sonra gelen çukurda etkisinin daha fazla olmasına yorulabilir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı açının artmasıyla azalmaktadır.



Şekil 4.239. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

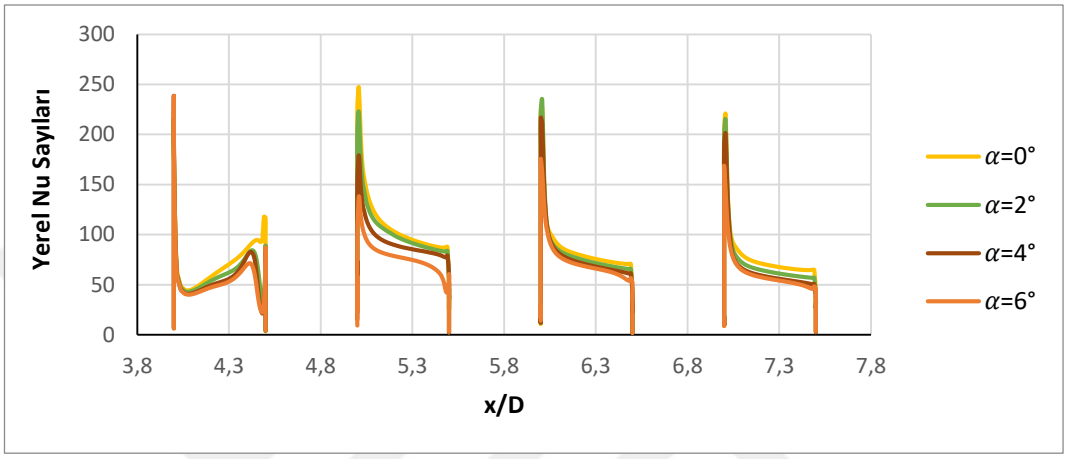
Şekil 4.240'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup açı arttıkça 2. bloğun üstüne doğru yayılmaktadır. Ayrıca blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup açı arttıkça çıkışa ve üst duvara doğru yayılmaktadır.



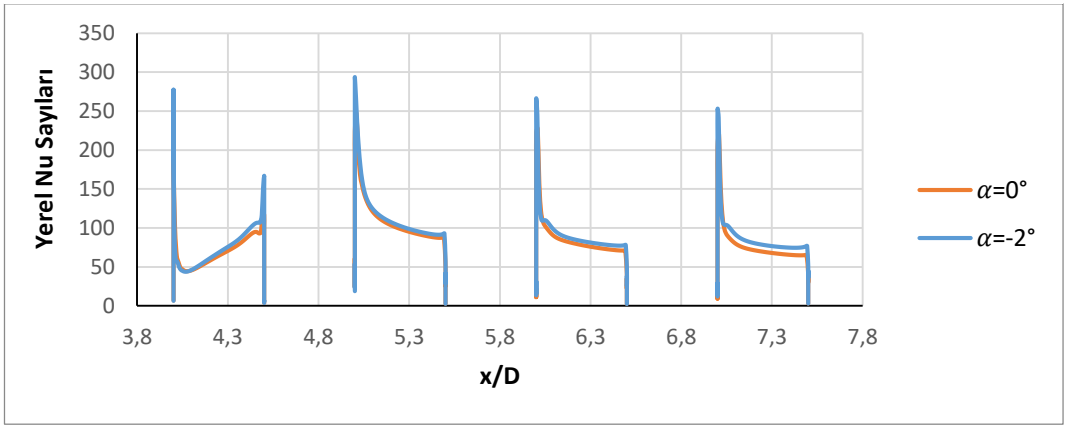
Şekil 4.240. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

Yakınsayan (α = -2°) ve baz (α = 0°) baz geometri için yerel ısı transfer katsayıları Şekil 4.242'de, baz geometri ve ıraksayan (α = 2°, 4° ve 6°) geometriler için de Şekil 4.241'de gösterilmiştir. Şekil 4.241'de bloklar üzerindeki maksimum yerel Nu sayısı ıraksayan geometriler için birinci bloğun ön ucunda elde edilmiştir. Şekil 4.242'de bloklar üzerindeki maksimum yerel Nu sayısı yakınsayan geometri için ikinci blok üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998). Birinci blok üzerinde blok sonuna doğru yakınsayan geometride ısı taşınım katsayısı artmakta, baz geometride de benzer bir eğilim sergilemektedir. İkinci ve üçüncü ve dördüncü blokların üstünde ise yerel ısı taşınım katsayısı dağılımları beklendiği gibi düzlem levha üzerindeki akış durumuna benzemekte, bloklar üzerinde blok sonuna doğru akışkan sıcaklığındaki çok hafif düşüşün neden olduğu çok hafif bir yükselme göze çarpmaktadır. Yani şiddetli akış ayrılmasının olduğu yerler zayıf taşınımla ısı transferi sergilemekte, tersi olarak akış yeniden birleşmesinin olduğu yerler ise kuvvetli taşınımla ısı transferi sergilemektedirler. Şekil 4.241'den de görüldüğü gibi ıraksayan geometrilerde (α = 2°, 4° ve 6°), ıraksama açısı arttıkça lokal ısı

taşınım katsayısı dağılımı da monoton bir biçimde azalmaktadır. Iraksayan geometrilerde birinci bloğun arka ucundaki ısı taşınım katsayısının arttıktan sonra keskin bir şekilde düşüp yine keskin bir biçimde artması olayı açı arttıkça şiddetini daha da arttırmakta ve yakınsayan geometride rastlamadığımız şekilde aynı yapı ikinci blokta da gözlenmekte, çok az biçimde de üçüncü ve dördüncü blok yüzeyinde de ortaya çıkmaktadır.



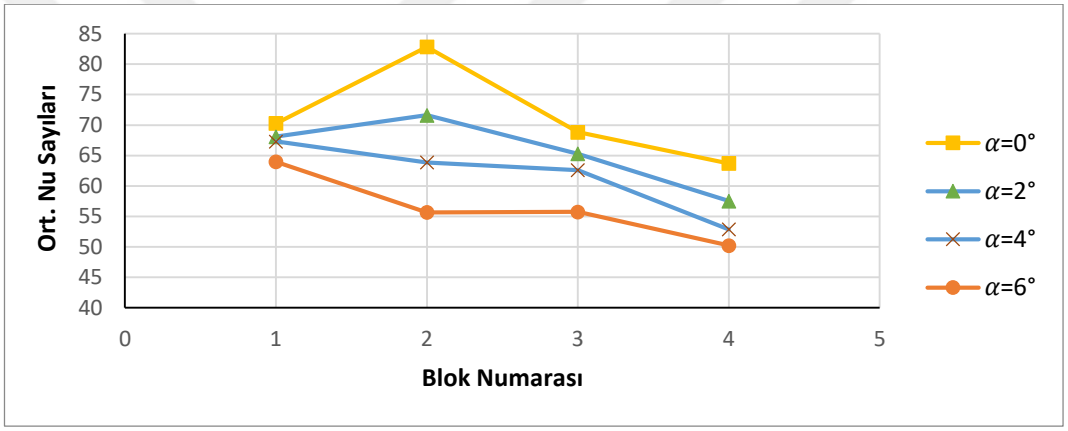
Şekil 4.241. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



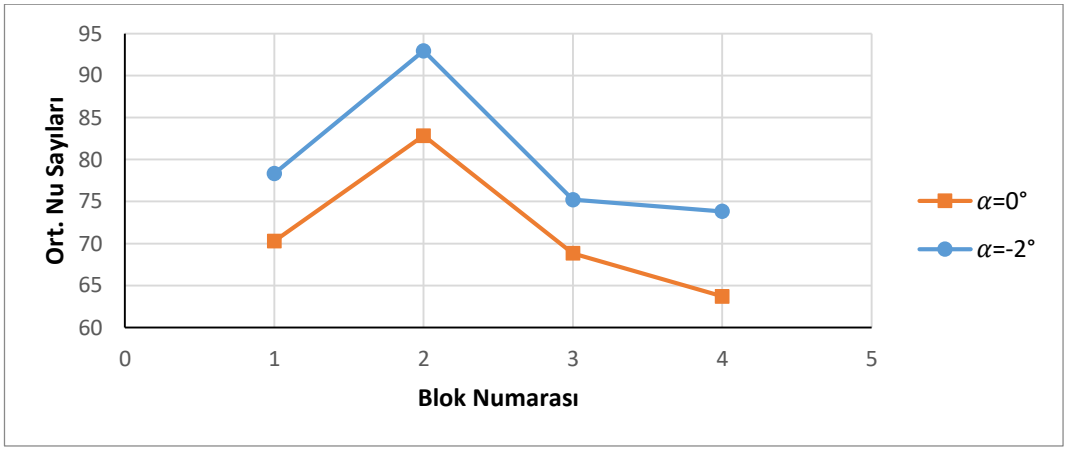
Şekil 4.242. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Şekil 4.243'de ıraksayan geometriler için, Şekil 4.244'de ise yakınsayan geometrinin bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik

ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.243'de ilk göze çarpan nokta baz geometriye göre açının artması durumunda artan ıraksama açısıyla birlikte ortalama Nu sayısının düşmesidir. Baz geometride ve α = 2° için en yüksek Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilirken, α = 4° ve α = 6°'de en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilmektedir. Tüm durumlarda en düşük Nu sayısı son yonga üzerinde elde edilmiştir. Şekil 4.244'de yakınsayan geometri için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Yakınsama açısı baz geometriyle benzer bir eğilim sergilemektedir. En yüksek ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Yakınsayan açı ortalama Nu sayısını artırmıştır. Çizelge 4.24'de tüm açılarda ortalama Nu sayısı verilmiştir buradan da görülebileceği gibi en yüksek ısı transferi (80,07) α =-2°'de elde edilmiştir.



Şekil 4.243. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



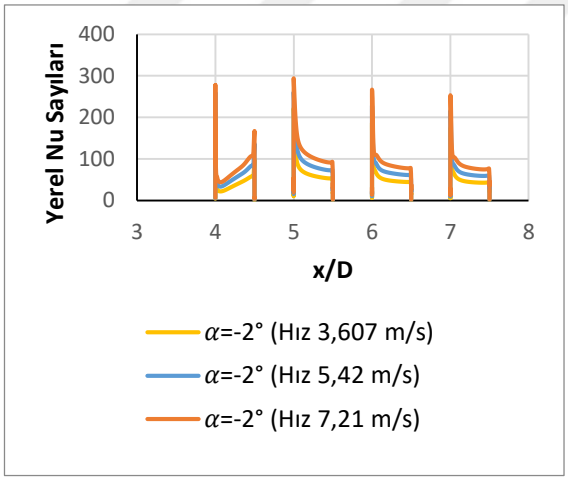
Şekil 4.244. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Çizelge 4.24. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

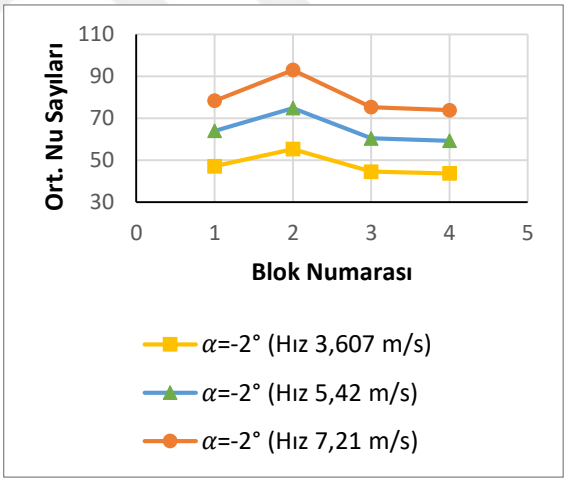
Açı	Ortalama Nusselt Sayısı
α=-2°	80,07
α=2°	65,62
α=4°	61,66
α=6°	56,4

Basınç gradyeninin farklı hızlarda karşılaştırılması;

α = -2° için hızın artırılması Şekil 4.245 ve Şekil 4.246'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.

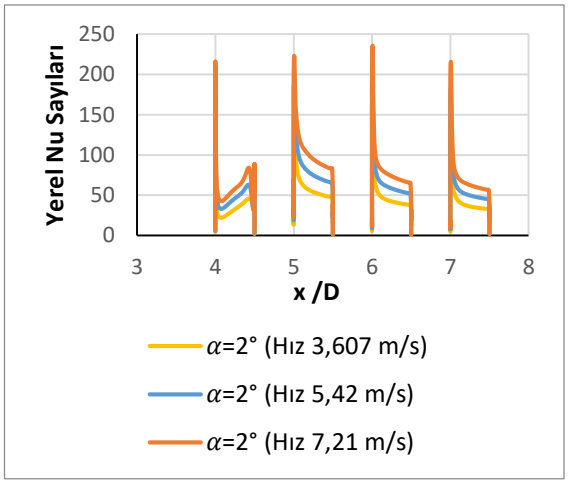


Şekil 4.245. α=-2° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

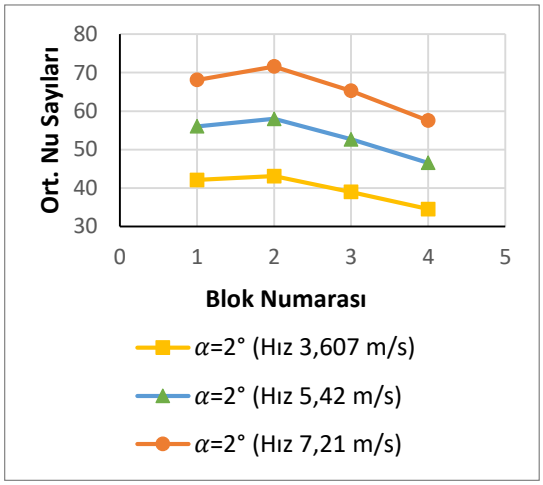


Şekil 4.246. α=-2° için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları

α = 2° için hızın artırılması Şekil 4.247 ve Şekil 4.248'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel Nu sayısı 3. yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.

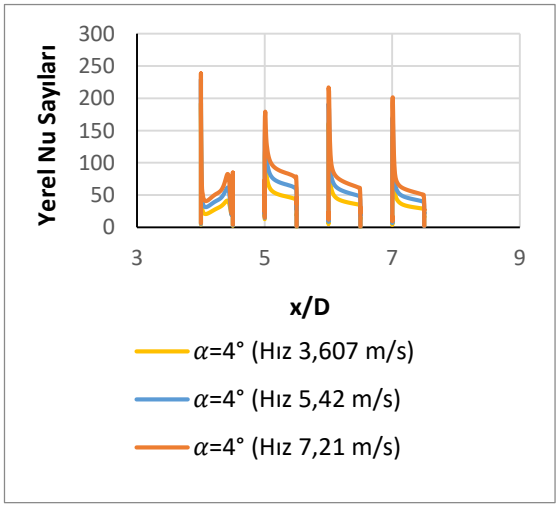


Şekil 4.247. α=2° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

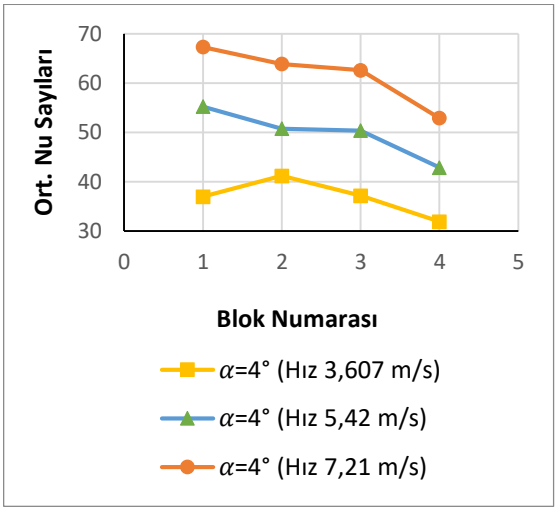


Şekil 4.248. α= 2° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

α = 4° için hızın artırılması Şekil 4.249 ve Şekil 4.250'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Hız 3,607 m/s hariç diğer hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken 3,607 m/s için ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük ortalama Nu sayısı son yonga üzerinde elde edilmiştir.

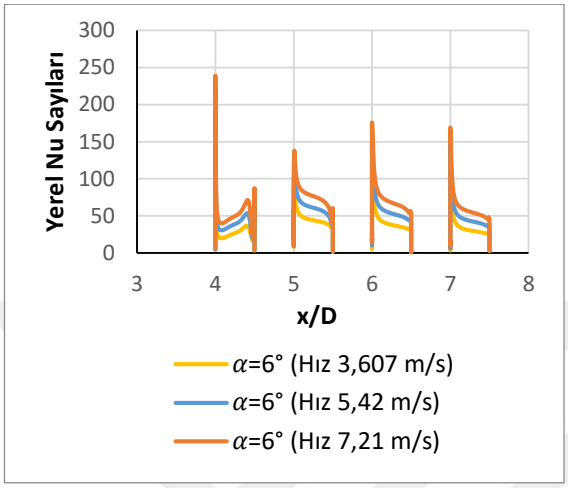


Şekil 4.249. α=4° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

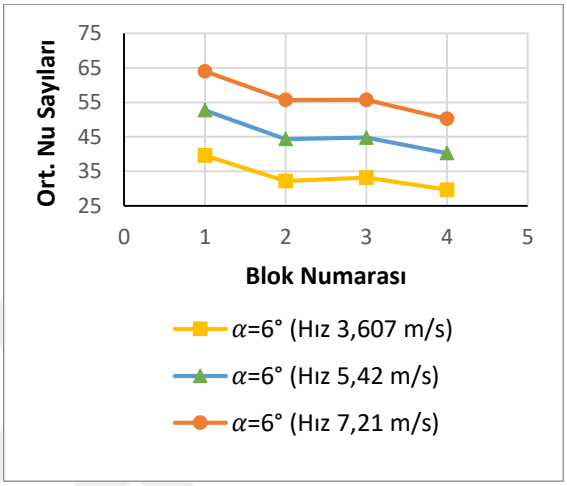


Şekil 4.250. α= 4° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

α = 6° için hızın artırılması (Re sayısının arttırılması) Şekil 4.251 ve Şekil 4.252'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda ortalama en düşük Nu sayısı son yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.251. α=6° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları



Şekil 4.252. α= 6° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Yapılan 12 adet analizle basınç gradyeninin ısı transferine etkisi incelendiğinde; Çizelge 4.22, 4.23 ve 4.24 incelendiğinde en yüksek ortalama Nu sayısı Re=11993 (Hız 7,21m/s) de ve α= -2° değerinde 80,07 olarak tespit edilmiştir. Gürses ve Pulat (2021), yaptığı çalışmalarında yakınsayan açı durumunda ısı transferinin arttığını, ıraksayan açı durumunda ise ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir (Açılar -2°, 0, 2°, 4° ve 6 ° olarak alınmıştır.).

Çizelge 4.25'den görüldüğü gibi, tüm hızlarda ıraksayan açılarda açının artması yeniden birleşme uzunluklarını artırmıştır. Tüm hızlarda yakınsayan açıda ise yeniden birleşme uzunluğu azalmıştır. Re sayısının artmasıyla yeniden birleşme uzunluklarında çok az bir miktar değişim olmaktadır. Driver ve Seegmiller (1985), yaptıkları çalışmada ıraksayan açılarda açıyı artırmanın yeniden birleşme uzunluğunu artırdığını gözlemlemişlerdir. Ateş (2015), çalışmasında pozitif yönde açının arttırılmasının yeniden birleşme uzunluğunu arttırdığını tespit etmiştir.

Çizelge 4.25. Farklı açılarda farklı hızların yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

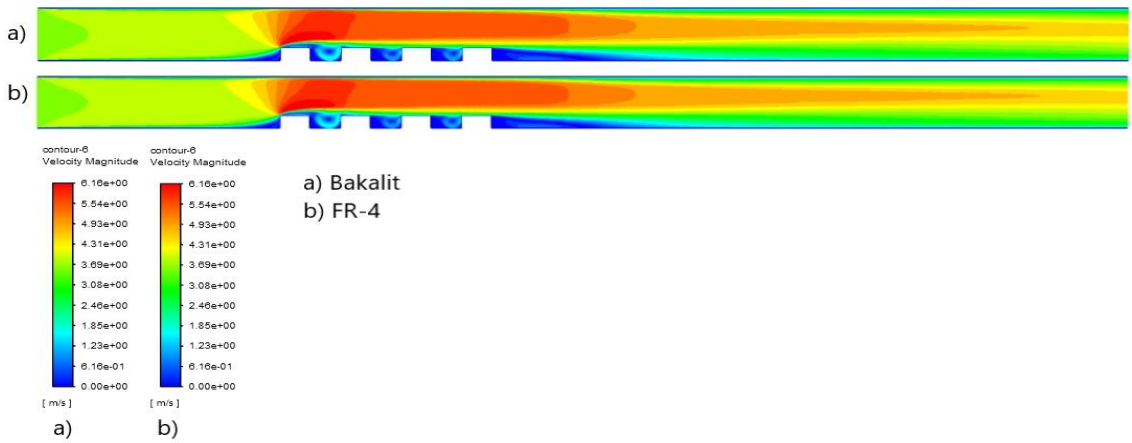
Hız (m/s)	Basınç Gradyeni (Derece)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	α=-2°	0,009477	0,039591
	α=0°	0,008961	0,047579
	α=2°	0,008136	0,065365
	α=4°	0,006883	0,140766
	α=6°	0,005422	0,196318
5,42	α=-2°	0,009477	0,039135
	α=0°	0,009175	0,047153
	α=2°	0,008345	0,063903
	α=4°	0,006675	0,134918
	α=6°	0,005213	0,200286
7,21	α=-2°	0,009477	0,038907
	α=0°	0,009175	0,046726
	α=2°	0,008554	0,062859
	α=4°	0,007092	0,128443
	α=6°	0,005004	0,202375

4.1.7. 2 boyutlu geometride baskı devre kartı malzemesinin etkisinin incelenmesi (Eşlenik ısı transferi)

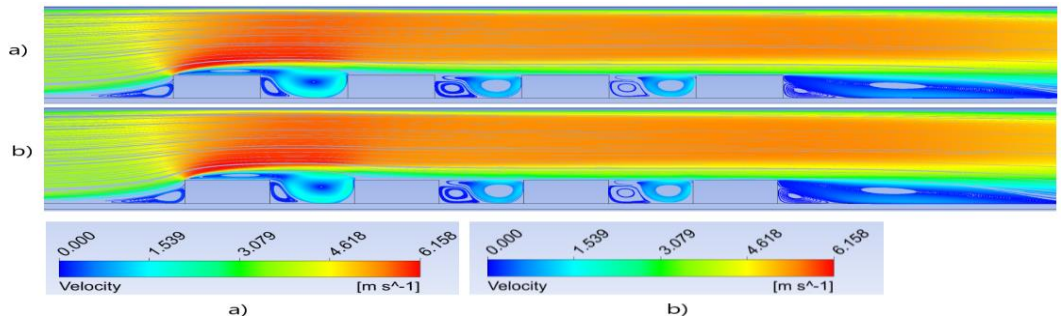
Daha önce bahsedildiği gibi eşlenik ısı transferinde elektronik yongadan olan ısı transferinin bir kısmı taşınımla ve bir kısmı da iletimle olmaktadır. Bu kısımda baskı devre kartının ısı transferinin iletimle olan kısmının, taşınım üzerine etkisi araştırılmıştır. Çünkü eşlenik durumda yongada üretilen ısı transferinin tamamı ısı taşınımına değil bir kısmı baskı devre kartından olan iletime gidecektir. Çalışmada literatürde en çok kullanılan malzemeler olan FR-4 ve bakalit alınmıştır (Durgam vd., 2017). Baskı devre kartının kalınlığı 1,5 mm alınarak analizler yapılmıştır. Tüm eşlenik ısı transferi analizlerinde blokların malzemesi silikon alınmıştır.

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.253 ve 4.254 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 6,16 m/s olarak belirlenmiştir. Şekil 4.254'den görüleceği üzere yeniden birleşme uzunluklarında da pek bir değişim olmamaktadır.

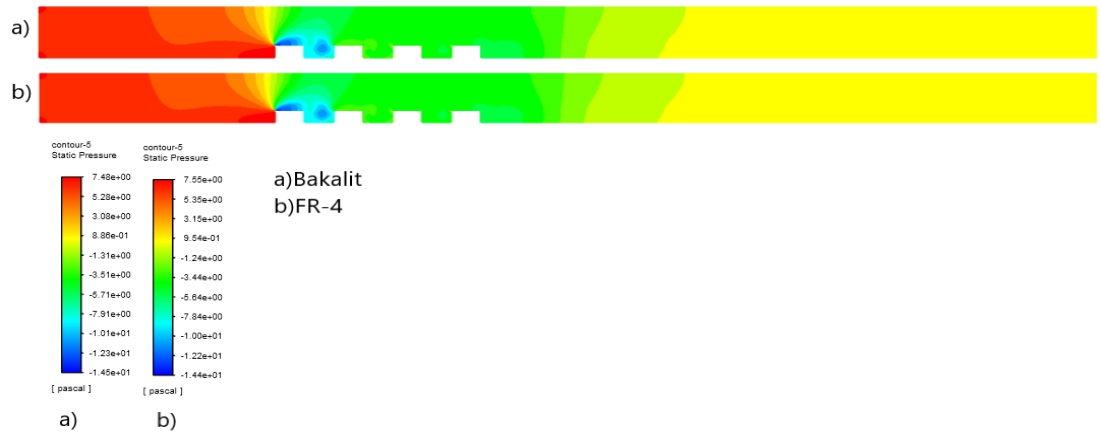


Şekil 4.253. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

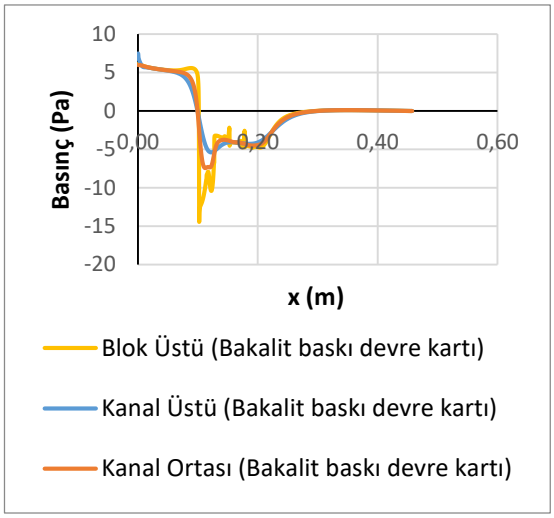


Şekil 4.254. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

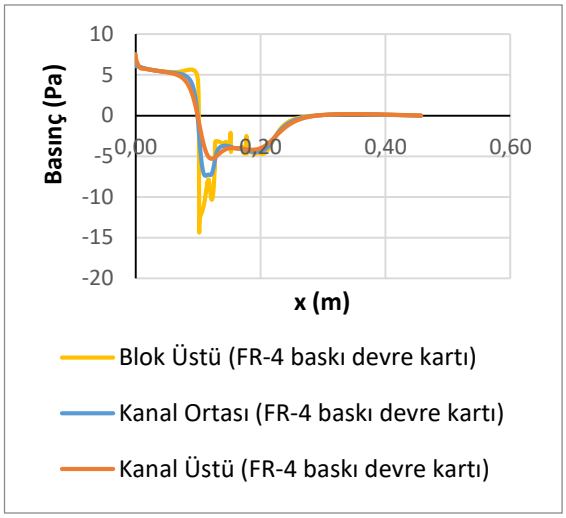
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.255'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.256 ve 4.257'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzeme durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Malzeme değiştiğinde Şekil 4.253'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.253, a ve b için 6,16 m/olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.255 a ve b'de basınçlar da hemen hemen aynı kalmaktadır. (Şekil 4.255 a'daki minimum basınç -14,5 Pa b ve c'deki minimum basınç ise -14,4 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.256 ve 4.257'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit baskı devre kartı için 6 Pa ve FR-4 baskı devre kartı için 6,07 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.255. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

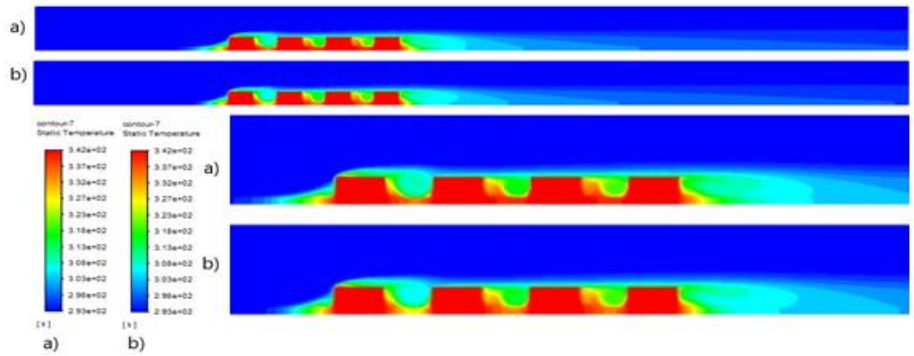


Şekil 4.256. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi



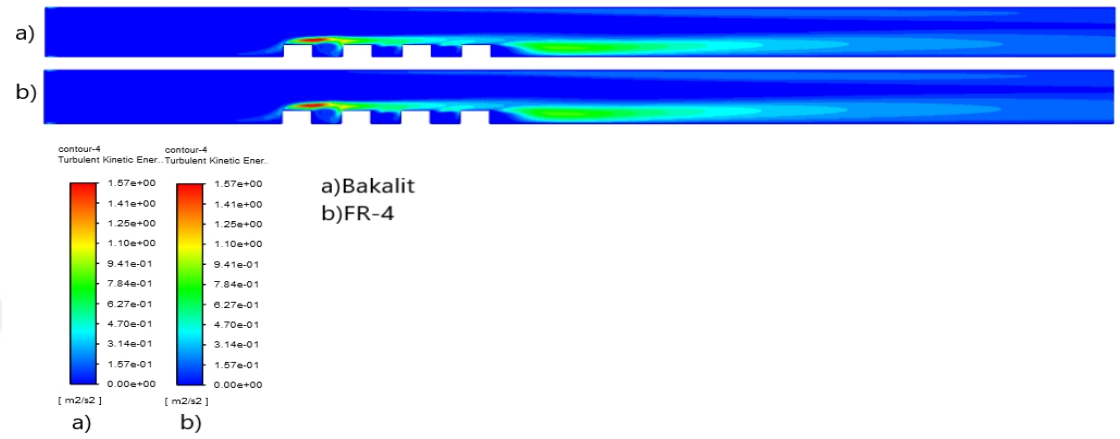
Şekil 4.257. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi

Şekil 4.258'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklar üzerinde elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



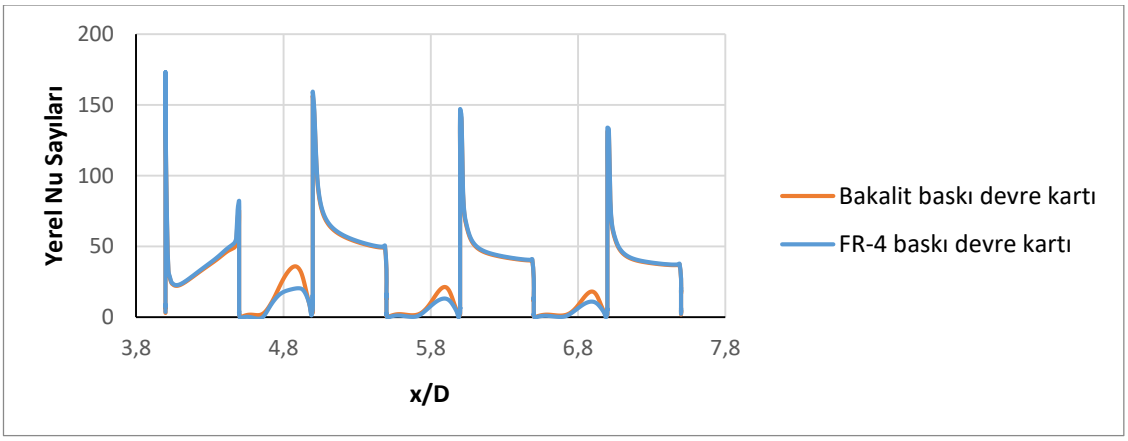
Şekil 4.258. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür) a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.259'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup malzeme cinsi değiştikçe konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa doğru yayılmaktadır.



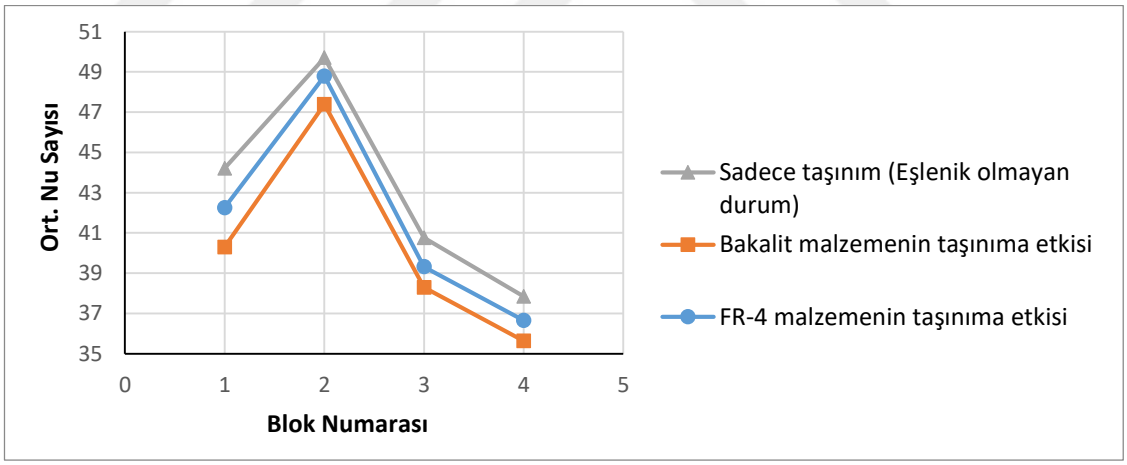
Şekil 4.259. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.260'da farklı baskı devre kartı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme içinde birinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük Nu sayısı ise en son yonga üzerindedir. Bu durum birinci blokta ısınan havanın bloklarda ilerledikçe etkisini azaltmasına yorulabilir.



Şekil 4.260. Re=6000 (3,607 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları

Şekil 4.261'de baskı devre kartında kullanılan her iki malzeme ve sadece taşınımla ısı transferi durumları için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.261'de ilk göze çarpan nokta baskı devre kartının olması durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 c) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde elde edilirken, her üç durumda da en düşük değer son yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.26'da dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.26'dan da görülebileceği gibi baskı devre kartından iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferi düşmüştür. Çünkü toplam ısı transferinin bir kısmı iletime gitmiştir. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme kullanılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme kullanılması durumuna göre bir miktar daha fazladır.



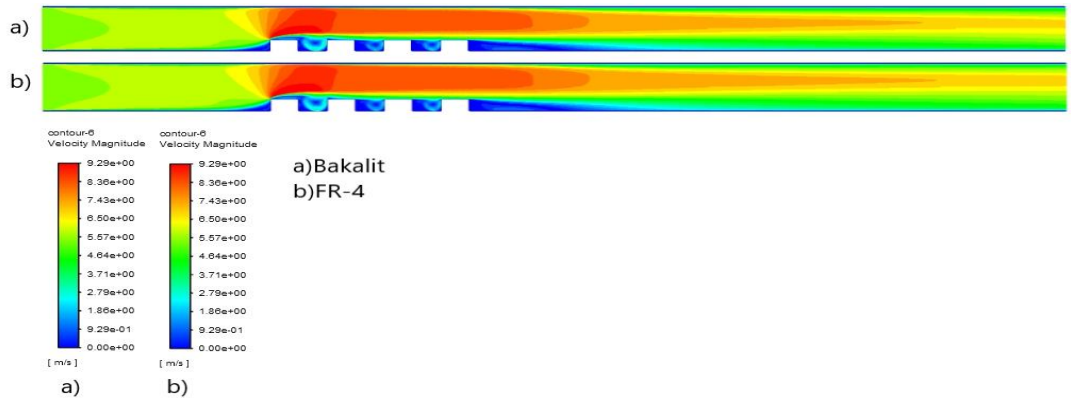
Şekil 4.261. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

Çizelge 4.26. Re=6000 (3,607 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlarda tüm yongaların ortalama Nu sayıları

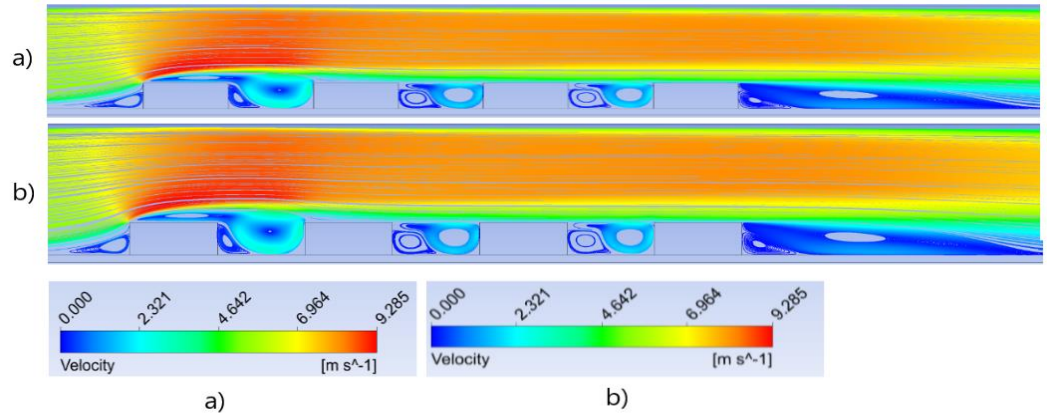
İncelenen Durumlar	Ortalama Nusselt Sayısı
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	43,12
FR-4 baskı devre kartı (Eşlenik durum)	41,75
Bakalit baskı devre kartı (Eşlenik durum)	40,4

Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.262 ve 4.263 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 9,29 m/s olarak belirlenmiştir. Şekil 4.263'den görüleceği üzere yeniden birleşme uzunluklarında da pek bir değişim olmamaktadır.



Şekil 4.262. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

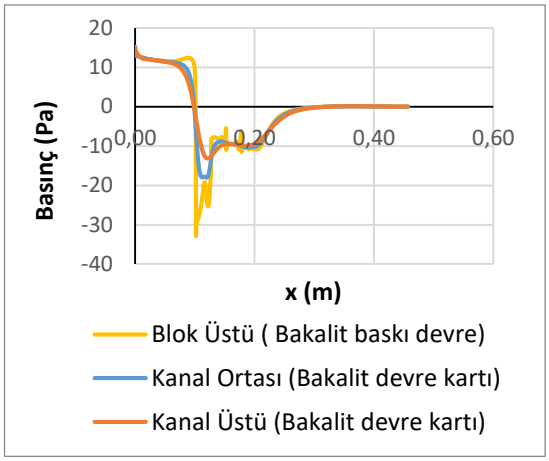


Şekil 4.263. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

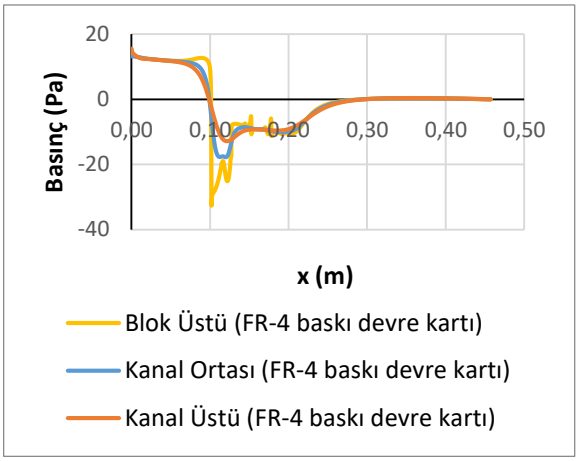
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.264'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.265 ve 4.266'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzeme ile durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Malzeme değiştiğinde Şekil 4.262'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.262, a ve b için 9,29 m/s olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.264 a ve b'deki minimum basınçlar da hemen hemen aynı kalmaktadır. (Şekil 4.264 a'daki minimum basınç -33 Pa b ve c'deki minimum basınç ise -32,7 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.265 ve 4.266'dan da görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit baskı devre kartı için 12,88 Pa ve FR-4 baskı devre kartı için 13,2 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.264. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

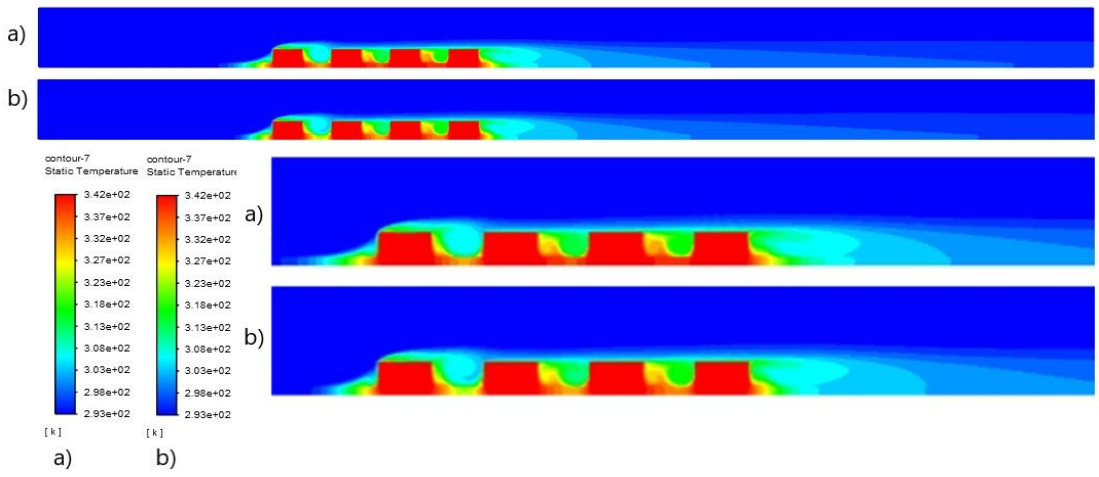


Şekil 4.265. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi



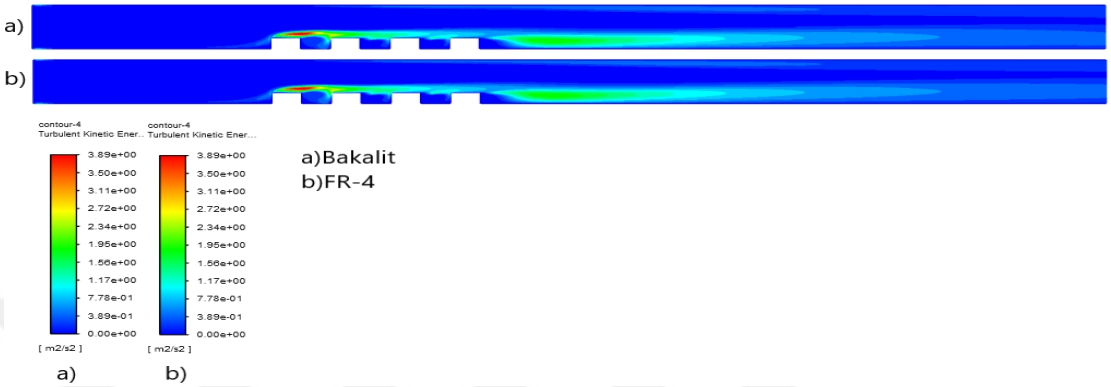
Şekil 4.266. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi

Şekil 4.267'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklar üzerinde elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



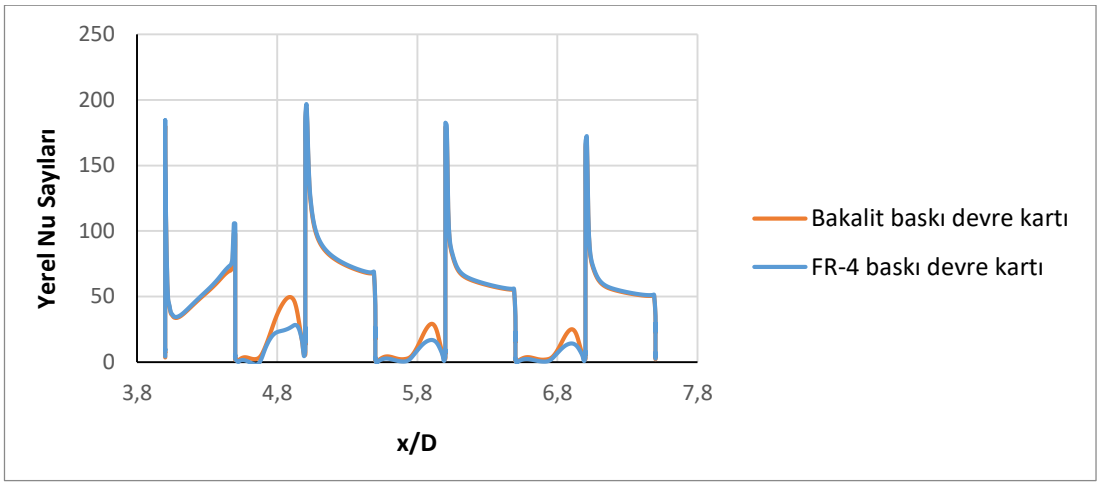
Şekil 4.267. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür)a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.268'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup malzeme cinsi değiştikçe konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



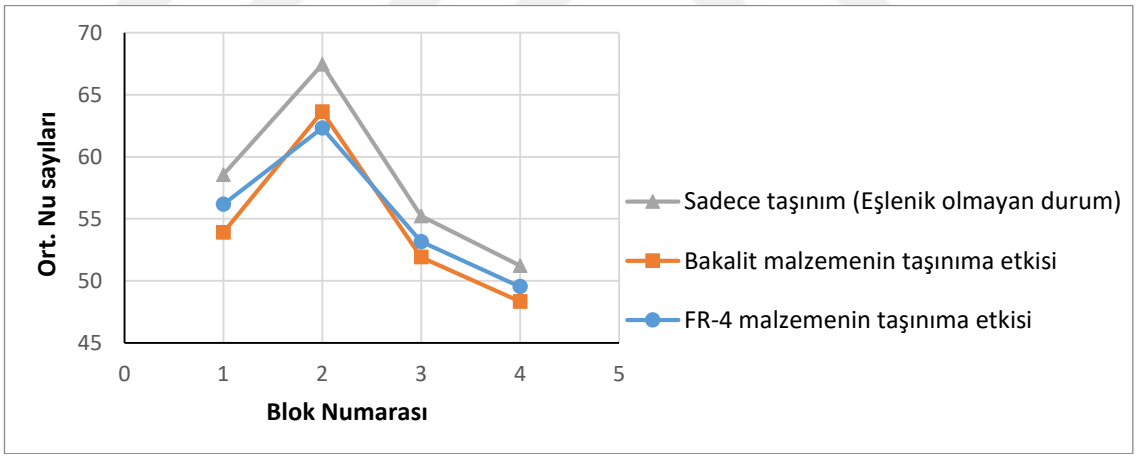
Şekil 4.268. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.269'da farklı baskı devre kartı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme içinde ikinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük Nu değeri ise en son yonga üzerindedir. Bu durum birinci blokta ısınan havanın bloklarda ilerledikçe etkisini azaltmasına yorulabilir.



Şekil 4.269. Re=9015 (5,42 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları

Şekil 4.270'de baskı devre kartında kullanılan her iki malzeme ve sadece taşınımla ısı transferi durumları için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.270'de ilk göze çarpan nokta baskı devre kartının olması durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 c) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ısı transferinin azalmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilirken, her üç durumda da en düşük değer son yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.27'de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayıları bulunmuştur. Çizelge 4.27'den de görülebileceği gibi baskı devre kartından iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferi düşmüştür. Çünkü toplam ısı transferinin bir kısmı iletime gitmiştir. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme kullanılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme kullanılması durumuna göre bir miktar daha fazladır.



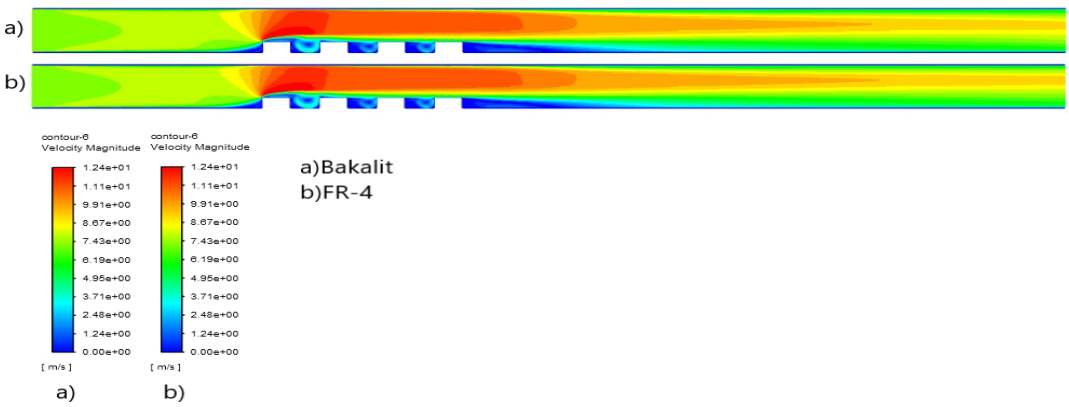
Şekil 4.270. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

Çizelge 4.27. Re=9015 (5,42 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlarda tüm blokların ortalama Nusselt sayıları

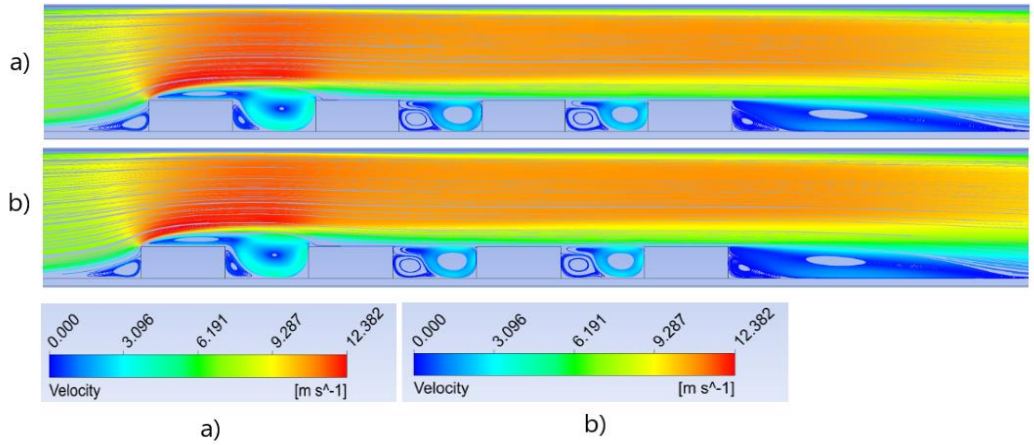
İncelenen Durumlar	Ortalama Nusselt Sayısı
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	58,1
FR-4 baskı devre kartı (Eşlenik durum)	55,29
Bakalit baskı devre kartı (Eşlenik durum)	54,43

Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.271 ve 4.272 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 12,4 m/s olarak belirlenmiştir. Şekil 4.272'den görüleceği üzere yeniden birleşme uzunluklarında da pek bir değişim olmamaktadır.

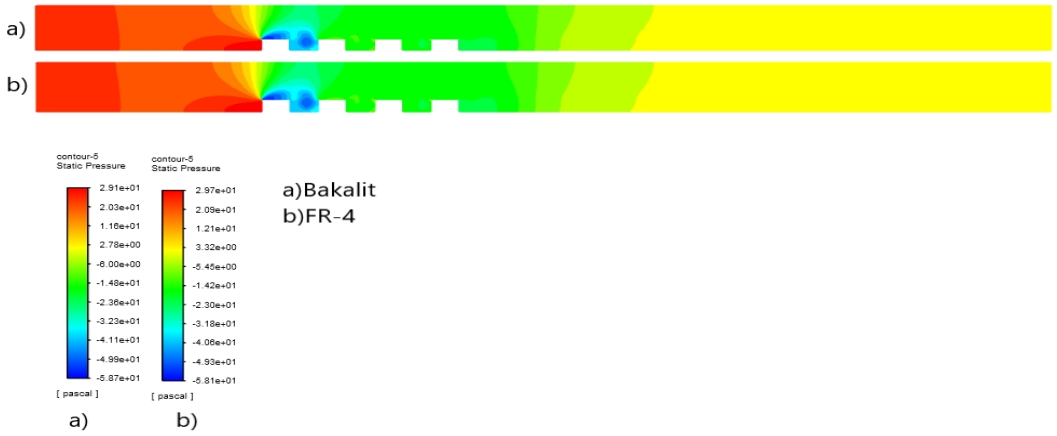


Şekil 4.271. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

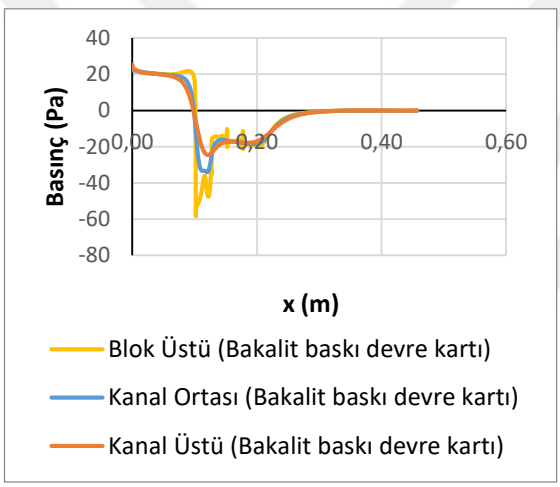


Şekil 4.272. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

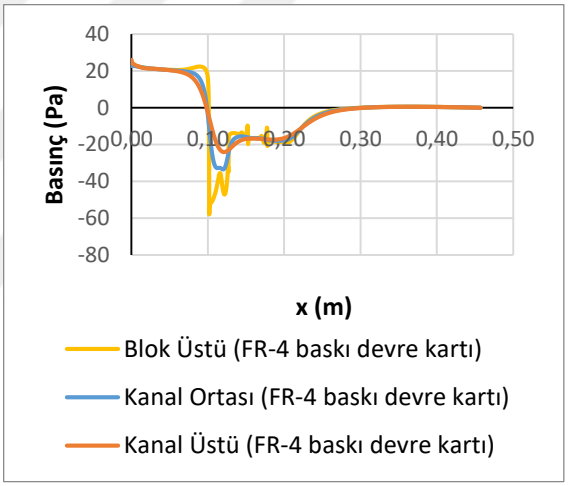
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.273'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.274 ve 4.275'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzeme ile kaplama durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Düşük basınç etkisi birinci bloktan sonraki yongada da görülmektedir. Malzeme değiştiğinde Şekil 4.271'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.271, a ve b için 12,4 m/s olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.273 a ve b'deki minimum basınçlar da hemen hemen aynı kalmaktadır (Şekil 4.273 a'daki minimum basınç -58,7 Pa b ve c'deki minimum basınç ise -58,1 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.274 ve 4.275'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit baskı devre kartı için 12,88 Pa ve FR-4 baskı devre kartı için 13,2 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.273. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

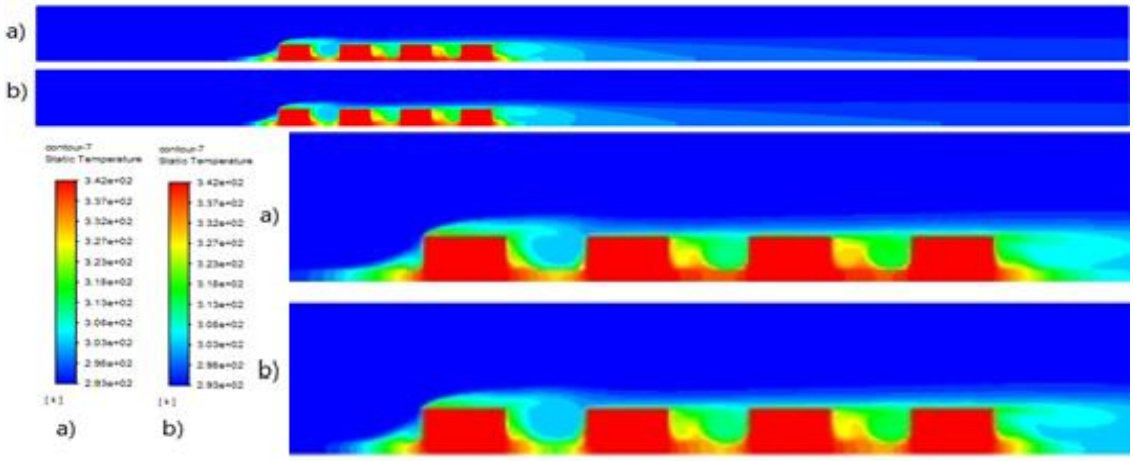


Şekil 4.274. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi



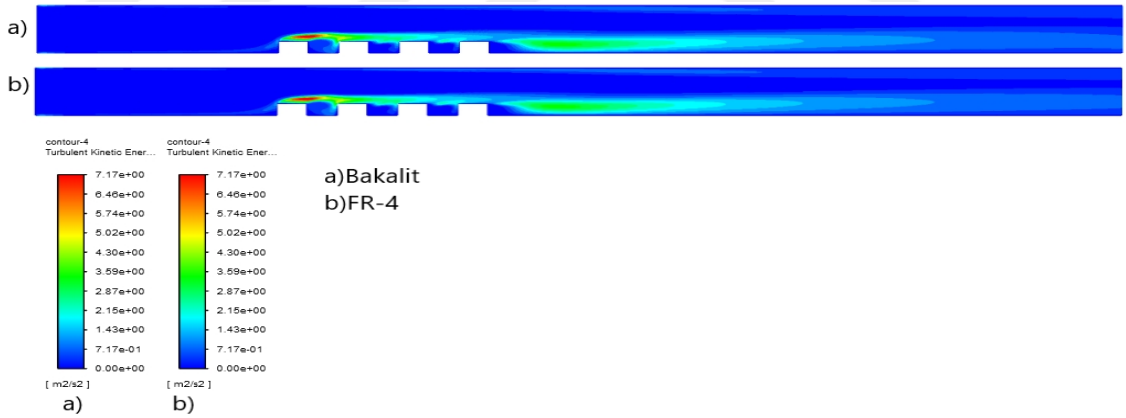
Şekil 4.275. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi

Şekil 4.276'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklar üzerinde elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



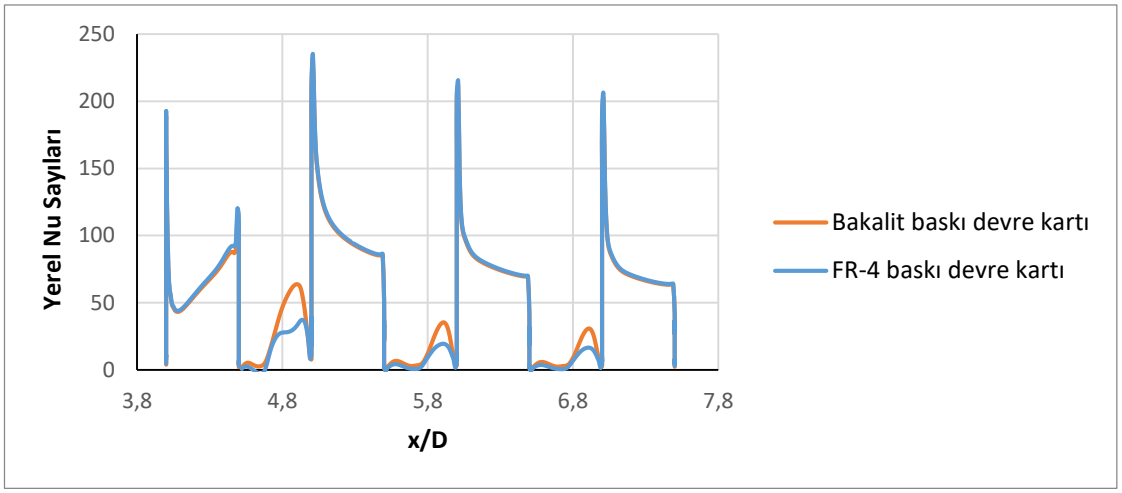
Şekil 4.276. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür) a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.277'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup malzeme cinsi değiştikçe konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



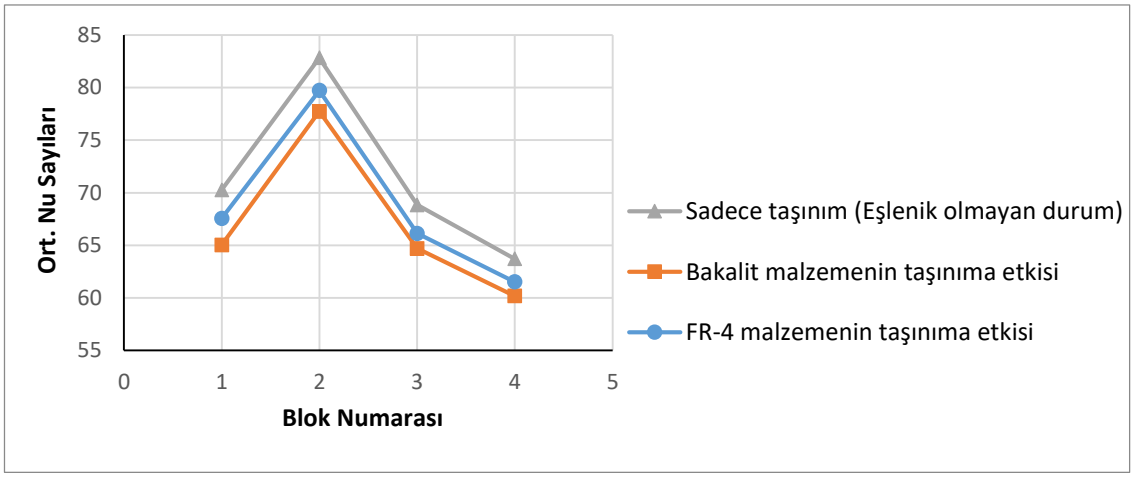
Şekil 4.277. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.278'de farklı baskı devre kartı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme içinde ikinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük Nu sayısı ise en son yonga üzerindedir. Bu durum birinci blokta ısınan havanın bloklarda ilerledikçe etkisini azaltmasına yorulabilir.



Şekil 4.278. Re=11993 (7,21 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları

Şekil 4.279'da baskı devre kartında kullanılan her iki malzeme ve sadece taşınımla olan ısı transferi durumları için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.279'da ilk göze çarpan nokta baskı devre kartının olması durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 c) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde elde edilirken, her üç durumda da en düşük değer son yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.28'de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.28'den de görülebileceği gibi baskı devre kartından iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferi düşmüştür. Çünkü toplam ısı transferinin bir kısmı iletime gitmiştir. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme kullanılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı daha yüksek olan bakalit malzeme kullanılması durumuna göre bir miktar daha fazladır.



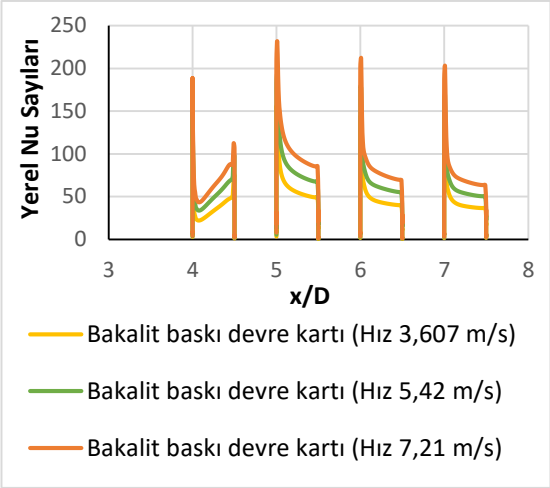
Şekil 4.279. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

Çizelge 4.28. Re=11993 (7,21 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlarda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

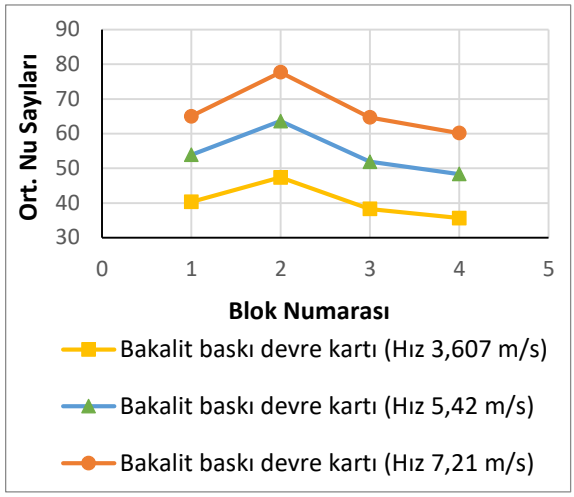
İncelenen Durumlar	Ortalama Nusselt Sayısı
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	71,41
FR-4 baskı devre kartı (Eşlenik durum)	68,74
Bakalit baskı devre kartı (Eşlenik durum)	66,91

Malzeme cinsinin farklı hızlarda karşılaştırılması;

Baskı devre kartında bakalit malzeme kullanılması durumunda hızın artırılması Şekil 4.280 ve Şekil 4.281'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.

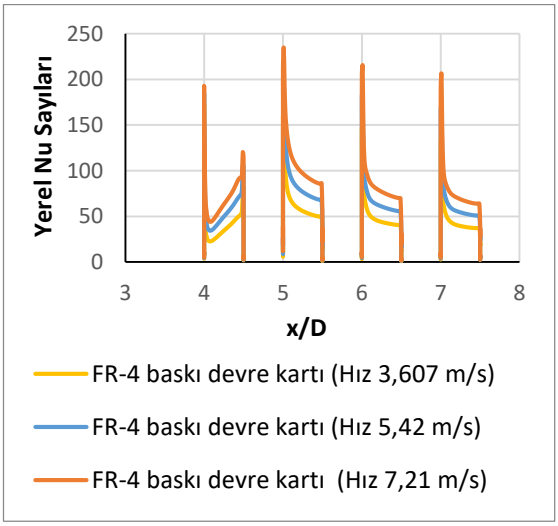


Şekil 4.280. Bakalit baskı devre kartı için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

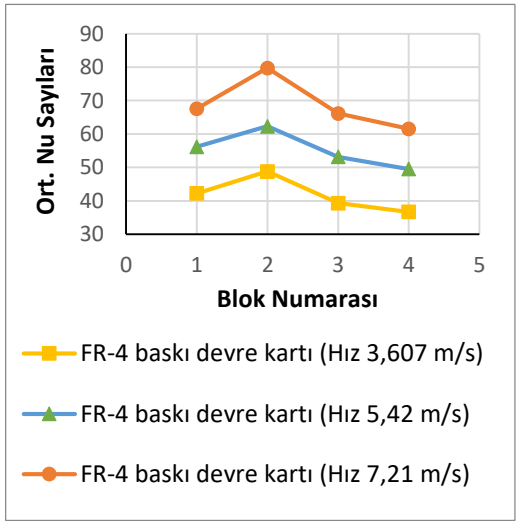


Şekil 4.281. Bakalit baskı devre kartı için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

Baskı devre kartında FR-4 malzeme kullanılması durumunda hızın arttırılması (Re sayısının arttırılması) Şekil 4.282 ve Şekil 4.283'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayılarını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayıları ikinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.282. FR-4 baskı devre kartı için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları



Şekil 4.283. FR-4 baskı devre kartı için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları

Yapılan 6 adet analiz ile farklı malzemelerin taşınıma olan etkisi incelendiğinde taşınımla olan en yüksek ısı transferinin Re=11993 (7,21 m/s)'de FR-4 malzemesinde elde edildiği görülmüştür. Pulat (2000), yaptığı çalışmasında kaplanan malzemenin ısı iletim katsayısı arttıkça lokal ısı taşınım katsayısının azaldığını gözlemlemiştir. Durgam ve diğerleri (2017), yaptıkları çalışmalarında FR-4 malzeme ile kaplama durumunda doğal taşınımın bakalit ile kaplamaya göre daha fazla olduğunu vurgulamışlardır.

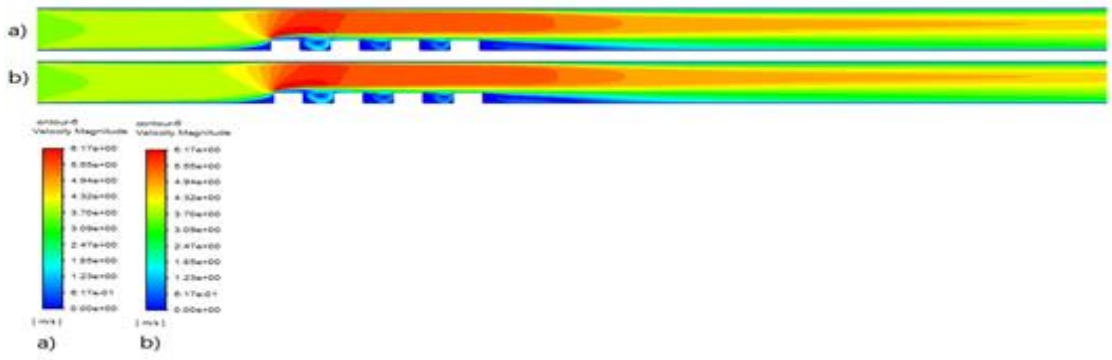
FR-4 ve bakalit baskı devre kartlarının üst yüzeyi ve alt yüzeyindeki sıcaklık dağılımının detayları EK-1'de verilmiştir.

4.1.8. 2 boyutlu geometride bakır sıvamanın etkisinin incelenmesi

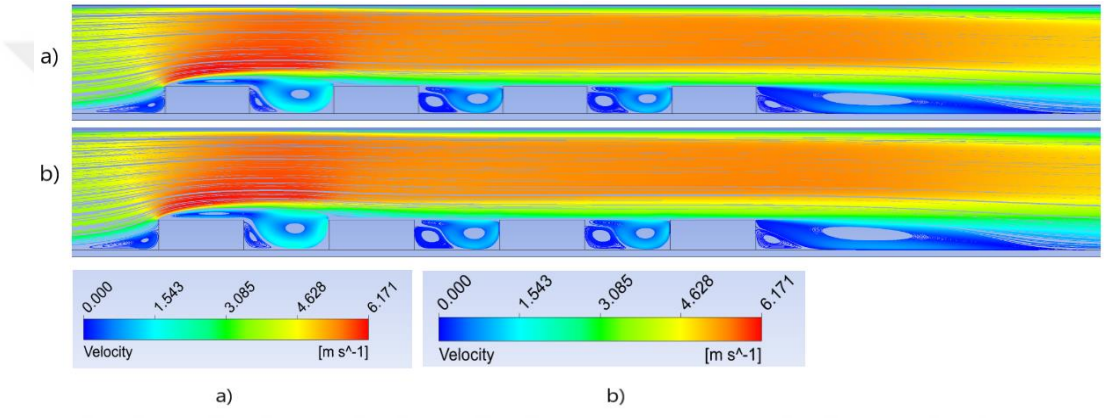
Baskı devre kartlarına bakır sıvama y-yönündeki (Bkz. Şekil 3.12) iletimle olan ısı transferini artırmak için yapılmaktadır (Çengel, 2010). Yonganın alt kısmından baskı devre kartına olan ısı transferi yongalar arasında ve son yongadan sonra ısı taşınımı ile de olmasından ötürü toplam ısı transferinin iletimle olan kısmı artabilmektedir (Nakayama ve Park, 1996). Bakır sıvamanın etkisini incelemek amacıyla baskı devre kartı üzerine 0,1 mm de bakır sıvama yapılmıştır. Bakır sıvama genellikle 0,1 mm, 0,15 mm gibi düşük kalınlıklarda yapılmaktadır (Çengel, 2010).

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.284 ve 4.285 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme altına bakır sıvama durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 6,17 m/s olarak belirlenmiştir. Şekil 4.285'den görüleceği üzere yeniden birleşme uzunluklarında da pek bir değişim olmamaktadır.



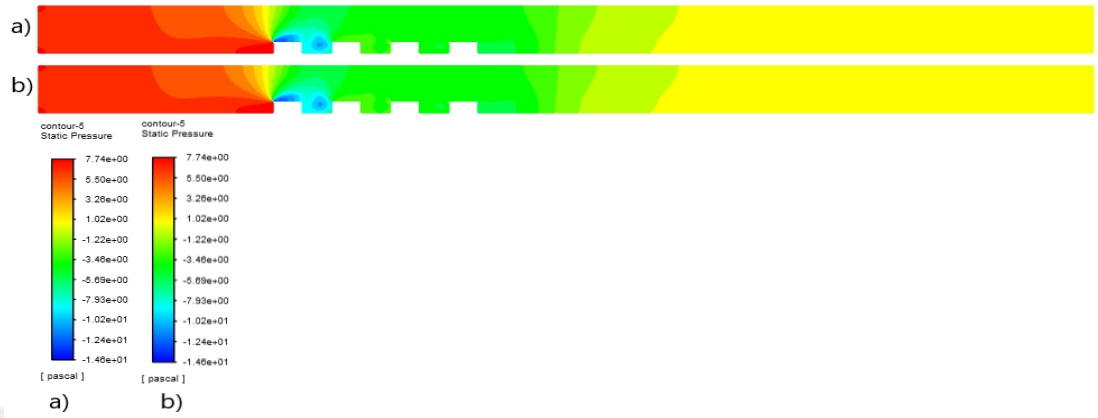
Şekil 4.284. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması



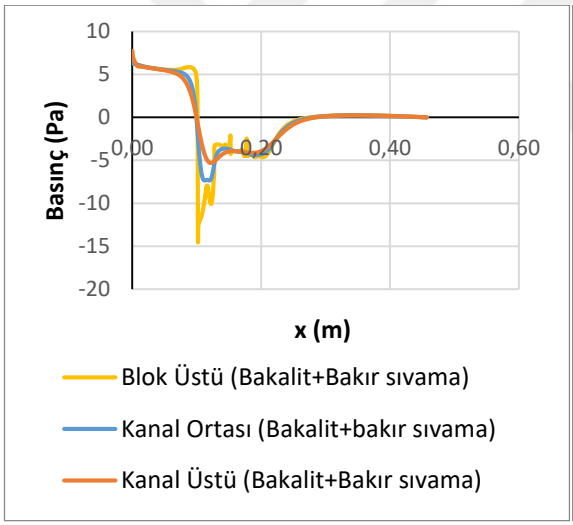
Şekil 4.285. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.286'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.287 ve 4.288'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzemenin üzerine bakır kaplama durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Düşük basınç etkisi birinci bloktan sonraki yongada da görülmektedir. Farklı malzemeler altına bakır sıvama durumunda Şekil 4.284'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.284, a ve b için 6,17 m/s olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.286 a ve b'deki minimum basınçlar da aynı kalmaktadır. (Şekil 4.286 a ve b'deki minimum basınç -14,6 olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.287 ve 4.288'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş

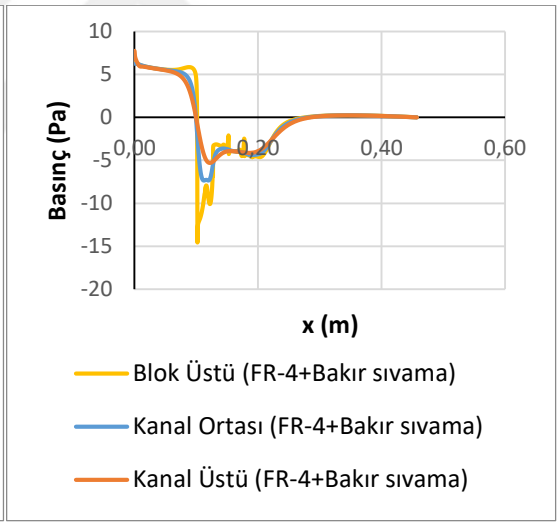
basınçları bakalit altına bakır sıvamada 6,24 Pa ve FR-4 altına bakır sıvamada 6,241 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.286. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması



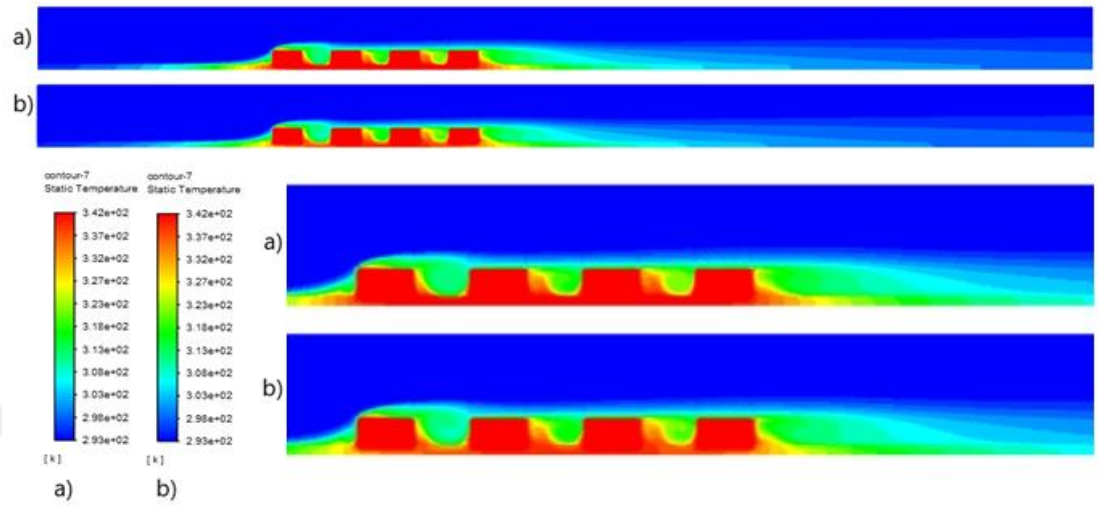
Şekil 4.287. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi



Şekil 4.288. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi

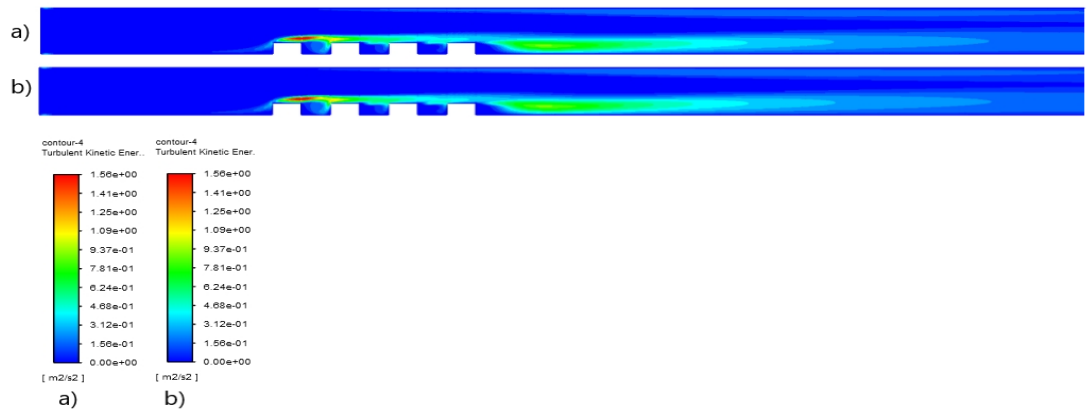
Şekil 4.289'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklar üzerinde elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık

değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



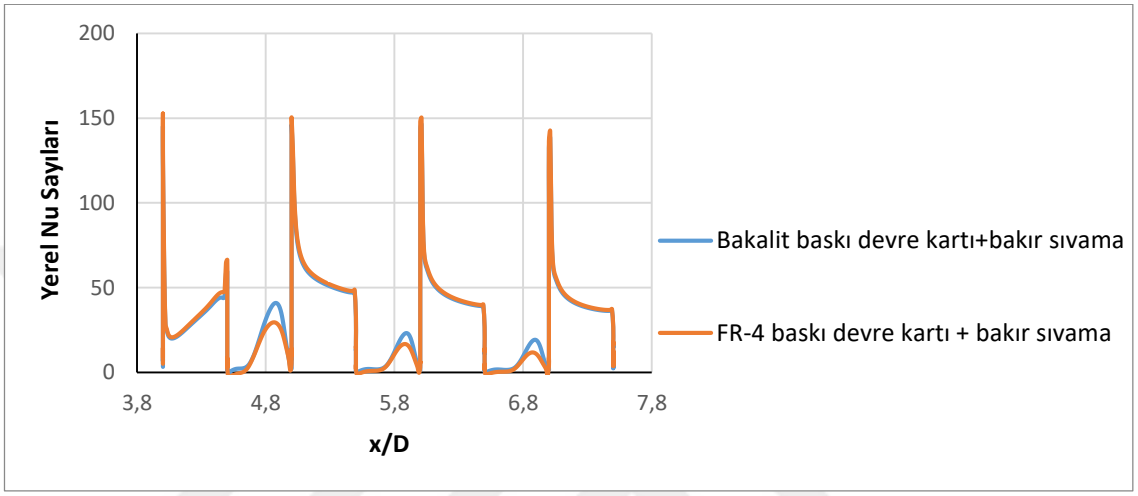
Şekil 4.289. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür) a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Şekil 4.290'dan da görüleceği gibi her iki durumda da maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup farklı malzeme altına bakır sıvama olduğunda da konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.290. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

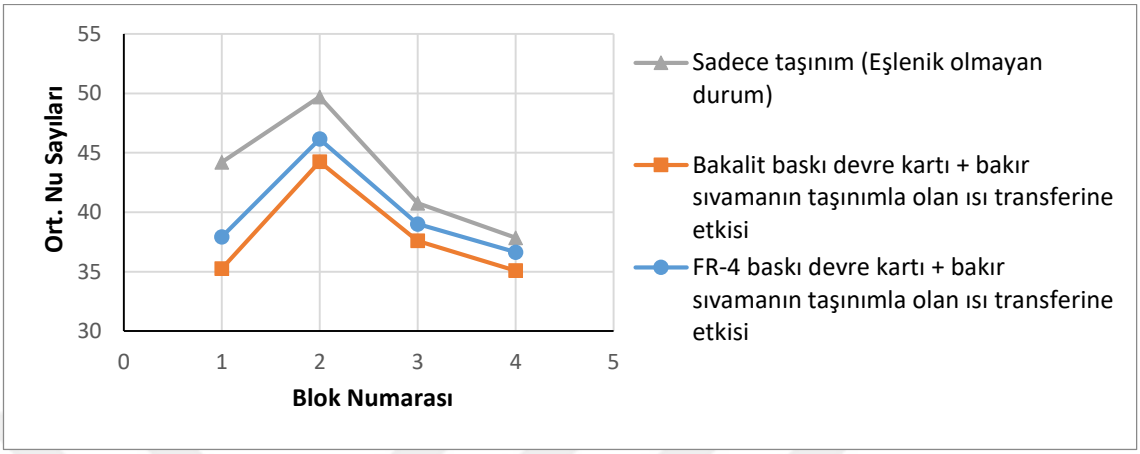
Şekil 4.291'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama olduğu durumda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme altına bakır sıvama olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük yerel Nu sayısı ise en son yonga üzerindedir. Bu durum birinci blokta ısınan havanın bloklarda ilerledikçe etkisini azaltmasına yorulabilir.



Şekil 4.291. Re=6000 (3,607 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.292'de baskı devre kartında kullanılan her iki malzeme altına bakır sıvama ve sadece taşınımla olan ısı transferi durumları için, bloklar üzerindeki ve blok arasındaki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.292'de ilk göze çarpan nokta baskı devre kartı üzerine bakır sıvama durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 d) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilirken, her üç durumda da en düşük değer son yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.29'da dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.29'dan da görülebileceği gibi baskı devre kartının altına bakır sıvama yapılması, iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferini düşürmüştür. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme altına bakır sıvama yapılması durumunda taşınımla olan ısı

transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme altına bakır sıvama yapılması durumuna göre bir miktar daha fazladır.



Şekil 4.292. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

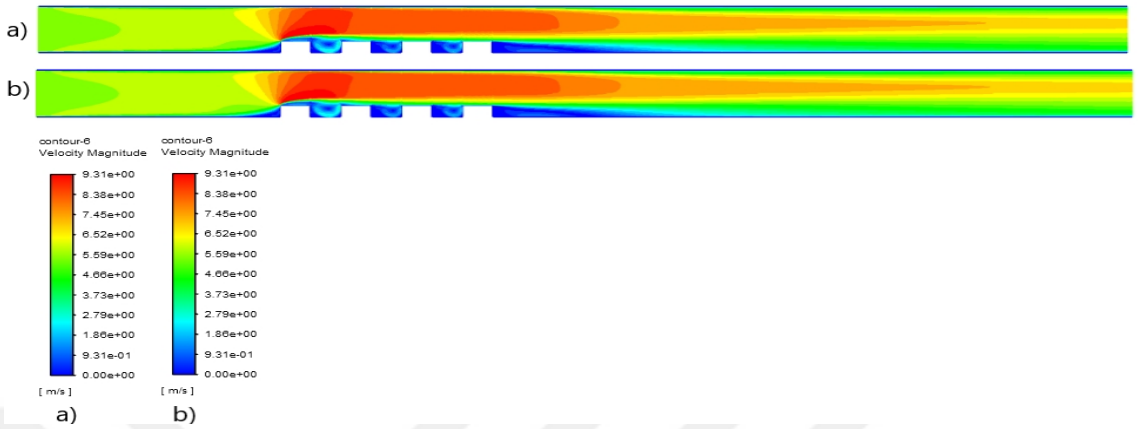
Çizelge 4.29. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı baskı devre kartı malzemesi altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

İncelenen Durumlar	Ortalama Nusselt Sayısı
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	43,12
FR-4 baskı devre kartı +bakır sıvama (Eşlenik durum)	39,93
Bakalit baskı devre kartı +bakır sıvama (Eşlenik durum)	38,04

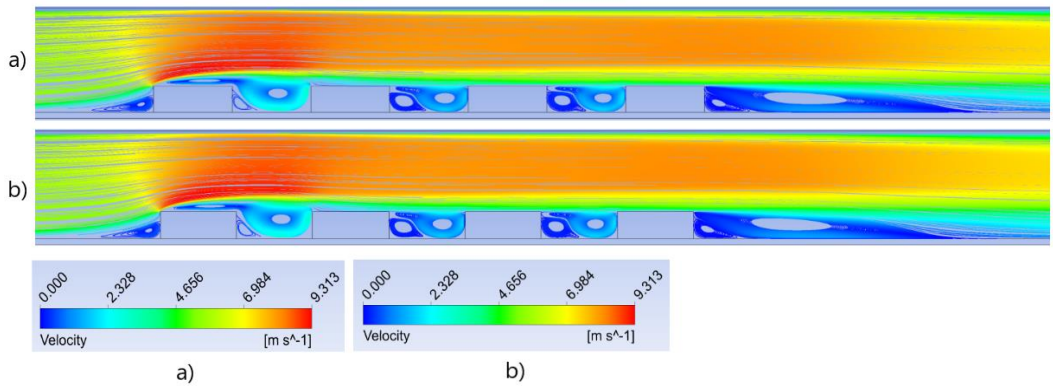
Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.293 ve 4.294 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme altına bakır sıvama durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 9,31 m/s olarak

belirlenmiştir. Şekil 4.294'den görüleceği üzere yeniden birleşme uzunluklarında da pek bir değişim olmamaktadır.



Şekil 4.293. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması



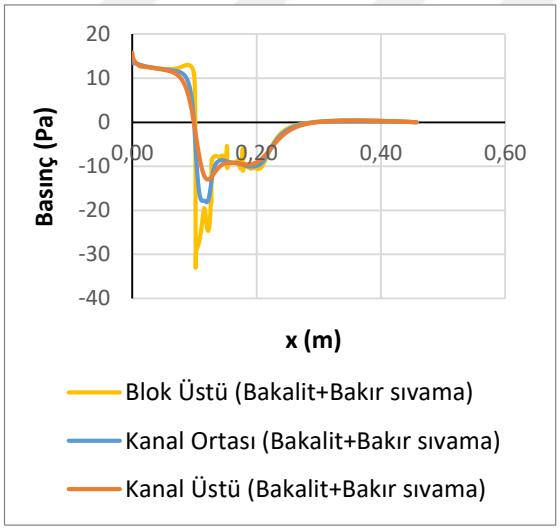
Şekil 4.294. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Kontür olarak basınç dağılımlarışekil 4.295'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.296 ve 4.297'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzemenin altına bakır kaplama durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Düşük basınç etkisi birinci bloktan sonraki yongada da görülmektedir. Malzeme değiştiğinde Şekil 4.293'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.293, a ve b için 9,31 m/s olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.295 a ve b'deki minimum basınçlar da aynı kalmaktadır. (Şekil 4.295 a ve b'deki

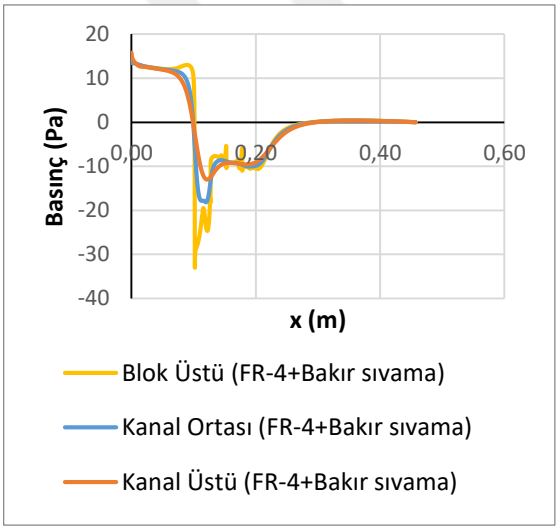
minimum basınç -33,2 olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.296 ve 4.297'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit altına bakır sıvama için 13,43 Pa ve FR-4 altına bakır sıvama durumları için 13,437 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.295. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması



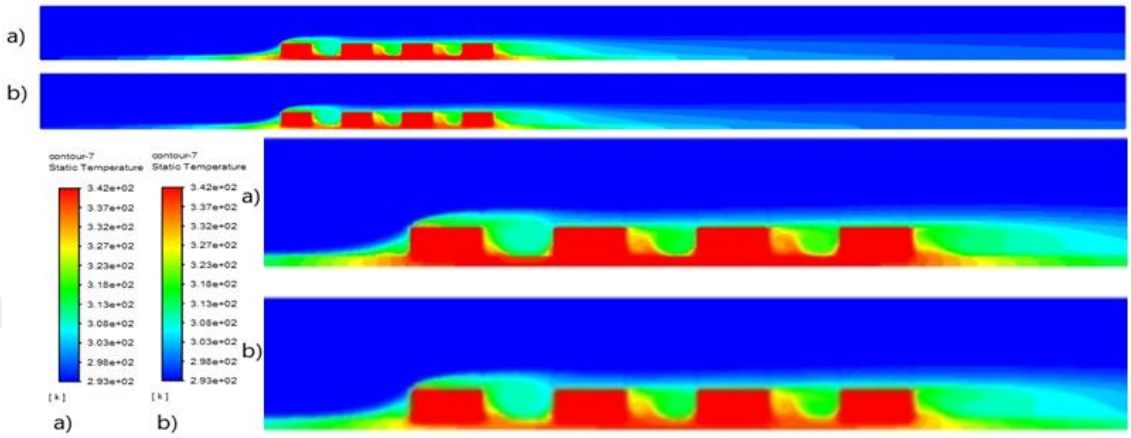
Şekil 4.296. Bakalit altına bakır sıvama için basınç değişimi



Şekil 4.297. FR-4 altına bakır sıvama için basınç değişimi

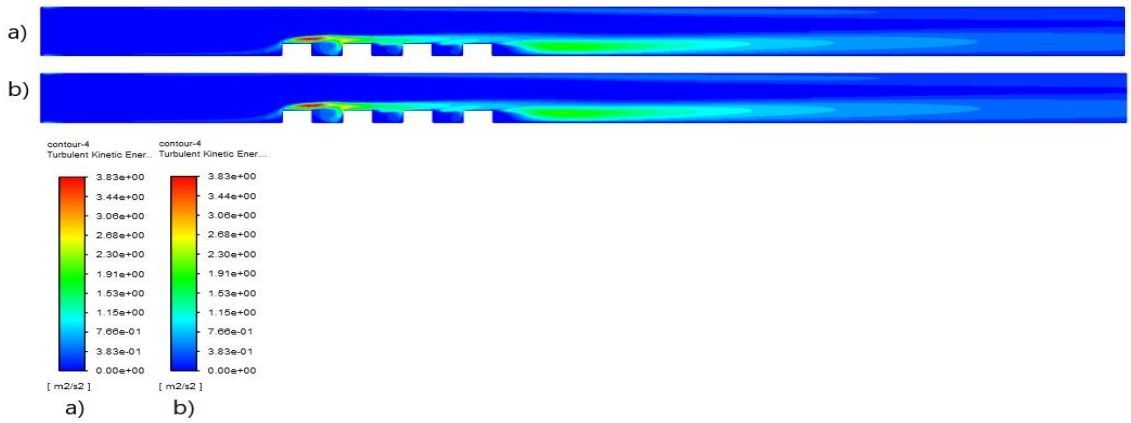
Şekil 4.298'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklar üzerinde elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle

ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



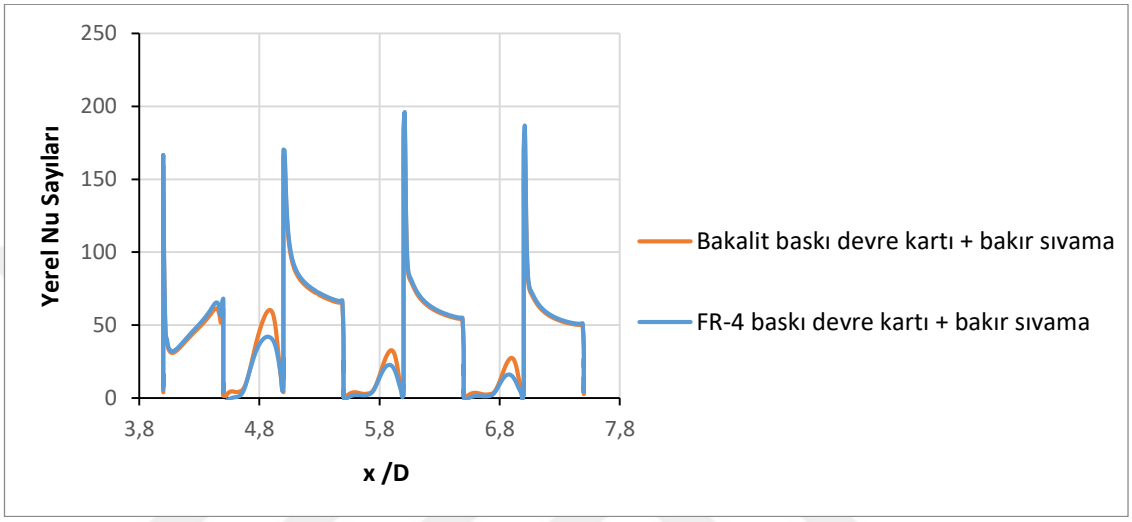
Şekil 4.298. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür) a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Şekil 4.299'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup farklı malzeme altına bakır sıvama olduğunda da konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.299. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

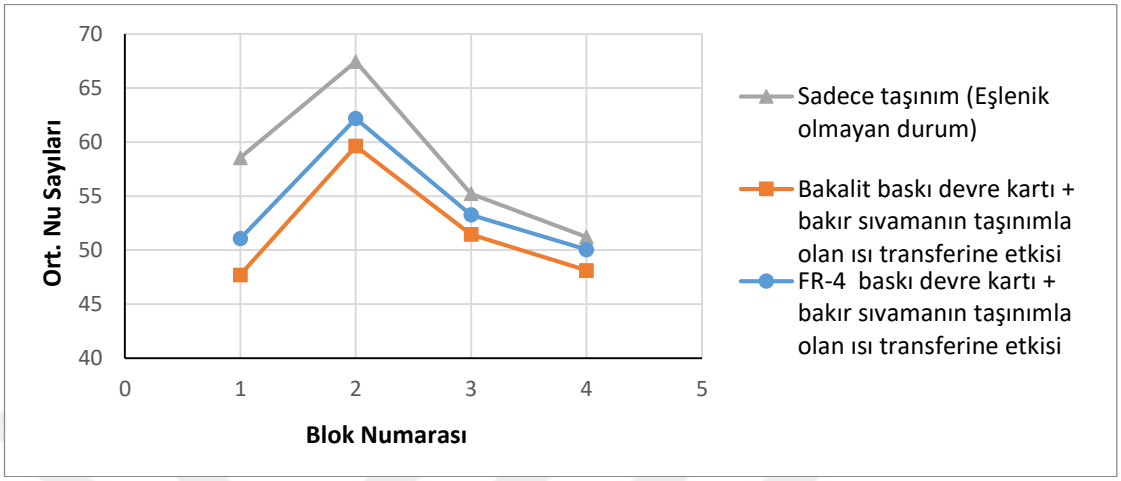
Şekil 4.300'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama olduğu durumda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme altına bakır sıvama olduğu durumda üçüncü yonga üzerinde görülmüştür. En düşük Nu sayısı ise ilk yonga üzerindedir.



Şekil 4.300. Re=9015 (5,42 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.301'de baskı devre kartında kullanılan her iki malzeme altına bakır sıvama ve sadece taşınımla olan ısı transferi durumları için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.301'de ilk göze çarpan nokta baskı devre kartı üzerine bakır sıvama durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 d) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde edilirken, her iki durumda da en düşük ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.30'da dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.30'dan da görülebileceği gibi baskı devre kartının altına bakır sıvama yapılması, iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferini düşürmüştür. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme altına bakır sıvama yapılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim

katsayısı yüksek olan bakalit malzeme altına bakır sıvama yapılması durumuna göre bir miktar daha fazladır.



Şekil 4.301. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

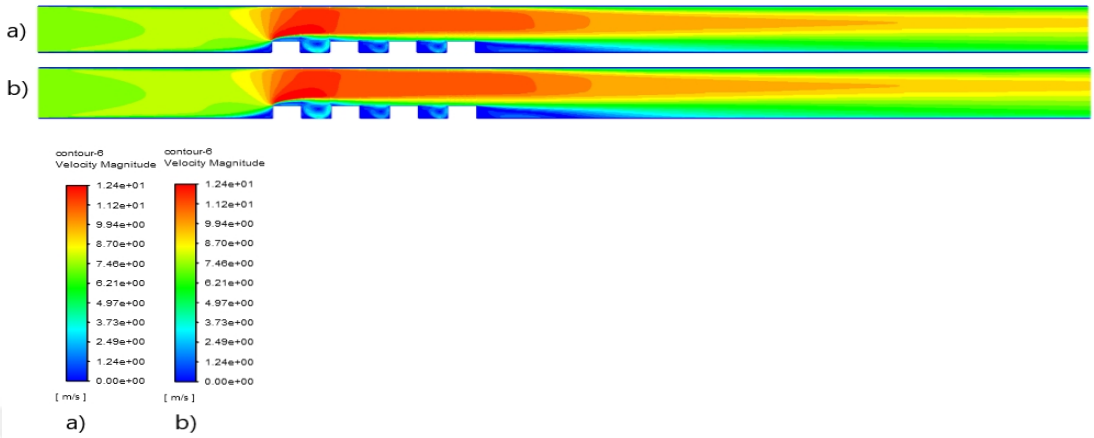
Çizelge 4.30. Re=9015 (5,42 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

İncelenen Durumlar	Ortalama Nusselt Sayısı
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	58,1
FR-4 baskı devre kartı +Bakır sıvama (Eşlenik durum)	54,13
Bakalit baskı devre kartı +Bakır sıvama (Eşlenik durum)	51,73

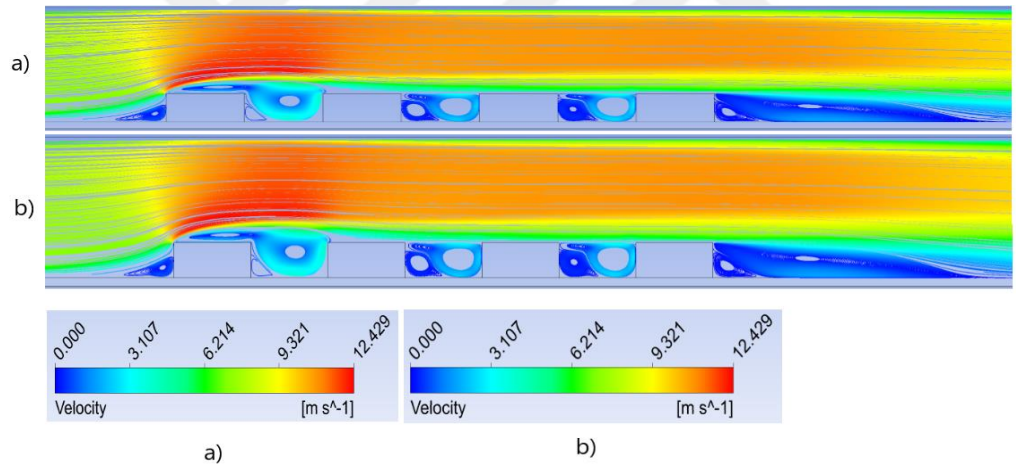
Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.302 ve 4.303 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme altına bakır sıvama durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 12,4 m/s olarak

belirlenmiştir. Şekil 4.303'den görüleceği üzere yeniden birleşme uzunluklarında da pek bir değişim olmamaktadır.



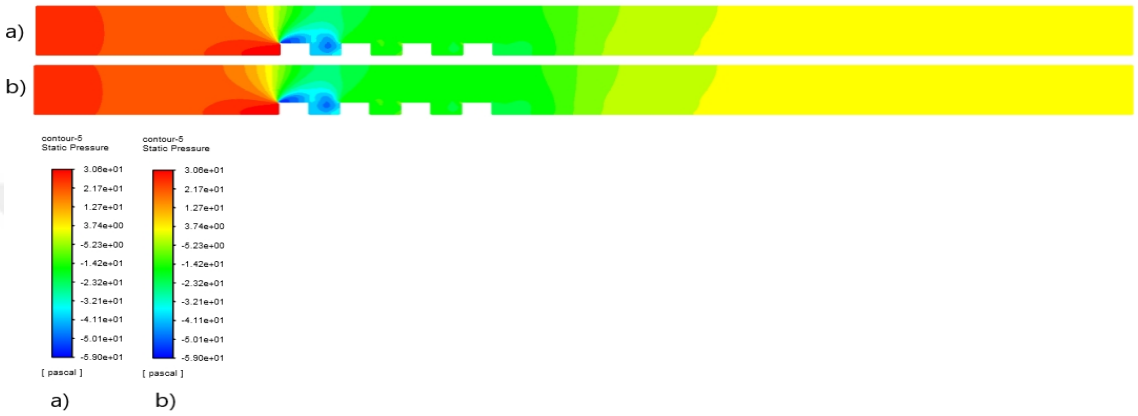
Şekil 4.302. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması



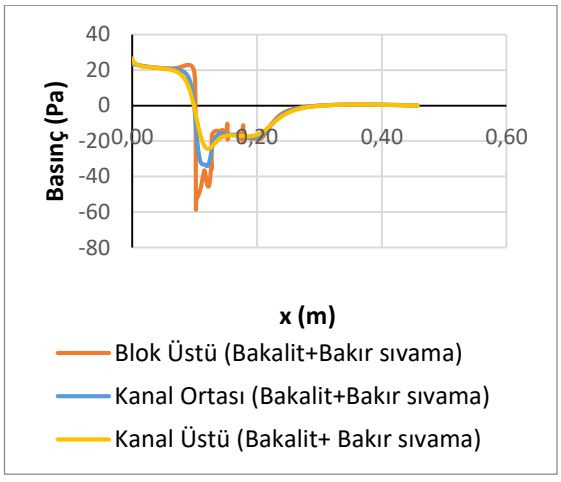
Şekil 4.303. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.304'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.305 ve 4.306'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzemenin altına bakır kaplama durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Düşük basınç etkisi birinci bloktan sonraki yongada da görülmektedir. Farklı malzemeler altına bakır sıvama durumunda Şekil 4.302'den de görülebileceği gibi

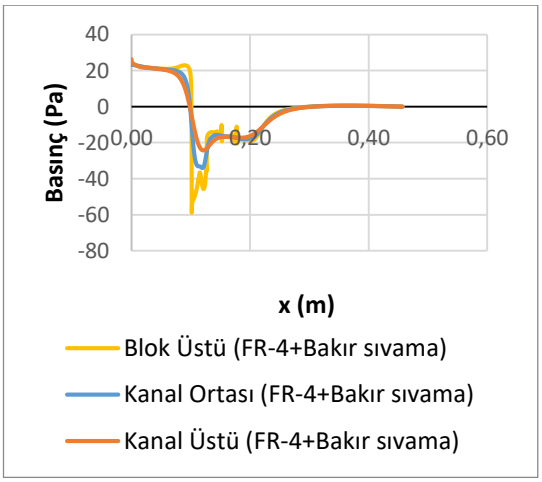
birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.302, a ve b için 12,4 m/s olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.304 a ve b'deki minimum basınçlar da aynı kalmaktadır. (Şekil 4.304 a ve b'deki minimum basınç -59 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.305 ve 4.306'dan da görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için 23,19 Pa ve Fr-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama durumu için 23,19 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.304. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması



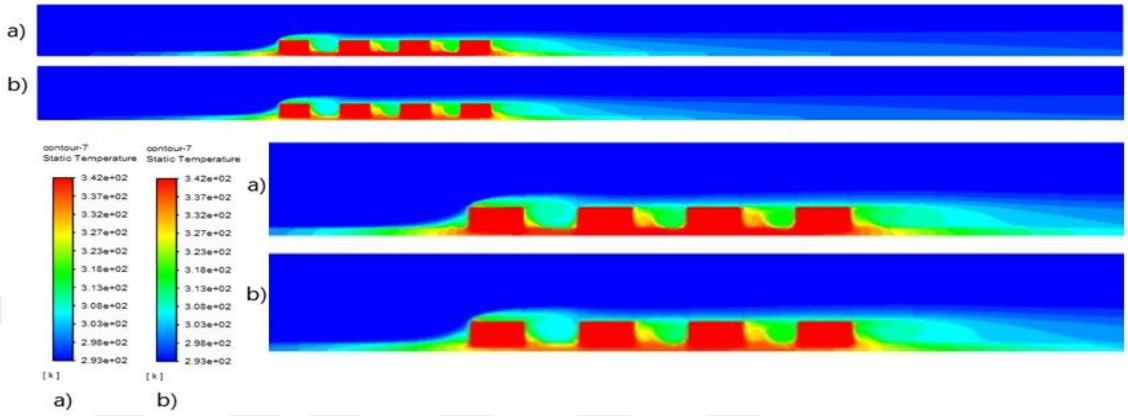
Şekil 4.305. Bakalit altına bakır sıvama için basınç değişimi



Şekil 4.306. FR-4 altına bakır sıvama için basınç değişimi

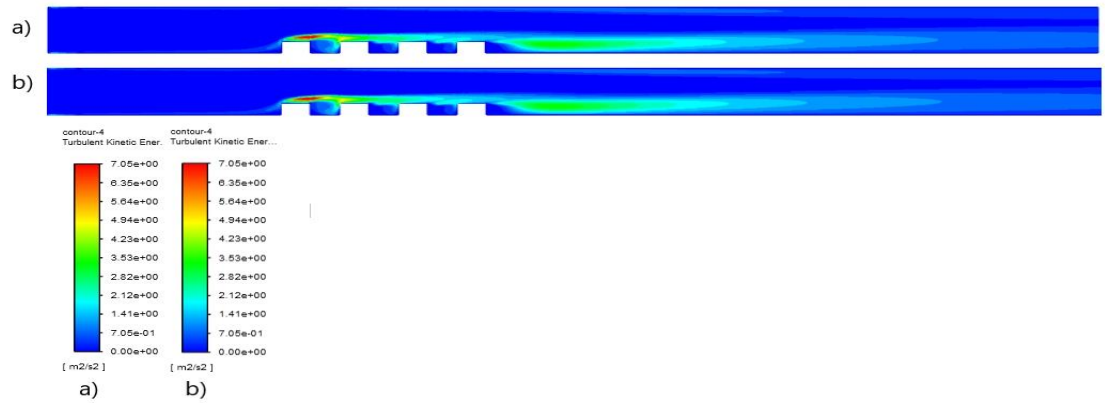
Şekil 4.307'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklar üzerinde elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle

ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



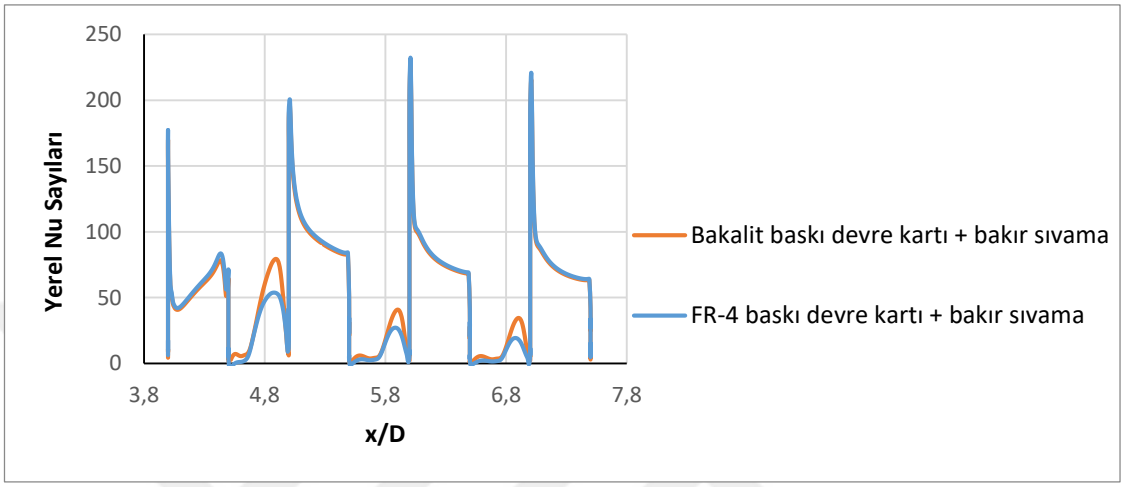
Şekil 4.307. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri (Sağ alttaki şekiller üstteki şekillerin büyütülmüşüdür) a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Şekil 4.308'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup farklı malzeme altına bakır sıvama olduğunda da konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



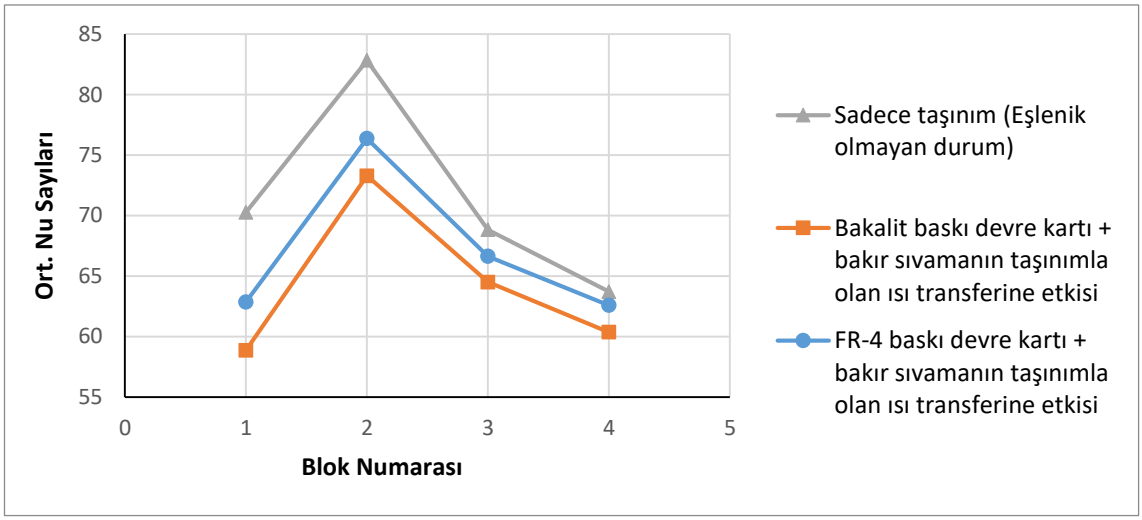
Şekil 4.308. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Şekil 4.309'da farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama olduğu durumda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme altına bakır sıvama olduğu durumda da üçüncü yonga üzerinde görülmüştür. Her iki durumda da en düşük Nu sayısı ise ilk yonga üzerindedir.



Şekil 4.309. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve blok aralarındaki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.310'da baskı devre kartında kullanılan her iki malzeme altına bakır sıvama ve sadece taşınımla olan ısı transferi durumları için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.310'da ilk göze çarpan nokta baskı devre kartı altına bakır sıvama durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 d) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı her iki bakır sıvama durumunda ikinci yonga üzerinde edilirken, en düşük ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.31'de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.31'den da görülebileceği gibi baskı devre kartının altına bakır sıvama yapılması, iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferini düşürmüştür. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme altına bakır sıvama yapılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme altına bakır sıvama yapılması durumuna göre bir miktar daha fazladır.



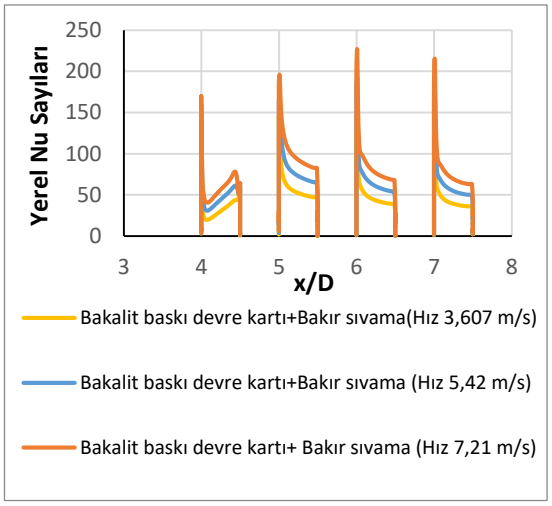
Şekil 4.310. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.31. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

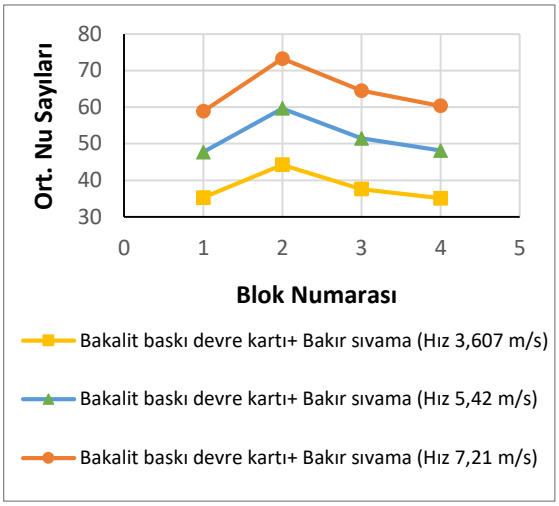
İncelenen Durumlar	Ortalama Nusselt Sayısı
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	71,41
FR-4 baskı devre kartı +Bakır sıvama (Eşlenik durum)	66,79
Bakalit baskı devre kartı +Bakır sıvama (Eşlenik durum)	64,25

Bakır sıvama etkisinin farklı hızlarda karşılaştırılması

Bakalit altına bakır sıvama için hızın artırılması Şekil 4.311 ve Şekil 4.312'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel Nu sayısı üçüncü yonga üzerinde elde edilirken, en yüksek ortalama Nu sayısı ise ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. En düşük ortalama Nu sayısı yüksek hızlarda ilk yonga üzerinde elde edilirken düşük hızda son yonga üzerinde elde edilmiştir.

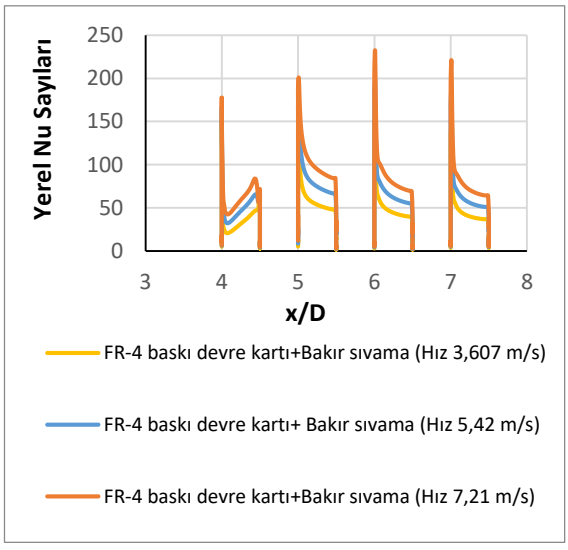


Şekil 4.311. Bakalit altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi

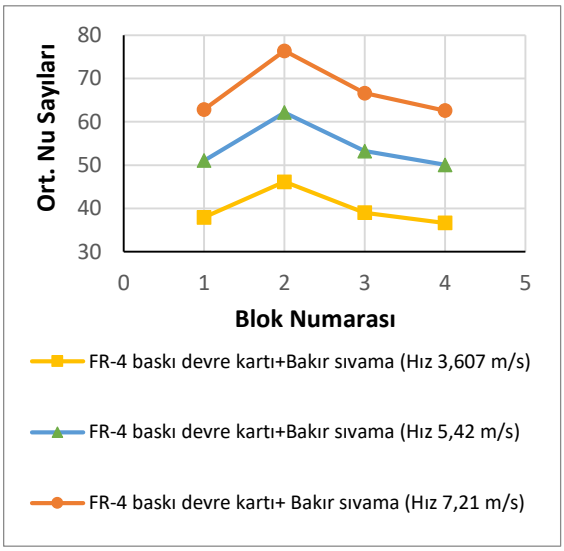


Şekil 4.312. Bakalit altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki ort. Nu sayısının değişimi

FR-4 altına bakır sıvama için hızın artırılması Şekil 4.313 ve Şekil 4.314'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel Nu sayısı üçüncü yonga üzerinde elde edilirken, en yüksek ortalama Nu sayısı ise ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. En düşük ortalama Nu sayısı tüm hızlarda son yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.313. FR-4 altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi



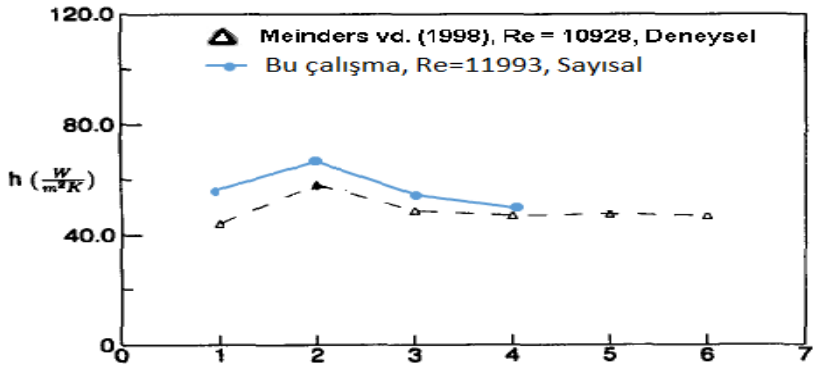
Şekil 4.314. FR-4 altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki ort. Nu sayısının değişimi

Yapılan 6 adet analizle bakır sıvamanın ısı transferine olan etkisi incelendiğinde taşınımla olan en yüksek ısı transferinin Re=11993 (7,21 m/s)'de FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama duurmunda elde edildiği görülmüştür. Durgam ve diğerleri (2017), yaptığı çalışmalarında bakır kaplama durumunda doğal taşınım miktarının sadece FR-4 veya sadece bakalit kaplamaya göre daha az olduğunu gözlemlemişlerdir.

FR-4 ve bakalit baskı devre kartlarının alt yüzeyleri üzerine bakır sıvamanın olduğu durumlar için baskı devre kartının üst yüzeyi ve bakır sıvamanın alt yüzeyindeki sıcaklık dağılımlarının detayları EK-1'de verilmiştir.

4.1.9. Deneysel çalışma ile 2 boyutlu baz geometrinin karşılaştırması

Baz geometri için elde edilen blok başına ortalama ısı transfer katsayıları yaklaşık olarak benzer Re sayısı ve benzer geometrik faktörlere sahip Meinders vd. (1998)'nin deneysel sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak Şekil 4.315'de verilmiştir (Bkz. Çizelge 4.32). Bu çalışmada blok başına ortalama ısı transfer katsayısında en yüksek farklılık 1. blokta meydana gelmiş ve yaklaşık %30 yüksek tahmin edilmiştir. Ortalama ısı transfer katsayılarında deneysel çalışmadaki trend yakalanmış olup aradaki farklılık Re sayısındaki, geometrik faktörlerdeki (Bkz. Çizelge 4.32) ve sınır şartlarındaki küçük farklılıklara yorulabilir. Meinders vd. (1998) deneysel çalışmalarında, belirsizlikler göz önüne alınarak yerel ısı taşınım katsayısındaki toplam birikimli (kümülatif) hatanın %5-10 arasında verilmiş olduğu dikkate alınırsa aradaki farkın daha da düşeceği unutulmamalıdır. Dolayısıyla Şekil 4.315 nitel (kalitatif) olarak değerlendirilmelidir



Şekil 4.315. Baz geometri için blok başına ortalama ısı transfer katsayılarının benzer deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Çizelge 4.32. Baz geometri ve deneysel çalışma için geometrik faktörler

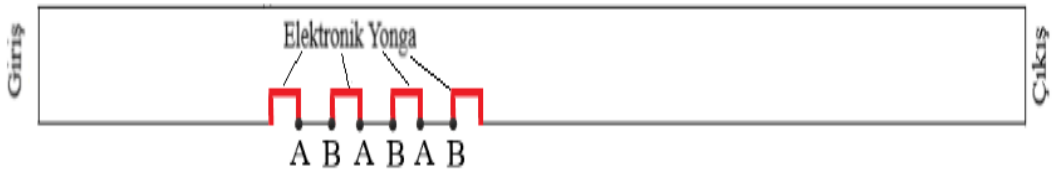
	H = 4h , (Bu çalışma)	H=3.33h (Meinders vd.,1998)
Blokaj oranı [h/H]	0,25	0,3
Genişleme oranı [H/(H-h)]	1,33	1,43
Görünüş oranı [l/h]	2	1
Paketleme yoğunluğu [s/l]	1	1

4.2. 3 Boyutlu Geometride Yapılan İncelemeler

2 boyutlu analizlerin yapıldığı tüm durumlar için 3 boyutlu analizler de yapılmıştır. Bu kısımda yapılan 3 boyutlu analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.2.1. 3 boyutlu geometride bloklar arası mesafenin incelenmesi

3 boyutlu geometride bloklar arası mesafe incelenirken kanal ortasına atılan plaka üzerindeki değerler 2 boyutlu geometrideki gibi alınmıştır.

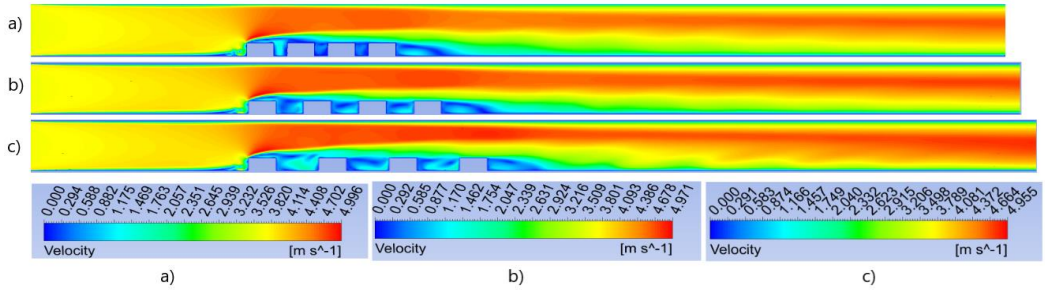


Şekil 4.316. Plaka üzerindeki bloklar arası mesafe değişimi

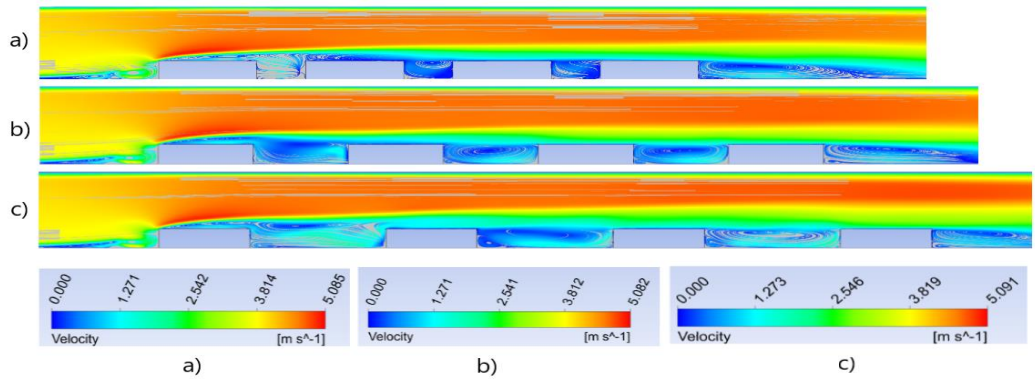
Şekil 4.316'da görüldüğü gibi bloklar arası mesafenin değişimini incelemek amacıyla Şekil 4.316'daki A-B aralığı yani bloklar arası mesafe baz geometride alınan değer dışında 2 değer daha alınarak 3 farklı hızda inceleme yapılmıştır. Baz geometride A-B aralığı 1,27 cm olmakla beraber, her 4 yonga arası için 0,635 cm ve 1,905 cm de alınarak analiz yapılmıştır. Diğer tüm özellikler sabit tutulmuştur. Bloklar arası mesafenin değişimini incelemek için toplam 9 adet analiz yapılmıştır.

Re= 6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

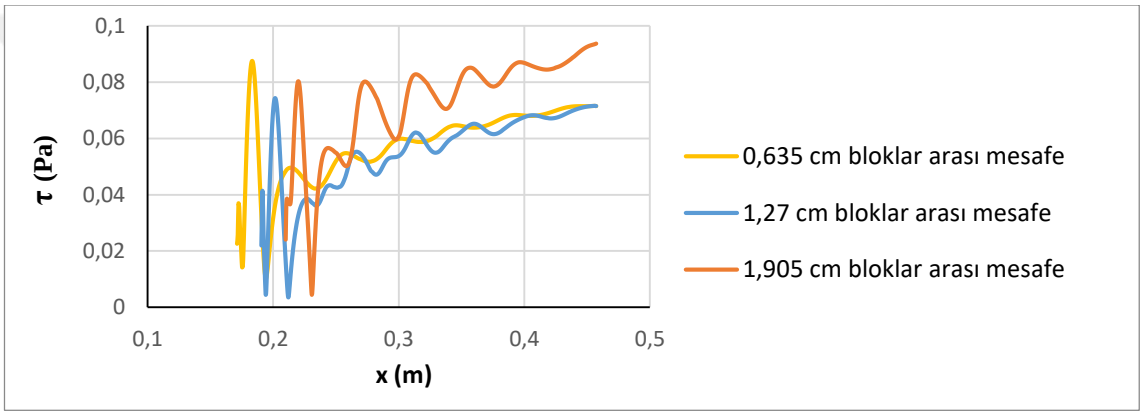
Şekil 4.317 ve 4.318 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı ve maksimum sıcaklık birinci bloğun üstünde oluşmaktadır. Bütün bloklar arası mesafeler için ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde küçük bir girdap oluşmaktadır. Bloklar arası mesafe arttıkça bütün çukurların ön tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmakta ve mesafe arttıkça girdap boyu artmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bütün bloklar arası mesafeler için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.36). Ayrıca son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.319'daki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.317. 316 Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

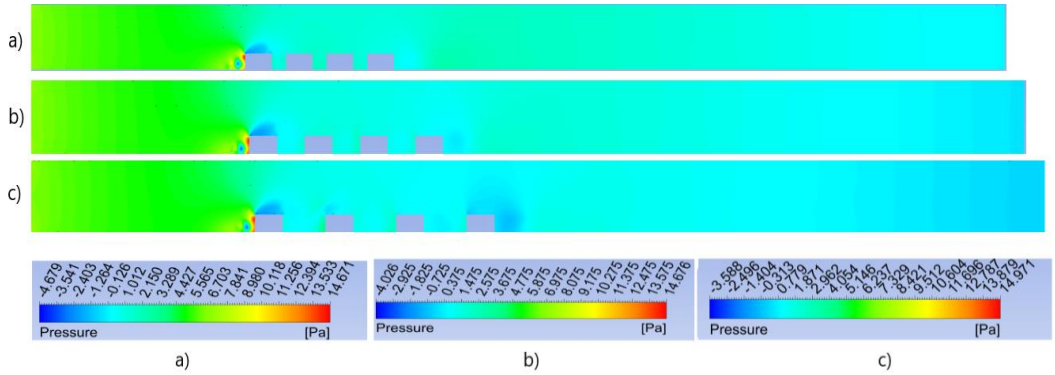


Şekil 4.318. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

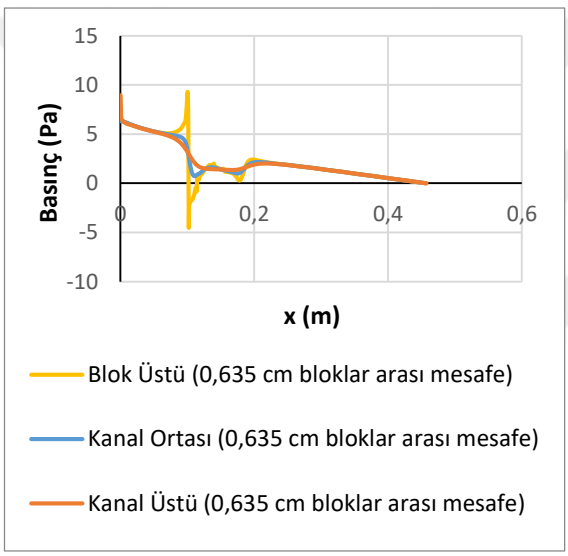


Şekil 4.319. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

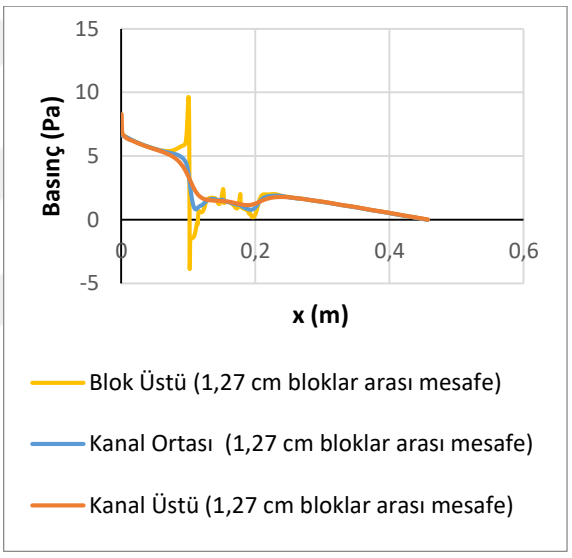
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.320'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.321, 4.322 ve 4.323'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstünde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Bloklar arası mesafe arttıkça Şekil 4.317'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız a için 4,99 m/s den b ve c'de 4,97 ve 4,95 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.320'de b ve c'deki basınçlarda a'dakiyle aynı oranda düşmüştür (a'daki minimum basınç –4,67 Pa b ve c'deki minimum basınçlar ise -4 ve -3,5 Pa olarak hesaplanmıştır).



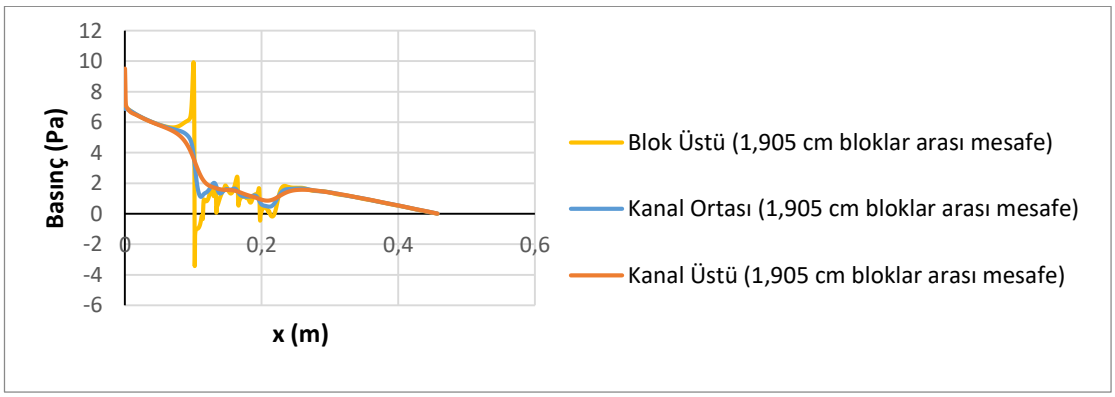
Şekil 4.320. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe



Şekil 4.321. 0,635 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi

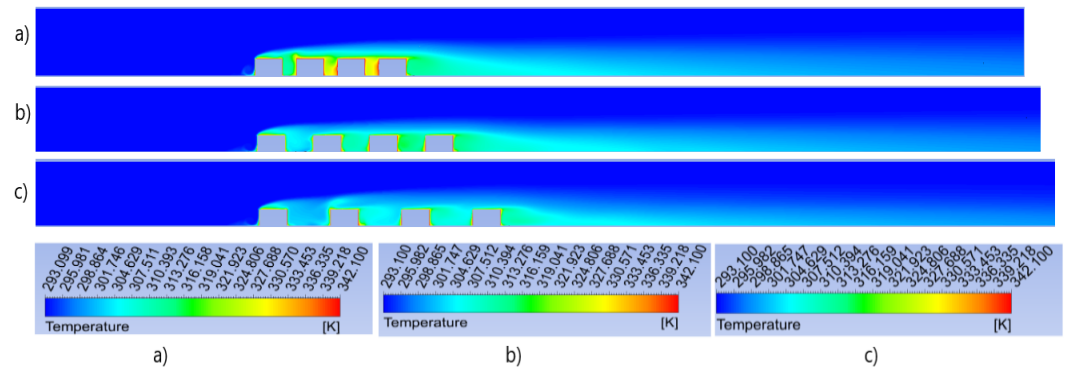


Şekil 4.322. 1,27 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi



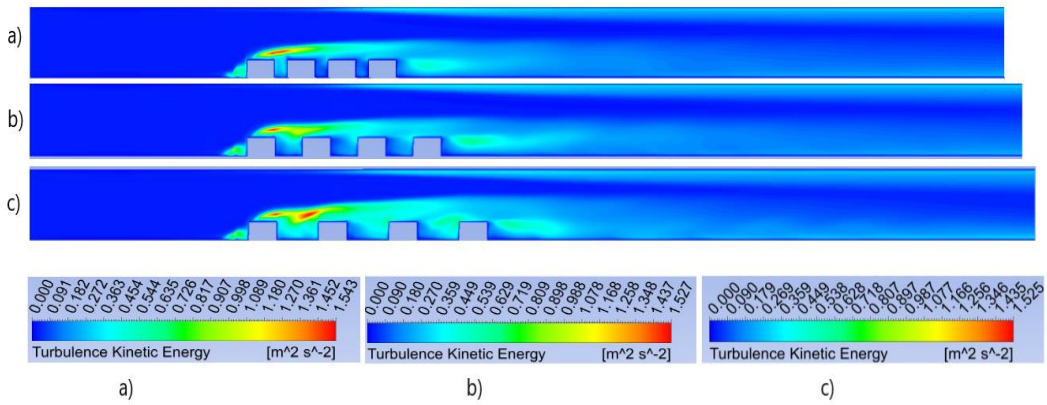
Şekil 4.323. 1,905 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi

Şekil 4.324'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Bloklar arası mesafenin daha az olduğu Şekil 4.324 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Her üç durumda da son çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurda sıcaklık artmaktadır. Ancak bu etki yongalar arası mesafe arttığında Şekil 4.324 c'den de görülebileceği gibi azalmaktadır. Bu azalma buradaki çukurlardaki ilk girdapların daha uzun olduğundan dolayı bu girdap akışlarının ikincil girdapla daha fazla temaslarına yorulabilir.



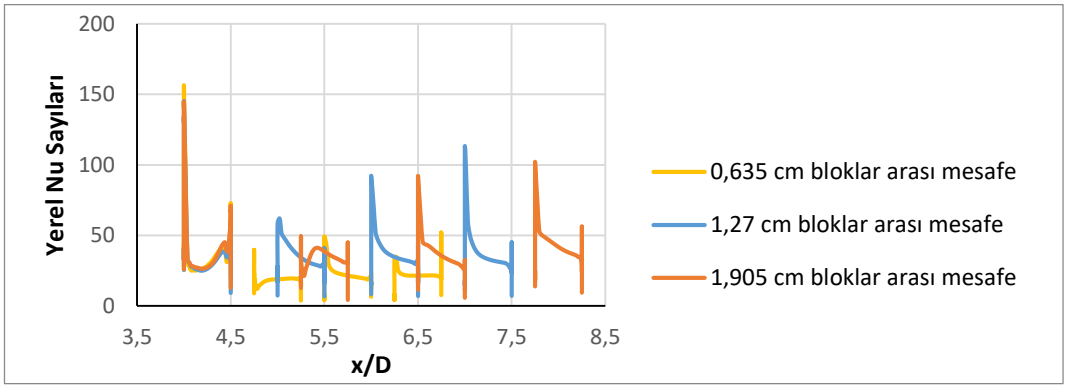
Şekil 4.324. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

Şekil 4.325'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup bloklar arası mesafe attıkça maksimum etki alanı yayılmaktadır. Hatta en yüksek bloklar arası mesafede ikinci yonga üzerine kadar gelmektedir. Ayrıca blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup bloklar arası mesafe arttıkça çıkışa ve üst duvara doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.325. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

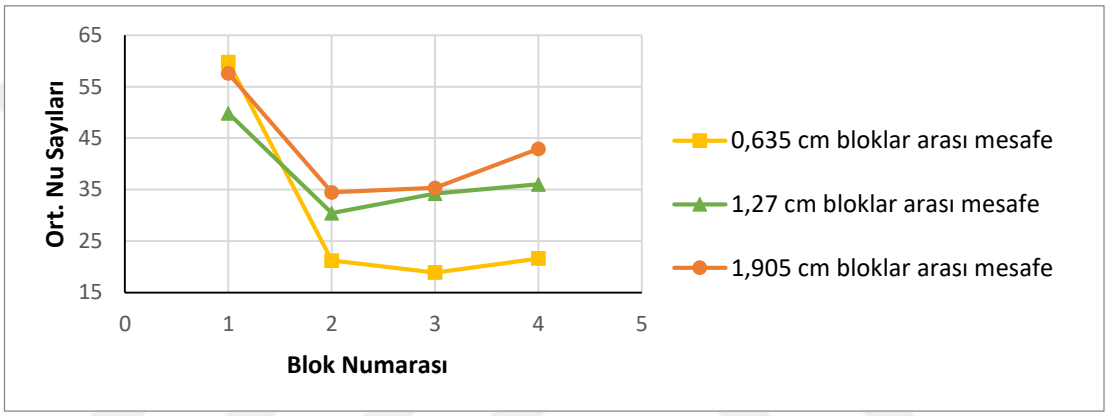
Şekil 4.326'da farklı bloklar arası mesafe için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde görülürken üçüncü yonga üzerinde ikinci yongaya göre bir artış gözlenmiştir. En düşük Nu sayısı ise ikinci yonga üzerindedir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca üç boyutlu analizlerde bloklar dar bir kanal içerisinde olduğu için blokaj etkisinde kalıp bu düzensizliğe sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.326. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.327'de tüm geometriler için, yani bloklar arası mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması

alınarak bulunmuştur. Şekil 4.327'de ilk göze çarpan nokta bloklar arası mesafe arttıkça ortalama Nu sayısının sayısının da artmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilmiştir. Her üç durumda da en düşük değeri ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Bloklar arası mesafenin artmasıyla maksimum ortalama Nu sayısının artması Şekil 4.325'den de görülebileceği gibi türbülansın etki alanının artmasına yorulabilir. Çizelge 4.33'de de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.33'den de görülebileceği gibi bloklar arası mesafenin artması ortalama ısı transferini artmıştır.



Şekil 4.327. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

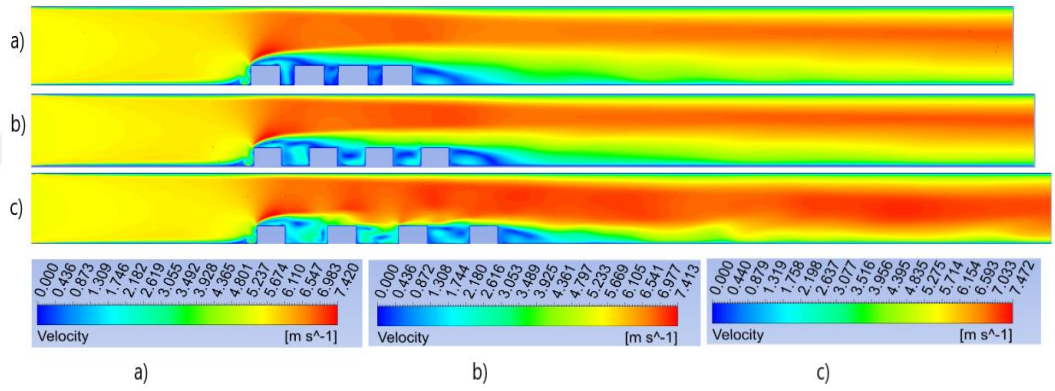
Çizelge 4.33. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar arası mesafe değişimi ile tüm blokların ortalama Nusselt sayısı

Bloklar Arası Mesafe	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	30,35
1,27 cm	37,6
1,905 cm	42,55

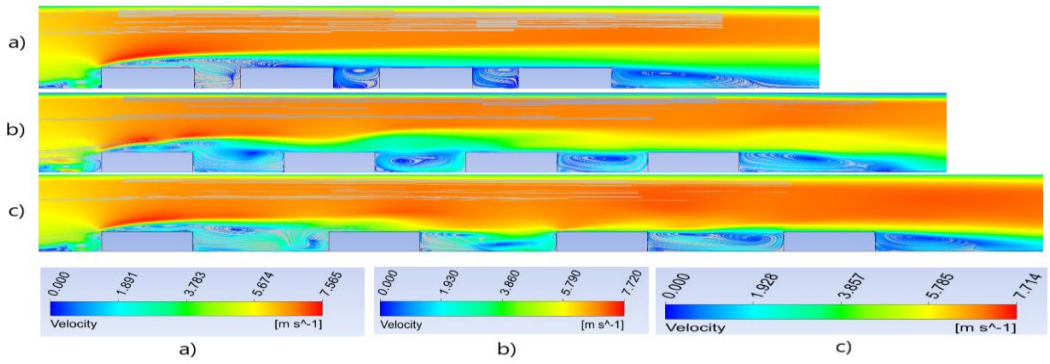
Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.328 ve 4.329 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı ve maksimum sıcaklık birinci bloğun üstünde oluşmaktadır. Bütün bloklar arası mesafeler için ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde küçük bir girdap oluşmaktadır. Bloklar arası mesafe arttıkça bütün çukurların ön tarafında saat yönünün

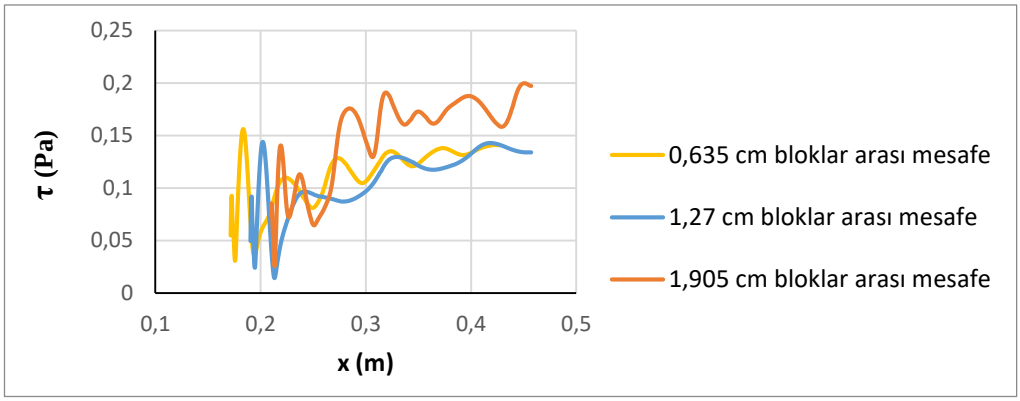
tersinde girdap oluşmakta ve mesafe arttıkça girdap boyu artmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bloklar arası mesafenin en yüksek olduğu durumda yeniden birleşme uzunluğunda bir miktar azalma görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.36). Ayrıca son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.330'daki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.328. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

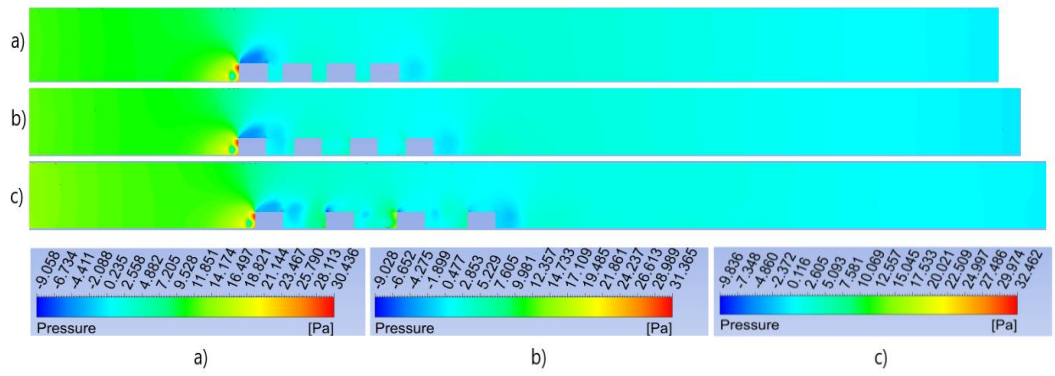


Şekil 4.329. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

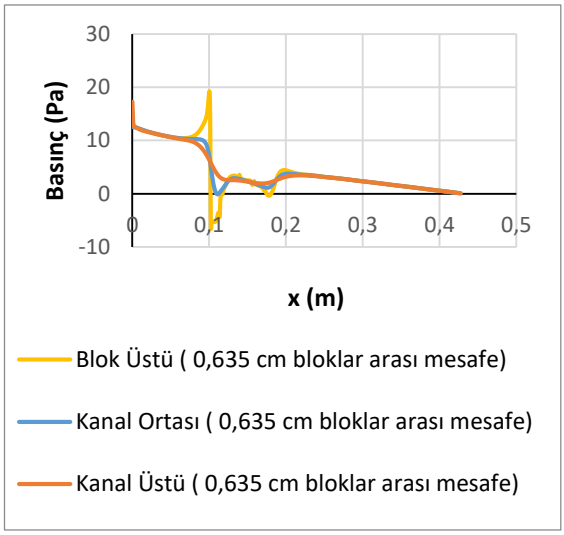


Şekil 4.330. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

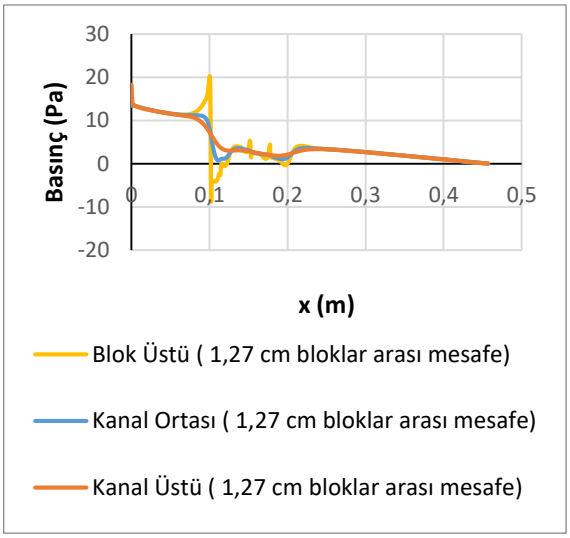
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.331'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.332, 4.333 ve 4.334'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstünde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Bloklar arası mesafe arttıkça Şekil 4.328'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız a için 4,42 m/s'den b ve c'de 4,41 ve 4,47 m/s olduğundan dolayı Şekil 4.331 b ve c'de basınçlarda a'dakiyle aynı oranda değişmiştir (a'daki minimum basınç –9,05 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -9,02 ve -9,8 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.332, 4.333 ve 4.334'den de görülebileceği gibi kanal giriş hızları bloklar arası mesafe arttıkça bir miktar artmaktadır (0,635 cm için 12,5 Pa, 1,27 cm için 13,45 Pa ve 1,905 cm bloklar arası mesafe için 14,5 Pa).



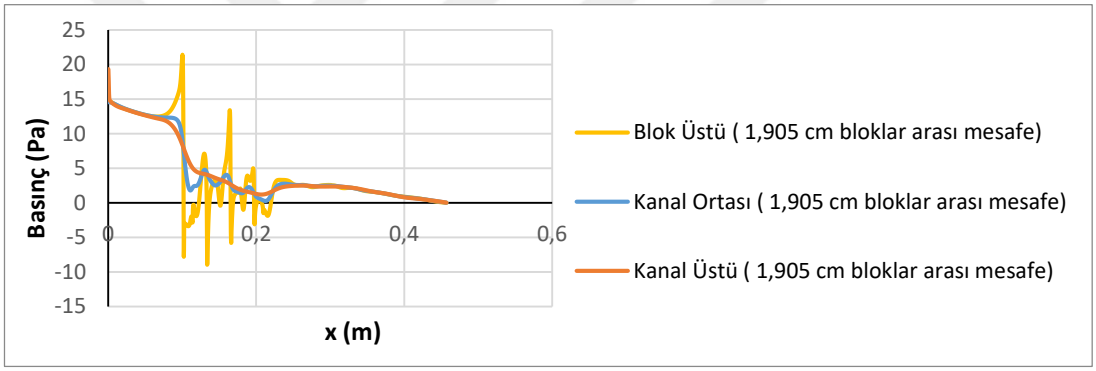
Şekil 4.331. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe



Şekil 4.332. 0,635 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi



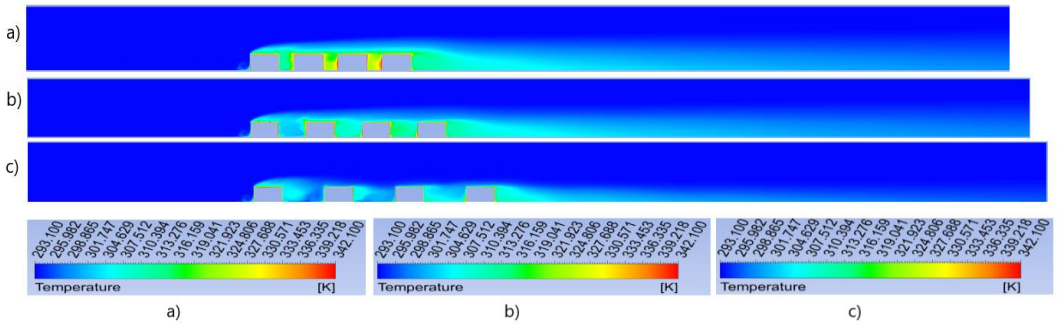
Şekil 4.333. 1,27 cm bloklar arası mesafe için basınç değişimi



Şekil 4.334. 1,905 bloklar arası mesafe için basınç değişimi

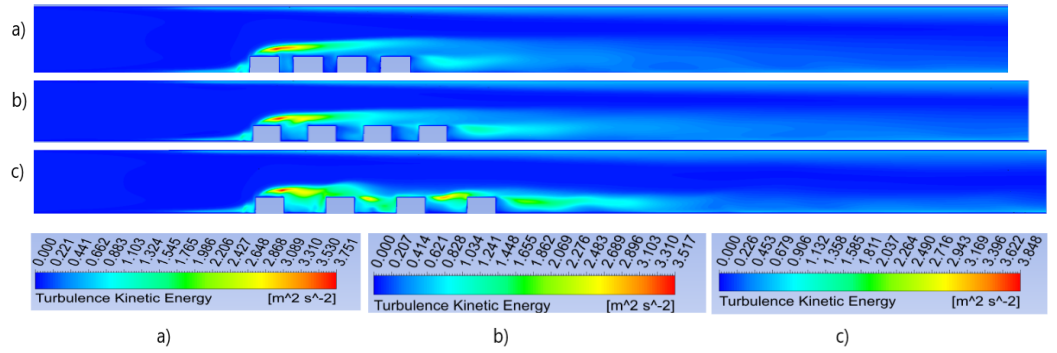
Şekil 4.335'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Bloklar arası mesafenin daha az olduğu Şekil 4.335 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Her üç durumda da son çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurda sıcaklık artmaktadır. Ancak bu etki yongalar arası mesafe arttığında Şekil

4.335 c'den de görülebileceği gibi azalmaktadır. Bu azalma buradaki çukurlardaki ilk girdapların daha uzun olduğundan dolayı bu girdap akışlarının ikincil girdapla daha fazla temaslarına yorulabilir.



Şekil 4.335. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm,b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

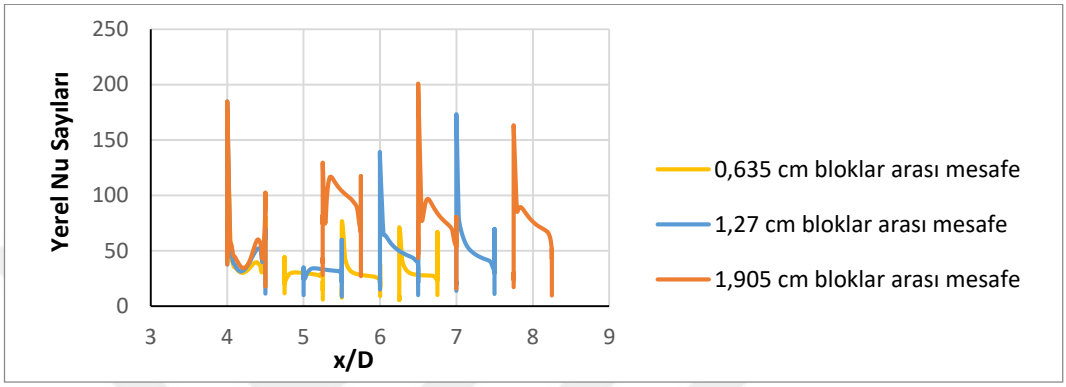
Şekil 4.336'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup bloklar arası mesafe attıkça maksimum etki alanı yayılmaktadır. Hatta en yüksek bloklar arası mesafede dördüncü yongaya kadar bu etki devam etmektedir. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup bloklar arası mesafe arttıkça çıkışa doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.336. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

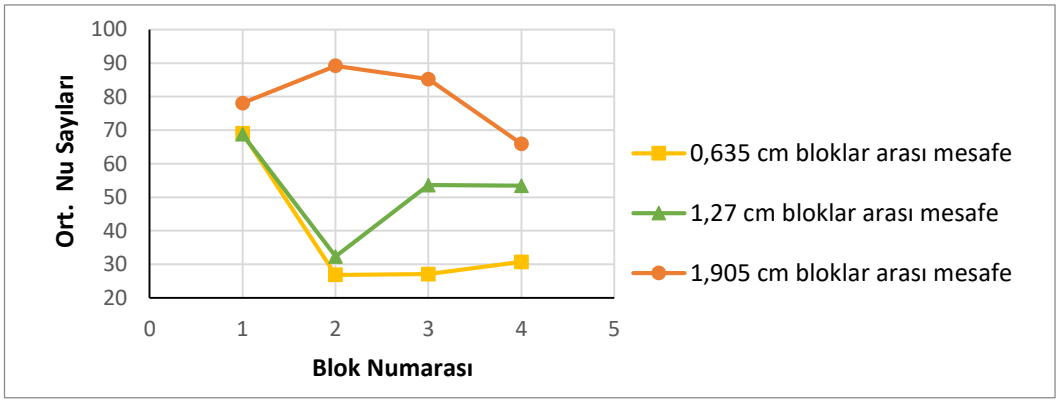
Şekil 4.337'de farklı bloklar arası mesafe için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı bloklar arası mesafe arttıkça üçüncü ve dördüncü yongaya doğru kaymaktadır. Bloklar arası mesafenin en az olduğu durumda ise birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. En düşük yerel Nu sayısı ise tüm

durumlarda ikinci yonga üzerindedir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca üç boyutlu analizlerde bloklar dar bir kanal içerisinde olduğu için blokaj etkisinde kalıp bu düzensizliğe sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.337. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.338'de tüm geometriler için, yani bloklar arası mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.338'de ilk göze çarpan nokta bloklar arası mesafe arttıkça ortalama Nu sayısının sayısının da artmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı düşük bloklar arası mesafelerde birinci yonga üzerinde edilirken en yüksek bloklar arası mesafe ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Bloklar arası mesafenin az olduğu durumlarda da en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en yüksek bloklar arası mesafede ise son yonga üzerinde elde edilmiştir. Bloklar arası mesafenin artmasıyla maksimum ortalama Nu sayısının artması Şekil 4.336'dan da görülebileceği gibi türbülansın etki alanının artmasına yorulabilir. Çizelge 4.34'de de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.34'den de görülebileceği gibi bloklar arası mesafenin artması ortalama ısı transferini artmıştır.



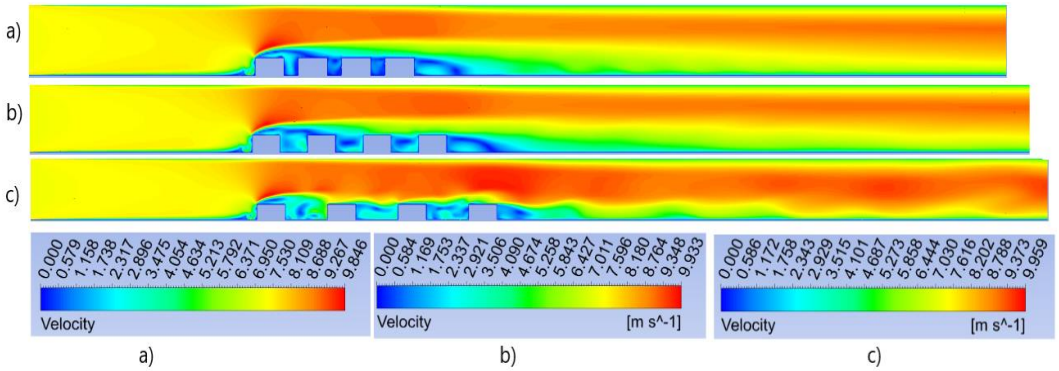
Şekil 4.338. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.34. Re=9015 (5,42 m/s)) için bloklar arası mesafe değişimi ile tüm blokların ortalama Nusselt sayıları

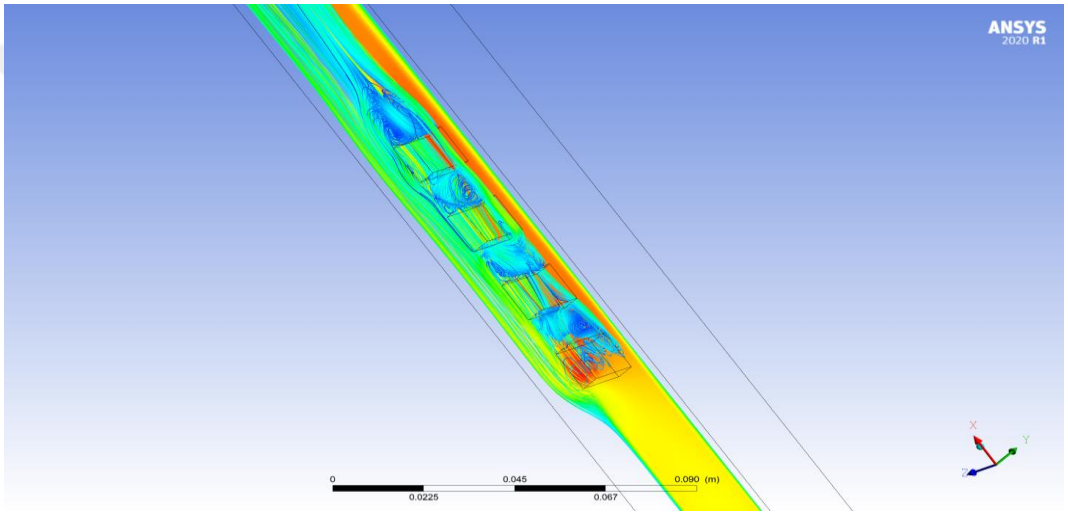
Bloklar Arası Mesafe	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	38,41
1,27 cm	52,02
1,905 cm	79,6

Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

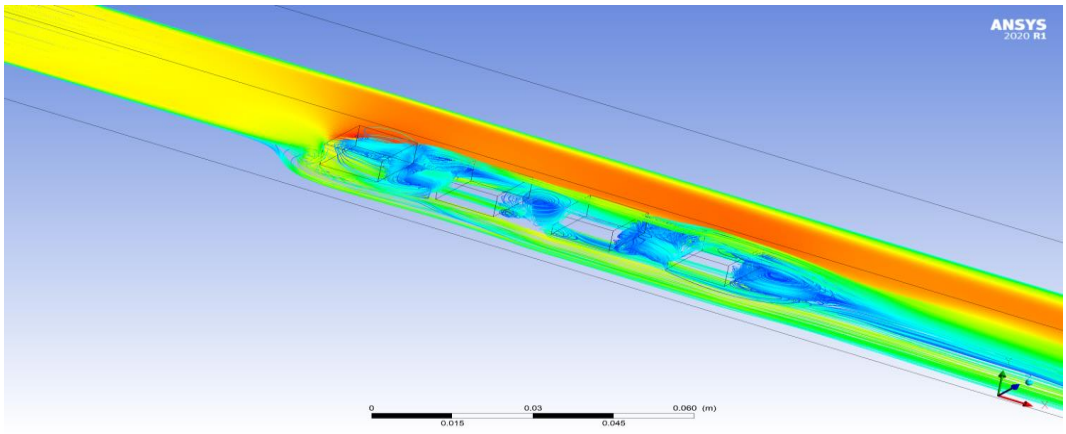
Şekil 4.339 ve 4.344 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı ve maksimum sıcaklık birinci bloğun üstünde oluşmaktadır. Bütün bloklar arası mesafeler için ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde küçük bir girdap oluşmaktadır. Bloklar arası mesafe arttıkça bütün çukurların ön tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmakta ve mesafe arttıkça girdap boyu artmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bloklar arası mesafenin en yüksek olduğu durumda yeniden birleşme uzunluğunda bir miktar azalma görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.36). Ayrıca son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.345'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.36'da verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.340, 4.341, 4.342 ve 4.343'de üç boyutlu görünümde akışın hız çizgileri verilmiştir.



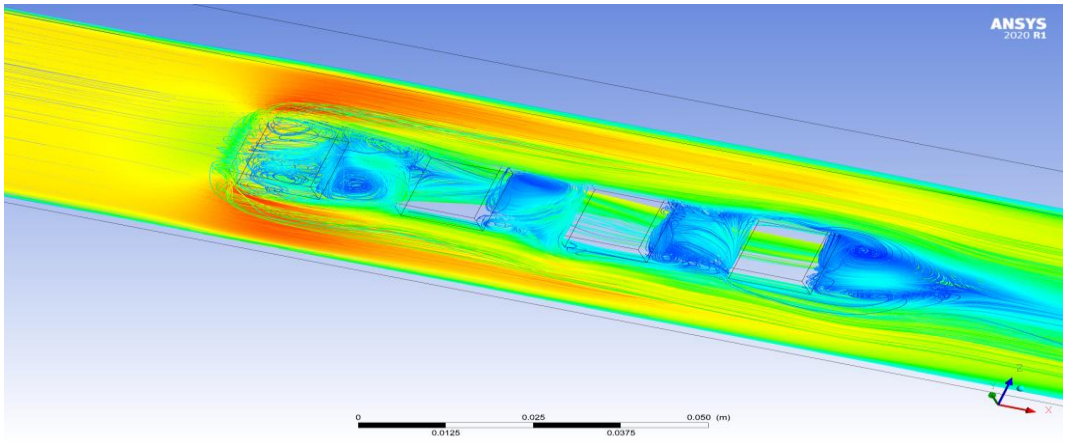
Şekil 4.339. Re=11993 (V=7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe



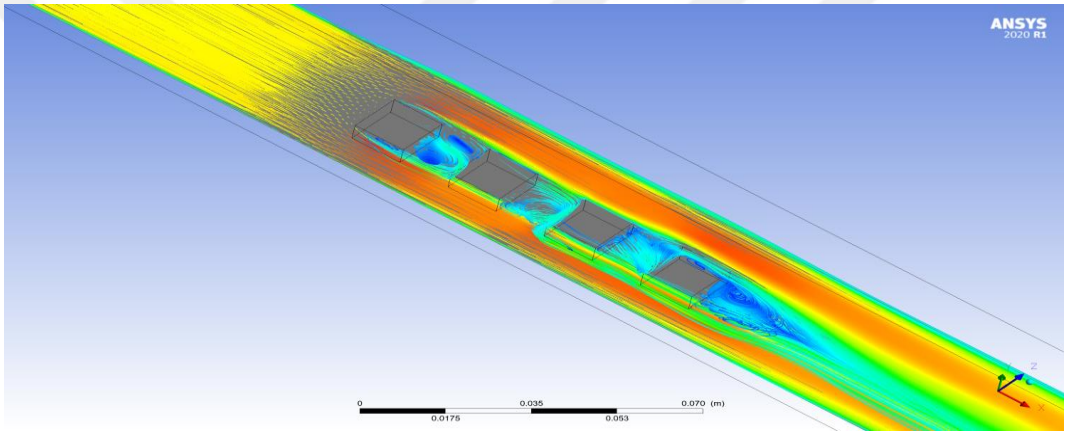
Şekil 4.340. Re=11993 (V=7,21 m/s) için 0.0127 m xy düzleminde hız çizgileri



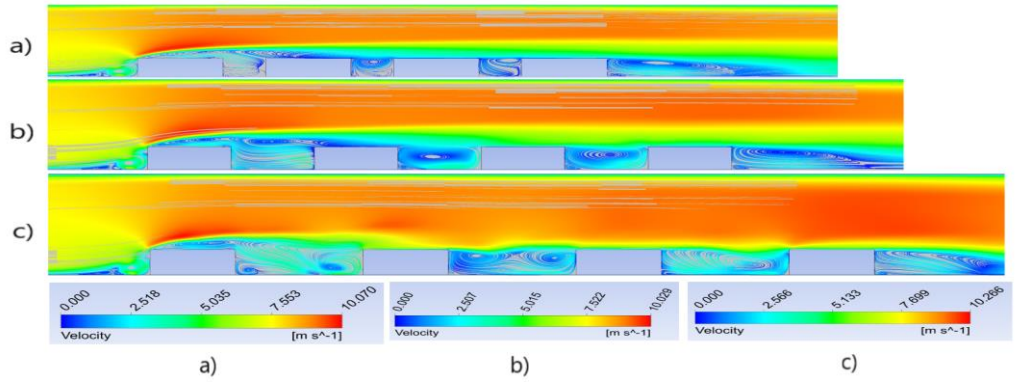
Şekil 4.341. Re=11993 (V=7,21 m/s) için 0.0254 m xy düzleminde hız çizgileri



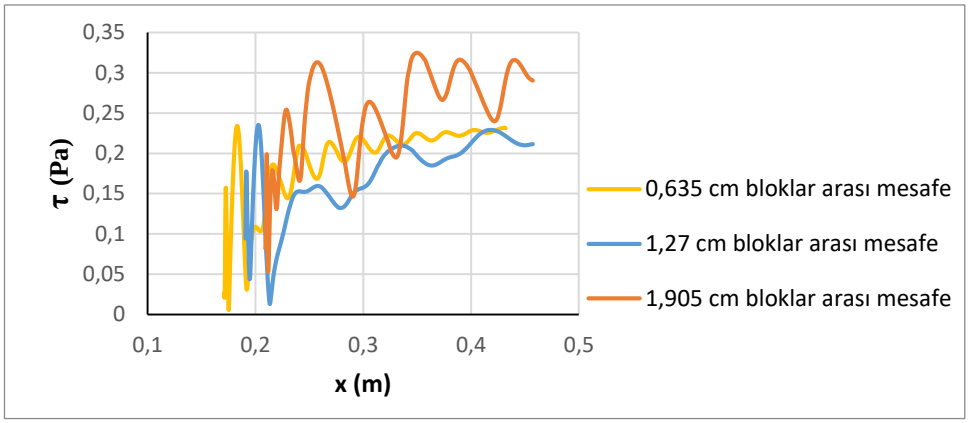
Şekil 4.342. Re=11993 (V=7,21 m/s) için 0.03175 m zx ekseninde hız çizgileri



Şekil 4.343. Re=11993 (V=7,21 m/s) için 0.0635 m zx ekseninde hız çizgileri

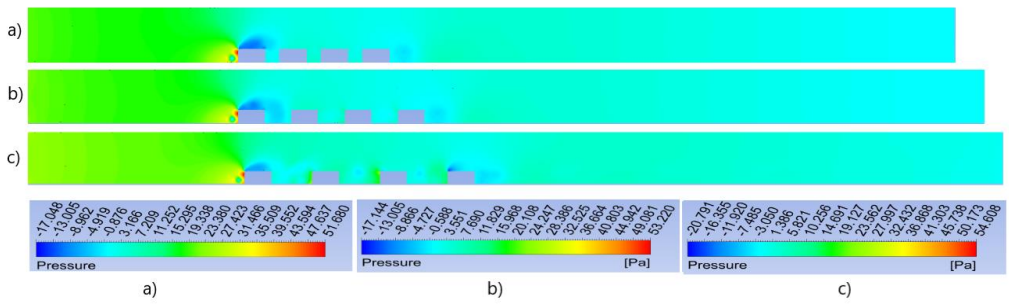


Şekil 4.344. Re=11993 (V=7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

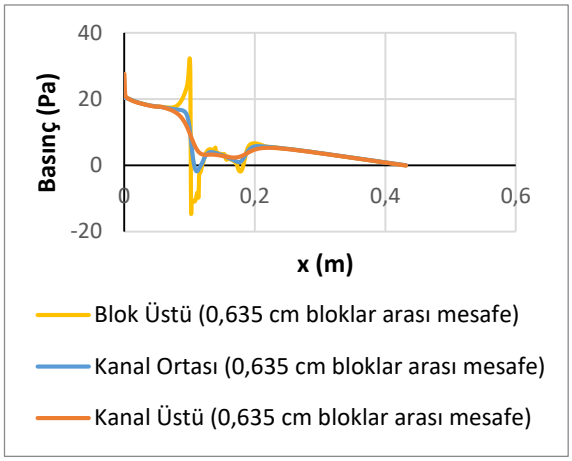


Şekil 4.345. Re=11993 (V=7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin değişimi

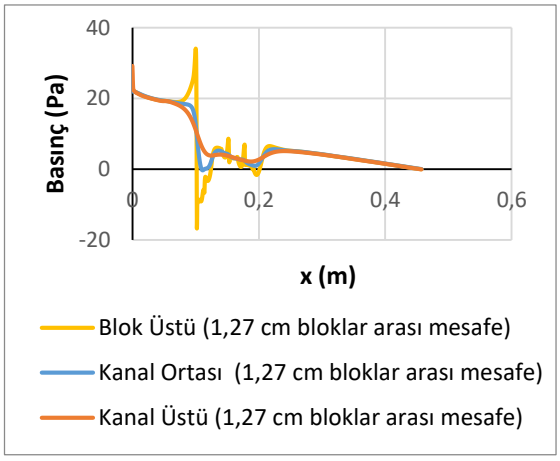
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.346'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.347, 4.348 ve 4.349'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstünde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Bloklar arası mesafe arttıkça Şekil 4.339'dan da görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız a için 9,84 m/s'den b ve c'de 9,93 ve 9,95 m/s olduğundan dolayı Şekil 4.346 b ve c'deki basınçlarda a'dakiyle hemen hemen aynı oranda değişmiştir (a'daki minimum basınç –17 Pa b ve c'deki minimum basınçlar ise -17,15 ve -20,7 Pa olarak hesaplanmıştır).Şekil 4.347, 4.348 ve 4.349'dan da görülebileceği gibi kanal giriş hızları bloklar arası mesafe arttıkça bir miktar artmaktadır (0,635 cm için 20,37 Pa, 1,27 cm için 21,93 Pa ve 1,905 cm bloklar arası mesafe için 23,4 Pa).



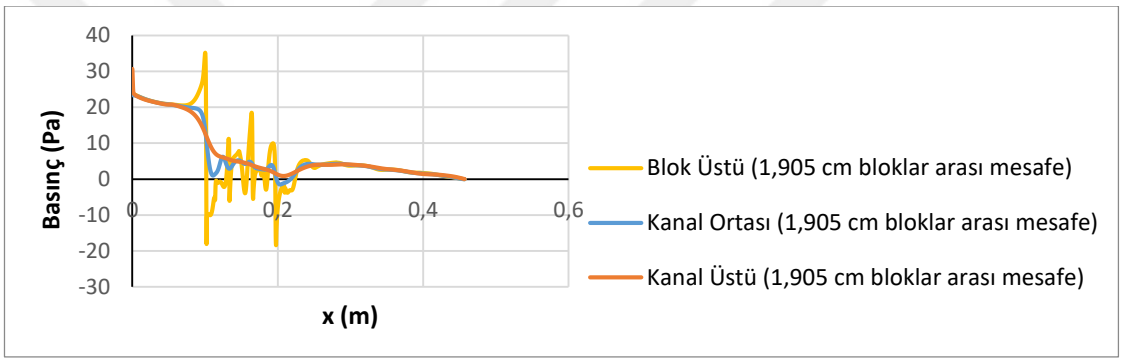
Şekil 4.346. Re=11993 (V=7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe



Şekil 4.347. 0,635 cm bloklar arası için basınç değişimi



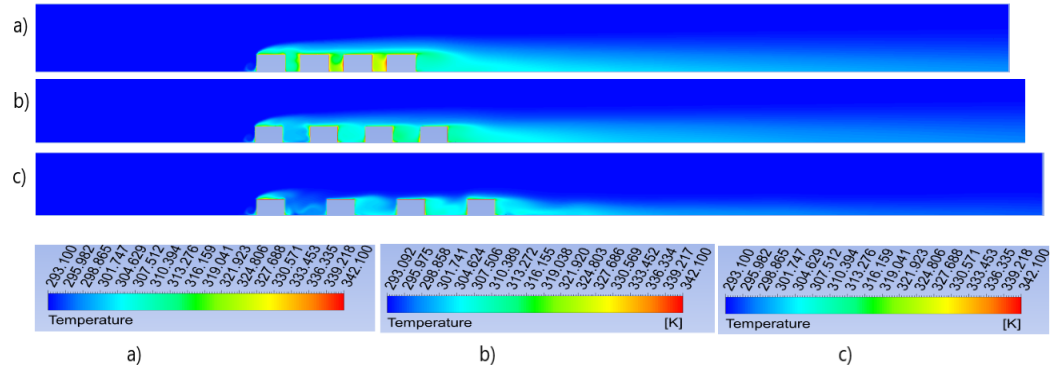
Şekil 4.348. 1,27 cm bloklar arası için basınç değişimi



Şekil 4.349. 1,905 cm bloklar arası için basınç değişimi

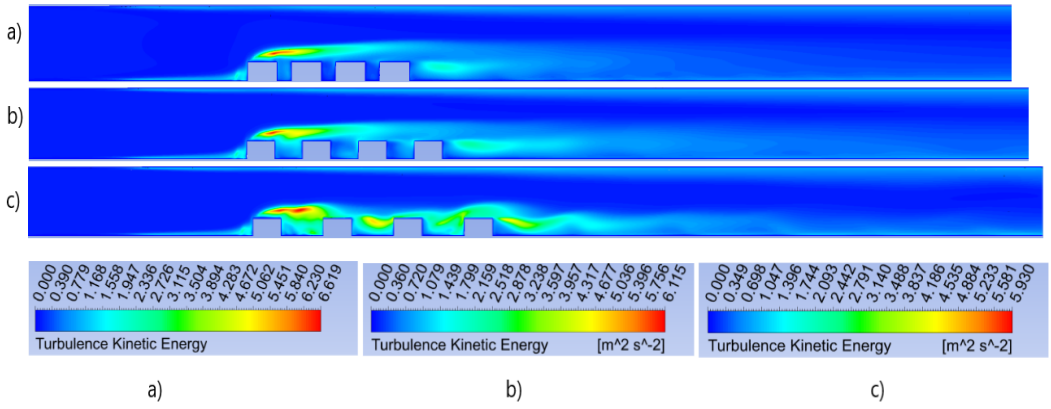
Şekil 4.350'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Bloklar arası mesafenin daha az olduğu Şekil 4.350 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Her üç durumda da son çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurda sıcaklık artmaktadır. Ancak bu etki yongalar arası mesafe arttığında Şekil 4.350 c'den de görülebileceği gibi azalmaktadır. Bu azalma buradaki çukurlardaki ilk

girdapların daha uzun olduğundan dolayı bu girdap akışlarının ikincil girdapla daha fazla temaslarına yorulabilir.



Şekil 4.350. Re=11993 (V=7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

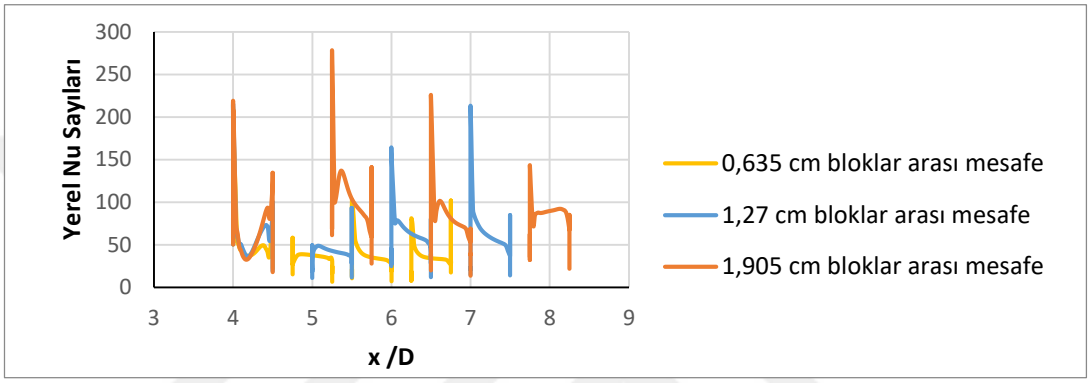
Şekil 4.351'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup bloklar arası mesafe attıkça maksimum etki alanı yayılmaktadır. Hatta en yüksek bloklar arası mesafede dördüncü yongadan sonraya kadar bu etki devam etmektedir. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup bloklar arası mesafe arttıkça çıkışa doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.351. Re=11993 (V=7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm bloklar arası mesafe

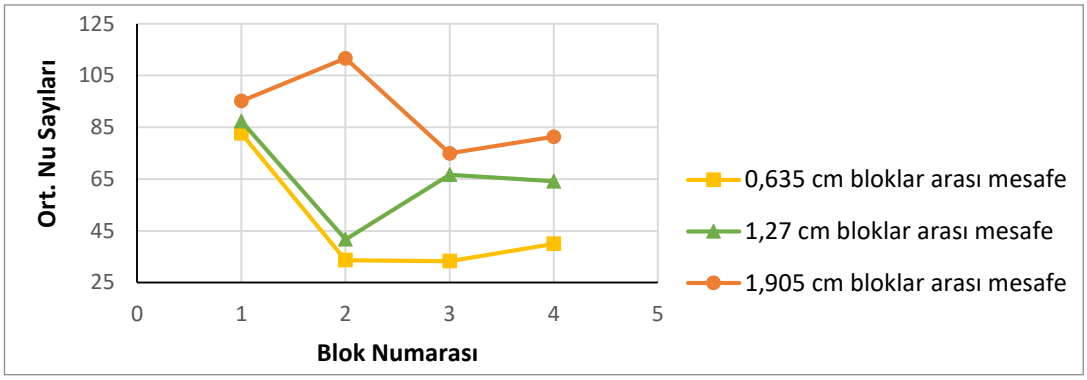
Şekil 4.352'de farklı bloklar arası mesafe için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı en yüksek bloklar arası mesafede ikinci yonga üzerinde elde edilirken bloklar arası mesafenin en az olduğu durumda ise

birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. En düşük yerel Nu sayısı ise bloklar arası mesafenin az olduğu durumlarda ikinci yonga üzerinde elde edilirken bloklar arası mesafenin en yüksek olduğu durumda son yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca üç boyutlu analizlerde bloklar dar bir kanal içerisinde olduğu için blokaj etkisinde kalıp bu düzensizliğe sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.352. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.353'de tüm geometriler için, yani bloklar arası mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.353'de ilk göze çarpan nokta bloklar arası mesafe arttıkça ortalama Nu sayısının sayısının da artmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı düşük bloklar arası mesafelerde birinci yonga üzerinde edilirken en yüksek bloklar arası mesafe ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Bloklar arası mesafenin az olduğu durumlarda da en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilirken en yüksek bloklar arası mesafede ise son yonga üzerinde elde edilmiştir. Bloklar arası mesafenin artmasıyla maksimum ortalama Nu sayısının artması Şekil 4.351'den de görülebileceği gibi türbülansın etki alanının artmasına yorulabilir. Çizelge 4.35'de de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.35'den de görülebileceği gibi bloklar arası mesafenin artması ortalama ısı transferini artmıştır.



Şekil 4.353. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.35. Re=11993 (7,21 m/s)) için bloklar arası mesafe değişimi ile tüm blokların ortalama Nusselt sayıları

Bloklar Arası Mesafe	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	47,41
1,27 cm	65
1,905 cm	90,73

Bloklar arası mesafe için farklı hızlarda karşılaştırma

Çizelge 4.36 incelendiğinde bloklar arası mesafe arttığında yeniden birleşme uzunluklarında bir miktar azalma olmaktadır. Re sayısı arttığında aynı geometri için yeniden birleşme uzunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır.

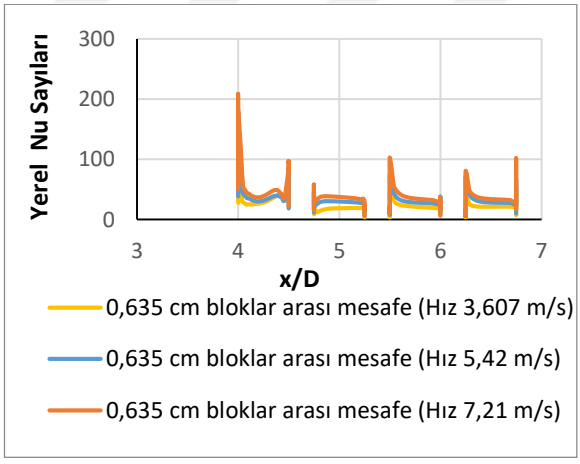
Çizelge 4.36. Farklı hızlarda ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırması

Hız (m/s)	Bloklar Arası Mesafe (cm)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	0,635	0,004021	0,023485
	1,27	0,003471	0,021725
	1,905	0,003468	0,020806

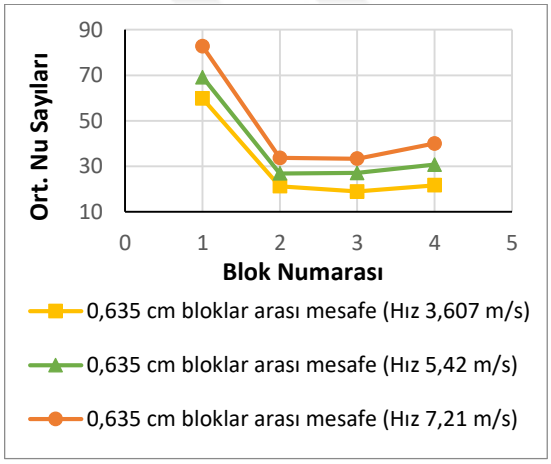
Çizelge 4.36. Farklı hızlarda ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırması (devam)

5,42	0,635	0,004099	0,022547
	1,27	0,003741	0,022448
	1,905	0,003468	0,016843
7,21	0,635	0,00418	0,020901
	1,27	0,004005	0,020824
	1,905	0,002731	0,010427

0,635 cm bloklar arası mesafede hızın artması Şekil 4.354 ve Şekil 4.355'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken ikinci bloktan sonra ortalama Nu sayısında bir artış gözlemlenmiştir.



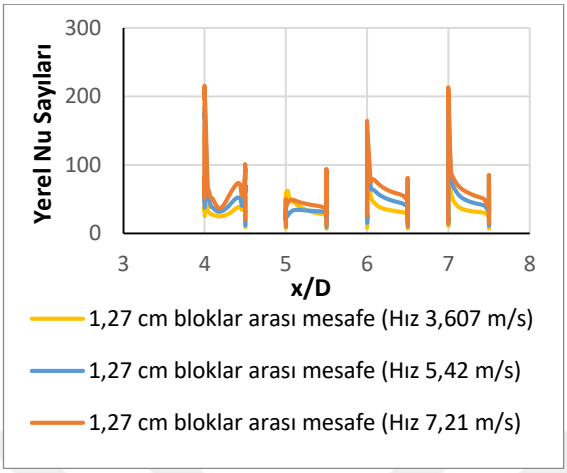
Şekil 4.354. 0,635 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları



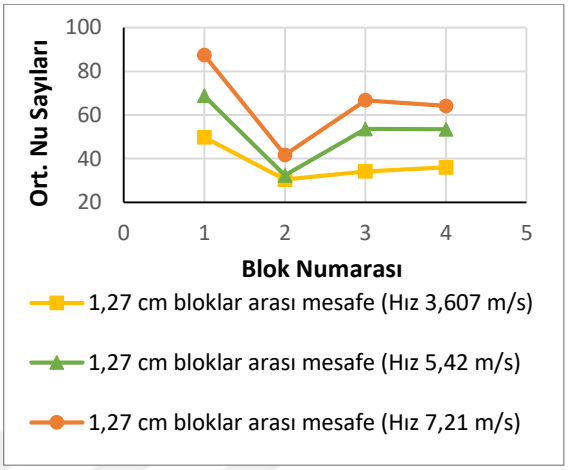
Şekil 4.355. 0,635 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,27 cm bloklar arası mesafede hızın artması Şekil 4.356 ve Şekil 4.357'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken ikinci

bloktan sonra ortalama Nu sayısında bir artış gözlemlenmiştir. En düşük yerel Nu sayısı ikinci blok üzerinde elde edilmiştir.

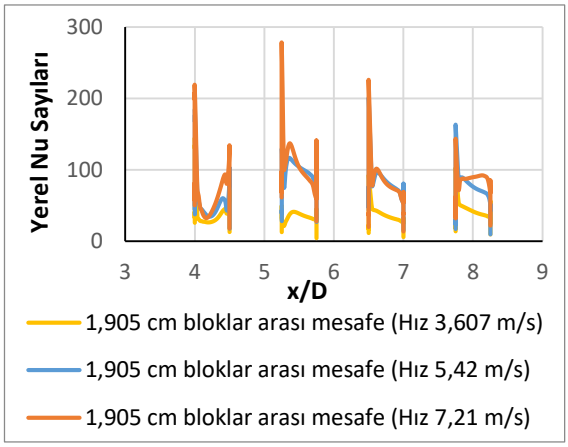


Şekil 4.356. 1,27 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

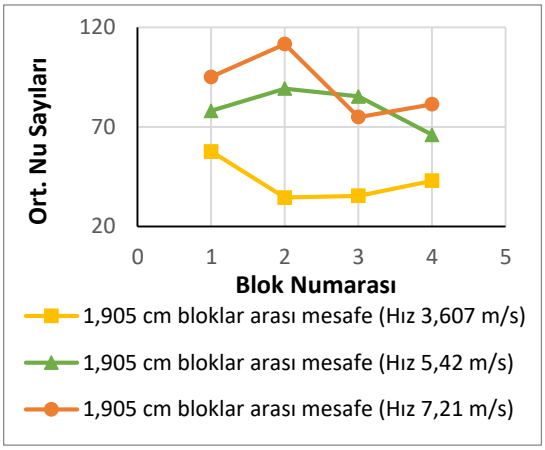


Şekil 4.357. 1,27 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları

1,905 cm bloklar arası mesafede hızın artması (Re sayısının arttırılması) Şekil 4.358 ve Şekil 4.359'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bloklar arası mesafenin artması hız arttıkça düzensizliği artırmış olup farklı hızlarda düşük bloklar arası mesafelerde görülmeyen eğilimlerde farklılıkları burada gözlenmiştir.



Şekil 4.358. 1,905 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

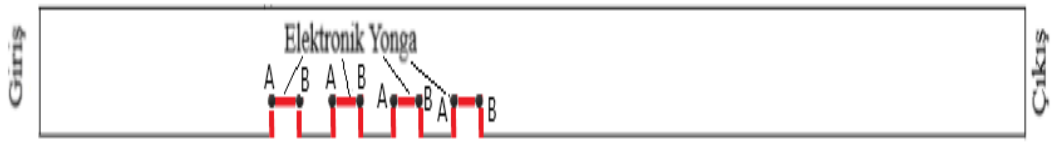


Şekil 4.359. 1,905 cm bloklar arası için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları

Yapılan 9 adet analiz, Çizelge 4.33, 4.34 ve 4.35 incelendiğinde en yüksek ortalama Nu sayısının 1,905 cm bloklar arası mesafede Re=11993 (Hız 7,21 m/s) 90,73 olduğu görülmüştür. Yani en fazla ısı transferinin 7,21 m/s hızda 1,905 cm bloklar arası mesafede olduğu tespit edilmiştir. Bu durum iki boyutlu analiz de de aynı bloklar arası mesafede elde edilmiştir. Chatterjee ve Mondal (2012)'de yaptığı laminer akışlı çalışmasında bloklar arasındaki mesafenin artmasının ortalama Nu sayısını artırdığını gözlemlemişlerdir. Amghar ve diğerleri (2021), ise yatay bir levhada yaptığı türbülanslı çalışmada bloklar arası mesafenin artırılmasının ısı transferini artırdığını gözlemlemişlerdir. Dhingra ve Ghoshdastidar (2016), dikey bir kanalda yaptıkları çalışmada bloklar arası mesafenin artırılmasıyla sol duvardaki sıcaklığın azaldığını dolayısıyla ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bilen ve Yapıcı (2001), akış yönünde bloklar arasındaki mesafenin artırılmasının ısı transferini arttırdığını gözlemlemişlerdir.

4.2.2. 3 boyutlu geometride blok boyunun etkisinin incelenmesi

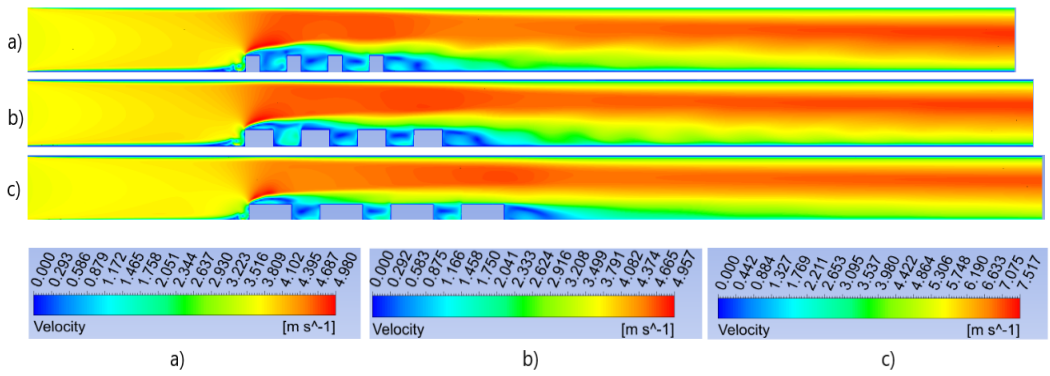
Şekil 4.360'dan da görüldüğü gibi 3 boyutlu analizlerde de kanal ortasındaki levha üzerindeki blok boyu değişimini incelemek amacıyla Şekil 4.360'daki A-B aralığı yani blok boyu mesafesi baz geometride alınan değer dışında 2 değer daha alınarak 3 farklı hızda inceleme yapılmıştır. Baz geometride A-B aralığı 1,27 cm olmakla beraber, her 4 yonga için 0,635 cm ve 1,905 cm de alınarak analiz yapılmıştır. Blok boyu mesafesinin değişimini incelemek için toplam 9 adet analiz yapılmıştır.



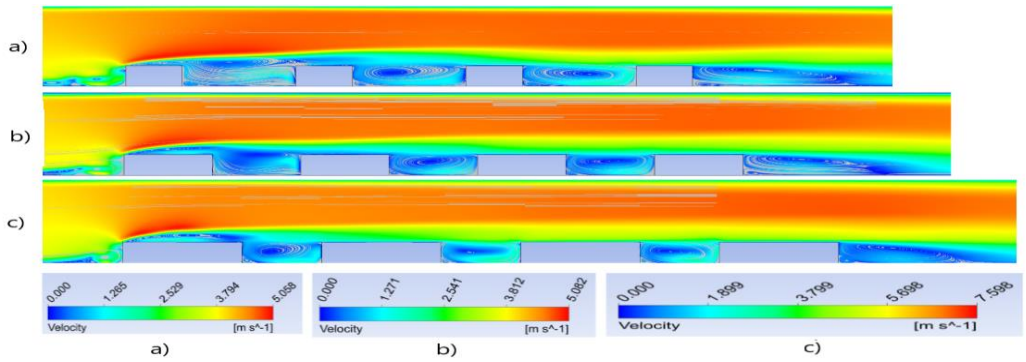
Şekil 4.360. Blok boyunun etkisinin incelenmesi

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

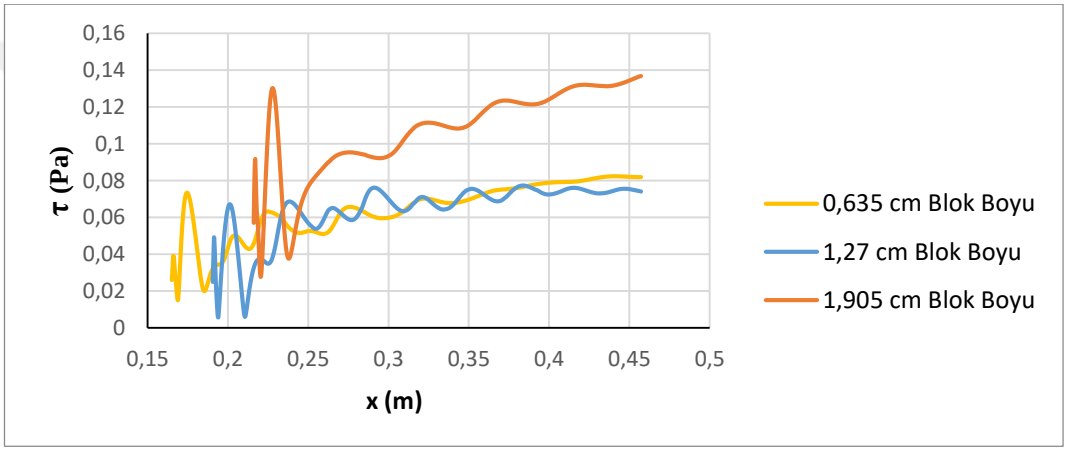
Şekil 4.361 ve 4.362 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün blok boyu mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En küçük blok boyu mesafelerinde ilk çukurun ön alt ucunda bir girdap oluşmazken diğer iki çukurda saat yönünün tersinde bir girdap oluşmaktadır. En yüksek blok boyu mesafesinde bütün çukurların ön tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bütün blok boyu mesafesi için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.40). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. En büyük blok boyu mesafesinde birinci bloğun arkasında olan saat yönündeki 1.girdap birinci bloğun üzerindeki akışı etkilemektedir. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunlukları son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.363'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.40'da verilmiştir.



Şekil 4.361. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi



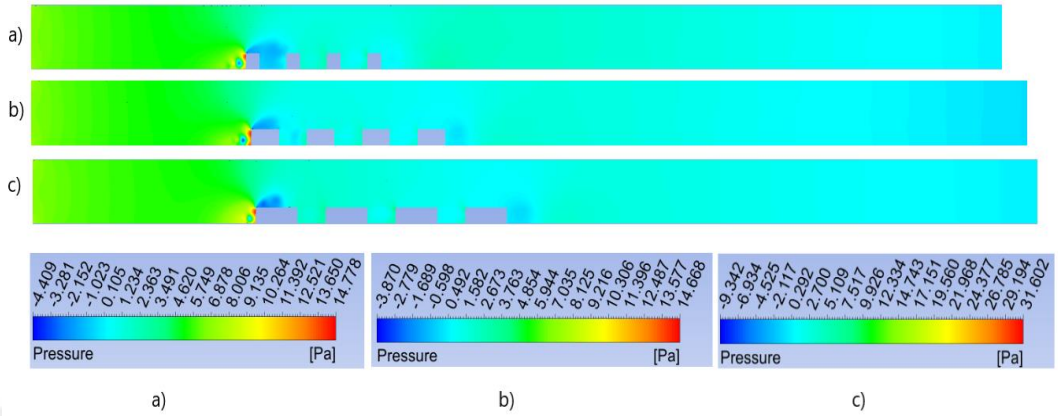
Şekil 4.362. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi



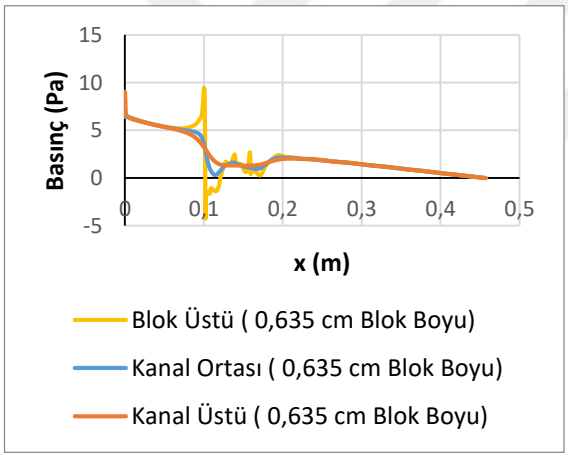
Şekil 4.363. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.364'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.365, 4.366 ve 4.367'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Blok boyu arttıkça düşük basıncın birinci blok üzerindeki etkisi blok sonuna kadar gelmemektedir. Blok boyu mesafesinin artması Şekil 4.361'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.361, a için 5,05 m/s, b ve c'de artarak 5,08 m/s ve 7,5 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.364 a'daki minimum basınçlarda -4,4 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -3,8 ve -9,3 Pa olarak hesaplanmış, Şekil 4.361'de hızlarla benzer oranda azalmıştır. Blok boyu mesafe arttıkça Şekil 4.365, 4.366 ve 4.367'den görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. 0,635 cm blok boyu

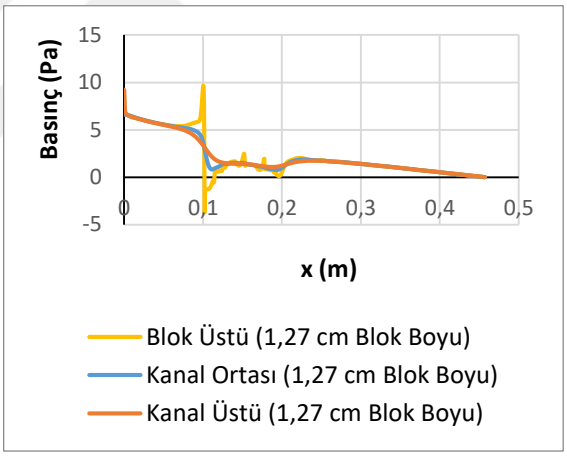
mesafesi için 6,42 Pa, 1,27 cm blok boyu mesafesi için 6,58 Pa ve 1,905 cm blok boyu mesafe için 13,7 Pa elde edilmiştir.



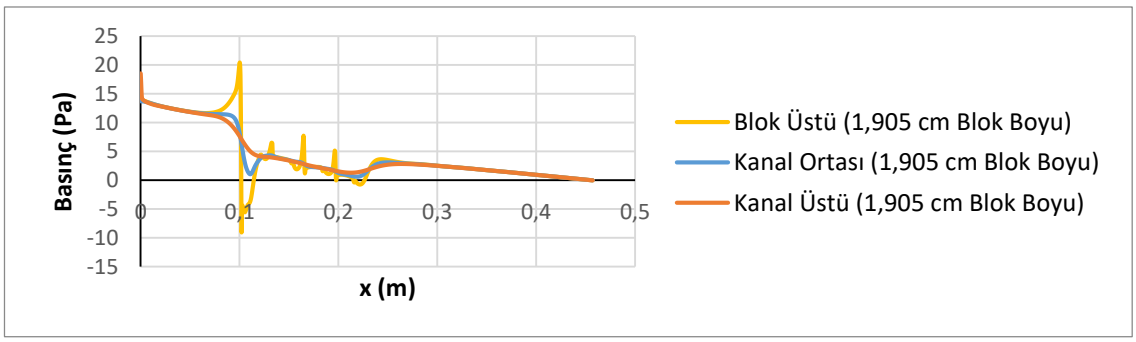
Şekil 4.364. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi



Şekil 4.365. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi

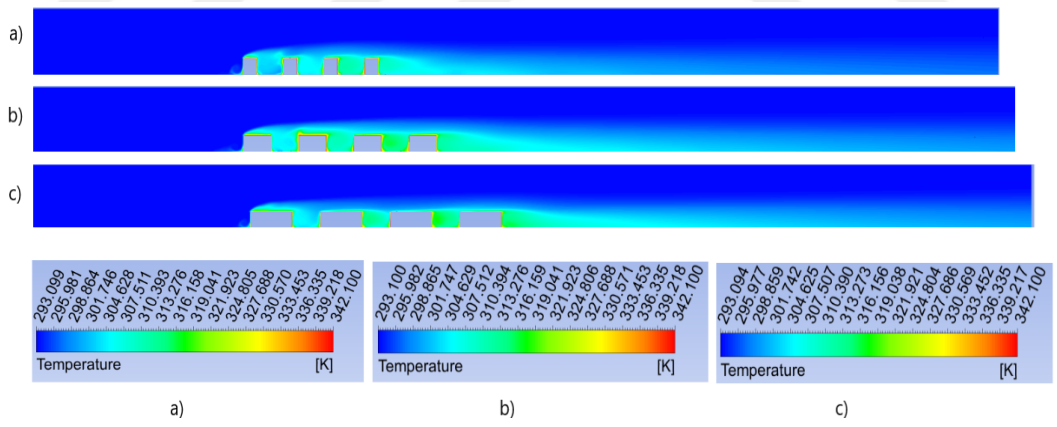


Şekil 4.366. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi



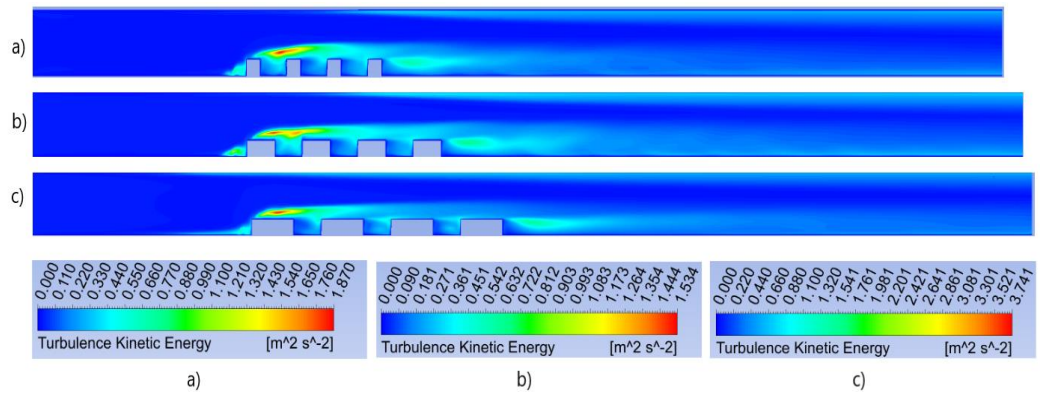
Şekil 4.367. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi

Şekil 4.368'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar blok üstlerinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok boyu mesafesinin daha az olduğu Şekil 4.368 a ve b durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Blok boyu mesafesinin en az olduğu Şekil 4.368 a durumunda Şekil 4.362'den de görülebileceği gibi birinci bloktan sonra öndeki küçük ikincil girdap oluşmadığı için ilk çukurda bu etki hemen hemen yok gibidir. Fakat diğer iki çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurlarda sıcaklık artmaktadır. Bu etki blok boyu mesafesi arttığında çok fazla bir değişime uğramamaktadır. Bu benzerliğin buradaki bloklar arasındaki mesafenin aynı olmasıyla çukurlarda oluşan girdap boyunun benzer olmasına yorulabilir.



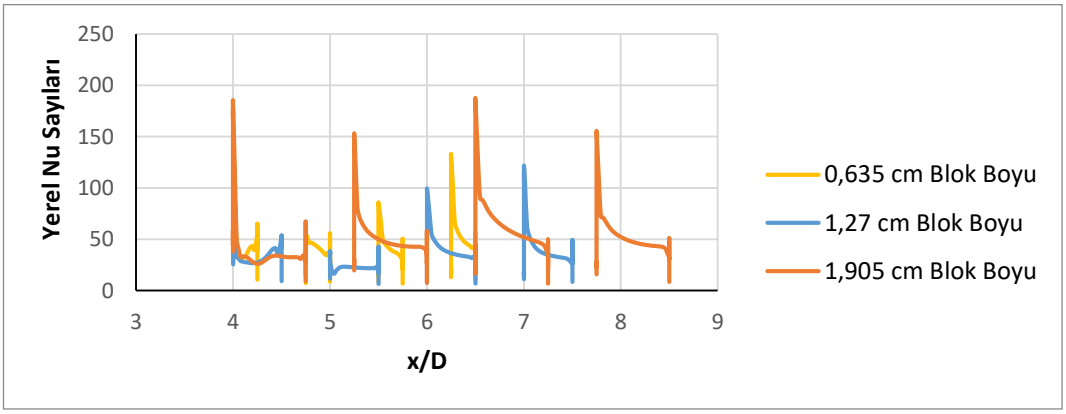
Şekil 4.368. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

Şekil 4.369'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji Şekil 4.369 b ve c durumunda 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok boyu mesafesi azaldıkça ikinci bloğun üzerine doğru yayılmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.369. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

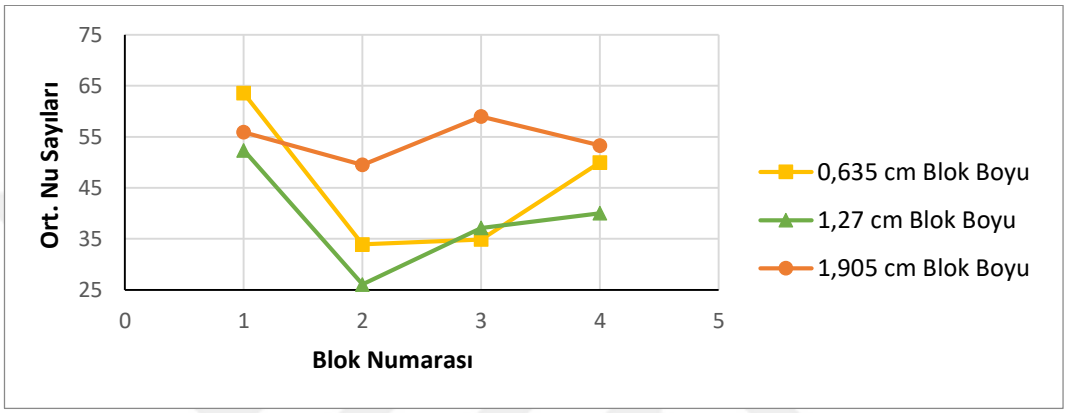
Şekil 4.370'de farklı blok boyu mesafesi için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok boyu mesafenin en az olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülürken üçüncü ve dördüncü yonga üzerinde ikinci yongaya göre tekrar bir artış gözlenmiştir. Blok boyu mesafesi arttıkça elde edilen maksimum Nusselt sayısı birinci blok üzerinde elde edilmiştir. Blok boyu mesafesi değişimiyle elde edilen bu farklılığın genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998). Ayrıca, üç boyutlu geometride bloklar dar bir kanal içerisinde olduğu için blokaj etkisinde kalmasına yorulmaktadır.



Şekil 4.370. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.371'de tüm geometriler için, yani blok boyu mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı

yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı blok boyu mesafelerinin daha az olduğu durumlarda birinci yonga üzerinde edilirken, blok boyu mesafesinin en fazla olduğu durumda en yüksek ortalama Nu sayısı üçüncü yonga üzerinde elde edilmektedir. Tüm durumlarda en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yongada elde edilmiştir. Blok boyu mesafesinin artışıyla ortalama Nu sayısı Çizelge 4.37'den de görülebilir.



Şekil 4.371. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

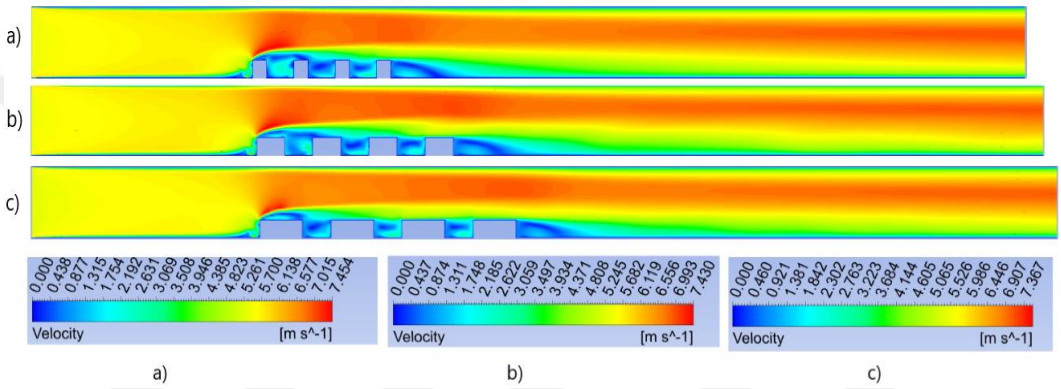
Çizelge 4.37. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Blok Boyu Mesafesi	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	45,57
1,27 cm	38,89
1,905 cm	54,42

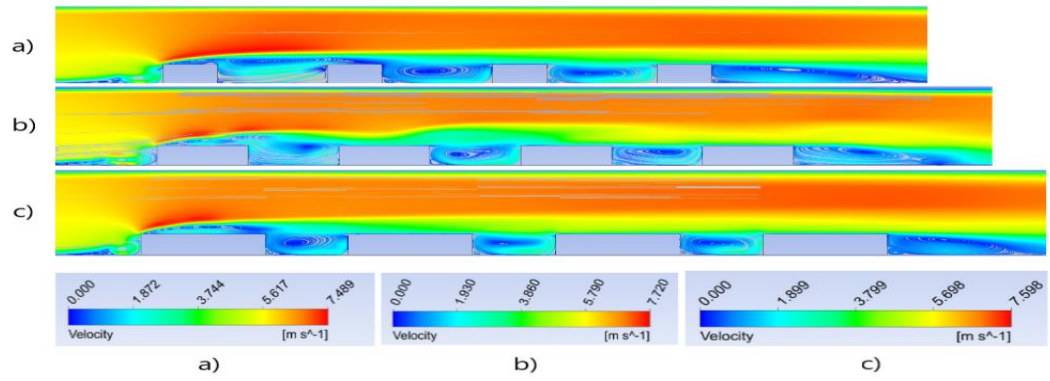
Re= 9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.372 ve 4.373 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün blok boyu mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En küçük blok boyu mesafelerinde ilk çukurun ön alt ucunda bir girdap oluşmazken diğer iki çukurda saat yönünün tersinde bir girdap oluşmaktadır. En yüksek blok boyu mesafesinde bütün çukurların ön tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına

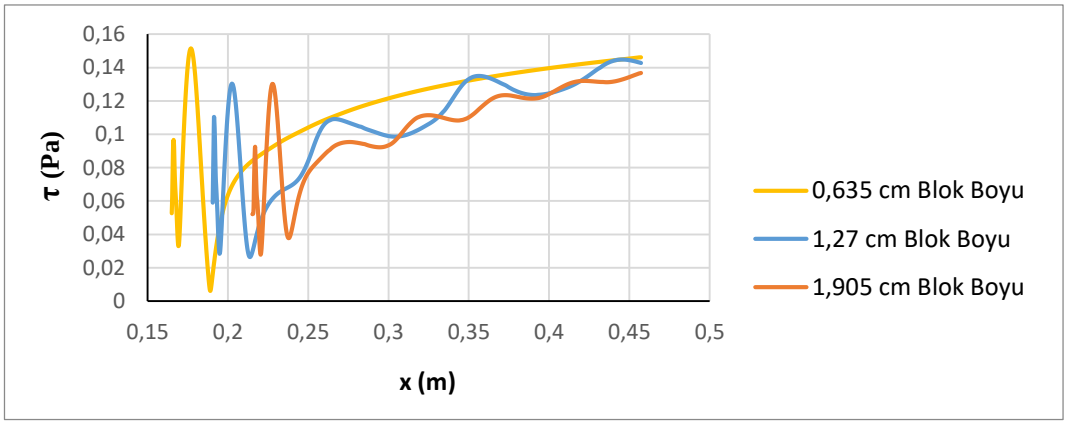
benzemekte ve bütün blok boyu mesafesi için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.40). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. En büyük blok boyu mesafesinde birinci bloğun arkasında olan saat yönündeki 1.girdap birinci bloğun üzerindeki akışı etkilemektedir. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.374'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.40'da verilmiştir.



Şekil 4.372. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

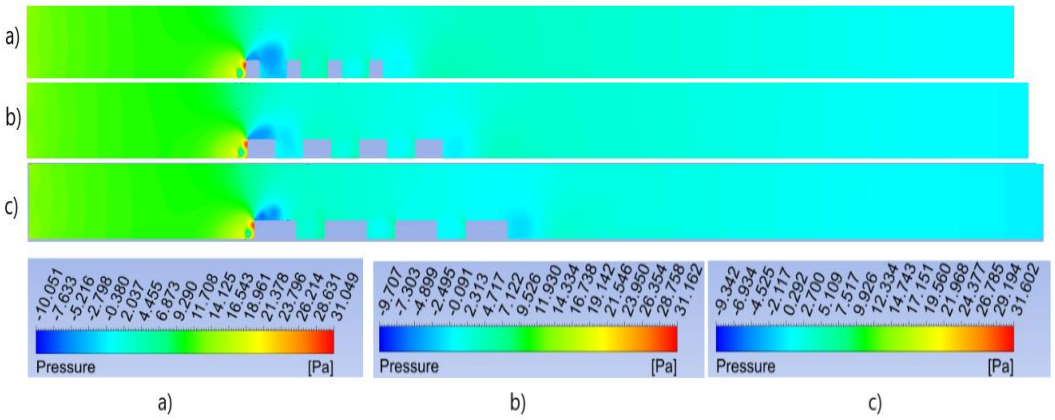


Şekil 4.373. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

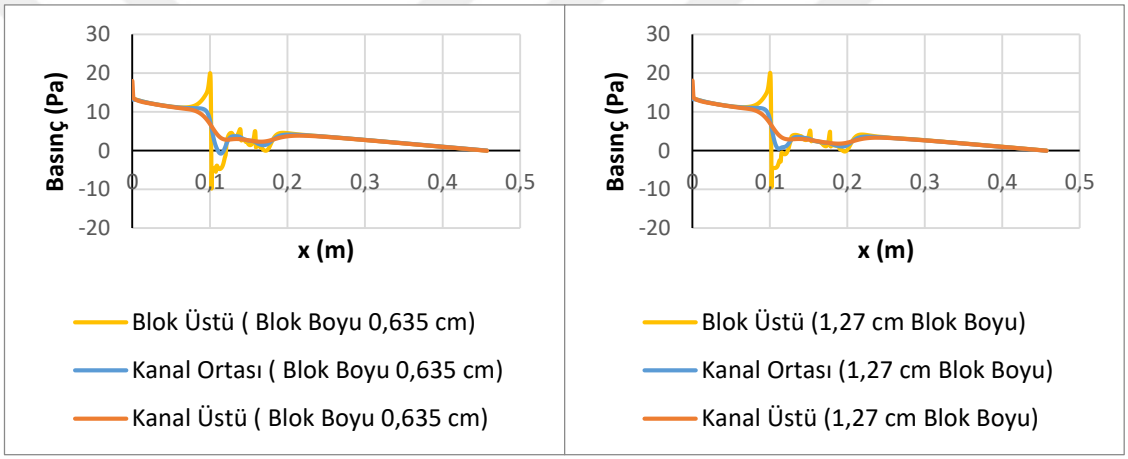


Şekil 4.374. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.375'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.376, 4.377 ve 4.378'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Blok boyu arttıkça düşük basıncın birinci blok üzerindeki etkisi blok sonuna kadar gelmemektedir. Blok boyu mesafesinin artması Şekil 4.372'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.372, a için 7,45 m/s, b ve c'de artarak 7,43 m/s ve 7,36 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.375 a'daki minimum basınçlarda -10,05 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -9,7 Pa ve -9,3 Pa olarak hesaplanmış olup Şekil 4.372'deki hızlarla benzer oranda azalmıştır. Blok boyu mesafe arttıkça Şekil 4.376, 4.377 ve 4.378' den görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. 0,635 cm blok boyu mesafesi için 13,19 Pa, 1,27 cm blok boyu mesafesi için 13,28 Pa ve 1,905 cm blok boyu mesafe için 13,73 Pa elde edilmiştir.

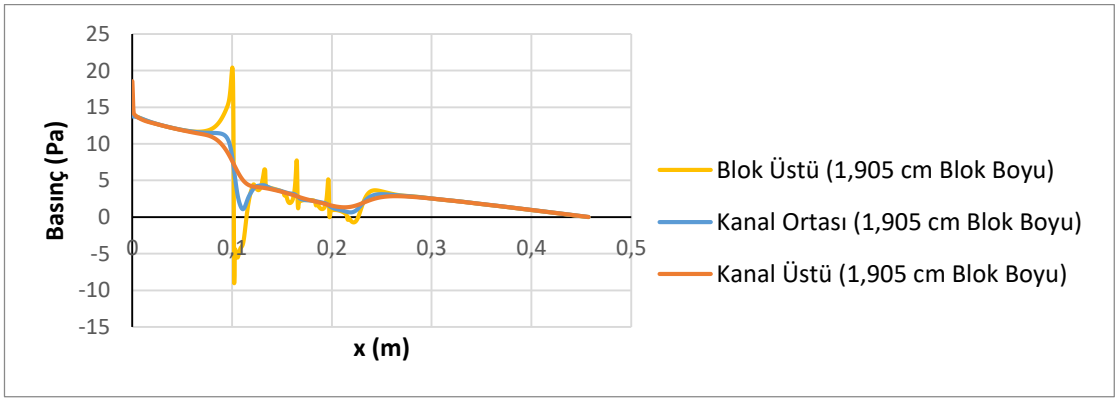


Şekil 4.375. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi



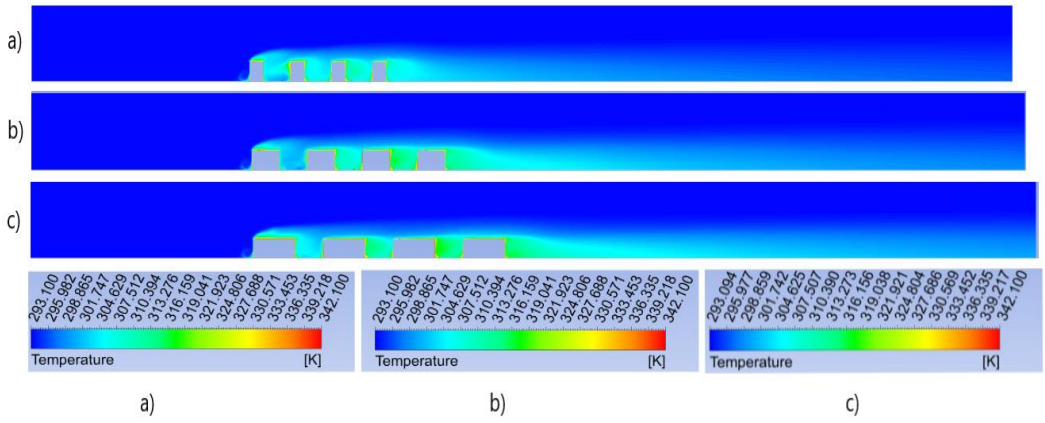
Şekil 4.376. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi

Şekil 4.377. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi



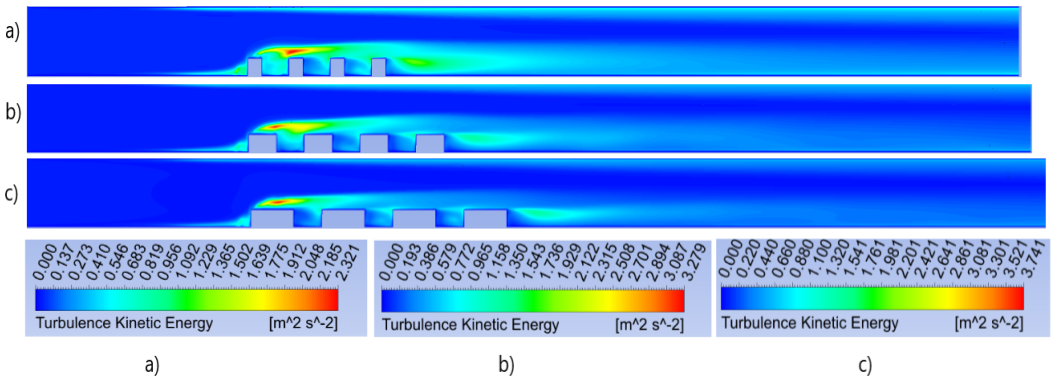
Şekil 4.378. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi

Şekil 4.379'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar blok üstlerinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok boyu mesafesinin daha az olduğu Şekil 4.379 a, b ve c durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Blok boyu mesafesinin en az olduğu Şekil 4.379 a ve b durumunda Şekil 4.373'den de görülebileceği gibi birinci bloktan sonra öndeki küçük ikincil girdap oluşmadığı için ilk çukurda bu etki hemen hemen yok gibidir. Fakat diğer iki çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurlarda sıcaklık artmaktadır. Bu etki blok boyu mesafesi arttığında çok fazla bir değişime uğramamaktadır. Bu benzerliğin buradaki bloklar arasındaki mesafenin aynı olmasıyla çukurlarda oluşan girdap boyunun benzer olmasına yorulabilir.



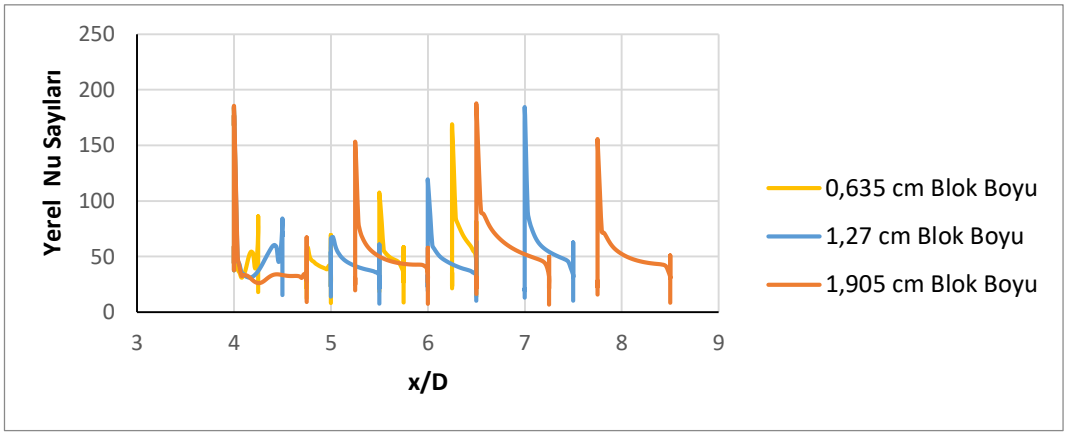
Şekil 4.379. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

Şekil 4.380'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji Şekil 4.380 b ve c durumunda 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok boyu mesafesi azaldıkça ikinci bloğun üzerine doğru yayılmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.380. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

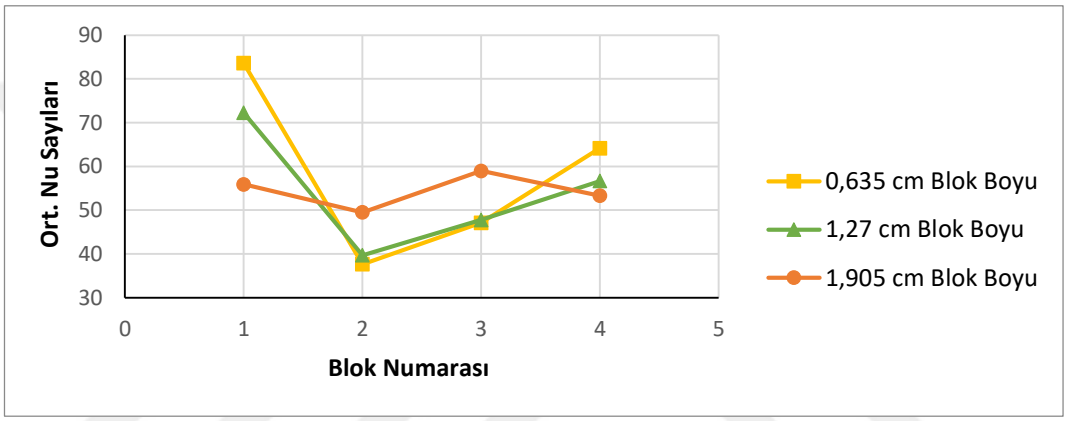
Şekil 4.381' de farklı blok boyu mesafesi için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok boyu mesafenin en az olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülürken üçüncü ve dördüncü yonga üzerinde ikinci yongaya göre tekrar bir artış gözlenmiştir. Blok boyu mesafesi arttıkça elde edilen maksimum Nusselt sayısı birinci blok üzerinde elde edilmiştir. Blok boyu mesafesi değişimiyle elde edilen bu farklılığın genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca, üç boyutlu geometride bloklar dar bir kanal içerisinde olduğu için blokaj etkisinde kalmasına yorulmaktadır.



Şekil 4.381. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.382'de tüm geometriler için, yani blok boyu mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların

sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı blok boyu mesafelerinin daha az olduğu durumlarda birinci yonga üzerinde edilirken, blok boyu mesafesinin en fazla olduğu durumda en yüksek ortalama Nu sayısı üçüncü yonga üzerinde elde edilmektedir. Tüm durumlarda en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yongada elde edilmiştir. Blok boyu mesafesinin artışıyla ortalama Nu sayısının değişimi Çizelge 4.38'den de görüldüğü gibi ısı transferini azaltmaktadır.



Şekil 4.382. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

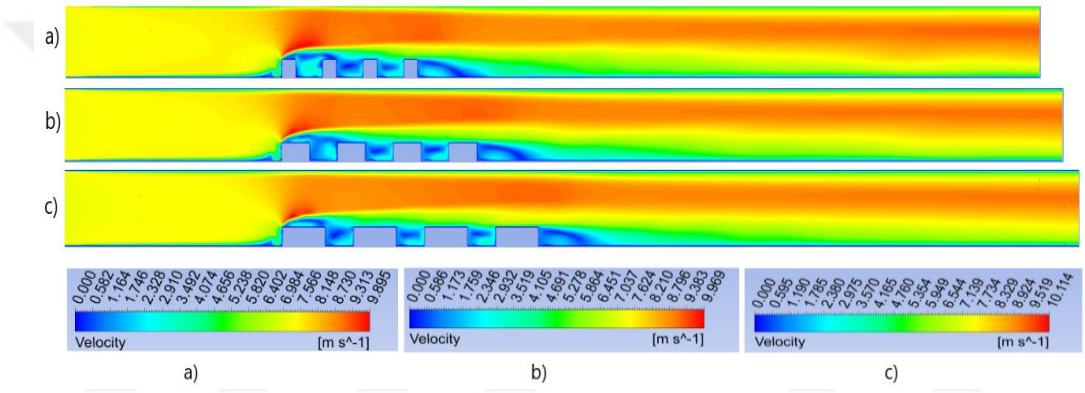
Çizelge 4.38. Re=9015 (5,42 m/s) için her dört yonganın ortalama Nusselt sayıları

Blok Boyu Mesafesi	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	58,14
1,27 cm	54,09
1,905 cm	53,4

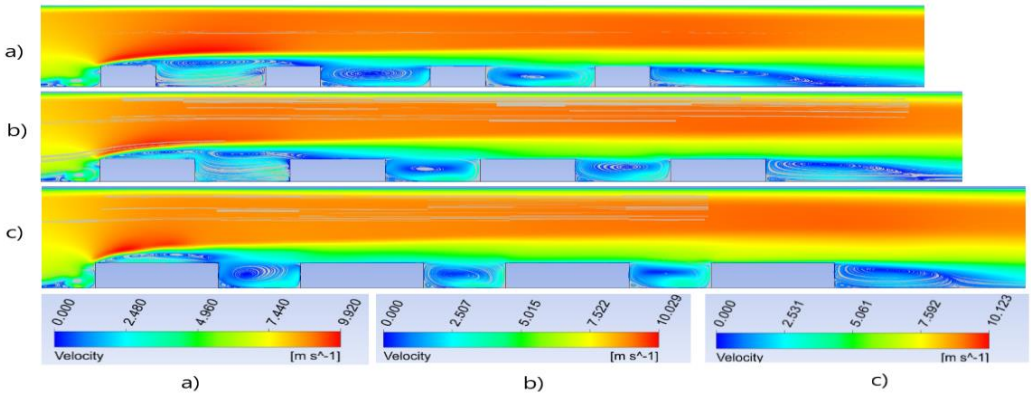
Re= 11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.383 ve 4.384 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün blok boyu mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. En küçük blok boyu mesafelerinde ilk çukurun ön alt ucunda bir girdap oluşmazken diğer iki çukurda saat yönünün tersinde bir

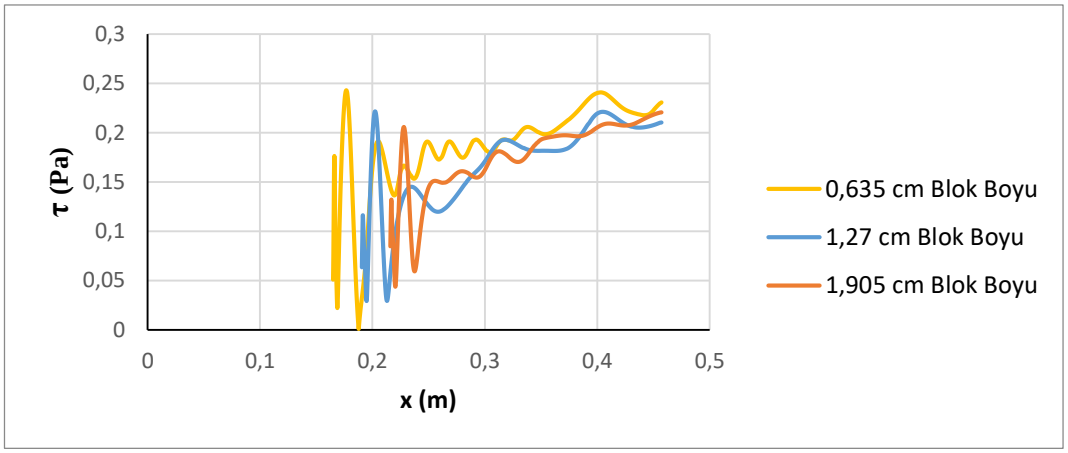
girdap oluşmaktadır. En yüksek blok boyu mesafesinde bütün çukurların ön tarafında saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve bütün blok boyu mesafesi için yeniden birleşme uzunluğu hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.40). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. En büyük blok boyu mesafesinde birinci bloğun arkasında olan saat yönündeki 1.girdap birinci bloğun üzerindeki akışı etkilemektedir. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunlukları son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.385'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.40'da verilmiştir.



Şekil 4.383. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

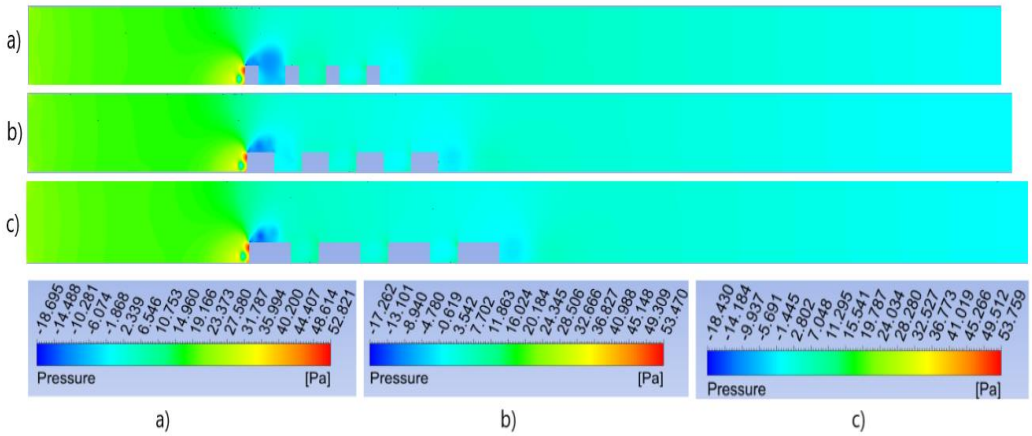


Şekil 4.384. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

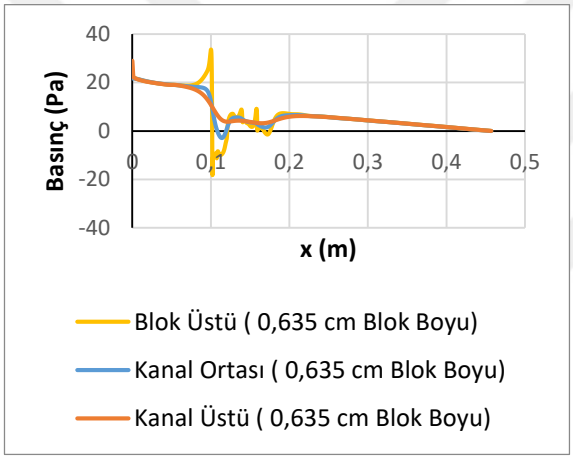


Şekil 4.385. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

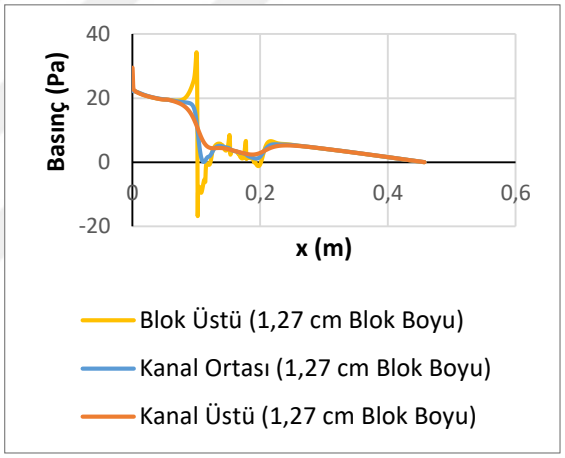
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.386'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.387, 4.388 ve 4.389'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Blok boyu arttıkça düşük basıncın birinci blok üzerindeki etkisi blok sonuna kadar gelmemektedir. Blok boyu mesafesinin artması Şekil 4.383'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.383, a için 9,89 m/s, b ve c'de artarak 9,96 m/s ve 10,12 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.386 a'daki minimum basınçlarda -18,69 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -17,26 Pa ve -18,43 Pa olarak hesaplanmış olup Şekil 4.383'deki hızlarla benzer oranda değişmiştir. Blok boyu mesafe arttıkça Şekil 4.387, 4.388 ve 4.389'dan görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da hemen hemen aynı kalmaktadır. 0,635 cm blok boyu mesafesi için 21,66 Pa, 1,27 cm blok boyu mesafesi için 21,16 Pa ve 1,905 cm blok boyu mesafe için 22,55 Pa elde edilmiştir.



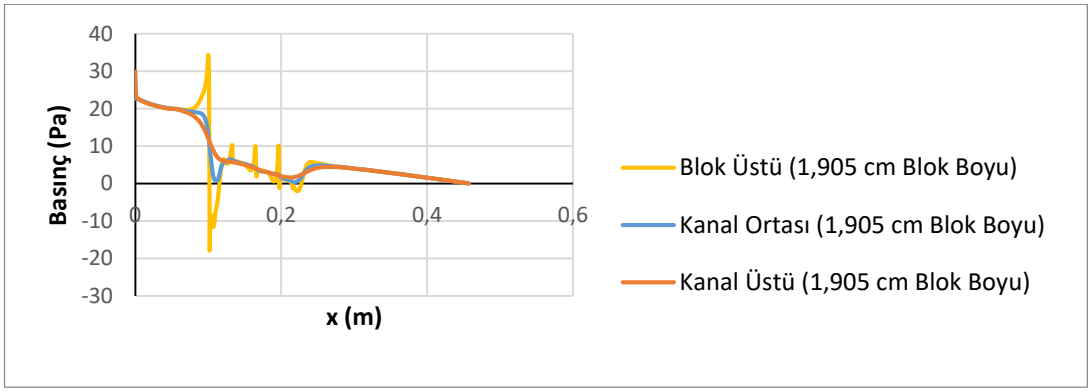
Şekil 4.386. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi



Şekil 4.387. 0,635 cm blok boyu için basınç değişimi

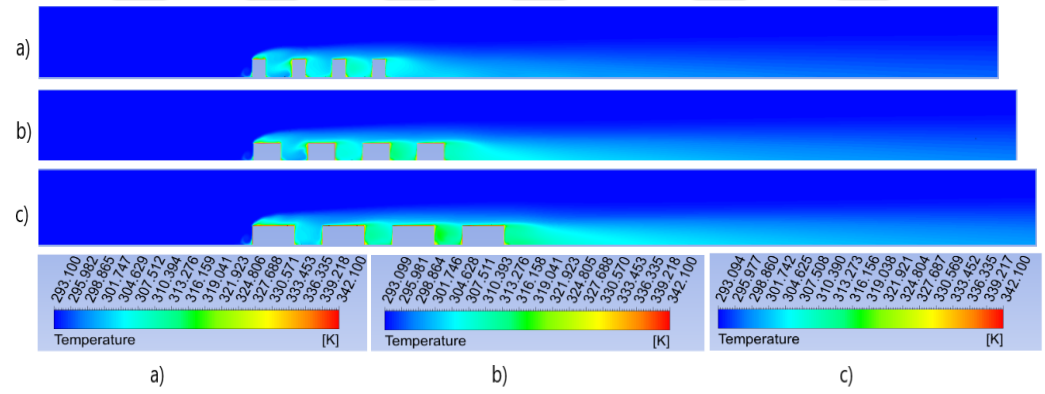


Şekil 4.388. 1,27 cm blok boyu için basınç değişimi



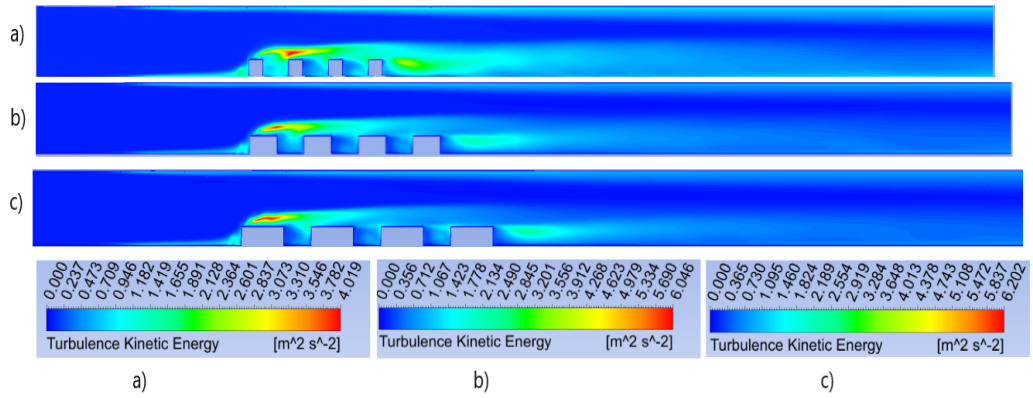
Şekil 4.389. 1,905 cm blok boyu için basınç değişimi

Şekil 4.390'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar blok üstlerinde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Şekil 4.390 a, b ve c durumlarında giriş havası birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Blok boyu mesafesinin en az olduğu Şekil 4.390 a ve b durumunda Şekil 4.384'den de görülebileceği gibi birinci bloktan sonra öndeki küçük ikincil girdap oluşmadığı için ilk çukurda bu etki hemen hemen yok gibidir. Fakat diğer iki çukurda ilk üç bloktaki havanın ısınması yüzünden bu çukurlarda sıcaklık artmaktadır. Bu etki blok boyu mesafesi arttığında çok fazla bir değişime uğramamaktadır. Bu benzerliğin buradaki bloklar arasındaki mesafenin aynı olmasıyla çukurlarda oluşan girdap boyunun benzer olmasına yorulabilir.



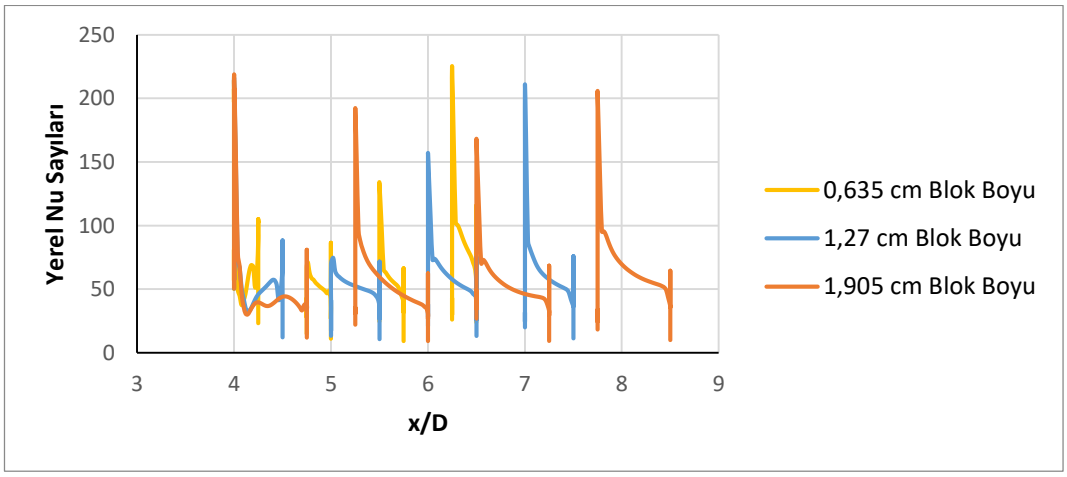
Şekil 4.390. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

Şekil 4.391'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji Şekil 4.391 b ve c durumunda 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok boyu mesafesi azaldıkça ikinci bloğun üzerine doğru yayılmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.391. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm, b) 1,27 cm (baz geometri), c) 1,905 cm blok boyu mesafesi

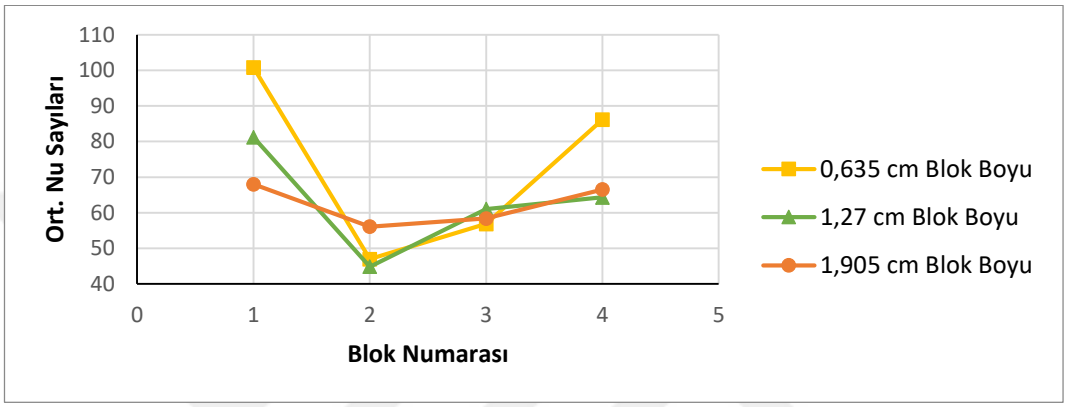
Şekil 4.392'de farklı blok boyu mesafesi için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok boyu mesafenin en az olduğu durumda dördüncü yonga üzerinde görülürken, blok boyu mesafesi arttıkça elde edilen maksimum Nusselt sayısı birinci blok üzerinde elde edilmiştir. Blok boyu mesafesi değişimiyle elde edilen bu farklılığın genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca, üç boyutlu geometride bloklar dar bir kanal içerisinde olduğu için blokaj etkisinde kalmasına yorulmaktadır.



Şekil 4.392. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.393'de tüm geometriler için, yani blok boyu mesafe değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların

sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde elde edilirken, tüm durumlarda en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yongada elde edilmiştir. Blok boyu mesafesinin artışıyla ortalama Nu değişimi Çizelge 4.39'dan da görüldüğü gibi ısı transferi azalmaktadır.



Şekil 4.393. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.39. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Blok Boyu Mesafesi	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	72,69
1,27 cm	62,86
1,905 cm	62,23

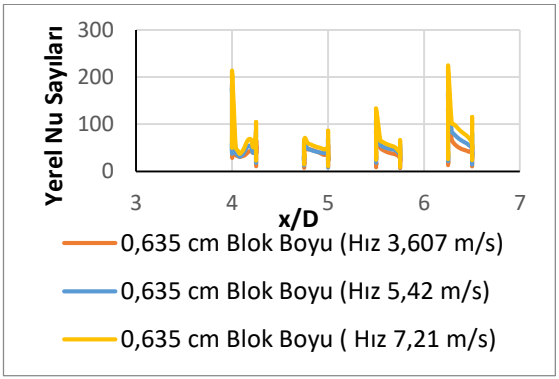
Blok boyu mesafesinin farklı hızlarda karşılaştırılması

Çizelge 4.40 incelendiğinde blok boyu arttığında yeniden birleşme uzunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır. Re sayısı arttığında aynı geometri için yeniden birleşme uzunlukları çok az bir miktar azalmaktadır. Pulat (1997), Türbülanslı akışta, Reynolds sayısının artmasıyla yeniden birleşme uzunluğunun azalmakta olduğunu ve 20000 Reynolds sayısından sonra yeniden birleşme uzunluğunun değişmediğini gözlemlemiştir.

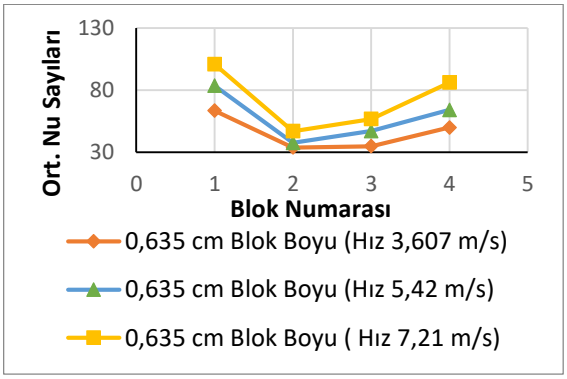
Çizelge 4.40. Farklı hızlarda ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Blok Boyu (cm)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	0,635	0,003802	0,020475
	1,27	0,003471	0,020023
	1,905	0,004346	0,02173
5,42	0,635	0,004095	0,0238985
	1,27	0,005272	0,023226
	1,905	0,005334	0,023032
7,21	0,635	0,003802	0,02281
	1,27	0,004272	0,022158
	1,905	0,004346	0,021247

0,635 cm blok boyu mesafesinde hızın artması Şekil 4.394 ve Şekil 4.395'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken ikinci blokta en düşük değerini almaktadır.

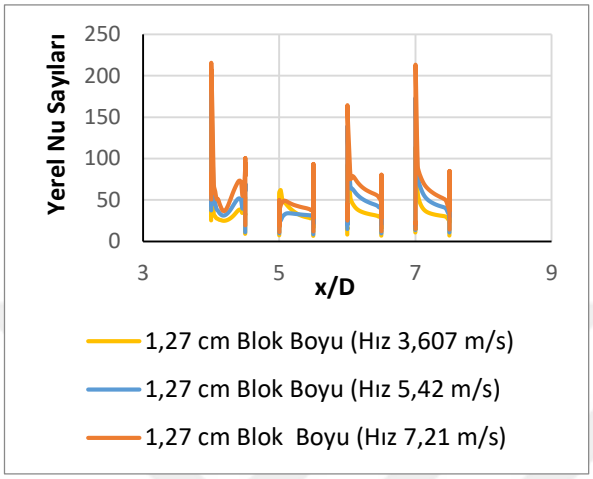


Şekil 4.394. 0,635 cm blok boyunda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

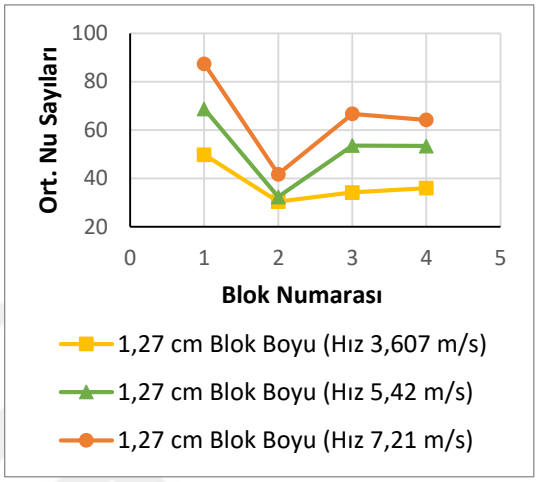


Şekil 4.395. 0,635 cm blok boyunda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,27 cm blok boyu mesafesinde hızın artması Şekil 4.396 ve Şekil 4.397'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken ikinci blokta en düşük değerini almaktadır.

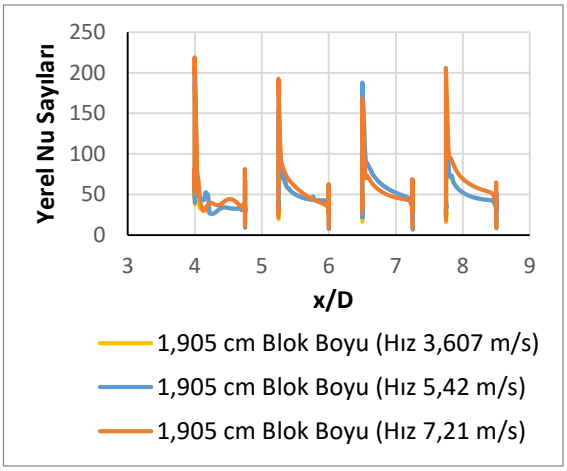


Şekil 4.396. 1,27 cm blok boyunda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

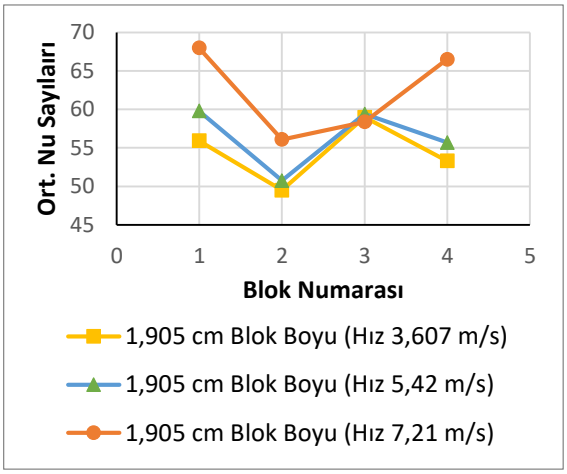


Şekil 4.397. 1,27 cm blok boyunda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,905 cm blok boyu mesafesinde hızın artması (Re sayısının artması) Şekil 4.398 ve Şekil 4.399'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken ikinci blokta en düşük değerini almaktadır.



Şekil 4.398. 1,905 cm blok boyunda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları



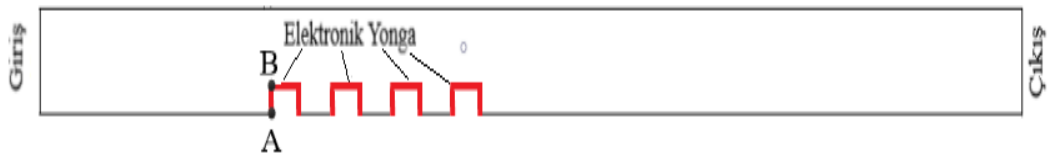
Şekil 4.399. 1,905 cm blok boyunda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

Yapılan 9 adet analiz, Çizelge 4.37, 4.38 ve 4.39 incelendiğinde en yüksek ortalama Nu sayısının 0,635 cm blok boyu mesafesinde Re=11993 (Hız 7,21 m/s) 72,69 olduğu görülmüştür. Yani en fazla ısı transferinin 7,21 m/s hızda 0,635 cm blok boyu mesafesinde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan 2 boyutlu analizlerde de en fazla ısı transferi gene aynı geometri ve hız için elde edilmiştir. Türkoğlu ve Yücel (1995), dikey bir kanalda düşük Re sayılarında yaptıkları çalışmada, blok boyunun artmasıyla ortalama Nu sayısının önce düştüğünü, sonra bu düşme eğiliminin azalarak devam ettiğini gözlemlemişlerdir. Xu ve diğerleri (1998), dikey bir kanalda akışkan olarak FC-72 ile yaptıkları çalışmalarında kanal genişliğinin ısı kaynağının uzunluğuna (blok boyu) oranı arttıkça ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Leung ve diğerleri (2000), yatay bir kanalda laminer akışta yaptıkları çalışmalarında yongaların boyu arttıkça ısı transferinin azaldığını tespit etmişlerdir. Dhingra ve Ghoshdastidar (2016), dikey bir kanalda yaptıkları çalışmada blok boyunun artırılmasıyla sağ duvardaki sıcaklığın arttığını dolayısıyla ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

4.2.3. 3 boyutlu geometride blok yüksekliğinin incelenmesi

Şekil 4.400'den de görüldüğü gibi blok yüksekliğinin değişimini incelemek amacıyla Şekil 4.400'deki A-B aralığı yani blok yüksekliği mesafesi baz geometride alınan değer dışında 2 değer daha alınarak 3 farklı hızda inceleme yapılmıştır. Baz geometride A-B aralığı 0,635 cm olmakla beraber, her 4 yonga için 1,27 cm ve 1,905 cm de alınarak analiz

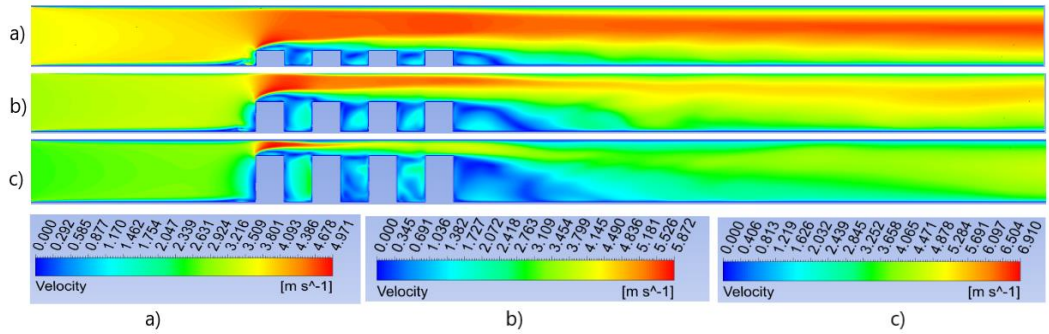
yapılmıştır. Blok yüksekliği mesafesinin değişimini incelemek için toplam 9 adet analiz yapılmıştır.



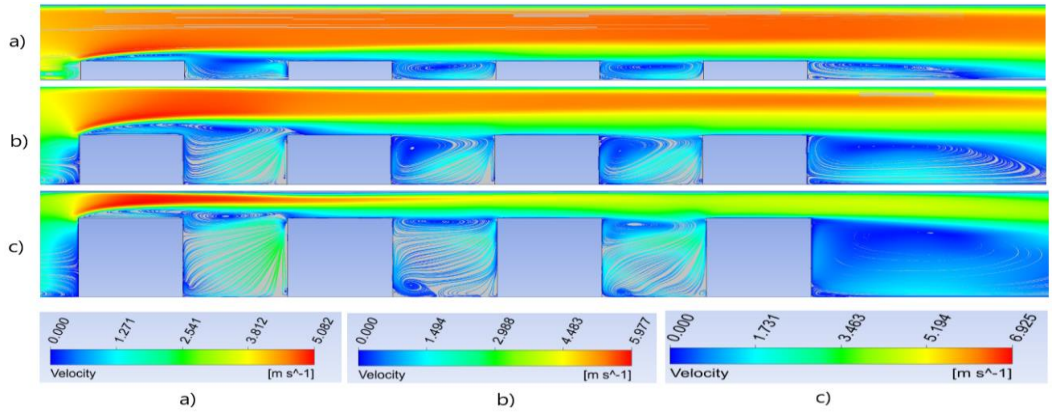
Şekil 4.400. Blok yüksekliği değişiminin gösterimi

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

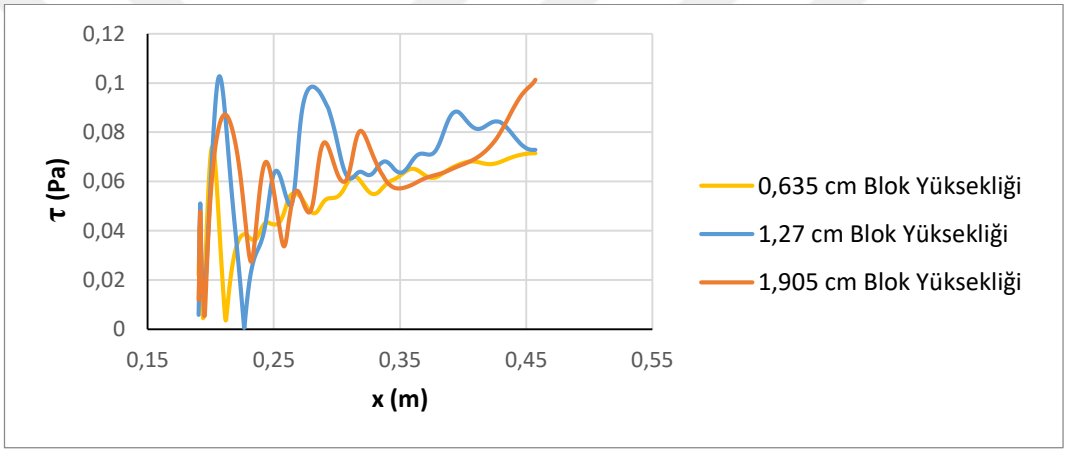
Şekil 4.401 ve 4.402 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En yüksek blok yüksekliği mesafesinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün blok yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Blok yüksekliği arttıkça çukurların ön tarafında oluşan saat yönünün tersindeki girdaplar oluşmamaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve blok yüksekliği arttıkça yeniden birleşme uzunlukları da artmaktadır (Bkz. Çizelge 4.44). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.403'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.44'de verilmiştir.



Şekil 4.401. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



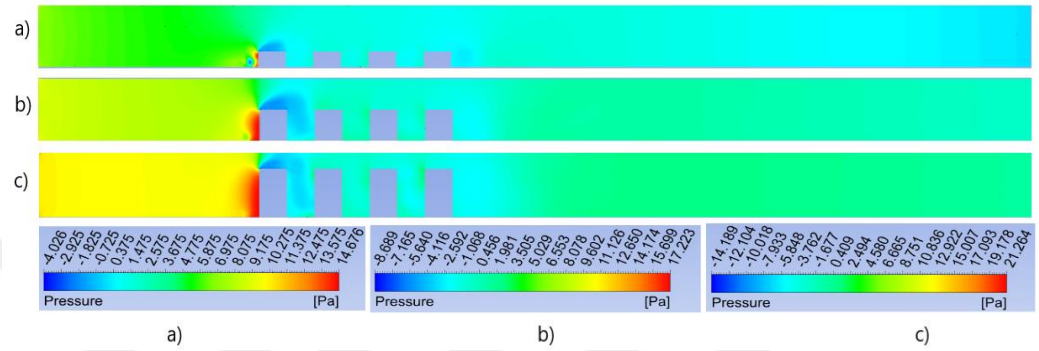
Şekil 4.402. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



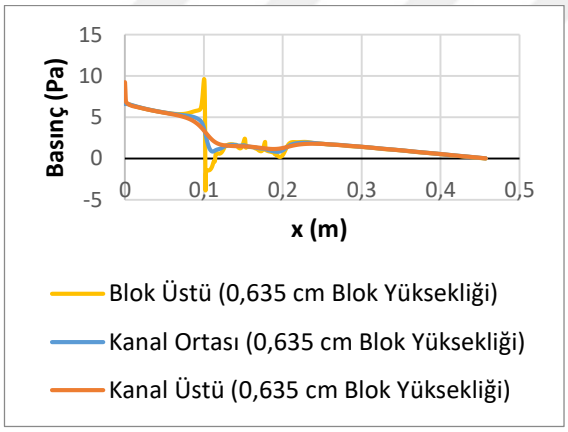
Şekil 4.403. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.404'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.405, 4.406 ve 4.407'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Şekil 4.404 b ve c durumunda yani blok yüksekliğinin daha fazla olduğu durumlarda düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Blok yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.401'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.401 a için 4,97 m/s, b ve c'de artarak 5,87 m/s ve 6,91 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.403'deki minimum basınç da Şekil 4.401'deki hızlarla benzer oranda değişerek a'da -4 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -8,6 Pa ve -14 Pa olarak hesaplanmıştır.

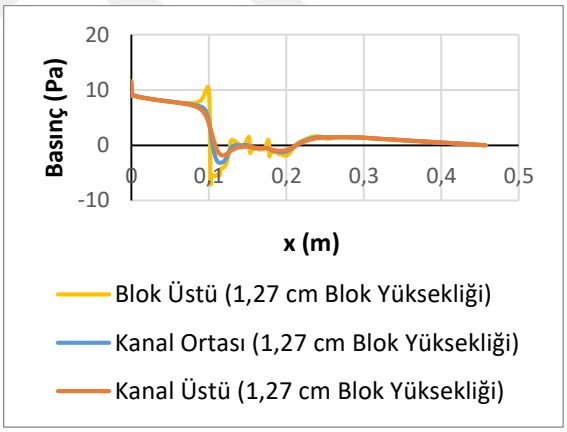
Blok yüksekliği arttıkça Şekil 4.405, 4.406 ve 4.407'den görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. Giriş basınçları, 0,635 cm yüksekliği mesafesi için 6,59 Pa, 1,27 cm blok yüksekliği için 9,03 Pa ve 1,905 cm yüksekliği için 13,35 Pa olarak elde edilmiştir. Blok yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu artış soğutma için kullanılacak fanın gücünün artırılması gerektiğini vurgulamaktadır



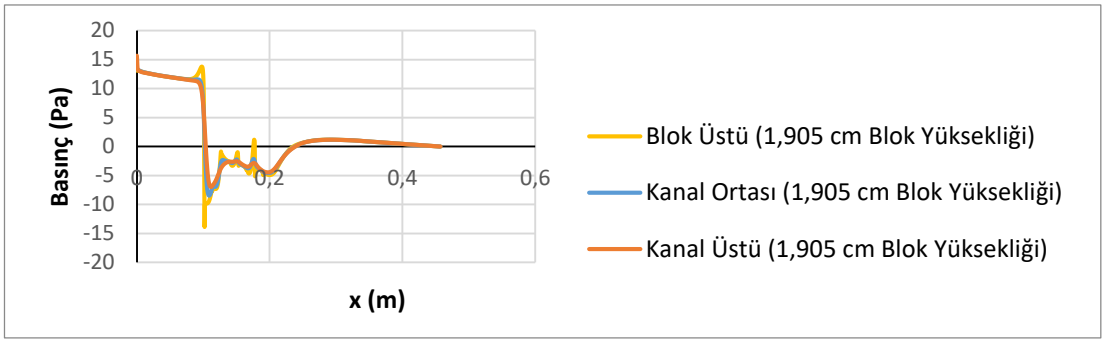
Şekil 4.404. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



Şekil 4.405. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

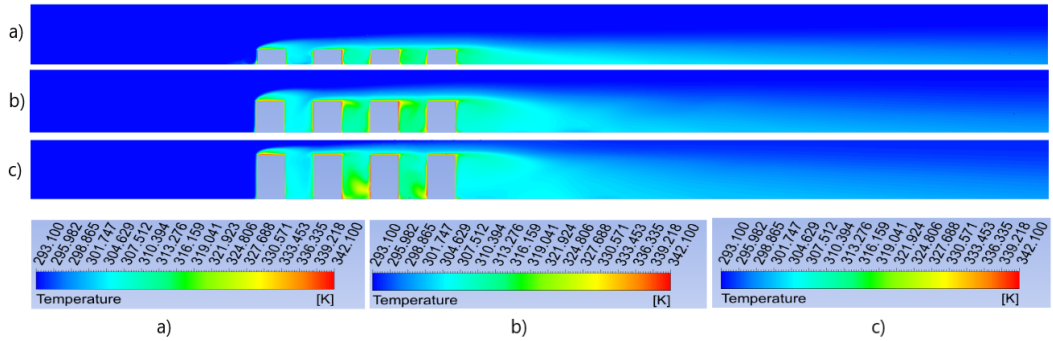


Şekil 4.406. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi



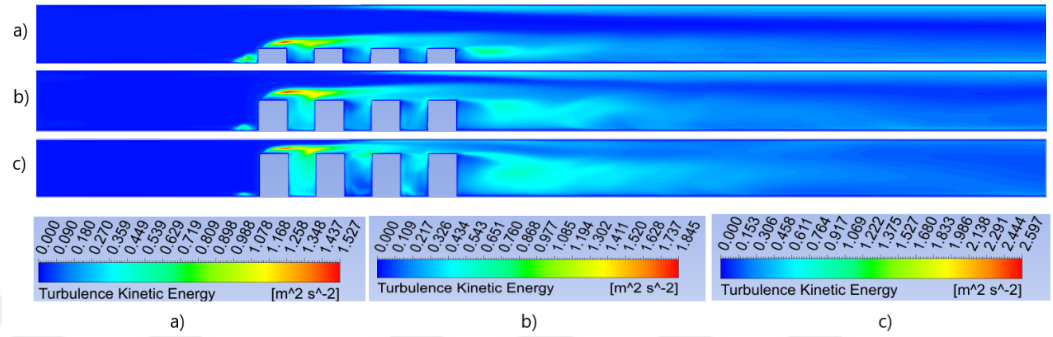
Şekil 4.407. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.408'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar blok üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok yüksekliğinin daha fazla olduğu Şekil 4.408 c durumda giriş havası birinci blokta daha fazla ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum blok yüksekliği azaldıkça etkisini azaltmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı blok yüksekliği arttıkça artmaktadır. Çünkü blok yüksekliği arttıkça kesit daraldığından akışkan daha fazla hızlanmakta daha yüksekten gelerek etki alanını artırmaktadır.



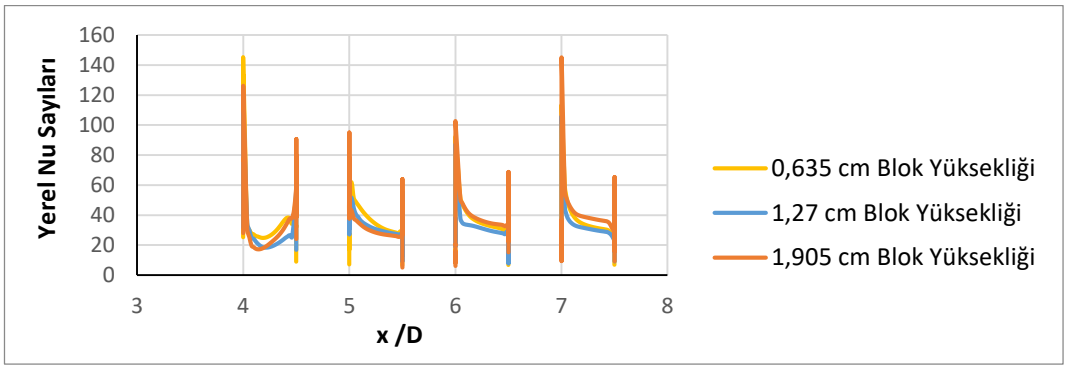
Şekil 4.408. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.409'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok yüksekliği attıkça maksimum etki alanı azalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



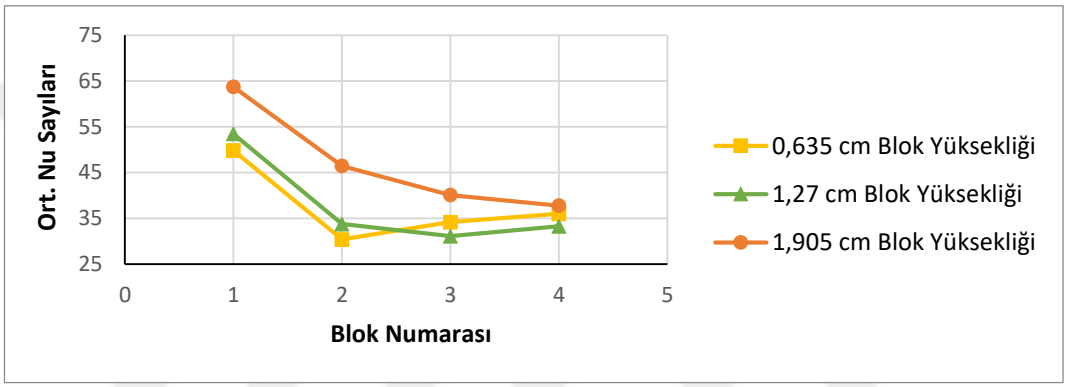
Şekil 4.409. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.410'da farklı blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok yüksekliğinin daha az olduğu durumlarda birinci yonga üzerinde görülürken blok yüksekliğin en fazla olduğu durumda dördüncü yonga üzerinde görülmektedir. En düşük yerel Nu sayısı ise tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde gözlemlenmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca 3 boyutlu geometride dar bir kanal içerisine yerleştirilen blokların blokaj etkisinde kalması durumuna yorulabilir.



Şekil 4.410. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayılarının gösterimi

Şekil 4.411'de tüm geometriler için, yani blok yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilirken, en düşük ortalama Nu değeri blok yüksekliği azaldıkça ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Blok yüksekliğinin artışı Çizelge 4.41'den de görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini artırmaktadır.



Şekil 4.411. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayılarının gösterimi

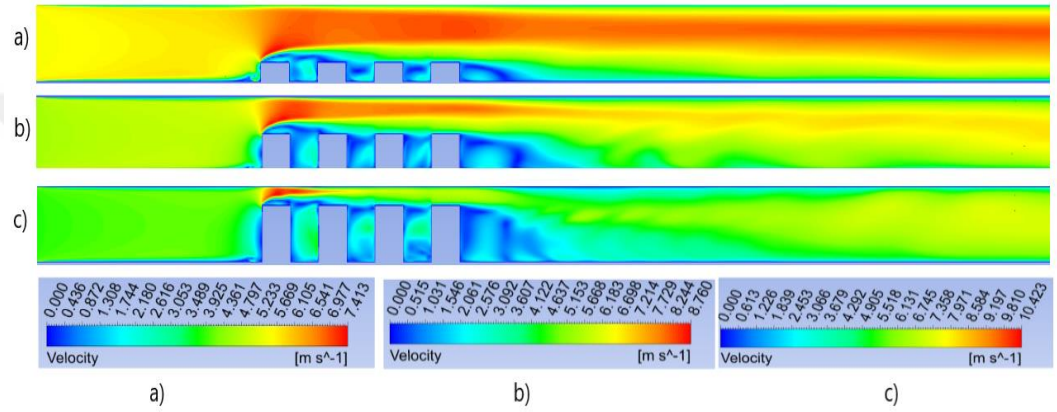
Çizelge 4.41. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Blok Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	37,607
1,27 cm	37,9
1,905 cm	47,02

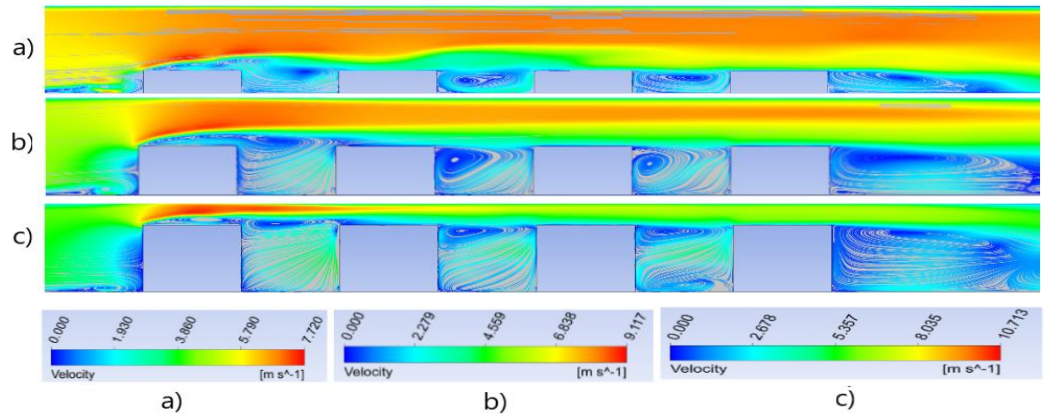
Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.412 ve 4.413 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En yüksek blok yüksekliği mesafesinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün blok yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır.

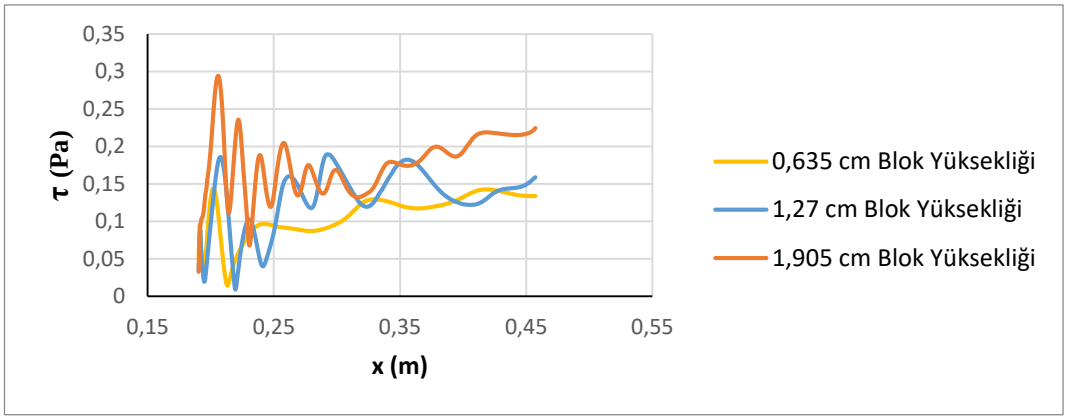
Blok yüksekliği arttıkça çukurların ön tarafında oluşan saat yönünün tersindeki girdaplar oluşmamaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve blok yüksekliği arttıkça yeniden birleşme uzunlukları da artmaktadır (Bkz. Çizelge 4.44). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.414'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.44'de verilmiştir.



Şekil 4.412. Re=9015 (5,42 m/s) hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

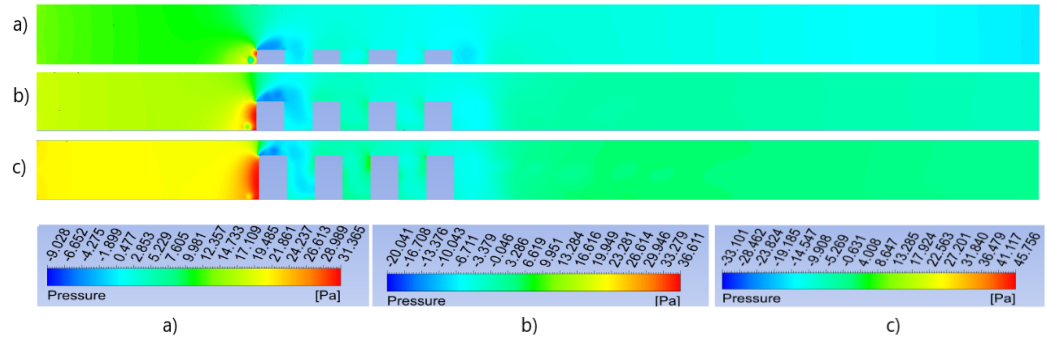


Şekil 4.413. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

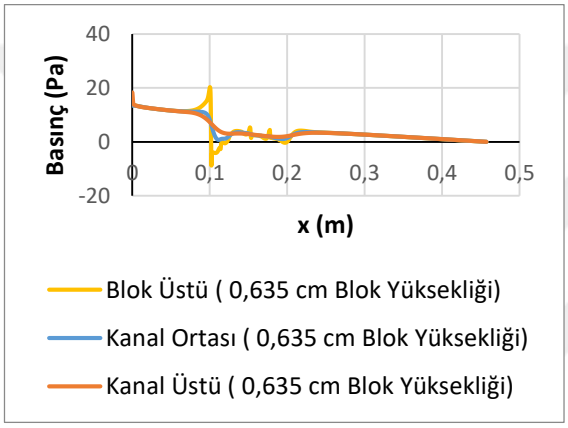


Şekil 4.414. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

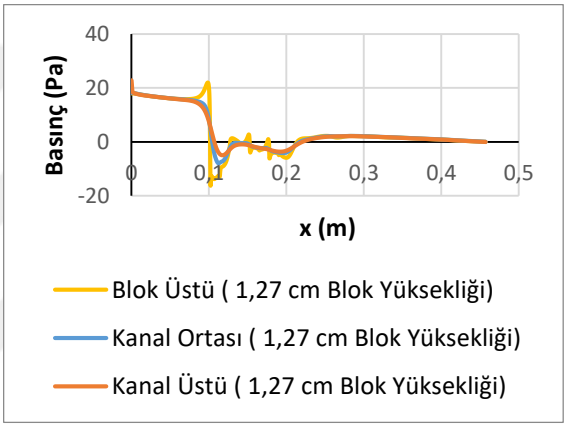
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.415'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.416, 4.417 ve 4.418'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Tüm geometrilerde düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Blok yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.412'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.412 a için 7,4 m/s, b ve c'de artarak 8,7 m/s ve 10,4 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.415'deki minimum basınç da Şekil 4.412'deki hızlarla benzer oranda değişerek a da -9 Pa, b ve c deki minimum basınçlar ise -20 Pa ve -33 Pa olarak hesaplanmıştır. Blok yüksekliği arttıkça Şekil 4.416, 4.417 ve 4.418'den görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. Giriş basınçları, 0,635 cm yüksekliği mesafesi için 13,45 Pa, 1,27 cm blok yüksekliği için 18,16 Pa ve 1,905 cm yüksekliği için 27,76 Pa olarak elde edilmiştir. Blok yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu artış soğutma için kullanılacak fanın gücünün artırılması gerektiğini vurgulamaktadır.



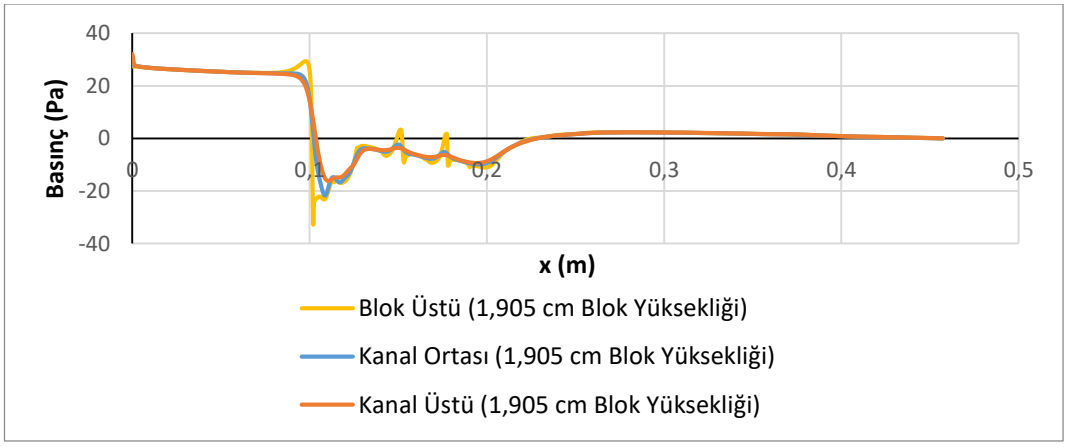
Şekil 4.415. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



Şekil 4.416. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

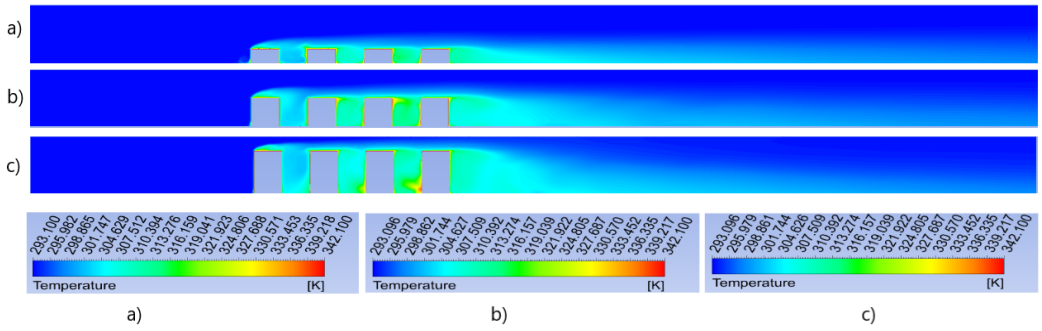


Şekil 4.417. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi



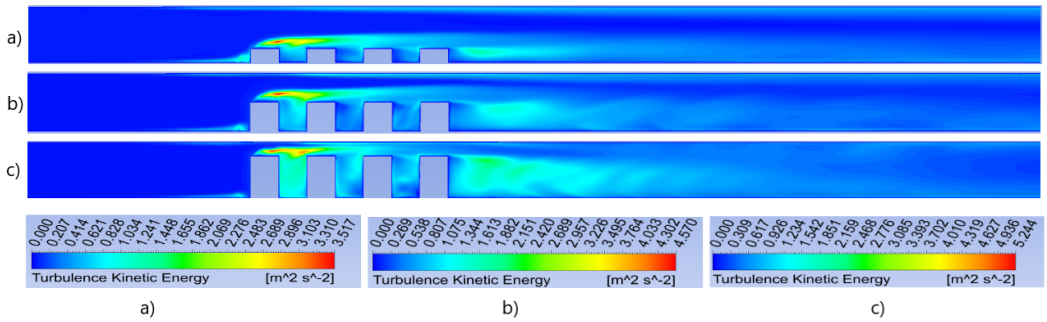
Şekil 4.418. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.419'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar blok üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok yüksekliğinin daha fazla olduğu Şekil 4.419 c durumda giriş havası birinci blokta daha fazla ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum blok yüksekliği azaldıkça etkisini azaltmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı blok yüksekliği arttıkça artmaktadır. Çünkü blok yüksekliği arttıkça kesit daraldığından akışkan daha fazla hızlanmakta daha yüksekten gelerek etki alanını artırmaktadır.



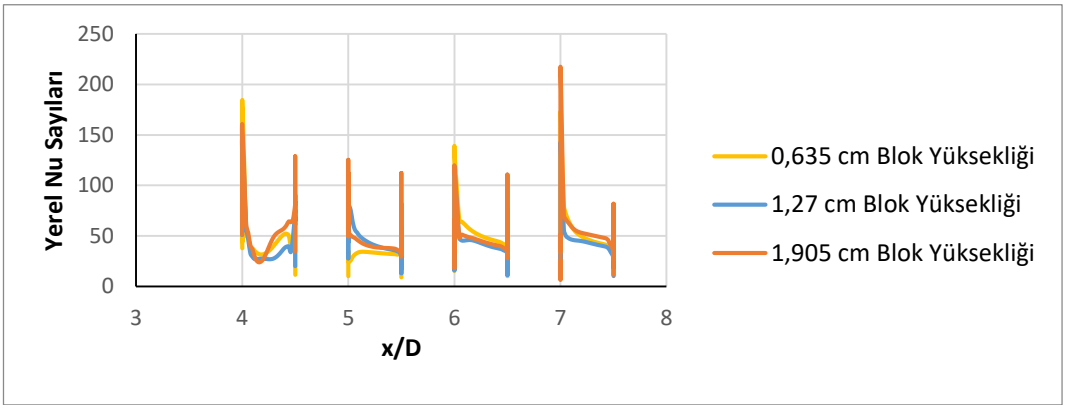
Şekil 4.419. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.420'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok yüksekliği attıkça maksimum etki alanı artmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



Şekil 4.420. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

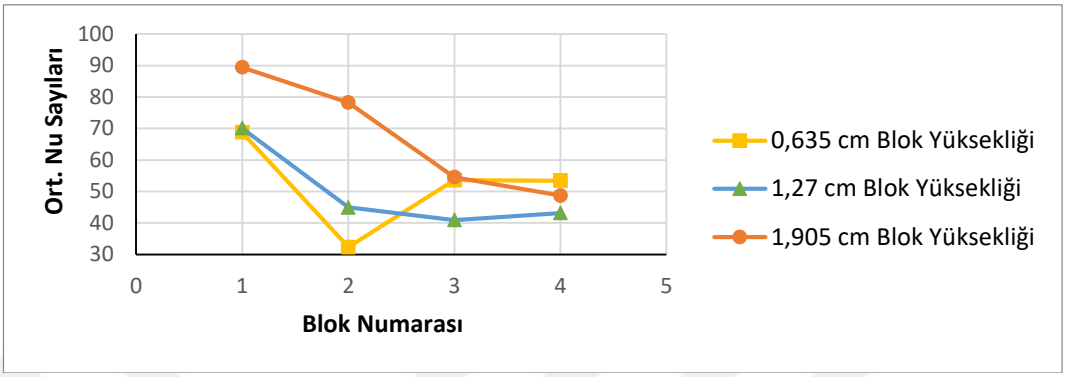
Şekil 4.421'de farklı blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok yüksekliğinin daha az olduğu durumlarda birinci yonga üzerinde görülürken blok yüksekliğin en fazla olduğu durumda dördüncü yonga üzerinde görülmektedir. En düşük yerel Nu sayısı ise tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde gözlemlenmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca 3 boyutlu geometride dar bir kanal içerisine yerleştirilen blokların blokaj etkisinde kalması durumuna yorulabilir.



Şekil 4.421. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.422'de tüm geometriler için, yani blok yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga

üzerinde edilirken, en düşük ortalama Nu sayısı blok yüksekliği azaldıkça ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Blok yüksekliğinin artışı Çizelge 4.42'den de görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini artırmaktadır.



Şekil 4.422. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

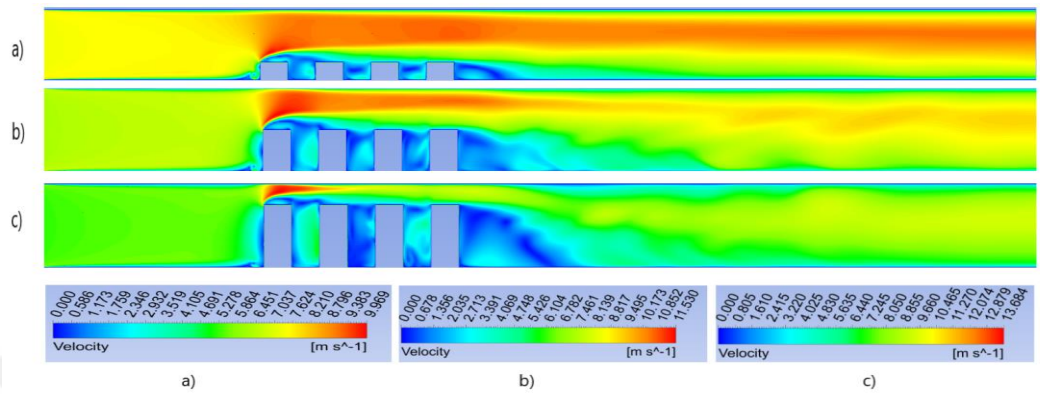
Çizelge 4.42. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Blok Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	48,08
1,27 cm	49,77
1,905 cm	67,72

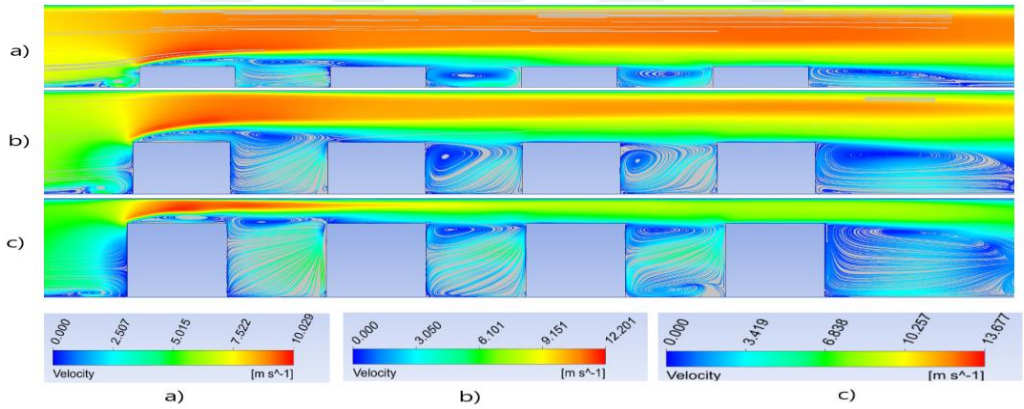
Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.423 ve 4.424 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En yüksek blok yüksekliği mesafesinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün blok yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Blok yüksekliği arttıkça çukurların ön tarafında oluşan saat yönünün tersindeki girdaplar oluşmamaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve blok yüksekliği arttıkça yeniden birleşme uzunlukları da artmaktadır (Bkz. Çizelge 4.44). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son bloktan sonraki hızın etki alanı yüksek hızdan dolayı en fazla blok yüksekliğinde daha fazladır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son

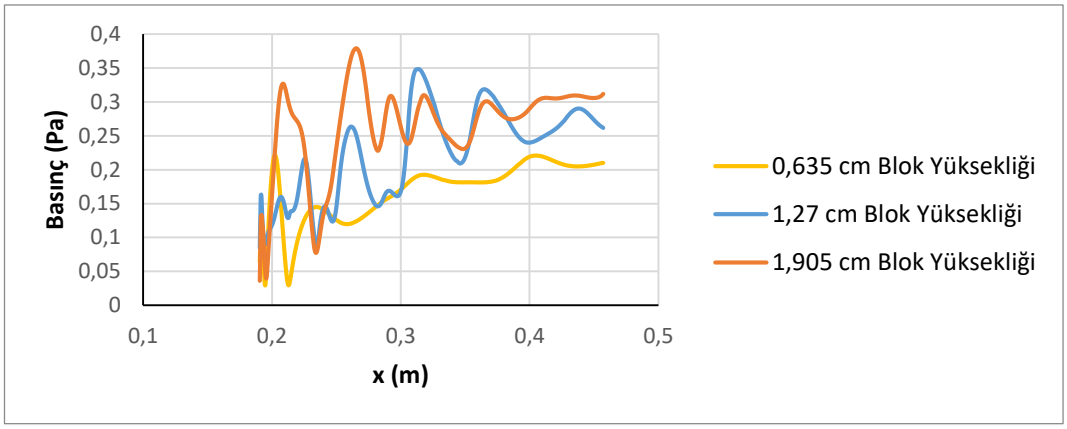
bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.425'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.44'de verilmiştir



Şekil 4.423. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

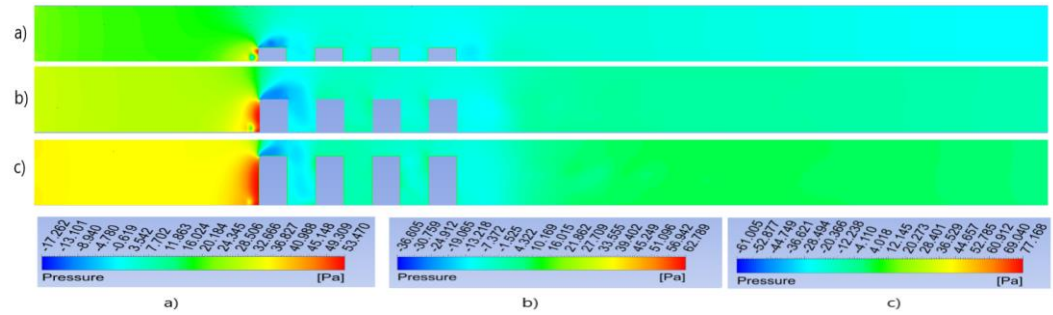


Şekil 4.424. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

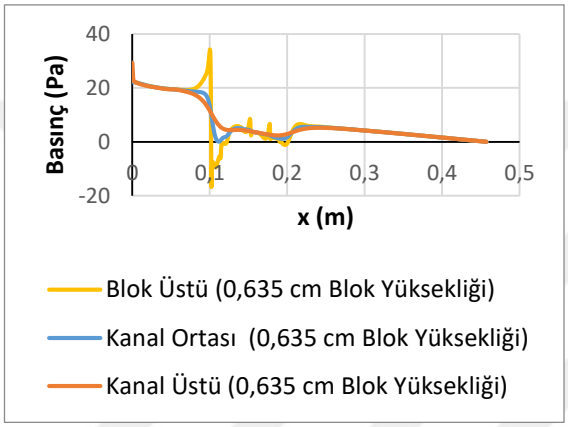


Şekil 4.425. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi

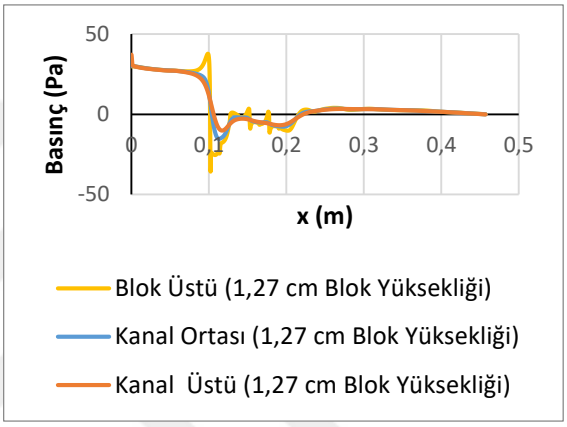
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.426'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.427, 4.428 ve 4.429'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Blok yüksekliğinin daha fazla olduğu geometrilerde düşük basınç etkisi birinci bloktan sonra gelen çukuru da etkilemektedir. Blok yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.423'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.423 a için 9,96 m/s, b ve c'de artarak 11,5 m/s ve 13,6 m/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.426'daki minimum basınç da Şekil 4.423'deki hızlarla benzer oranda değişerek a da -17,26 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -36,6 Pa ve -61 Pa olarak hesaplanmıştır. Blok yüksekliği arttıkça Şekil 4.427, 4.428 ve 4.429'den görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da artmaktadır. Giriş basınçları, 0,635 cm yüksekliği mesafesi için 22,16 Pa, 1,27 cm blok yüksekliği için 30,18 Pa ve 1,905 cm yüksekliği 45,37 Pa olarak elde edilmiştir. Blok yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu artış soğutma için kullanılacak fanın gücünün artırılması gerektiğini vurgulamaktadır.



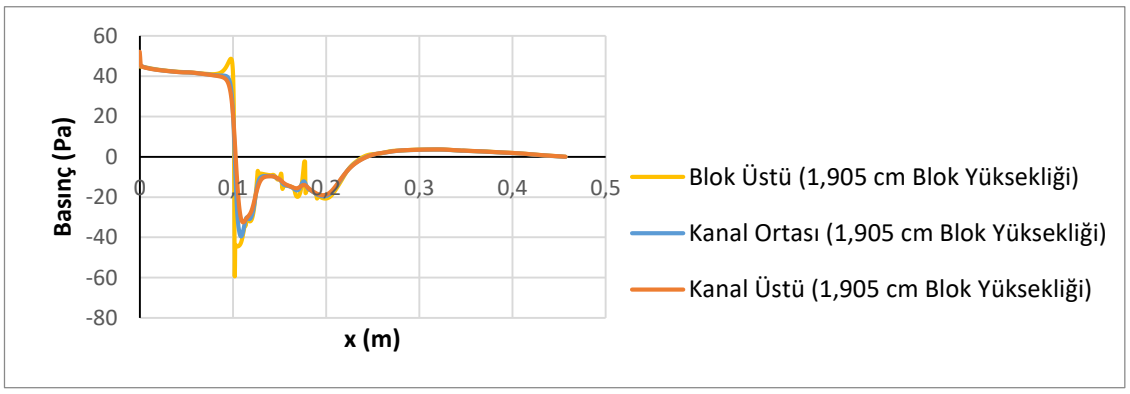
Şekil 4.426. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği



Şekil 4.427. 0,635 cm blok yüksekliği için basınç değişimi



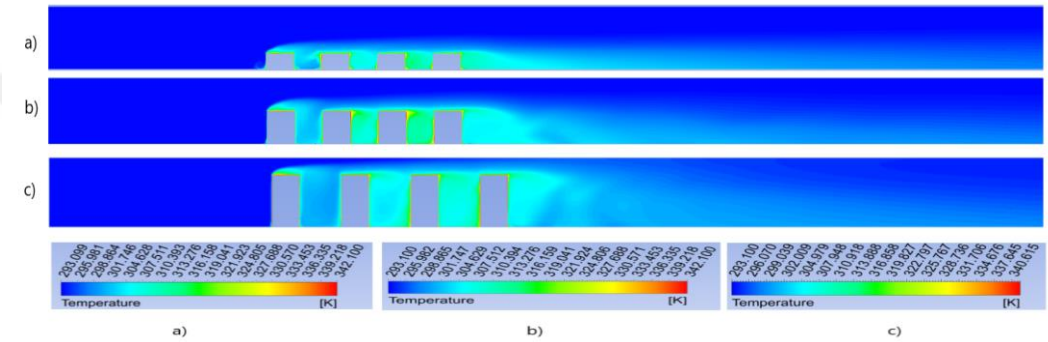
Şekil 4.428. 1,27 cm blok yüksekliği için basınç değişimi



Şekil 4.429. 1,905 cm blok yüksekliği için basınç değişimi

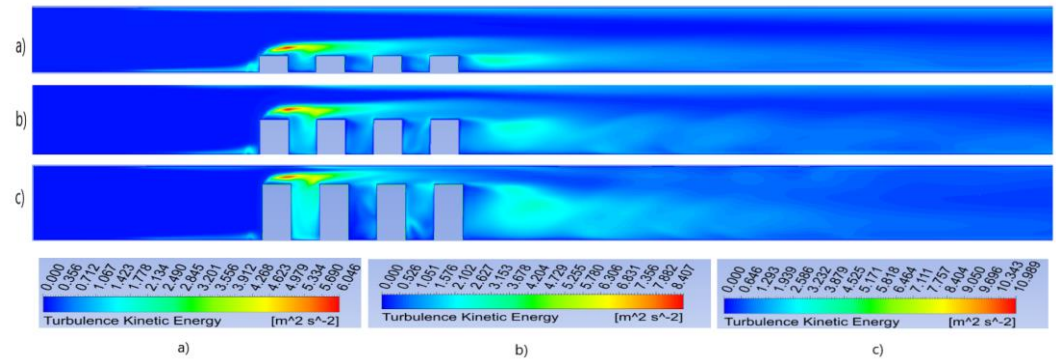
Şekil 4.430'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar blok üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve

sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Blok yüksekliğinin daha fazla olduğu Şekil 4.430 b ve c durumda giriş havası birinci blokta daha fazla ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı blok yüksekliği arttıkça artmaktadır. Çünkü blok yüksekliği arttıkça kesit daraldığından akışkan daha fazla hızlanmakta daha yüksekten gelerek etki alanını artırmaktadır.



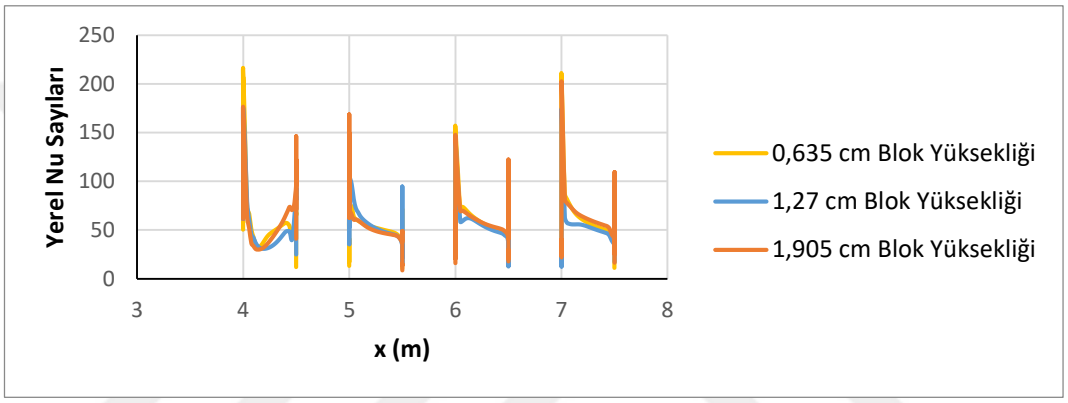
Şekil 4.430. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.431'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup blok yüksekliği attıkça maksimum etki alanı artmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup blok boyu mesafesi arttıkça çıkışa duvara doğru yayılmaktadır.



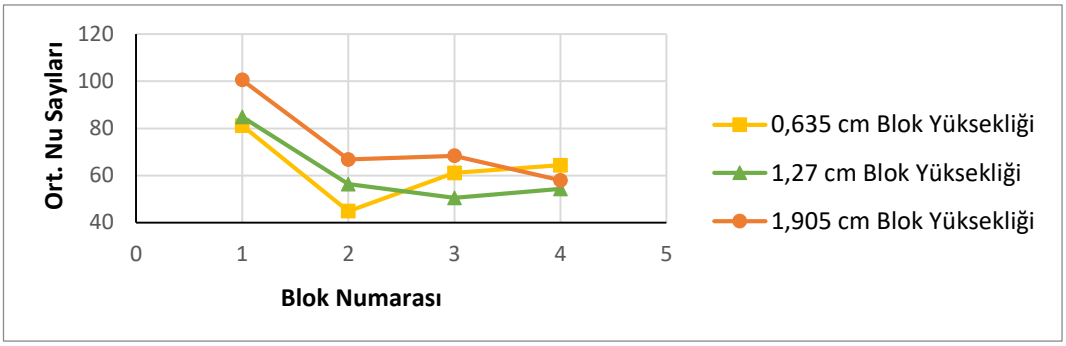
Şekil 4.431. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 0,635 cm (baz geometri), b) 1,27 cm, c) 1,905 cm blok yüksekliği

Şekil 4.432'de farklı blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı blok yüksekliğinin daha az olduğu durumlarda birinci yonga üzerinde görülürken blok yüksekliğin en fazla olduğu durumda dördüncü yonga üzerinde görülmektedir. En düşük yerel Nu sayısı ise tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde gözlemlenmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca 3 boyutlu geometride dar bir kanal içerisine yerleştirilen blokların blokaj etkisinde kalması durumuna yorulabilir.



Şekil 4.432. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.433'de tüm geometriler için, yani blok yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilirken, en düşük ortalama Nu sayısı blok yüksekliği azaldıkça ikinci yonga üzerine doğru kaymaktadır. Blok yüksekliğinin artışı Çizelge 4.43'den de görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini artırmaktadır.



Şekil 4.433. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.43. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Blok Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
0,635 cm	60,2
1,27 cm	61,5
1,905 cm	73,4

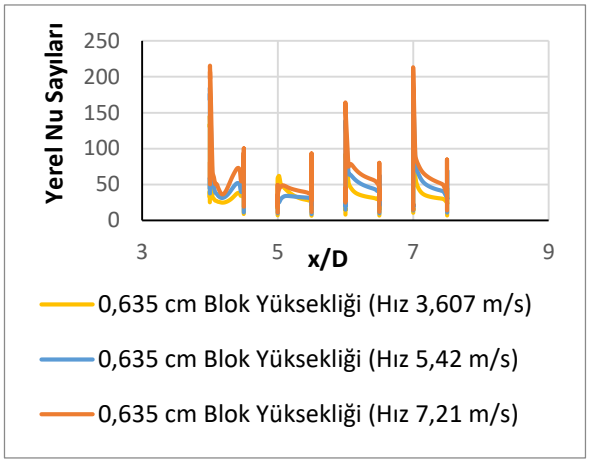
Blok yüksekliğinin farklı hızlarda karşılaştırılması

Çizelge 4.44' den görüldüğü üzere blok yüksekliğinin artması son yongadan sonra oluşan yeniden birleşme uzunluğunu artırmıştır. Nie ve Armaly (2002), yaptığı çalışmalarında basamak yüksekliğini artırmanın yeniden birleşme uzunluğunu artırdığını gözlemlemişlerdir. Re sayısının artmasıyla da yeniden birleşme uzunluklarında aynı geometri için çok fazla bir değişim olmamaktadır.

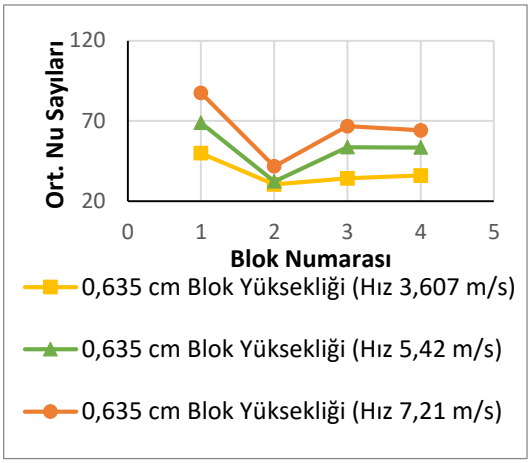
Çizelge 4.44. Farklı hız ve geometrilerde yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Blok Yüksekliği	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	0,635 cm	0,00347	0,021625
	1,27 cm	0,004805	0,036041
	1,905 cm	0,004805	0,041647
5,42	0,635 cm	0,004005	0,022692
	1,27 cm	0,004538	0,0291
	1,905 cm	0,024027	0,040312
7,21	0,635 cm	0,004272	0,022425
	1,27 cm	0,004272	0,022158
	1,905 cm	0,005072	0,043783

0,635 cm blok yüksekliğinde hızın artması Şekil 4.434 ve Şekil 4.435'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken en düşük ikinci blok üzerinde elde edilmiştir.

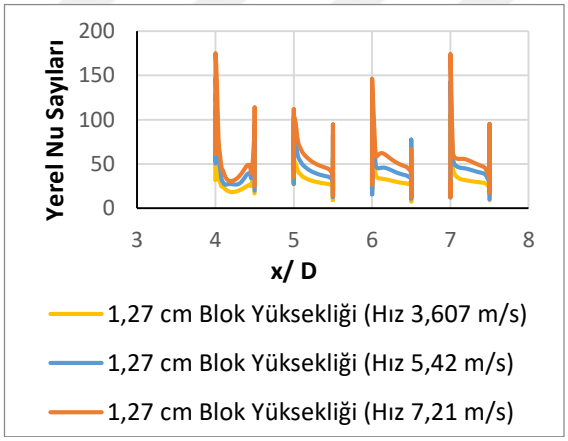


Şekil 4.434. 0,635 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi

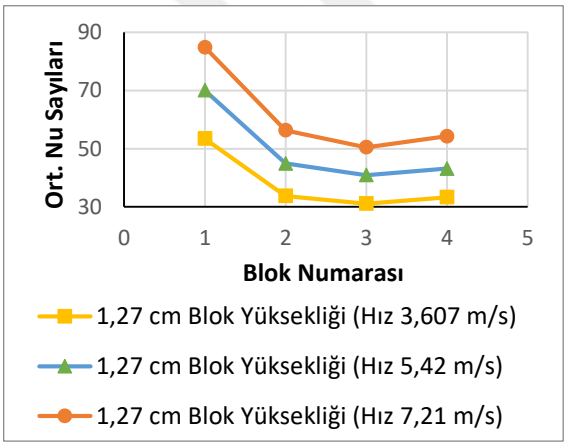


Şekil 4.435. 0,635 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayısının değişimi

1,27 cm blok yüksekliğinde hızın artması Şekil 4.436 ve Şekil 4.437'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken en düşük ikinci blok üzerinde elde edilmiştir.



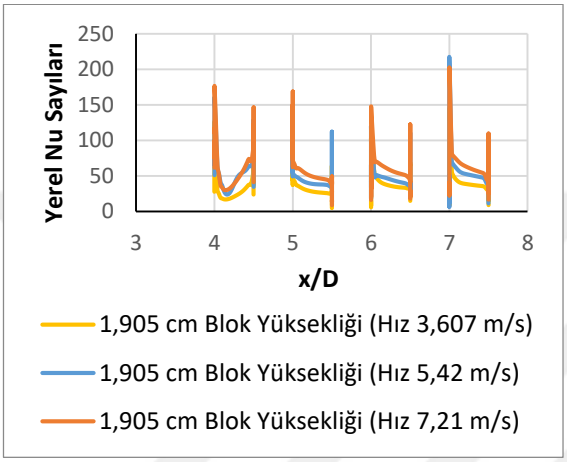
Şekil 4.436. 1,27 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları



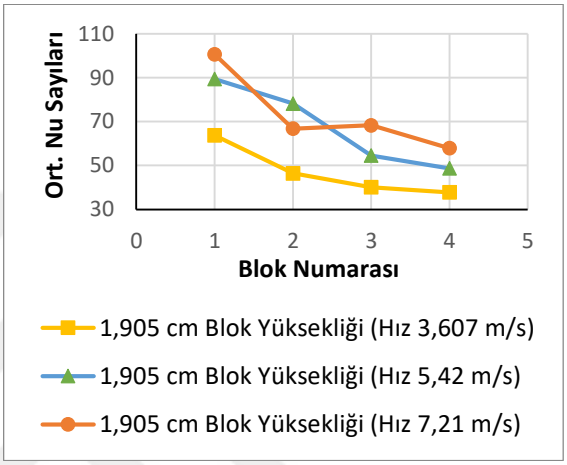
Şekil 4.437. 1,27 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,905 cm blok yüksekliğinde hızın artması (Re sayısının arttırılması) Şekil 4.438 ve Şekil 4.439'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok

üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı en yüksek blok yüksekliği hariç diğer geometrilerde ikinci blok üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.438. 1,905 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

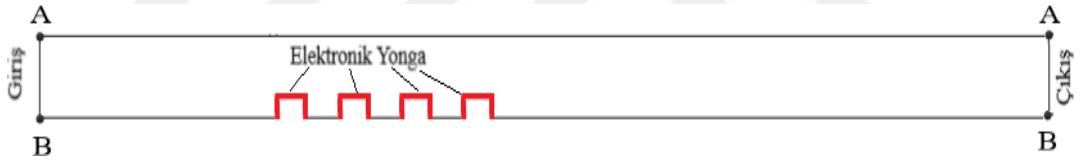


Şekil 4.439. 1,905 cm blok yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

Yapılan 9 adet analizle blok yüksekliğinin ısı transferine etkisi incelendiğinde; Çizelge 4.41, 4.42 ve 4.43 değerlendirilerek en yüksek ortalama Nu sayısının Re=11993 (Hız 7,21m/s)'de ve 1,905 cm blok yüksekliğinde 73,4 olarak tespit edilmiştir. 2 boyutlu analizlerle karşılaştırma yapıldığında orada da aynı geometride ve aynı hızda ısı transferinin en fazla olduğu bulunmuştur. Aung (1983), yaptığı geri basamak akışını inceleyen çalışmasında basamak yüksekliğinin azalmasıyla, basamak arkasında oluşan ve vorteks akışının hakim olduğu bölgenin küçülerek daha az girdaplı hale geldiğini ve böylece ısı transferinin düştüğünü gözlemlemiştir. Naik, Probert ve Bryden (1999), blok yüksekliğini artırmanın ısı transferini arttırdığının sonucuna varmışlardır. Nie ve Armaly (2002), bir kanalda geri basamak üzerine laminer akışta basamak yüksekliği arttıkça Nu sayısının da arttığını gözlemlemişlerdir. Mohammed (2006), yaptığı çalışmasında modülün yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranı arttıkça ortalama Nusselt sayısının arttığını gözlemlemiştir. Tsay ve Cheng (2008), iki boyutlu laminer akışta blok yüksekliği arttıkça ortalama Nusselt sayısının arttığını gözlemlemişlerdir.

4.2.4. 3 boyutlu geometride kanal yüksekliğinin incelenmesi

Şekil 4.440'dan da görüldüğü gibi kanal yüksekliğinin değişimini incelemek amacıyla Şekil 4.440'daki A-B aralığı yani kanal yüksekliği baz geometride alınan değer dışında 2 değer daha alınarak 3 farklı hızda inceleme yapılmıştır. Baz geometride A-B aralığı 2,54 cm olmakla beraber, 1,27 cm ve 1,905 cm de alınarak analizler yapılmıştır. Kanal yüksekliği mesafesinin değişimini incelemek için toplam 9 adet analiz yapılmıştır. Kanal yüksekliği hesabı yaparken kanalı daralttığımızdan dolayı giriş hızları artmıştır. Hız hesabı gerekli formüller ile yapılarak analizler o şekilde yapılmıştır. Re=11993 için 1,27 cm kanal yüksekliğinde hız 14,42 m/s 1,905 cm için hız 9,61 m/s ve 2,54 cm (baz geometri) için hız 7,21 m/s'dir. Re=9015 için 1,27 cm kanal yüksekliğinde hız 10,84 m/s 1,905 cm kanal yüksekliğinde hız 7,22 m/s ve 2,54 cm (baz geometri) için hız 5,42 m/s'dir. Re=6000 için 1,27 cm kanal yüksekliğinde hız 7,21 m/s 1,905 cm kanal yüksekliğinde hız 4,73 m/s ve 2,54 cm (baz geometri) için hız 3,607 m/s'dir. Bu değişiklikler Çizelge 4.45'de gösterilmiştir.



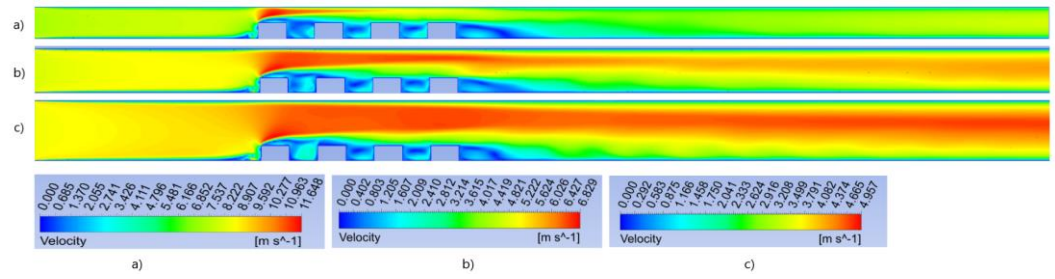
Şekil 4.440. Kanal yüksekliğinin değişiminin gösterimi

Çizelge 4.45. Re sayısına göre kanal yüksekliğinin değişimiyle belirlenen hızlar

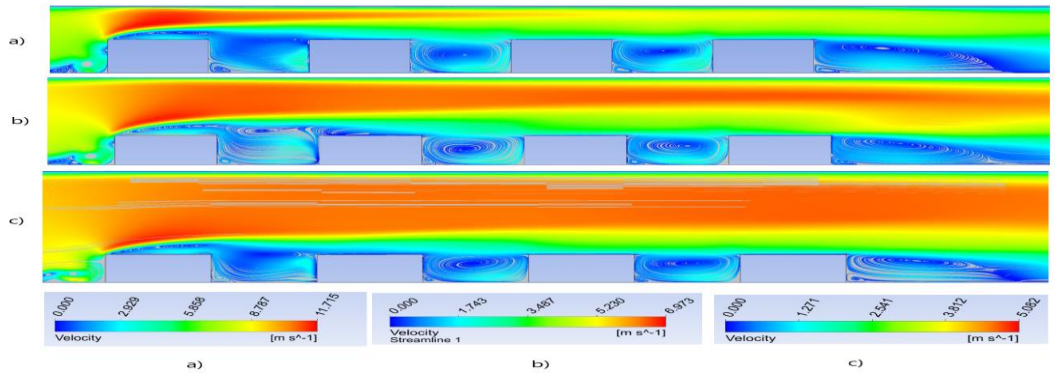
	Kanal Yüksekliği		
	1,27 cm	**1,905 cm**	**2,54 cm**
Re=6000	7,21 m/s	4,73 m/s	3,607 m/s
Re=9015	10,84 m/s	7,22 m/s	5,42 m/s
Re=11993	14,42 m/s	9,61 m/s	7,21 m/s

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

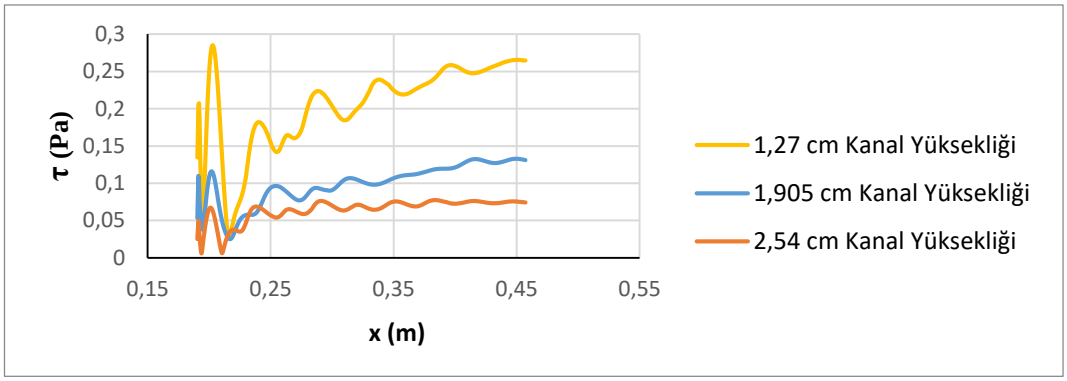
Şekil 4.441ve 4.442 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En düşük kanal yüksekliğinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün kanal yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Tüm kanal yüksekliklerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve kanal yüksekliğinin artmasıyla yeniden birleşme uzunluklarında bir miktar değişim görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.49). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.443'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve farklı hızlardaki yeniden birleşme uzunlukları karşılaştırılarak Çizelge 4.49'da verilmiştir.



Şekil 4.441. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri a) 1,27 cm, b)1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

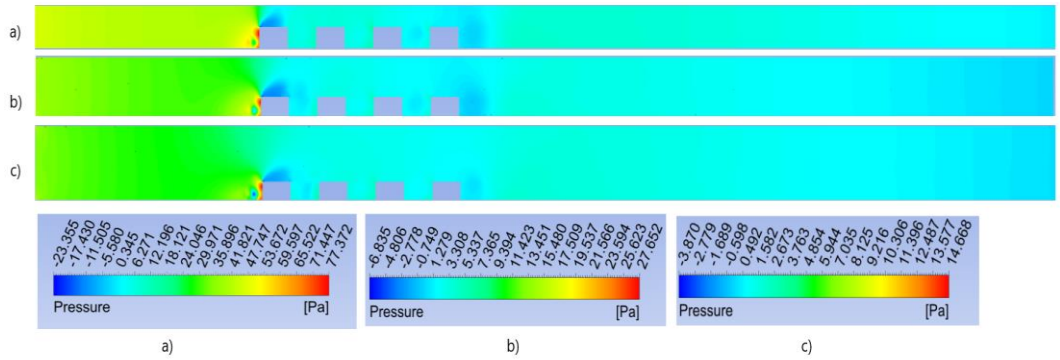


Şekil 4.442. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

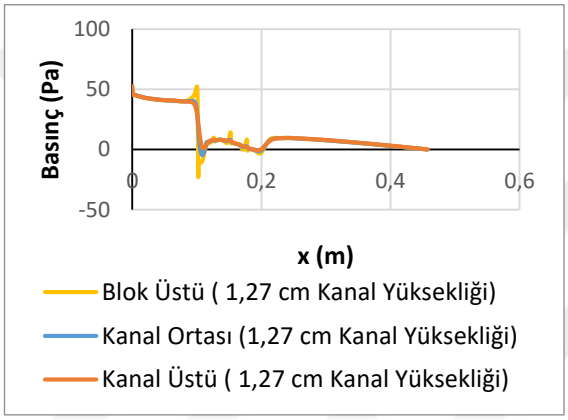


Şekil 4.443. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için kayma gerilmelerinin gösterimi

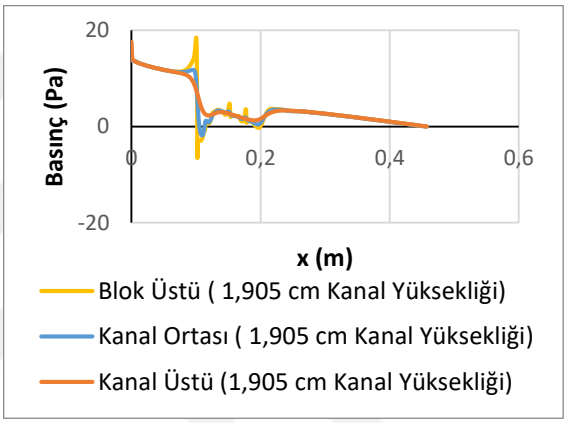
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.444'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.445, 4.446 ve 4.447'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Kanal yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.441'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.441 a için 11,6 m/s, b ve c'de azalarak 6,8 m/s ve 4,9 m/s düştüğünden dolayı Şekil 4.444 b ve c'deki minimum basınçlarda Şekil 4.441 a'dakinden daha az değişmiştir. Şekil 4.444 a'daki minimum basınç -23 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -6,8 Pa ve -3,8 Pa olarak hesaplanmıştır. Kanal yüksekliği arttıkça Şekil 4.445, 4.446 ve 4.447'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da azalmaktadır. Giriş basınçları, 1,27 cm kanal yüksekliği için 46,11 Pa, 1,905 cm kanal yüksekliği için 13,73 Pa ve 2,54 cm kanal yüksekliği için 6,58 Pa olarak elde edilmiştir. Kanal yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu azalma soğutma için kullanılacak fanın gücünün azalması gerektiğini vurgulamaktadır.



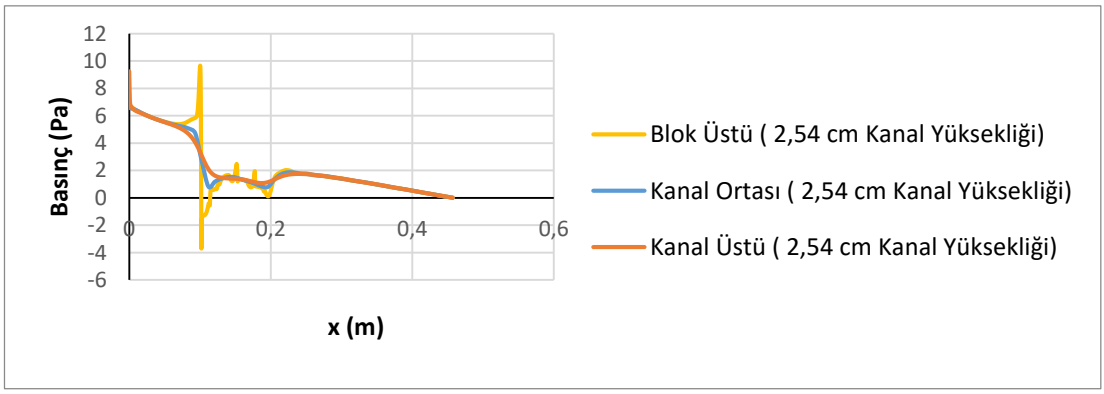
Şekil 4.444. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



Şekil 4.445. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi



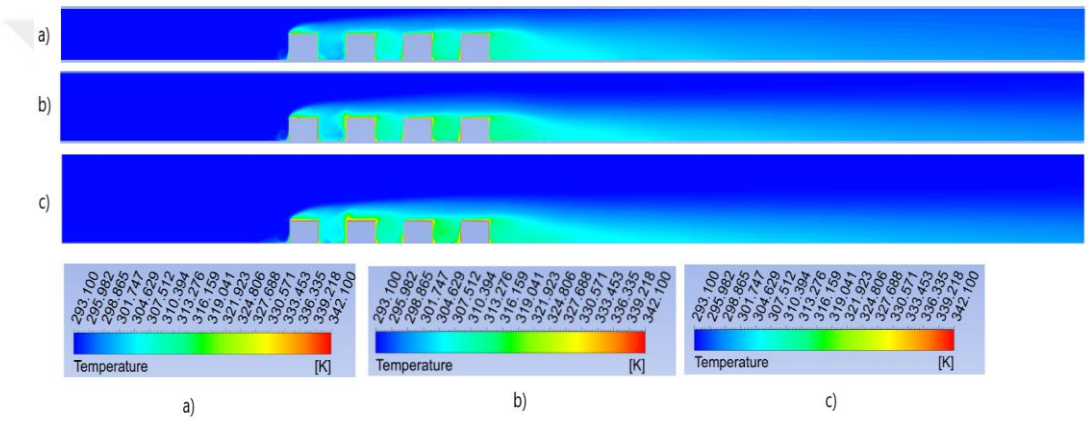
Şekil 4.446. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi



Şekil 4.447. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

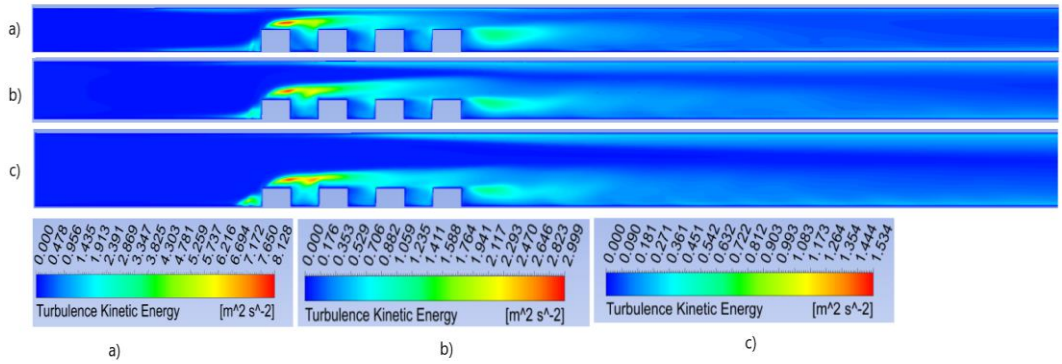
Şekil 4.448'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı

artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Kanal yüksekliğinin artması ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durum Şekil 4.442 b ve c'de oluşan saat yönünün tersinde oluşan girdapların uzunluğunun daha fazla olmasına yorulabilir. Bu durum kanal yüksekliği azaldıkça etkisini azaltmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı kanal yüksekliğiyle pek değişmemektedir.



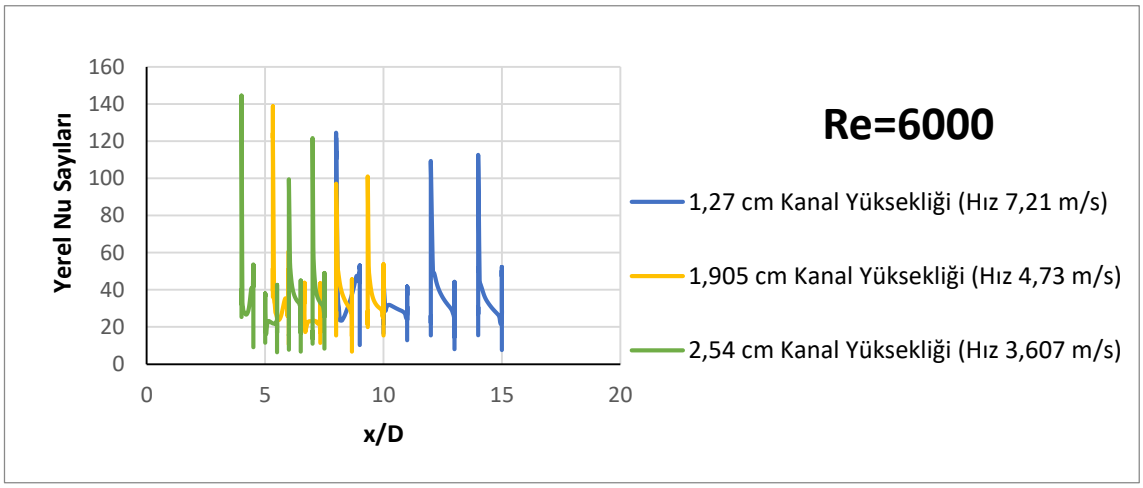
Şekil 4.448. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a) 1,27 cm, b)1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.449'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup kanal yüksekliği attıkça maksimum etki alanı da değişmektedir. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup kanal yüksekliği arttıkça çıkış duvarına doğru yayılmaktadır. Maksimum türbülans kinetik enerjinin değeri kanal yüksekliğinin daha az olduğu durumda olup değeri 8,1 m^2/s^2'dir.



Şekil 4.449. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

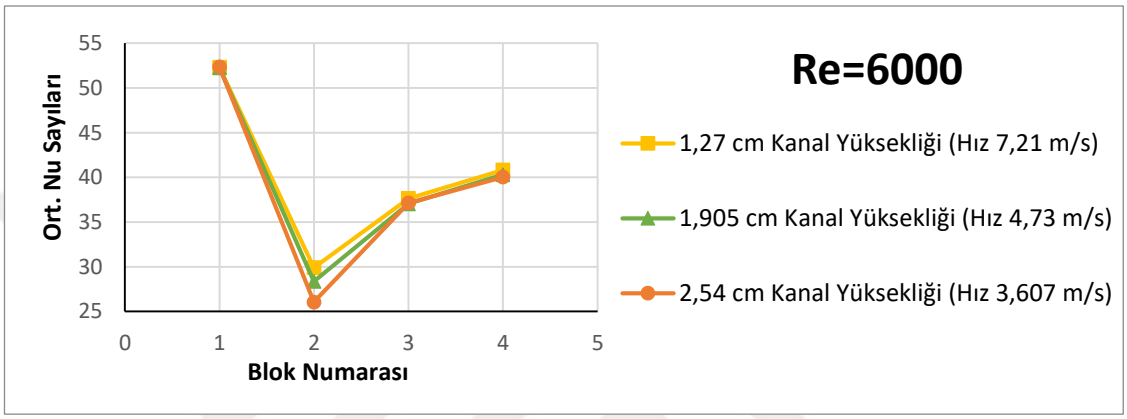
Şekil 4.450'de farklı kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm geometrilerde birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca bloklar dar bir kanala yerleştirildiğinden dolayı blokaj etkisinin de bu farklılığa sebep olduğu düşünülebilir.



Şekil 4.450. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.451'de tüm geometriler için, yani kanal yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların

sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm kanal yükseklikleri için en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmektedir. Kanal yüksekliğinin artışı Çizelge 4.46'dan da görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini azaltmaktadır.



Şekil 4.451. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayısının gösterimi

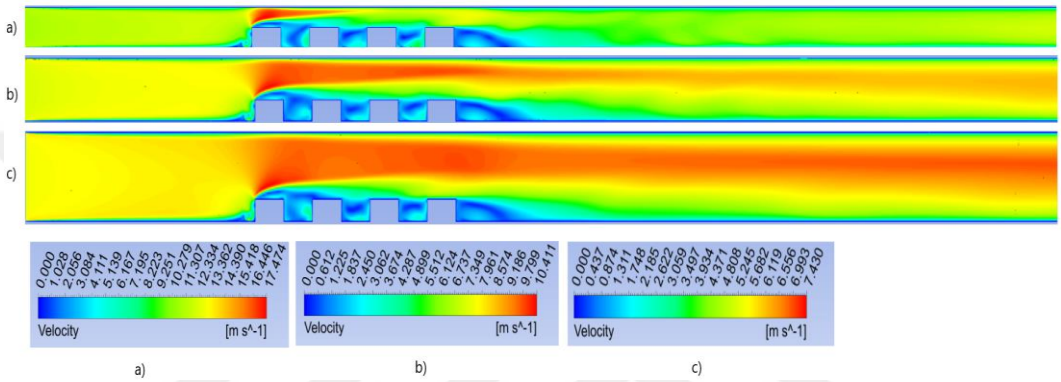
Çizelge 4.46. Re=6000 (3,607 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Kanal Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
1,27 cm	40,17
1,905 cm	39,49
2,54 cm	38,89

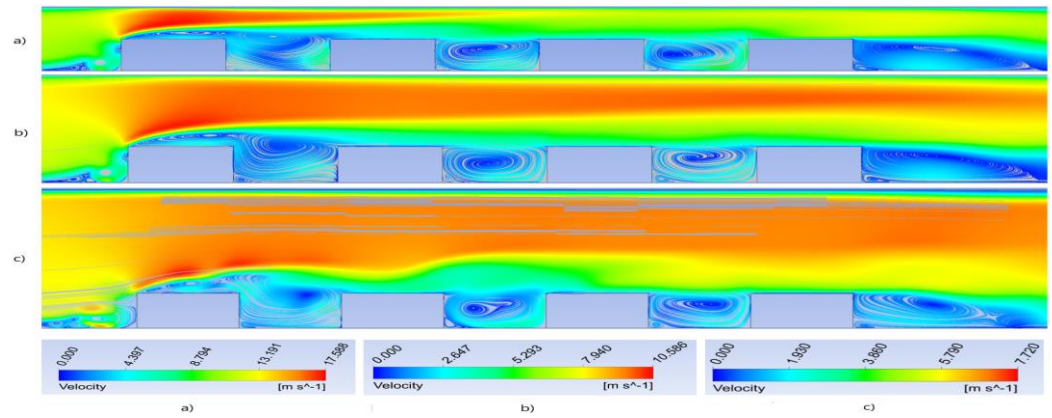
Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.452 ve 4.453 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En düşük kanal yüksekliğinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün kanal yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Tüm kanal

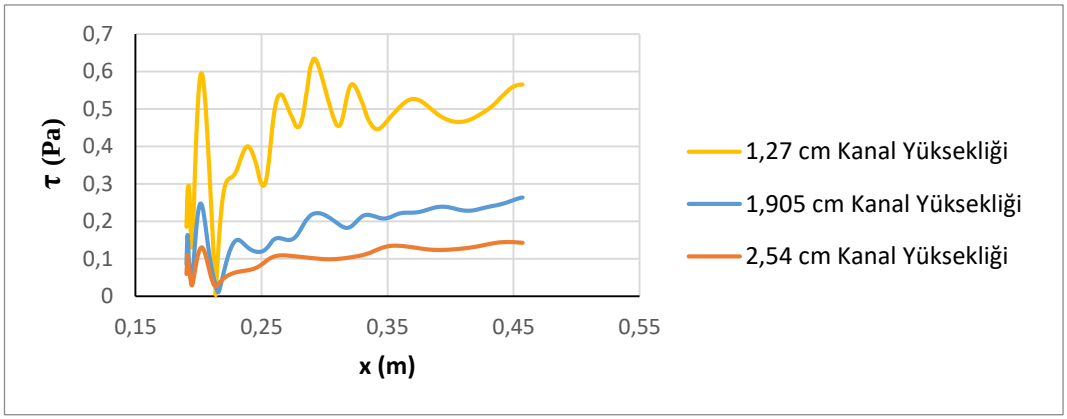
yüksekliklerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve kanal yüksekliğinin artmasıyla yeniden birleşme uzunluklarında bir miktar değişim görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.49). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunlukları tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.454'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.49'da verilmiştir.



Şekil 4.452. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

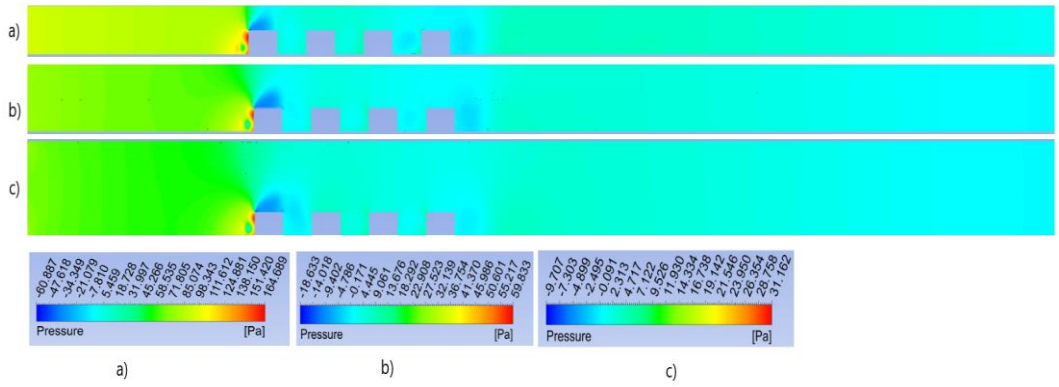


Şekil 4.453. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

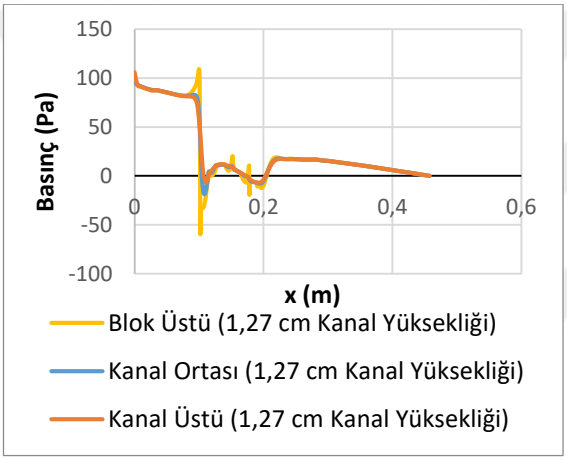


Şekil 4.454. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar kayma gerilmelerinin gösterimi

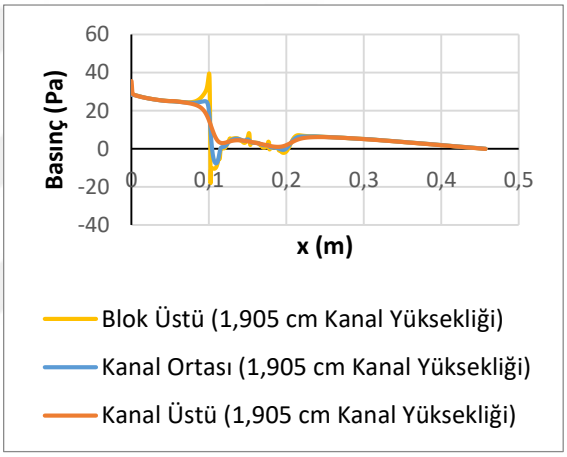
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.455'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.456, 4.457 ve 4.458'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Kanal yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.452'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.452 a için 17,47 m/s, b ve c'de azalarak 10,4 m/s ve 7,4 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.455 b ve c'deki minimum basınçlarda Şekil 4.452 a'dakinden daha az değişmiştir. Şekil 4.455 a'daki minimum basınç -60 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -18 Pa ve -9,7 Pa olarak hesaplanmıştır. Kanal yüksekliği arttıkça Şekil 4.456, 4.457 ve 4.458'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da azalmaktadır. Giriş basınçları, 1,27 cm kanal yüksekliği için 94,69 Pa, 1,905 cm kanal yüksekliği için 28,36 Pa ve 2,54 cm kanal yüksekliği için 13,28 Pa olarak elde edilmiştir. Kanal yüksekliği arttıkça basınç değişimindeki bu azalma soğutma için kullanılacak fanın gücünün azalması gerektiğini vurgulamaktadır.



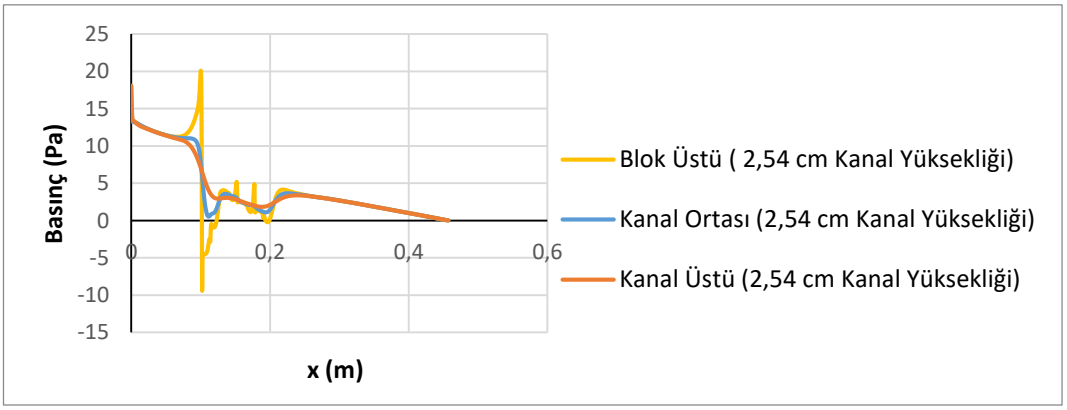
Şekil 4.455. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a) 1,27 cm, b)1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



Şekil 4.456. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

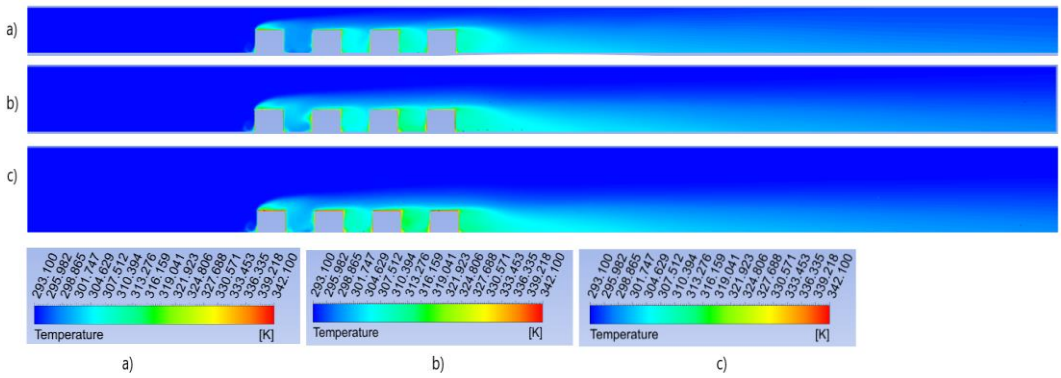


Şekil 4.457. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi



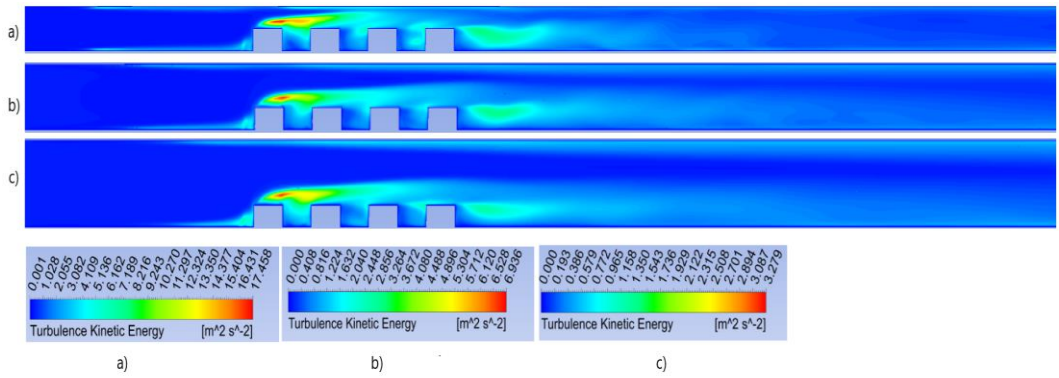
Şekil 4.458. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.459'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Kanal yüksekliğinin artması ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durum Şekil 4.453 b ve c'de oluşan saat yönünün tersinde oluşan girdapların uzunluğunun daha fazla olmasına yorulabilir. Bu durum kanal yüksekliği azaldıkça etkisini azaltmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı kanal yüksekliğiyle pek değişmemektedir.



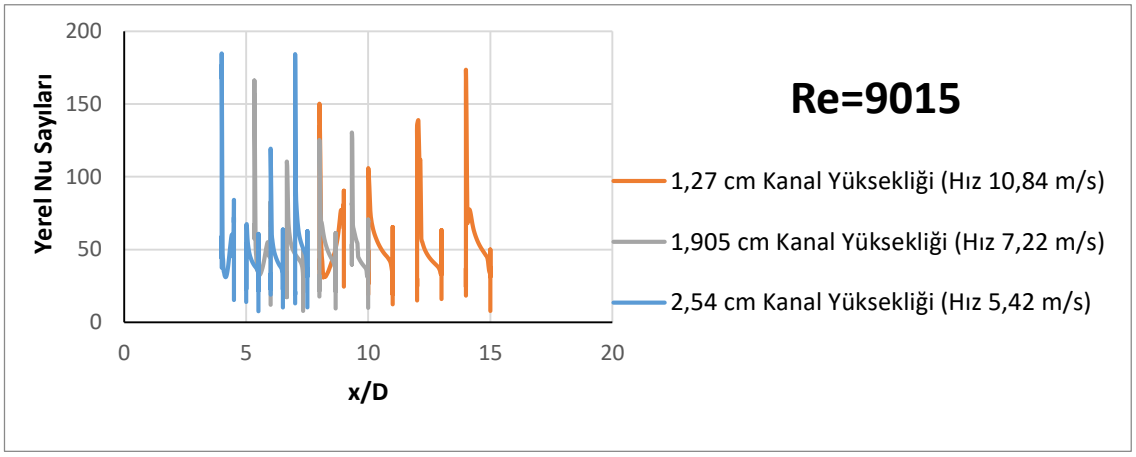
Şekil 4.459. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.460'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup kanal yüksekliği azaldıkça maksimum etki alanı artmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup kanal yüksekliği arttıkça çıkış duvarına doğru yayılmaktadır. Maksimum türbülans kinetik enerji kanal yüksekliğinin daha az olduğu durumda olup değeri 17,45 m^2/s^2'dir.



Şekil 4.460. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans enerji kontürleri a)1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

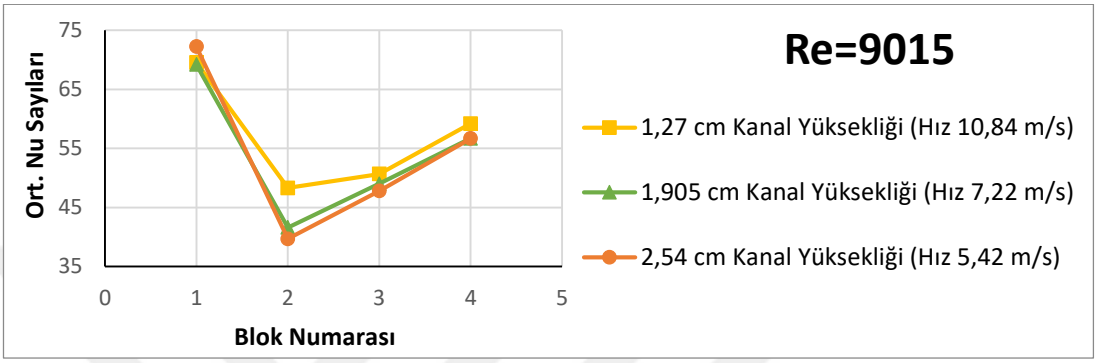
Şekil 4.461'de farklı kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı kanal yüksekliğinin en az olduğu durum hariç birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca bloklar dar bir kanala yerleştirildiğinden dolayı blokaj etkisinin de bu farklılığa sebep olduğu düşünülebilir.



Şekil 4.461. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.462'de tüm geometriler için, yani kanal yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı

yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm kanal yükseklikleri için en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmektedir. Kanal yüksekliğinin artışı Çizelge 4.47'den de görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini azaltmaktadır.



Şekil 4.462. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

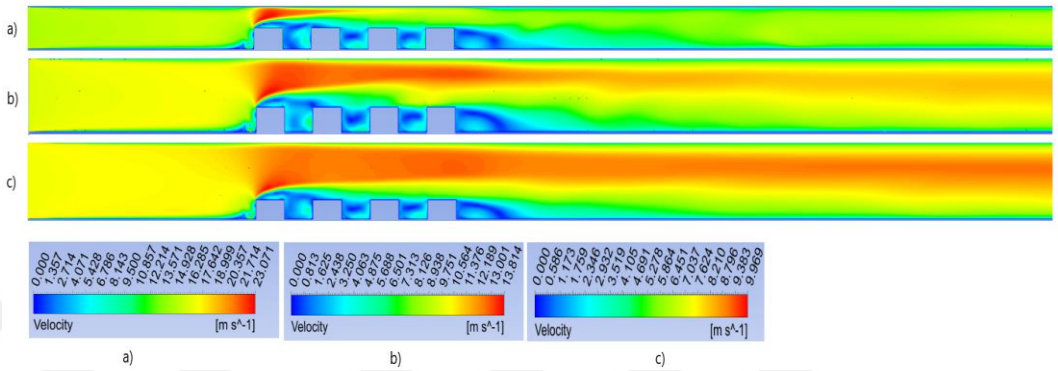
Çizelge 4.47. Re=9015 (5,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayısının gösterimi

Kanal Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
1,27 cm	56,93
1,905 cm	54,12
2,54 cm	54,09

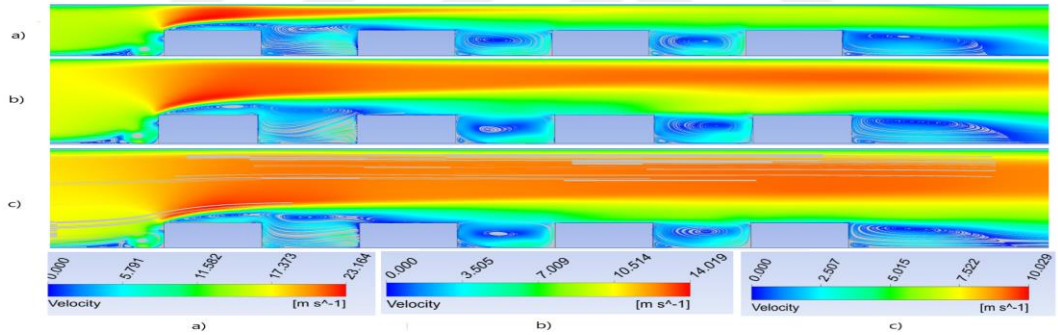
Re=11993 (V=7,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.463ve 4.464 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. En düşük kanal yüksekliğinde kesit daralması daha fazla olduğu için hız artışı da bununla orantılı olarak daha fazladır. Bütün kanal yüksekliği mesafelerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Tüm kanal yüksekliklerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve kanal yüksekliğinin değişmesiyle yeniden birleşme uzunluklarında bir miktar değişim görülmektedir (Bkz.

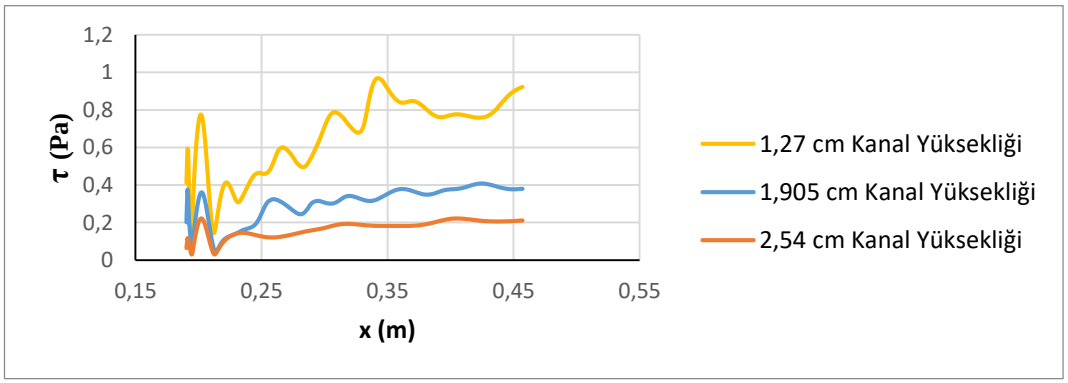
Çizelge 4.49). Ayrıca her üç durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.465'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.49'da verilmiştir.



Şekil 4.463. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

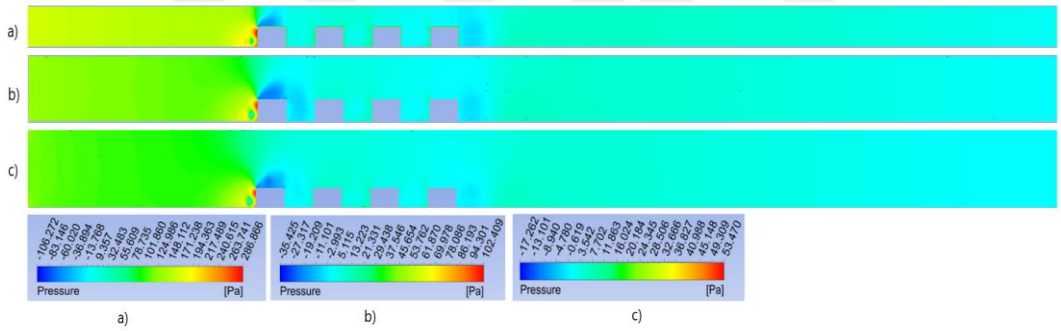


Şekil 4.464. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için hız çizgileri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

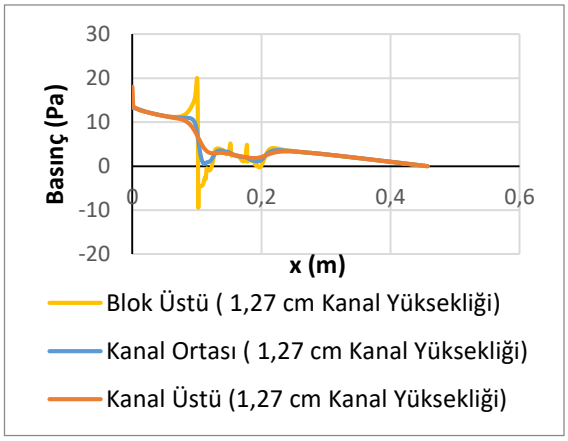


Şekil 4.465. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için kayma gerilmeleri

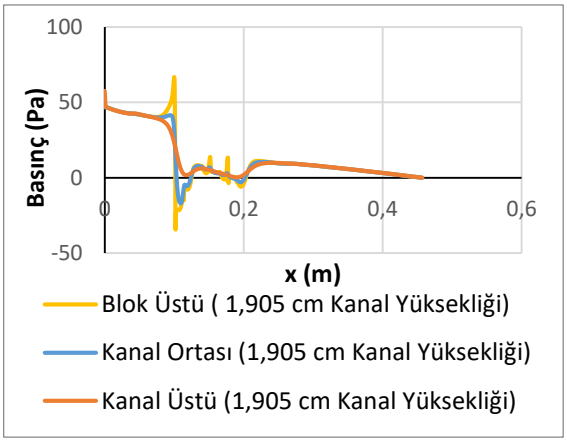
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.466'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.467, 4.468 ve 4.469'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Kanal yüksekliğinin artmasıyla Şekil 4.463'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.463 a için 23,07 m/s, b ve c'de azalarak 13,8 m/s ve 9,9 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.466 b ve c'deki minimum basınçlarda Şekil 4.463 a'dakinden daha az değişmiştir. Şekil 4.466 a'daki minimum basınç -106,2 Pa, b ve c'deki minimum basınçlar ise -35,4 Pa ve -17,2 Pa olarak hesaplanmıştır. Kanal yüksekliği arttıkça Şekil 4.467, 4.468 ve 4.469'dan da görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da bir miktar değişmektedir. Giriş basınçları, 1,27 cm kanal yüksekliği için 13,28 Pa, 1,905 cm kanal yüksekliği için 46,76 Pa ve 2,54 cm kanal yüksekliği için 22,16 Pa olarak elde edilmiştir.



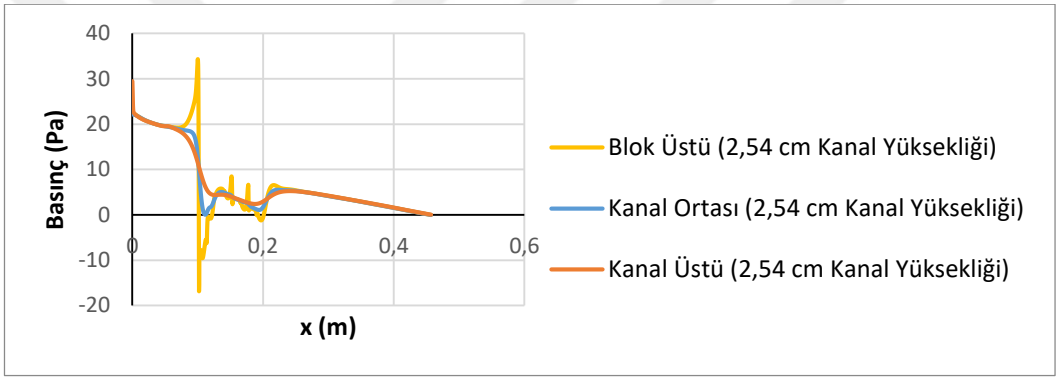
Şekil 4.466. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için basınç kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği



Şekil 4.467. 1,27 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

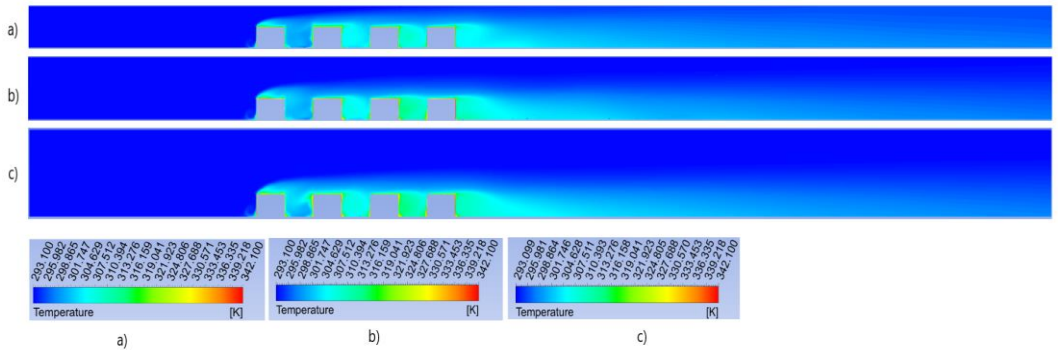


Şekil 4.468. 1,905 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi



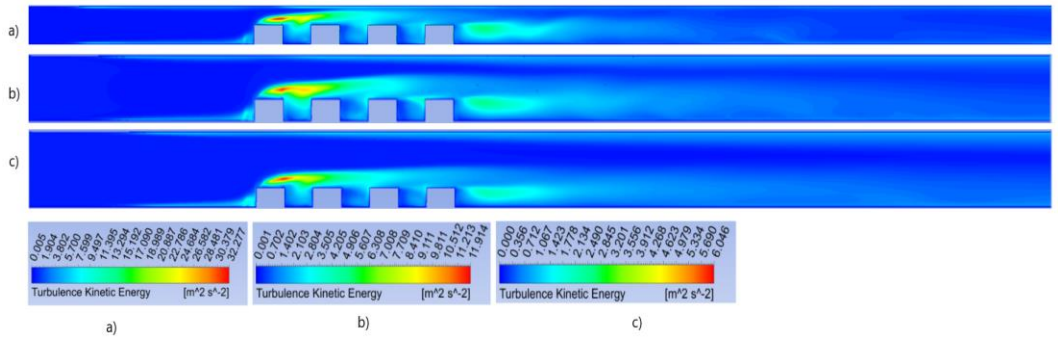
Şekil 4.469. 2,54 cm kanal yüksekliği için basınç değişimi

Şekil 4.470'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar ilk bloğun üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Kanal yüksekliğinin artması ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durum Şekil 4.464 b ve c'de oluşan saat yönünün tersinde oluşan girdapların uzunluğunun daha fazla olmasına yorulabilir. Bu durum kanal yüksekliği azaldıkça etkisini azaltmaktadır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı kanal yüksekliğiyle pek değişmemektedir.



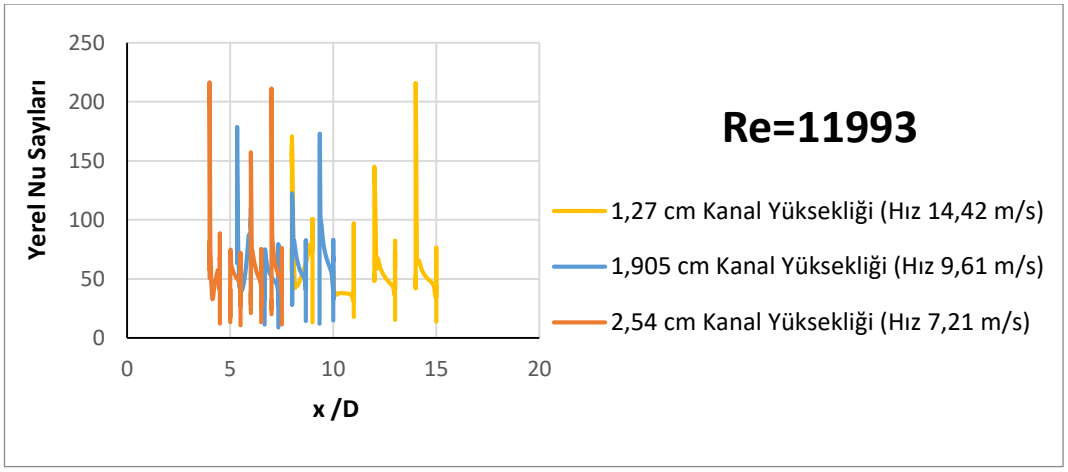
Şekil 4.470. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için sıcaklık kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.471'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup kanal yüksekliği azaldıkça maksimum etki alanı artmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup kanal yüksekliği arttıkça çıkış duvarına doğru yayılmaktadır. Maksimum türbülans kinetik enerji kanal yüksekliğinin daha az olduğu durumda olup değeri 32,27 m^2/s^2'dir.



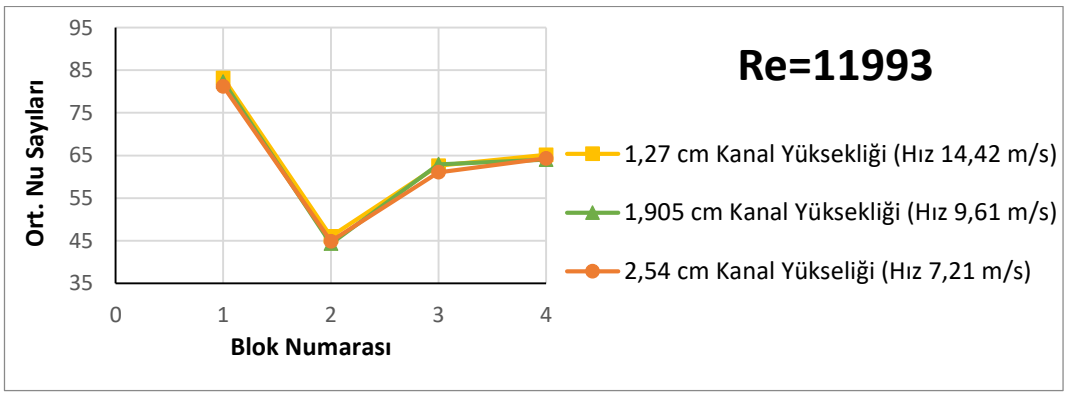
Şekil 4.471. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için türbülans kinetik enerji kontürleri a) 1,27 cm, b) 1,905 cm, c) 2,54 cm (baz geometri) kanal yüksekliği

Şekil 4.472'de farklı kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı kanal yüksekliğinin en az olduğu durum hariç diğer geometrilerde birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca bloklar dar bir kanala yerleştirildiğinden dolayı blokaj etkisinin de bu farklılığa sebep olduğu düşünülebilir.



Şekil 4.472. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.473'de tüm geometriler için, yani kanal yüksekliği değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm kanal yükseklikleri için en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmektedir. Kanal yüksekliğinin artışı Çizelge 4.48'den de görülebileceği gibi ortalama Nu sayısını yani ısı transferini azaltmaktadır.



Şekil 4.473. Re=11993 (7,21 m/s) ve eşdeğer hızlar için ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.48. Re=11993 (7,42 m/s) ve eşdeğer hızlar için tüm yongaların ortalama Nusselt sayısının gösterimi

Kanal Yüksekliği	Ortalama Nusselt Sayısı
1,27 cm	64,23
1,905 cm	63,39
2,54 cm	62,86

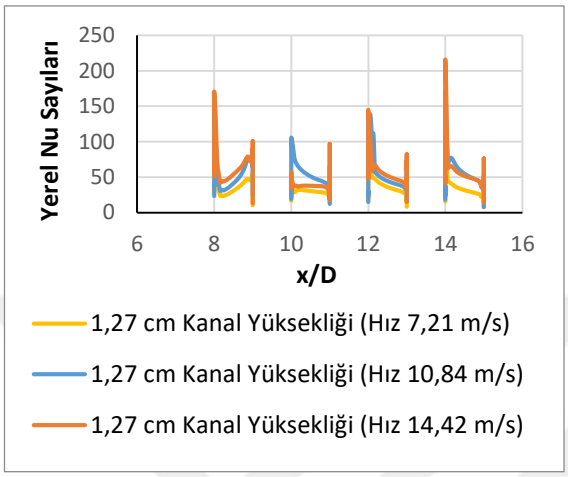
Kanal yüksekliğinin farklı hızlarda karşılaştırılması

Çizelge 4.49'dan görüldüğü üzere aynı geometride Re sayısının artması ise yeniden birleşme uzunluklarında çok az bir miktar azalmaya sebep olmuştur. Pulat (1997), çalışmasında türbülanslı akışta, Reynolds sayısının artmasıyla yeniden birleşme uzunluğunun azaldığını ve 20000 Reynolds sayısından sonra yeniden birleşme uzunluğu değişmediğini gözlemlemiştir.

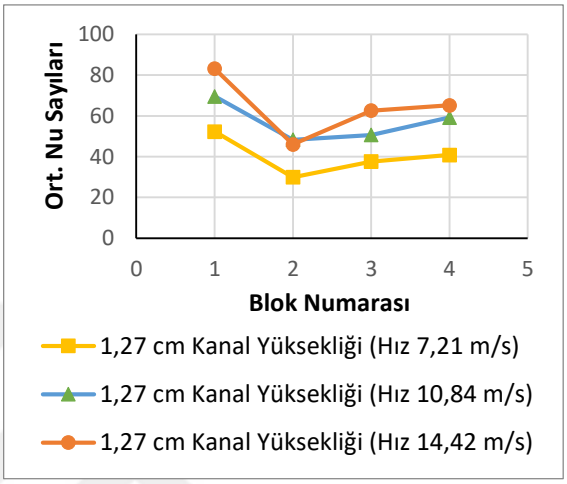
Çizelge 4.49. Farklı kanal yüksekliği ve hızlarda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Kanal Yüksekliği (cm)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	1,27 cm	0,004272	0,02346
	1,905 cm	0,004272	0,026697
	2,54 cm	0,003471	0,020023
5,42	1,27 cm	0,004272	0,023226
	1,905 cm	0,004005	0,025095
	2,54 cm	0,004272	0,023493
7,21	1,27 cm	0,003471	0,021625
	1,905 cm	0,004272	0,022959
	2,54 cm	0,004272	0,022425

1,27 cm kanal yüksekliğinde hızın artırılması Şekil 4.474 ve Şekil 4.475'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.

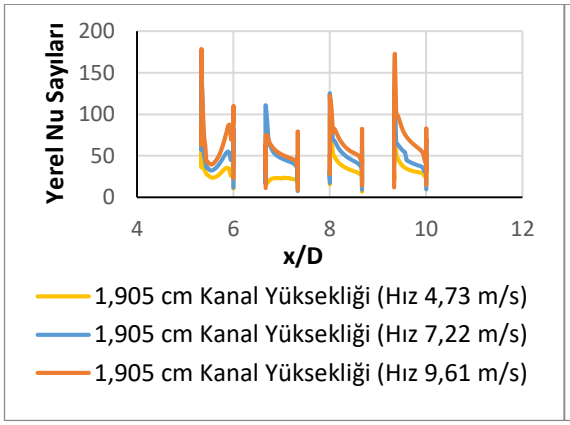


Şekil 4.474. 1,27 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

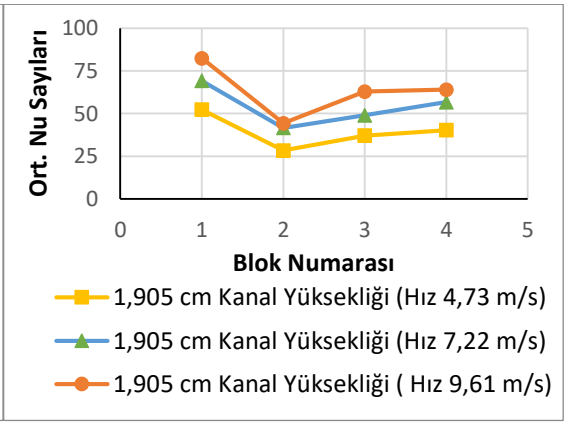


Şekil 4.475. 1,27 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

1,905 cm kanal yüksekliğinde hızın artırılması Şekil 4.476 ve Şekil 4.477'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.

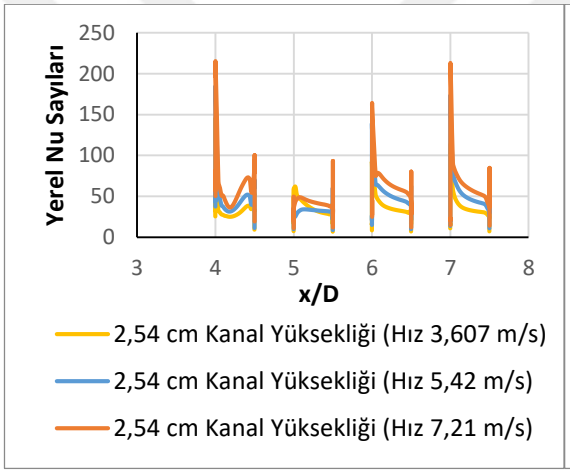


Şekil 4.476. 1,905 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

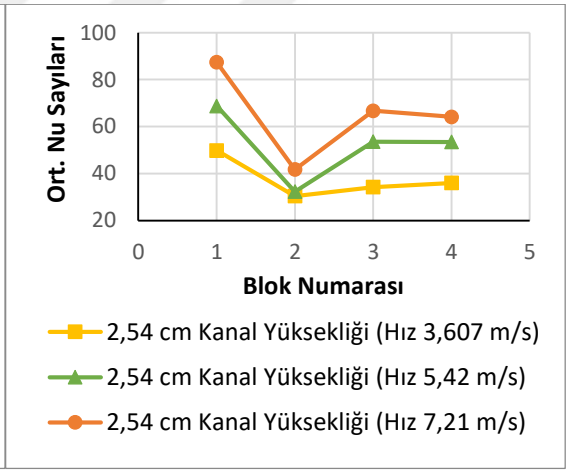


Şekil 4.477. 1,905 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

2,54 cm kanal yüksekliğinde hızın arttırılması (Re sayısının arttırılması) Şekil 4.478 ve Şekil 4.479'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük yerel ve ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.478. 2,54 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları



Şekil 4.479. 2,54 cm kanal yüksekliği için bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

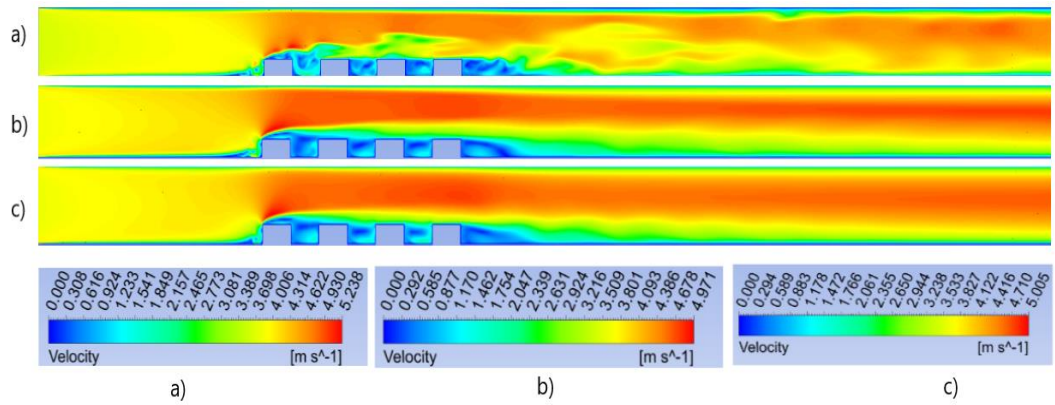
Yapılan 9 adet analizle kanal yüksekliğinin ısı transferine etkisi incelendiğinde; Çizelge 4.46, 4.47 ve 4.48 incelendiğinde en yüksek ortalama Nu sayısı Re=11993 (Hız 7,21m/s) de ve 1,27 cm kanal yüksekliğinde 64,23 olarak tespit edilmiştir. Üç boyutlu analizlerde bulunan en yüksek ısı transferinin elde edildiği bu geometri ve hız iki boyutlu analizlerde elde edilen geometri ve hızla aynıdır. Türkoğlu ve Yücel (1995), dar kanallarda, yüksek Reynolds sayılarında daha etkin soğutma sağlanabildiğini tespit etmişlerdir. Xu ve diğerleri (1998), kanal genişliğinin ısı kaynağının uzunluğuna (blok boyu) oranı arttıkça ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Mohammed (2006), yaptığı çalışmasında modül yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranı arttıkça (yani kanal yüksekliği azaldıkça) ısı transferinin arttığını tespit etmiştir.

4.2.5. 3 boyutlu geometride türbülans giriş parametrelerinin incelenmesi

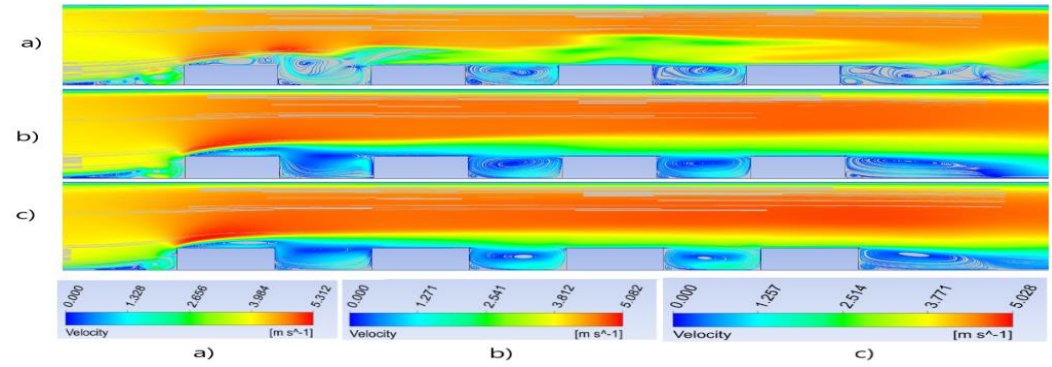
Bu bölümde türbülans giriş parametrelerinden türbülans şiddetinin akış ve ısı transferi üzerine etkileri incelenmiştir. Türbülans şiddeti baz geometri de % 4 alınırken karşılaştırma amaçlı diğer çalışmalarda % 1 ve % 12 de alınmıştır. Bu analizlerin tamamı 3 farklı hız için yapılmış olup bu kısımda da toplam 9 adet analiz yapılmıştır.

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

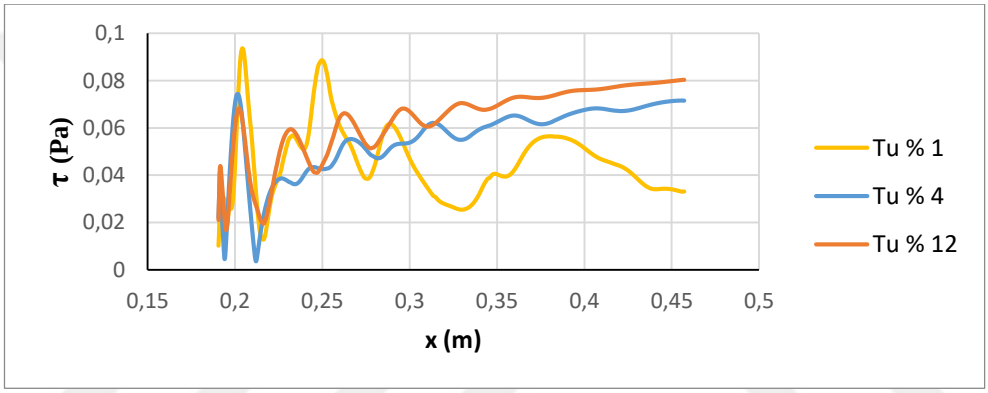
Şekil 4.480 ve 4.481 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün türbülans şiddetlerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Tüm türbülans şiddetlerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve türbülans şiddetinin artmasıyla yeniden birleşme uzunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.53). Ayrıca her üç durumda da son bloğun arka alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.482'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.53'de verilmiştir.



Şekil 4.480. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

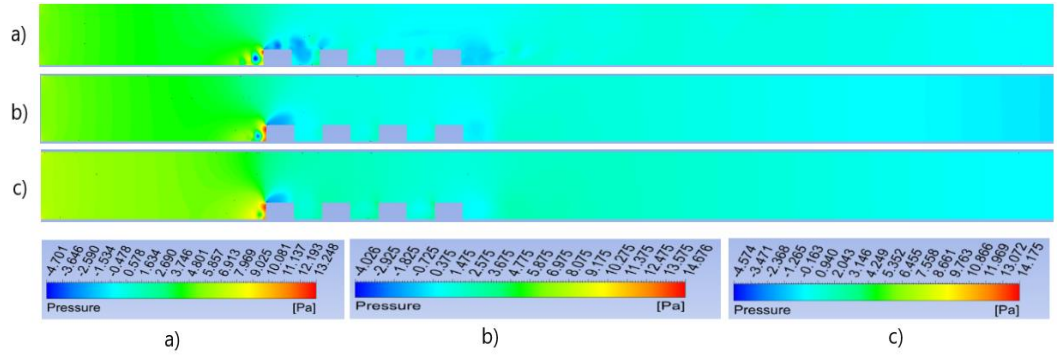


Şekil 4.481. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

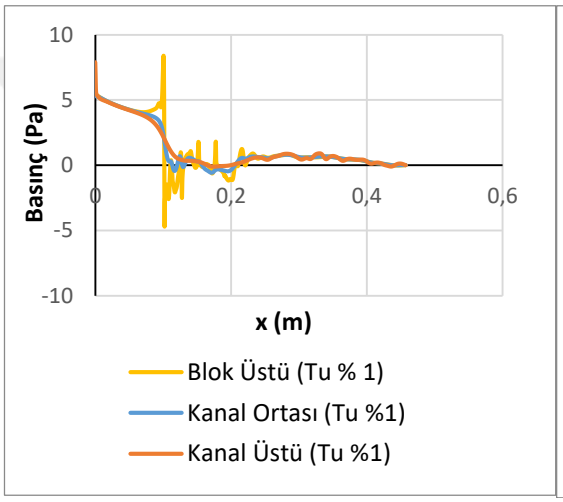


Şekil 4.482. Re=6000 (3,607 m/s) için kayma gerilmeleri gösterimi

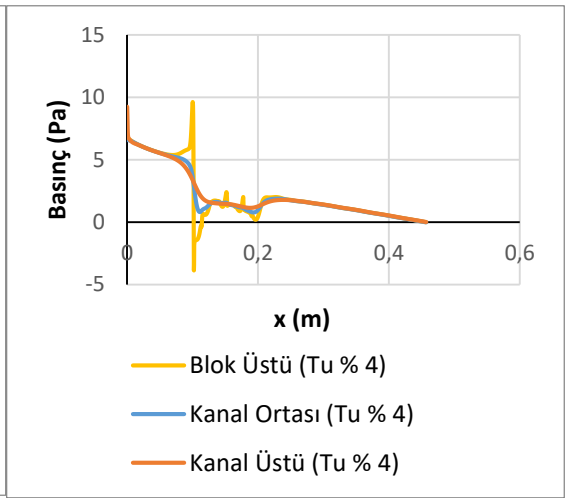
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.483'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.484, 4.485 ve 4.486'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Türbülans şiddetinin artmasıyla Şekil 4.480'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.480 a için 5,2 m/s, b ve c'de azalarak 4,9 m/s ve 5 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.483 b ve c'deki basınçlarda Şekil 4.480 a'daki hızla hemen hemen aynı oranda artmıştır. Şekil 4.480 a'daki minimum basınç -4,7 Pa, b ve c'deki basınçlar ise -4 Pa ve -4,5 Pa olarak hesaplanmıştır. Türbülans şiddeti arttıkça Şekil 4.484, 485 ve 486'dan da görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da çok fazla bir değişim olamamaktadır. Giriş basınçları, % 1 türbülans şiddeti için 5,2 Pa, % 4 türbülans şiddeti için 6,5 Pa ve % 12 türbülans şiddeti için 7,13 Pa olarak elde edilmiştir.



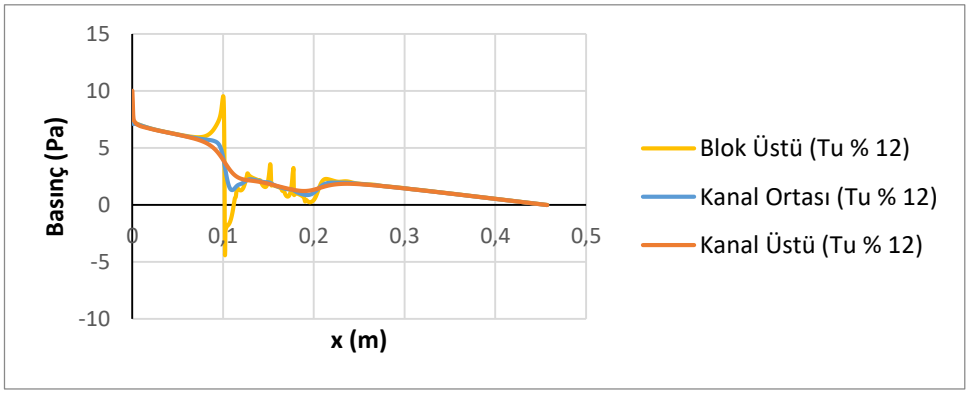
Şekil 4.483. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



Şekil 4.484. Tu % 1 için basınç değişimi

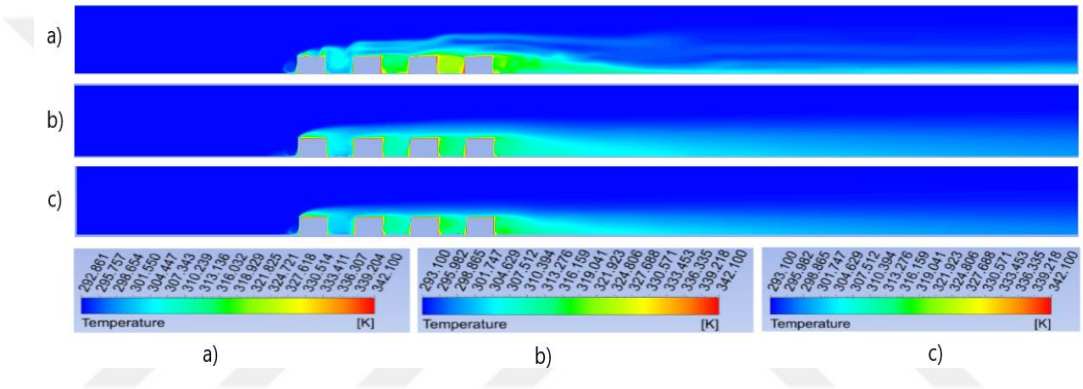


Şekil 4.485. Tu % 4 için basınç değişimi



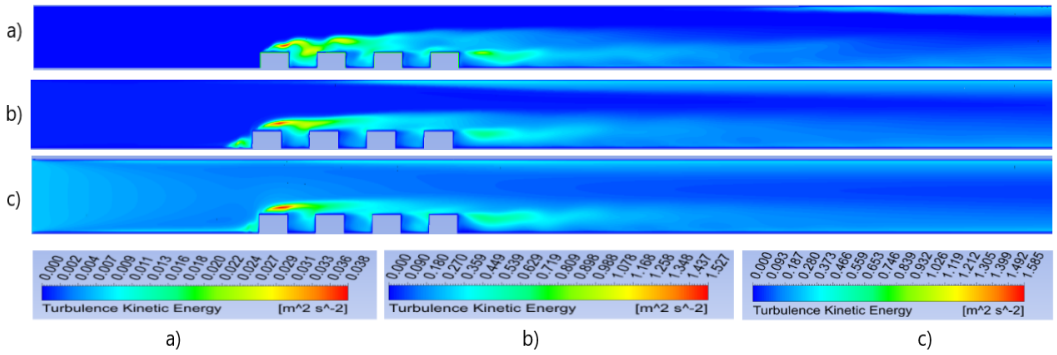
Şekil 4.486. Tu % 12 için basınç değişimi

Şekil 4.487'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar blok üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazladır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı türbülans şiddetinin değişimiyle pek değişmemektedir.



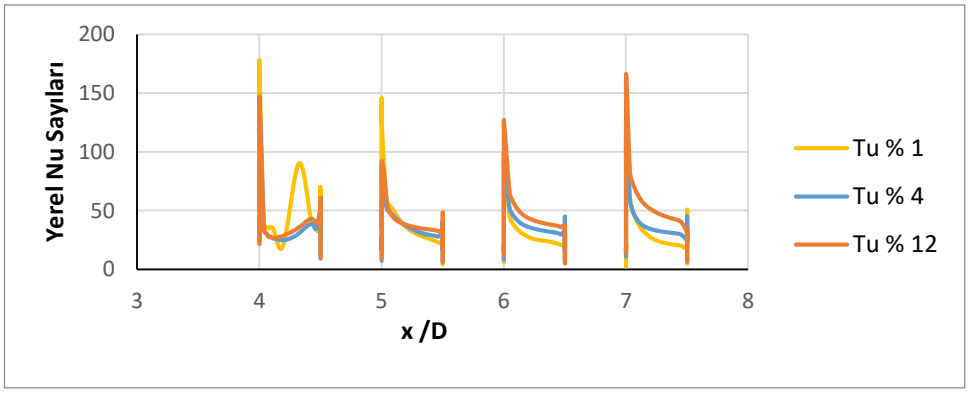
Şekil 4.487. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

Şekil 4.488'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup türbülans şiddeti değişimiyle maksimum etki alanı hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksektir. Tüm durumlarda bu etki hemen hemen aynı kalmaktadır. Maksimum türbülans kinetik enerji türbülans şiddetinin en yüksek olduğu durumda elde edilmiş olup değeri 1,58 $m^2⁄s^2$'dir.



Şekil 4.488. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

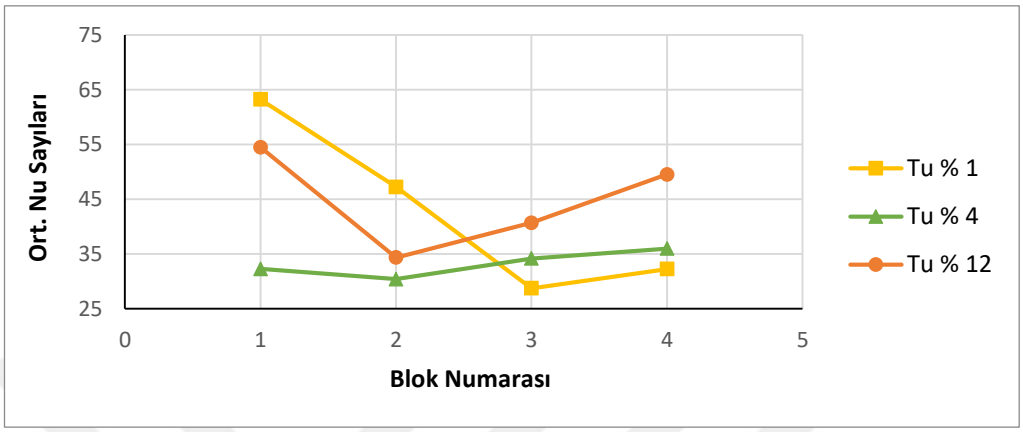
Şekil 4.489'da farklı türbülans şiddetleri için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Türbülans şiddetinin artması yerel Nu sayılarında bir miktar artışa sebep olmuştur.



Şekil 4.489. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.490'da tüm geometriler için, yani türbülans şiddeti değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga

üzerinde edilmiştir. Türbülans şiddetinin daha yüksek olduğu durumlarda en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Türbülans şiddetinin en yüksek olduğu durumda ısı transferinde daha fazla olduğu Çizelge 4.50 yardımıyla da görülebilir.



Şekil 4.490. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

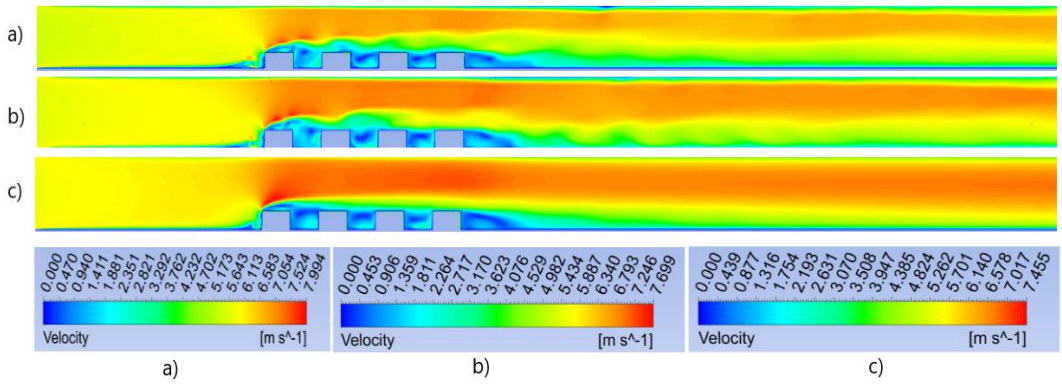
Çizelge 4.50. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Türbülans Şiddeti	Ortalama Nusselt Sayısı
% 1	42,87
% 4	33,22
% 12	44,77

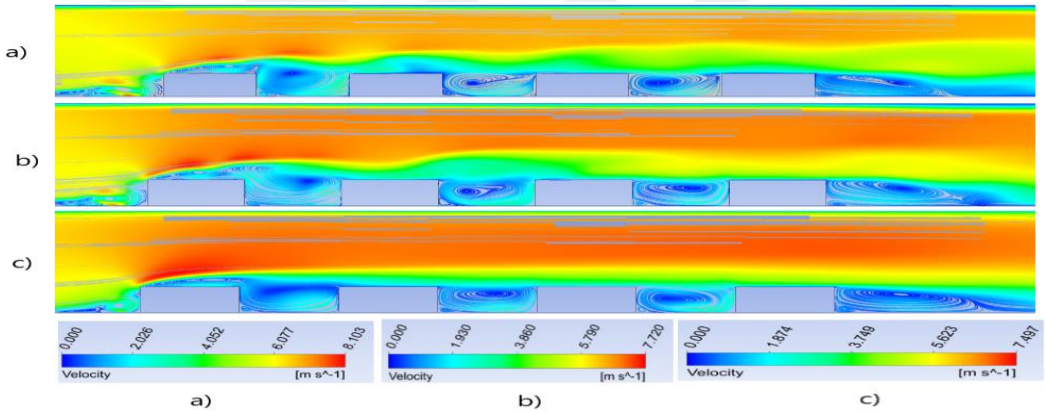
Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.491 ve 4.492 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün türbülans şiddetlerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Tüm türbülans şiddetlerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve türbülans şiddetinin artmasıyla yeniden birleşme uzunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.53). Ayrıca her üç durumda da son bloğun arka alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için son bloktan sonraki alt

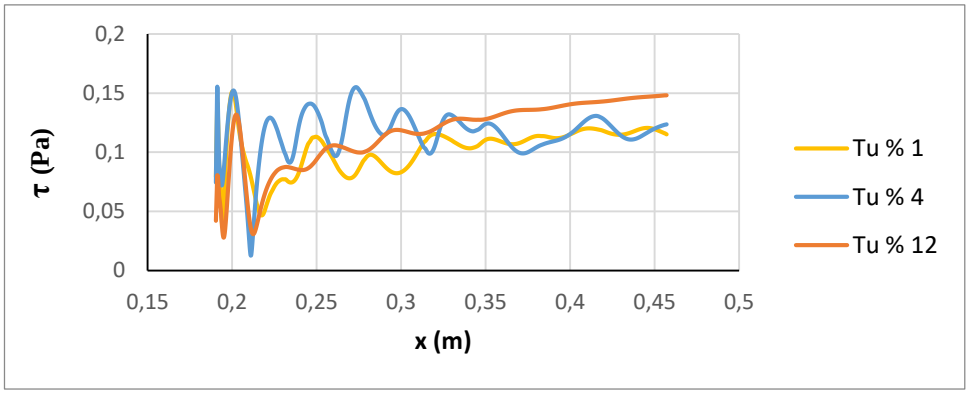
duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.493'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.53'de verilmiştir.



Şekil 4.491. Re=9015 (5,42 m/s) hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

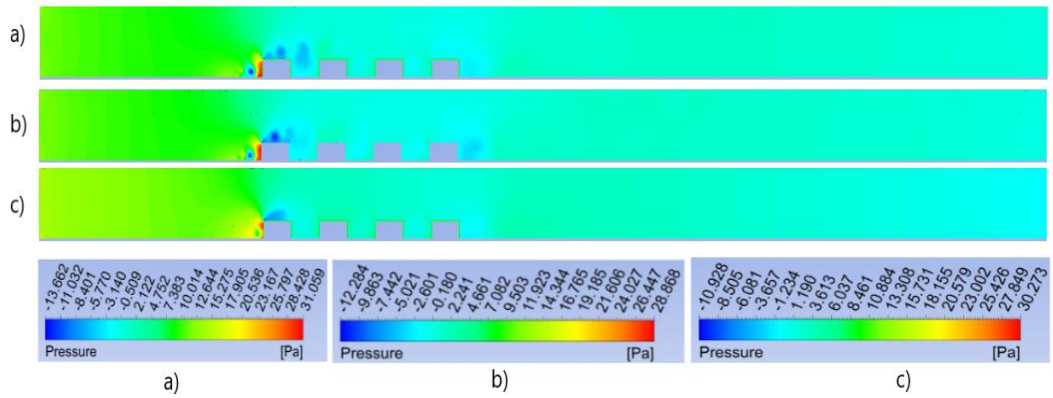


Şekil 4.492. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu %12

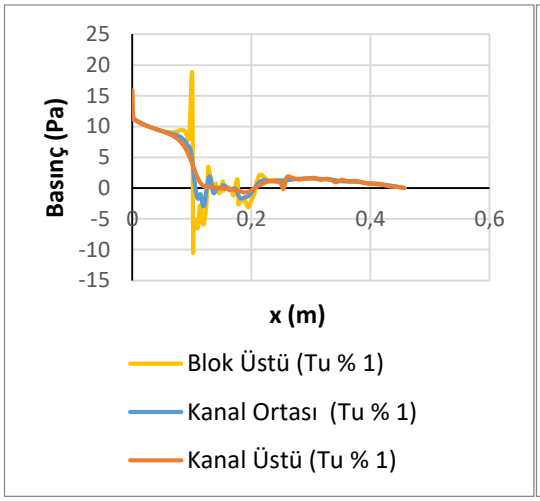


Şekil 4.493. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmeleri değişimi

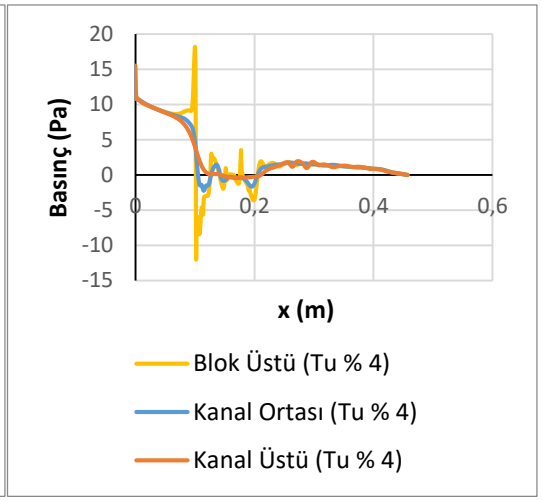
Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.494'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.495, 4.496 ve 4.497'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Türbülans şiddetinin artmasıyla Şekil 4.491'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.491 a için 7,9 m/s, b ve c'de azalarak 7,6 m/s ve 7,4 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.494 b ve c'deki basınçlarda Şekil 4.491 a'dakiyle hemen hemen aynı oranda artmıştır. Şekil 4.494 a'daki minimum basınç -13,6 Pa, b ve c' deki basınçlar ise -12,2 Pa ve -10,9 Pa olarak hesaplanmıştır. Türbülans şiddeti arttıkça Şekil 4.495, 4.496 ve 4.497' den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da çok fazla bir değişim olamamaktadır. Giriş basınçları, % 1 türbülans şiddeti için 11,84 Pa, % 4 türbülans şiddeti için 10,81 Pa ve % 12 türbülans şiddeti için 14,07 Pa olarak elde edilmiştir.



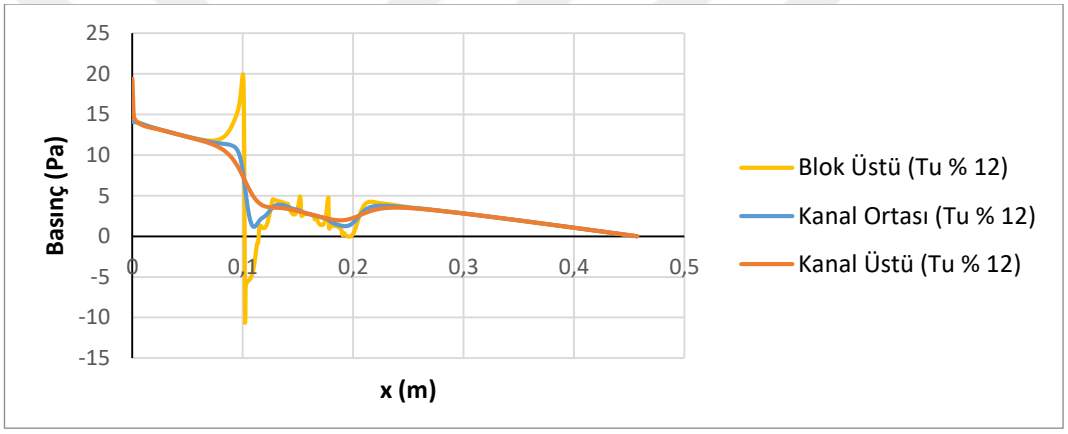
Şekil 4.494. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



Şekil 4.495. Tu % 1 için basınç değişimi

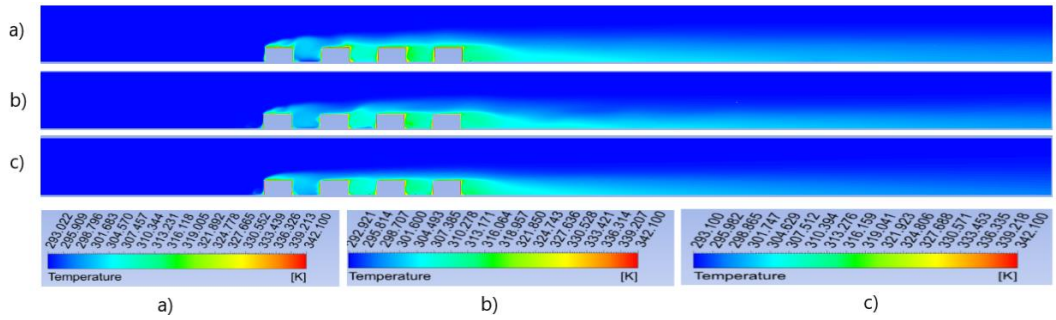


Şekil 4.496. Tu % 4 için basınç değişimi



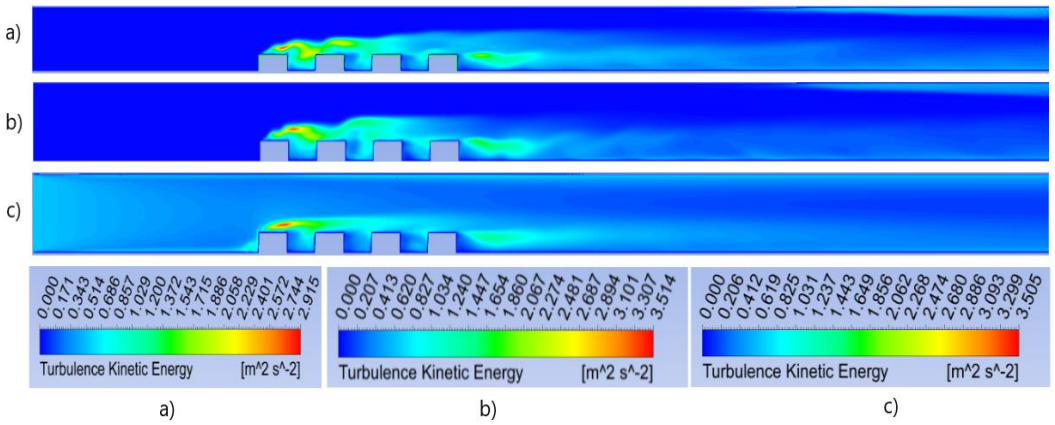
Şekil 4.497. Tu % 12 için basınç değişimi

Şekil 4.498'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar blok üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazladır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı türbülans şiddetinin değişimiyle pek değişmemektedir.



Şekil 4.498. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

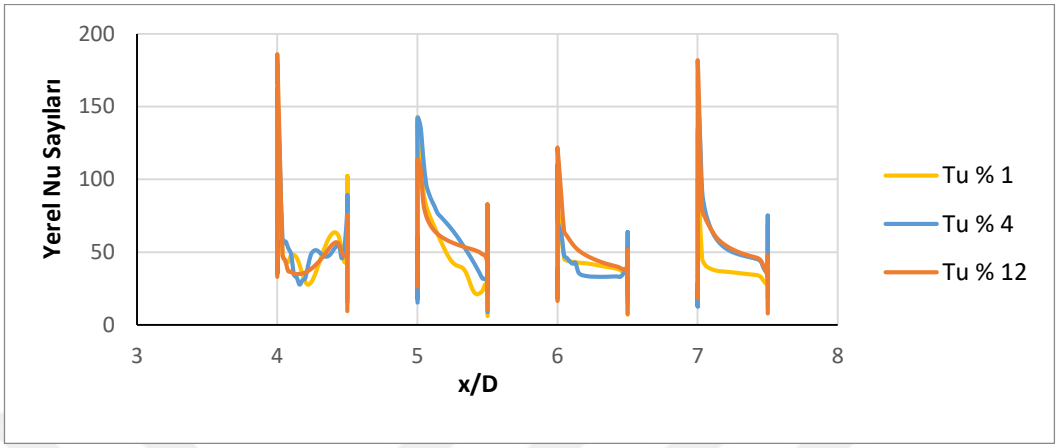
Şekil 4.499'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup türbülans şiddeti değişimiyle maksimum etki alanı hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksektir. Tüm durumlarda bu etki hemen hemen aynı kalmaktadır. Maksimum türbülans kinetik enerji türbülans şiddetinin en yüksek olduğu durumda elde edilmiş olup değeri 3,5 m^2/s^2'dir.



Şekil 4.499. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

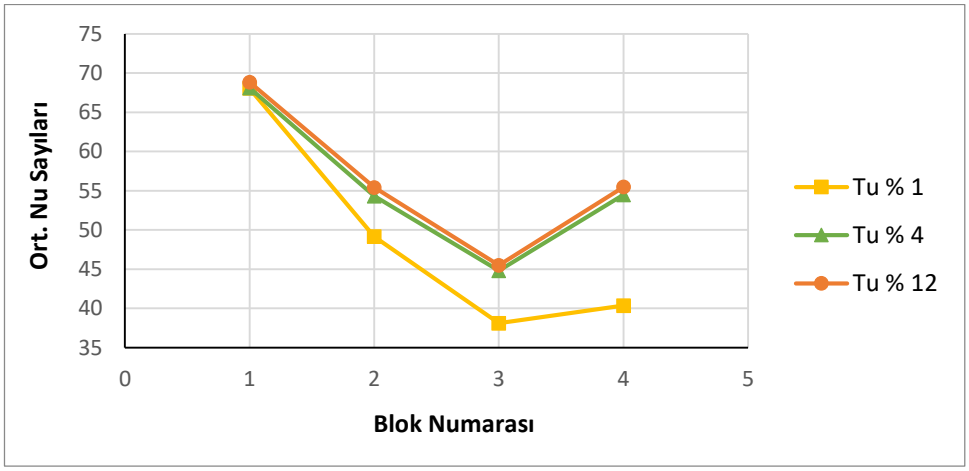
Şekil 4.500'de farklı türbülans şiddetleri için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına

dayandırılmaktadır. Türbülans şiddetinin artması yerel Nu sayılarında bir miktar artışa sebep olmuştur.



Şekil 4.500. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.501'de tüm geometriler için, yani türbülans şiddeti değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Türbülans şiddetinin en yüksek olduğu durumda ısı transferinin de daha fazla olduğu Çizelge 4.51 yardımıyla da görülebilir.



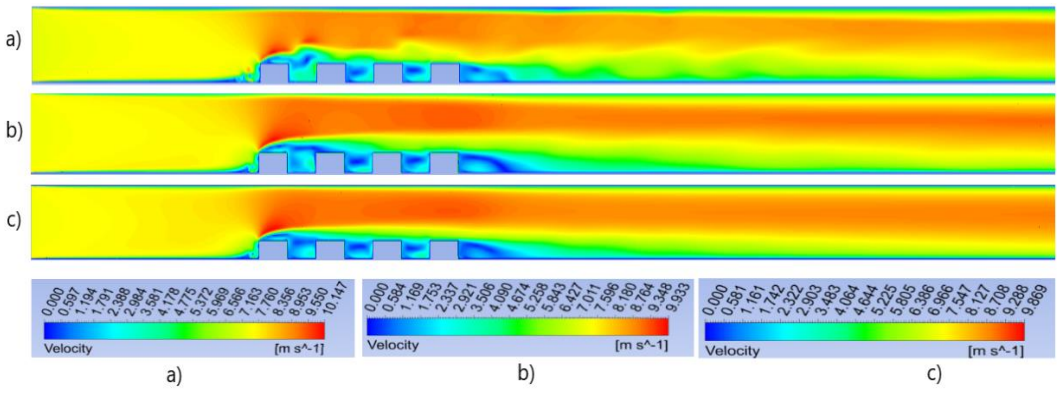
Şekil 4.501. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.51. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

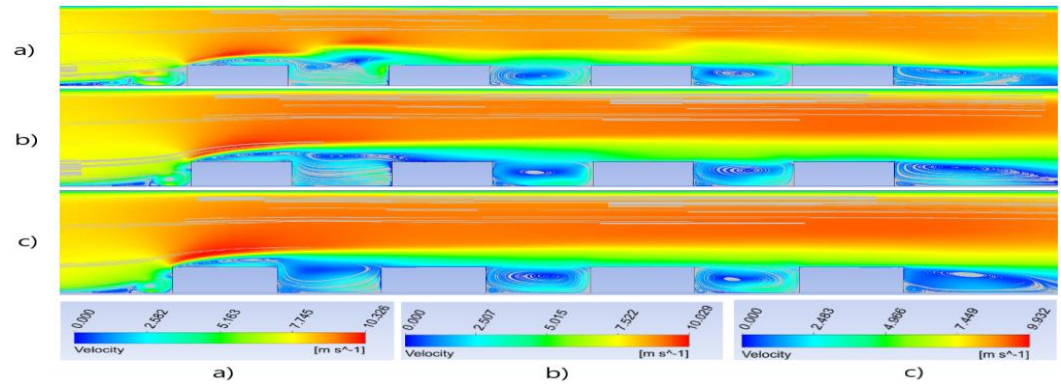
Türbülans Şiddeti	Ortalama Nusselt Sayısı
% 1	48,9
% 4	55,41
% 12	56,29

Re=11993 (V=7,42 m/s için) yapılan çalışmalar;

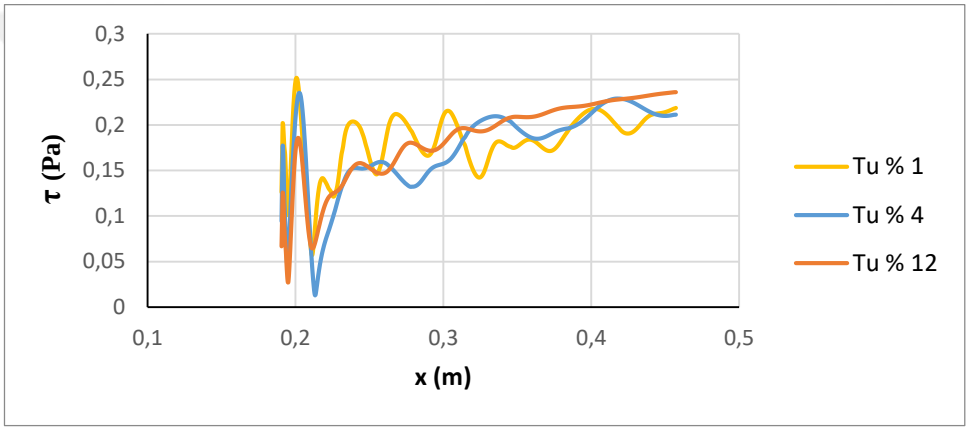
Şekil 4.502 ve 4.503 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Bütün türbülans şiddetlerinde ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Tüm türbülans şiddetlerinde çukurların ön alt ucunda saat yönünün tersi yönde girdaplar oluşmaktadır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemekte ve türbülans şiddetinin artmasıyla yeniden birleşme uzunlukları hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Çizelge 4.53). Ayrıca her üç durumda da son bloğun arka alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.504'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.53'de verilmiştir.



Şekil 4.502. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



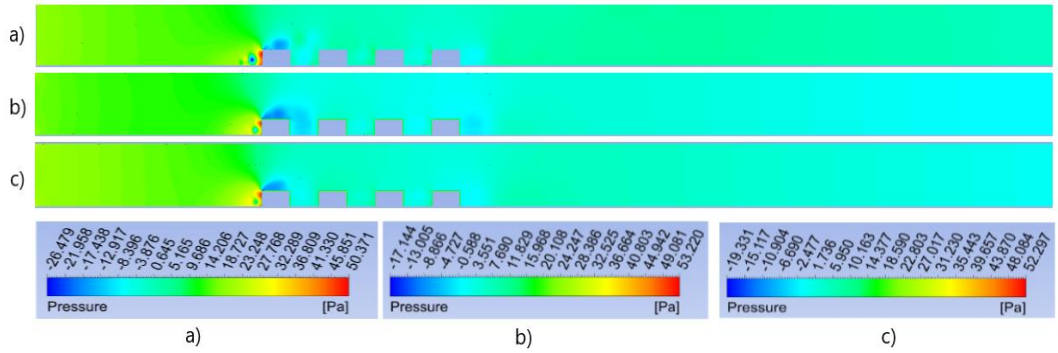
Şekil 4.503. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12



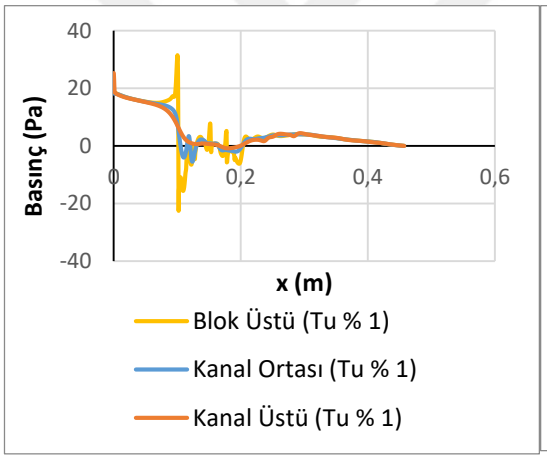
Şekil 4.504. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı türbülans şiddetlerinde kayma gerilmeleri

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.505'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.506, 4.507 ve 4.508'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar tüm geometrilerde birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Türbülans şiddetinin artmasıyla Şekil 4.502'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.502 a için 10,14 m/s, b ve c'de azalarak 9,9 m/s ve 9,8 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.505 b ve c'deki basınçlarda Şekil 4.502 a'dakiyle hemen hemen aynı oranda artmıştır. Şekil 4.505 a'daki minimum basınç -26,4 Pa, b ve c'deki basınçlar ise -17,1 Pa ve -19,33 Pa olarak hesaplanmıştır. Türbülans şiddeti arttıkça Şekil 4.506, 4.507 ve 4.508'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçları da çok fazla bir değişim olmamaktadır. Giriş basınçları, % 1 türbülans şiddeti için 18,15 Pa, %

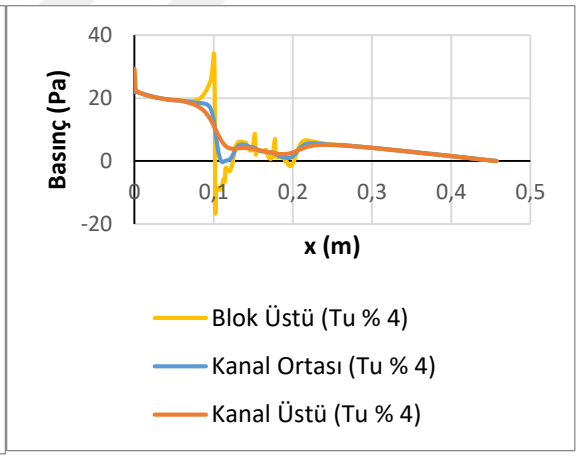
4 türbülans şiddeti için 21,93 Pa ve % 12 türbülans şiddeti için 23,3 Pa olarak elde edilmiştir.



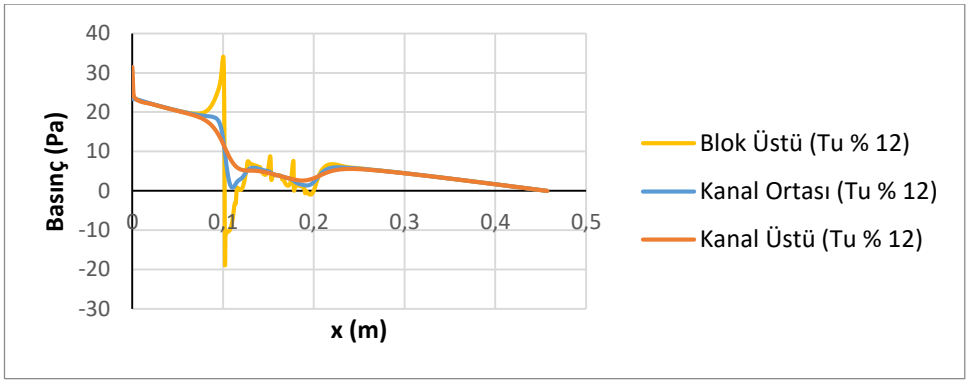
Şekil 4.505. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c)Tu % 12



Şekil 4.506. Tu % 1 için basınç değişimi

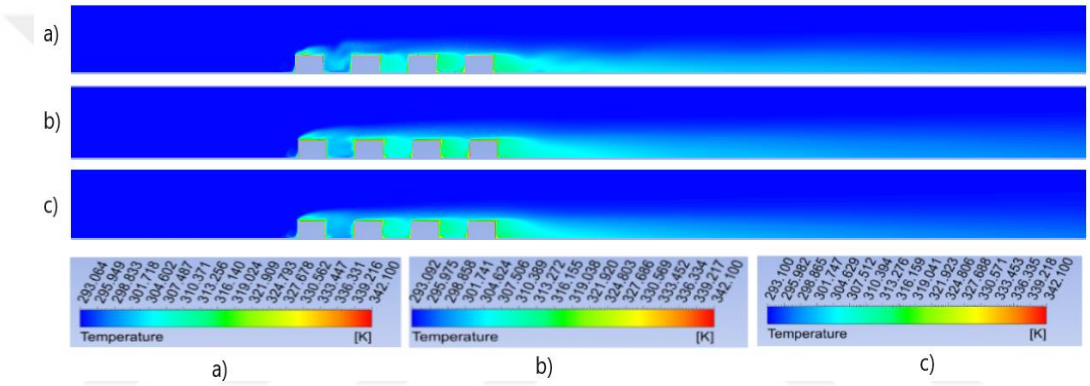


Şekil 4.507. Tu % 4 için basınç değişimi



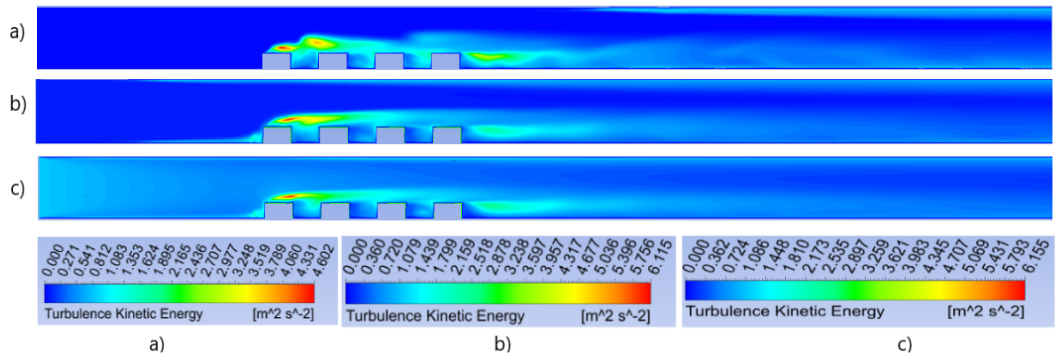
Şekil 4.508. Tu % 12 için basınç değişimi

Şekil 4.509’ da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar blok üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisinin daha fazladır. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı türbülans şiddetinin değişimiyle pek değişmemektedir.



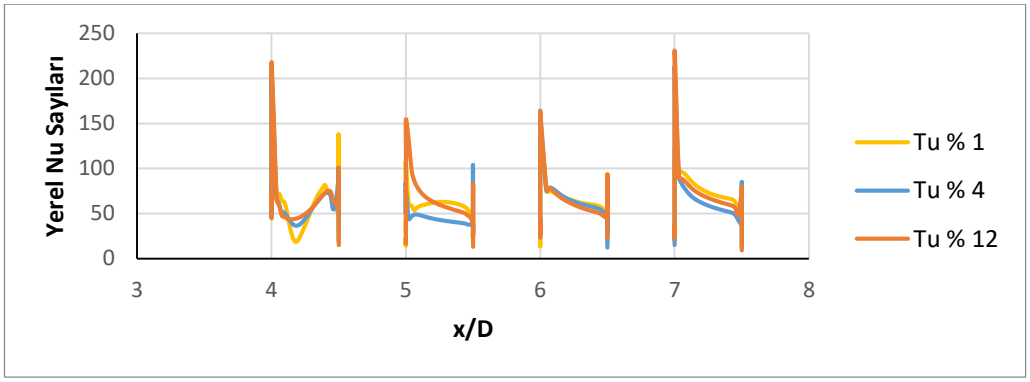
Şekil 4.509. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu % 12

Şekil 4.510’dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup türbülans şiddeti değişimiyle maksimum etki alanı hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksektir. Tüm durumlarda bu etki hemen hemen aynı kalmaktadır. Maksimum türbülans kinetik enerji türbülans şiddetinin en yüksek olduğu durumda elde edilmiş olup değeri 6,15 m^2/s^2’dir.



Şekil 4.510. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Tu % 1, b) Tu % 4 (baz geometri), c) Tu %12

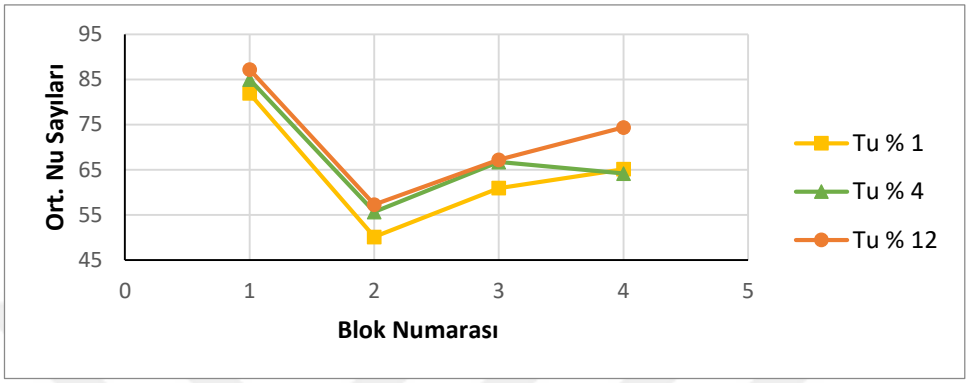
Şekil 4.511'de farklı türbülans şiddetleri için bloklar üzerindeki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nu sayısının türbülans şiddetinin daha az olduğu durumlarda birinci yonga üzerinde elde edilirken, türbülans şiddetinin daha yüksek olduğu durumda dördüncü yonga üzerinde elde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük yerel Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır. Türbülans şiddetinin artması yerel Nu sayılarında bir miktar atışa sebep olmuştur.



Şekil 4.511. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.512'de tüm geometriler için, yani türbülans şiddeti değişimleri için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayısı verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması

alınarak bulunmuştur. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilmiştir. Tüm durumlarda en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Türbülans şiddetinin en yüksek olduğu durumda ısı transferinin de daha fazla olduğu Çizelge 4.52 yardımıyla da görülebilir.



Şekil 4.512. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.52. Re=11993 (7,42 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Türbülans Şiddeti	Ortalama Nusselt Sayısı
% 1	64,51
% 4	67,88
% 12	71,5

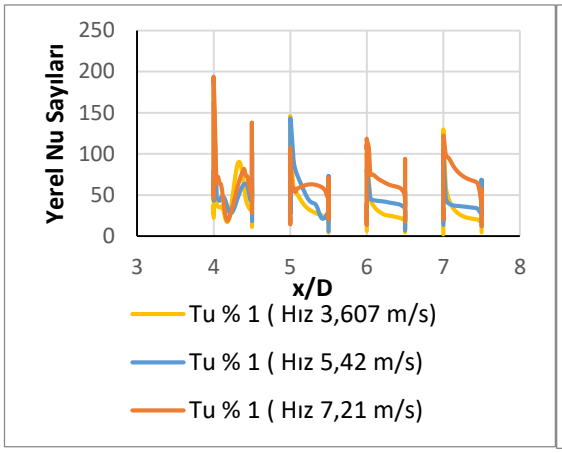
Türbülans giriş parametrelerinin farklı hızlarda incelenmesi

Çizelge 4.53'den görüldüğü üzere türbülans şiddeti arttıkça yeniden birleşme uzunluklarında çok az bir miktar azalma olmaktadır. Aynı geometride Re sayısının artması yeniden birleşme uzunluklarında çok fazla bir değişime sebep olmamaktadır. Isomoto ve Honami (1989), yaptıkları deneysel çalışmada türbülans şiddeti arttıkça yeniden birleşme uzunluklarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Ateş (2015), yaptığı tez çalışmasında geri basamak akışında türbülans şiddeti arttıkça yeniden birleşme uzunluğunun azaldığını gözlemlemiştir.

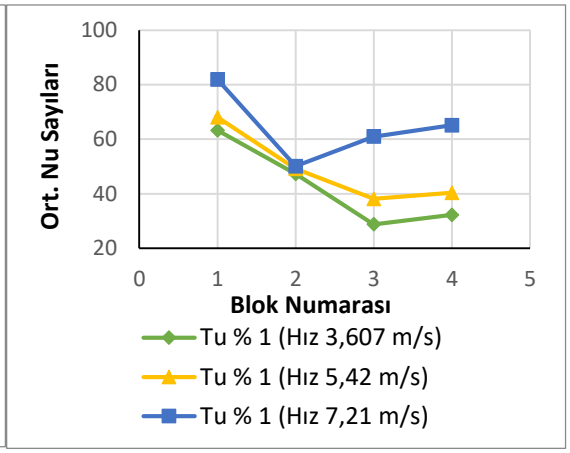
Çizelge 4.53. Tüm türbülans şiddetlerinde ve tüm hızlarda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Türbülans Şiddeti	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	% 1	0,0048	0,0255
	% 4	0,003471	0,021625
	% 12	0,004272	0,025629
5,42	% 1	0,003737	0,026963
	% 4	0,0027112	0,020557
	% 12	0,004538	0,022158
7,21	% 1	0,004538	0,02055
	% 4	0,004005	0,022692
	% 12	0,00488	0,020824

Türbülans şiddeti % 1 için hızın artırılması Şekil 4.513 ve Şekil 4.514'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.

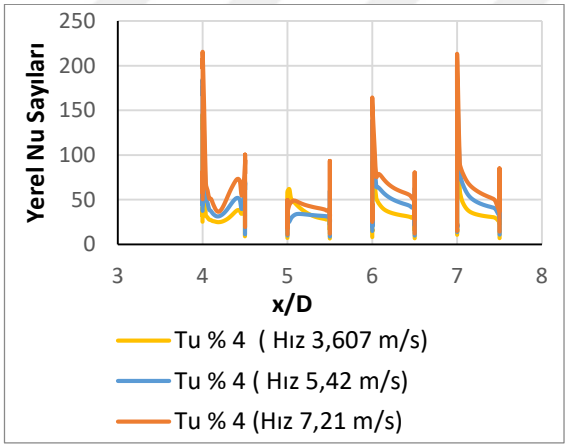


Şekil 4.513. Tu % 1 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

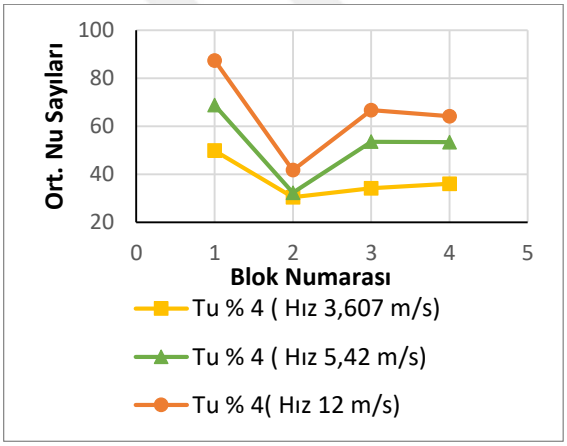


Şekil 4.514. Tu % 1 için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Türbülans şiddeti % 4 için hızın artırılması Şekil 4.515 ve Şekil 4.516'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.



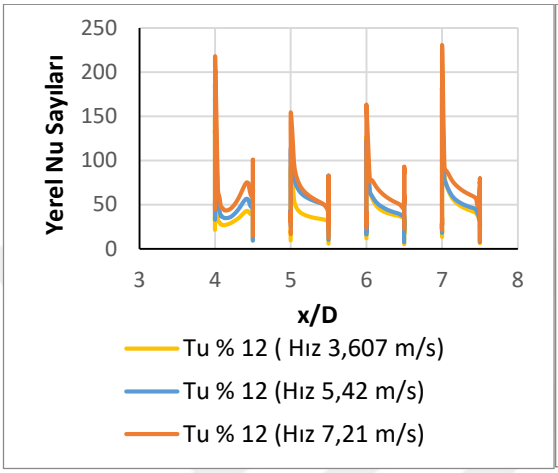
Şekil 4.515. Tu % 4 için yerel Nusselt sayıları



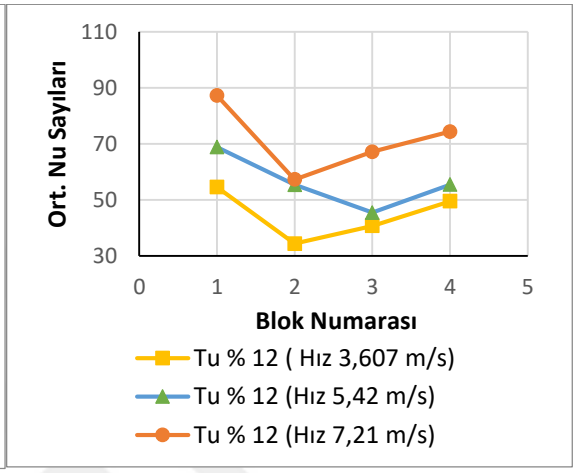
Şekil 4.516. Tu % 4 için ortalama Nusselt sayıları

Türbülans şiddeti % 12 için hızın arttırılması (Re sayısının arttırılması) Şekil 4.517 ve Şekil 4.518'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Demircan (2012) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmasında Reynolds sayısının artması ile Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Etemoğlu ve diğerleri (2004) tek blok üzerinden yaptığı laminer ve türbülanslı çalışmada Reynolds sayısının artmasıyla ısı

taşınım katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Demircan ve Özdemir (2019), tek blok üzerinden laminer akış için yaptıkları soğutma çalışmasında Re sayısının artırılmasıyla birlikte ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı hız 5,42 m/s hariç diğer durumlarda ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.517. Tu % 12 için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları



Şekil 4.518. Tu % 12 için bloklar üzerindeki ort. Nusselt sayıları

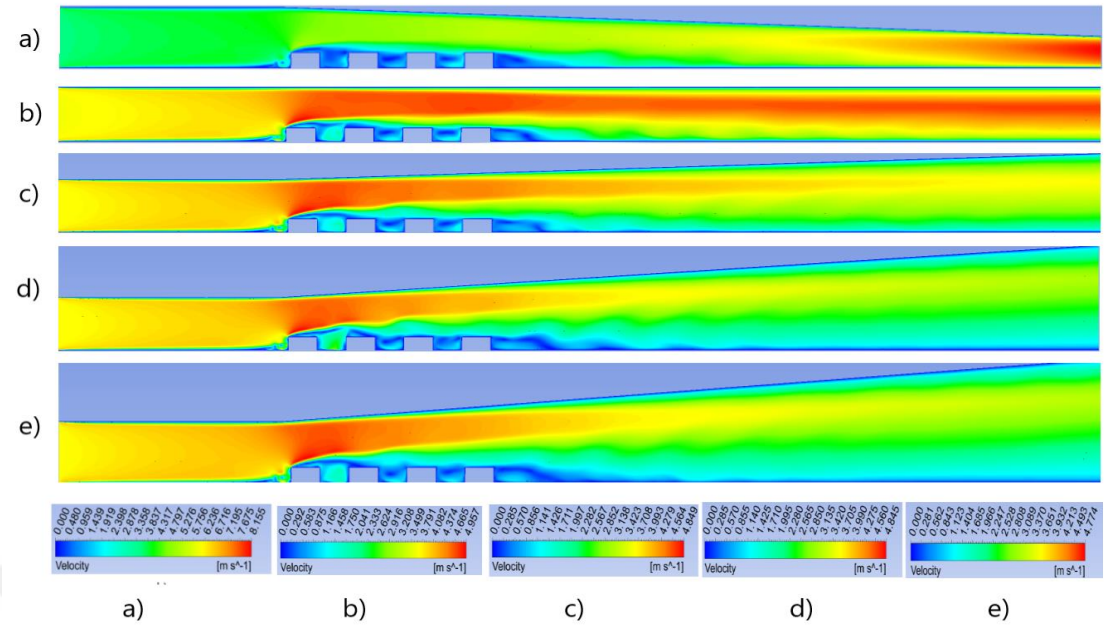
Yapılan 9 adet analizle türbülans şiddetinin ısı transferine etkisi incelendiğinde; Çizelge 4.50, 4.51 ve 4.52 değerlendirildiğinde en yüksek ortalama Nu sayısının Re=11993 (Hız 7,21 m/s)'de ve türbülans şiddeti % 12 olduğu durumda değeri 71,5 olarak tespit edilmiştir. İki boyutlu analizlerde de aynı türbülans şiddeti ve aynı hızda en yüksek ısı transferi elde edilmiştir. Pulat (2000), yaptığı çalışmasında, türbülans şiddetinin arttırılmasının ısı transferi üzerine dikkat çekici bir etkisinin olmadığını vurgulamıştır. Bunun nedenini ilk ısı kaynağının önünde uzunca bir mesafe olmasına dayandırmaktadır (Türbülans şiddeti % 1,2, % 6,9 ve % 13 dür.). Özellik değişimi ve kaldırma kuvvetinin etkisi hesaba katıldığında bile türbülans şiddetinin etkisini açıkça gözlemleyememiştir. Wang ve Mujumdar (2005), yaptıkları iki boyutlu jet çalışmalarında giriş türbülans şiddetini arttırmanın yüzey boyunca ısı transferini çok az bir miktar artırdığını gözlemlemişlerdir (Türbülans şiddeti % 1, 2, 4 ve 6'dır.). İşman, Pulat, Etemoğlu ve Can (2008), yaptıkları jet çalışmalarında 2 farklı türbülans modelinde de türbülans şiddetini artırmanın ısı transferini artırdığını gözlemlemişlerdir.

4.2.6. 3 boyutlu geometride basınç gradyeninin etkisinin incelenmesi

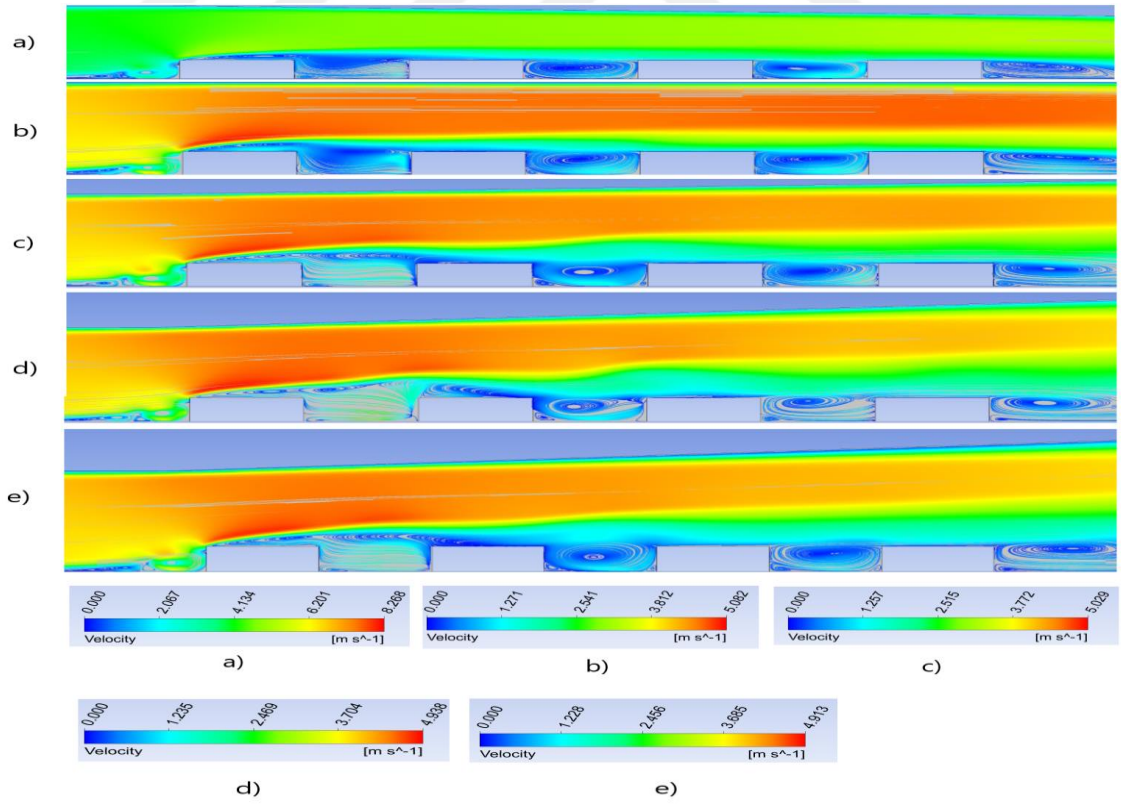
Basınç gradyeni üst plaka üzerine verilen ve ilk bloktan 3 mm önce başlayan eğimle sağlanmıştır. -2°, 0°, 2°, 4° ve 6° ° açı verilerek ısı transferi üzerine basınç gradyeninin etkisi araştırılmıştır.

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

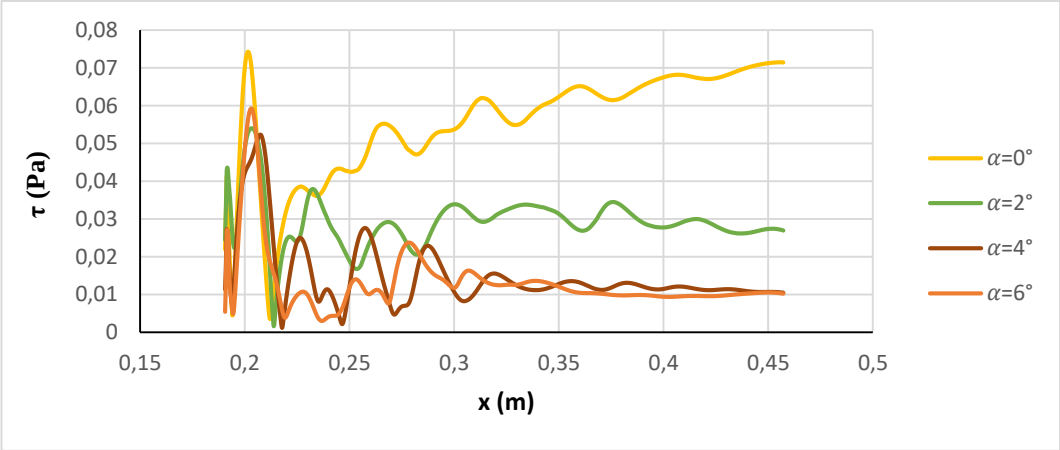
Şekil 4.519 ve 4.520'den de görülebileceği gibi yakınsayan geometri hariç (Şekil 4.519 a) tüm geometrilerde 1. bloktan sonra kesit daralmasından sonra hız artmakta ve hız artış oranı açı arttıkça azalmaktadır. Bu azalma 2°'den sonra yavaşlamaktadır. Şekil 4.519 b' de 0°'de maksimum hız 4,9 m/s olarak akış ilk yongaya çarptıktan sonra 1. yonga üzerinde gözlemlenmiştir. 2°, 4° ve 6°'deki maksimum hızlar sırasıyla 4,849 m/s, 4,845 m/s ve 4,77 m/s olarak hesaplanmıştır. Yakınsayan geometride ise (α= -2°) maksimum hız kesit daralmasının daha fazla olduğu çıkışta elde edilmiş olup 8,1 m/s değerindedir. Şekil 4.519'dan görülebileceği tüm geometrilerde ilk bloktan önce saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Yakınsayan geometri ve baz geometrideki bloklardan sonra saat yönü ve saat yönünün tersindeki blokların boyu benzerdir. Şekil 4.521'den de görülebileceği gibi açının artması yeniden birleşme uzunluğunu artırmıştır. Şekil 4.522'de ise yakınsayan geometri yeniden birleşme uzunluğunu azaltmıştır (Bkz. Çizelge 4.57). Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Tüm geometrilerde son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.521 ve Şekil 4.522'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.57'de verilmiştir.



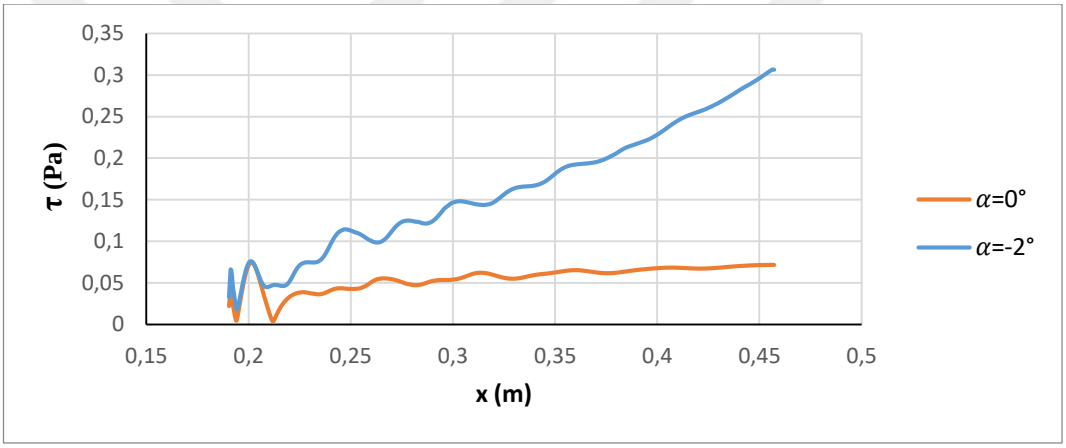
Şekil 4.519. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



Şekil 4.520. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



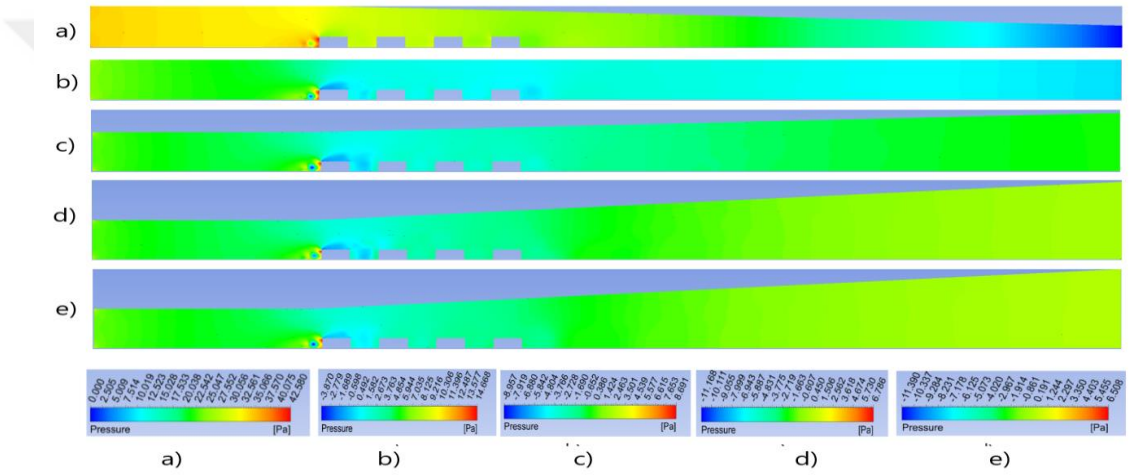
Şekil 4.521. Re=6000 (3,607 m/s) için ıraksayan açılarda ve baz geometride kayma gerilmesi değerleri



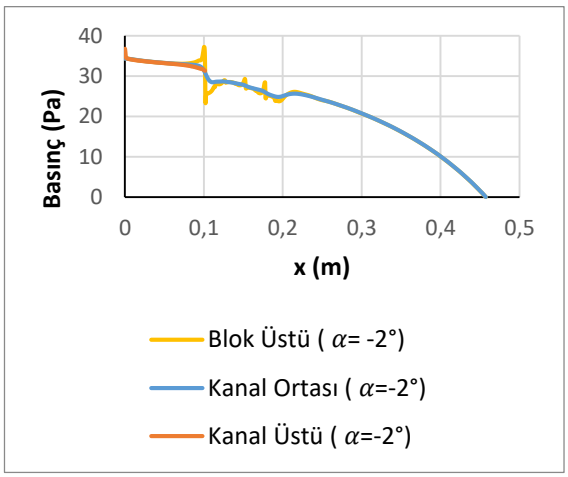
Şekil 4.522. Re=6000 (3,607 m/s) için yakınsayan açıda ve baz geometride kayma gerilmesi değerleri

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.523'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.524, 4.525, 4.526 ve 4.527'da blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar yakınsayan geometri hariç birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Yakınsayan geometride en düşük basınç hızın en yüksek olduğu kanal çıkışında elde edilmiştir. Yakınsayan geometride ise bloklar çevresinde oluşan basınç gradyeni daha homojen olup, ıraksayan geometrilerdeki 1. blokla 2. blok arasında oluşan düşük basınç bölgeleri oluşmamaktadır. Açının artmasıyla Şekil 4.519'dan da

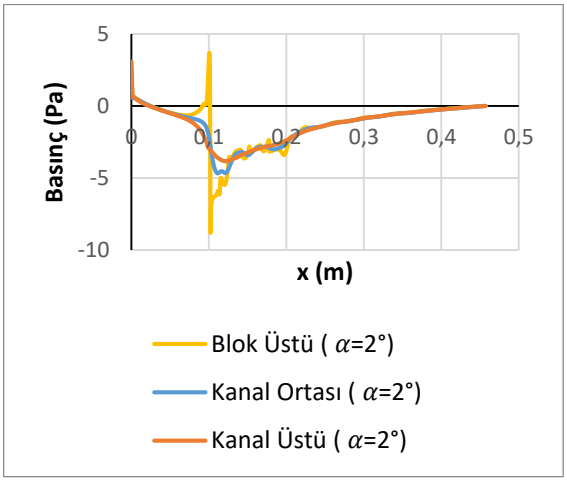
görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.519 c için 4,849 m/s, d ve e 'de azalarak 4,845 m/s ve 4,77 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.523 c, d ve e'deki basınçlarda Şekil 4.519 c, d ve e'dekiyle hemen hemen aynı oranda değişmiştir. Şekil 4.523 c'deki minimum basınç -8,9 Pa, d ve e'deki basınçlar ise -11,1 Pa ve -11,3 Pa olarak hesaplanmıştır. Açı arttıkça Şekil 4.524, 4.525, 4.526 ve 4.527'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçların da çok fazla bir değişim olmamaktadır. Giriş basınçları, α= 2° için 0,56, α= 4° Pa için -1,6 Pa ve α= 6° için -1,6 Pa olarak elde edilmiştir. Fakat açı azaldıkça giriş basıncı artmaktadır (α= -2° için 34,32 elde edilmiştir). Baz geometride yani α= 0° de bu değer 6,59 Pa'dır (Bkz. Şekil 4.524, 4.525, 4.526 ve 4.527).



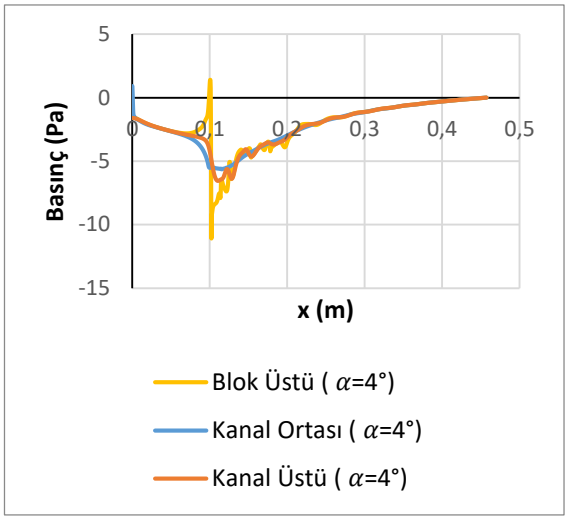
Şekil 4.523. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

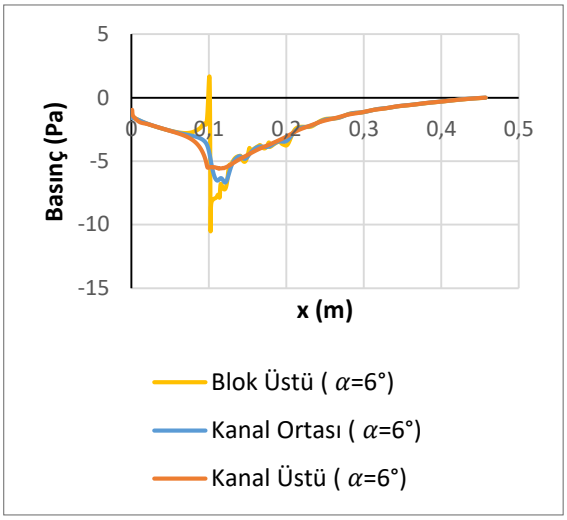


Şekil 4.524. α= -2° için basınç değişimi



Şekil 4.525. α= 2° için basınç değişimi

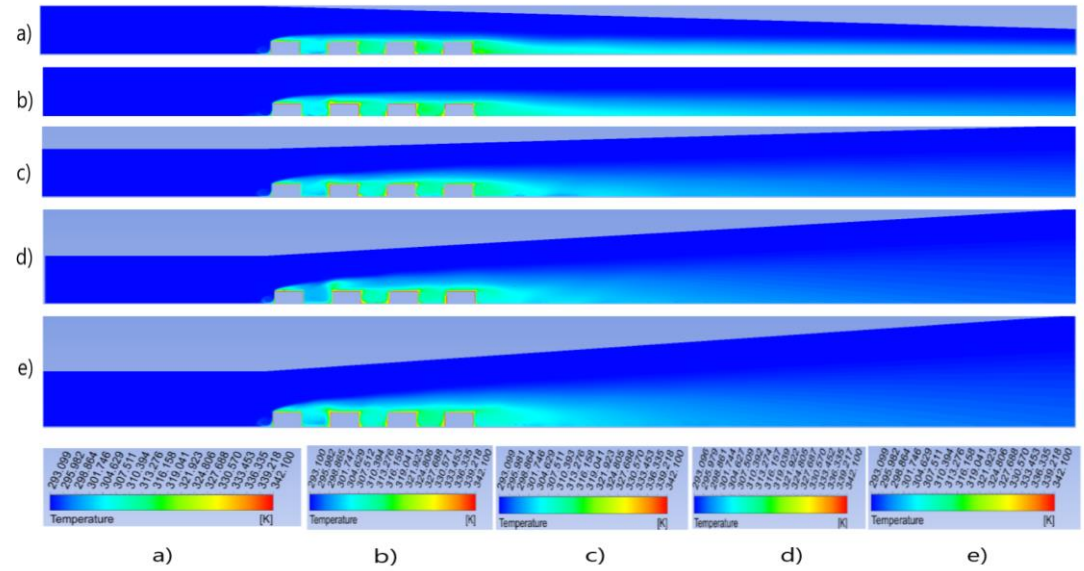




Şekil 4.526. α= 4° için basınç değişimi

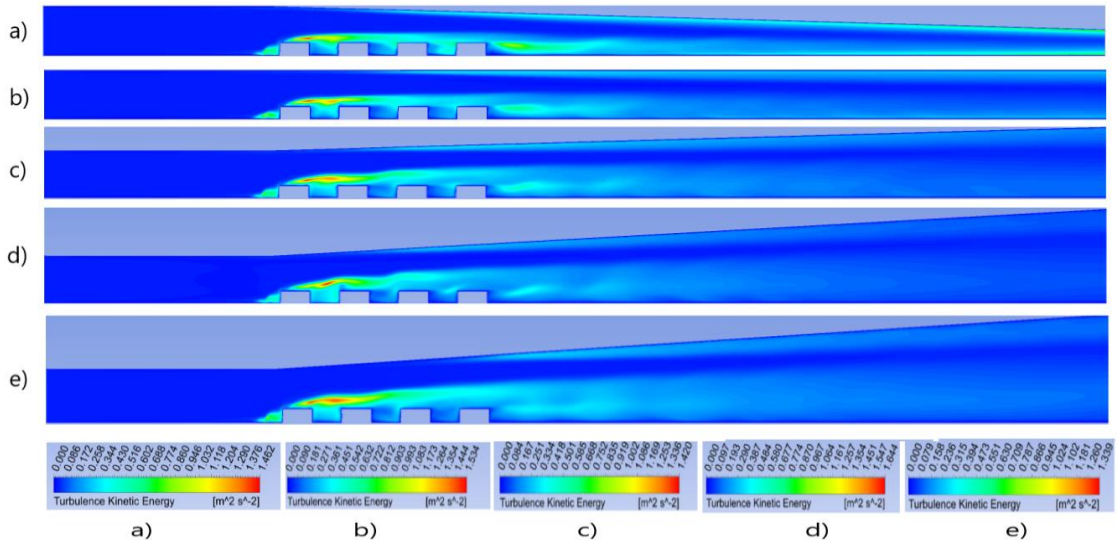
Şekil 4.527. α= 6° için basınç değişimi

Şekil 4.528'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar bloğun üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Ayrıca ıraksayan açılardaki sıcaklık etkisi çıkışa kadar ulaşmamaktadır. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisi daha fazladır. Bu durum giriş havasının birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü yongalardan sonra gelen çukurda etkisinin daha fazla olmasına yorulabilir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı açının artmasıyla azalmaktadır.



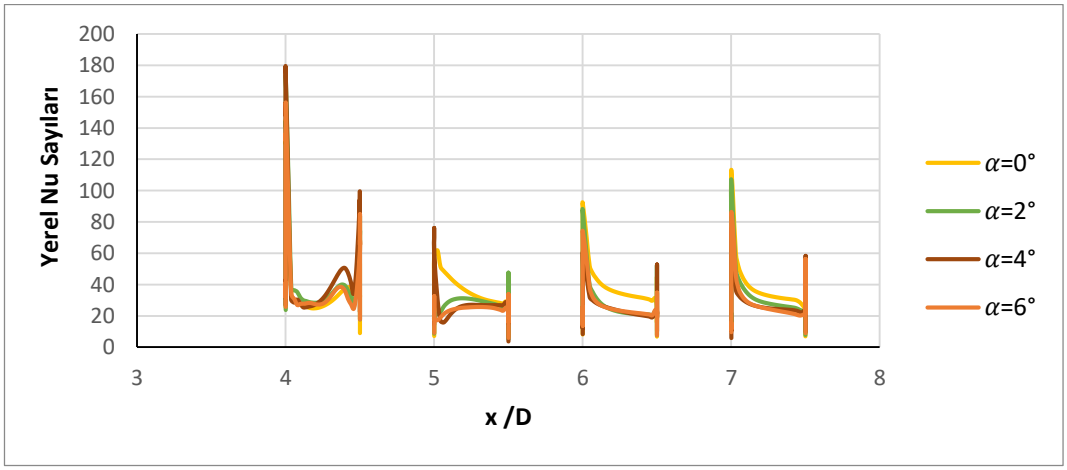
Şekil 4.528. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

Şekil 4.529'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup açı arttıkça 2. bloğun üstüne doğru yayılmaktadır. Ayrıca blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup açı arttıkça çıkışa ve üst duvara doğru yayılmaktadır.

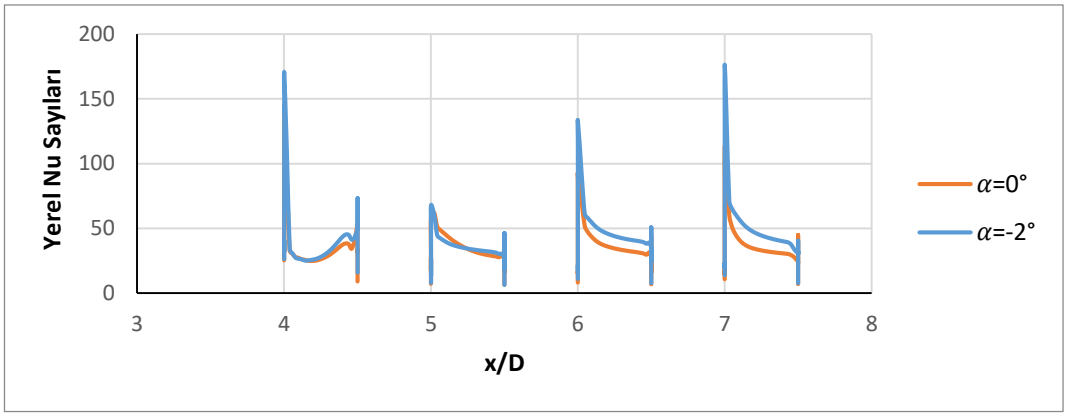


Şekil 4.529. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

Yakınsayan (α = -2°) ve baz (α = 0°) baz geometri için yerel ısı transfer katsayıları Şekil 4.531'de ve baz geometri ve ıraksayan (α = 2°, 4° ve 6°) geometriler için de Şekil 4.530'da gösterilmiştir. Şekil 4.530'da maksimum yerel Nu sayısı ıraksayan geometriler için birinci bloğun ön ucunda elde edilmiştir. Şekil 4.531'da maksimum yerel Nu sayısı yakınsayan geometri için dördüncü blok üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998). Birinci blok üzerinde blok sonuna doğru yakınsayan geometride ısı taşınım katsayısı artmakta, baz geometride de tam benzer bir eğilim sergilemektedir. Yani şiddetli akış ayrılmasının olduğu yerler zayıf taşınımla ısı transferi sergilemekte, tersi olarak akış yeniden birleşmesinin olduğu yerler ise kuvvetli taşınımla ısı transferi sergilemektedirler. İkinci, üçüncü ve dördüncü blokların üstünde ise yerel ısı taşınım katsayısı dağılımları beklendiği gibi düzlem levha üzerindeki akış durumuna benzemekte, bloklar üzerinde blok sonuna doğru akışkan sıcaklığındaki çok hafif düşüşün neden olduğu çok hafif bir yükselme göze çarpmaktadır. Tüm bloklar için üst plakadaki negatif açı (yakınsama) blok yüzeyinde blok ucundan sonra yerel Nu sayısını arttırmaktadır. Şekil 4.530'dan da görüldüğü gibi ıraksayan geometrilerde (α = 2°, 4° ve 6°), ıraksama açısı arttıkça lokal Nu sayısı azalmaktadır. Iraksayan geometrilerde birinci bloğun arka ucundaki yerel Nu sayısı arttıktan sonra keskin bir şekilde düşüp yine keskin bir biçimde artması olayı açı arttıkça şiddetini daha da arttırmakta ve yakınsayan geometride de benzer bir eğilim ortaya çıkmaktadır.

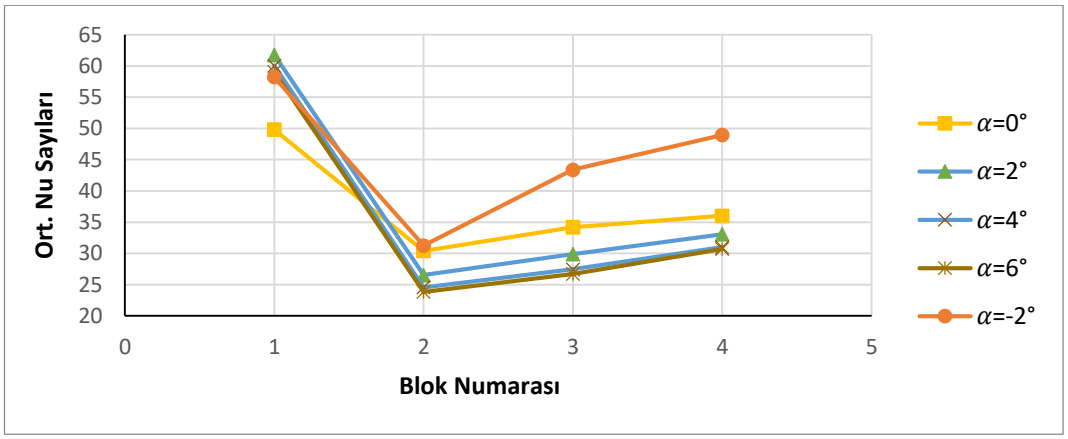


Şekil 4.530. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri karşılaştırılması)



Şekil 4.531. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Yakınsayan geometri ve baz geometri karşılaştırılması)

Şekil 4.532'de ıraksayan geometriler için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.532'de ilk göze çarpan nokta baz geometriye göre açının artması durumunda artan ıraksama açısıyla birlikte ortalama Nu sayısının düşmesidir. Tüm geometrilerde en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilmektedir. Tüm durumlarda en düşük ortalama Nu sayısı ise ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere yakınsayan açı ortalama Nu sayısını artırmıştır. Çizelge 4.54'de tüm açılarda ortalama Nu sayısı verilmiştir buradan da görülebileceği gibi en yüksek ısı transferi α=-2°'de elde edilmiştir.



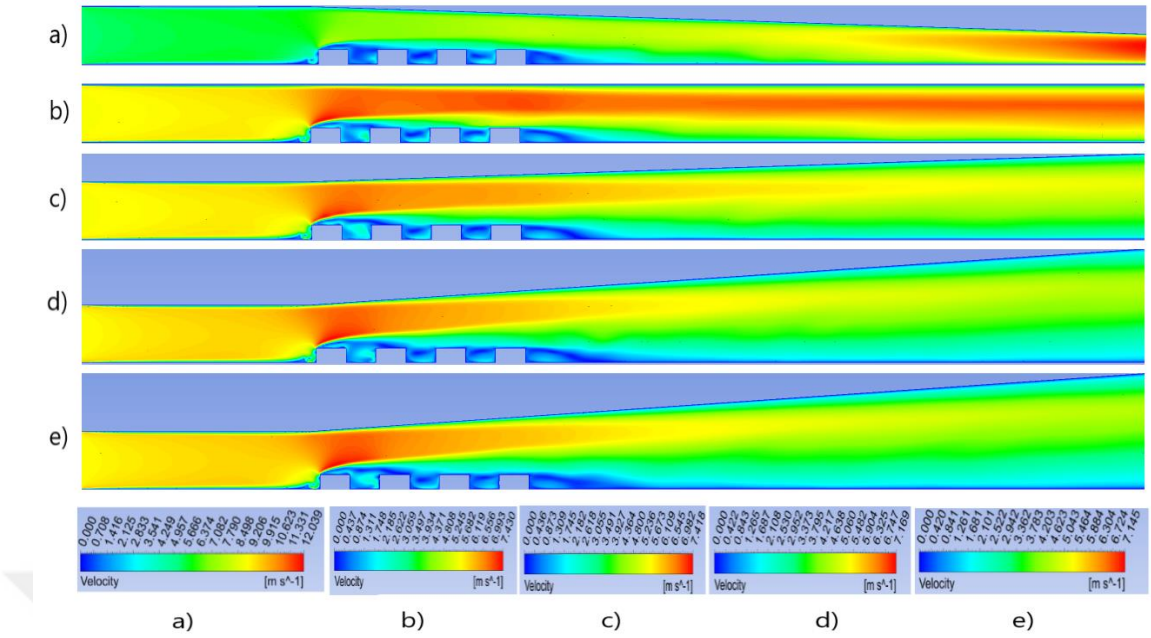
Şekil 4.532. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları (Yakınsayan, ıraksayan geometriler ve baz geometri karşılaştırılması)

Çizelge 4.54. Re=6000 (3,607 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

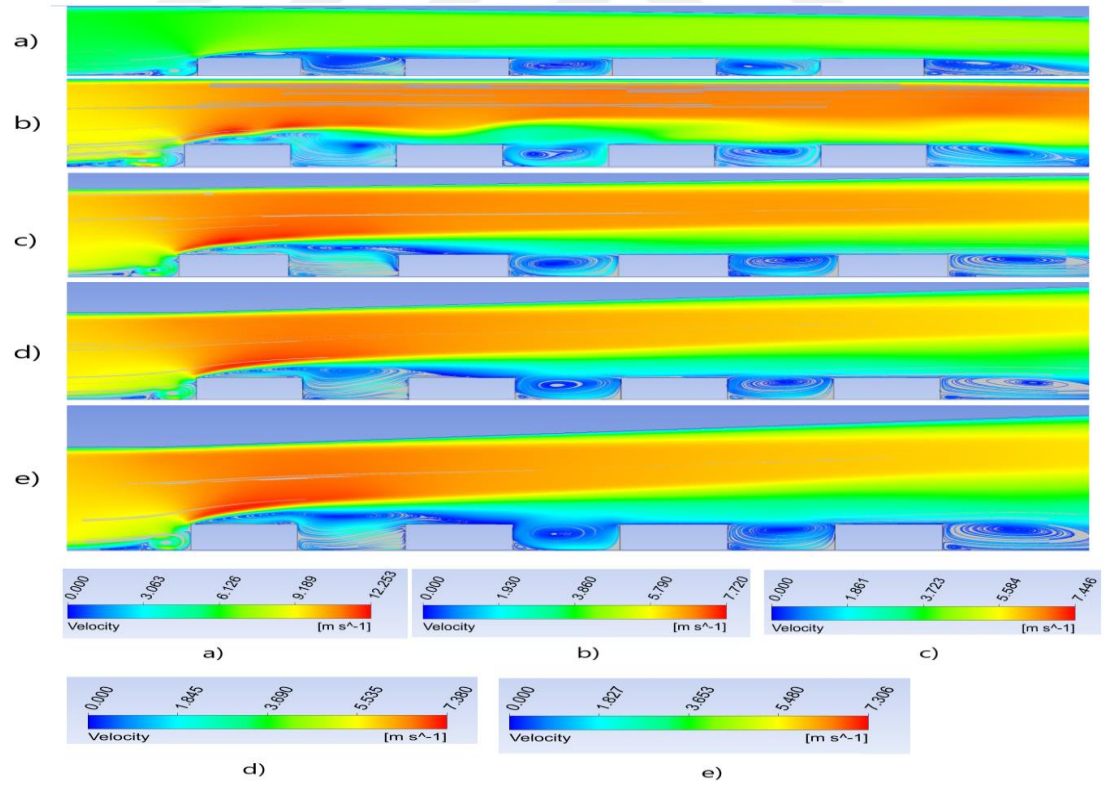
Açı	Ortalama Nusselt Sayısı
α=-2°	45,46
α=2°	37,82
α=4°	35,76
α=6°	35,08

Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

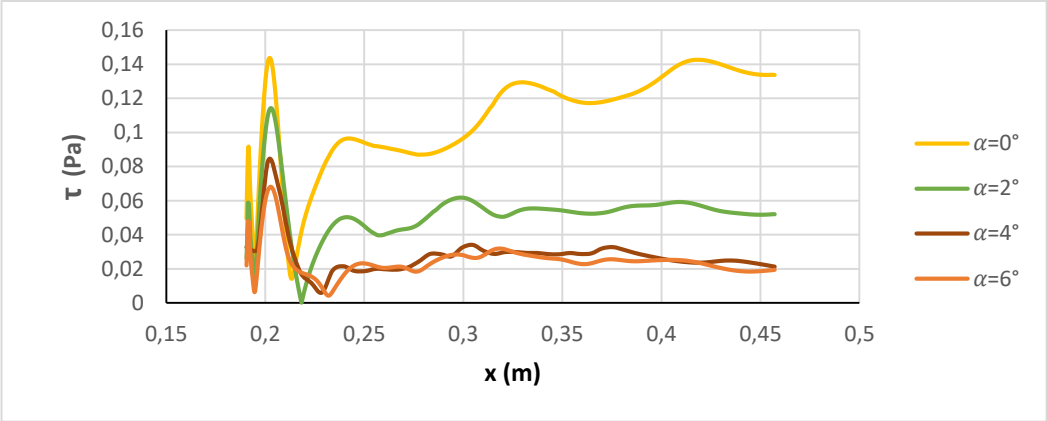
Şekil 4.533 ve 4.534'den de görülebileceği gibi yakınsayan geometri hariç (Şekil 4.533 a) tüm geometrilerde 1. bloktan sonra kesit daralmasından sonra hız artmakta ve hız artış oranı açı arttıkça azalmaktadır. Bu azalma 2°'den sonra yavaşlamaktadır. Şekil 4.533 b'de 0°'de maksimum hız 7,4 m/s olarak akış ilk yongaya çarptıktan sonra 1. yonga üzerinde gözlemlenmiştir. 2°, 4° ve 6°'deki maksimum hızlar sırasıyla 7,41 m/s, 7,16 m/s ve 7,14 m/s olarak hesaplanmıştır. Yakınsayan geometride ise (α= -2°) maksimum hız kesit daralmasının daha fazla olduğu çıkışta elde edilmiş olup 12 m/s değerindedir. Şekil 4.534'den görülebileceği tüm geometrilerde ilk bloktan önce saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Yakınsayan geometri ve baz geometrideki bloklardan sonra saat yönü ve saat yönünün tersindeki blokların boyu benzerdir. Şekil 4.535'den de görülebileceği gibi açının artması yeniden birleşme uzunluğunu artırmıştır. Şekil 4.536'de ise yakınsayan geometri yeniden birleşme uzunluğunu azaltmıştır (Bkz. Çizelge 4.57). Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Tüm geometrilerde son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.535 ve Şekil 4.536'daki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.57'de verilmiştir.



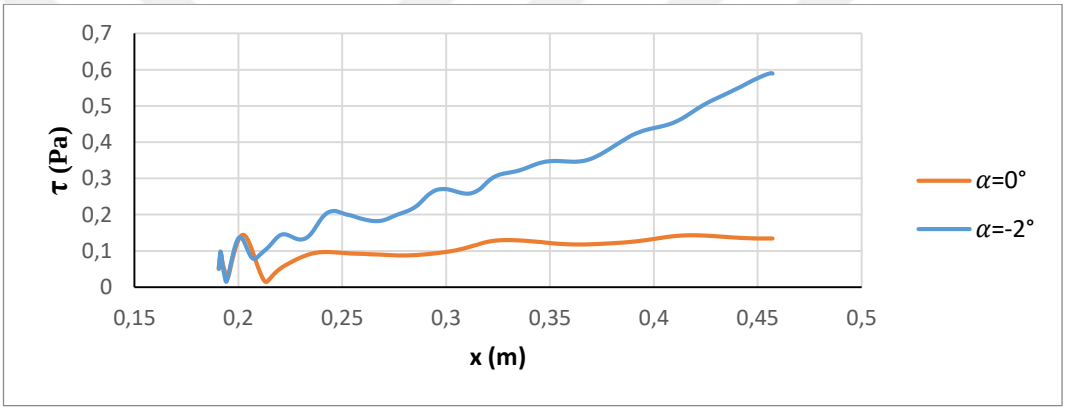
Şekil 4.533. Re=9015 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



Şekil 4.534. Re=9015 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



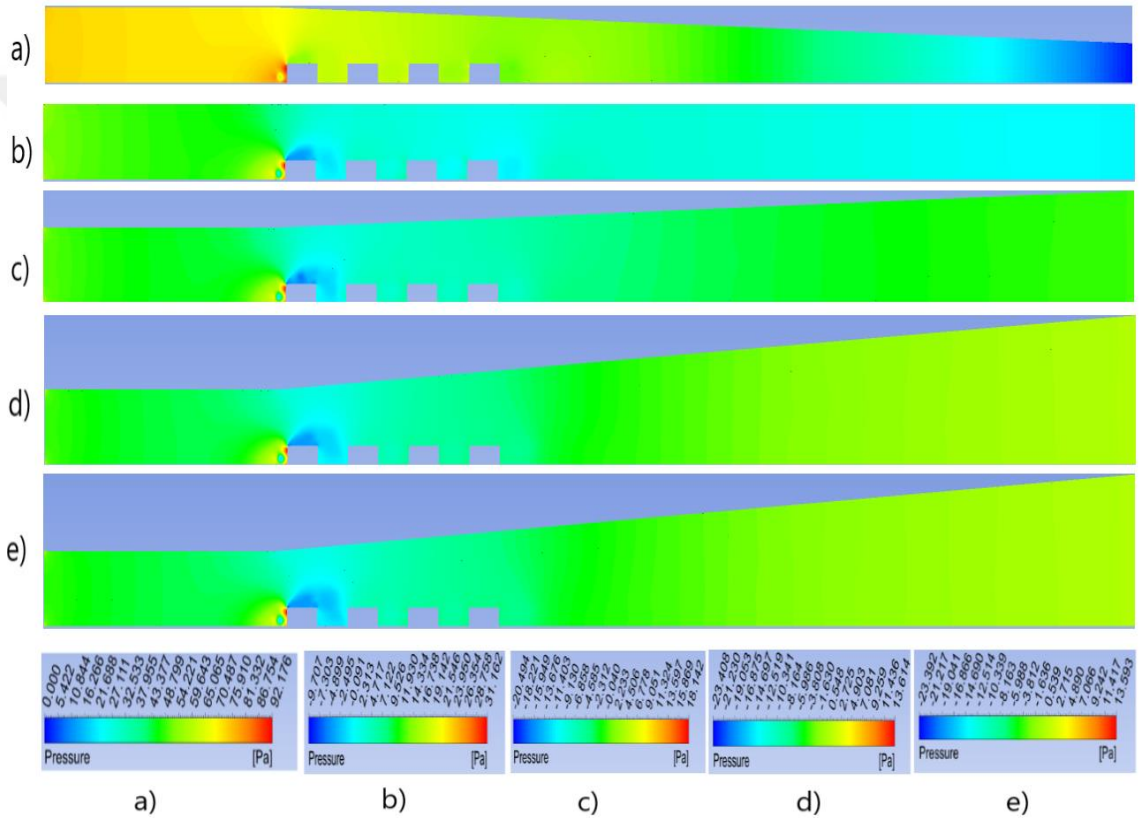
Şekil 4.535. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



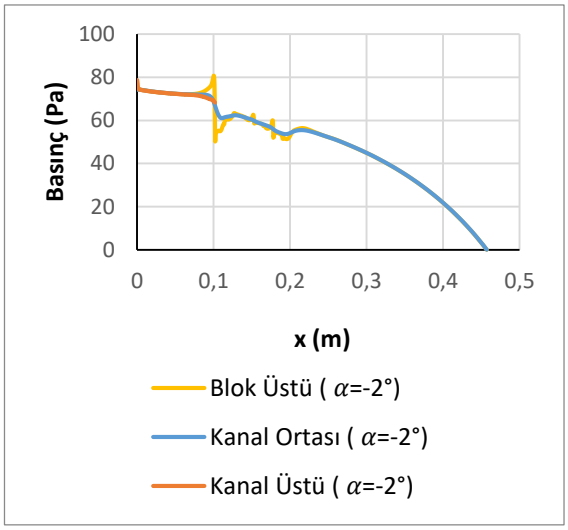
Şekil 4.536. Re=9015 (5,42 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.537'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.538, 4.539, 4.540 ve 4.541'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar yakınsayan geometri hariç birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Yakınsayan geometride en düşük basınç hızın en yüksek olduğu kanal çıkışında elde edilmiştir. Yakınsayan geometride ise bloklar çevresinde oluşan basınç gradyeni daha homojen olup, ıraksayan geometrilerdeki 1. blokla 2. blok arasında oluşan düşük basınç bölgeleri oluşmamaktadır. Açının artmasıyla Şekil 4.533'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.533 c için 7,41 m/s, d ve e'de azalarak 7,16 m/s ve 7,14 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.537 c, d ve e'deki

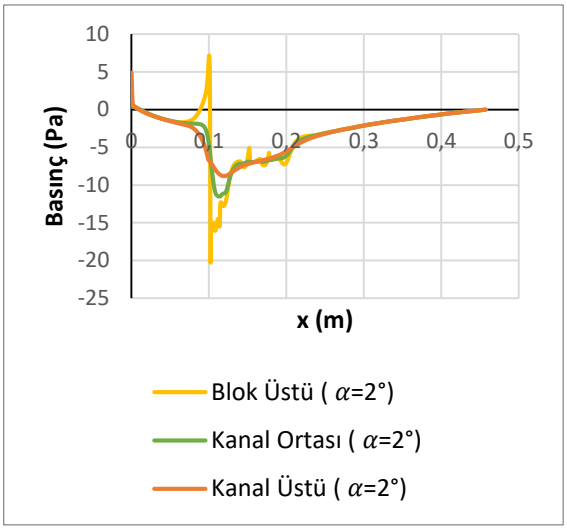
basınçlarda Şekil 4.533 c, d ve e'dekiyle hemen hemen aynı oranda değişmiştir. Şekil 4.537 c'deki minimum basınç -20,4 Pa, d ve e'deki basınçlar ise -23,41 Pa ve -23,4 Pa olarak hesaplanmıştır. Açı arttıkça Şekil 4.538, 4.539, 4.540 ve 4.541'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçların da çok fazla bir değişim olmamaktadır. Giriş basınçları, α= 2° için 0,46, α= 4° Pa için -4 Pa ve α= 6° için -4,22 Pa olarak elde edilmiştir. Fakat açı azaldıkça giriş basıncı artmaktadır (α= -2° için 74,25 elde edilmiştir). Baz geometride yani α= 0° de bu değer 13,45 Pa'dır (Bkz. Şekil 4.538, 4.539, 4.540, ve 4.541).



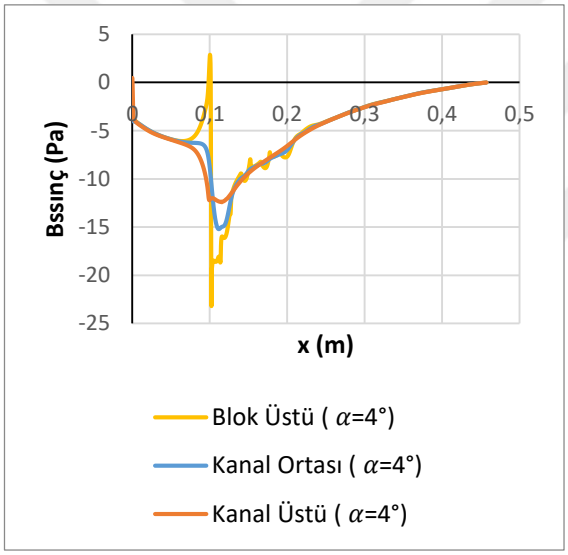
Şekil 4.537. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



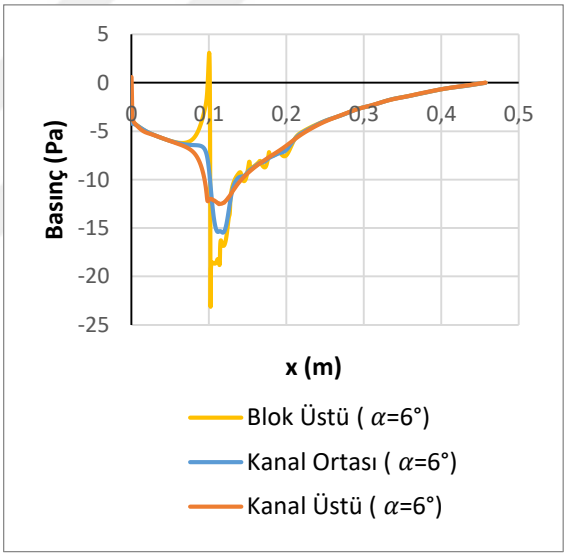
Şekil 4.538. α= -2° için basınç değişimi



Şekil 4.539. α= 2° için basınç değişimi



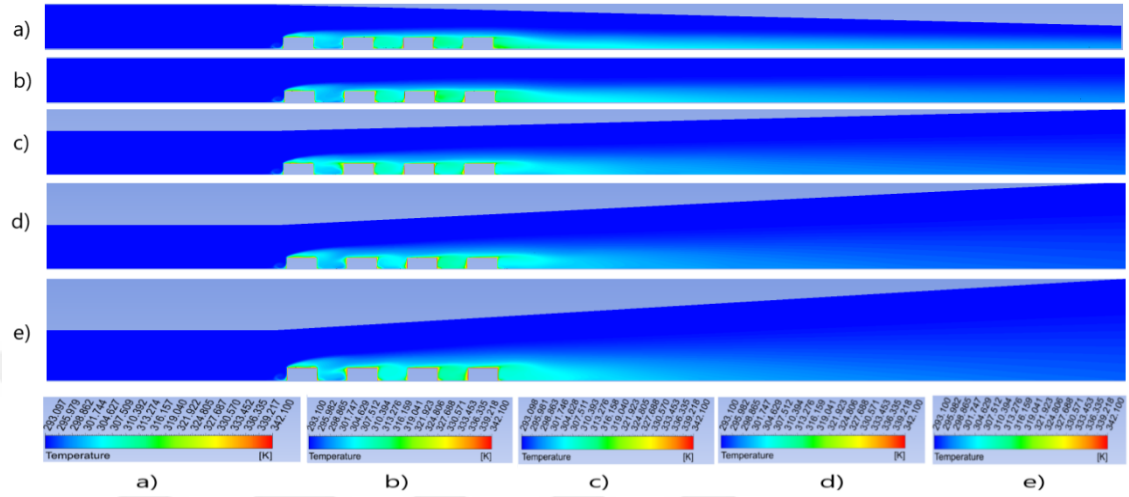
Şekil 4.540. α= 4° için basınç değişimi



Şekil 4.541. α= 6° için basınç değişimi

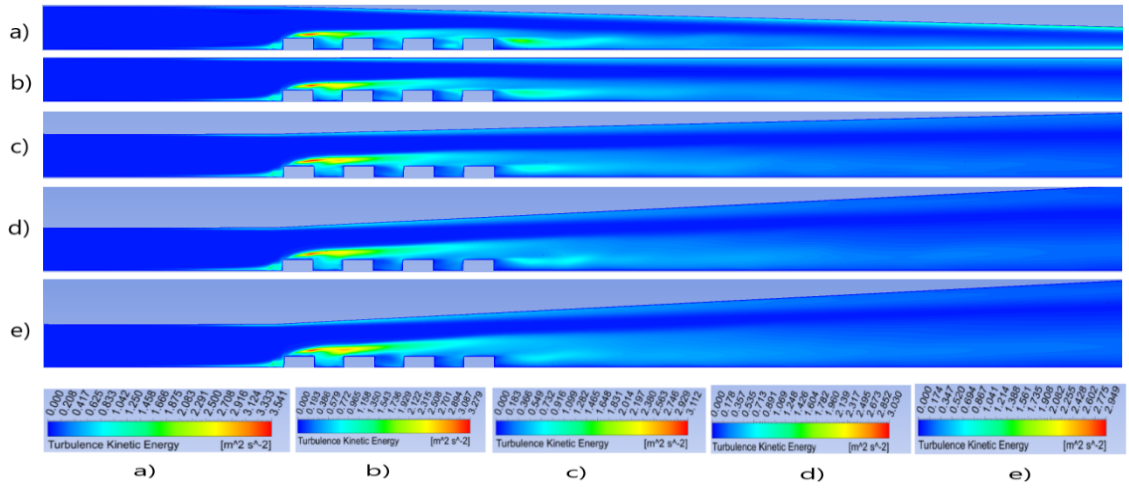
Şekil 4.542'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar bloğun üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Ayrıca ıraksayan açılardaki sıcaklık etkisi çıkışa kadar ulaşmamaktadır. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda

sıcaklık etkisi daha fazladır. Bu durum giriş havasının birinci blokta ısındığından dolayı ikinci ve üçüncü yongalardan sonra gelen çukurda etkisinin daha fazla olmasına yorulabilir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı açının artmasıyla azalmaktadır.



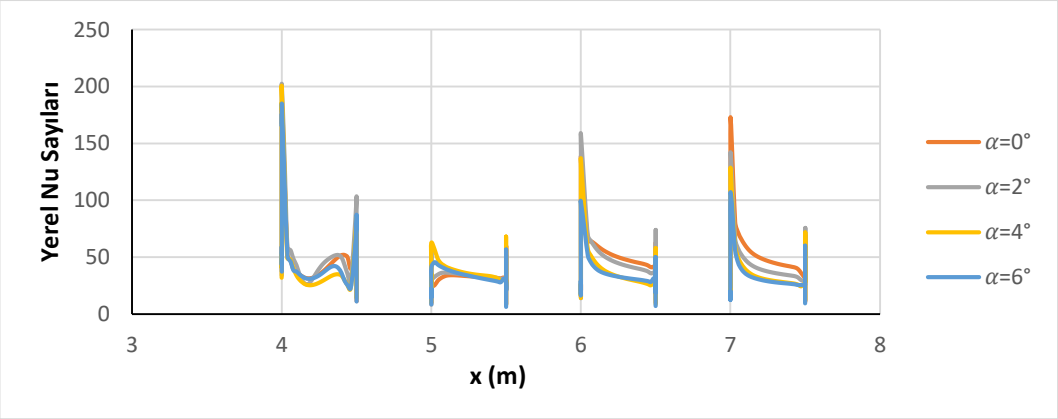
Şekil 4.542. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

Şekil 4.543'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup açı arttıkça 2. bloğun üstüne doğru yayılmaktadır. Ayrıca son bloğun arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup açı arttıkça çıkışa ve üst duvara doğru yayılmaktadır.

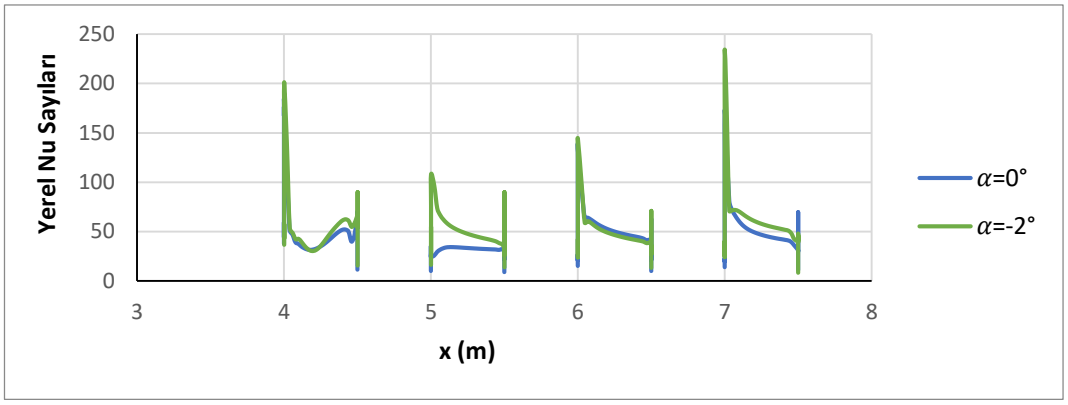


Şekil 4.543. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

Yakınsayan (α = -2°) ve baz (α = 0°) baz geometri için yerel ısı transfer katsayıları Şekil 4.545'de ve baz geometri ve ıraksayan (α = 2°, 4° ve 6°) geometriler için de Şekil 4.544'de gösterilmiştir. Şekil 4.544'de maksimum yerel Nu sayısı ıraksayan geometriler için birinci bloğun ön ucunda elde edilmiştir. Şekil 4.545'de maksimum yerel Nu sayısı yakınsayan geometri için dördüncü blok üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998). Birinci blok üzerinde blok sonuna doğru yakınsayan geometride ısı taşınım katsayısı artmakta, baz geometride de tam benzer bir eğilim sergilemektedir. Yani şiddetli akış ayrılmasının olduğu yerler zayıf taşınımla ısı transferi sergilemekte, tersi olarak akış yeniden birleşmesinin olduğu yerler ise kuvvetli taşınımla ısı transferi sergilemektedirler. Diğer bloklarda da bloklar üzerinde blok sonuna doğru akışkan sıcaklığındaki çok hafif düşüşün neden olduğu çok hafif bir yükselme göze çarpmaktadır. Tüm bloklar için üst plakadaki negatif açı (yakınsama) blok yüzeyinde blok ucundan sonra yerel Nu sayısını arttırmaktadır. Şekil 4.544'den de görüldüğü gibi ıraksayan geometrilerde (α = 2°, 4° ve 6°) ıraksama açısı arttıkça lokal Nu sayısı azalmaktadır. Iraksayan geometrilerde birinci bloğun arka ucundaki yerel Nu sayısı arttıktan sonra keskin bir şekilde düşüp yine keskin bir biçimde artması olayı açı arttıkça şiddetini daha da arttırmakta ve yakınsayan geometride de benzer bir eğilim ortaya çıkmaktadır.

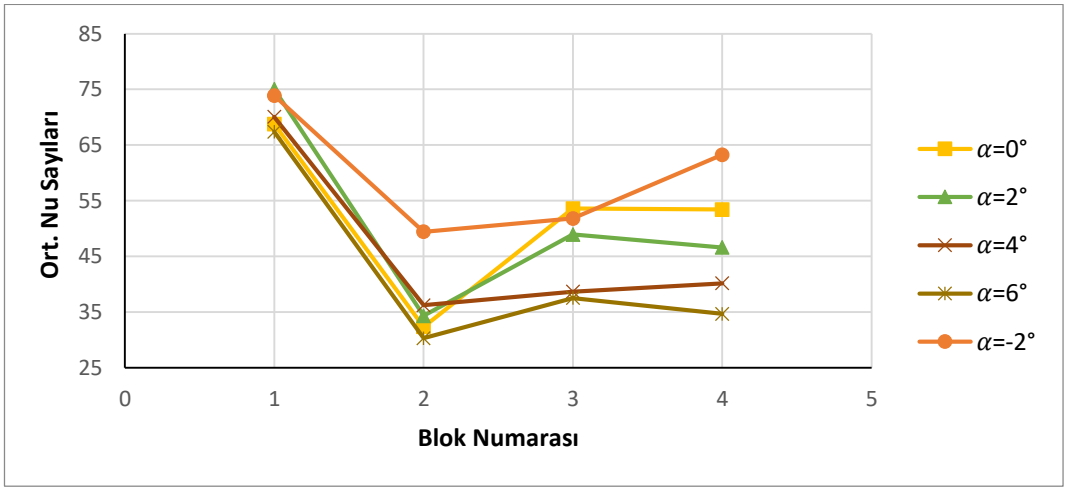


Şekil 4.544. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



Şekil 4.545. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Şekil 4.546'da tüm geometriler için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.546'da ilk göze çarpan nokta baz geometriye göre açının artması durumunda artan ıraksama açısıyla birlikte ortalama Nu sayısının düşmesidir. Tüm geometrilerde en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilmektedir. Tüm durumlarda en düşük ortalama Nu sayısı ise ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Grafikten de görülebileceği üzere yakınsayan açı ortalama Nu sayısını artırmıştır. Çizelge 4.55'de tüm açılarda ortalama Nu sayısı verilmiştir buradan da görülebileceği gibi en yüksek ısı transferi α=-2° de elde edilmiştir.



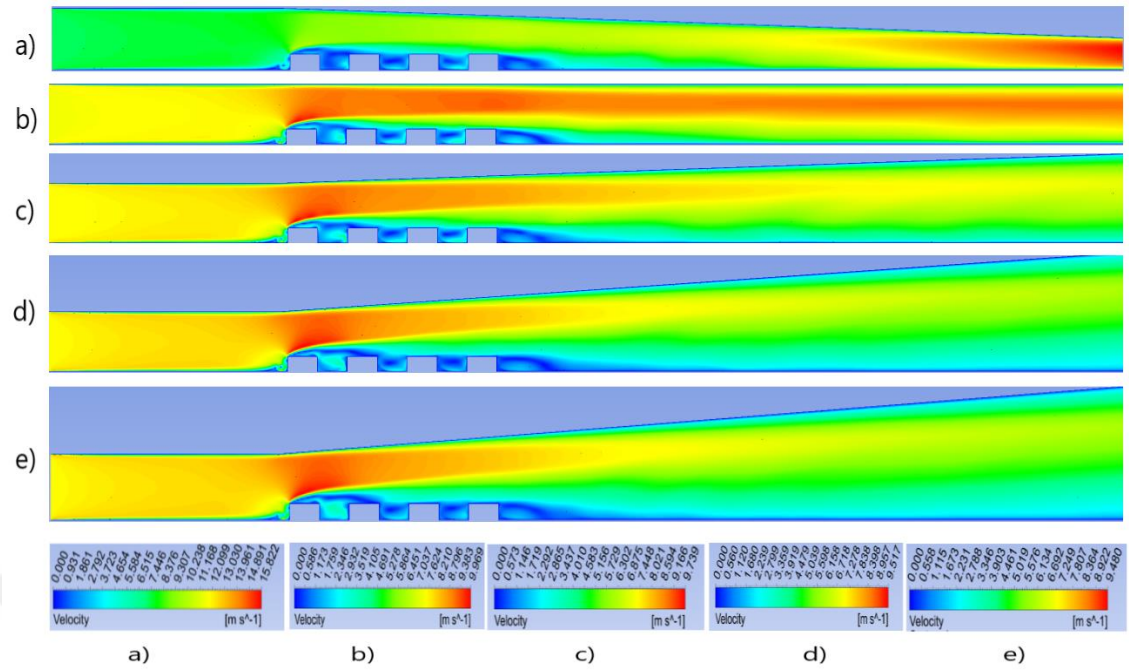
Şekil 4.546. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

Çizelge 4.55. Re=9015 (5,42 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

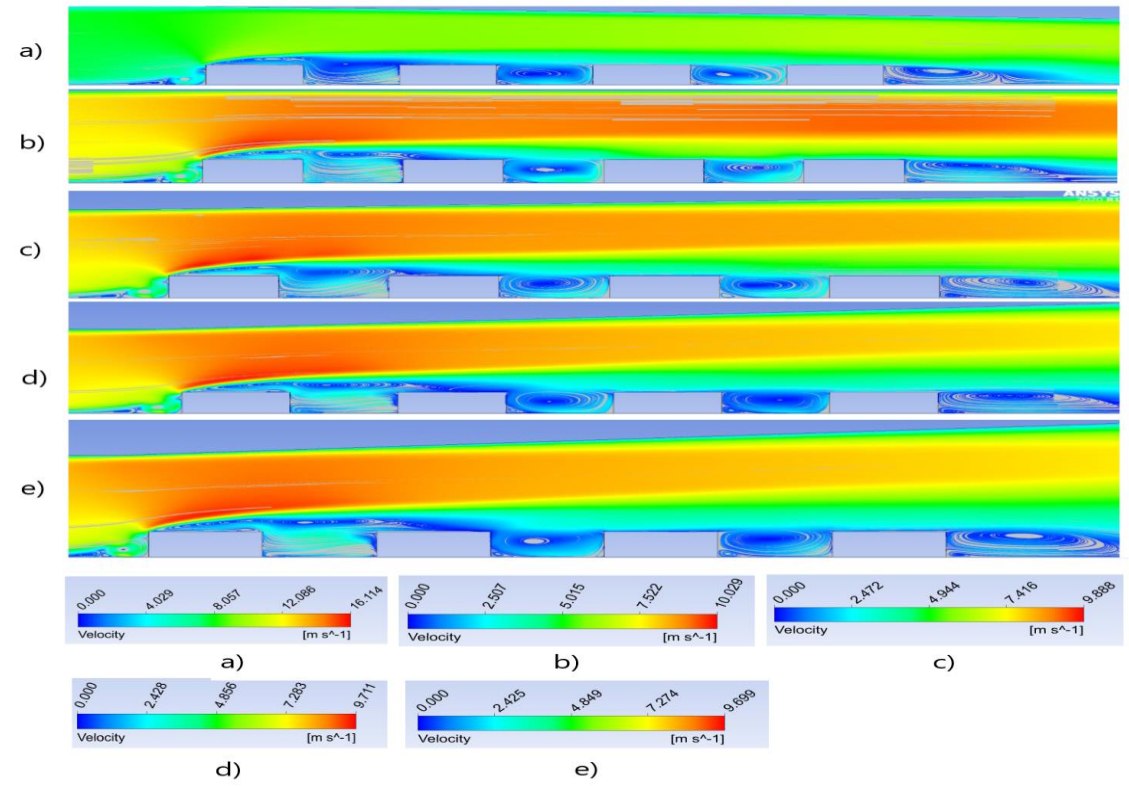
Açı	Ortalama Nusselt Sayısı
α=-2°	59,58
α=2°	51,22
α=4°	46,27
α=6°	34,65

Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

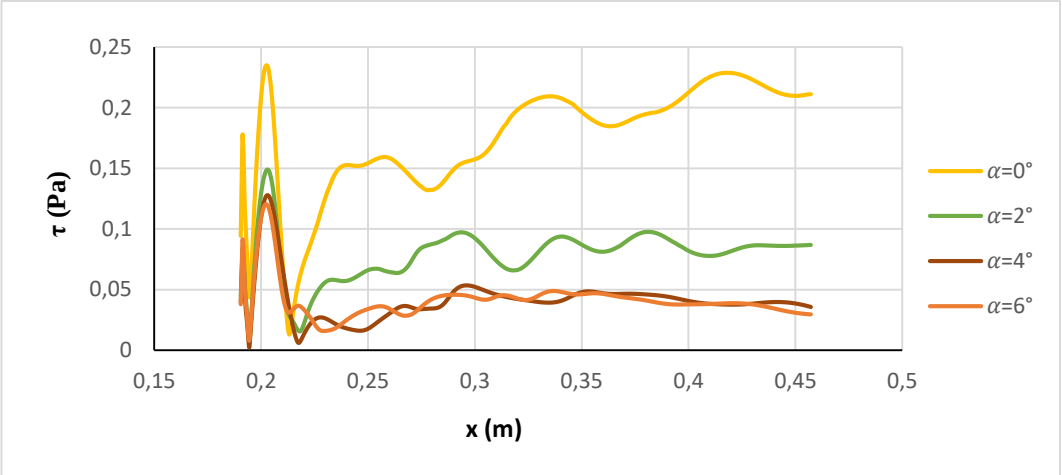
Şekil 4.547 ve 4.548'den de görülebileceği gibi yakınsayan geometri hariç (Şekil 4.547 a) tüm geometrilerde 1. bloktan sonra kesit daralmasından sonra hız artmakta ve hız artış oranı açı arttıkça azalmaktadır. Bu azalma 2°'den sonra yavaşlamaktadır. Şekil 4.547 b'de 0°'de maksimum hız 9,9 m/s olarak akış ilk yongaya çarptıktan sonra 1. yonga üzerinde gözlemlenmiştir. 2°, 4° ve 6°'deki maksimum hızlar sırasıyla 9,73 m/s, 9,51 m/s ve 9,48 m/s olarak hesaplanmıştır. Yakınsayan geometride ise (α= -2°) maksimum hız kesit daralmasının daha fazla olduğu çıkışta elde edilmiş olup 15,82 m/s değerindedir. Şekil 4.547'den görülebileceği tüm geometrilerde ilk bloktan önce saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Yakınsayan geometri ve baz geometrideki bloklardan sonra saat yönü ve saat yönünün tersindeki blokların boyu benzerdir. Şekil 4.549'den de görülebileceği gibi açının artması yeniden birleşme uzunluğunu artırmıştır. Şekil 4.550'de ise yakınsayan geometri yeniden birleşme uzunluğunu azaltmıştır (Bkz. Çizelge 4.57). Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Tüm geometrilerde son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarını tespit etmek için, son bloktan sonraki alt duvardaki kayma gerilmeleri Şekil 4.549 ve Şekil 4.550'deki gibi çizilerek hesaplanmış ve Çizelge 4.57'de verilmiştir.



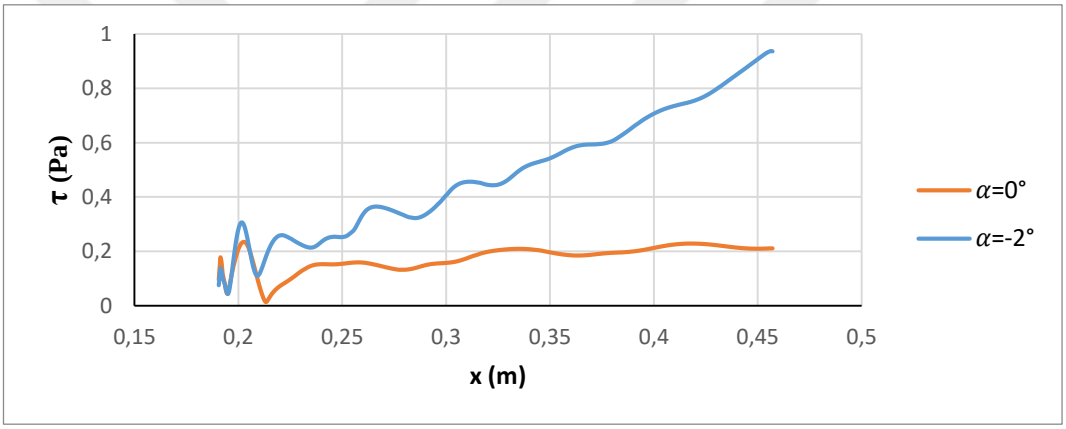
Şekil 4.547. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



Şekil 4.548. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



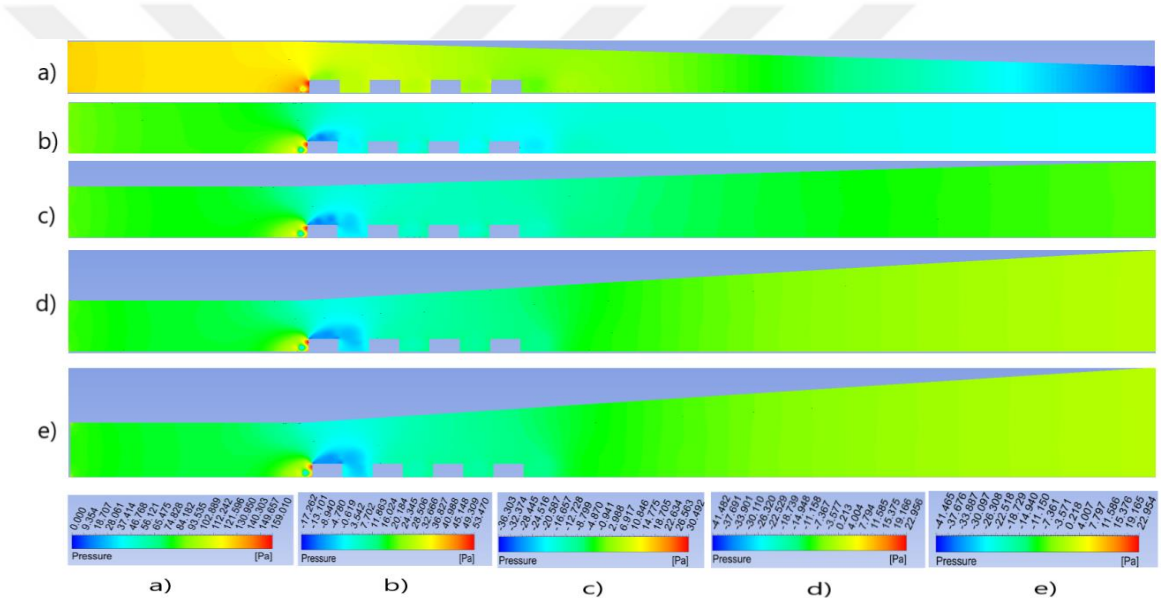
Şekil 4.549. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



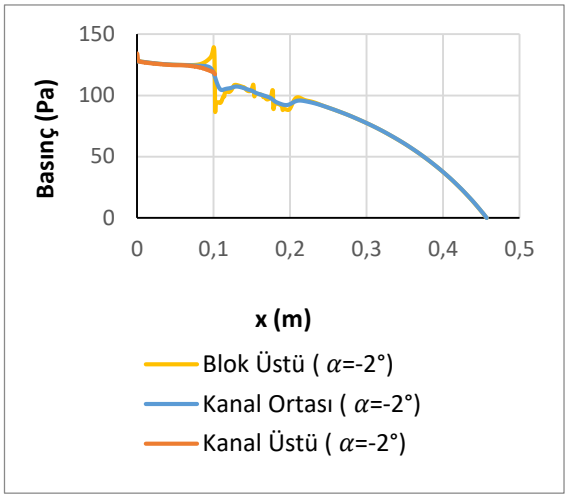
Şekil 4.550. Re=11993 (7,21 m/s) için kayma gerilmelerinin gösterimi (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Kontür olarak basınç dağılımları Şekil 4.551'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.552, 4.553, 4.554 ve 4.555'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar yakınsayan geometri hariç birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Yakınsayan geometride en düşük basınç hızın en yüksek olduğu kanal çıkışında elde edilmiştir. Yakınsayan geometride ise bloklar çevresinde oluşan basınç gradyeni daha homojen olup, ıraksayan geometrilerdeki 1. blokla 2. blok arasında oluşan düşük basınç bölgeleri oluşmamaktadır. Açının artmasıyla Şekil 4.547'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.547 c için 9,73 m/s, d

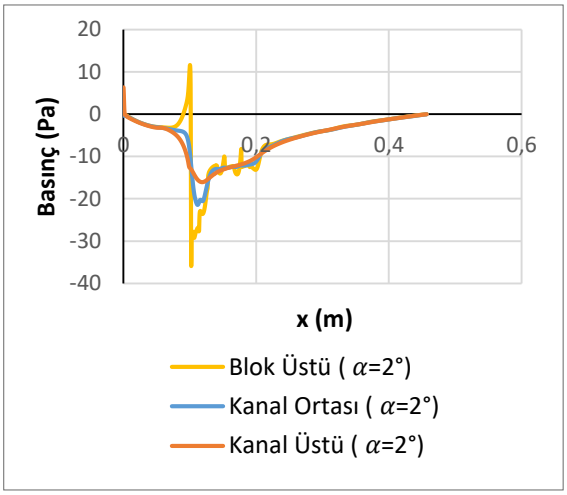
ve e'de azalarak 9,51 m/s ve 9,48 m/s'ye düştüğünden dolayı Şekil 4.551 c, d ve e'deki basınçlarda Şekil 4.547 c, d ve e'dekiyle hemen hemen aynı oranda değişmiştir. Şekil 4.551 c'deki minimum basınç -36,3 Pa, d ve e'deki basınçlar ise -41,48 Pa ve -41,46 Pa olarak hesaplanmıştır. Açı arttıkça Şekil 4.552, 4.553, 4.554 ve 4.555'den de görülebileceği gibi kanal ortasındaki giriş basınçların da bir miktar azalma olmaktadır. Giriş basınçları, α= 2° için -0,34, α= 4° Pa için -7,8 Pa ve α= 6° için -8,16 Pa olarak elde edilmiştir. Fakat açı azaldıkça giriş basıncı artmaktadır (α= -2° için 127,66 elde edilmiştir). Baz geometride yani α= 0° de bu değer 21,93 Pa'dır (Bkz. Şekil 4.552, 4.553, 4.554 ve 4.555). Bu durum soğutma için kullanılacak fanın gücünün yakınsayan geometride daha fazla olması gerektiğini vurgulamaktadır.



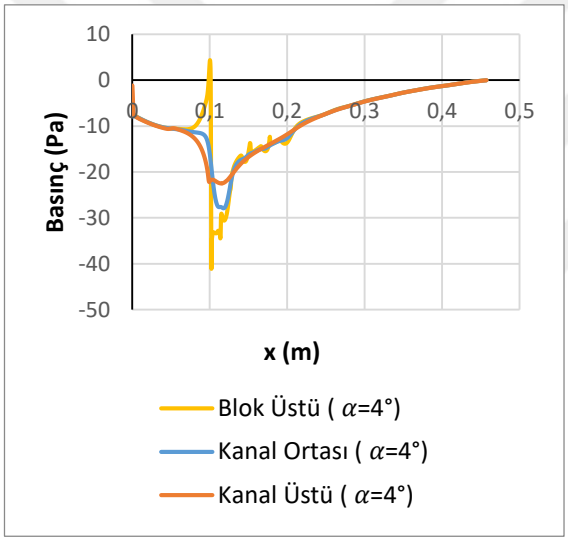
Şekil 4.551. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°



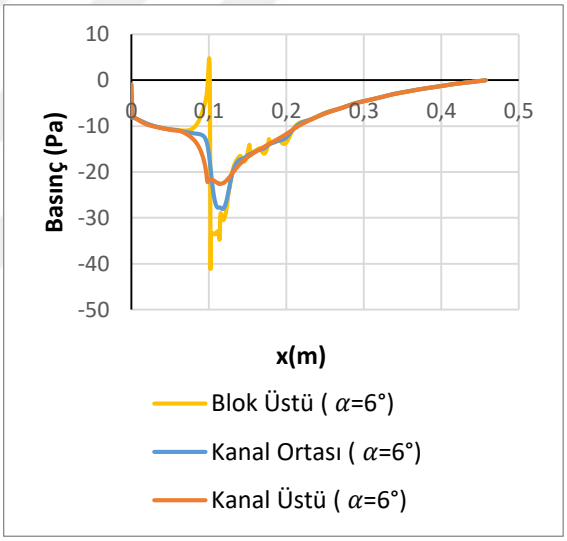
Şekil 4.552. α= -2° için basınç değişimi



Şekil 4.553. α= 2° için basınç değişimi



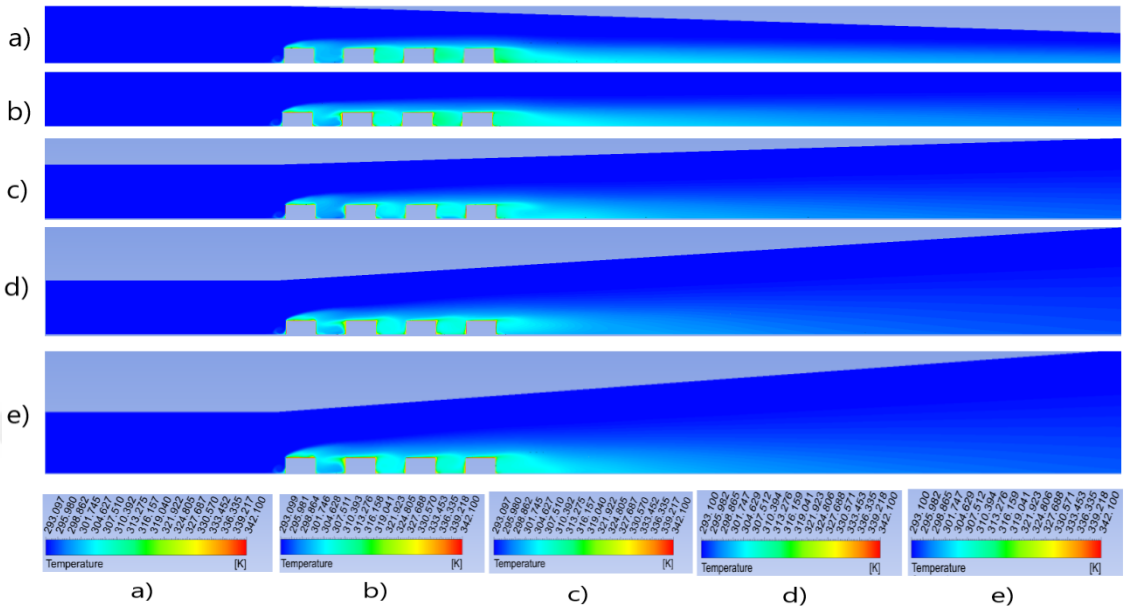
Şekil 4.554. α= 4° için basınç değişimi



Şekil 4.555. α= 6° için basınç değişimi

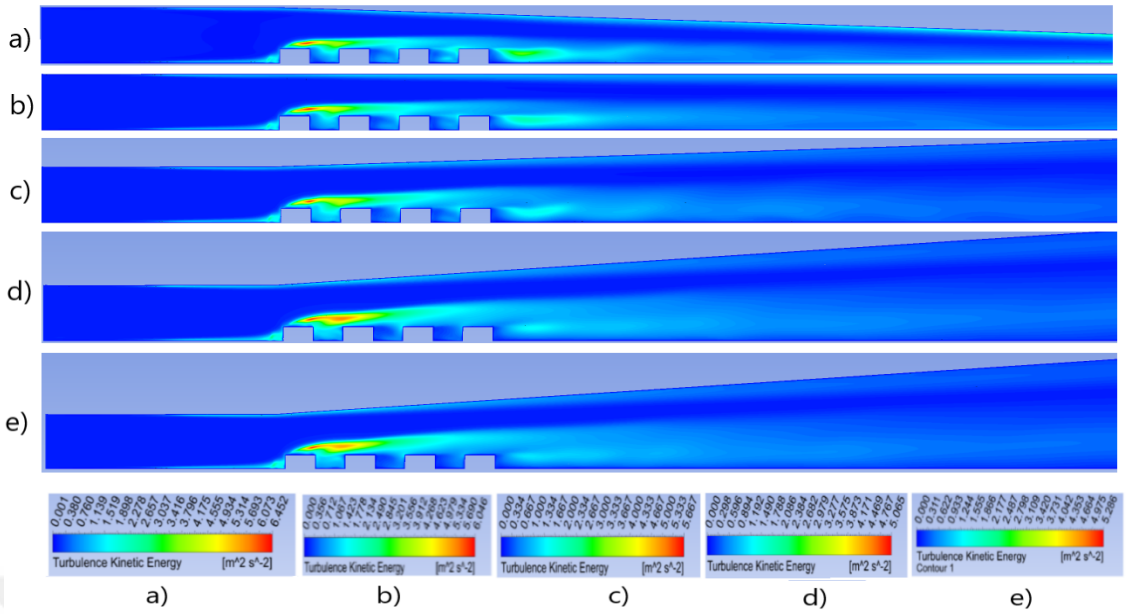
Şekil 4.556'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar bloğun üstünde, blok aralarında ve son bloğun arka alt köşesinde oluşmaktadır. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal ortasına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir. Ayrıca ıraksayan açılardaki sıcaklık etkisi çıkışa kadar ulaşamamaktadır. Tüm durumlarda ikinci ve üçüncü ve yongalardan sonra gelen çukurda sıcaklık etkisi daha fazladır. Bu durum giriş havasının birinci blokta ısındığından dolayı

ikinci ve üçüncü yongalardan sonra gelen çukurda etkisinin daha fazla olmasına yorulabilir. Son bloktan sonraki sıcaklığın etki alanı açının artmasıyla azalmaktadır.



Şekil 4.556. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), α=2°, d) α=4°, e) α=6°

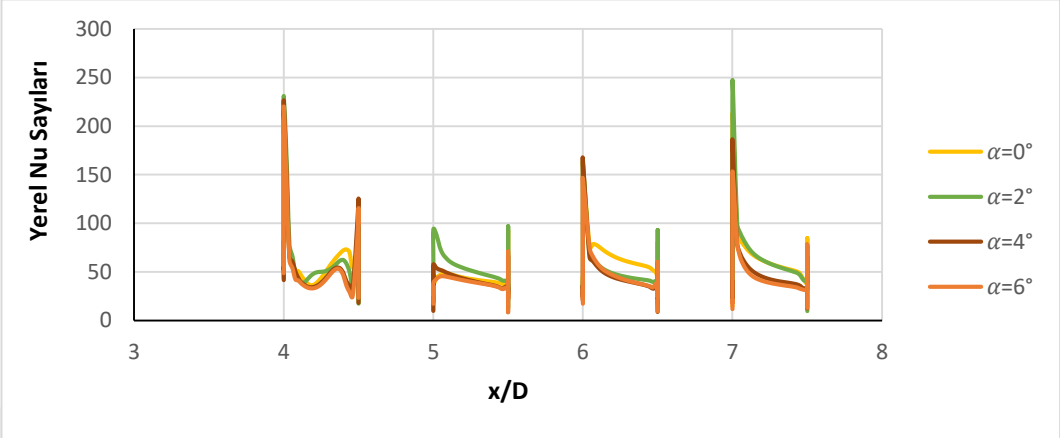
Şekil 4.557'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup açı arttıkça 2. bloğun üstüne doğru yayılmaktadır. Ayrıca son bloğun arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup açı arttıkça çıkışa ve üst duvara doğru yayılmaktadır. Maksimum kinetik enerji yakınsama açısında (α=-2°) elde edilmiş olup değeri 6,45 m^2/s^2'dir.



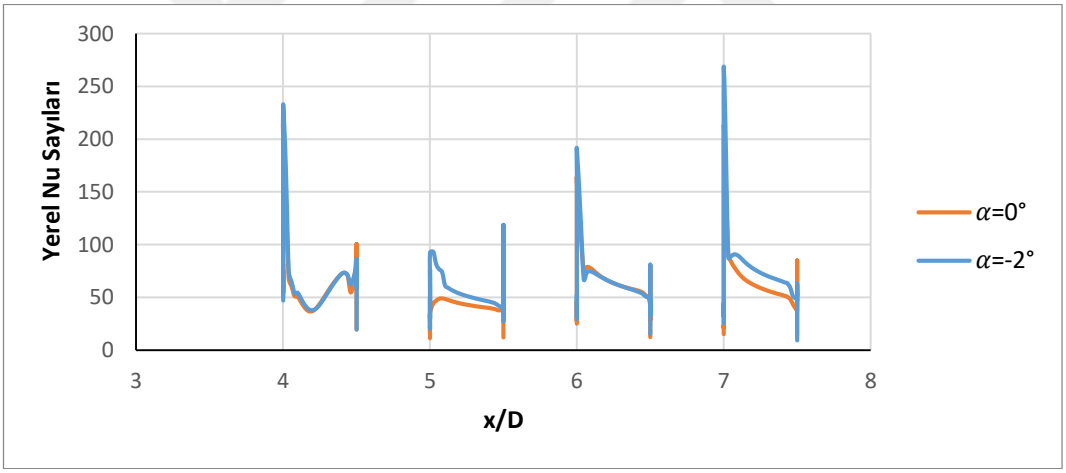
Şekil 4.557. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) α=-2°, b) α=0° (baz geometri), c) α=2°, d) α=4°, e) α=6°

(α = -2°) ve baz (α = 0°) baz geometri için bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları Şekil 4.559'de ve baz geometri ve ıraksayan (α = 2°, 4° ve 6°) geometriler için de Şekil 4.558'de gösterilmiştir. Şekil 4.558'de maksimum yerel Nu sayısı ıraksayan geometriler için (α = 2°) hariç birinci bloğun ön ucunda elde edilmiştir. Şekil 4.559'da maksimum yerel Nu sayısı yakınsayan geometri için dördüncü blok üzerinde elde edilmiştir. Bu durum genel olarak her bir blok etrafındaki karmaşık girdap yapısının taşınımla ısı transfer dağılımında geniş oranda bir düzensizliğe sebep olmasına dayandırılmaktadır (Meinders vd., 1998). Birinci blok üzerinde blok sonuna doğru yakınsayan geometride yerel Nu sayısı artmakta, baz geometride de tam benzer bir eğilim sergilemektedir. Yani şiddetli akış ayrılmasının olduğu yerler zayıf taşınımla ısı transferi sergilemekte, tersi olarak akış yeniden birleşmesinin olduğu yerler ise kuvvetli taşınımla ısı transferi sergilemektedirler. Diğer bloklarda da bloklar üzerinde blok sonuna doğru akışkan sıcaklığındaki çok hafif düşüşün neden olduğu bir yükselme göze çarpmaktadır. Tüm bloklar için üst plakadaki negatif açı (yakınsama) blok yüzeyinde blok ucundan sonra yerel Nu sayısını arttırmaktadır. Şekil 4.558'den de görüldüğü gibi ıraksayan geometrilerde (α = 2°, 4° ve 6°) ıraksama açısı arttıkça yerel Nu sayısı azalmaktadır. Iraksayan geometrilerde birinci bloğun arka ucundaki yerel Nu sayısı arttıktan sonra

keskin bir şekilde düşüp yine keskin bir biçimde artması olayı açı arttıkça şiddetini daha da arttırmakta ve yakınsayan geometride de benzer bir eğilim ortaya çıkmaktadır.



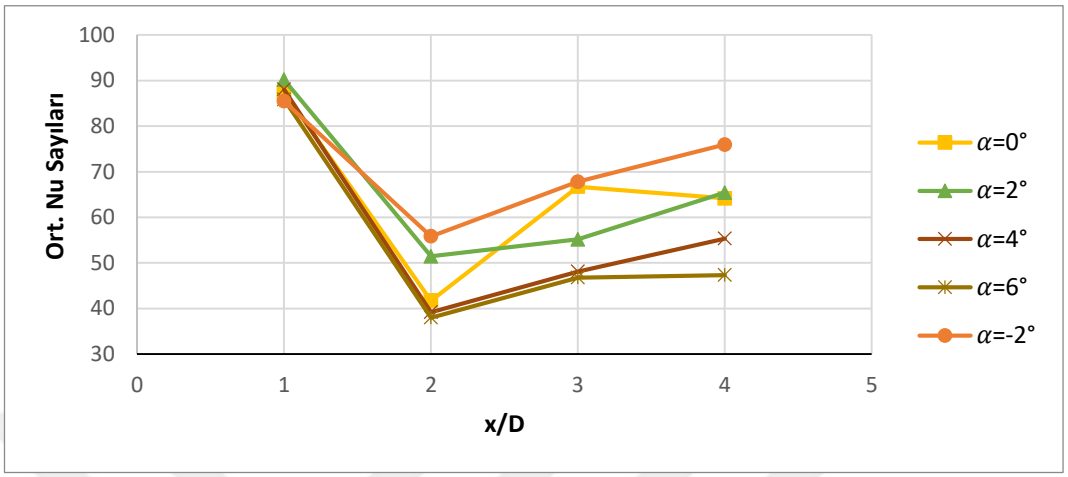
Şekil 4.558. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri)



Şekil 4.559. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları (Yakınsayan geometri ve baz geometri)

Şekil 4.560'da tüm geometriler için, bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Şekil 4.560'da ilk göze çarpan nokta baz geometriye göre açının artması durumunda artan ıraksama açısıyla birlikte ortalama Nu sayısının düşmesidir. Tüm geometrilerde en yüksek ortalama Nu sayısı birinci blok üzerinde elde edilmektedir. Tüm durumlarda en düşük ortalama Nu sayısı ise ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere yakınsayan açı ortalama Nu sayısını artırmıştır. Çizelge 4.56'da tüm

açılarda ortalama Nu sayısı verilmiştir buradan da görülebileceği gibi en yüksek ısı transferi α=-2° de elde edilmiştir.



Şekil 4.560. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları (Iraksayan geometriler ve baz geometri)

Çizelge 4.56. Re=11993 (7,21 m/s) için tüm yongaların ortalama Nusselt sayıları

Açı	Ortalama Nusselt Sayısı
α=-2°	71,26
α=2°	65,55
α=4°	57,68
α=6°	54,49

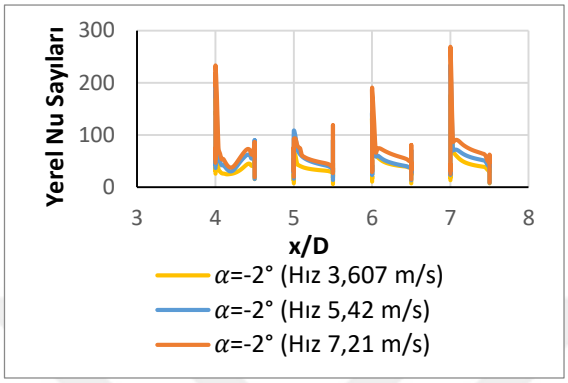
Farklı hızlarda basınç gradyeninin karşılaştırılması

Çizelge 4.57'den görüldüğü gibi, ıraksayan açılarda açının artması yeniden birleşme uzunluklarını artırmıştır. Yakınsayan açıda ise yeniden birleşme uzunluğu azalmıştır. Driver ve Seegmiller (1985), yaptıkları çalışmada ıraksayan açılarda açıyı artırmanın yeniden birleşme uzunluğunu artırdığını gözlemlemişlerdir. Ateş (2015), çalışmasında pozitif yönde açının arttırılmasının yeniden birleşme uzunluğunu arttırdığını tespit etmiştir.

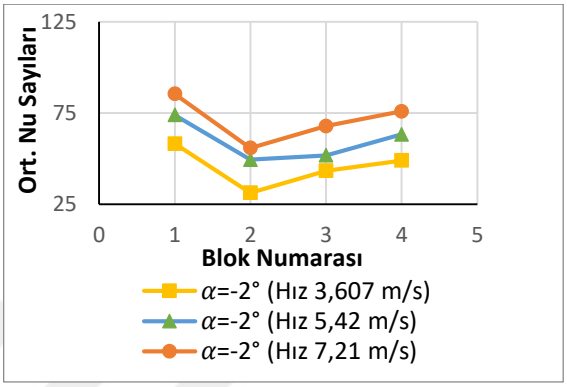
Çizelge 4.57. Farklı açılarda farklı hızların yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Basınç Gradyeni (Derece)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	α=-2°	0,004005	0,018421
	α=0°	0,00347	0,021625
	α=2°	0,004538	0,023226
	α=4°	0,003204	0,027231
	α=6°	0,003738	0,028566
5,42	α=-2°	0,003471	0,017086
	α=0°	0,004275	0,022982
	α=2	0,004005	0,027765
	α=4°		0,0381
	α=6°	0,004005	0,04138
7,21	α=-2°	0,004272	0,018688
	α=0°	0,004272	0,022692
	α=2	0,004005	0,027498
	α=4°	0,004005	0,0275
	α=6°	0,004005	0,038711

α = -2° için hızın artırılması Şekil 4.561 ve Şekil 4.562'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.

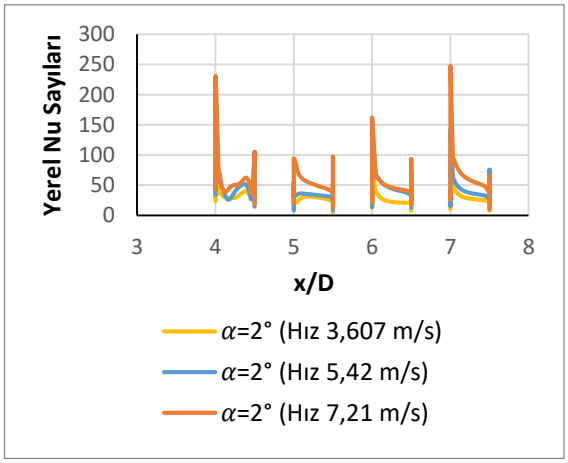


Şekil 4.561. α=-2° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

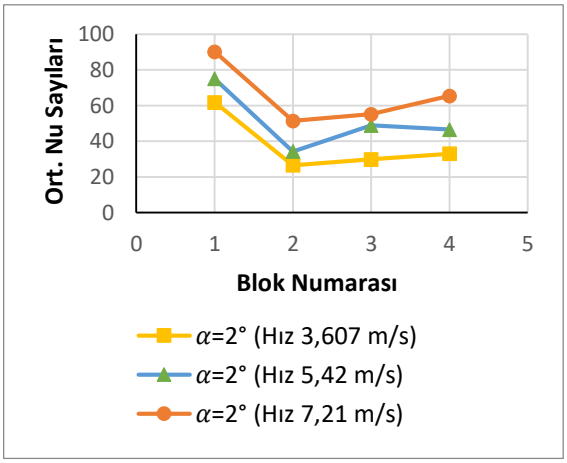


Şekil 4.562. α=-2° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

α = 2° için hızın artırılması Şekil 4.563 ve Şekil 4.564'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.

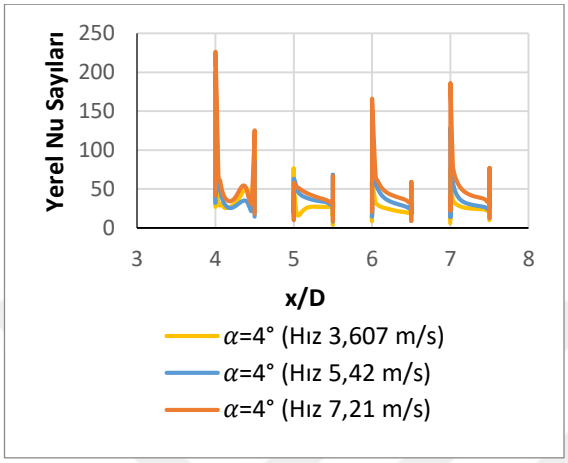


Şekil 4.563. α=2° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

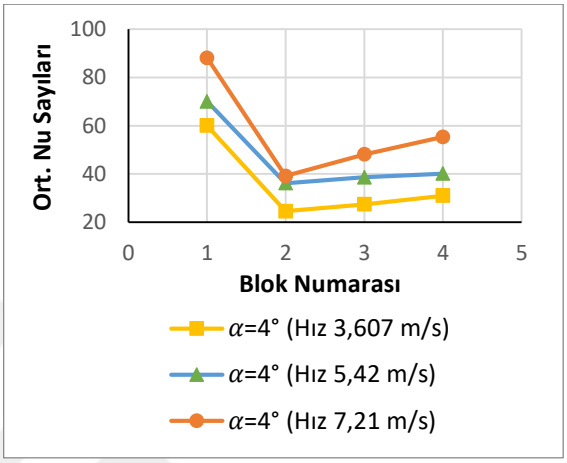


Şekil 4.564. α= 2° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

$\alpha = 4°$ için hızın artırılması Şekil 4.565 ve Şekil 4.566'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.

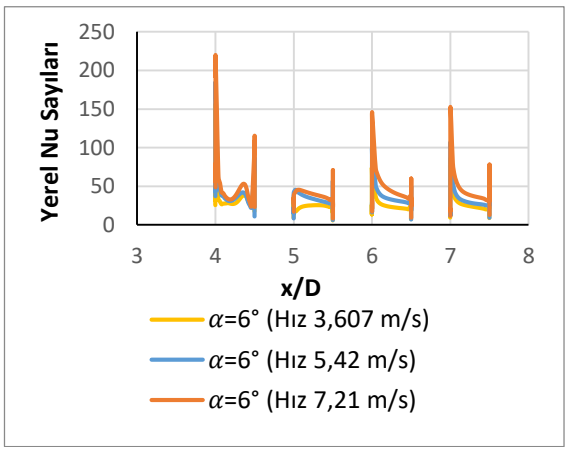


Şekil 4.565. α=4° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları

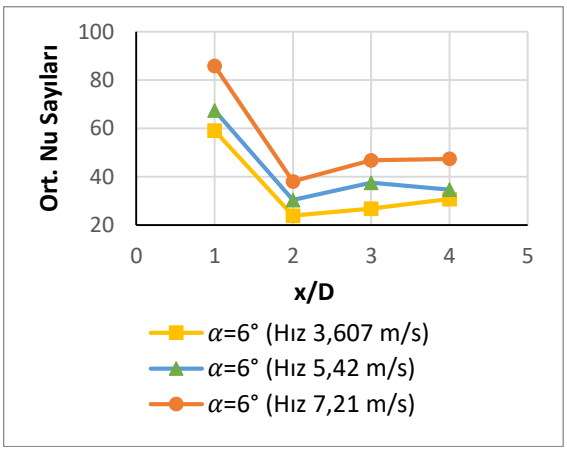


Şekil 4.566. α= 4° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

$\alpha = 6°$ için hızın artırılması Şekil 4.567 ve Şekil 4.568'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.567. α=6° için bloklar üzerindeki yerel Nusselt sayıları



Şekil 4.568. α= 6° için bloklar üzerindeki ortalama Nusselt sayıları

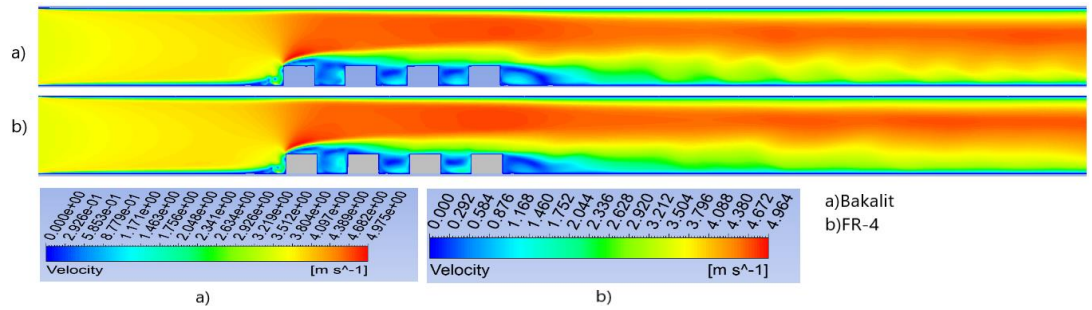
Yapılan 12 adet analizle basınç gradyeninin ısı transferine etkisi incelendiğinde; Çizelge 4.54, 4.55 ve 4.56 değerlendirildiğinde en yüksek ortalama Nu sayısı Re=11993 (Hız 7,21 m/s)'de ve α= -2° değerinde 71,26 olarak tespit edilmiştir. İki boyutlu analizlerde de aynı geometri ve aynı hızda en yüksek ısı transferi elde edilmiştir. Gürses ve Pulat (2021), yaptığı çalışmalarında yakınsayan açı durumunda ısı transferinin arttığını, ıraksayan açı durumunda ise ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir (Açılar -2°, 0, 2°, 4° ve 6 ° olarak alınmıştır.).

4.2.7. 3 boyutlu geometride baskı devre kartı malzemesinin etkisinin incelenmesi (Eşlenik ısı transferi)

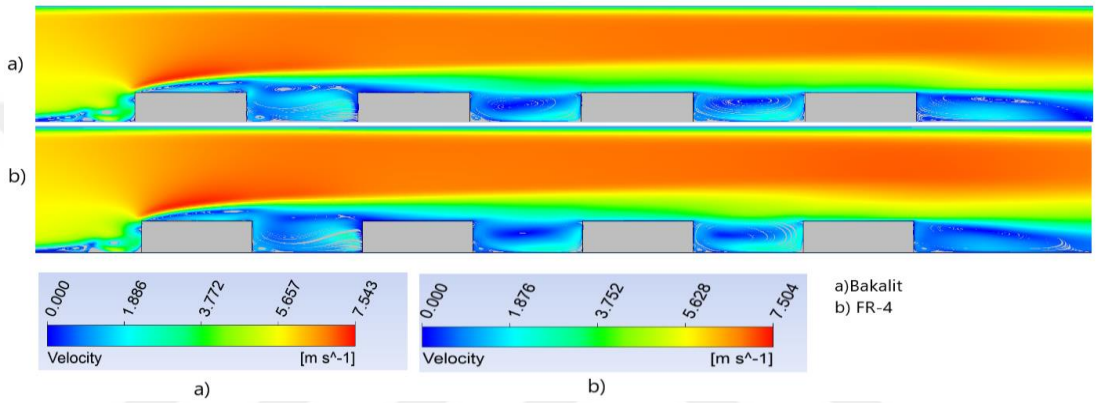
Bu kısımda baskı devre kartının malzeme cinsinin iletim ile olan ısı transferinin toplam ısı transferi üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma da literatürde en çok kullanılan 2 malzeme olan FR-4 ve bakalit alınmıştır. Baskı devre kartının kalınlığı 1,5 mm alınarak analizler yapılmıştır. Tüm eşlenik analizlerde blokların malzemesi silikon alınmıştır.

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

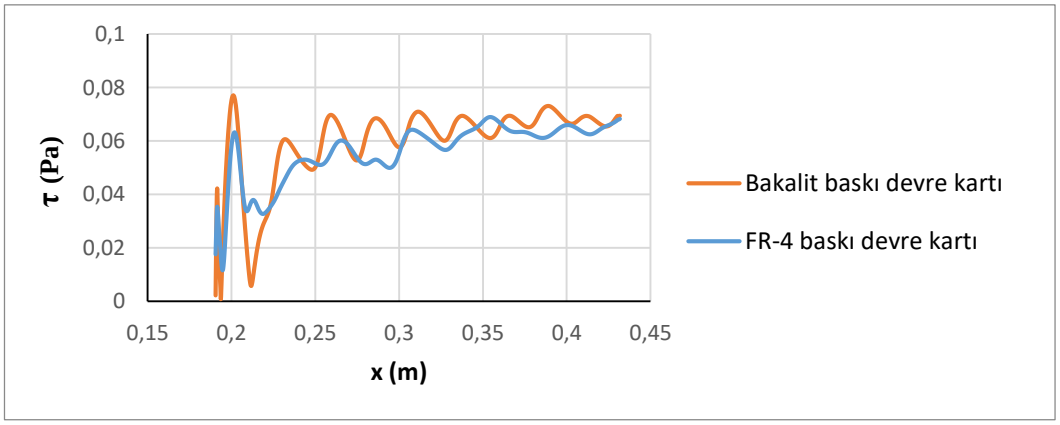
Şekil 4.569 ve 4.570 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 4,97 m/s olarak belirlenmiştir. Şekil 4.571'den görüleceği üzere baskı devre kartının malzeme farklılığı yeniden birleşme uzunluklarında pek fazla bir değişime neden olmamaktadır (Bkz. Çizelge 4.61).



Şekil 4.569. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı



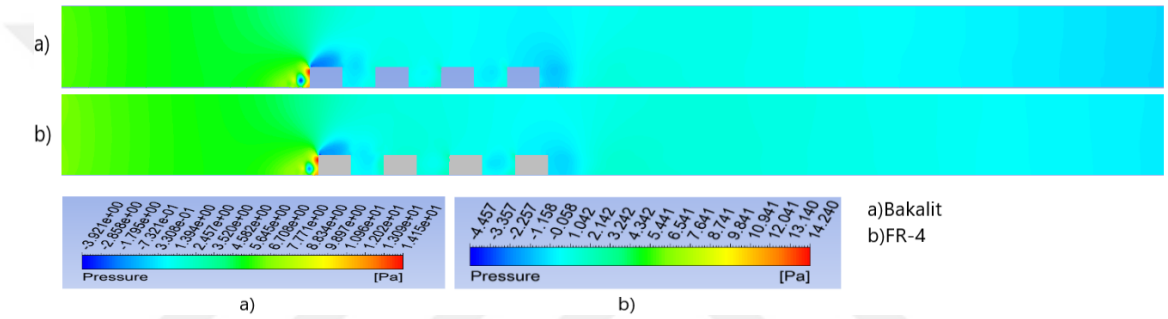
Şekil 4.570. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı



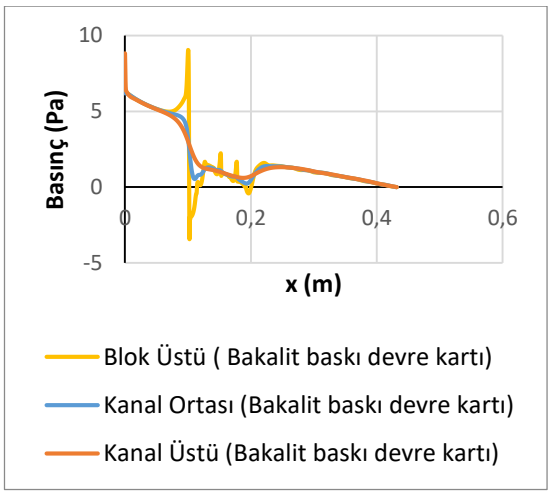
Şekil 4.571. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı baskı devre kartı malzemesi için kayma gerilmeleri

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.572'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.573 ve 4.574'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki

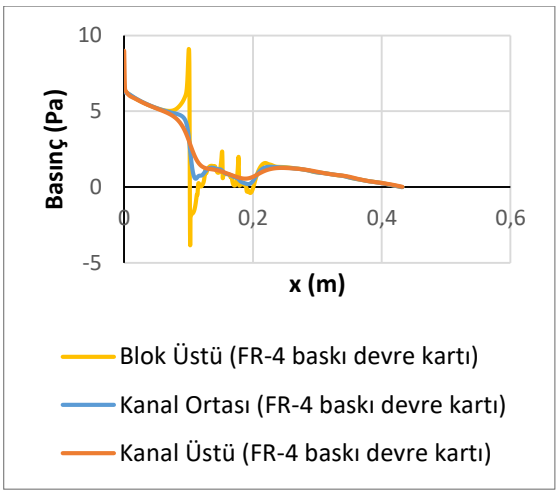
malzemenin durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Malzeme değiştiğinde Şekil 4.569'dan da görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.569, a ve b için 4,97 m/s olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.572 a ve b'deki minimum basınçlar da hemen hemen aynı kalmaktadır. (Şekil 4.572 a'daki minimum basınç -3,9 Pa, b'de ise -4,4 Pa olarak hesaplanmıştır.) Şekil 4.573 ve 4.574'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit baskı devre kartı için 6,17 Pa ve FR-4 baskı devre kartı için 6,23 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.572. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı



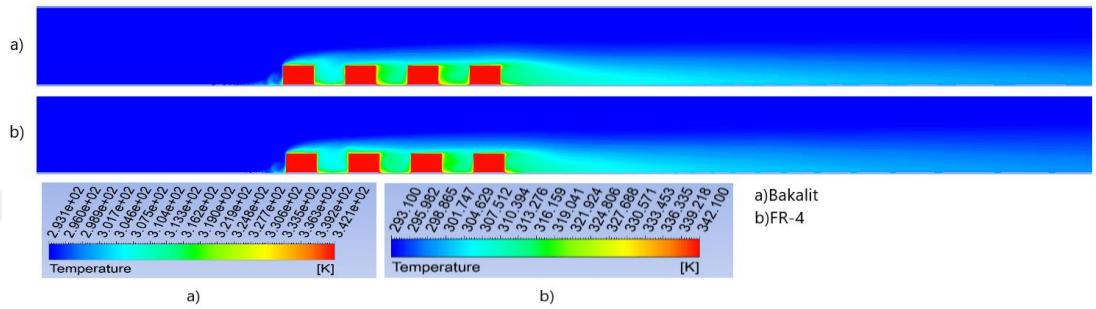
Şekil 4.573. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi



Şekil 4.574. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi

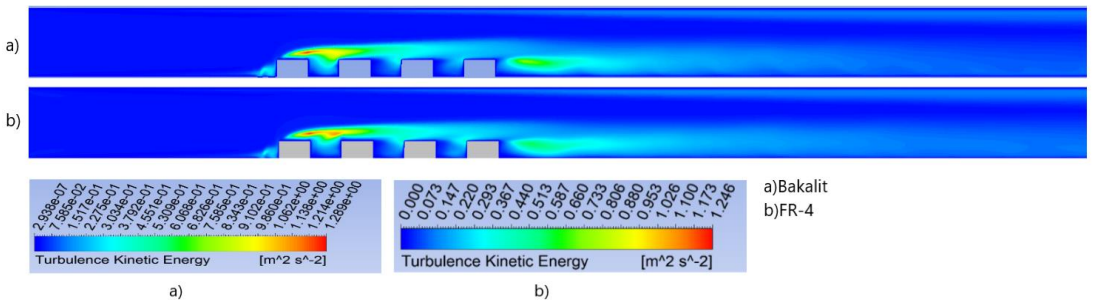
Şekil 4.575'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Her iki malzeme için de maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve

bloklarda elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



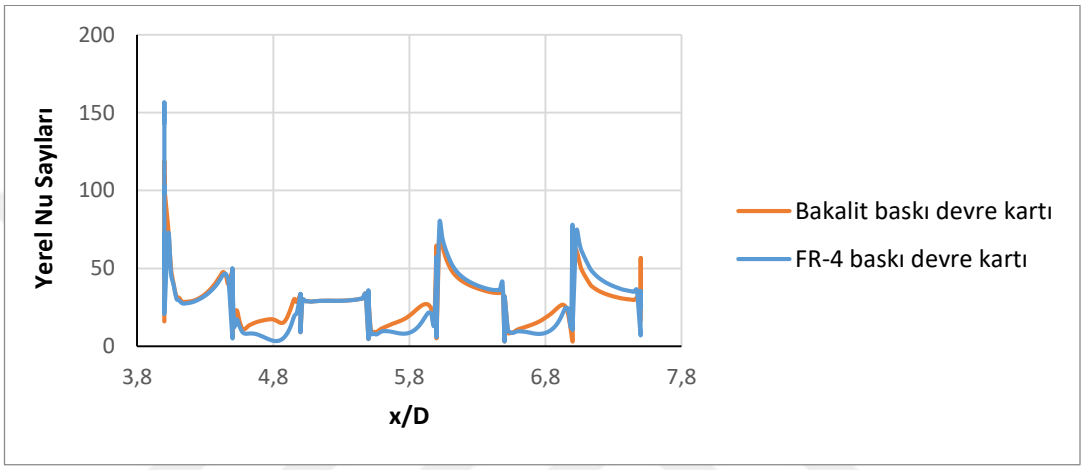
Şekil 4.575. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.576'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup baskı devre kartında farklı malzeme kullanıldığında da konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır. Maksimum kinetik enerji değerleri her iki durumda da hemen hemen aynıdır (Bakalit baskı devre kartı için 1,29 m^2/s^2 ve FR-4 baskı devre kartı için 1,24 m^2/s^2 dir.).



Şekil 4.576. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

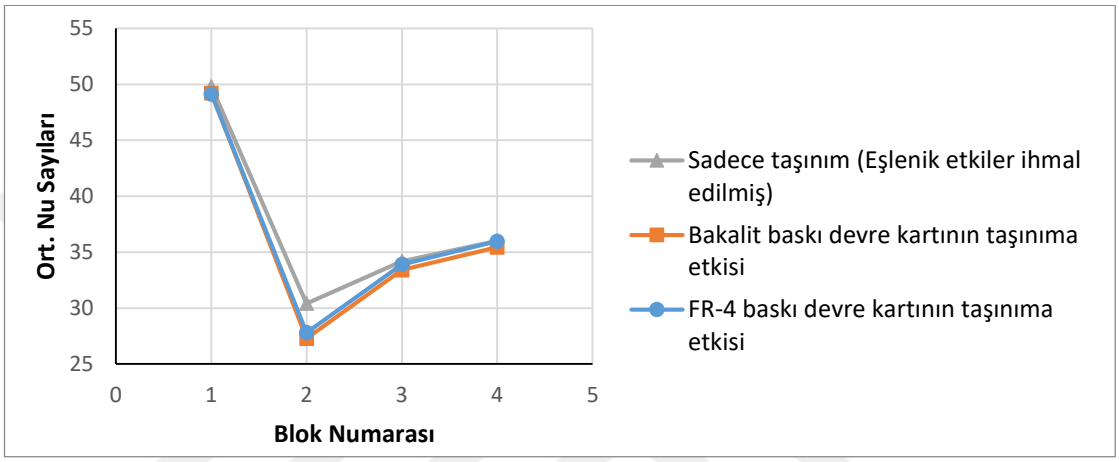
Şekil 4.577'de farklı baskı devre kartı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki durumda da birinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük Nu sayısı ise iki durumda da ikinci yonga üzerindedir. Baskı devre kartında farklı malzeme kullanılması durumunda bakalit ve FR-4 malzemeleri arasında üçüncü ve dördüncü yonga üzerinde ufak bir değişim görülmektedir.



Şekil 4.577. Re=6000 (3,607 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzeme cinsleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları

Şekil 4.578'de baskı devre kartında kullanılan her iki malzeme ve sadece taşınımla ısı transferi durumları için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.578'de ilk göze çarpan nokta baskı devre kartının malzemesinin dikkate alınması durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 c) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. 3 boyutlu durumda iletimle olan ısı transferi etkisinin düşmesi, yanlardan olan taşınımla ısı transferinin toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmını artırması yüzündendir. Ek olarak yanlarda blokaj yüzünden akışkan hızı da arttığından dolayı yanlardan olan ısı transferini artmaktadır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilirken, her üç durumda da en düşük değer ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.58'de dört yonganın

ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.58'den de görülebileceği gibi baskı devre kartından iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferi az bir miktar düşmüştür. Çünkü toplam ısı transferinin bir kısmı iletime gitmiştir. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme kullanılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme kullanılması durumuna göre az bir miktar daha fazladır.



Şekil 4.578. Re=6000 (3,607 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

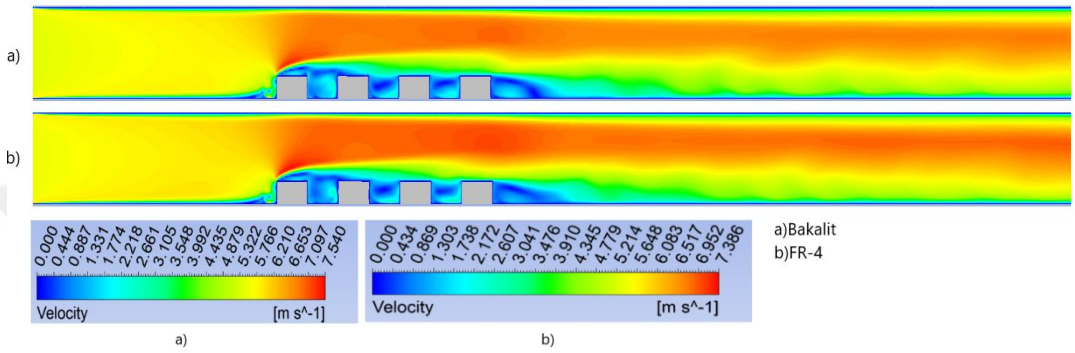
Çizelge 4.58. Re=6000 (3,607 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlarda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

İncelenen Durumlar	Ortalama Nusselt Sayısı
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	36,7
FR-4 baskı devre kartı (Eşlenik durum)	35,1
Bakalit baskı devre kartı (Eşlenik durum)	34,32

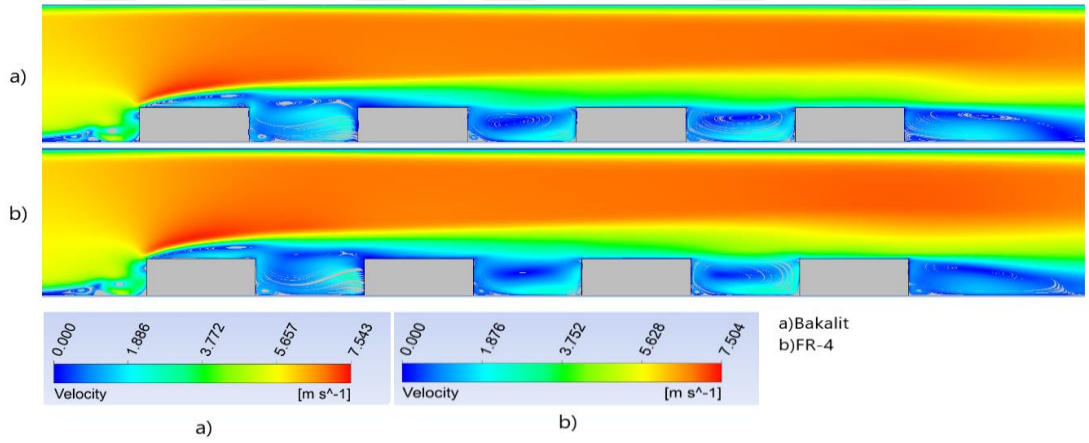
Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

Şekil 4.579 ve 4.580 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son

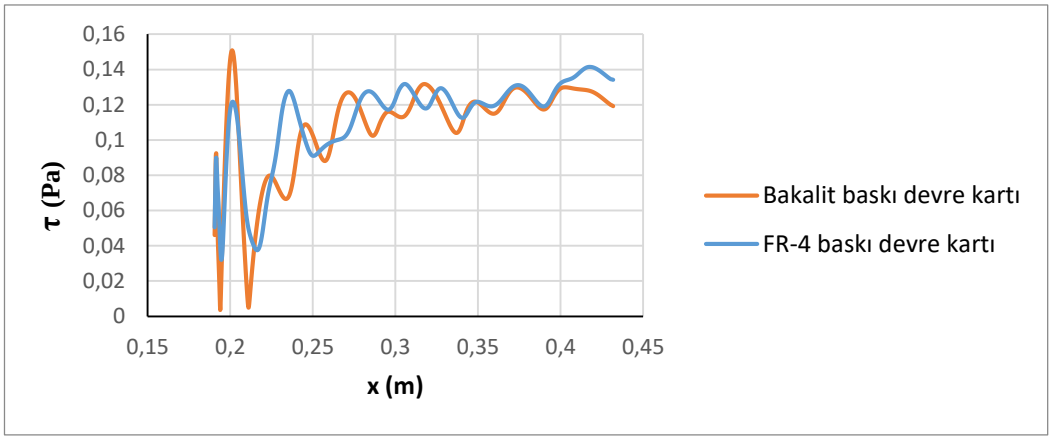
bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hız hemen hemen aynıdır (Bakalit baskı devre kartı için 7,5 m/s ve FR-4 baskı devre kartı için 7,4 m/s dir.).Şekil 4.581'den görüleceği üzere baskı devre kartının malzemesinin iletimle olan ısı transferinin dikkate alınması yeniden birleşme uzunluklarında pek fazla bir değişime neden olmamaktadır (Bkz. Çizelge 4.61).



Şekil 4.579. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

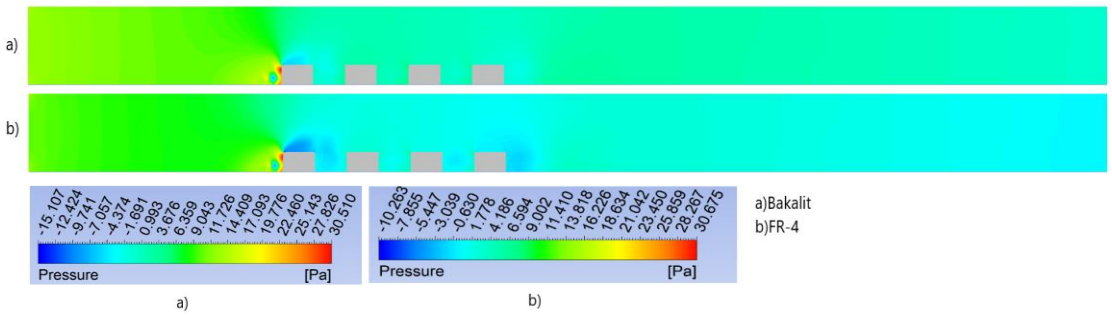


Şekil 4.580. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

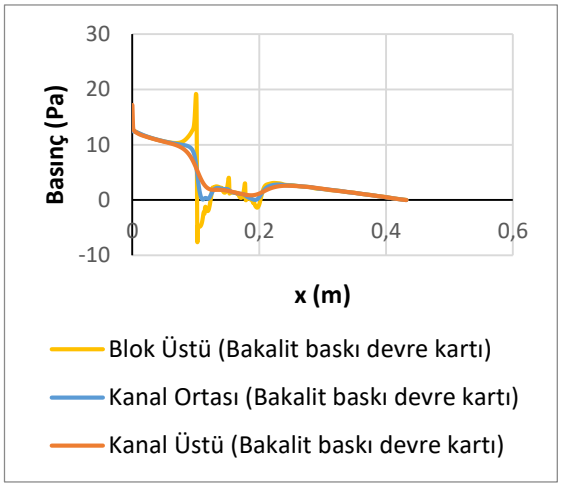


Şekil 4.581. Re=9015 (5,42 m/s)'de farklı baskı devre kartı malzemesi için kayma gerilmeleri

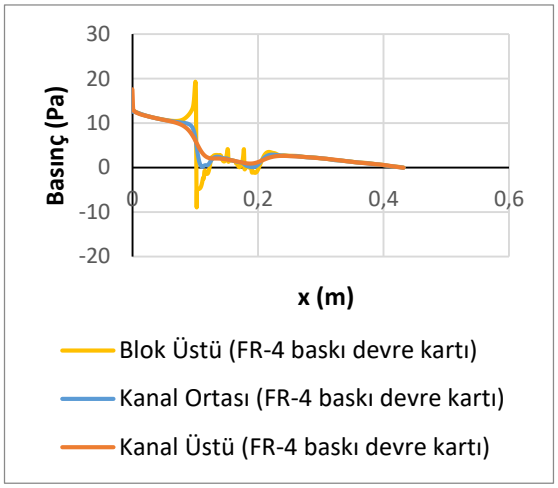
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.582'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.583 ve 4.584'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzeme durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Malzeme değiştiğinde Şekil 4.579'dan da görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.579, a ve b için 7,5 m/s ve 7,4 m/s olarak hemen hemen aynı olduğundan dolayı Şekil 4.582 a ve b'deki minimum basınçlar da hemen hemen aynı kalmaktadır. (Şekil 4.582 a'daki minimum basınç -15,1 Pa, b'de ise -10 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.583 ve 4.584'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit için 12,4 Pa ve FR-4 için 12,6 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.582. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

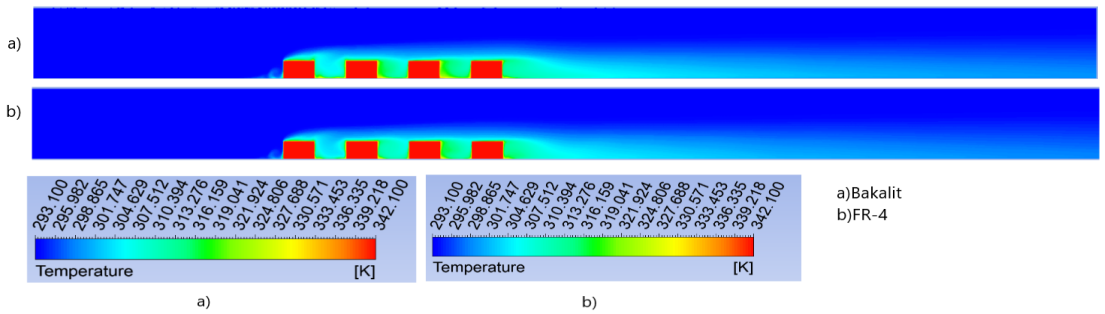


Şekil 4.583. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi



Şekil 4.584. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi

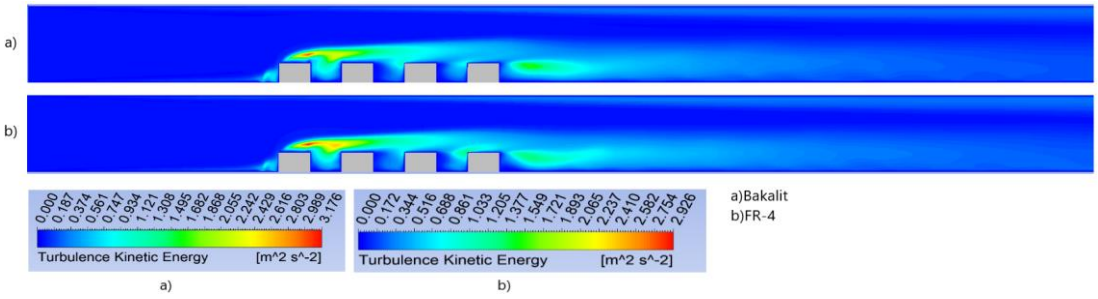
Şekil 4.585'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Her iki durumda da maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklarda elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



Şekil 4.585. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

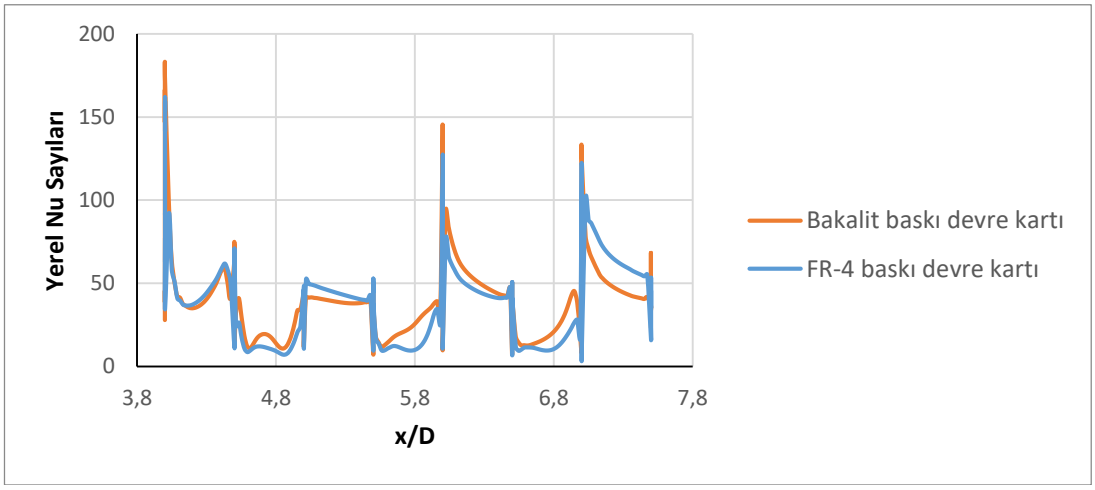
Şekil 4.586'dan da görüleceği gibi her iki durumda da maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup baskı devre kartı malzemesi olarak farklı malzeme kullanıldığında da konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki

durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır. Maksimum kinetik enerji değerleri her iki durumda da hemen hemen aynıdır (Bakalit baskı devre kartı için 3,1 m^2/s^2 ve FR-4 baskı devre kartı için 2,9 m^2/s^2 dir.).



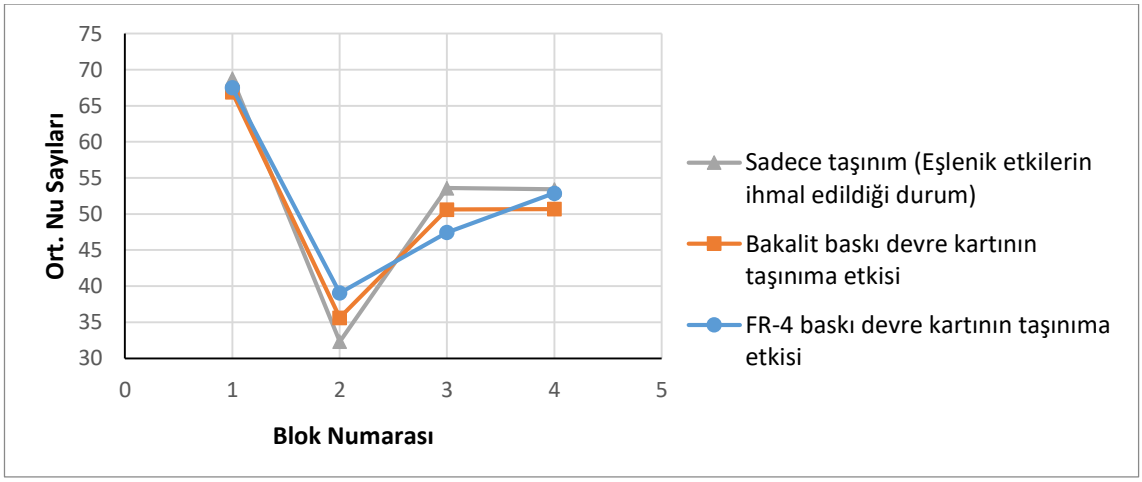
Şekil 4.586. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a)Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.587'de baskı devre kartının farklı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Her iki durumda da maksimum yerel Nusselt sayısı birinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük Nu sayısı ise ikinci yonga üzerindedir. Baskı devre kartının malzemesinin bakalit ve FR-4 olması durumunda yerel Nu sayılarında tüm yongalar üzerinde ufak bir değişim görülmektedir.



Şekil 4.587. Re=9015 (5,42 m/s)'de baskı devre kartının farklı malzeme cinsleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları

Şekil 4.588'de baskı devre kartında kullanılan her iki malzeme ve sadece taşınımla ısı transferi durumları için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.588'de ilk göze çarpan nokta baskı devre kartının malzemesinin dikkate alınması durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 c) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. 3 boyutlu durumda iletimle olan ısı transferi etkisinin düşmesi, yanlardan olan taşınımla ısı transferinin toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmını artırması yüzündendir. Ek olarak yanlarda blokaj yüzünden akışkan hızı da arttığından dolayı yanlardan olan ısı transferini artmaktadır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilirken, her üç durumda da en düşük değer ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.59'da dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.59'dan da görülebileceği gibi baskı devre kartından iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferi az bir miktar düşmüştür. Çünkü toplam ısı transferinin bir kısmı iletime gitmiştir. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme kullanılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme kullanılması durumuna göre az bir miktar daha fazladır.



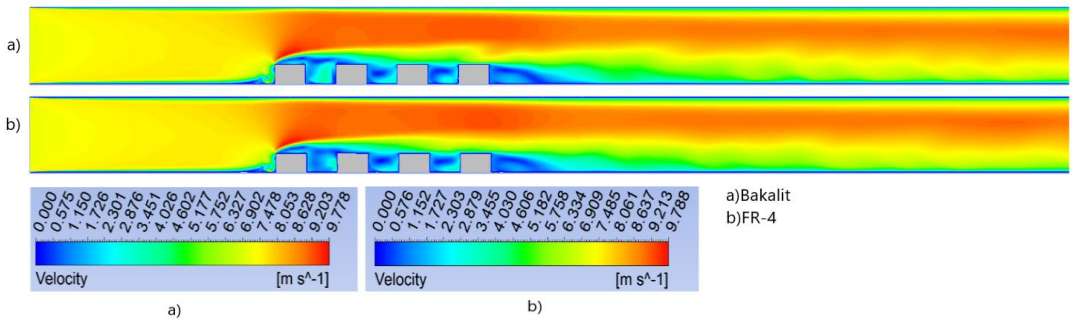
Şekil 4.588. Re=9015 (5,42 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

Çizelge 4.59. Re=9015 (5,42 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlarda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

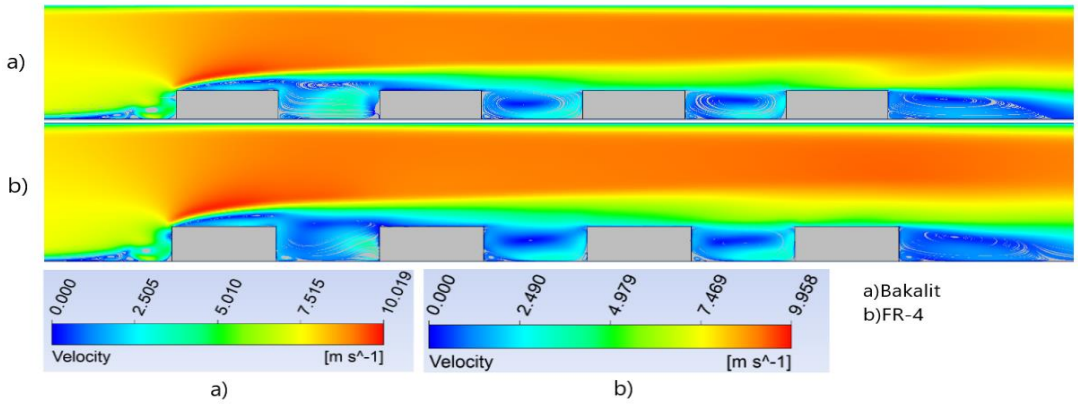
İncelenen Durumlar	Ortalama Nusselt Sayısı
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	52,02
FR-4 baskı devre kartı (Eşlenik durum)	51,72
Bakalit baskı devre kartı (Eşlenik durum)	50,95

Re=11993 (V=7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;

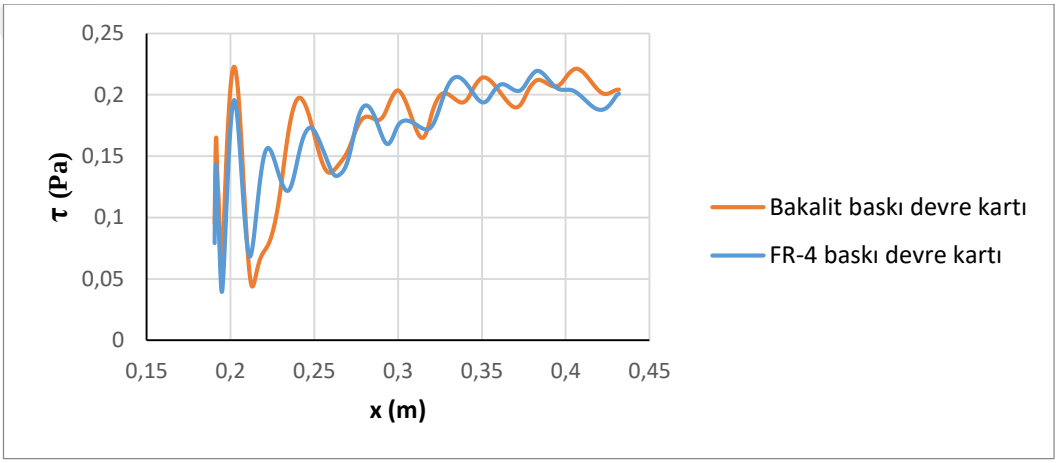
Şekil 4.589 ve 4.590 incelendiğinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar hemen hemen aynıdır (Bakalit baskı devre kartı için 9,77 m/s ve FR-4 baskı devre kartı için 9,78 m/s). Şekil 4.591'den görüleceği üzere baskı devre kartının malzemesinin cinsi yeniden birleşme uzunluklarında çok az bir değişime sebep olmaktadır (Bkz. Çizelge 4.61).



Şekil 4.589. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı



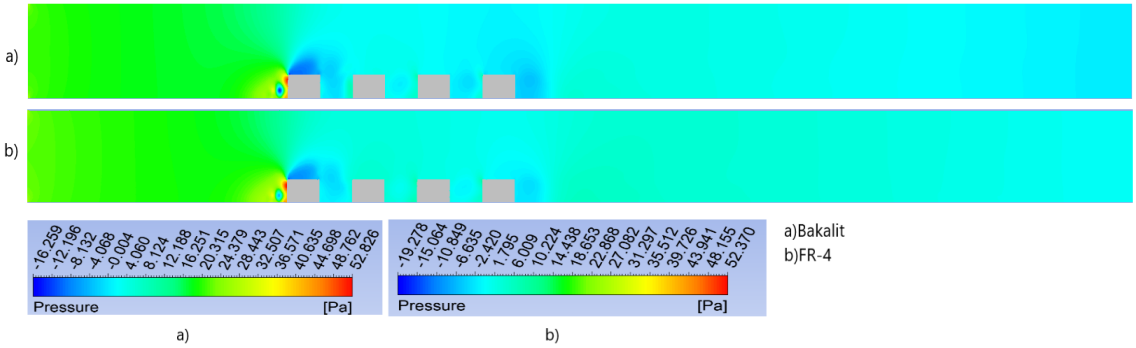
Şekil 4.590. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı



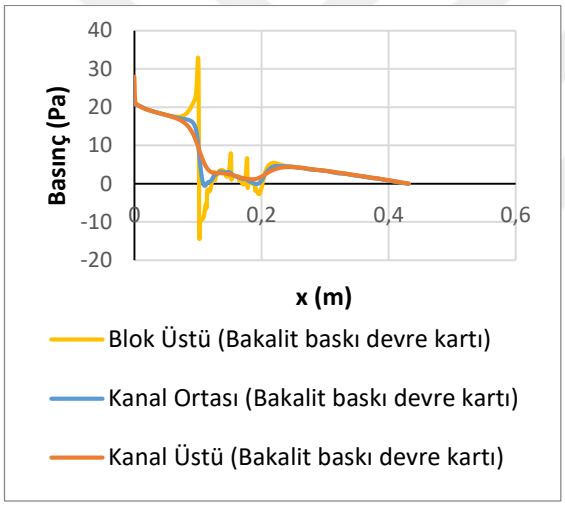
Şekil 4.591. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı baskı devre kartı malzemesi için kayma gerilmeleri

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.592'de verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.593 ve 4.594'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzeme durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Malzeme değiştiğinde Şekil 4.589'dan da görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.589, a ve b için 9,77 m/s ve 9,78 m/s olarak hemen hemen aynı olduğundan dolayı Şekil 4.592 a ve b'deki minimum basınçlar da hemen hemen aynı kalmaktadır. (Şekil 4.592 a'daki minimum basınç -16,2 Pa, b'de ise -19,2 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.593 ve 4.594'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal

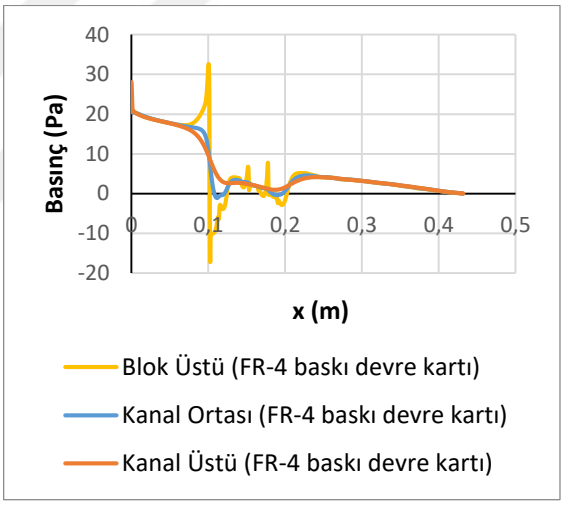
ortasındaki giriş basınçları bakalit baskı devre kartı için 20,7 Pa ve FR-4 baskı devre kartı için 20,45 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.592. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

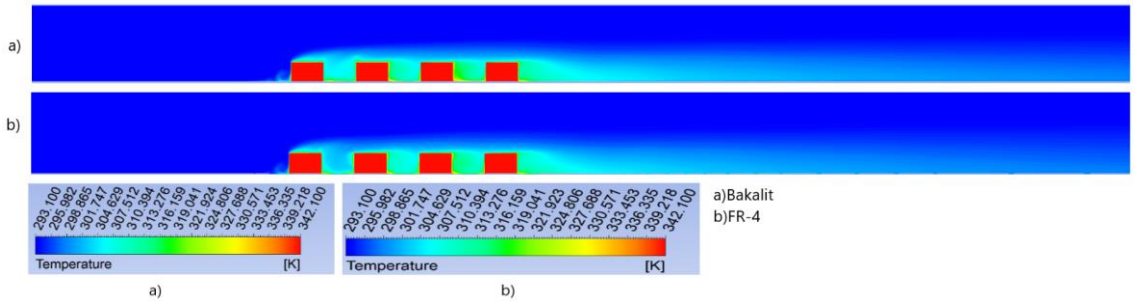


Şekil 4.593. Bakalit baskı devre kartı için basınç değişimi



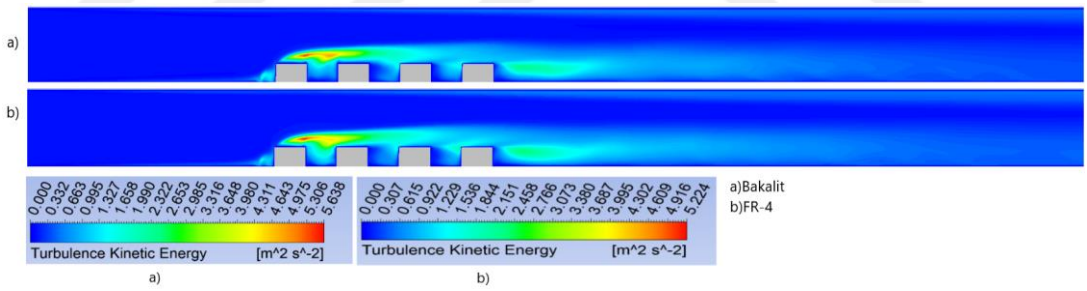
Şekil 4.594. FR-4 baskı devre kartı için basınç değişimi

Şekil 4.595'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Her iki durumda da maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklarda elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



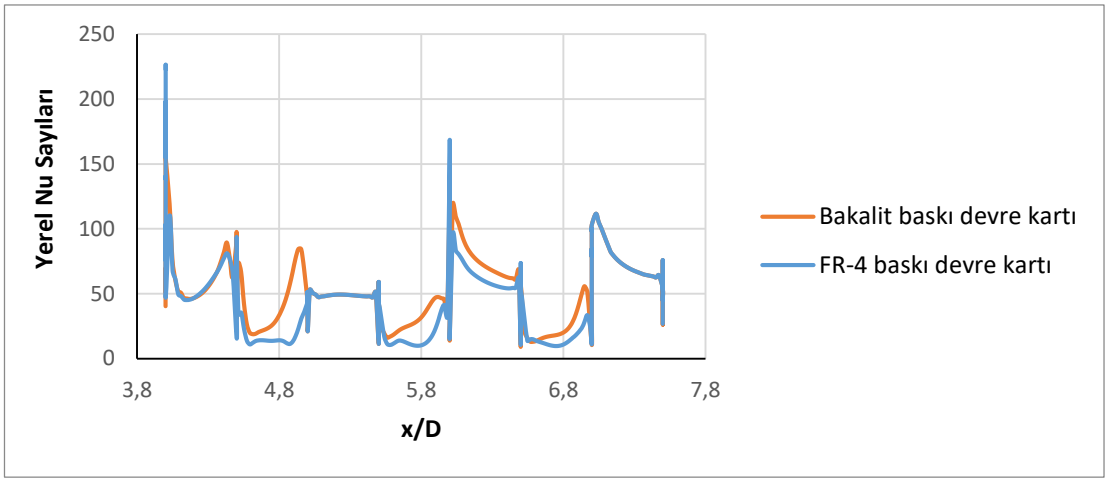
Şekil 4.595. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.596'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup baskı devre kartının malzemesinin farklı malzeme olması durumunda da konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca her iki durumda da son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup çıkışa duvara doğru yayılmaktadır. Maksimum kinetik enerji değerleri her iki durumda da hemen hemen aynıdır (Bakalit baskı devre kartı için 5,6 m^2/s^2 ve FR-4 baskı devre kartı için 5,2 m^2/s^2 dir.)



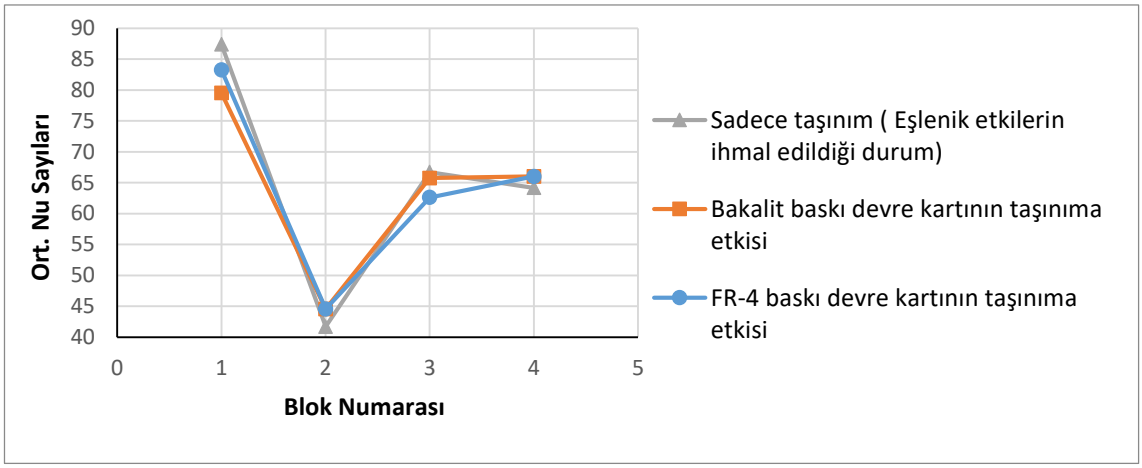
Şekil 4.596. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı b) FR-4 baskı devre kartı

Şekil 4.597'de farklı baskı devre kartı malzemeleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme içinde birinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük Nu sayısı ise ikinci yonga üzerindedir. Baskı devre kartının malzemesinin bakalit ve FR-4 olması durumunda yerel Nu sayılarında tüm yongalar üzerinde ufak bir değişim görülmektedir.



Şekil 4.597. Re=11993 (7,21 m/s) 'de baskı devre kartının farklı malzeme cinsleri için bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmındaki yerel Nu sayıları

Şekil 4.598'de baskı devre kartında kullanılan her iki malzeme ve sadece taşınımla ısı transferi durumları için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.598'de ilk göze çarpan nokta baskı devre kartının malzemesinin dikkate alınması durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 c) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. 3 boyutlu durumda iletimle olan ısı transferi etkisinin düşmesi, yanlardan olan taşınımla ısı transferinin toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmını artırması yüzündendir. Ek olarak yanlarda blokaj yüzünden akışkan hızı da arttığından dolayı yanlardan olan ısı transferini artmaktadır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilirken, her üç durumda da en düşük değer ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.60'da dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu değerleri bulunmuştur. Çizelge 4.60'dan da görülebileceği gibi baskı devre kartından iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferi az bir miktar düşmüştür. Çünkü toplam ısı transferinin bir kısmı iletime gitmiştir. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme kullanılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme kullanılması durumuna göre az bir miktar daha fazladır.



Şekil 4.598. Re=11993 (7,21 m/s) için bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

Çizelge 4.60. Re=11993 (7,21 m/s)'de eşlenik ve eşlenik olmayan durumlar için tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

İncelenen Durumlar	**Ortalama Nusselt Sayısı**
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	65
FR-4 baskı devre kartı (Eşlenik durum)	64,11
Bakalit baskı devre kartı (Eşlenik durum)	63,96

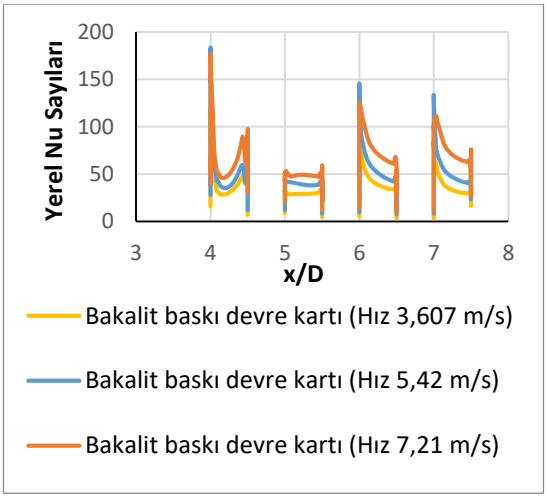
Baskı devre kartı malzemesinin etkisinin farklı hızlarda karşılaştırılması

Baskı devre kartının farklı malzemelerde olması, farklı hızlarda yeniden birleşme uzunluklarında çok az bir değişime neden olmaktadır (Bkz. Çizelge 4.61).

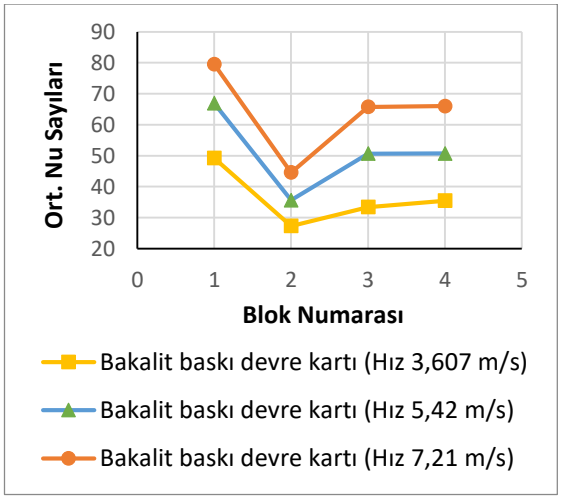
Çizelge 4.61. Farklı malzemeler için farklı hızların yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Malzeme Cinsi	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	Bakalit baskı devre kartı	0,00314	0,021256
	FR-4 baskı devre kartı	0,004106	0,018599
5,42	Bakalit baskı devre kartı	0,00338	0,020532
	FR-4 baskı devre kartı	0,004106	0,025846
7,21	Bakalit baskı devre kartı	0,004106	0,021964
	FR-4 baskı devre kartı	0,004348	0,021014

Baskı devre kartının malzemesinin bakalit olması durumunda hızın artırılması Şekil 4.599 ve Şekil 4.600'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ort. Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. En düşük ortalama Nu sayısı tüm durumlarda ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.

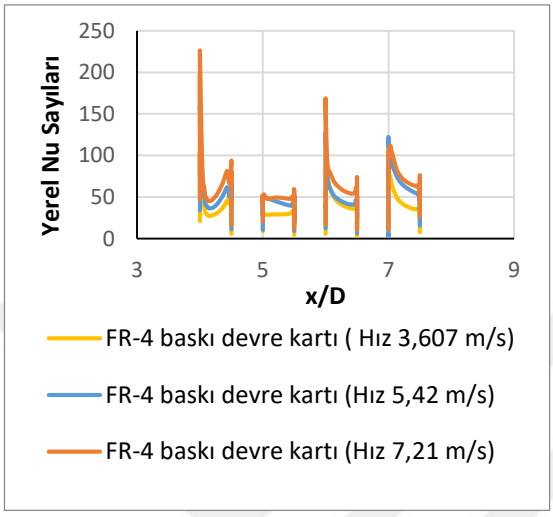


Şekil 4.599. Bakalit baskı devre kartının bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının farklı hızlardaki yerel Nu sayıları

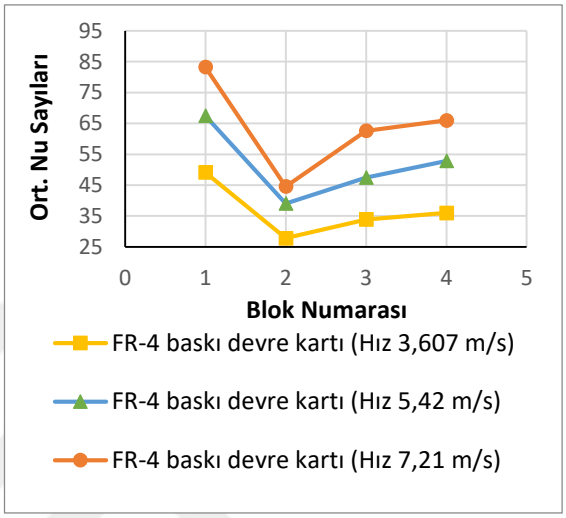


Şekil 4.600. Bakalit baskı devre kartının bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının farklı hızlardaki ort. Nu sayıları

Baskı devre kartının malzemesinin FR-4 olması durumunda hızın artırılması Şekil 4.601 ve Şekil 4.602'den de görülebileceği gibi yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel ve ortalama Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilmiştir. En düşük yerel ve ortalama Nu sayısı tüm hızlarda ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.601. FR-4 baskı devre kartının bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının farklı hızlardaki yerel Nu sayıları



Şekil 4.602. FR-4 baskı devre kartının bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının farklı hızlardaki ort. Nu sayıları

Yapılan 6 adet analiz incelendiğinde taşınımla olan en yüksek ısı transferinin Re=11993 (7,21 m/s)'de FR-4 malzemesinde elde edildiği görülmüştür. Pulat (2000), yaptığı çalışmasında baskı devre kartı malzemesinin ısı iletim katsayısı arttıkça lokal ısı taşınım katsayısının azaldığını gözlemlemiştir. Durgam ve diğerleri (2017), yaptıkları çalışmalarında FR-4 malzeme kullanılması durumunda doğal taşınımın bakalit malzeme kullanılmasına göre daha fazla olduğunu vurgulamışlardır.

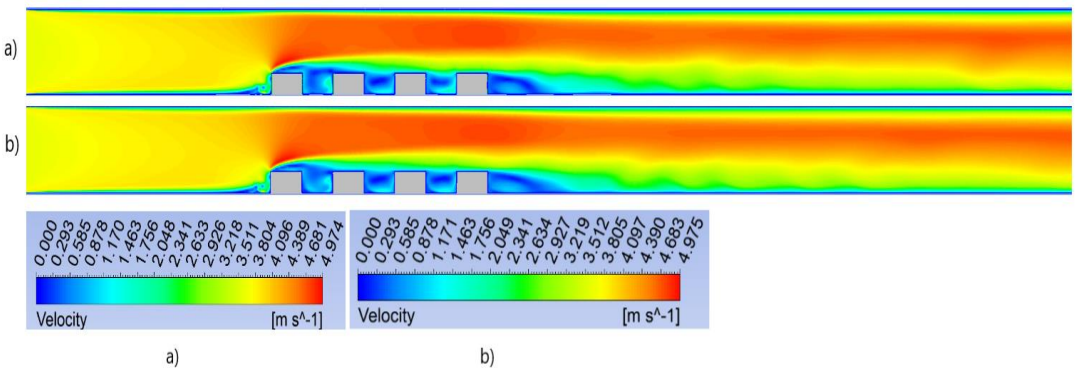
4.2.8. 3 boyutlu geometride bakır sıvamanın etkisinin incelenmesi

Baskı devre kartlarına bakır sıvama y-yönündeki (Bkz. Şekil 3.12) iletimle olan ısı transferini artırmak için yapılmaktadır (Çengel, 2010). Yonganın alt kısmından baskı devre kartına olan ısı transferi yongalar arasında ve son yongadan sonra ısı taşınımı ile de olmasından ötürü toplam ısı transferinin iletimle olan kısmı artabilmektedir (Nakayama ve Park, 1996). 3 boyutlu durumda iletimle olan ısı transferi etkisinin düşmesi, yanlardan

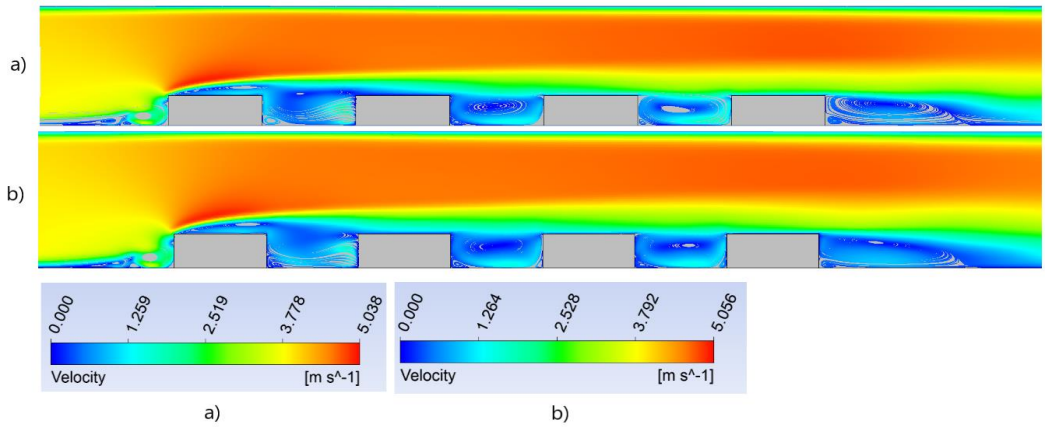
olan taşınımla ısı transferinin toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmını artırması yüzündendir. Ek olarak yanlarda blokaj yüzünden akışkan hızı da arttığından dolayı yanlardan olan ısı transferini artmaktadır. Bakır sıvamanın etkisini incelemek amacıyla baskı devre kartı üzerine 0,1 mm de bakır sıvama yapılmıştır. Bakır sıvama genellikle 0,1 mm, 0,15 mm gibi düşük kalınlıklarda yapılmaktadır (Çengel, 2010).

Re=6000 (V=3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;

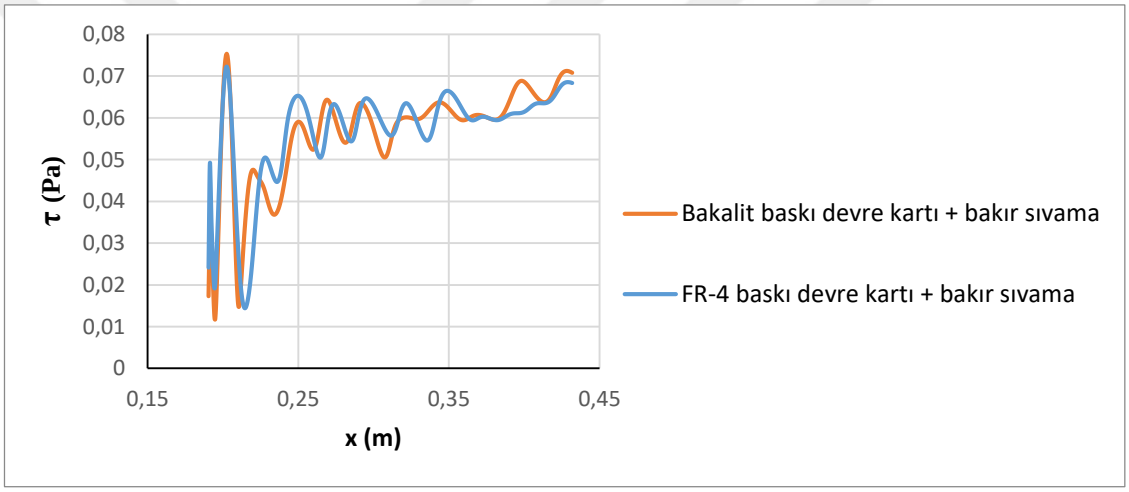
Şekil 4.603 ve 4.604 incelendiğinde her iki durum içinde ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Hem bakalit altına bakır sıvama hem de FR-4 altına bakır sıvama durumunda ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 4,9 m/s olarak belirlenmiştir. Şekil 4.605'den görüleceği üzere yeniden birleşme uzunluklarında da pek bir değişim olmamaktadır (Bkz. Çizelge 4.65).



Şekil 4.603. Re=6000 (3,607 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması



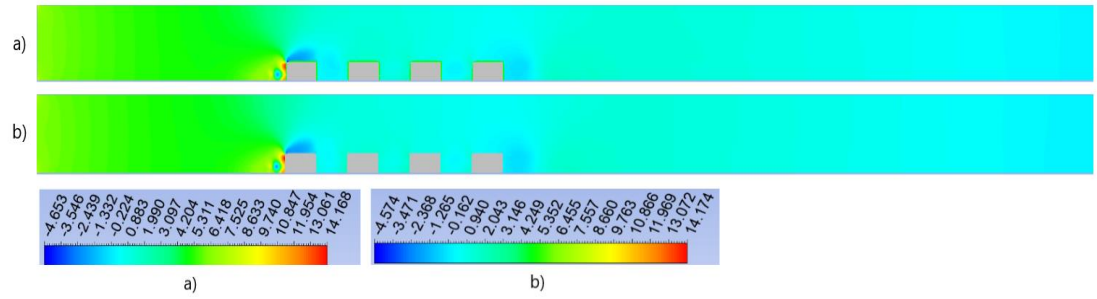
Şekil 4.604. Re=6000 (3,607 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması



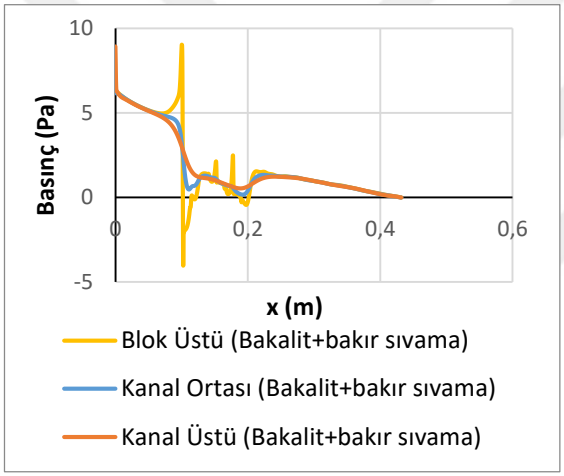
Şekil 4.605. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama için kayma gerilmeleri

Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.606'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.607 ve 4.608'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzemenin altına bakır kaplama durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Bakır sıvama olduğunda Şekil 4.603'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.603, a ve b için 4,9 m/s olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.606 a ve b'deki minimum basınçlar da aynı kalmaktadır. (Şekil 4.606 a ve b'deki minimum basınç -4,6 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.607 ve 4.608'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit

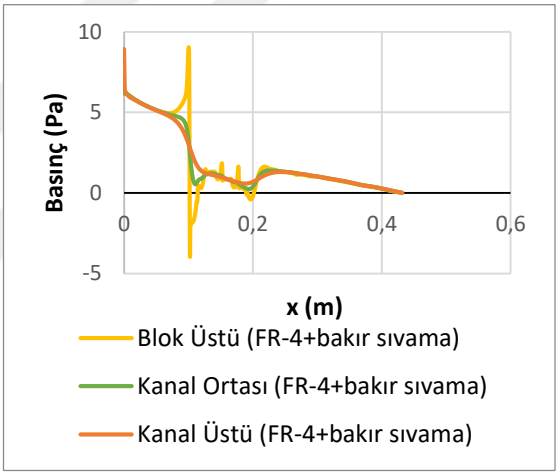
baskı devre kartı + bakır sıvama için 6,17 Pa ve FR-4 baskı devre kartı + bakır sıvama için 6,16 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.606. Re=6000 (3,607 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

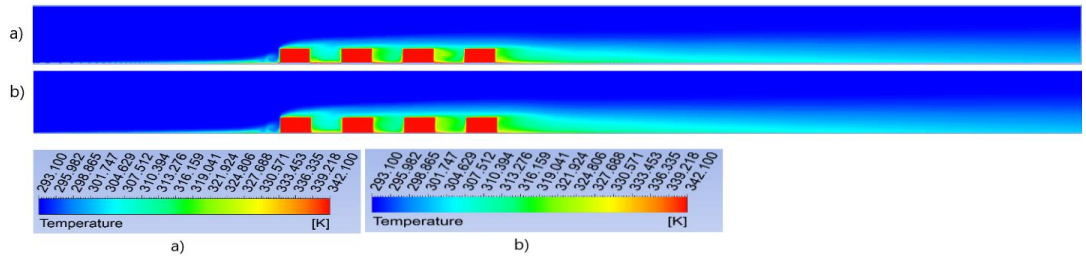


Şekil 4.607. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi



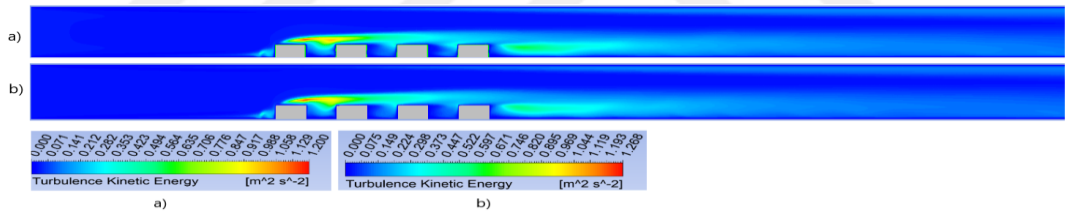
Şekil 4.608. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi

Şekil 4.609'de sıcaklık kontürleri verilmiştir. Her iki durumda da maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklar üzerinde elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



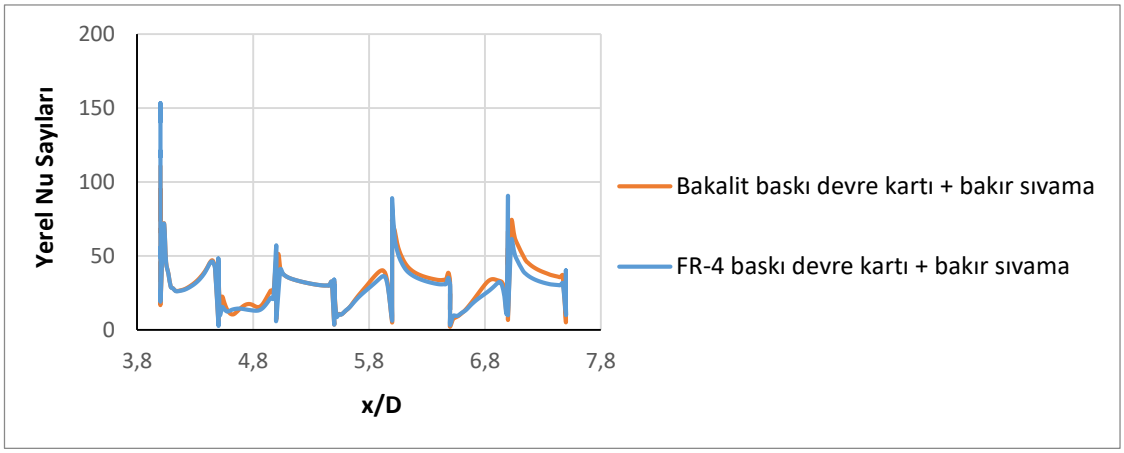
Şekil 4.609. Re=6000 (3,607 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Şekil 4.610'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup farklı malzeme altına bakır sıvama olduğunda da konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır. Maksimum kinetik enerji değerleri her iki durumda da hemen hemen aynıdır (Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için 1,2 m^2/s^2 ve FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için 1,26 m^2/s^2 dir.)



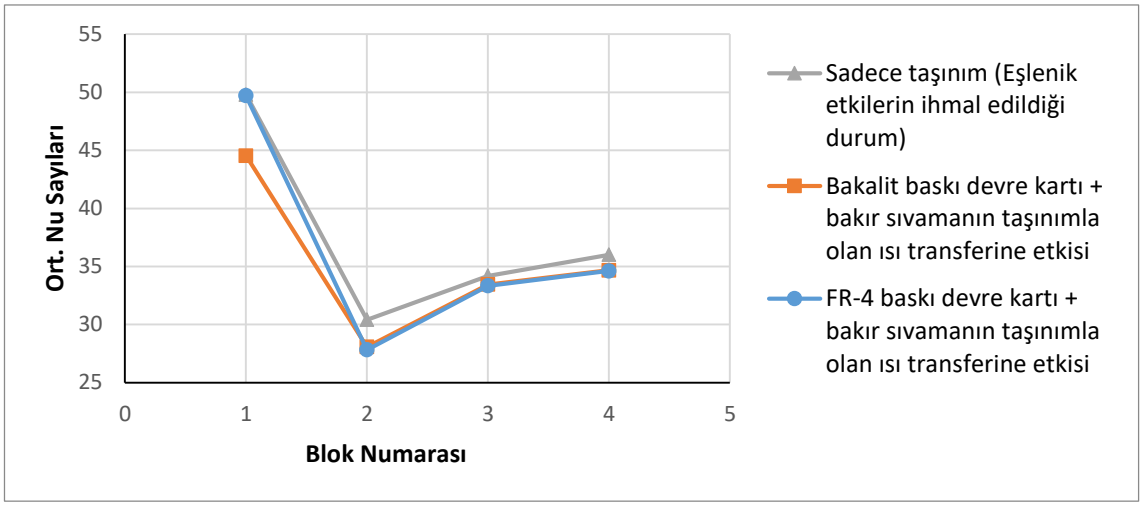
Şekil 4.610. Re=6000 (3,607 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Şekil 4.611'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama olduğu durumda bloklar üzerindeki ve blok aralarındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme altına bakır sıvama olduğu durumda da birinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük yerel Nu sayısı ise ikinci yonga üzerindedir.



Şekil 4.611. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.612'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama ve sadece taşınımla ısı transferi durumları için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.612'de ilk göze çarpan nokta baskı devre kartı üzerine bakır sıvama durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 d) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilirken, her iki durumda da en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.62'de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.62'den de görülebileceği gibi baskı devre kartının altına bakır sıvama yapılması, iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferini çok az bir miktar düşürmüştür. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme altına bakır sıvama yapılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme altına bakır sıvama yapılması durumuna göre çok az bir miktar daha fazladır.



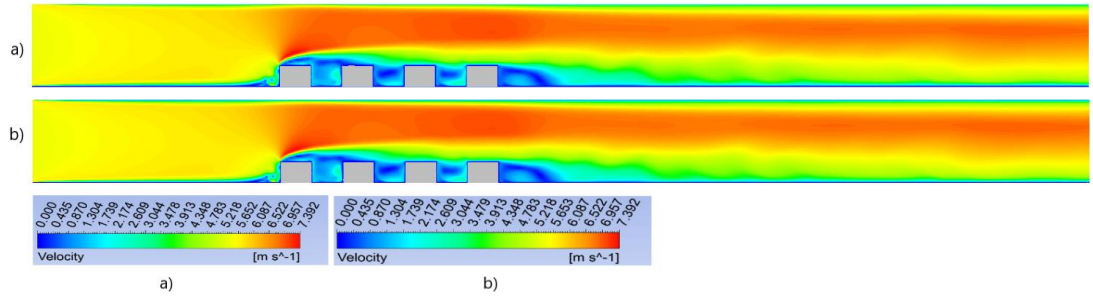
Şekil 4.612. Re=6000 (3,607 m/s) için bakır sıvama durumunda bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

Çizelge 4.62. Re=6000 (3,607 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

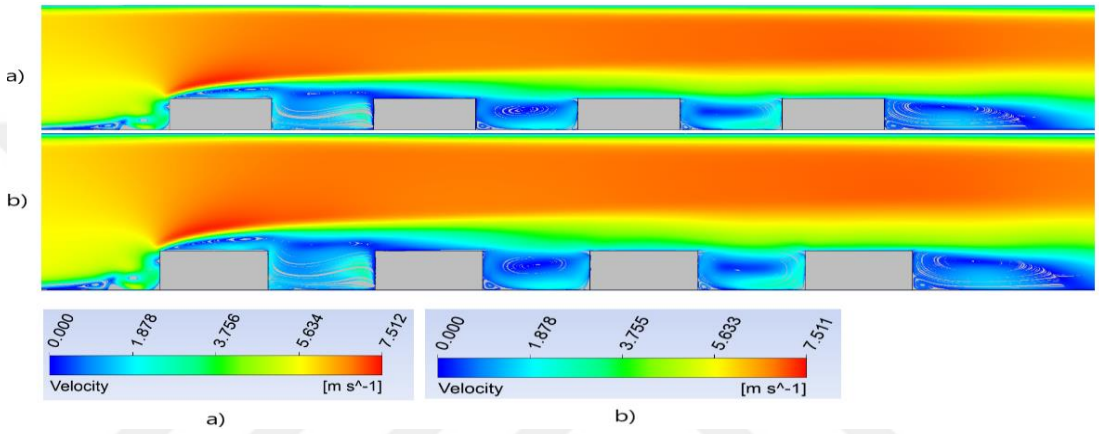
İncelenen Durumlar	**Ortalama Nusselt Sayısı**
Sadece Taşınım (Eşlenik olmayan durum)	37,7
FR-4 baskı devre kartı +Bakır sıvama (Eşlenik durum)	36,37
Bakalit baskı devre kartı +Bakır sıvama (Eşlenik durum)	35,18

Re=9015 (V=5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;

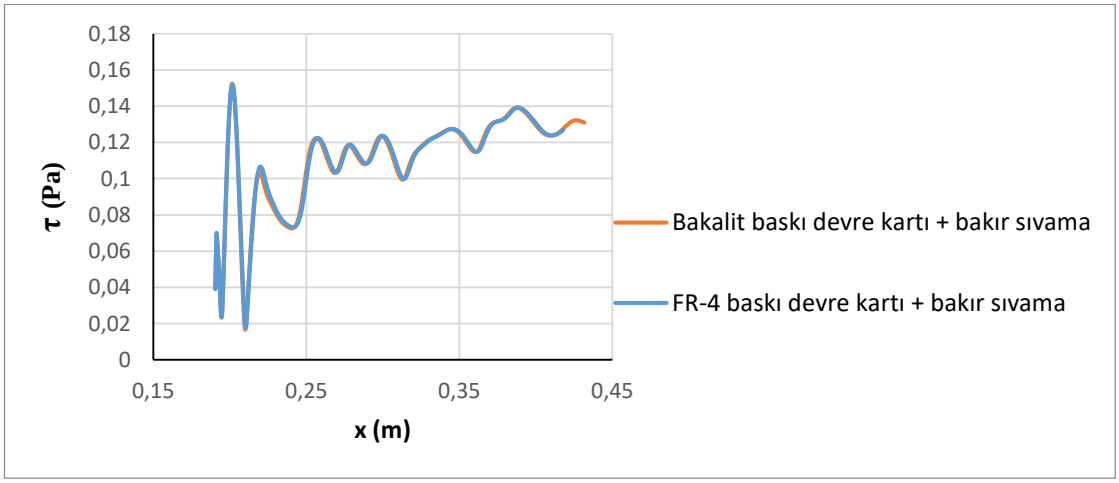
Şekil 4.613 ve 4.614 incelendiğinde her iki durumda da ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme altına bakır sıvama durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 7,39 m/s olarak belirlenmiştir. Şekil 4.615'den görüleceği üzere yeniden birleşme uzunluklarında da pek bir değişim olmamaktadır (Bkz. Çizelge 4.65).



Şekil 4.613. Re=9015 (5,42 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

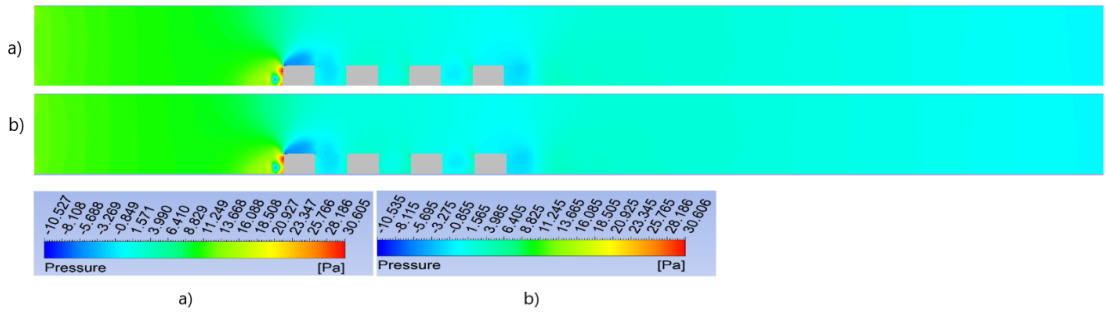


Şekil 4.614. Re=9015 (5,42 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

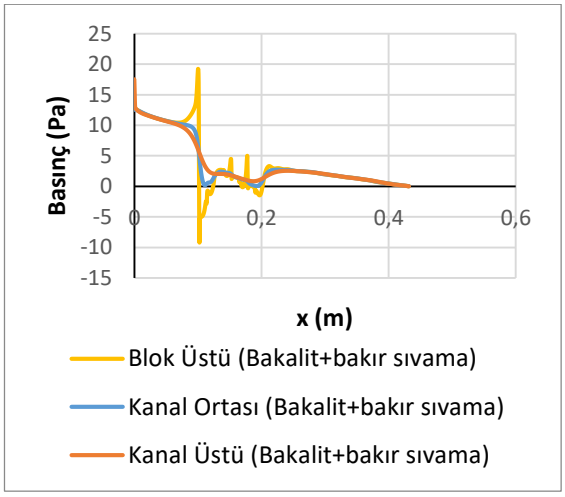


Şekil 4.615. Re=9015 (5,42 m/s)'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama için kayma gerilmeleri

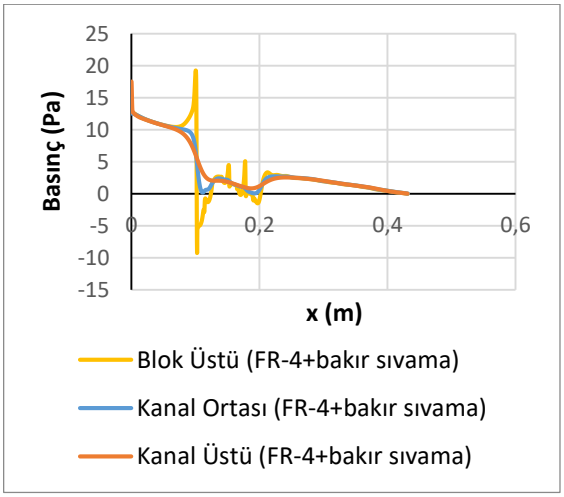
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.616'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.617 ve 4.618'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzeme altına bakır kaplama durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Bakır sıvama olduğunda Şekil 4.613'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.613, a ve b için 7,39 m/s olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.616 a ve b'deki minimum basınçlar da aynı kalmaktadır. (Şekil 4.616 a ve b'deki minimum basınç -10,5 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.617 ve 4.618'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit + bakır sıvama ve FR-4 + bakır sıvama için 12,5 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.616. Re=9015 (5,42 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

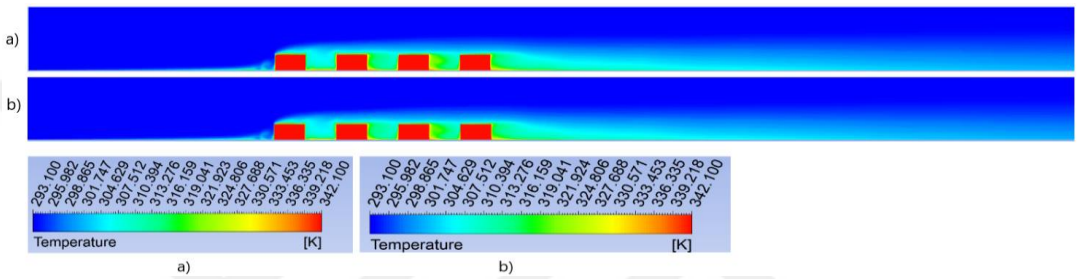


Şekil 4.617. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi



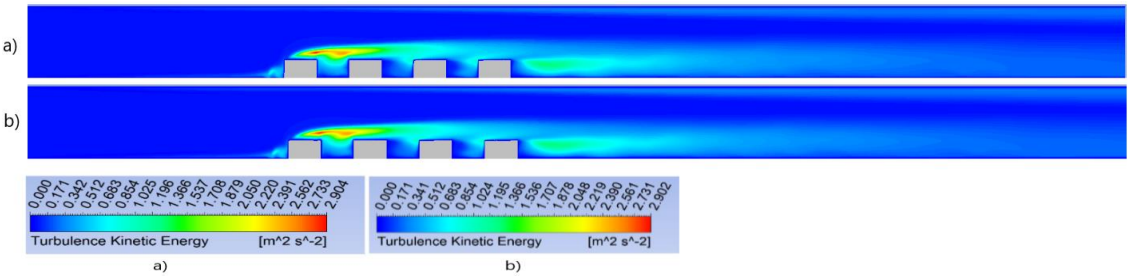
Şekil 4.618. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi

Şekil 4.619'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Her iki durumda da maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklar üzerinde elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



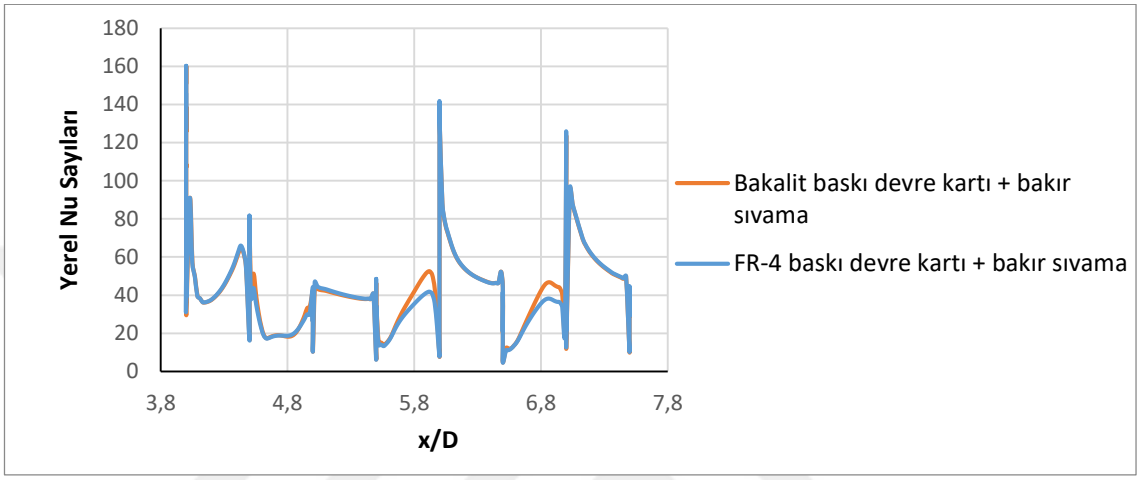
Şekil 4.619. Re=9015 (5,42 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Şekil 4.620'den de görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup farklı malzeme altına bakır sıvama olduğunda da konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır. Maksimum kinetik enerji değerleri her iki durumda da hemen hemen aynıdır (Bakalit + bakır sıvama için 2,904 m^2/s^2 ve FR-4 + bakır sıvama için 2,902 m^2/s^2 dir.).



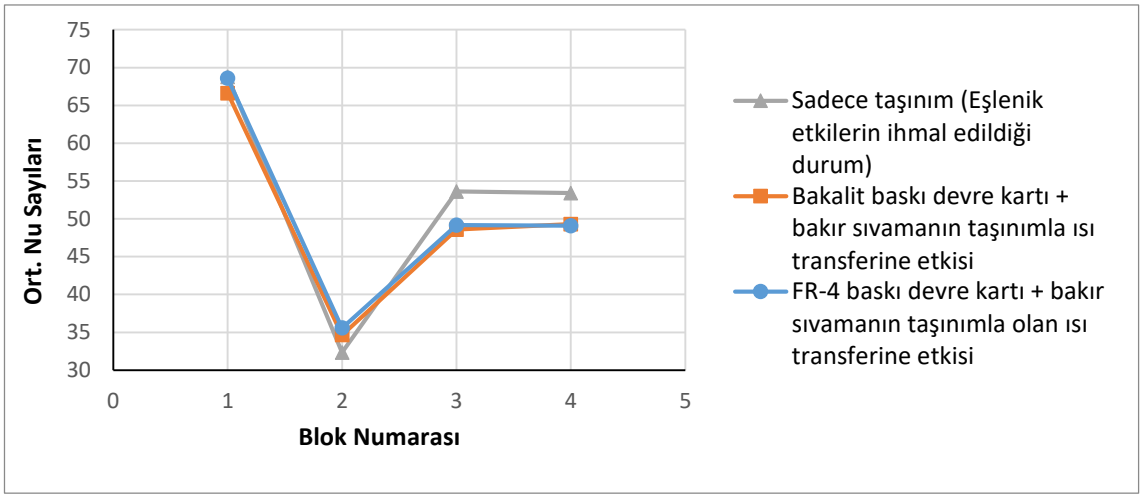
Şekil 4.620. Re=9015 (5,42 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Şekil 4.621'de farklı baskı devre kartları altına bakır sıvama olduğu durumda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme altına bakır sıvama olduğu durumda da birinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük yerel Nu sayısı ise her iki durum da da ikinci yonga üzerindedir.



Şekil 4.621. Re=9015 (5,42 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.622'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama ve sadece taşınımla ısı transferi durumları için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.622'de ilk göze çarpan nokta baskı devre kartı üzerine bakır sıvama durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 d) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. Çizelge 4.63'de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.63'den de görülebileceği gibi baskı devre kartının altına bakır sıvama yapılması, iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferini çok az bir miktar düşürmüştür. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme altına bakır sıvama yapılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme altına bakır sıvama yapılması durumuna göre çok az bir miktar daha fazladır.



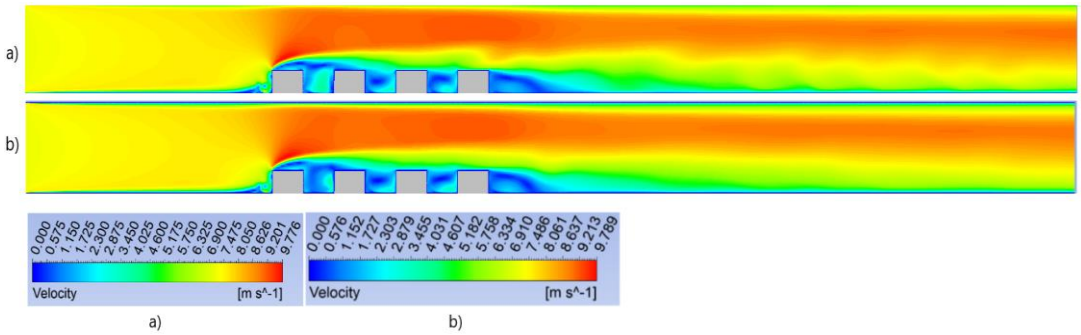
Şekil 4.622. Re=9015 (5,42 m/s) için bakır sıvama durumunda bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

Çizelge 4.63. Re=9015 (5,42 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

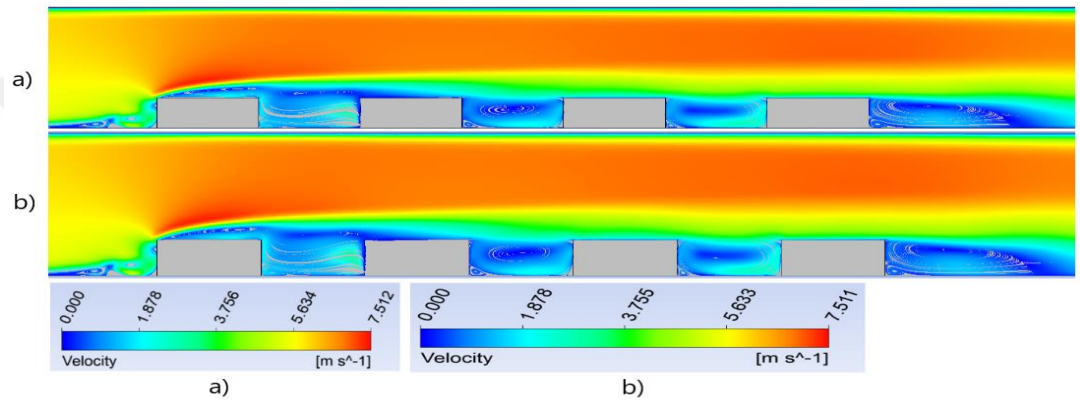
İncelenen Durumlar	**Ortalama Nusselt Sayısı**
Sadece Taşınım (Eşlenik olmayan durum)	52,02
FR-4 baskı devre kartı +Bakır sıvama (Eşlenik durum)	50,5
Bakalit baskı devre kartı +Bakır sıvama (Eşlenik durum)	49,78

Re=11993 (V=7,21 m/s için) yapılan çalışmalar;

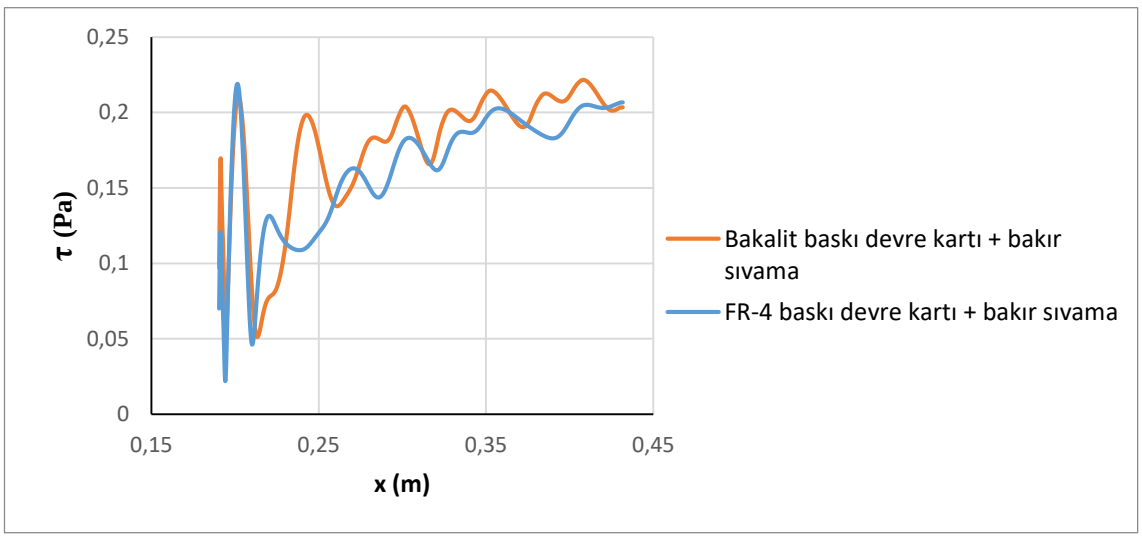
Şekil 4.623 ve 4.624 incelendiğinde her iki durumda da ilk bloğun üst ucundan itibaren kesit daralmasından dolayı hızın arttığı görülmektedir. Her iki malzeme altına bakır sıvama durumunda da ilk bloğun ön alt ucunda saat yönünde bir girdap oluşmaktadır. Her iki durumda da bloklardan sonra gelen çukurda oluşan saat yönünün tersindeki girdapların uzunluğu hemen hemen aynıdır. Son bloğun arkası geri basamak akışına benzemektedir. Ayrıca her iki durumda da son bloğun alt ucunda ikinci bir saat yönünün tersinde girdap oluşmaktadır. Elde edilen maksimum hızlar değişmemekle beraber 9,77 m/s olarak belirlenmiştir. Şekil 4.625'den görüleceği üzere yeniden birleşme uzunluklarında da pek bir değişim olmamaktadır (Bkz. Çizelge 4.65).



Şekil 4.623. Re=11993 (7,21 m/s) için hız kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

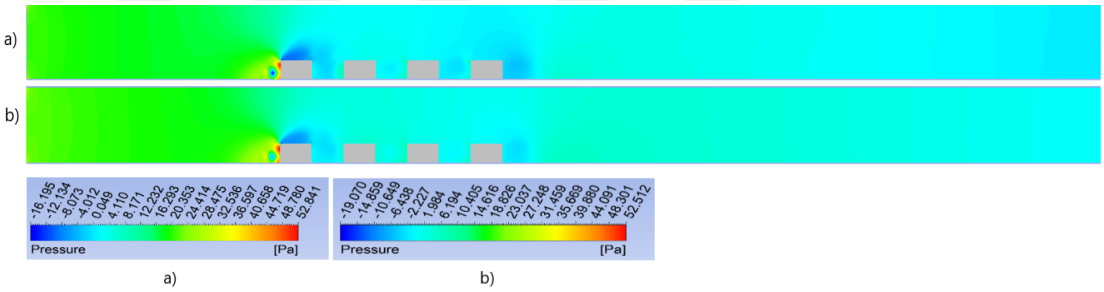


Şekil 4.624. Re=11993 (7,21 m/s) için hız çizgileri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

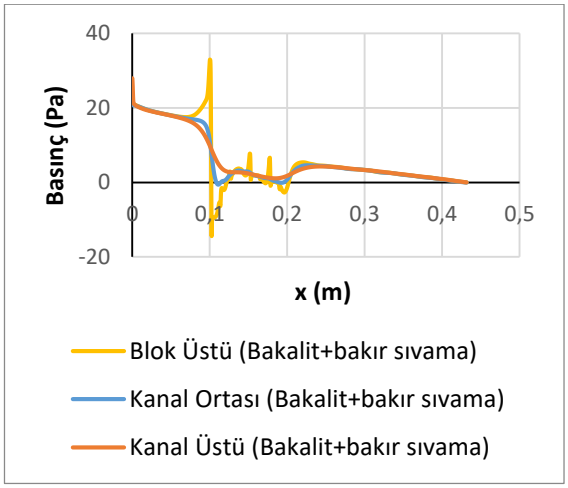


Şekil 4.625. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama için kayma gerilmeleri

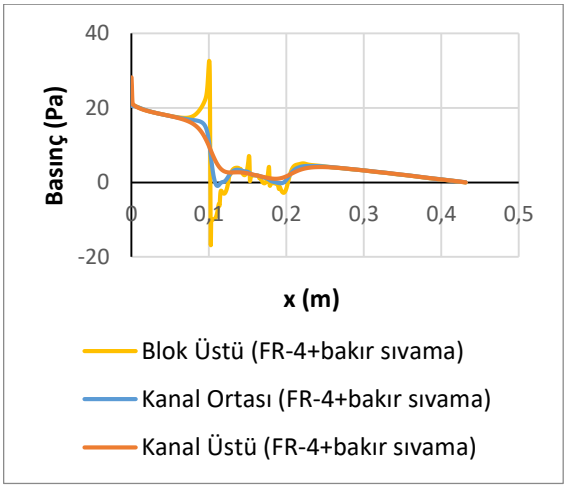
Kontür olarak basınç dağılımları şekil 4.626'da verilmiştir. Ayrıca blokların sebep olduğu basınç değişimlerini daha iyi anlayabilmek için şekil 4.627 ve 4.628'de blok üstü, kanal ortası ve kanal üstü kesitlerinde basınç değerleri çizdirilmiştir. En düşük basınçlar her iki malzemenin altına bakır kaplama durumunda da birinci blok üzerinde oluşmaktadır. Bu durum blok üzerinde hız arttığından dolayı Bernoulli prensibine göre basıncın azalmasına yorulmalıdır. Bakır sıvama olduğunda Şekil 4.623'den de görülebileceği gibi birinci blok üzerindeki maksimum hız Şekil 4.623, a ve b için 9,77 m/s olarak değişmediğinden dolayı Şekil 4.626 a ve b'deki minimum basınçlar hemen hemen aynı kalmaktadır. (Şekil 4.626 a ve b'deki minimum basınç -16,19 Pa ve -19 Pa olarak hesaplanmıştır). Şekil 4.627 ve 4.628'den de görülebileceği gibi her iki durumda da akışkanın kanal ortasındaki giriş basınçları bakalit + baskır sıvama ve FR-4 +bakır sıvama için sırasıyla 20,7 Pa ve 20,58 Pa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.626. Re=11993 (7,21 m/s) için basınç kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

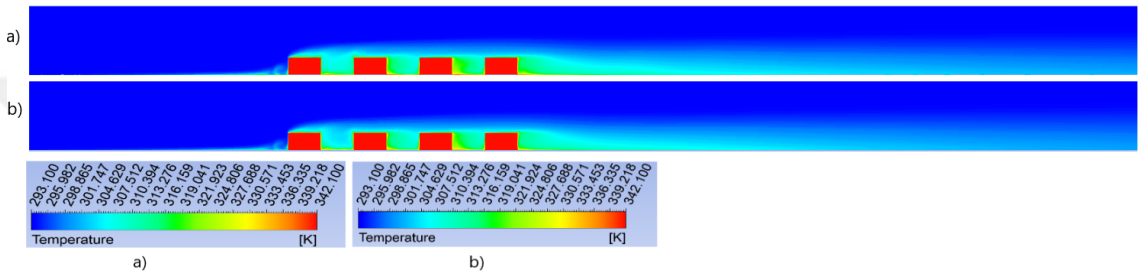


Şekil 4.627. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi



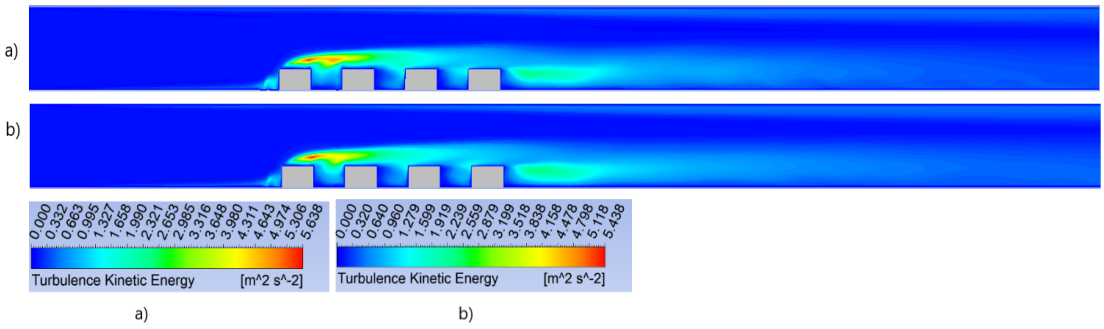
Şekil 4.628. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için basınç değişimi

Şekil 4.629'da sıcaklık kontürleri verilmiştir. Her iki durumda da maksimum sıcaklıklar ilk bloğun ön alt köşesinde, blok aralarında, son bloğun arka alt köşesinde ve bloklar üzerinde elde edilmiştir. Buralarda oluşan girdap bloklara çarpıp ısınmakta ve ısınan akış tekrar sirküle ettiğinden dolayı akışkan sıcaklığı artmaktadır. Son bloğun arkasında oluşan girdap da aynı sebepten dolayı ısınmakta ve sıcaklık kanal çıkışına doğru yayılmaktadır. Sıcaklık değişimi etkisini blok yüzeyinden kanal tabanına doğru göstermekte olup akışın ataletinden dolayı kanal tavanına doğru giriş sıcaklığı değişmemektedir.



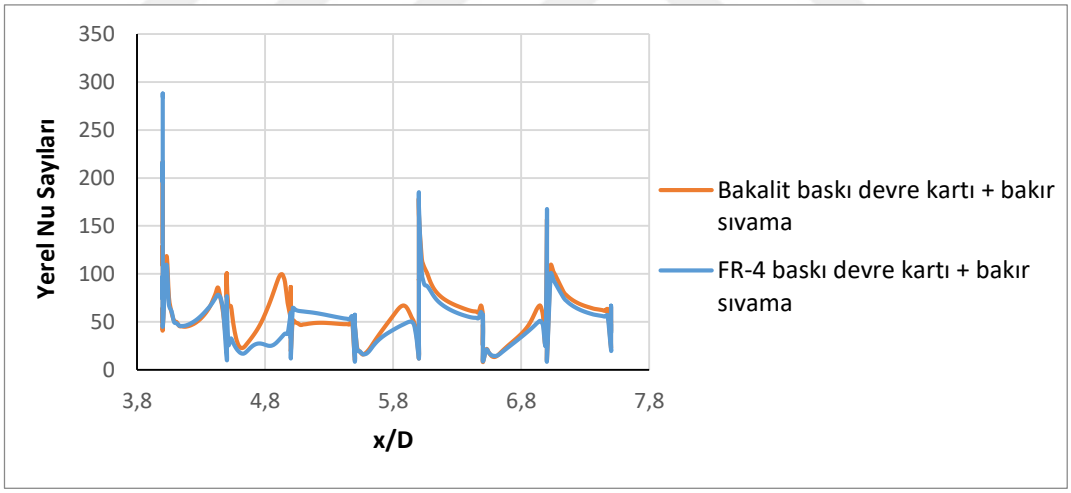
Şekil 4.629. Re=11993 (7,21 m/s) için sıcaklık kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

Şekil 4.630'dan da görüleceği gibi maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup farklı malzeme altına bakır sıvama olduğunda da konumu hemen hemen aynı kalmaktadır. Ayrıca son blok arkasında oluşan girdaptan dolayı buralarda da türbülans kinetik enerjileri yüksek olup her iki durumda da çıkışa duvara doğru yayılmaktadır. Maksimum kinetik enerji değerleri her iki durumda da hemen hemen aynıdır (Bakalit baskı devre kartı + bakır sıvama için 5,6 m^2/s^2 ve FR-4 baskı devre kartı + bakır sıvama için 5,4 m^2/s^2'dir.).



Şekil 4.630. Re=11993 (7,21 m/s) için türbülans kinetik enerji kontürleri a) Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması b) FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama yapılması

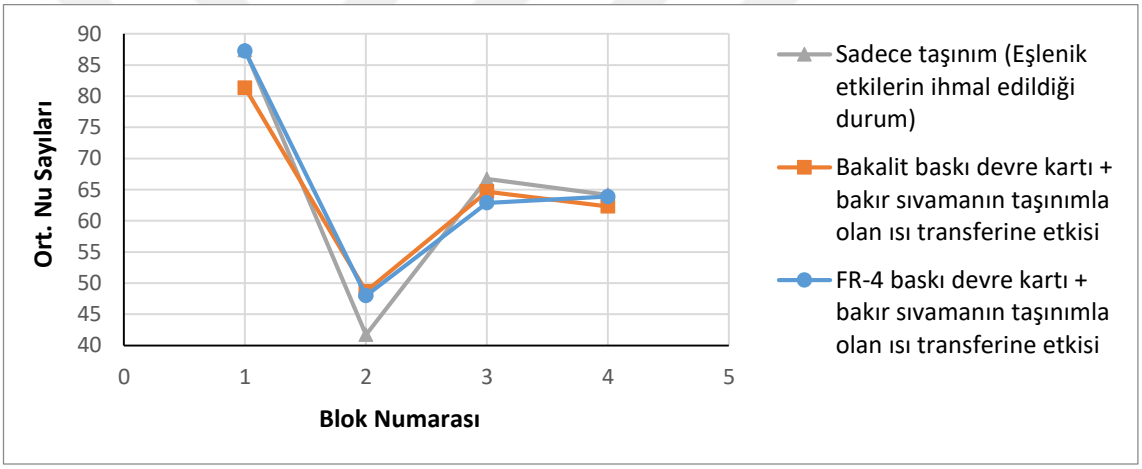
Şekil 4.631'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama olduğu durumda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nu sayısının değişimi görülmektedir. Maksimum yerel Nusselt sayısı her iki malzeme altına bakır sıvama olduğu durumda birinci yonga üzerinde görülmüştür. En düşük yerel Nu sayısı ise her iki durumda ikinci yonga üzerindedir.



Şekil 4.631. Re=11993 (7,21 m/s) için farklı malzemelerdeki baskı devre kartı altına bakır sıvanması durumunda bloklar üzerindeki ve bloklar arasındaki yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.632'de farklı baskı devre kartı altına bakır sıvama ve sadece taşınımla ısı transferi durumları için bloklar üzerindeki ortalama Nu sayıları verilmiştir. Ortalama Nu sayısı hesaplanırken blokların sadece üst yüzeyleri değil ön ve arka yüzeyleri de dikkate alınmıştır. Ortalama Nu sayısı yüzeye en yakın ağ noktalarında hesaplanan yerel Nu sayısının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 4.632'de ilk göze çarpan nokta

baskı devre kartı altına bakır sıvama durumunda toplam ısı transferi Q_{toplam}'ın (Bkz. Şekil 3.11 d) taşınıma giden kısmının azalması nedeniyle taşınımla olan ortalama ısı transferinin azalmasıdır. En yüksek ortalama Nu sayısı tüm durumlarda birinci yonga üzerinde edilirken, her iki durumda da en düşük ortalama Nu sayısı ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.64'de dört yonganın ortalaması alınarak ortalama Nu sayısı bulunmuştur. Çizelge 4.64'den de görülebileceği gibi baskı devre kartının altına bakır sıvama yapılması, iletimle olan ısı transferi yüzünden taşınımla olan ortalama ısı transferini çok az bir miktar düşürmüştür. Isı iletim katsayısı daha düşük olan FR-4 malzeme altına bakır sıvama yapılması durumunda taşınımla olan ısı transferi, ısı iletim katsayısı yüksek olan bakalit malzeme altın bakır sıvama yapılması durumuna göre çok az bir miktar daha fazladır.



Şekil 4.632. Re=11993 (7,21 m/s) için bakır sıvama durumunda bloklar üzerindeki toplam ısı transferinin taşınımla olan kısmının ortalama Nu sayıları

Çizelge 4.64. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda ve eşlenik olmayan durumda tüm blokların ortalama Nu sayısının karşılaştırılması

İncelenen Durumlar	Ortalama Nusselt Sayısı
Sadece taşınım (Eşlenik olmayan durum)	65
FR-4 baskı devre kartı +Bakır sıvama (Eşlenik durum)	64,8
Bakalit baskı devre kartı+Bakır sıvama (Eşlenik durum)	64,24

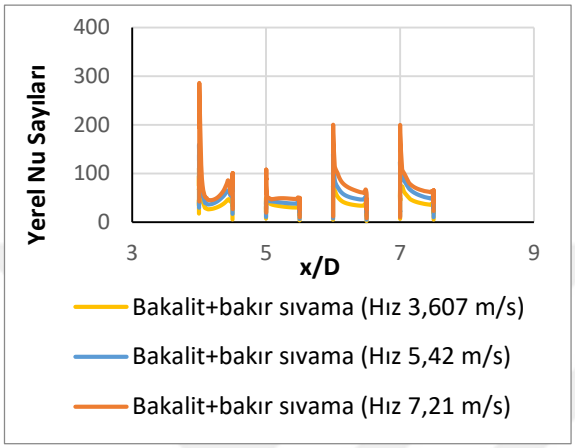
Farklı hızlarda bakır sıvamanın etkisinin karşılaştırılması

Farklı malzemeler altına bakır sıvama durumunda farklı hızlarda yeniden birleşme uzunlukları Çizelge 4.65 yardımıyla da görülebileceği gibi hemen hemen aynı kalmaktadır.

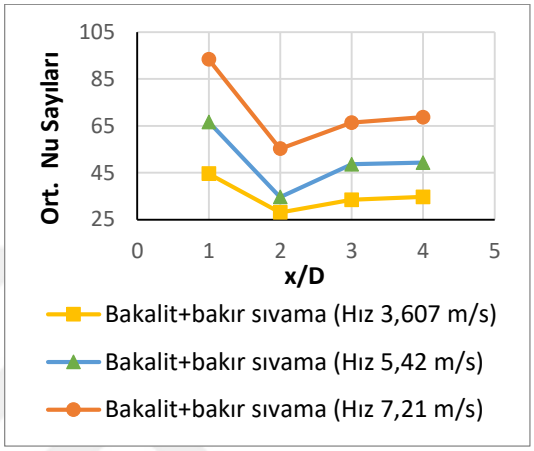
Çizelge 4.65. Re=11993 (7,21 m/s)'de farklı malzeme altına bakır sıvama durumunda yeniden birleşme uzunluklarının karşılaştırılması

Hız (m/s)	Malzeme Cinsi+ Bakır Sıvama	Yeniden Birleşme Uzunluğu 1 (m)	Yeniden Birleşme Uzunluğu 2 (m)
3,607	Bakalit+Bakır sıvama	0,004348	0,020048
	FR-4+Bakır sıvama	0,004106	0,023913
5,42	Bakalit+Bakır sıvama	0,004106	0,019565
	FR-4+Bakır sıvama	0,004099	0,019813
7,21	Bakalit+Bakır sıvama	0,0041	0,022947
	FR-4+Bakır sıvama	0,003623	0,019806

Bakalit altına bakır sıvama için hızın artırılması Şekil 4.633 ve Şekil 4.634'den de görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken, en düşük yerel ve ortalama Nu sayısı ise ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.

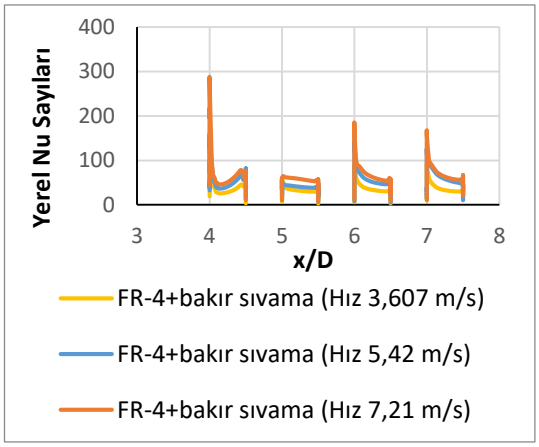


Şekil 4.633. Bakalit altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

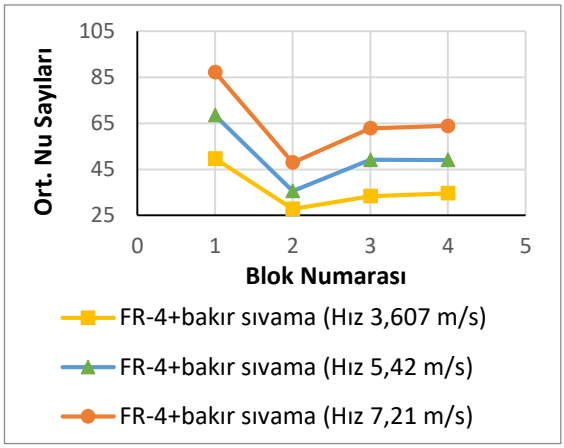


Şekil 4.634. Bakalit altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama için hızın artırılması Şekil 4.635 ve Şekil 4.636'dan da görülebileceği gibi bloklar üzerindeki yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Tüm hızlarda en yüksek yerel Nu sayısı birinci yonga üzerinde elde edilirken, en düşük yerel ve ortalama Nu sayısı ise ikinci yonga üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.635. FR-4 altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki yerel Nu sayıları

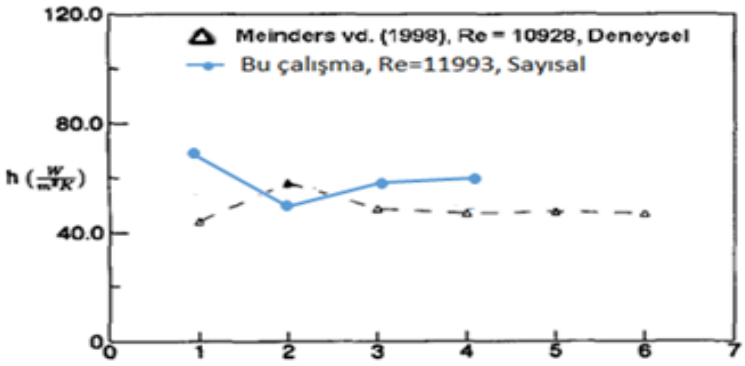


Şekil 4.636. FR-4 altına bakır sıvamanın farklı hızlarda bloklar üzerindeki ort. Nu sayıları

Yapılan 6 adet analiz incelendiğinde en yüksek ısı transferinin Re=11993 (7,21 m/s) de FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama durumunda elde edildiği görülmüştür. Elde edilen en iyi ısı transferi yapılan iki boyutlu analizlerde de aynı durumda elde edilmiştir. Durgam ve diğerleri (2017), yaptığı çalışmalarında bakır kaplama durumunda doğal taşınım miktarının sadece FR-4 veya bakalit kaplamaya göre daha az olduğunu gözlemlemişlerdir.

4.2.5 Deneysel çalışma ile 3 boyutlu baz geometrinin karşılaştırması

Baz geometri için elde edilen blok başına ortalama ısı transfer katsayıları yaklaşık olarak benzer Re sayısı ve benzer geometrik faktörlere sahip Meinders vd. (1998)'nin deneysel sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak Şekil 4.637'de verilmiştir (Bkz. Çizelge 4.66). Bu çalışmada blok başına ortalama ısı transfer katsayısında en yüksek farklılık 1. blokta meydana gelmiş ve yaklaşık %40 yüksek tahmin edilmiştir. Ortalama ısı transfer katsayılarında deneysel çalışmadaki trend 2. yonga hariç yakalanmış olup aradaki farklılık Re sayısındaki, geometrik faktörlerdeki (Bkz. Çizelge 4.66) ve sınır şartlarındaki küçük farklılıklara ve araştırma yapılan kanalın dar olması sebebiyle blokaj etkilerine yorulabilir. Meinders vd. (1998) deneysel çalışmalarında, belirsizlikler göz önüne alınarak yerel ısı taşınım katsayısındaki toplam birikimli (kümülatif) hatanın % 5-10 arasında verilmiş olduğu dikkate alınırsa aradaki farkın daha da düşeceği unutulmamalıdır. Dolayısıyla Şekil 4.637 nitel (kalitatif) olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 4.637. Baz geometri için blok başına ortalama ısı transfer katsayılarının benzer deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Çizelge 4.66. Baz geometri ve deneysel çalışma için geometrik faktörler

	H = 4h , (Bu çalışma)	H=3.33h (Meinders vd.,1998)
Blokaj oranı [h/H]	0,25	0,3
Genişleme oranı [H/(H-h)]	1,33	1,43
Görünüş oranı [l/h]	2	1
Paketleme yoğunluğu [s/l]	1	1

5. SONUÇ

Bloklar arası mesafenin artırılmasıyla iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, farklı hızlarda, blok üzerinde elde edilen maksimum hızda ve yeniden birleşme uzunluklarında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, bloklar arası mesafenin artırılması elde edilen minimum basıncın konumunu değiştirmemiş olup, birinci yonga üzerinde elde edilmiştir, ayrıca aynı bloklar arası mesafede hızın artırılması yerel ve ortalama Nusselt sayısını artırmıştır. Bloklar arası mesafenin ısı transferi üzerine etkileri incelendiğinde iki boyutlu geometri ve üç boyutlu geometride 1,905 cm bloklar arası mesafede en iyi ısı transferi gerçekleştirildiği görülmüştür (Bkz. Çizelge 5.1). Yani bloklar arasındaki mesafeyi artırmak ısı transferini artırmıştır.

Blok boyunun artırılmasıyla iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, farklı hızlarda, blok üzerinde elde edilen maksimum hızda ve yeniden birleşme uzunluklarında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, blok boyunun artırılması elde edilen minimum basıncın konumunu değiştirmemiş olup, birinci yonga üzerinde elde edilmiştir, ayrıca aynı blok boyu mesafesinde hızın artırılması yerel ve ortalama Nusselt sayısını artırmıştır. Blok boyunun ısı transferi üzerine etkileri incelendiğinde iki boyutlu geometri ve üç boyutlu geometride 0,635 cm blok boyu mesafesinde en iyi ısı transferi gerçekleştirildiği görülmüştür (Bkz. Çizelge 5.1). Yani blok boyunu kısaltmak ısı transferini artırmıştır.

Blok yüksekliğinin artırılmasıyla iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, farklı hızlarda, blok üzerinde elde edilen maksimum hızda ve yeniden birleşme uzunluklarında bir artış gözlemlenmiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, blok yüksekliğinin artırılması elde edilen minimum basıncın konumunu değiştirmemiş olup, birinci yonga üzerinde elde edilmiştir, ayrıca aynı blok yüksekliği mesafesinde hızın artırılması yerel ve ortalama Nusselt sayısını artırmıştır. Blok yüksekliğinin ısı transferi üzerine etkileri incelendiğinde iki boyutlu geometri ve üç boyutlu geometride 1,905 cm blok boyu mesafesinde en iyi ısı transferi gerçekleştirildiği görülmüştür (Bkz. Çizelge 5.1). Yani blok yüksekliğini artırmak ısı transferini artırmıştır.

Kanal yüksekliğinin artırılmasıyla iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, farklı hızlarda, blok üzerinde elde edilen maksimum hızda azalma gözlemlenmiştir. İki boyutlu analizlerde yeniden birleşme uzunluklarında kanal yüksekliğinin artmasıyla bir miktar azalma görülürken aynı azalma oranı üç boyutlu analizlerde yakalanmamıştır. İki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, blok yüksekliğinin artırılması elde edilen minimum basıncın konumunu değiştirmemiş olup, birinci yonga üzerinde elde edilmiştir, ayrıca aynı kanal yüksekliğinde hızın artırılması yerel ve ortalama Nusselt sayısını artırmıştır. Kanal yüksekliğinin ısı transferi üzerine etkileri incelendiğinde iki boyutlu geometri ve üç boyutlu geometride 1,27 cm kanal yüksekliğinde en iyi ısı transferi gerçekleştirildiği görülmüştür (Bkz. Çizelge 5.1). Yani kanal yüksekliğini azaltmak ısı transferini artırmıştır.

Türbülans şiddetinin artırılmasıyla iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, farklı hızlarda, blok üzerinde elde edilen maksimum hızda kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. İki ve üç boyutlu analizlerde, yeniden birleşme uzunlukları türbülans şiddetinin artmasıyla hemen hemen aynı kalmaktadır, türbülans şiddetinin artırılması elde edilen minimum basıncın konumunu değiştirmemiş olup, birinci yonga üzerinde elde edilmiştir, ayrıca aynı türbülans şiddetinde hızın artırılması yerel ve ortalama Nusselt sayısını artırmıştır. Türbülans şiddetinin ısı transferi üzerine etkileri incelendiğinde iki boyutlu geometri ve üç boyutlu geometride % 12 giriş türbülans şiddetinde en iyi ısı transferi gerçekleştirildiği görülmüştür (Bkz. Çizelge 5.1). Yani türbülans şiddetini artırmak ısı transferini bir miktar artırmıştır.

İki ve üç boyutlu geometrilerde basınç gradyenin etkileri incelendiğinde yakınsayan geometri hariç tüm geometrilerde 1. bloktan sonra kesit daralmasından sonra hız artmakta ve hız artışı gittikçe azalmaktadır. Iraksayan geometrilerde açının artması yeniden birleşme uzunluğunu artırırken, yakınsayan geometride yeniden birleşme uzunluğu açıyla beraber azaltmıştır. Yakınsayan geometride basınç kanal girişinden itibaren bloklardan sonra çıkışın hemen hemen ortalarında bir miktar artmakta, sonra kanal çıkışına doğru azalmakta ve çıkışta minimum olmaktadır. Iraksayan geometrilerde basınç değişimi kanal çıkışına kadar devam etmektedir. Maksimum kinetik enerji 1. bloğun üstünde oluşmakta olup açı arttıkça 2. bloğun üstüne doğru yayılmaktadır. Tüm aynı açılarda hızın

artırılması yerel ve ortalama Nu sayısını artırmıştır. Iraksayan açılarda açının artırılması Çizelge 5.1'den de görülebileceği gibi ısı transferini azaltmıştır. Yakınsayan açıda, baz geometriye göre ısı transferini artırmıştır. Yani basınç grandyenin etkisi incelendiğinde en iyi ısı transferi $\alpha = -2°$ de elde edilmiştir (Bkz. Çizelge 5.1).

Baskı devre kartı malzemesinin cinsinin etkileri iki ve üç boyutlu geometrilerde incelendiğinde, bakalit ve FR-4 malzeme olması durumunda blok üzerinde elde edilen maksimum hızda ve yeniden birleşme uzunluklarında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, baskı devre kartının malzemesinin farklı olması durumunda elde edilen minimum basıncın konumu değiştirmemiş olup, birinci yonga üzerinde elde edilmiştir, ayrıca aynı malzemede hızın artırılması yerel ve ortalama Nusselt sayısını artırmıştır. Eşlenik etkinin ısı transferi üzerine etkileri incelendiğinde FR-4 malzemesi kullanılması durumunda ısı iletim katsayısı daha düşük olduğu için bakalit malzeme kullanılması durumuna göre taşınımla olan ısı transferinin bir miktar daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. (Bkz. Çizelge 5.1). Baskı devre kartının malzemesinin ısı transferi hesabına katılmasıyla, iletim ile olan ısı transferini devreye soktuğundan dolayı taşınımla olan ısı transferi bir miktar azalmıştır.

Baskı devre kartı üzerine bakır sıvamanın etkileri iki ve üç boyutlu geometrilerde incelendiğinde, her iki durum içinde bloklar üzerinde elde edilen maksimum hızda ve yeniden birleşme uzunluklarında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde, baskı devre kartı üzerine bakır sıvama yapılması elde edilen minimum basıncın konumunu değiştirmemiş olup, birinci yonga üzerinde elde edilmiştir, ayrıca aynı malzeme üzerine bakır sıvama yapıldığında hızın artırılması yerel ve ortalama Nusselt sayısını artırmıştır. Bakır sıvamanın farklı malzemelerde ısı transferi üzerine etkileri incelendiğinde FR-4 malzemesi altına bakır sıvama durumunda bakalit altına bakır sıvama durumuna göre taşınımla olan ısı transferinin bir miktar daha fazla olduğu (Bkz. Çizelge 5.1) gözlenmiştir. Baskı devre kartının üzerine bakır sıvama yapılması iletim ile ısı transferini devreye soktuğundan dolayı ısı transferi bir miktar azalmıştır.

Çizelge 5.1. Tüm çalışmalarda elde edilen ortalama Nusselt sayıları (s: Bloklar arası mesafe, w: Blok boyu, h: Blok yüksekliği, H: Kanal yüksekliği, Tu: Türbülans şiddeti α:Açı)

	Re=6000 (V=3,607 m/s)		**Re=9015 (V=5,42 m/s)**		**Re=11993 (V=7,21 m/s)**	
	Ort. Nusselt Sayısı (2B)	**Ort Nusselt Sayısı (3B)**	**Ort. Nusselt Sayısı (2B)**	**Ort. Nusselt Sayısı (3B)**	**Ort. Nusselt Sayısı (2B)**	**Ort. Nusselt Sayısı (3B)**
s=0,635 cm	38,2	30,35	52,01	38,41	64,6	47,41
s=1,27 cm	43,12	37,6	58,1	52,02	71,4	65
s=1,905 cm	47,02	42,55	63,1	79,6	77,3	90,73
w=0,635 cm	46,65	45,57	62,58	58,14	77,69	72,69
w=1,27 cm	43,12	38,89	58,1	54,09	71,41	62,86
w=1,905 cm	40,37	54,42	54,7	53,4	67,65	62,23
h=0,635 cm	43,125	37,607	58,21	48,08	71,4	60,2
h=1,27 cm	47,39	37,9	64,43	49,77	79,6	61,5
h=1,905 cm	65,71	47,02	90,44	67,72	112,96	73,4
H=1,27 cm	54,63	40,17	74,02	56,93	91,11	64,23
H=1,905 cm	45,33	39,49	61,82	54,12	75,93	63,39
H=2,54 cm	43,12	38,89	58,1	54,09	71,41	62,86
Tu=%1	42,88	42,87	58,01	48,9	71,27	64,51
Tu=%4	43,12	33,22	58,12	55,41	71,41	67,88
Tu=%12	43,99	44,77	59,2	56,29	72,67	71,5
α=-2°	47,6	45,46	64,57	59,58	80,07	71,26
α=2°	39,64	37,82	53,29	51,22	65,62	65,55
α=4°	36,8	35,76	49,8	46,27	61,66	57,68
α=-6°	33,65	35,08	45,53	34,65	56,4	54,49
Bakalit baskı devre kartı	40,4	34,32	54,43	50,95	68,74	63,96
FR-4 baskı devre kartı	41,75	35,1	55,29	51,72	66,91	64,11
Bakalit + Bakır sıvama	38,04	35,18	51,73	49,78	64,25	64,24
FR-4 + Bakır sıvama	39,93	36,37	54,13	50,5	66,79	64,8

Öneriler

- Bu çalışmada bloklar düzenli (eşit) aralıklarda yerleştirilmiş olup bundan sonraki çalışmalar için blokların düzensiz yerleştirildiği problemler incelenebilir.
- Bu çalışmada bloklar kanalın alt yüzeyine yerleştirilmiştir bundan sonraki çalışmalar için bloklar kanalın üst yüzeyine yerleştirilerek problemler incelenebilir.
- Türbülans giriş parametresi olarak sadece türbülans giriş şiddetinin etkileri incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda türbülans uzunluk ölçeğininde ısı transferi üzerine etkileri incelenebilir.
- Devre kartlarının aynı veya benzer olduğu ve düzenli olarak sıralandığı sistemlere ek olarak devre kartlarının düzensiz yerleştirildiği ve basınç gradyeninin oluştuğu elektronik sistemler de olabilir. İleride çalışmanın daha yüksek yakınsama açılarının da denenmesi önerilmektedir. Böylece elektronik sistemlerin daha fazla kullanım geometrileri için farklı hızlarda basınç gradyeninden nasıl etkilenecekleri hakkında da bilgi sahibi olunabilecektir.

Bulunan sonuçların bu tür uygulamalarda soğutma performansının ne şekilde etkileneceği ve ne gibi tedbirler alınması gerektiği ile ilgili yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Adams, V. H., Joshi Y. ve Blackburn, D. L. (1999). Three-dimensiol study of combined conduction, radiation, and natural convection from discrete heat sources in a horizontal narrow aspect ratio enclosure. *Journal of Heat Transfer*, *121*(4), 992-1001.

Amghar, K., Filali, A., Louhibi, M. A., Bouali, H., Salhi, N. ve Salhi, M. (2021). Numerical study of turbulent heat transfer in a horizontal channel provided with square blocks: Effect of the inter blocks spacing. *Journal of Thermal Engineering*, *7*(3), 650-665.

ANSYS Fluent Release. 13.0, Erişim linki: Chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture07-heat-transfer.pdf. Erişim Tarihi: 10.08.2022

ANSYS Fluent Theory Guide. 15.0 Realese.

Anwar-ul-Haque, F. A., Yamada, S. ve Chaudhry, S. R. (2007). Assessment of turbulence models for turbulent flow over backward facing step. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* 2, 2-7.

Armaly, B. F., Li, A. ve Nie, J. H. (2001). Three-dimensional forced convection flow adjacent to backward-facing step. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, *16*, 222-227.

Ateş, M. (2015). Geri basamak akışlarında dış türbülansın ve basınç gradyeninin ısı transferi üzerine etkileri. *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Bursa.*

Aung, W. (1983). An interferometric investigation of separated forced convection in laminar flow past cavities. *Journal of Heat Transfer of the ASME*, *105*, 505-512.

Aylı, E., Bayer, O. ve Aradağ, S. (2016). Experimental investigation and CFD analysis of rectangular profile fins in a square channel for forced convection regimes. *International Journal of Thermal Sciences*, *109*, 279-290.

Bar-Cohen, A., Watwe, A. A. ve Prasher, R. S. (2007). *Heat transfer in electronic equipment*. A. Bejan ve A. D. Kraus, A. D. (Ed.), Heat transfer handbook (s. 947-1028) içinde, New Jersey: Wiley.

Barton, I. E. (1997). The entrance effect of laminer flow over a backward-facing step geometry. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 25, 633-644.

Bayraktar, S. (2021). Numerical investigation of flow over obstacles on a backward-facing step. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *36*, 1145-1158.

Bilen, K. ve Yapıcı, S. (2001). Heat transfer form a surface fitted with rectangular blocks at different orientation angle. *Heat and Mass Transfer*, *38*(7), 649-655.

Bouttout, A., Benissaad, S. ve Bessaïh, R. (2014). Numerical study of forced convection in a horizontal channel with heated blocks due to oscillation of incoming flow. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, *65*(6), 584-600.

Changcharoen, W. ve Eiamsa-ard, S. (2011). Numerical investigation of turbulent heat transfer in channels with detached rib-arrays. *Heat Transfer Asian Research*, *40*(5), 431-447.

Chatterjee, D. ve Mondal, B. (2012). Forced convection heat transfer from tandem square cylinders for various spacing ratios. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, *61*(5), 381-400, DOI: 10.1080/10407782.2012.647985

Chen, Y. M. ve Wang, K. C. (1998). Experimental study on the forced convective flow in a channel with heated blocks in tandem. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *16*(4), 286-298.

Chen, S., Liu, Y., Chan, S. F., Leung, C. W. ve Chan, T. L. (2001). Experimental study of optimum spacing problem in the cooling of simulated electronic package. *Heat and Mass Transfer*, *37*(2), 251-257.

Choi, C. Y. ve Ortega, A. (1993). Mixed convection in an inclined channel with a discrete heat source. *International journal of heat and mass transfer*, *36*(12), 3119-3134.

Chung, B. T. F. ve Li, H. H. (1995). Forced convective cooling enhancement through a double layer design. *Journal of Electronic Packaging*, *117*(1), 69-74.

Cole, K. D. (2008). Flush-mounted steady-periodic heated film with application to shear-stress measurement. *Journal of heat transfer*, *130*(11).

Cukurel, B. ve Arts, T. (2013). Local heat transfer dependency on thermal boundary condition in ribbed cooling channel geometries. *Journal of Heat Transfer*, *135*(10).

Çelik, G. (2019). *Elektronik Cihazlarda Termoelektrik Soğutucu ve Isı Borusu Soğutma Performansının Sayısal Olarak İncelenmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çengel, Y. A. (2010). *Heat transfer-a practical approach*. New York: McGraw-Hill.

Çengel, Y. A. ve Cimbala, J. M. (2006). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications.* New York: McGraw-Hill.

Davalath, J. ve Bayazıtoğlu, Y. (1987). Forced convection cooling across rectangular blocks. *Journal of Heat Transfer*, *109*, 321-328.

Defraeye, T., Blocken, B., ve Carmeliet, J. (2010). CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *53*(1), 297-308.

Demircan, T. (2012). *İçerisinde Isıtıcı Bloklar Bulunan Bir Kanalda, Osilasyonlu Akışın ve Isı Transferinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Demircan, T. ve Özdemir, E. (2019). Askerî sistemlerin yüksek sıcaklıklara çıkan devre elemanlarının etkin olarak soğutulması. *Savunma Bilimleri Dergisi*, *18*(1), 27-54.

Dhingra, R. ve Ghoshdastidar, P. S. (2016). A numerical study of the effect of thermal radiation on the forced air cooling of low heat flux electronic chips mounted on one side of a vertical channel. In *15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 1107-1116.

Driver, D. M. ve Seegmiller, H. L. (1985). Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channelflow. *AIAA journal*, *23*(2), 163-171.

Dur, F. N. (2007). *Çok Katmanlı Elektronik Elemanlarda Isı İletiminin Sayısal Olarak İncelenmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Durgam, S., Venkateshan, S. P. ve Sundararajan, T. (2017). Experimental and numerical investigations on optimal distribution of heat source array under natural and forced convection in a horizontal channel. *International Journal of Thermal Sciences*, *115*, 125-138.

Eaton, J. K. ve Johnston, J. P. (1981). A review of research on subsonic turbulent flow reattachment. *AIAA Journal*, *19*(9), 1093-1100.

Elsaadawy, E., Mortazavi, H. ve Hamed, M. S. (2008). Turbulence modeling of forced convection heat transfer in two-dimensional ribbed channels. *Journal of Electronic Packaging, 130*(3), 1-17.

Etemoğlu, A. B., İşman, M. K., Pulat, E. ve Can, M. (2004). Tek yongalı elektronik cihazların laminer ve türbülanslı akışta soğutulmalarının analizi. *Mühendis ve Makina, 45*(535), 18-28.

Fletcher, C. A. J. (1998). *Computational Techniques for Fluid Dynamics I: Fundamental and General Techniques.* Berlin: Springer.

Gavara, M. (2012). Natural convection in a vertical channel with arrays of flush-mounted heaters on opposite conductive walls. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 62*(2), 111-135.

Gupta, S. K., Rawat, M. K. ve Kukreja, N. (2019). Analysis of heat transfer enhancement of electronic chip using CFD. *International Journal of Scientific & Technology Research, 8*(12), 1017-1020.

Güldemir, G. (2015). *Üst Yüzeyinde Engeller Bulunan ve Alt Kısmı Ondüleli Bir Kanalda Akışın ve Isı Transferinin Sayısal Olarak İncelenmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Güngör, M. A. (2020). *Çok Yongalı ve Değişken Kesitli Elektronik Sistemlerin Isıl Analizi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Gürses, D. ve Pulat, E. (2021). Türbülanslı akışta yüzeye monte edilmiş blok gibi elektronik yongalardan olan ısı transferi üzerine basınç gradyeni etkilerinin hesaplamalı olarak araştırılması. *23. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi,* Gaziantep-Türkiye.

He, J., Liu, L. ve Jacobi, A. M. (2011). Conjugate thermal analysis of air-cooled discrete flush-mounted heat sources in a horizontal channel. *Journal of Electronic Packaging, 133.*

Iaccarino, G., Ooi, A., Durbin, P. A. ve Behnia, M. (2002). Conjugate heat transfer predictions in two-dimensional ribbed passages. *International Journal of Heat and Fluid Flow, 23*(3), 340-345.

Isomoto, K. ve Honami, S. (1989). The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment process over a backward-facing step. *Journal Of Fluids Engineering, 111,* 87-92.

İlday, Ö. ve Atlı, V. (2006). Geri basamak akışının deneysel incelenmesi. *itüdergisi/d mühendislik, 5*(6), 27-38.

İşman, M. K. (2005). *Elektronik Cihazlarının Soğutulmasının Bilgisayar Destekli Analizi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Jaramillo, J. E., Pérez-Segarra, C. D., Oliva, A. ve Claramunt, K. (2007). Analysis of different RANS models applied to turbulent forced convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 50*(19-20), 3749-3766.

John, B., Senthilkumar, P. ve Sadasivan, S. (2019). Applied and theoretical aspects of conjugate heat transfer analysis: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering, 26*(2), 475-489.

Karabulut, K. ve Alnak, D. E. (2020). Değişik şekilde tasarlanan ısıtılmış yüzeylerin hava jeti çarpmalı soğutulmasının araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26*(1), 88-98.

Kılıç, M. ve Başkaya, Ş. (2017). Farklı geometride akış yönlendiriciler ve çarpan jet kullanarak yüksek ısı akılı bir yüzeyden olan ısı transferinin iyileştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32*(3), 693-707.

Korichi, A. ve Oufer, L. (2007). Heat transfer enhancement in oscillatory flow in channel with periodically upper and lower walls mounted obstacles. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *28*(5), 1003-1012.

Launder, B. E. ve Spalding, D. B. (1972). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence.* New York: Academic Press.

Leung, C. W., Chen, S. ve Chan, T. L. (2000). Numerical simulation of laminar forced convection in an air-cooled horizontal printed circuit board assembly. *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, *37*(4), 373-393.

Mathews, R. N. ve Balaji, C. (2006). Numerical simulation of conjugate, turbulent mixed convection heat transfer in a vertical channel with discrete heat sources. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *33*(7), 908-916.

Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, *32*(8), 1598-1605.

Meinders, E. R. ve Hanjalić, K. (1999). Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *20*(3), 255-267.

Meinders, E. R., Van Der Meer, T. H. ve Hanjalic, K. (1998). Local convective heat transfer from an array of wall-mounted cubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *41*(2), 335-346.

Meinders, E. R., Van der Meer, T. H., Hanjalić, K. ve Lasance, C. J. M. (1997). Application of infrared thermography to the evaluation of local convective heat transfer on arrays of cubical protrusions. *International journal of heat and fluid flow*, *18*(1), 152-159.

Mohamed, M. M. (2006). Air cooling characteristics of a uniform square modules array for electronic device heat sink. *Applied Thermal Engineering*, *26*(5-6), 486-493.

Moussaoui, M. A., Jami, M., Mezrhab, A. ve Naji, H. (2009). Lattice Boltzmann simulation of convective heat transfer from heated blocks in a horizontal channel. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, *56*(5), 422-443.

Naik, S., Probert, S. D. ve Bryden, I. G. (1999). Heat transfer characteristics of shrouded longitudinal ribs in turbulent forced convection. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *20*(4), 374-384.

Nakayama, W. ve Park, S. H. (1996). Conjugate heat transfer from a single surface-mounted block to forced convective air flow in a channel. *Journal of Heat Transfer*, *118*(2), 301-309.

Nie, J. H. ve Armaly, B. F. (2002). Three-dimensional convective flow adjacent to backward-facing step-effects of step height. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *45*(12), 2431-2438.

Park, T. H., Choi, H. G., Yoo, J. Y. ve Kim, S. J. (2003). Streamline upwind numerical simulation of two-dimensional confined impinging slot jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *46*(2), 251-262.

Pırasacı, T. ve Sivrioğlu M. (2012). Çıkıntılı ayrık ısıtıcılar üzerindeki laminar konveksiyon ile ısı transferinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *27*(4), 765-773.

Poulikakos, D. ve Wietrzak, A. (1994). *Cooling of microelectronic sensor by turbulent forced convection*. S. Kakaç, H. Yüncü ve K. Hijikata (Ed.), Cooling of electronic systems (s. 203-224) içinde. Dordrecht: Springer.

Pulat, E. (1997). *Mikroelektronik Devre Elemanlarının Zorlanmış Taşınımla Soğutulmasının Simülasyonu* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Pulat, E. (2000). Yüzeyle aynı hizada monte edilmiş ayrık ısı kaynakları üzerinden olan akışta eşlenik ısı transferinin hesaplamalı olarak araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, *2*(1), 175-182.

Pulat, E., İşman, M. K., Etemoğlu, A. B. ve Can, M. (2011). Effect of turbulence models and near-wall modeling approaches on numerical results in impingement heat transfer. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, *60*(6), 486-519.

Pulat, E., Öge A. İ. ve Karagöz İ. (2000). Yüzeye monte edilmiş blok üzerinden olan akışın ve sıcaklık dağılımının 3 boyutlu simülasyonu. 12. Ulusal Isı Bilimi Kongresi Sakarya.

Ramadhyani, S., Moffatt, D. F. ve Incropera, F. P. (1985). Conjugate heat transfer from small isothermal heat sources embedded in a large substrate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *28*(10), 1945-1952.

Ratnam, G. S. ve Vengadesan, S. (2008). Performance of two equation turbulence models for prediction of flow and heat transfer over a wall mounted cube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *51*(11-12), 2834-2846.

Sarper, B. (2018). *Hava ile Elektronik Soğutmada Optimum Geometri ve İşletme Parametrelerinin Araştırılması* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Sarper, B., Sağlam, M., Aydın, O. ve Avcı, M. (2017). Natural convection heat transfer from discretely heated vertical channel: effect of the surface radiation. *Proceedings of the 2nd World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer,* Barcelona, Spain.

Shaeri, M. R., Yaghoubi, M. ve Jafarpur, K. (2009). Heat transfer analysis of lateral perforated fin heat sinks. *Applied Energy*, *86*(10), 2019-2029.

Sherry, M. J., Jacono, D. L., Sheridan, J. (2009). Flow separation characterisation of a forward facing step ımmersed in a turbulent boundary layer. *Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, 22-24.

Sözbir, N., Sözbir, M., Ekmekçi, İ., Saraç, H. İ. ve Çallı, İ. (1997). Elektronik sistemlerin ısı taşınımı ile soğutulması. *11. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiriler Kitabı*, Edirne, 546-555.

Sugavanam, R., Ortega, A. ve Choi, C. Y. (1995). A numerical investigation of conjugate heat transfer from a flush heat source on a conductive board in laminar channel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *38*(16), 2969-2984.

Şahin, B. (2009). Sınır şartlarının kapalı ortamlardaki doğal taşınımla ısı transferi ve sıcaklık dağılımına etkisinin sayısal analizi. *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir.

Tan, F., Canbolat, A. F., Türkan B. ve Yüce B. E. (2015). Elektronik cihazların soğutulmasının farklı türbülans modelleri ve duvar yaklaşımları ile CFD simülasyonu, *TESKON Bildiri Kitabı,* İzmir, 655-674.

Tropea, C. D. ve Gackstatter, R. (1985 The flow over two-dimensional surface-mounted obstacles at low Reynolds numbers. *Journal of Fluids Engineering*, *107,* 489-494.

Tsay, Y. L. ve Cheng, J. C. (2008). Analysis of convective heat transfer characteristics for a channel containing short multi-boards mounted with heat generating blocks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *51*(1-2), 145-154.

Tsay, Y. L., Cheng, J. C. ve Chang, T. S. (2003). Enhancement of heat transfer from surface-mounted block heat sourcesin a duct with baffles. *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, *43*(8), 827-841.

Türkoğlu, H. ve Yücel, N. (1995). Mixed convection in vertical channels with a discrete heat source. *Heat and Mass Transfer*, *30*(3), 159-166.

Umur, H., Yemenici, O., Umur, Y. ve Sakin, A. (2017). Flow and heat transfer characteristics over rectangular blocked surfaces. *Experimental Heat Transfer*, *30*(3), 192-204.

Versteeg, H. K. ve Malalasekera, W. (1995), *An Introduction to Computational Fluid Dynamics.* New York: Longman.

Vogel, J.C. ve Eaton, J.K. (1985). Combined heat transfer and fluid dynamic measurements downstream of a backward-facing step. *Journal of Heat Transfer, 107*, 922-929.

Wang, H., Chen, Z. ve Gao, J. (2016). Influence of geometric parameters on flow and heat transfer performance of micro-channel heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, *107*, 870-879.

Wang, S. J. ve Mujumdar, A. S. (2005). A comparative study of five low Reynolds number k–ε models for impingement heat transfer. *Applied Thermal Engineering, 25*(1), 31-44.

Wilcox, D. C. (1998) *Turbulence Modeling for CFD*. California: DCW Industries.

Wu, H. W., Wang, S. W. ve Perng, S. W. (1998). The effective installation of an inclined plate for the enhancement of forced convection over rectangular sources. *Heat and Mass Transfer*, *33*(5), 431-438.

Xu, G. P., Tou, K. W. ve Tso, C. P. (1998). Numerical modelling of turbulent heat transfer from discrete heat sources in a liquid-cooled channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *41*(10), 1157-1166.

Yemenici, O. (2010). *Bloklu Yüzeylerde Akış ve Isı Transferi Karakteristiklerinin İncelenmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

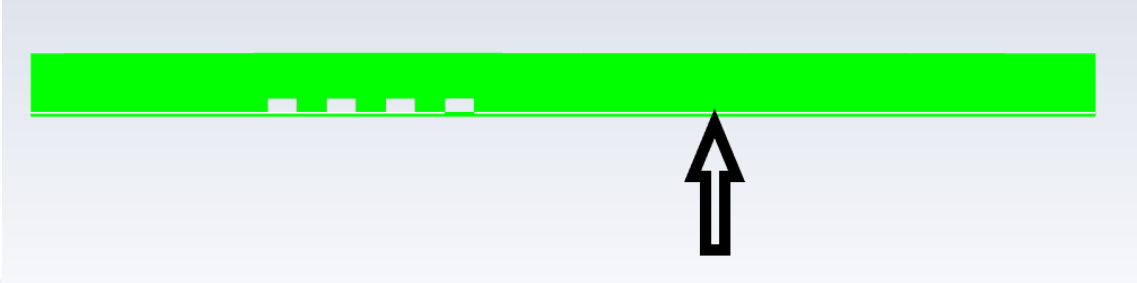
Young, T. J. ve Vafai, K. (1998). Convective flow and heat transfer in a channel containing multiple heated obstacles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *41*(21), 3279-3298.

Yücel, C., Hasnaoui, M., Robillard, L. ve Bilgen, E. (1993). Mixed convection heat transfer in open ended inclined channels with discrete isothermal heating. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 24*(1), 109-126.

EKLER

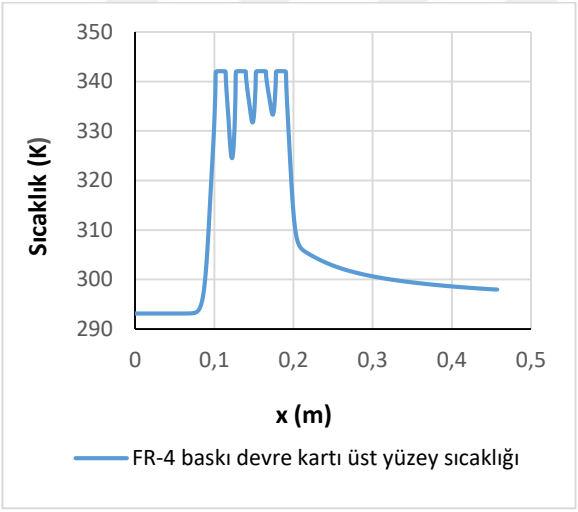
EK1 2B Eşlenik Isı Transferinde Sıcaklık Dağılımlarının Gösterilmesi

Baskı devre kartının hemen üstündeki sıcaklık dağılımları;

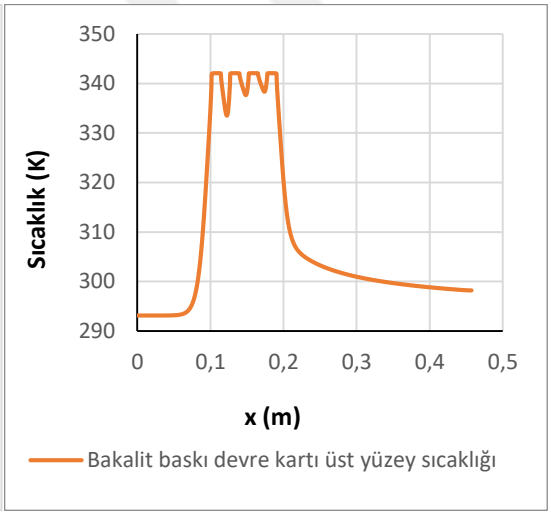


Ek Şekil 4.1. Baskı devre kartı ve bakır sıvama yapılması durumunda baskı devre kartı üzerinde çizilen sıcaklık değerlerinin konumunun gösterimi

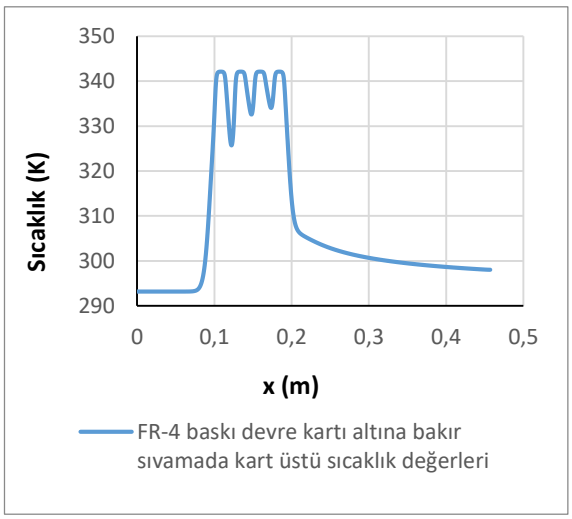
Re = 6000 (Hız =3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;



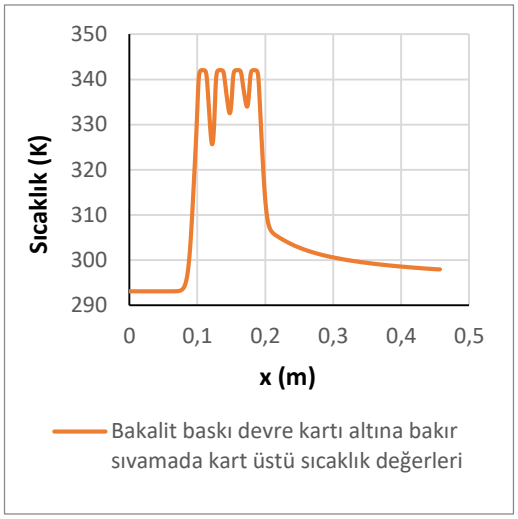
Ek Şekil 4.2. FR-4 baskı devre kartı üst yüzey sıcaklığı



Ek Şekil 4.3. Bakalit baskı devre kartı üst yüzey sıcaklığı

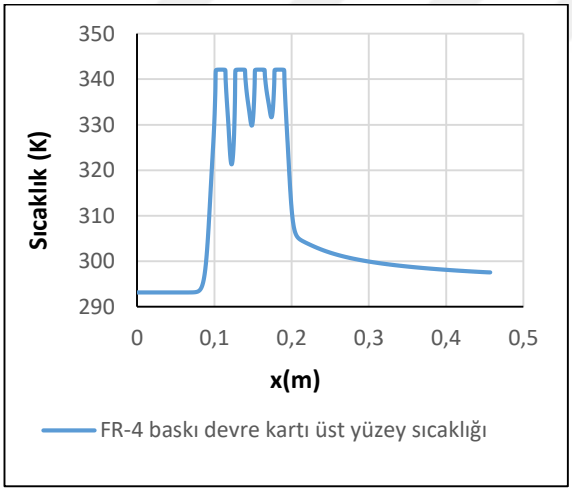


Ek Şekil 4.4. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvamada kart üstü yüzey sıcaklık değerleri

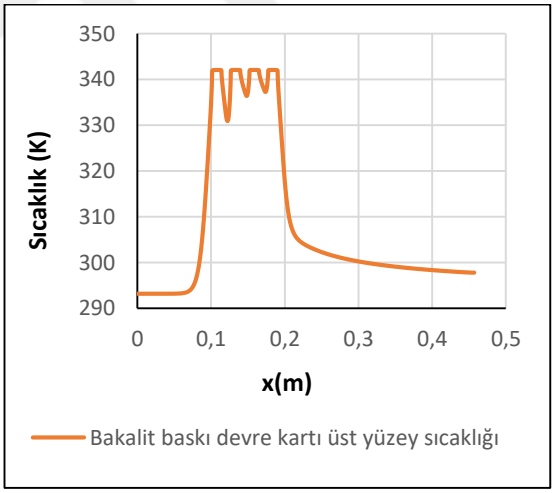


Ek Şekil 4.5. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvamada kart üstü yüzey sıcaklık değerleri

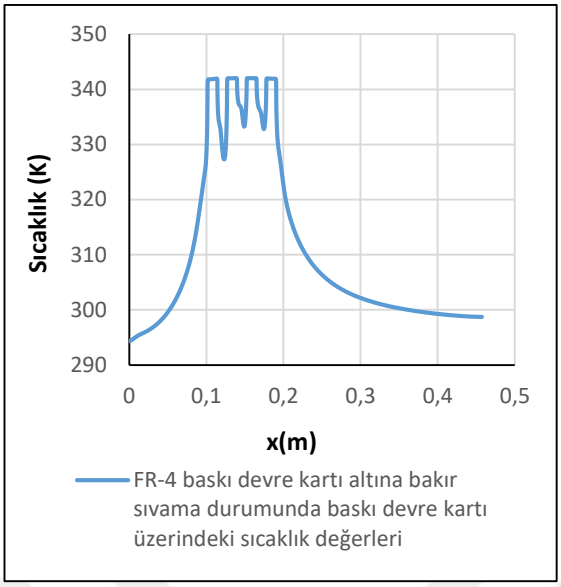
Re = 9015 (Hız =5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;



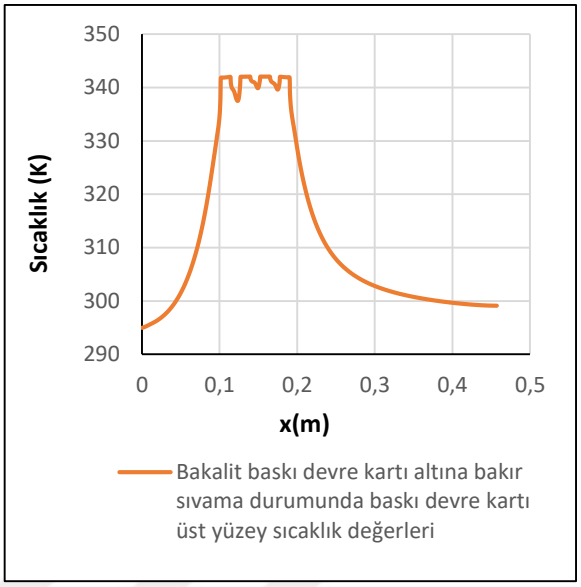
Ek Şekil 4.6. FR-4 baskı devre kartı üst yüzey sıcaklığı



Ek Şekil 4.7. Bakalit baskı devre kartı üst yüzey sıcaklığı

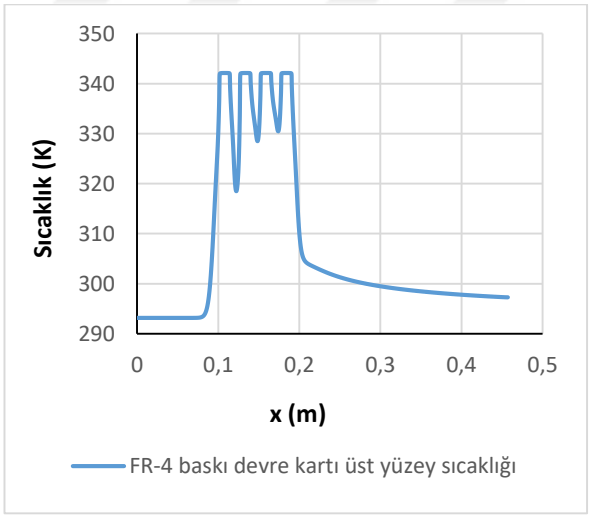


Ek Şekil 4.8. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvamada baskı devre kartı üzerindeki sıcaklık değerleri

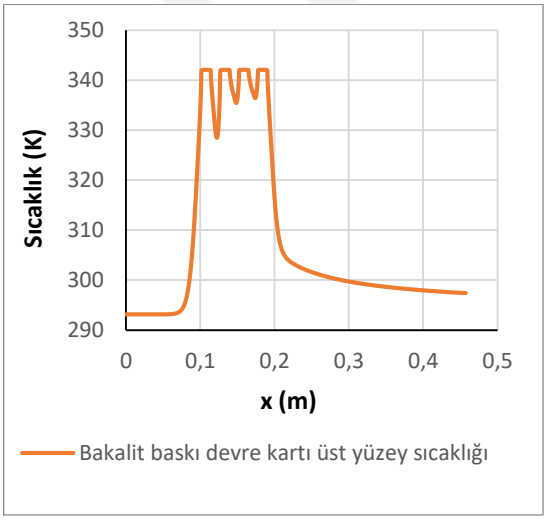


Ek Şekil 4.9. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvamada baskı devre kartı üzerindeki sıcaklık değerleri

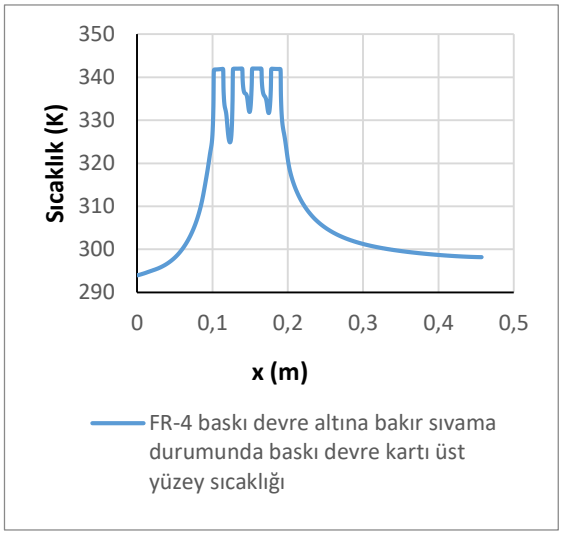
Re = 11993 (Hız =7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;



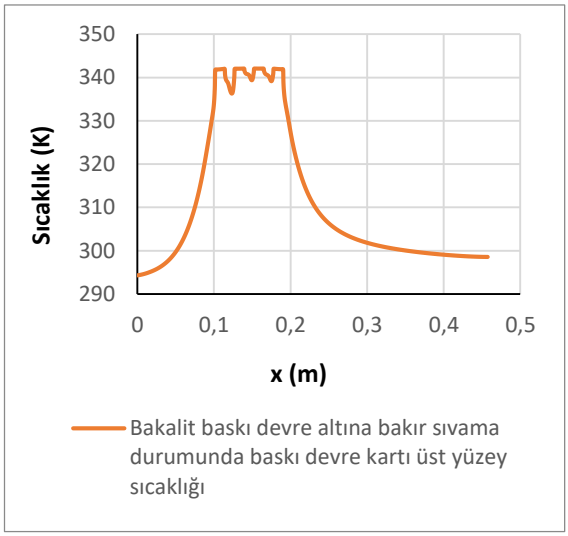
Ek Şekil 4.10. FR-4 baskı devre kartı üst yüzey sıcaklığı



Ek Şekil 4.11. Bakalit baskı devre kartı üst yüzey sıcaklığı

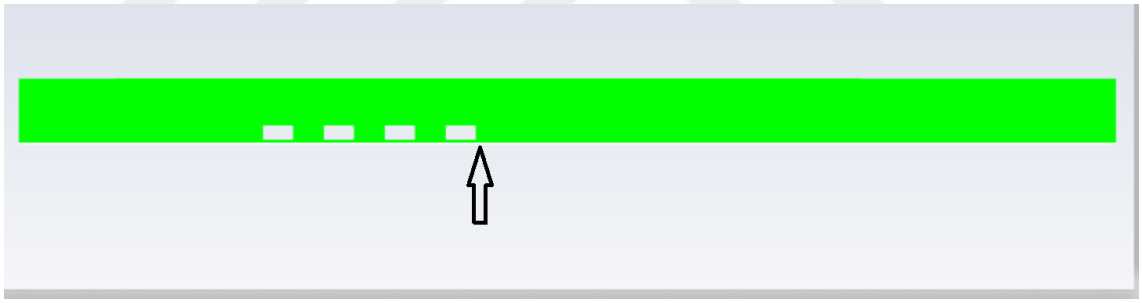


Ek Şekil 4.12. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvamada baskı devre kartı üst yüzey sıcaklık değerleri



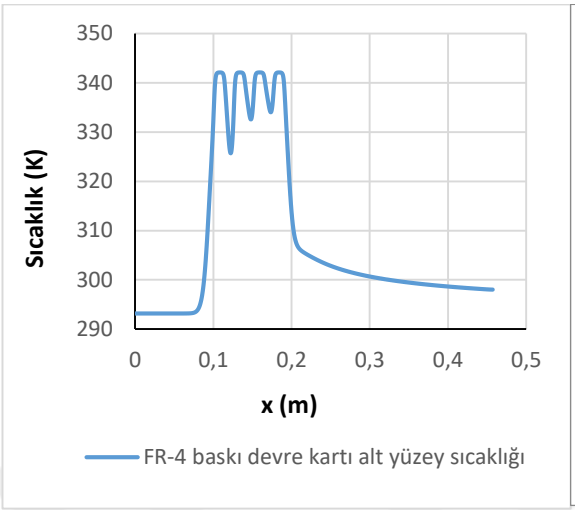
Ek Şekil 4.13. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvamada baskı devre kartı üst yüzey sıcaklık değerleri

Baskı devre kartının ve bakır sıvamanın hemen altındaki sıcaklık dağılımları;

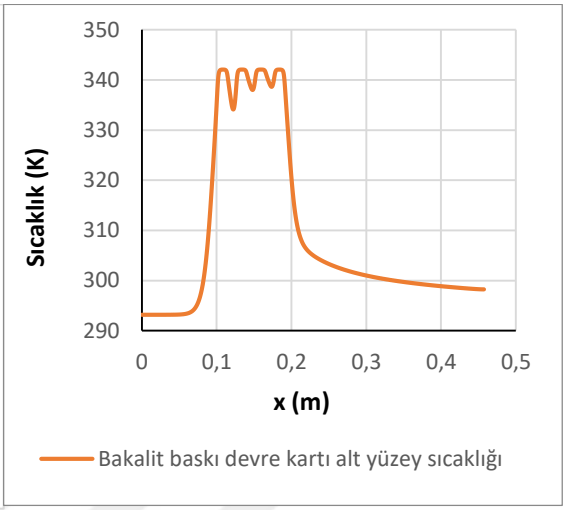


Ek Şekil 4.14. Baskı devre kartı ve bakır sıvama yapılması durumunda baskı devre kartı altında ve bakır sıvama altında çizilen sıcaklık değerlerinin konumunun gösterimi

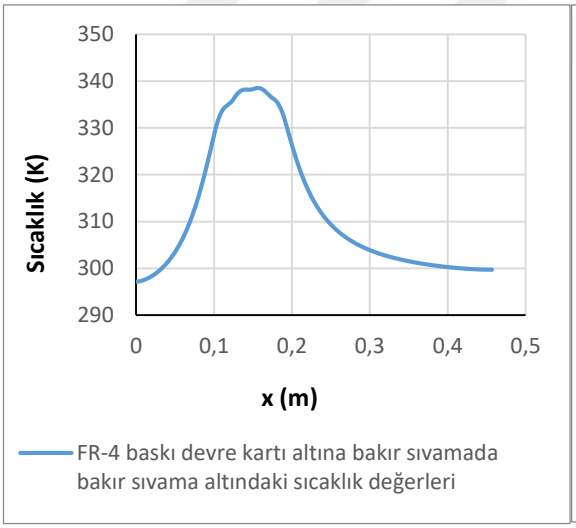
Re = 6000 (Hız =3,607 m/s) için yapılan çalışmalar;



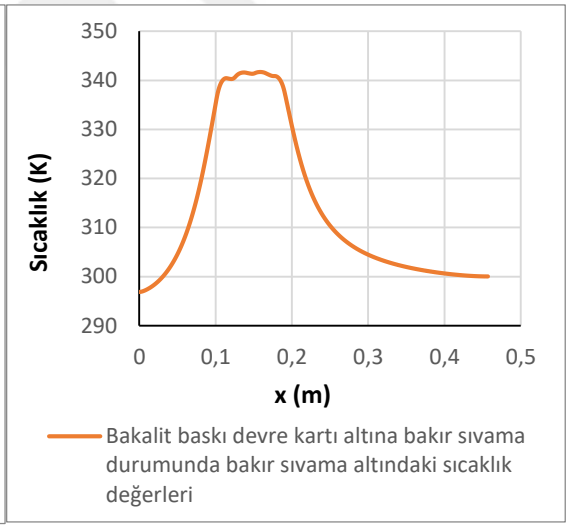
Ek Şekil 4.15. FR-4 baskı devre kartı alt yüzey sıcaklığı



Ek Şekil 4.16. Bakalit baskı devre kartı alt yüzey sıcaklığı

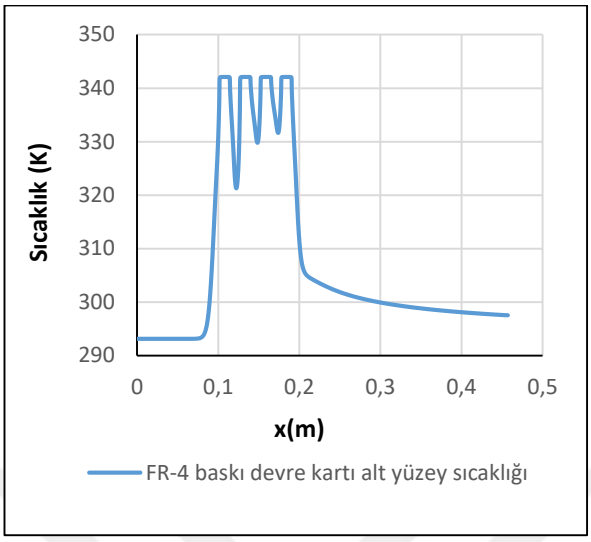


Ek Şekil 4.17. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama durumunda bakır sıvama altındaki sıcaklık değerleri

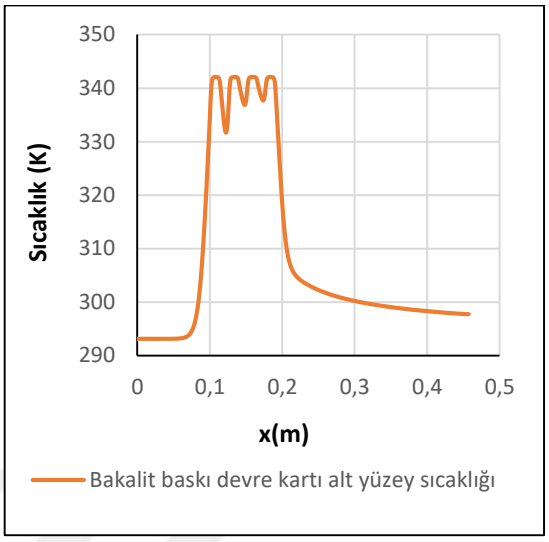


Ek Şekil 4.18. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama durumunda bakır sıvama altındaki sıcaklık değerleri

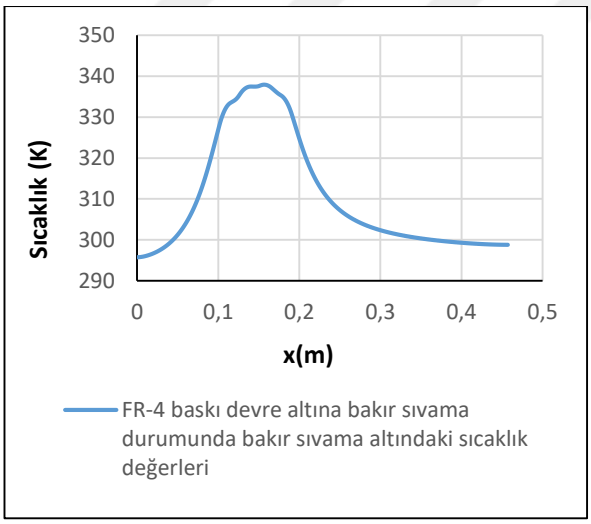
Re = 9015 (Hız =5,42 m/s) için yapılan çalışmalar;



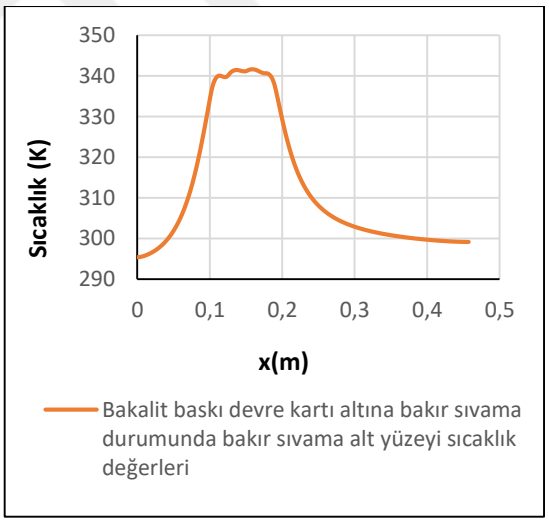
Ek Şekil 4.19. FR-4 baskı devre kartı alt yüzey sıcaklığı



Ek Şekil 4.20. Bakalit baskı devre kartı alt yüzey sıcaklığı

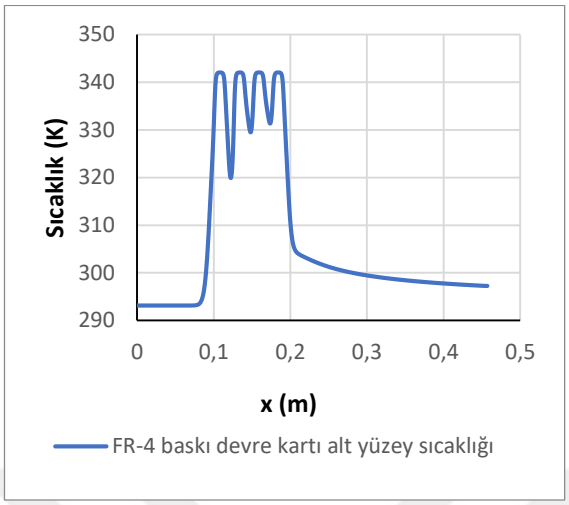


Ek Şekil 4.21. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama durumunda bakır sıvama altındaki sıcaklık değerleri

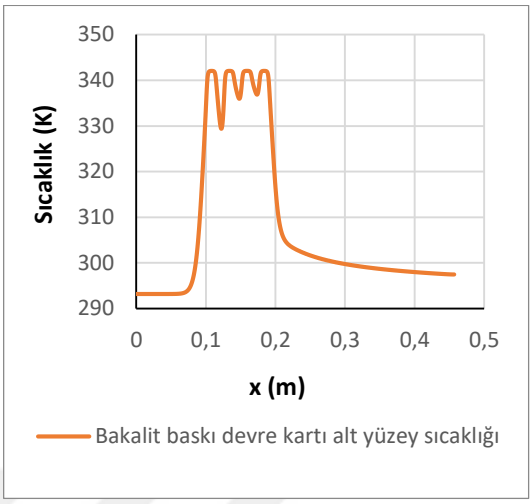


Ek Şekil 4.22. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama durumunda bakır sıvama altındaki sıcaklık değerleri

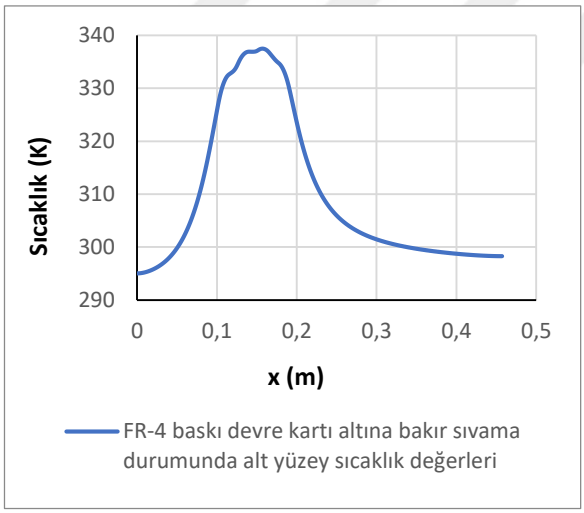
Re = 11993 (Hız =7,21 m/s) için yapılan çalışmalar;



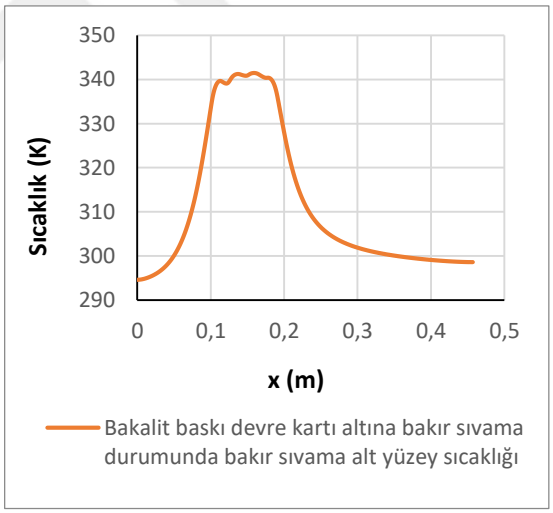
Ek Şekil 4.23. FR-4 baskı devre kartı alt yüzey sıcaklığı



Ek Şekil 4.24. Bakalit baskı devre kartı alt yüzey sıcaklığı



Ek Şekil 4.25. FR-4 baskı devre kartı altına bakır sıvama durumunda bakır sıvama altındaki sıcaklık değerleri



Ek Şekil 4.26. Bakalit baskı devre kartı altına bakır sıvama durumunda bakır sıvama altındaki sıcaklık değerleri