GERİ BASAMAK GEOMETRİSİNDE AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN FARKLI DENEY TASARIMI YÖNTEMLERİ İLE ARAŞTIRILMASI

Murat ATEŞ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERİ BASAMAK GEOMETRİSİNDE AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN FARKLI DENEY TASARIMI YÖNTEMLERİ İLE ARAŞTIRILMASI

Murat ATEŞ
0000-0003-1065-2419

Prof. Dr. Erhan PULAT
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

GERİ BASAMAK GEOMETRİSİNDE AKIŞ VE ISI TRANSFER KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN FARKLI DENEY TASARIMI YÖNTEMLERİ İLE ARAŞTIRILMASI

Murat ATEŞ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erhan PULAT

Bu çalışmada, geri basamak geometrisinde gerçekleşen akışlarda akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerine etki eden parametrelerin etkileri ve birbirleri ile olan etkileşimleri farklı deney tasarımı yöntemleri ile araştırılmıştır. Literatürde yer alan deneysel bir çalışmanın sayısal olarak modellemesi yapılmış, iki boyutlu, sıkıştırılamaz ve türbülanslı akış kullanılarak bu deneysel çalışmanın sonuçlarına sayısal yöntemlerle ulaşılmıştır. Ardından bu deneysel çalışmanın geometrik boyutlarında modifikasyonlar yapılarak farklı genişleme oranları, basınç gradyenleri ve türbülans seviyeleri altında geri basamak akışının akış ve ısı transferi davranışları incelenmiştir. ANSYS Fluent Student 2020 R1 programdaki farklı algoritmalar ve türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda yeniden birleşme bölgesinin genişleme oranı ve basınç gradyeni arttıkça büyüdüğü; ısı transferinin ise basınç gradyeninin artmasına bağlı olarak arttığı, fakat genişleme oranının artmasına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. MINITAB 20 istatistik programı kullanılarak gerçekleştirilen deney tasarımı çalışmalarında da genişleme oranının diğer parametrelere göre ısı ve akış karakteristikleri üzerinde yüzdesel olarak daha yüksek etkiye sahip olduğunu görülmüştür. Ayrıca akışa etki eden parametrelerin akış ve ısı transferi karakteristiklerinin maksimizasyonu için optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geri basamak akışı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, türbülanslı akışlar, deney tasarımı

2023, xxi + 269 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF EFFECTS OF PARAMETERS ON FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN BACKWARD FACING STEP GEOMETRY WITH DIFFERENT DESIGN OF EXPERIMENT METHODS

Murat ATEŞ

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

Supervisor: Prof. Erhan PULAT

In this study, the effects of the parameters affecting the flow and heat transfer characteristics of the flow in the back step geometry and their interactions with each other were investigated with different experimental design methods. An experimental study in the literature has been modeled numerically, and the results of this experimental study have been reached by numerical methods using two-dimensional, incompressible and turbulent flow. Then, the flow and heat transfer behaviors of the backward facing flow under different expansion rates, pressure gradients and turbulence levels were investigated by making modifications to the geometric dimensions of this experimental study. Numerical studies using different algorithms and turbulence models in the ANSYS Fluent Student 2020 R1 program showed that the reattachment zone grew as the expansion rate and pressure gradient increased; on the other hand, it was observed that the heat transfer increased due to the increase of the pressure gradient, but decreased due to the increase in the expansion rate. In the experimental design studies carried out using the MINITAB 20 statistical program, it was observed that the expansion ratio had a higher percentage effect on the heat and flow characteristics than the other parameters. In addition, optimization was carried out to maximize the flow and heat transfer characteristics of the parameters affecting the flow.

Key Words: Backward face step flow, computational fluid dynamics, turbulent flows, design of experiment

2023, xxi + 269 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu doktora tezi çalışmaları kapsamında danışman hocam Prof. Dr. Erhan PULAT'a vizyoner yönlendirmeleri ve esirgemediği desteğinden dolayı öncelikle teşekkür ederim. Ayrıca iyi bir eğitim almam için sahip oldukları tüm imkânları seferber eden annem Fatma ATEŞ ve babam Selim ATEŞ'e; üniversite eğitimim boyunca hiçbir koşulda desteğini esirgemeyen ağabeyim Mehmet ATEŞ ve eşi Betül ATEŞ'e; doktora tezimin yazım sürecinde her zaman yanımda olan değerli eşim Av. Tülin ATEŞ'e ve motivasyon kaynağım olan kızlarım Nilüfer ATEŞ ve Aslıhan Nil ATEŞ'e çok teşekkür ederim.

Murat ATEŞ
28/02/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET ……	i
ABSTRACT ……...	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ……..	iii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ ……...	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ ……	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ ……..	xx
1. GİRİŞ ……	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI……..……..	5
2.1. Geri Basamak Akışları ……..……..……	5
2.2. Deney Tasarımı ……..……..……..	6
2.3. Kaynak Özetleri ……..……..……..	9
2.3.1. Geri Basamak Akışları İle İlgili Yapılan Çalışmalar ……...	9
2.3.2. Deney Tasarımı İle İlgili Yapılan Çalışmalar …….	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM..……...	22
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ……..	22
3.1.1. Korunum Denklemleri ve Türbülans Modelleri ……..	23
3.1.2. Duvar Fonksiyonları …….....	27
3.1.3. Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği Çalışmaları İçin Sayısal Yöntem ….	31
3.2. Deney Tasarımı ……..……..……...	43
3.2.1. İstatistiki Tanımlar ……..……..……	43
3.2.2. Faktöriyel Tasarım ……..……...……	46
3.2.3. Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ……..……..….	52
3.2.4. Taguchi Metodu ……..……...……	54
3.2.5. Deney Tasarımı Çalışmaları İçin Sayısal Yöntem ……..	63
4. BULGULAR ……..……..……	66
4.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Uygulamaları ……...	66
4.1.1. Deneysel Çalışmanın Doğrulanması ……..	66
4.1.2. Modifiye Edilmiş Çalışmaların Değerlendirilmesi …….	89
4.1.3. Modifiye Edilmiş Çalışmaların Karşılaştırılması ……...	179
4.2. Deney Tasarımı Uygulamaları ……..……..	210
4.2.1. Yanıt Yüzey Yöntemi Uygulaması ……..……...	210
4.2.2. Taguchi Metodu Uygulamaları ……..…….	228
5. TARTIŞMA VE SONUÇ ……..……...	239
KAYNAKLAR ……..……..……..	227
EKLER ……..……..……...	256
EK 1. -2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Akış Diagramı	257
EK 2. 0 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Akış Diagramı	258
EK 3. 2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Akış Diagramı	259
EK 4. 1,1 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Göre Akış Diagramı ……..……..……	260
EK 5. 1,25 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Göre Akış Diagramı ……..……..……	261

EK 6. 1,43 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Göre Akış Diagramı ……..……..…… 262
EK 7. -2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Türbülans Kinetik Enerjisi ……..……..…….. 263
EK 8. 0 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Türbülans Kinetik Enerjisi ……..……..…….. 264
EK 9. 2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Türbülans Kinetik Enerjisi ……..……..…….. 265
EK 10. 1,1 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Türbülans Kinetik Enerjisi ……..……..…….. 266
EK 11. 1,25 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Türbülans Kinetik Enerjisi ……..……..…….. 267
EK 12. 1,43 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Türbülans Kinetik Enerjisi ……..……..…….. 268
ÖZGEÇMİŞ ……..……..……... 269

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
μ	Faktöriyel tasarım için genel ortalama
μt	Türbülans viskozitesi
Cp	Özgül ısı
F	Varyans homojenliği
Gk	Ortalama hız geçişine bağlı türbülans kinetik enerji üretimi
H	Geri basamak akışı basamak yüksekliği
Hç	Geri basamak akışı kanal çıkış yüksekliği
H_g	Geri basamak akışı kanal giriş yüksekliği
k	Türbülans kinetik enerjisi
k_x	Herhangi bir faktörün seviye sayısı
κ	Von Karman sabiti
L	Taguchi metodu kayıp fonksiyonu
L	Geri basamak akışı basamak sonrası kanal uzunluğu
L_g	Geri basamak akışı basamak öncesi giriş uzunluğu
L_t	Geri basamak akışı toplam uzunluğu
l_μ	Uzunluk ölçeği
m	Taguchi metodu hedef değeri
N	Gürültü faktörü
n	ANOVA tablosu grup eleman sayısı
Nu	Nusselt Sayısı
P	Basınç
P	ANOVA tablosu hipotez testinin olasılık değeri
$\dot{q}$	Duvar ısı akısı
R^2	Regresyon denklemi tahmin kapasitesi
$\vec{r}$	Konum vektörü
Re	Reynolds sayısı
S	Sinyal faktörü
S / N	Sinyal / gürültü oranı
St	Stanton sayısı
T	Sıcaklık
T_w	Duvar sıcaklığı
u_i	Anlık akışkan hızı
u_i'	Anlık akışkan hız dalgalanması
$\overline{u_i'}$	Anlık akışkan hızı ortalaması
V_x	Herhangi bir faktörün serbestlik derecesi
x	Kontrol edilebilen değişken
X_r	Yeniden birleşme uzunluğu
Y	Taguchi metodu kalite değişkeni
y^+	Geri basamak akış tabanından olan birimsiz uzaklık
Y_v	Fiziki vizkoz alt tabaka kalınlığı
z	Kontrol edilemeyen değişken
α	Basınç gradyeni değişim açısı
δ	Tam gelişmiş akış sınırı

Δ	Tolerans değeri
ε	Türbülans kinetik enerjisi dağılım oranı
ρ	Yoğunluk
ω	Türbülans frekansı
$\boldsymbol{\Omega}$	Açısal hız

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ANOVA	Varyans analizi
BG	Basınç gradyeni
CCD	Central composite design
DS1	-2º basınç gradyeni uygulanmış Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi
DS2	0º basınç gradyeni uygulanmış Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi
DS3	2º basınç gradyeni uygulanmış Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi
DS4	4º basınç gradyeni uygulanmış Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi
DS5	6º basınç gradyeni uygulanmış Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi
GO	Genişleme oranı
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
IH1	-2º basınç gradyeni uygulanmış Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi
IH2	0º basınç gradyeni uygulanmış Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi
IH3	2º basınç gradyeni uygulanmış Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi
IH4	4º basınç gradyeni uygulanmış Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi
IH5	6º basınç gradyeni uygulanmış Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi
MKT	Merkezi kompozit tasarım
MSB	ANOVA tablosu gruplar arası farklar karesi ortalaması
MSW	ANOVA tablosu grup içi farklar karesi ortalaması
RNG	Renormalization group
RSM	Reynolds stress model
SSB	ANOVA tablosu grup ortalamalarının genel ortalamadan olan fark karelerinin gruplardaki eleman sayısı ile çarpımlarının toplamı
SST	ANOVA tablosu aritmetik ortalamadan farklar karelerinin toplamı
SST	Shear stress transport
SSW	ANOVA tablosu grup içi farklar karesi toplamı
TS	Türbülans seviyesi
VE1	-2º basınç gradyeni uygulanmış Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi

VE2	0º basınç gradyeni uygulanmış Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi
VE3	2º basınç gradyeni uygulanmış Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi
VE4	4º basınç gradyeni uygulanmış Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi
VE5	6º basınç gradyeni uygulanmış Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi
YBN	Yeniden birleşme noktası
YYY	Yanıt yüzey yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Geri basamak akışının temel yapısı……..	5
Şekil 2.2.	Sistem ya da süreç genel yapısı…….……	7
Şekil 2.3.	Deney tasarlama kuralları…….	8
Şekil 3.1.	Geri basamak akışı temel geometrisi……	22
Şekil 3.2.	Geometrik modifikasyon bölgeleri……...	23
Şekil 3.3.	Sayısal yöntem uygulama adımları……...	32
Şekil 3.4.	Vogel ve Eaton (1985) geometrisi……	32
Şekil 3.5.	-2 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS1) ……..…….	35
Şekil 3.6.	0 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS2) ……...	35
Şekil 3.7.	2 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS3) ……...	35
Şekil 3.8.	4 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS4) ……...	35
Şekil 3.9.	6 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS5) ……...	35
Şekil 3.10.	-2 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi (VE1)	36
Şekil 3.11.	0 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi (VE2)	36
Şekil 3.12.	2 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi (VE3)	36
Şekil 3.13.	4 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi (VE4)	36
Şekil 3.14.	6 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi (VE5)	36
Şekil 3.15.	-2 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH) ……..	37
Şekil 3.16.	0 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH2) ……	37
Şekil 3.17.	2 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH3) ……	37
Şekil 3.18.	4 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH4) ……	37
Şekil 3.19.	6 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH5) ……	37
Şekil 3.20.	Simülasyon ve doğrulama uygulama adımları ……	39
Şekil 3.21.	Vogel ve Eaton (1985) ağ örgü yapısı ……..……	40
Şekil 3.22	Simülasyon uygulama algoritma seçenekleri ……..	41
Şekil 3.23.	Ağ örgü yapılarının y^+ karşılaştırması ……	41
Şekil 3.24	Stanton sayısı ve yeniden birleşme etkileşimi doğrulama grafiği	42
Şekil 3.25.	Gerçekleştirilen analizlerin hız profili ……	43
Şekil 3.26.	Faktöriyel tasarım etkileşimleri ……..	46
Şekil 3.27.	2^2 faktöriyel tasarım geometrik ve matris gösterimi ……...	48
Şekil 3.28.	2^3 faktöriyel tasarım geometrik ve matris gösterimi ……...	49
Şekli 3.29.	2^3 faktöriyel tasarımdaki faktörlerin etki ve etkileşimleri ……...	51
Şekil 3.30.	2 ve 3 faktör için merkezi kompozit tasarım ……...	53

Şekil 3.31.	Taguchi metodu uygulama adımları ……...	55
Şekil 3.32.	Taguchi yönteminin felsefesi ……..	55
Şekil 3.33.	Taguchi'nin kayıp fonksiyonu …… ……..	57
Şekil 4.1.	A grubu simülasyonları Stanton grafikleri ……..	68
Şekil 4.2.	A grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……	68
Şekil 4.3.	B grubu simülasyonları Stanton grafikleri …….	69
Şekil 4.4.	B grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……...	69
Şekil 4.5.	C grubu simülasyonları Stanton grafikleri …….	70
Şekil 4.6.	C grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……...	70
Şekil 4.7.	D grubu simülasyonları Stanton grafikleri ..……	71
Şekil 4.8.	D grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……...	71
Şekil 4.9.	E grubu simülasyonları Stanton grafikleri …….	72
Şekil 4.10.	E grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……...	72
Şekil 4.11.	F grubu simülasyonları Stanton grafikleri ……..	73
Şekil 4.12.	F grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……...	73
Şekil 4.13.	G grubu simülasyonları Stanton grafikleri …….	74
Şekil 4.14.	G grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……...	74
Şekil 4.15.	H grubu simülasyonları Stanton grafikleri …….	75
Şekil 4.16.	H grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……...	75
Şekil 4.17.	I grubu simülasyonları Stanton grafikleri ……..	76
Şekil 4.18.	I grubu simülasyonları x-ekseni hız profili …….....	76
Şekil 4.19.	J grubu simülasyonları Stanton grafikleri ……..	77
Şekil 4.20.	J grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……	77
Şekil 4.21.	K grubu simülasyonları Stanton grafikleri …….	78
Şekil 4.22.	K grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……...	78
Şekil 4.23.	L grubu simülasyonları Stanton grafikleri …….	79
Şekil 4.24.	L grubu simülasyonları x-ekseni hız profili ……...	79
Şekil 4.25.	Yeniden birleşme uzunluklarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması …….	81
Şekil 4.26.	A grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması ……...	82
Şekil 4.27.	B grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması ……...	82
Şekil 4.28.	C grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması ……...	83
Şekil 4.29.	D grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması ……...	83
Şekil 4.30.	E grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması	84
Şekil 4.31.	F grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması	84
Şekil 4.32.	G grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması ……...	85
Şekil 4.33.	H grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması ……...	85
Şekil 4.34.	I grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması	86
Şekil 4.35.	J grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması	86
Şekil 4.36.	K grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması ……...	87
Şekil 4.37.	L grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması	87

Şekil 4.38.	Uygun simülasyonun ağdan bağımsızlığı ……	88
Şekil 4.39.	-2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS1) …….…..…..…..…..…..…..…..…..…..…..…..…..…….	91
Şekil 4.40.	-2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS1) ……	91
Şekil 4.41.	-2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS1) …..……..	92
Şekil 4.42.	-2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS1) ……	92
Şekil 4.43.	-2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS1) ……..	93
Şekil 4.44.	0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS2) ……...	94
Şekil 4.45.	0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS2) ……..	94
Şekil 4.46.	0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS2) ……..	95
Şekil 4.47.	0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS2) ……..	95
Şekil 4.48.	0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS2) ……..	96
Şekil 4.49.	2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS3) ……...	97
Şekil 4.50.	2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS3) ……..	97
Şekil 4.51.	2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS3) ……..	98
Şekil 4.52.	2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS3) ……..	98
Şekil 4.53.	2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS3) ……..	99
Şekil 4.54.	4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS4) ……...	100
Şekil 4.55.	4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS4)	100
Şekil 4.56.	4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS4) ……..	101
Şekil 4.57.	4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS4) ……..	101
Şekil 4.58.	4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS4) ……..	102
Şekil 4.59.	6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS5) ……...	103
Şekil 4.60.	6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS5) ……..	103
Şekil 4.61.	6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS5) ……..	104

Şekil 4.62. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS5) …….. 104
Şekil 4.63. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS5) …….. 105
Şekil 4.64. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS) …….. 106
Şekil 4.65. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS) ……... 106
Şekil 4.66. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS) …….. 107
Şekil 4.67. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS) ……... 107
Şekil 4.68. % 0,2 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS) ….. 108
Şekil 4.69. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS) …….. 108
Şekil 4.70. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS) ……... 109
Şekil 4.71. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS) …….. 109
Şekil 4.72. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS) ……... 110
Şekil 4.73. % 1,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS) ….. 110
Şekil 4.74. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS) …….. 111
Şekil 4.75. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS) ……... 111
Şekil 4.76. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS) …….. 112
Şekil 4.77. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS) ……... 112
Şekil 4.78. % 3,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS) ….. 113
Şekil 4.79. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS) …….. 113
Şekil 4.80. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS) ……... 114
Şekil 4.81. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS) …….. 114
Şekil 4.82. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS) ……... 115
Şekil 4.83. % 5,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS) ….. 115
Şekil 4.84. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS) …….. 116
Şekil 4.85. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS) ……... 116
Şekil 4.86. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS) …….. 117
Şekil 4.87. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS) ……... 117

Şekil 4.88. % 7,4 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS) ….. 118
Şekil 4.89. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE1) ……... 121
Şekil 4.90. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE1) …… 121
Şekil 4.91. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE1) …… 122
Şekil 4.92. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE1) …… 122
Şekil 4.93. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE1) …….. 123
Şekil 4.94. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE2) ……... 124
Şekil 4.95. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE2) …….. 124
Şekil 4.96. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE2) ……. 125
Şekil 4.97. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE2) ……. 125
Şekil 4.98. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE2) …….. 126
Şekil 4.99. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE3) ……. 127
Şekil 4.100. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE3) ……. 127
Şekil 4.101. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE3) ……. 128
Şekil 4.102. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE3) ……. 128
Şekil 4.103. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE3) …….. 129
Şekil 4.104. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE4) ……. 130
Şekil 4.105. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE4) ……. 130
Şekil 4.106. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE4) ……. 131
Şekil 4.107. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE4) ……. 131
Şekil 4.108. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE4) …….. 132
Şekil 4.109. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE5) ……. 133
Şekil 4.110. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE5) ……. 133
Şekil 4.111. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE5) ……. 134

Şekil 4.112. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE5) ……. 134
Şekil 4.113. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE5) …….. 135
Şekil 4.114. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE) ……..…….…… 136
Şekil 4.115. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE) ……..……. 136
Şekil 4.116. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE) …….. 137
Şekil 4.117. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE) ……..……. 137
Şekil 4.118. % 0,2 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE) ….. 138
Şekil 4.119. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE) ……..…….…… 138
Şekil 4.120. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE) ……..……. 139
Şekil 4.121. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE) …….. 139
Şekil 4.122. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE) ……..……. 140
Şekil 4.123. % 1,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE) ….. 140
Şekil 4.124. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE) ……..…….…… 141
Şekil 4.125. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE) ……..……. 141
Şekil 4.126. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE) …….. 142
Şekil 4.127. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE) ……..……. 142
Şekil 4.128. % 3,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE) ….. 143
Şekil 4.129. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE) ……..…….…… 143
Şekil 4.130. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE) ……..……. 144
Şekil 4.131. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE) …….. 144
Şekil 4.132. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE) ……..……. 145
Şekil 4.133. % 5,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE) ….. 145
Şekil 4.134. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE) ……..……..... 146
Şekil 4.135. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE) ……..……. 146
Şekil 4.136. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE) …….. 147
Şekil 4.137. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE) ……..……. 147

Şekil 4.138. % 7,4 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE) ….. 148
Şekil 4.139. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH1) …….……..…….. 151
Şekil 4.140. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH1) ……. 151
Şekil 4.141. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH1) ……. 152
Şekil 4.142. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH1) ……. 152
Şekil 4.143. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH1) ……... 153
Şekil 4.144. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH2) …….……..…….. 154
Şekil 4.145. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH2) ……... 154
Şekil 4.146. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH2) ……... 155
Şekil 4.147. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH2) …….…….. 155
Şekil 4.148. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH2) ……... 156
Şekil 4.149. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH3) …….……..…….. 157
Şekil 4.150. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH3) …….…….. 157
Şekil 4.151. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH3) ……... 158
Şekil 4.152. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH3) ……... 158
Şekil 4.153. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH3) ……... 159
Şekil 4.154. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH4) …….……..…….. 160
Şekil 4.155. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH4) …….…….. 160
Şekil 4.156. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH4) …….…….. 161
Şekil 4.157. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH4) ……... 161
Şekil 4.158. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH4) …….……..…….. 162
Şekil 4.159. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH4) …….…….. 162
Şekil 4.160. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH4) …….…….. 163
Şekil 4.161. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH4) ……... 163

Şekil 4.162. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH) ……..……..……..……... 165
Şekil 4.163. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH) ……..……..……. 165
Şekil 4.164. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH) ……... 166
Şekil 4.165. % 0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (IH) ……..……..……..…… 166
Şekil 4.166. % 0,2 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH) …… 167
Şekil 4.167. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH) ……..……..……..……... 167
Şekil 4.168. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH) ……..……..……..…… 168
Şekil 4.169. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH) ……... 168
Şekil 4.170. % 1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (IH) ……..……..……..…… 169
Şekil 4.171. % 1,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH) …… 169
Şekil 4.172. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH) ……..……..……..……... 170
Şekil 4.173. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH) ……..……..……..…… 170
Şekil 4.174. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH) ……... 171
Şekil 4.175. % 3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (IH) ……..……..……..…… 171
Şekil 4.176. % 3,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH) …… 172
Şekil 4.177. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH) ……..……..……..……... 172
Şekil 4.178. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH) ……..……..……..…… 173
Şekil 4.179. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH) ……... 173
Şekil 4.180. % 5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (IH) ……..……..……..…… 174
Şekil 4.181. % 5,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH) …… 174
Şekil 4.182. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH) ……..……..……..……... 175
Şekil 4.183. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH) ……..……..……..…… 175
Şekil 4.184. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH) …… 176
Şekil 4.185. % 7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (IH) ……..……..……..…… 176
Şekil 4.186. % 7,4 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH) …… 177
Şekil 4.187. % 0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre x ekseni hız ……... 181

Şekil 4.188. % 0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı ……. 181
Şekil 4.189. % 0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi ……..... 182
Şekil 4.190. % 0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Nusselt sayısı ……. 182
Şekil 4.191. % 0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ……... 183
Şekil 4.192. % 3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre x ekseni hız ……..... 184
Şekil 4.193. % 3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı ……. 184
Şekil 4.194. % 3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi ……..…….. 185
Şekil 4.195. % 3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Nusselt sayısı ……. 185
Şekil 4.196. % 3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ……... 186
Şekil 4.197. % 7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre x ekseni hız …… 187
Şekil 4.198. % 7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı ……. 187
Şekil 4.199. % 7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi ……..…….. 188
Şekil 4.200. % 7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Nusselt sayısı ……. 188
Şekil 4.201. % 7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ……... 189
Şekil 4.202. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı ……. 191
Şekil 4.203. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ……... 191
Şekil 4.204. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi ……..... 192
Şekil 4.205. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı ……... 192
Şekil 4.206. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi …….. 193
Şekil 4.207. 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı ……. 193
Şekil 4.208. 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ……... 194

Şekil 4.209. 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi ……..... 194
Şekil 4.210. 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı ……... 195
Şekil 4.211. 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi …….. 195
Şekil 4.212. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı ……. 196
Şekil 4.213. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ……... 196
Şekil 4.214. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi ……..... 197
Şekil 4.215. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı ……... 197
Şekil 4.216. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi …….. 198
Şekil 4.217. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı ……... 200
Şekil 4.218. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ……. 200
Şekil 4.219. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi ……...…….. 201
Şekil 4.220. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı ……. 201
Şekil 4.221. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ……... 202
Şekil 4.222. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı ……... 203
Şekil 4.223. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ……. 203
Şekil 4.224. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi ……. 204
Şekil 4.225. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı ……. 204
Şekil 4.226. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ……... 205
Şekil 4.227. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı ……... 206
Şekil 4.228. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ……. 206
Şekil 4.229. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi ……. 207

Şekil 4.230. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı ……. 207
Şekil 4.231. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ……... 208
Şekil 4.232. Yeniden birleşme uzunluğu için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (kontur) …… 213
Şekil 4.233. Yeniden birleşme uzunluğu için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur) ……. 213
Şekil 4.234. Yeniden birleşme uzunluğu için türbülans seviyesi - basınç gradyeni etkileşimi (kontur) …… 214
Şekil 4.235. Yeniden birleşme uzunluğu için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (3D) …….. 214
Şekil 4.236. Yeniden birleşme uzunluğu için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (3D) ……... 215
Şekil 4.237. Yeniden birleşme uzunluğu için türbülans seviyesi - basınç gradyeni etkileşimi (3D) …….. 215
Şekil 4.238. Ortalama Stanton sayısı için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (kontur) ……... 218
Şekil 4.239. Ortalama Stanton sayısı için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur) ……... 218
Şekil 4.240. Ortalama Stanton sayısı için basınç gradyeni - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur) ……... 219
Şekil 4.241. Ortalama Stanton sayısı için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (3D) ……..... 219
Şekil 4.242. Ortalama Stanton sayısı için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (3D) ……..... 220
Şekil 4.243. Ortalama Stanton sayısı için basınç gradyeni - türbülans seviyesi etkileşimi (3D) ……..... 220
Şekil 4.244. Maksimum Stanton sayısı için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (kontur) ……... 223
Şekil 4.245. Maksimum Stanton sayısı için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur) …… 224
Şekil 4.246. Maksimum Stanton sayısı için basınç gradyeni - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur) …… 224
Şekil 4.247. Maksimum Stanton sayısı için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (3D) …… 225
Şekil 4.248. Maksimum Stanton sayısı için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (3D) ……... 225
Şekil 4.249. Maksimum Stanton sayısı için basınç gradyeni - türbülans seviyesi etkileşimi (3D) ……... 226
Şekil 4.250. Optimizasyon grafikleri ……... 227
Şekil 4.251. Yeniden birleşme uzunluğu için parametrelerin ortalama S/N oranları …… 231
Şekil 4.252. Ortalama Stanton sayısı için parametrelerin ortalama S/N oranları …… 233
Şekil 4.253. Maksimum Stanton sayısı için parametrelerin ortalama S/N oranları …… 236
Şekil 4.254. Tüm yanıtlar için parametrelerin ortalama S/N oranları ……... 238

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	Simülasyon geometrileri ……...	34
Çizelge 3.2.	Sınır şartları ve fiziksel büyüklükleri ……	38
Çizelge 3.3.	Ağ örgü yapılarının düğüm ve element sayıları ……	42
Çizelge 3.4.	ANOVA tablosu ……..……..	44
Çizelge 3.5.	ANOVA tablosunda kullanılan terimler ……...	44
Çizelge 3.6.	2^2 faktöriyel tasarımda etkilerin işaretleri …….	48
Çizelge 3.7.	2^3 faktöriyel tasarımda etkilerin işaretleri …….	51
Çizelge 3.8.	Taguchi kayıp fonksiyon özellikleri …….....	58
Çizelge 3.9.	Performans karakteristiği işaret / gürültü oranı …….	60
Çizelge 3.10.	2^k deney tasarımı ve Taguchi deney tasarımı farkı ……	61
Çizelge 3.11.	Ortogonal dizi seçim tablosu ……	62
Çizelge 4.1.	Simülasyon algoritmana göre gruplandırma …….	66
Çizelge 4.2.	Yeniden birleşme uzunlukları ……...	80
Çizelge 4.3.	Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi simülasyon grupları …….	90
Çizelge 4.4.	Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi simülasyon grupları sayısal verileri …….	119
Çizelge 4.5.	Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi simülasyon grupları ……..……	120
Çizelge 4.6.	Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi simülasyon grupları sayısal verileri …….	149
Çizelge 4.7.	Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi simülasyon grupları …….	150
Çizelge 4.8.	Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi simülasyon grupları sayısal verileri …….	178
Çizelge 4.9.	Genişleme oranına göre karşılaştırma grupları …….	180
Çizelge 4.10.	Türbülans seviyesine göre karşılaştırma grupları …….	190
Çizelge 4.11.	Basınç gradyenine göre karşılaştırma grupları ……..	199
Çizelge 4.12.	Modifiye çalışmalardan elde edilen sayısal veriler ……...	209
Çizelge 4.13.	Yeniden birleşme uzunluğu için katsayı tahminleri ……..	211
Çizelge 4.14.	Yeniden birleşme için ANOVA tablosu ……...	212
Çizelge 4.15.	Ortalama Stanton sayısı için katsayı tahminleri ……	216
Çizelge 4.16.	Ortalama Stanton sayısı için ANOVA tablosu ……..	217
Çizelge 4.17.	Maksimum Stanton sayısı için katsayı tahminleri …….	221
Çizelge 4.18.	Maksimum Stanton sayısı için ANOVA tablosu ……..	222
Çizelge 4.19.	Taguchi Metodu uygulaması için faktörler, faktör seviyeleri ve faktör serbestlik dereceleri ……	228
Çizelge 4.20.	Taguchi metodu uygulaması faktör seviyeleri, faktör değerleri ve yanıt değerleri ……..	229
Çizelge 4.21.	L9 ortogonal dizi dağılımı için yeniden birleşme uzunluğu ve S/N oranları ……..	230
Çizelge 4.22.	Yeniden birleşme uzunluğu için sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu ……..	230
Çizelge 4.23.	Yeniden birleşme uzunluğu için ANOVA tablosu ……	232

Çizelge 4.24. L9 ortogonal dizi dağılımı için ortalama Stanton sayıları ve S/N oranları …….. 232
Çizelge 4.25. Ortalama Stanton sayısı için sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu …….. 233
Çizelge 4.26. Ortalama Stanton sayısı için ANOVA tablosu …….. 234
Çizelge 4.27. L9 ortogonal dizi dağılımı için maksimum Stanton sayıları ve S/N oranları …….. 235
Çizelge 4.28. Maksimum Stanton sayısı için sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu …….. 236
Çizelge 4.29. Maksimum Stanton sayısı için ANOVA tablosu …….. 237
Çizelge 4.30. Tüm yanıtlar için sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu ……... 238
Çizelge 5.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları için etkileşim tablosu …….. 240
Çizelge 5.2. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları için yeniden birleşme oluşum tablosu ……... 242

1. GİRİŞ

Açık ya da kapalı bir sistem olmasına bakılmaksızın içerisinde akışkan bulunduran ve bu akışkanının gerek durağan gerekse hareket halindeki davranışlarını inceleyen akışkanlar mekaniği bilimi, günlük hayatımızın farkında olmasak bile önemli bir parçasıdır. Meteorolojik olayların gerçekleşmesi, ulaşım araçlarının hareketlendirilmesi, inşaat projelerinin tasarımları, tüm kuvvet makineleri ve iş makinelerinin çalıştırılması ve hatta vücudumuzdaki dolaşım sistemi organlarının çalışması akışkanlar mekaniğinin çalışma alanı içerisindedir. Oldukça farklı çalışma alanlarında karşımıza çıkan akışkanlar mekaniği ile ilgili çalışma alanlarından birisi de geri basamak akışları olduğu bilinmektedir.

Geri basamak akışları; laminer ve türbülanslı akış türlerini, akışın ayrılmasını ve yeniden birleşmesini, akışın yeniden birleşmesiyle beraber meydana geri dönme bölgelerindeki girdap oluşumlarını, yeniden birleşme sonrasında akıştaki basınç ve hız değişimini, akış bölgesinde oluşan titreşimi ve gürültüyü bir arada inceleyebileceğimiz temel akışkanlar mekaniği konularının başında gelmektedir. Açık ya da kapalı yapıda, akış doğrultusundaki pozitif yönde aniden değişen kanal yüksekliğinin neden olduğu geri basamak akışları; soğutma sistemleri (elektronik devrelerin soğutulması, araç aydınlatma ekipmanlarının soğutulması, gaz türbinlerinin soğutulması vb.), ısı enerjisinin mekanik enerjiye çevrilmesi (yanma odaları, içten yanmalı motorlar vb.), enerji üretim sistemlerinin tasarlanması (rüzgar türbinlerinin kanatlarının tasarımı, türbin kanatlarının tasarımı), akışkan kullanan makinelerin çalıştırılması (türbin, kompresör vb.), inşaat projeleri (köprü tasarımları, binaların rüzgar yüklerinin hesaplanması vb.) gibi oldukça geniş ve farklı alanlarda karşımıza çıkmaktadır.

Bir geri basamak akışında akış karakteristiklerini etkileyen birçok faktör yer almaktadır. Başta basamak yüksekliği olmak üzere akışkanın hızı, viskozitesi, kapalı bir kanalda akış söz konusu ise kanal yüksekliği ya da akış boyunca kanal yüksekliğindeki değişim, akışkanın temas halinde olduğu yüzeylerdeki ısıl durumlar, akışkanda bulunan nano parçacıkların yoğunluğu vb. birçok faktör geri basamak akışlarında akış karakteristikleri üzerinde bazen oldukça yüksek bazen de ihmal edilebilecek boyutta öneme sahip olabilmektedir.

Geri basamak akışlarını konu alan oldukça fazla sayıda teorik, deneysel ve nümerik çalışma gerçekleştirilmiştir. Akım ayrılması, geri dönme bölgesi, yeniden birleşme uzunluğu, genişleme oranı, ısı transferi, Reynolds sayısı gibi parametreler aracılığıyla sistemin akış ve ısı karakteristikleri hakkında değerlendirmeler de bulunulmuştur. Konu ile ilgili olarak ilk çalışmalar günümüzden 60 yıl kadar öncesinde yeniden birleşme uzunluğu, sürtünme, basınç değişimi odaklı deneysel çalışmalarla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda karmaşık yapıya sahip olan akım ayrılması, yeniden birleşmenin oluşması gibi durumlar için ayrıntılı korelasyonlar açıklığa kavuşturulamamıştır. Son yirmi yılda özellikle nümerik çalışmaların önemli bir yöntem haline geldiği göz önünde bulundurulduğunda, geri basamak akışları ile ilgili olan yapılan çalışmalarda daha hassas ve yerel ölçümler yapılabilmekte; bu ölçümler yapılırken de diğer parametreler hakkında da kapsamlı sonuçlar elde edilebilmektedir (Chen, Asai, Nonomura, Xi ve Liu, 2018).

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuca etkileyen birçok faktör olabilmektedir. Deney sonuçlarına etki eden her bir faktörün ayrı ayrı etkisini incelemenin oldukça maliyetli olduğu ve zaman baskısı yaratacağı bilinmektedir. Pratikte uygulanan deneylerin bir kısmının basit deneyler olduğu bilinmekle beraber bazı deneylerde tasarımı, üretimi, kaliteyi etkileyen oldukça fazla parametre bir arada bulunabilmektedir. Bu gibi durumlarda istatistiksel olarak tanımlanmış deneylere ihtiyaç duyulabilmektedir. İstatistiksel olarak tanımlanan deneylerde, birçok faktörün ürün parametrelerine olan etkilerini ve birbirleriyle olan etkileşimlerini ekonomik olarak incelemek mümkün olabilmektedir (Şirvancı, 1997). Gerçekleştirilecek çalışmanın yapısına ve içerdiği parametrelerin özelliklerine göre yanıt yüzey yöntemi, faktöriyel tasarım ve Taguchi metodu sıklıkla kullanılan deney tasarımı yöntemlerinin arasında gelmekte olduğu bilinmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), günümüzde akışkanlar mekaniği analizlerinde kullanılan analiz tekniklerinin başında yer almaktadır. HAD; akış, ısı ve kütle transferi problemlerinin sayısal olarak çözümlendiği bir analiz yöntemidir. Akışkanın hareketini tanımlayan diferansiyel denklemlerin çözümlendiği bu yöntem, özellikle deneysel çalışmalarla elde edilemeyen kayma gerilme, hız, basınç ve sıcaklık dağılımları, akışa ait akım çizgileri gibi akış alanı hakkındaki ayrıntıları elde etmek için kullanılmaktadır (Sözen ve Çiftçi, 2016). Bu teknikle yapılan analizlerde

öncelikle analizi yapılacak olan sistemin gerek iki boyutta gerekse üç boyutta modellemesi yapılmaktadır. Modellemenin ardından sistemin ağ örgü yapısı oluşturularak analizin gerçekleştirileceği alan oluşturulur. Son olarak sistemdeki gerekli sınır şartları tanımlanarak analiz sonuçlarına ulaşılmakta ve elde edilen sonuçlar üzerinde gerekli değerlendirmeler gerçekleştirilmektedir.

Gerçekleştirilen literatür araştırmaları sonucunda geri basamak akışları ile ilgili yapılan birçok nümerik çalışma olmasına rağmen, modellenen çalışmalarda gerek akış karakteristiklerinin gerekse ısı transferi karakteristiklerinin bir arada incelendiği çalışmalarının sayıca az olduğu görülmüştür. Bu karakteristiklerin bir arada incelendiği çalışmalarda da basamak sonrasında değişen basınç gradyeni etkisinden bağımsız çalışmalar yapıldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca geri basamak akışlarında akış ve ısı transferine etkileyen faktörlerin sonuçlara ve birbirlerine olan etkisini deney tasarımı yoluyla inceleyen bir çalışma olmadığı da tespit edilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda bu çalışmaya benzeyen kısıtlı çalışmalar olduğu sonucuna varılmıştır. Janani, Prakash, Harini ve Harish (2017) ileri basamak akışındaki ısı transferini Taguchi metoduyla incelemiş ve sırasıyla basamak yüksekliğinin ve Reynolds sayısının ısı transferi üzerindeki en etkin parametreler olduğunu ifade etmiştir. Nath ve Krishnan (2019) ise genişleme oranının maksimum ısı ve kütle transferine ve minimum duvar kayma gerilmesine ulaşılmasında önemli katkıları olduğunu ifade etmiştir.

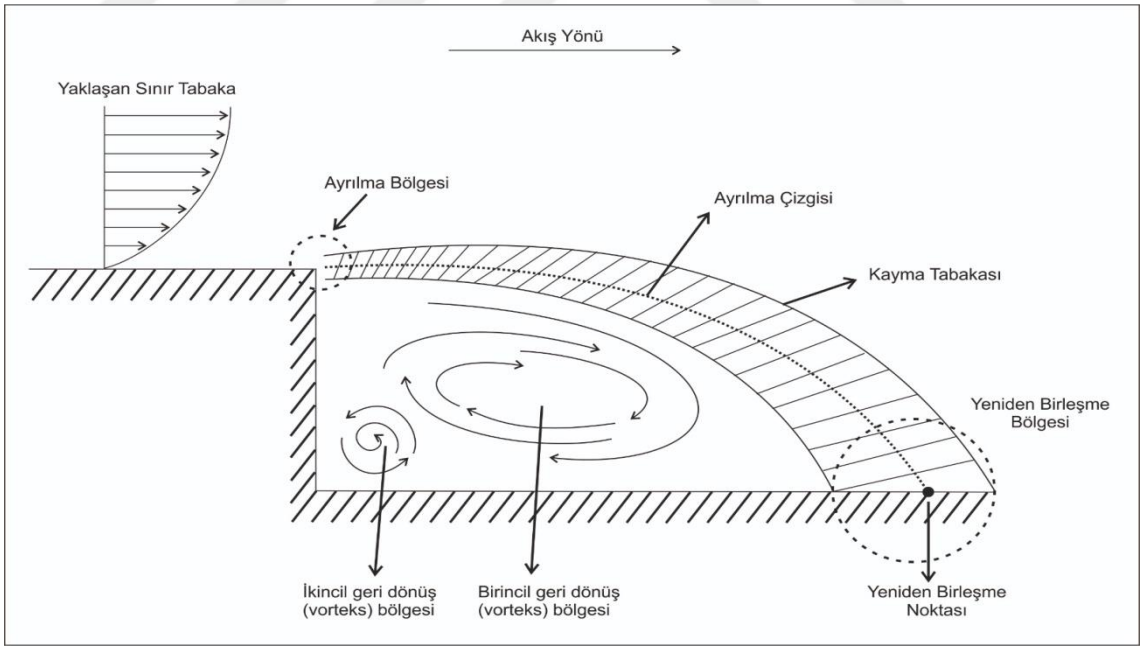
Hazırlanan bu doktora tezi kapsamında da standart bir geri basamak akışı ele alınmış, HAD tekniği kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve farklı deney tasarımı metotları kullanılarak HAD analizleri sonrasında elde edilen sonuçların birbirleriyle olan etkileşimleri değerlendirilmiştir. Sırasıyla Vogel ve Eaton (1985) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmanın modellemesi gerçekleştirilmiş ve nümerik çalışmanın validasyonu sağlanmıştır. Ardından Driver ve Seegmiller (1985) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada uygulanan basamak yüksekliği ve değişen kanal yükseklikleri ile Isomoto ve Honami (1989) tarafından yapılan deneysel çalışmadaki basamak yüksekliği ve türbülans seviyesindeki değişimler validasyonu sağlanan modellemeye uygulanmıştır. Böylelikle türbülans seviyesindeki, kanal yüksekliğindeki ve basamak yüksekliğindeki değişimlerin sabit ısı akısı uygulanan bir alandaki akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerine etkileri bir arada değerlendirilebilmiştir. Elde edilen

sonuçlar farklı deney tasarımı metotlarıyla incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda ise hangi parametrelerin basamak sonrasında yeniden birleşme uzunluğunun ve Stanton sayısının belirlenmesinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri de ortaya çıkarılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Geri Basamak Akışları

Geri basamak akışları oldukça basit bir yapıya sahiptir. Fakat akışın ayrılmasına ve basamak sonrasında yeniden birleşme olayı oldukça karmaşık yapıdadır. Bir geri basamak akışının genel yapısında değişen kanal yüksekliğine yaklaşmakta olan bir sınır tabaka, kanal yüksekliğinin değişim noktasında bir ayrılma bölgesi ve bu ayrılma bölgesinden ayrılma çizgisi etrafındaki kayma tabakası ve son olarak ayrılmış olan akışın yeniden kanal tabanı ile buluştuğu yeniden birleşme bölgesi bulunur. Yeniden birleşme bölgesi içerisinde ayrılma çizgisinin kanal tabanı ile buluştuğu nokta yeniden birleşme noktası olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca yeniden birleşme bölgesi ve kanal yüksekliğinin değiştiği bölge arasında da geri dönüş ya da vorteks bölgeleri meydana gelmektedir (Ateş ve Pulat, 2020). Şekil 2.1'de bir geri basamak akışının temel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Geri basamak akışının temel yapısı (Ateş ve Pulat, 2020)

Bu tür akışlarda basamağa yaklaşan sınır tabaka keskin köşede ayrılarak bir serbest kayma tabakası oluşturmaktadır. Ayrılan kayma tabakası hızlıca yeniden birleşme bölgesine doğru kıvrılarak taban duvarına çarpmaktadır. Kayma tabakasının bir bölümü kuvvetli bir ters basınç gradyeni sayesinde akımın tersi yönüne doğru bir geri dönme bölgesi oluşturacak şekilde yönlenmektedir. Kayma tabakası, akımı dengelemeye çalışan kıvrılmanın, ters basınç gradyeninin ve yeniden birleşme bölgesindeki duvar ile olan çarpmanın etkilerine maruz kalmaktadır. Yeniden birleşme noktası, zaman ortalaması alınmış akıma ait ayırıcı akım çizgisinin yüzey ile buluştuğu noktadır. Yeniden birleşmeden sonra yeni bir sınır tabaka formasyonu oluşmaktadır (İlday ve Atlı, 2006).

İlday ve Atlı (2006) geri basamak akışlarının en karakteristik bağımlı değişkeninin yeniden birleşme uzunluğu olduğunu ve yeniden birleşme uzunluğuna ya da bir başka deyişle akış karakteristiklerine etki eden faktörleri yaklaşan sınır tabakanın karakteri, yaklaşan sınır tabakanın kalınlığı, serbest akım türbülans seviyesi, basınç gradyeni ve kanal genişliğinin basamak yüksekliğine olan oranı olarak adlandırabileceğimiz açıklık oranı olduğunu ifade etmiştir.

Vogel ve Eaton (1985) geri basamak akışlarında ısı transferi karakteristiklerinin ise farklı fiziksel mekanizmalar tarafından kontrol edildiğini belirtmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda bu etkenler arasında yerel sürtünme, Reynolds sayısı, serbest türbülans seviyesi, titreşim ve ısı akısı sayılabilmektedir.

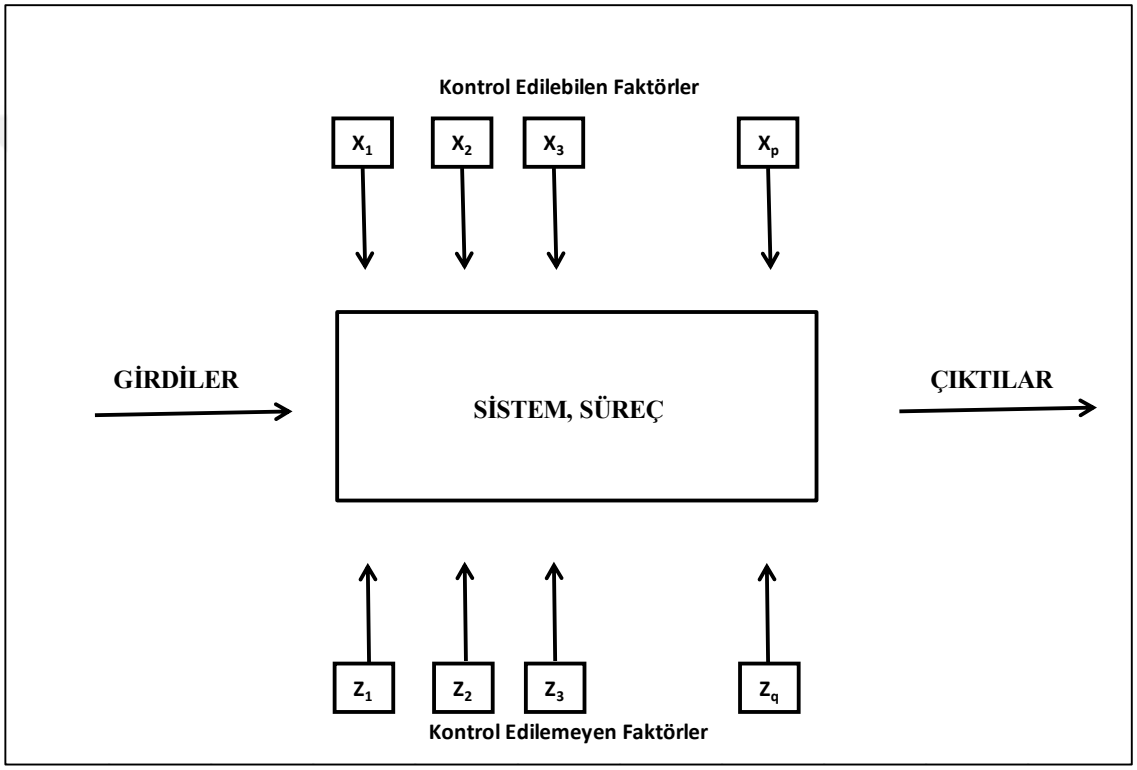
2.2. Deney Tasarımı

Deney tasarımı, 1920'lerde, istatistik biliminin babası sayılan İngiliz istatistikçi Sir Ronald Fisher tarafından, tarım alanında araştırmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir. Ayrıca, deney verilerinin analizi için bugün klasik sayılan "varyans analizi" (ANOVA) yöntemini de geliştirmiştir (Şirvancı 1997).

Montgomery (2012) deney tasarımını, uygun verilerin bir araya getirilerek istatistiksel yöntemler ile analiz edildiği ve böylelikle geçerli ve nesnel sonuçlara ulaşıldığı deneysel planlama süreci olarak ifade etmektedir. Besterfield ve diğerleri (2012) ise deney

tasarımını, herhangi bir ürün ya da süreçte var olan kritik parametrelerdeki önemli değişikliklere sebep olan değişkenleri tanımlayan nümerik çalışma olarak ifade etmiştir.

Montgomery (2012) deneyleri genel olarak sistemlerin ve süreçlerin performansını incelemek için kullanıldığını ve Şekil 2.2'deki gibi temsil edilebileceğini ifade etmektedir. Bazı proses değişkenlerini ya da malzeme özelliklerini ($x_1, x_2, x_3, \ldots x_p$) kontrol edilebilir, bazı değişkenleri ise ($z_1, z_2, z_3, \ldots z_q$) kontrol edilemeyen değişkenler olarak tanımlanabileceğini belirtir.



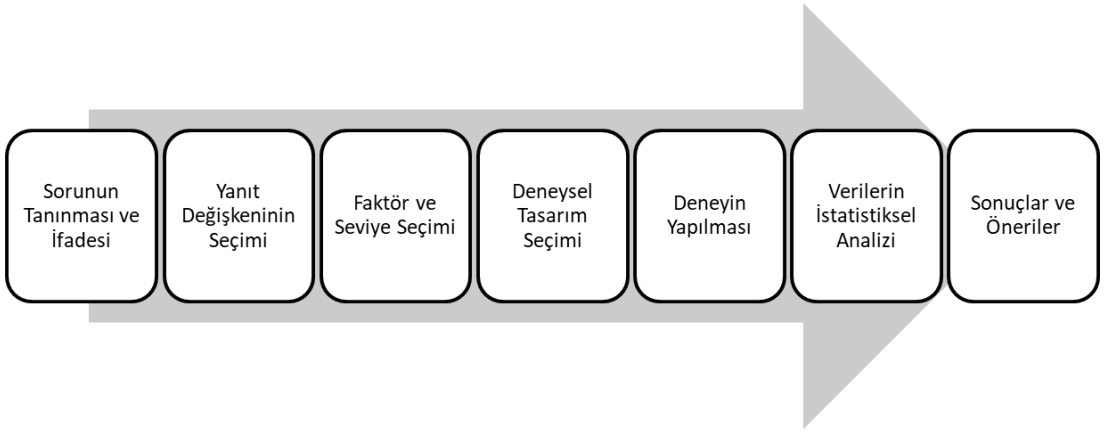
Şekil 2.2. Sistem ya da süreç genel yapısı (Montgomery, 2012)

Akman ve Özkan (2011) deney tasarım tekniklerinin yeni bir süreç geliştirmede ve performans artırmak amacıyla mevcut süreci düzeltmede çok önemli bir rol oynadığını ve değişkenliğin kaynağı olan kontrol edilemeyen değişkenlerin etkisinin en az olduğu süreci geliştirmeyi amaçladığını ifade etmiştir.

Montgomery (2012) deney tasarımının üç temel ilkesi olduğunu ve bunların rastgele seçme (randomization), çoğaltma (replication) ve engelleme (blocking) olduğunu

belirtmiştir. Rastgele seçme ile hem deneysel materyalin hem de bireysel çalışmaların gerçekleştirileceği sıra rastgele seçilerek deneysel tasarımda istatistiksel yöntemlerin kullanılmasının temel yapı taşının oluşturulduğunu ifade etmektedir. Rastgele seçme ile istatistiksel yöntemlerin kullanılmasında gözlemlerin bağımsız olarak rastgele dağıtılmakta ve deneyde mevcut olabilecek yabancı faktörlerin etkilerinin ortaya çıkarılmasında yardımcı olduğunu aktarmaktadır. Çoğaltma ile her faktör kombinasyonunun bağımsız bir şekilde tekrarlamasını ve çoğaltmanın iki önemli özelliği olduğunu belirtmektedir. İlk olarak deneysel hatanın tahmininin gerçekleştirilmesine izin verdiğini, ikinci olarak ise deneydeki faktör seviyelerinin her birinin gerçek ortalamasının tahmininde daha kesin bir tahmin gerçekleştirilmesi olduğunu belirtmiştir. Engellemenin ise değişkenler arasında karşılaştırılmaların yapılmasında kesinlik sağlamak amacıyla yapıldığını ifade etmiştir. Deneysel sonuca doğrudan etki edebilecek fakat doğrudan ilgi alanında yer almayan değişkenlerin ortadan kaldırmak amacıyla kullanıldığını ifade etmiştir.

Montgomery (2012) bir deneyin tasarlanmasında ya da analiz edilmesinde istatistiksel yaklaşımın nasıl kullanılacağını ve verilerin nasıl analiz edileceği yedi adımda ifade etmiştir. Deney tasarımında önemli olan unsurun iyi tasarlanmış olup olmadığını ve iyi bir tasarlamanın genellikle başarılı bir sonuca erişmede önemli olduğunu ifade etmiştir. Kötü bir planlama ile yapılan deneylerin zaman, para ve kaynak israfına neden olacağını belirtmiştir. Deney tasarlama kuralları olarak belirtebileceğimiz bu hususlar Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Deney tasarlama kuralları

Deney tasarımı çalışmalarında kullanılan temel kavramlardan yanıt değişkeni deney tasarımı yapılarak incelenmek istenen ve süreçte iyileştirmeye tabi tutulan değişken; faktör, deneyde yanıt değişkeni üzerinde etkisi bulunan kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen değişkenler; seviye ise yanıt değişkeni üzerinde etkili olan faktörlerin eşit aralıklı olarak denenecekleri değerler bütünüdür (Taylan, 2009).

2.3. Kaynak Özetleri

2.3.1. Geri Basamak Akışları İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Geri basamak akışları ile ilgili günümüzde kadar olukça fazla çalışma gerçekleştirildiği bilinmektedir. Türbülans seviyesindeki değişim, basamak yapısındaki değişim, akışın gerçekleştiği geometrideki değişim, akışkanın içeriğindeki değişim gibi çeşitli parametrelerin akış karakteristikleri üzerine olan etkileri ve akışta gerçekleşen ısı transferi üzerine olan etkileri gerek deneysel gerekse nümerik olarak incelenmiştir.

Bradshaw ve Wong (1972), Etheridge ve Kemp (1978) ve Jürgens ve Kaltenbach (2012) türbülans kayma tabakalarının akış karakteristikleri üzerine olan etkilerini incelemiştir. Kayma tabakalarının düzensizleşmesi ile birlikte geri basamak akışlarında yeniden birleşme uzunluğunda değişim meydana geldiğini aktarmıştır.

Launder ve Spalding (1974), Kim, Ghajar, Tang ve Foutch (2005), Haque, Ahmad, Yamada ve Chaudhry (2007), Louda, Prihoda, Svacek ve Kozel (2012) ve Sıdık, Ghaderian ve Sadeghipour (2013) farklı türbülans modelleri kullanarak geri basamak akışlarındaki akış karakteristiklerini değerlendirmiştir. Launder ve Spalding (1974), $k - \varepsilon$ modelinin sabit katsayılar üzerinde herhangi bir ayarlama yapmadan hem duvara yakın olan akışın hem de serbest akışın tahminine izin veren en basit model olduğunu ifade etmiştir. Kim ve diğerleri (2005) Re-Normalisation Group (RNG) $k - \varepsilon$ ve Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modellerinin yeniden birleşme, yüzey sürtünmesi ve statik basınç katsayısı için tahminlerinin iyi olduğunu aktarmıştır. Haque ve diğerleri (2007) SST $k - \omega$ türbülans modeli kullanılmasının yeniden birleşme uzunluğunun belirlenmesinde etkili olduğunu ifade etmiştir. Louda ve diğerleri (2012) $k - \varepsilon$ modelinin, $k - \omega$ modeline göre

yeniden birleşme noktasından sonraki ivme dahil olmak üzere duvardaki hızı daha iyi tahmin ettiğini fakat k –ε modelinin duvardaki sürtünmenin ve basıncın tahminin iyi olmadığını aktarmıştır. Sıdık ve diğerleri (2013) ise Lattice – Boltzman modeli kullanarak çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Geri basamak akışlarında yapılan çalışmalarda en sık rastlanan konu ise Reynolds sayısının akış karakteristikleri üzerine olan etkisi olmuştur. Durst ve Tropea (1981), Armaly, Durst, Pereira ve Schönung (1983), Chiang, Sheu ve Tsai (1997), Karasu (2001), Kostas, Soria ve Chong (2001), Pulat ve Diner (2001), Barkley, Gomes ve Henderson (2002), Armaly, Li ve Nie (2003), Nie ve Armaly (2004), Ertürk (2008), Hossain, Rahman ve Ridwan (2013) ve Liakos ve Malamataris (2015) gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarda Reynolds sayısı değişimleri ile akış karakteristiklerinde yaşanan değişimleri incelemiştir. Yapılan çalışmalarda varılan ortak nokta Reynolds sayısındaki artışın yeniden birleşme uzunluğunu ve geri dönme bölgesinin büyüklüğünü artırdığı şeklinde ifade edilmiştir.

Driver ve Seegmiller (1985) yüksek Reynolds sayılarında farklı basınç gradyenleri için yeniden birleşme noktasını; Ateş ve Pulat (2022) ise yine aynı şekilde farklı basınç gradyenleri için yeniden birleşme noktasıyla birlikte ısı transferi karakteristiklerini incelemiştir. Driver ve Seegmiller (1985) farklı basınç gradyenlerini deney düzeneğindeki üst duvarın basamağın hemen öncesinde farklı açılarla konumlandırılmasıyla elde etmiştir. Elde edilen sonuçlar duvar açılımına bağlı olarak açılımın artması sonrasında yeniden birleşme noktasının arttığını, akıştaki momentumu artırırken basıncın geri kazanımını geciktirdiğini ifade etmiştir. Duvar açılımına bağlı olarak Reynolds gerilmelerinde büyük farklar oluşmadığını; yeniden birleşmede üçlü türbülans korelasyonunun aniden kaybolduğunu da belirtmiştir. Ayrıca duvar açılımının türbülans kinetik enerjisinin üretim, dağılım, yayılım ve taşınım mekanizmalarını azaltma eğilimi gösterdiğini aktarmıştır. Ateş ve Pulat (2022) ise kanal çıkışına doğru daralmanın yaşandığı geometride yeniden birleşme noktasının basamağa yakın olmasından kaynaklı akım ayrışması sonrasında daha büyük bir düzensizlikten dolayı ısı transferinin daha yüksek olduğunu, aynı şekilde kanal çıkışı genişledikçe yeniden birleşme noktası kanal çıkışına doğru ilerlediğini ifade etmiştir. Böylelikle vorteks bölgesi büyürken akıştaki düzensizliğn ve gerçekleşen ısı transferi kapasitesinin azaldığını belirtmiştir.

Literatürde araştırması gerçekleştirilirken dikkat çeken hususlardan birisi de geri basamak akışları ile ilgili yapılan çalışmaların bir arada değerlendirildiği karşılaştırmalı çalışmalar olmuştur. Eaton ve Johnston (1981), Lee ve Mateescu (1998), Aubrun, Kao ve Boisson (2000), Abu-Mulaweh (2003), Mittal, Madanan ve Goldstein (2017) ve Chen ve diğerleri (2018) geri basamak akışlarında yapılan akış karakteristikleri, ısı transferi ve kütle transferi incelemelerini ele almıştır. Özellikle Chen ve diğerlerinin (2018) son 60 yılda gerçekleştirilen 250'ye yakın çalışmayı birlikte değerlendirerek yaptığı karşılaştırma araştırmacılara önemli katkı sağlamıştır.

Geri basamak akışlarında akış karakteristiklerinin özellikle yenide birleşme olayının ısı transferine önemli etkileri olmaktadır. Vogel ve Eaton (1985), Abu-Mulaweh, Armaly ve Chen (2001), Nie ve Armaly (2003) ve Barrios-Pina, Viazzo ve Rey (2012) bu yönde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Vogel ve Eaton (1985) yeniden birleşmenin ısı transfer katsayısını yerel olarak yaklaşık iki kat artırdığını belirtmiştir. Abu-Mulaweh ve diğerleri (2001) yeniden birleşme uzunluğunun artmasına bağlı olarak ise maksimum ısı transfer oranının sağlandığı bölgenin basamaktan uzaklaştığını ifade etmiştir. Nie ve Armaly (2003) basamak sonrası duvarda gelişen maksimum Nusselt sayısının, o bölgeye olan jet benzeri akıştan kaynaklandığını aktarmıştır. Barrios-Pina ve diğerleri (2012) ise basamak sonrasında ısıtılmış alt duvar ile sıcaklık farklılıklarının etkilerini araştırmıştır.

Vogel ve Eaton (1985) geri basamak sonrasında akışın temas halinde olacağı alt yüzeye sabit ısı uygulaması olan bir deneysel düzenek kullanarak gerçekleştirmiştir. Maksimum ısı transfer katsayısının, türbülans yoğunluğunun en yüksek olduğu yeniden birleşmenin yukarı yönlü akışında oluştuğunu belirtmiştir. Isı transfer katsayısının ise yeniden birleşme istikametinde hızlıca düz plaka davranışına geçtiğini aktarmıştır. Isı transfer direncinin büyük bir kısmının duvara yakın bölgede gerçekleştiğini, basamağa yakın bölge dışında serbest kayma tabakalarındaki türbülansın çok güçlü olduğunu ve deneysel çalışmada ısı transferinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için, duvara yakın bölgedeki sıcaklık değişimlerinin iyi analiz edilmesinin önemini vurgulamıştır. Vogel ve Eaton (1985), çeşitli akış bölgelerinde ısı transfer katsayısının farklı fiziksel mekanizmalar tarafından kontrol edildiğini belirterek, yeniden birleşmenin üst bölgesine doğru duvara yakın tabakanın laminer sınır tabaka olarak büyüdüğünü ve geri dönen akışın merkezine doğru yaklaştıkça kalınlaştığını örnek olarak belirtmiştir. Bu tabaka

kalınlaşmasının ise ısı transfer katsayısının hızlı bir şekilde düşmesine neden olduğunu ve yeniden birleşmenin alt kısmında ise duvara yakın tabakanın sıradan türbülanslı sınır tabaka gibi davranmakta olduğunu belirtmiştir (Ateş 2015). Yeniden birleşme bölgesi içinde duvara yakın bölgede aslında ortalama bir akış olmadığını ve duvara yakın bölgenin etkin iletkenliğinin türbülans dalgalanmalarının yoğunluğu ile belirlendiğini aktarmıştır.

Isomoto ve Honami (1989) ve Ateş ve Pulat (2020) türbülans seviyesindeki değişimlerin geri basamak akışlarındaki etkilerini incelemiştir. Isomoto ve Honami (1989) farklı türbülans yoğunlukları kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Elde edilen veriler ile yeniden birleşmede giriş sınır tabaka boyunca hız dağılımı etkisi zayıfken yeniden birleşme uzunluğunun duvara yakın maksimum türbülans yoğunluğu ile güçlü bir negatif ilişkisi olduğunu belirtmiştir. Basamak sonrasındaki sürüklenme bölgesi olarak da adlandırabileceğimiz geri dönme bölgesindeki türbülansın, yeniden birleşme uzunluğunun belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını da ifade etmiştir. Ateş ve Pulat (2020) ise dış türbülans seviyesine bağlı olarak, basamak sonrası yeniden birleşme ve ısı transferi değişikliklerini incelemiştir. Türbülans seviyesinin artmasıyla yeniden birleşme uzunluğunun yavaşça azalmakta olduğu ve yerel Stanton (St) sayısı dağılımının da yavaşça arttığı belirtmiştir.

Fessler ve Eaton (1997) ise yapmış olduğu deneysel çalışmada dikey olarak yer verilen geri basamak düzeneğinde, akışkan içindeki yoğun parçacıkların ani genişlemeden sonra türbülanslı akışa olan tepkilerini incelemiştir. Basamak sonrasındaki partikül ortalama akış hızlarının genel olarak normal akış hızlarından fazla olduklarını ifade etmiştir. Akış hızlarındaki bu farkın deneysel düzeneğin alt kısımlarında arttığını ve bu artışın normal akışın ter basınç gradyenine parçacıklardan daha fazla daha fazla maruz kaldıklarını belirtmiştir.

Kanal yüksekliğinin kanal ile basamak arasındaki yüksekliğe oranı olarak ifade edebileceğimiz kanal genişleme oranının da geri basamak akışlarında akış karakteristikleri üzerine etkileri vardır. Beaudoin, Cadot, Aider ve Wesfreid (2004) ve Tihon, Penkavova, Havlica ve Simcik (2012) bu yönde araştırmalar gerçekleştirmiştir. Beaudoin ve diğerleri (2004) kanal genişlemesine bağlı olarak akıştaki istikrarsızlık

arasında ilişki olabileceğini; Tihon ve diğerleri (2012) genişleme oranının artmasıyla geri basamak akış yapısının daha da karmaşıklaştığını ifade etmiştir.

Geri basamak akışlarında akış karakteristiklerine etkili olan parametrelerin bazı çalışmalarda bir arada incelendiği de görülmektedir. Iwai, Nakabe ve Suzuki (2000), Lan, Armaly ve Drallmeier (2009) ve Xie ve Xi (2017) gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarda, Reynolds sayısının ve genişleme oranının akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerine olan etkilerini bir arada incelemiştir. Iwai ve diğerleri (2000) farklı Reynolds sayıları ve farklı genişleme oranları için yapmış oldukları çalışmalda, Nusselt sayısındaki artışın Reynolds sayısının ve genişleme oranının artmasına bağlı olduğunu ifade etmiştir. Lan ve diğerleri (2009) yeniden birleşme için Reynolds sayısı ve genişleme oranı etkisinin az olduğunu fakat ısı transferi için önemli bir etken olduğunu ifade etmiştir. Xie ve Xi (2017) ise genişleme oranının artmasına bağlı olarak birincil geri dönme bölgesinin boyutunda azalma olduğunu ve Reynolds sayısının artmasına bağlı olarak sıcaklık dağılımlarındaki dalgalanmaların arttığını ifade etmiştir.

Biswas, Breuer ve Durst (2004) geniş bir Reynolds sayısı aralığında ve farklı genişleme oranlarında laminer akışın kullanarak iki ve üç boyutta yapılan nümerik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmalarda akışın gerçekleştirildiği kanal için önemli tasarım parametrelerinden biri olan basınç kayıplarını incelenmiş ve basınç kayıplarının basamak yüksekliğinin artmasıyla arttığını, Reynolds sayısının artmasıyla da azaldığını belirtmiştir.

Chen, Nie, Armaly ve Hsieh (2006) ve Kherbeet, Mohammed, Munisamy ve Salman (2014) genişleme oranının akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerine etkisini araştırmıştır. Chen diğerleri (2006) basamak yüksekliği arttıkça basamak sonrasındaki birincil ve ikincil geri dönüş bölgelerinin boyutsal olarak büyüdüğünü; maksimum türbülans kinetik enerjisinin arttığını; basamak yakınlarında türbülans kinetik enerjisinin azaldığını ve Stanton sayısının küçüldüğünü ifade etmiştir. Kherbeet diğerleri (2014) ise mikro ölçekli basamak yüksekliğinin akış ve ısı karakteristiklerine etkisini incelemiş ve basamak yüksekliğinin artmasıyla Nusselt sayısının ve yüzey sürtünme katsayının arttığını; Reynolds sayısının ve basınç düşüşünün azaldığını aktarmıştır.

İlday ve Atlı (2006), Singh, Paul ve Ranjan (2011), Louda, Prihoda, Kozel ve Svacek (2013) ve Qi, Ding, Tu, Wang ve Wang (2021) ise basamak yapısının akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerine etkisini araştırmıştır. İlday ve Atlı (2006) farklı basamak modelleri (düz, 45º açılı, ters 45º açılı, çeyrek daire, yarım daire) kullanarak yapmış olduğu çalışmada dairesel yapıya sahip basamak kullanıldığında daha kısa yeniden birleşme uzunluğuna sahip olunacağını belirtmiştir. Singh ve diğerleri (2011) farklı basamak açılarının yeniden birleşme üzerindeki etkilerini incelemiş ve basamak açısındaki artışın yeniden birleşme uzunluğunu arttırdığını bildirmiştir. Louda ve diğerleri (2013) basamak yapısına eğim uygulayarak incelemeler yapmış ve düşük eğim açılarında nümerik çalışmaların yeniden birleşme uzunluğunu deneysel çalışmalardan daha düşük bulduğunu aktarmıştır. Qi ve diğerleri (2020) ise kademeli basamak yapısında basamak sayısındaki artışın, Nusselt sayısında artışa neden olduğunu ve maksimum Nusselt sayısının oluşma bölgesini basamağa yaklaştırdığını belirtmiştir.

Abu-Nada (2008), Togun ve diğerleri (2014), Qi ve diğerleri (2021) ve Boudiaf ve diğerleri (2020) nano akışkan kullanarak geri basamak akışlarında ısı transferini incelemiştir. Abu-Nada (2008) yeniden birleşme bölgesi içerisindeki yüksek Nusselt sayılarının, Reynolds sayısından bağımsız olarak nano parçacıkların termofiziksel özelliklerine bağlı olduğunu; fakat yeniden birleşme bölgesi dışında nano parçacıkların termofiziksel özellikleri dışında Reynolds sayısının da Nusselt sayısı üzerinde etkili olduğunu ifade etmiştir. Reynolds sayısından bağımsız olarak nano parçacıkların hacimsel oranının artmasıyla ortalama Nusselt sayılarında artış olduğunu belirtmiştir. Togun ve diğerleri (2014) akış hacminin artmasına bağlı olarak nano parçacık dağılımının ve Reynolds sayısının artmasına bağlı olarak ısı transferinin de arttığını belirtmiştir. Qi ve diğerleri (2020) akışkan olarak su yerine nano akışkan kullanılması durumunda ısı transferinin artacağını ifade etmiştir. Boudiaf ve diğerleri (2020) ise Reynolds sayısındaki artışın ve nano parçacık çaplarının azaltılarak nano parçacık dağılımını artırmanın ısı transferini artıracağını fakat nano partikül çaplarının küçülmesinin parçacıkların yerel ısı transferini de azaltacağını belirtmiştir.

Khanafer, Al-Azmi, Al-Shammari ve Pop (2008) ve Terhaar, Velazquez, Arias ve Sanchez-Sanz (2010) yapmış oldukları çalışmalarda titreşimli akış tercihinde bulunarak geri basamak akışlarındaki ısı transferini araştırmıştır. Khanafer ve diğerleri (2008)

Reynolds sayısının ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade ederek, ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısının artmasıyla arttığını; salınım frekansındaki artmayla ise azaldığını aktarmıştır. Terhaar ve diğerleri (2010) ise geri basamak akışlarında titreşimli akışların ısı transferini azalttığını aktarmıştır.

Geri basamak akışlarında basamak sonrasına yerleştirilen çeşitli engelleyicilerin akış karakteristikleri ve ısı transferine olan etkileri de çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Kumar ve Dhiman (2012), Selimefendigil ve Öztop (2013, 2014, 2015), Ahmed, Kherbeet, Ahmed ve Salman (2018) ve Beyazoğlu ve diğerleri (2022) yapmış oldukları çalışmalarda bu yönde bir uygulama gerçekleştirmiştir. Kumar ve Dhiman (2012) basamak sonrasındaki uygun bir pozisyona dairesel bir engelin koyulması halinde, basamak sonrasındaki hız alanının değişeceğini ve böylelikle basamak sonrası alt yüzeyde ısı transferinin arttırılabileceğini ifade etmiştir. Selimefendigil ve Öztop (2013) basamak sonrasında üst duvara monte edilmiş akışı engel ince kanatlı bir geri basamak akışını araştırmış ve engelleyici kanatın, akışın hareketini yönlendirerek basamak sonrasında oluşan geri dönme bölgesinin uzunluğunu etkileyerek ısı transferini arttırdığını ifade etmiştir. Selimefendigil ve Öztop (2014) basamak sonrasında manyetik kutuplar etkisinde dönen bir silindirin olduğu ve akışkan olarak sıvı demirin kullanıldığı bir geri basamak akışını incelemiş ve Reynolds sayısının artmasına bağlı olarak Nusselt sayısında arttığını ifade etmiştir. Manyetik kutup şiddetlerinin ve silindir dönüş açılarının geri dönme bölgelerinin uzunluk ve boyutunda kontrol elemanı olarak kullanılabileceğini ve silindir dönüş açısındaki etkinin ise düşük Reynolds sayıları için yerel Nusselt sayısı dağılımında daha belirgin olduğu sonucunu aktarmıştır. Selimefendigil ve Öztop (2015) basamak sonrasında dönen bir silindirin ve akışkan olarak nano akışkanın kullanıldığı geri basamak akışında Reynolds sayısının artmasına bağlı olarak Nusselts sayısında neredeyse doğrusal bir artış olduğunu belirtmiştir. Bu artışa akışkanın debisinin artmasına bağlı olarak akışkan içinde yer alan parçacıkların daha fazla ısıl iletkenliğe ulaşması olduğu sonucuna varmıştır. Sistemdeki dönen silindirin artan açısal hızına bağlı olarak akış fonksiyonlarının arttığını ifade etmiş ve akışın debisine bağlı olarak akım çizgileri ve sıcaklık dağılımlarının değişmediğini aktarmıştır. Ahmed ve diğerleri (2018) ise mikro ölçekte basamak yapısına sahip bir geri basamak akışında basamak sonrasında üst duvara konumlandırılmış farklı tipteki girdap üreteçlerinin etkilerini incelemiş ve akışın girdap üreticileri üzerine gelme açısının ısı transferinin artmasında önemli bir etkiye sahip

olduğu belirtmiştir. Girdap üreticilerine akışın yüksek bir açıyla gelmesinin ısı transferini artırdığı; akışın 60º'lik bir açıyla gelmesi durumunda ise üreteç olmayan duruma göre Nusselt sayısında çok dik bir artış olduğunu ifade etmiştir. Farklı geometrilere sahip olan girdap üreteçleri arasından ise ısı transferini artırmak için en uygun geometrinin dikdörtgensel olması gerektiğini aktarmıştır. Beyazoğlu ve diğerleri (2022) laminer akış koşullarında üst duvara monte edilmiş üçgen çıkıntıların olduğu baskı devre kartlarında ısıtılmış blokların ısı transferinin arttırılması için üçgen kılavuz çıkıntıların etkilerini sayısal olarak araştırmış ve üçgen çıkıntıların boyutlarının alt yüzeyde akış modellerini etkilediğini; çıkıntıların olduğu üst duvarda çıkıntıdan sonra bir geri dönme bölgesi oluştuğunu ifade etmiştir. Bu geri dönme bölgesinin büyüklüğünün Reynolds sayısının artışına bağlı olarak büyüdüğünü ve sabit bir genişleme oranında Reynolds sayısının artışına bağlı olarak yeniden birleşme bölgesinin büyüklüğünün arttığını ifade etmiştir. Baskı devre kartlarındaki blokların ve üst yüzeyde bulunan üçgen çıkıntıların Reynolds sayısı ile birlikte ikinci geri dönme bölgesi oluşumunda büyük etkiye sahip olduğunu ve üst yüzeydeki çıkıntıların büyüklüğü arttıkça ısı transferinin de arttığını ifade etmiştir.

Ateş (2015) ise geri basamak akışlarında dış türbülansın ve basınç gradyeninin ısı transferi üzerine olan etkilerini nümerik olarak incelemiştir. Aynı şekilde basamak yüksekliğindeki değişimlerinde incelendiği yüksek lisans tezi çalışmasında; basınç gradyeni etkisi olmaksızın giriş türbülans seviyesi arttıkça yeniden birleşme uzunluğunun küçüldüğünü ve Stanton sayısı dağılımının yavaşça arttığını belirtmiştir. Türbülans seviyesi etkisi olmaksızın basamak sonrasında üst duvardaki eğime bağlı olarak, ters basınç gradyeni arttıkça yeniden birleşme uzunluğunun büyüdüğünü ve Stanton sayısının da yavaşça azaldığını ifade etmiştir. Genişleme oranının artmasına bağlı olarak, maksimum ısı transferinde ve basamak sonrasındaki kanal boyunca oluşan ısı transferinde düşüş olduğunu fakat ısı transferi gelişim bölgesinde ise artış olduğunu aktarmıştır.

2.3.2. Deney Tasarımı İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Mühendislik hesaplamalarında optimizasyon amaçlı yapılan çalışmalarda deney tasarımı uygulamaları oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Deney tasarımı çalışmaları zaman, maliyet, iş gücü, ekipman vb. bir çok yönden sağlamış olduğu avantajlar sebebiyle çok çeşitli alanlarda uygulamaya esas olmalarında neden olmuştur. Deney tasarımı

uygulamaları elektronik, mekanik ya da elektromekanik sistemlerin soğutulması; kara, deniz ve hava taşımacılığında dış etmenlerin ulaşım araçları üzerindeki olumsuz etkilerinin bertaraf edilmesi; ısı değiştiricilerinin tasarım parametrelerinin iyileştirilmesi, kapalı bir ortamdaki çeşitli faktörlerin ısı transferine olan etkilerinin incelenmesi, çeşitli makinelerinin tasarım parametrelerinin belirlenmesi gibi oldukça çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Deney tasarımı çalışmaları kapsamında Tong, Su ve Wang (1997) Taguchi metodu kullanarak optimum faktör optimizasyonunun belirlenmesi ve doğrulamanın gerçekleştirilmesi aşamalarını içeren bir çalışma önermesinde bulunmuştur. Böylelikle her türlü çoklu yanıt probleminde önerilen yöntemin farklı veri türlerini içeren çok yanıtlı problemi aynı anda ele alabileceğini ve her yanıtın önemini ilgili yanıtın ağırlığını değiştirerek kolayca ayarlanabileceğini belirtmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yoluyla elde edilen sonuçların deney tasarımı yaklaşımıyla optimizasyonun yapıldığı elektronik, mekanik ya da elektromekanik sistemlerin soğutulmasına yönelik çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Cheng, Chen ve Chung (2004) ızgara dizilimine sahip çok çipli modüllerin etkili termal karakterizasyonunu yanıt yüzey yöntemi ile inceleyerek sıcaklığa etki eden faktörlerin değerlendirmesini yapmıştır. Cheng, Xu, Zhu, Zhu ve Luo (2006) bir süper bilgisayarda kullanılabilecek sıvı soğutmalı çiplerin termal performansını yanıt yüzey yöntemi kullanarak incelemiş ve çiplerde kullanılan malzemelerin ısıl iletkenlik performansında termal yağ, akışkan hızı ve akışkanın giriş sıcaklığının sistemin ısıl performansında önemli bir etkisinin olduğunu ifade etmiştir. Mao, Hsiang ve Yue (2017) karmaşık yapılı bir mikro soğutucuda nano akışkanın akış karakteristiklerini ve ısı transferi karakteristiklerini yanıt yüzey yöntemi kullanarak değerlendirmiş ve nano parçacıkların hacimsel oranının artmasına bağlı olarak ısı transferinin artırılabileceği ve nano parçacık hacimsel oranının nano parçacık çapının etkisinden daha yüksek olduğunu ifade etmiştir. Zhang, Ho ve Fu (2018) yağlı trafo soğutma sistemi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Kılıç ve Şentürk (2019) ise yüksek güç tüketen bir mikroçipin soğutulması için mini kanallı soğutucu bloğun ısıl ve hidrolik performansını Taguchi metodu kullanarak analizini yapmıştır. Mini kanal uygulamalarının elektronik

elemanların soğutulması için etkin bir yol olduğu ve soğutucu bloğun malzeme seçiminde ısıl iletkenlik katsayısının önemli bir faktör olduğunu belirtmiştir.

Kara, deniz hava taşımacılığı alanında dış etmenlerin ulaşım araçları üzerindeki etkilerinin optimizasyonunda hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla değerlendirilmeler gerçekleştirilmiştir. Bayraktar ve diğerleri (2005) bir kamyonda sürüklenme etkisini azaltmak amacıyla üç farklı yönlendirici tasarımı yapıp, her bir yönlendiricinin sürüklenme etkisini faktöriyel tasarım yoluyla belirlemiş ve yönlendiricilerin parametre hassasiyetlerini belirlemiştir. Yoon ve Lee (2018) dört rotorlu bir insansız hava aracının (drone) aerodinamik parametre analizlerini gerçekleştirmiş ve uçuş için gerekli kalkışı sağlayacak kuvvete en fazla etkileyen parametrelerin rotor açıları ile aracın kalkış pozisyonu olduğunu belirmiştir. Seok, Kim, Seo ve Rhee (2019) deniz taşımacılığında kullanılan tankerlerin maruz kaldığı dalgaların gövdeye etki eden direnci azaltmak amacıyla yanıt yüzey yöntemi kullanarak pruva şeklini iyileştirmek amacıyla çalışmalar yapmıştır.

Turgut ve Dikici (2011), Kotcioglu, Cansız ve Khalaji (2013), Ünverdi ve Küçük (2019) ve Göktepeli, Atmaca ve Çakan (2020) ısı değiştiricilerin tasarım parametrelerinin optimizasyonu için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve deney tasarımı çalışmalarını bir arada gerçekleştirmiştir. Turgut ve Dikici (2011) pervane şeklinde üretilen türbülans artırıcı yapıların bir ısı değiştiricisinin iç borusuna yerleştirilmesi ile oluşturulan dönmeli akışı Taguchi metodu ile incelenmiş ve ısı transferine en fazla etki eden parametrelerin sırasıyla türbülans artırıcı yapıların kanat açıları, Reynolds sayısı, türbülans artırıcı yapıların arasındaki mesafe olduğunu; kanat çapındaki değişim etkisinin ise son derece düşük olduğunu belirtmiştir. Kotcioğlu ve diğerleri (2013) periyodik olarak kesintiye uğramış uzaklaşan ve yakınsayan kanal akış alanlarını içeren plakalara sahip içeren dikdörtgen kanallı bir ısı değiştiricisindeki tasarım parametrelerinin Taguchi metodu kullanarak incelemiş ve kanal genişliği ile beraber yarıklı kanal yapısının basınç düşüşünü azalttığını ifade etmiştir. Ayrıca kanal genişliğinin ve plakaların eğim açılarının artmasıyla ısı transfer oranını arttığını aktarmıştır. Ünverdi ve Küçük (2019) havadan havaya çalışan bir çapraz akışlı levhalı ısı değiştiricilerinin ısıl ve hidrolik performansı Taguchi metodu kullanarak incelemiş ve ısı değiştirici tasarımında en etkili parametrelerin kanal yüksekliği ve ortalama hava akış hızı olduğu belirtmiştir. Göktepeli

ve diğerleri (2020) ise paralel plakalar arasındaki ısı transferi ve türbülanslı akış özelliklerini, Taguchi metodu ile incelemiş ve kiriş yüksekliklerinin ısı transferi ve akış karakteristiklerini belirlemede en önemli faktör olduğunu belirtmiştir. Ayrıca kirişler arası mesafenin artmasına bağlı olarak ısı transferinin de arttığını; kiriş yüksekliği, kirişler arası mesafe ve Reynolds sayısının artmasına ayrı ayrı Nusselt sayısında artışa ve bu artışların da basınç kayıplarında da artışa neden olduğunu belirtmiştir.

Coşkun, Motorcu, Yamankaradeniz ve Pulat (2012) ve Bademlioğlu, Canbolat, Yamankaradeniz ve Kaynaklı (2019) ısı geri kazanım süreçleri ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir. Coşkun ve diğerleri (2012) mekanik bir ısı pompası kullanarak, atık ısı geri kazanım sisteminin performansını Taguchi metodu yardımıyla optimize etmiş ve yapılan analizler sonucunda sistem performansına en fazla etki eden parametrenin atık ısı sıcaklığı olduğunu ve bunu kompresör hızının takip ettiğini ifade etmiştir. Bademlioğlu ve diğerleri (2019) ise geri kazanımlı bir ısı değiştiricisi kullanan örnek organik Rankine çevriminin performans analizini Taguchi metoduyla gerçekleştirmiş ve atık ısı sıcaklık kaynağının sistemin performansına etki eden diğer faktörlere göre daha fazla olduğunu belirtmiştir.

Kapalı bir kanal ya da tüp içerisindeki çeşitli etkenlerin ısı transferi üzerine olan etkilerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve deney tasarımları kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmaları da çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Rout, Hussein ve Mohanty (2014) içerisinde kanat yer alan bir tüpteki kanat parametrelerinin ve Nusselt sayısı aracılığıyla ısı transferine ve Reynolds sayısı aracılığıyla sürtünme faktörüne olan etkisini yanıt yüzey yöntemi kullanarak incelemiştir. Düşük kanat yükseklikleri için kanat sayısının artmasıyla Nusselt sayısının artış eğiliminin olduğunu fakat yediden fazla kanat söz konusu olduğunda Nusselt sayısının azalmaya başladığını belirtmiştir. Ayrıca kanat kalınlığının Nusselt ve Reynolds sayılarının değişiminde kanat yüksekliği ve sayısına göre önemli olmadığını aktarmıştır. Lee ve diğerleri (2015) Taguchi metodu kullanarak yapmış oldukları çalışmada soğutma kanallarının içinde mikro yapılar tasarlandığında akış sürtünmesinin en aza indirgenebileceğini ve ısı transferinin artırılabileceğini ifade etmiştir. Mamourian, Shirvan, Ellahi ve Rahimi (2016) bir tarafı dalgalı geometriye sahip kare bir alandan geçen nano akışkandaki ısı transferini maksimize etmek için Taguchi metodu aracılığıyla incelemeler yapmış ve nano parçacık

hacimsel oranı artmasıyla Nusselt sayısında artış olduğu ve entropi üretiminde ise azalma olduğunu ifade etmiştir. Yue, Hsiang ve Shih (2016) dalgalı bir kanal içerisindeki nano akışkanın akış karakteristiklerini ve ısı transferi karakteristiklerini yanıt yüzey yöntemiyle incelemiştir. Isı transferinde meydana gelen artışın ana olarak nano parçacıkların hacimsel oranına, dalga boyuna ve genliğine bağlı olduğunu ifade etmiştir. Reynolds sayısından bağımsız olarak nano akışkandaki basınç düşüşünün ise dalga genliğinin ve nano parçacıkların hacimsel oranının artmasıyla arttığını belirtmiştir. Yue, Hsiang ve Kuan (2016) ise bükülen bir kanalda (C şeklinde) nano akışkanın akış karakteristiklerini ve ısı transferi karakteristiklerini yanıt yüzey yöntemi ile incelemiştir. Kanalın yapısından dolayı akış yönündeki sürekli değişimin, düzensizliği artıracağını dolayısıyla termal performansın da artacağını belirtmiştir. Kanalın geometrik yapısının sürtünme faktörüne kıyasla nano parçacıkların hacimsel oranını değiştirmede daha önemli bir etkiye sahip olduğunu aktarmıştır.

Janani ve diğerleri (2017) ve Nath ve Krishnan (2019) gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarda basamak akışlarını incelemiştir. Janani ve diğerleri (2017) önünde kare engelleri olan iki kademeli bir ileri basamak akışındaki ısı transferini; basamak yüksekliği, engel boyutu, Reynolds sayısı ve engel ile basamak arasındaki mesafe parametreleri üzerinden Taguchi metoduyla incelemiştir. Sırasıyla basamak yüksekliğinin ve Reynolds sayısının ısı transferi üzerindeki en etkin parametreler olduğunu ifade etmiştir. Nath ve Krishnan (2019) ise akışkan olarak içerisinde alüminyum nano parçacıkların bulunduğu su ve etilen glikol karışımı kullanılan bir geri basamak akışında; konvektif ısı ve kütle transferinin akış, geometri ve termofiziksel karakteristiklerini hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve Taguchi metodu kullanarak optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Genişleme oranı, Reynolds sayısı, kaldırma oranı, nano parçacıkların hacimsel oranı, nano parçacıkların şekli ve Grashof sayılarını kontrol parametresi olarak kullanarak genişleme oranı ile nano parçacıkların hacimsel oranının maksimum ısı ve kütle transferine ve minimum duvar kayma gerilmesine ulaşılmasında önemli katkıları olduğunu ifade etmiştir.

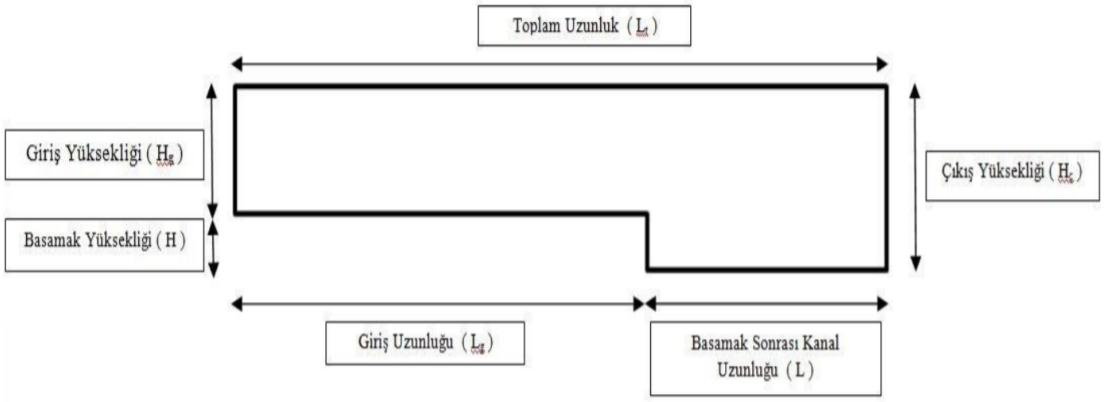
Farklı alanlarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile birlikte kullanılabilen deney tasarımı uygulamalarını çoğaltmak mümkündür. Sun, Kim, Yang, Kim ve Yoon (2017) bir siklon ayrıştırıcısının toplama verimliliğini artırmak; Naderi ve Khamehchi (2018) dikey bir

sondaj kuyusunun taşıma verimliliğini artırmak; Yiğit (2018) dik eksenli rüzgar türbinlerinin kanatlarında daha yüksek momentum katsayısına ulaşmak; Leman, Wulandari ve Bintara (2019) Pelton türbinlerinin verimliliğini optimize etmek; Li ve diğerleri (2020) rüzgar enerjili bir santrifüj pompasının hidrolik tasarımını optimize etmek amacıyla kombine çalışmalar gerçekleştirmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

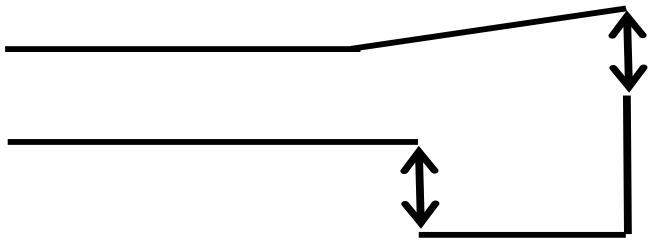
Bir geri basamak akışının geometrik yapısı ve bu yapıda tanımlanan geometrik büyüklükler Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu geometride giriş yüksekliği (H_g), basamak yüksekliği (H), çıkış yüksekliği ($H_ç$), giriş uzunluğu (L_g), basamak sonrası kanal uzunluğu (L) ve toplam uzunluk (L_t) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.1. Geri basamak akışı temel geometrisi (Ateş 2015)

Bu çalışmada öncelikli olarak Vogel ve Eaton (1985) tarafından yapılan deneysel çalışmadaki geri basamak akışı nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan incelemede hazırlanan simülasyonun deneysel çalışma ile doğrulaması yapıldıktan sonra, Driver ve Seegmiller (1985) tarafından yapılan deneysel çalışmadaki geri basamak geometrisinin üst duvarındaki açısal duvar yüksekliğinin değişimi doğrulaması yapılan modele uygulanarak, simülasyonda modifikasyonlar yapılmıştır. Isomoto ve Honami (1989) tarafından yapılan deneysel çalışmadaki farklı türbülans seviyelerini, doğrulaması yapılan modifiye geometriye uygulanarak farklı türbülans seviyelerinin akış ve ısı karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca farklı genişleme oranlarının da karakteristikler üzerindeki etkilerinin araştırılması için Driver ve Seegmiller (1985) ve Isomoto ve Honami (1989) çalışmalarındaki basamak yükseklikleri de modifiye edilmiş

modele uygulanmıştır. Uygulanan geometrik modifikasyonlar Şekil 3.2'de gösterilmekte olup, üst duvardaki açısal yükseklik değişimi için toplam altı farklı model, basamak yüksekliği değişimi için ise toplam üç farklı modifikasyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Geometrik modifikasyon bölgeleri

İki boyutta yapılan bu çalışmalardaki hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ANSYS FLUENT Student 2020 R1 programı ve k ε türbülans modeli aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde akışkan olarak 20ºC' deki hava kullanılmıştır.

3.1.1. Korunum Denklemleri ve Türbülans Modelleri

3.1.1.1. Korunum Denklemleri

Akışkan karakterli maddelerin hareketlerini tanımlamayan Navier – Stokes denklemlerindeki değişkenlerin indis gösterimleri hız bileşenlerine benzer bir şekilde ortalama ve dalgalanma bileşenlerine ayrılabilmektedir.

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \tag{3.1}$$

Denklem 3.1'de u_i anlık akışkan hızını ifade etmekte olup, u'_i hız dalgalanmasını ve $\overline{u}_i$ ise herhangi bir noktadaki u_i' nin zaman ortalama değeridir. Buradan yola çıkılarak diğer korunum denklemlerinin de ifadeleri gerçekleştirilebilir.

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.2}$$

Momentum denklemi;

$$\rho \frac{\partial u_i u_j}{x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\overline{u_i' u_j'}\right) \tag{3.3}$$

Enerji denklemi;

$$\rho c_p \frac{\partial u_i T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \overline{u_i' T'}\right] \tag{3.4}$$

Pulat, Isman, Etemoğlu ve Can (2011), momentum denkleminde $-\overline{u'_i\, u'_j}$ olarak ifade edilen Reynolds gerilimini yerel hız geçişleri ve türbülans viskozitesi (μ_t) ile ilişkili olduğunu (Boussinesq Hipotezi) ve Launder ve Spalding (1972)' nin bunu belirttiğini ifade etmiştir. Türbülans viskozitesi olan kullanılan (μ_t), türbülans modeline bağlı olarak farklı modellemeler ile de hesaplanabilmektedir.

3.1.1.2. Standard k - ε (St. k – ε) türbülans modeli

Standant k ε türbülans modeli Launder ve Spalding (1972) tarafından sunulan klasik iki denklemli bir modeldir. Bu modelde,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.5}$$

k türbülans kinetik enerjisini, *ε* ise türbülans kinetik enerjisinin yayılım oranını temsil eder. Buradaki değişkenler ise aşağıdaki taşınım denklemlerinden elde edilirler.

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon \tag{3.6}$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.7)$$

Denklem 3.6 ve 3.7'de G_k, ortalama hız geçişlerine bağlı olarak türbülans kinetik enerji üretimini temsil eder. Aynı denklemlerdeki diğer terimler ise şu şekildedir.

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3.8)$$

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.9)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \quad (3.10)$$

Bu modeldeki sabitlerin değerleri $C_{1\varepsilon} = 1{,}44$; $C_{2\varepsilon} = 1{,}44$; $C_\mu = 0{,}09$; $\sigma_k = 1{,}0$ ve $\sigma_\varepsilon = 1{,}3$' tür.

3.1.1.3. Re – Normalization Group k – ε (RNG k – ε) türbülans modeli

Re – normalization k-ε türbülans modeli, standart k-ε modeline benzemekle beraber, farklı sabitleri ile birlikte taşınım denklemlerinde de ek terimleri vardır. Ayrıca bu model türbülans girdap etkisini de içermekte olup; düşük Reynolds sayılarında da akışları tahmin etme özelliğine sahiptir (Hofmann, Kaiser, Kind ve Hartin, 2007). RNG k-ε türbülans modelinin taşınım denklemleri, standart k - ε türbülans modelindeki taşınım denklemlerine benzer formlara sahiptir (Pulat, Isman, Etemoglu ve Can, 2011).

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(ku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{eff}\frac{\partial k}{dx_j}\right) + G_k - \rho\varepsilon \quad (3.11)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + R_\varepsilon \quad (3.12)$$

Bu modelde, G_k standart k - ε türbülans modelindeki gibi hesaplanmaktadır. α_k ve α_ε sabitleri 1,393 olup; RNG k – ε türbülans modeli ile standart k-ε türbülans modeli arasındaki temel fark ise ek terim olan ε 'nun aşağıdaki denklemle ifadesidir.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta + \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{3.13}$$

Denklem 3.13'te yer alan ifadeler $\eta \equiv \frac{S_k}{\varepsilon}$; $\eta_0 = 4{,}38$ ve $\beta = 0{,}012$'dir. Model sabitleri ise $C_{1\varepsilon} = 1{,}42$ ve $C_{2\varepsilon} = 1{,}68$'dir.

3.1.1.4. Realizable k – ε (Real. k – ε) türbülans modeli

Shih, Zhu ve Lumley (1994) tarafından geliştirilen bu modelde türbülans viskozitesi yeniden formülleştirilmiştir. Bu model, türbülanslı akışların fiziği ile tutarlı olan Reynolds gerilmeleri üzerindeki bazı matematiksel kısıtlamaları karşılamaktadır. Fakat Realizable k – e türbülans modeli, ortalama hız bileşenlerini tahmin etmede diğer k – e modellerinden belirgin şekilde daha az hassasiyet göstermektedir (Pulat ve diğerleri, 2011). Bu modelde C_μ sabit olmayıp, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \tag{3.14}$$

Denklem 3.14'te ifade edilen terimler ise aşağıdaki gibidir.

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \widetilde{\Omega_{ij}} \widetilde{\Omega_{ij}}} \tag{3.15}$$

$$\widetilde{\Omega_{ij}} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \tag{3.16}$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \tag{3.17}$$

$\overline{\Omega_{ij}}$ açısal hızın ω_k referans çerçevesi ile dönen ortalama dönme oranının indis gösterimidir. Bu modelde taşınım denklemleri ise aşağıdaki gibidir.

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(ku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon \tag{3.18}$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} \tag{3.19}$$

S ve G_k, standard k - ε türbülans modelindeki gibi hesaplanması karşın farklı olan ifadeler aşağıdaki gibidir.

$$C_1 = \max\left(0{,}43\ \frac{\eta}{\eta + 5}\right) \tag{3.20}$$

$$\eta = S\ \frac{k}{\varepsilon} \tag{3.21}$$

Bu modeldeki diğer sabitler $A_0 = 4{,}04;\ A_s = \sqrt{6}\cos\phi;\ \phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}\ \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\widetilde{S^3}}\right);$ $\widetilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$; $C_{1\varepsilon} = 1{,}44;\ C_2 = 1{,}9;\ \sigma_k = 1{,}0$ ve $\sigma_\varepsilon = 1{,}2$' dir.

3.1.2. Duvar Fonksiyonları

Akışın duvara yakın bölgede viskoz alt bölge, tampon bölge ve tamamen türbülanslı bölge olmak üzere üç alt bölge mevcuttur. Viskoz alt bölgede, akış neredeyse laminer olup, moleküler viskozite baskındır. Tampon bölge, viskoz alt bölge ile tamamen türbülanslı bölge arasında bulunup, moleküler viskozite ve türbülans bu bölgede eşit derecede önemlidir. Tamamen türbülanslı bölgede ise türbülans ana etmendir (Pulat ve diğerleri, 2011).

Duvar bölgesini modellemek için iki yaklaşım mevcuttur. Bir yaklaşımda, viskoz alt katman ve tampon katmanı çözülmeyip, bunun yerine bu bölgeler için duvar fonksiyonları adı verilen yarı deneysel formüller kullanılır. Duvar fonksiyonları, duvar ile tamamen türbülanslı bölge arasında bir köprü görevi görür. Diğer yaklaşımda ise

türbülans modelleri, viskoz alt tabakayı içeren ince bir ağ kullanılarak bu bölgelerde geçerli olacak şekilde değiştirilir. Bu nedenle, ikinci yaklaşım duvara yakın modelleme olarak adlandırılmaktadır (Pulat ve diğerleri, 2011).

3.1.2.1. Standart duvar fonksiyonu (standard wall function)

Endüstriyel akışlarda yaygın olarak kullanılmakta olan bu duvar fonksiyonu, Launder ve Spalding (1974) çalışmasına dayandırılmaktadır (Pulat ve diğerleri, 2011). Duvara yakın bölgede momentum denklemi bu model için aşağıdaki gibidir.

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) \tag{3.22}$$

$$y^* \equiv \frac{\rho\, C_\mu^{0,25} k_p^{0,5} y_p}{\mu} \tag{3.23}$$

Denklem 3.22 ve 3.23'deki yer alan terimler ise belirli bir noktadaki türbülans kinetik enerjisi olarak k_p; belirli bir noktanın duvara olan uzaklığı olan y_p; E = 9,793 (ampirik sabit) ve κ = 0,4187 (von Karman sabiti)'dir.

Enerji denkleminde yer alan terimler ve ifadeler ise $T\omega$ duvar sıcaklığını, T_p duvara bitişik olan hücre sıcaklığını ve $\dot{q}$ duvar ısı akısını belirtmek üzere Denklem 3.24'te gösterilmektedir.

$$T^* \equiv \frac{\left(T_\omega - T_p\right)\rho c_p\, C_\mu^{0,25} k_p^{0,5}}{\dot{q}} \tag{3.24}$$

Türbülans kinetik enerjisi k ve ε ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_k \approx \tau_\omega \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_\omega \frac{\tau_\omega}{\kappa \rho C_\mu^{0,25} k_p^{0,5} y_p} \tag{3.25}$$

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{0,75} k_p^{1,33}}{\kappa y_p} \tag{3.26}$$

3.1.2.2. Ölçülebilir duvar fonksiyonu (scalable wall function)

Ölçülebilir duvar fonksiyonu, y^+ değerinin 11'in altında olduğu ağ örgü modellemelerinde, iyileştirmelerin standart duvar işlevlerinin bozulmasını önlemektedir. y^+ değerinin 11'in üzerinde olduğu durumlar için ise Standart duvar fonksiyonu ile aynı özelliklere sahiptir (Chmielewski ve Gieras, 2013).

3.1.2.3. Dengesiz duvar fonksiyonu (non-equilibrium wall function)

Kim ve Choudhury (1995) iki tabakalı duvar yaklaşımı gösteren dengesiz duvar fonksiyonunun, standart duvar fonksyonundaki gibi sıcaklık aynı kalmasına rağmen, ortalama hızın basınç değişim etkilerine daha duyarlı olduğunu belirtmiştir.

$$\left[U - \frac{1}{2}\frac{dp}{dx}\left(\frac{y_v}{\rho\kappa\sqrt{k}}\ln\left(\frac{y}{y_v}\right) + \frac{y - y_v}{\rho\kappa\sqrt{k}} + \frac{y_v^2}{\mu}\right)\right]\left(\frac{C_\mu^{0,25} k^{0,5} y}{\tau_\omega/\rho}\right) = \frac{1}{\kappa}\ln\left(E\frac{\rho C_\mu^{0,25} k^{0,5} y}{\mu}\right) \tag{3.27}$$

Denklem 3.27'da belirtilen y_v, fiziki viskoz alt tabaka kalınlığı olup, aşağıdaki denkleme göre tanımlanır.

$$y_v \equiv \frac{11{,}225\mu}{\rho C_\mu^{0,25} k_p^{0,5}} \tag{3.28}$$

Türbülans miktarları ile ilgili tahminler ise Denklem 3.29, 3.30 ve 3.31'de gösterilmiştir.

$$\tau_t = \begin{cases} 0, & y < y_v \\ \tau_\omega, & y > y_v \end{cases} \tag{3.29}$$

$$k = \begin{cases} \left(\frac{y}{y_v}\right)^2 k_p, & y < y_v \\ k_p, & y > y_v \end{cases} \tag{3.30}$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{2vk}{y^2}, & y < y_v \\ \frac{k^{1,33}}{C_1^* y}, & y > y_v \end{cases} \tag{3.31}$$

3.1.2.4. Geliştirilmiş duvar davranışı (enhanced wall treatment)

Geliştirilmiş duvar davranışı iki farklı yapıdan oluşmaktadır. Bu yapılardan biri olan iki tabakalı modelde, laminer alt tabakayı çözümleyebilmek için sık ağ örgüsü gerekmekte, fakat bu ağ örgüsünün tüm duvarların çözüm alanlarında küçük olması da gerekmektedir. Tüm geometriler için uygun olmama ihtimali, iki tabakalı modeli geliştirilmiş duvar davranışının bir diğer yapısı olan geliştirilmiş duvar fonksiyonu ile birleştirilmesi avantajlı kılmaktadır. (Pulat ve diğerleri, 2011)

İki tabakalı modelde tüm çalışma alanı viskoziteden etkilenen bölgeye bölünmekte ve tam türbülans bölgesine göre duvar mesafesini baz alarak Reynolds sayısı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Re_y \equiv \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \tag{3.32}$$

Denklem 3.32'de yer alan *y* şu şekilde ifade edilir.

$$\mathrm{y} \equiv \min_{\vec{r_w} \epsilon \vec{\Gamma_w}} \|\vec{r} - \vec{r_w}\| \tag{3.33}$$

Denklem 3.33'de ifade edilen $\vec{r}$ alanın bir noktasındaki konum vektörü ve $\vec{r}_w$ de duvar sınırındaki konum vektörüdür. Eğer Re_y>200 ise, k-ε modeli ya da RSM modeline göre aksi takdirde Wolfstein'ın tek denklem modeline (Wolfstein 1969) göre çalışır. Türbülans viskozitesi Denklem 3.34'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\mu_{t,2layer} = \rho C_\mu l_\mu \sqrt{k} \tag{3.34}$$

Denklem 3.34'te belirtilen l_μ , uzunluk ölçeği olup, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$l_\mu = \mathrm{y} C_l^* \left(1 - e^{-Re_y / A_\mu}\right) \tag{3.35}$$

$$\mu_{t,enh} = \lambda_\varepsilon \mu_t + (1 - \lambda_\varepsilon)\mu_{t,2layer} \tag{3.36}$$

Geliştirilmiş duvar davranışında Kader'in (1981) önermiş olduğu bir fonksiyon ile laminer ve türbülans yasaları harmanlanır. Bu ifadeler ise Denklem 3.37, 3.38, 3.39 ve 3.40'da gösterilmiştir.

$$u^+ = e^{\Gamma} u_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} u_{turb}^+ \tag{3.37}$$

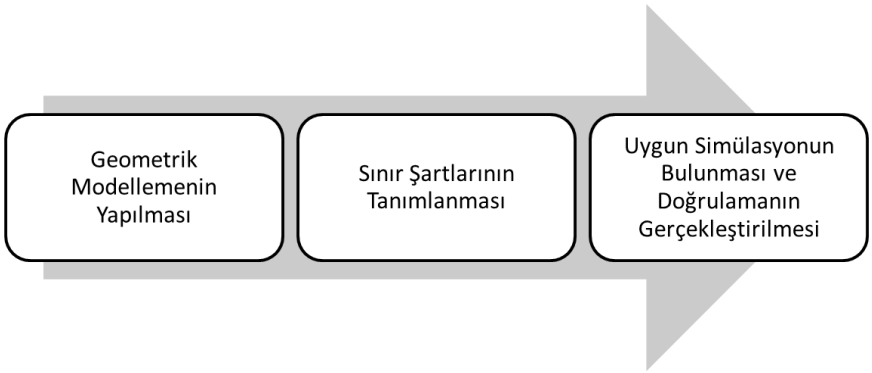
$$\Gamma = -\frac{0{,}01\,(y^+)^4}{1 + 5y^+} \tag{3.38}$$

$$T^+ = e^{\Gamma} T_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} T_{turb}^+ \tag{3.39}$$

$$\Gamma = -\frac{0{,}01\,(Pry^+)^4}{1 + 5Pr^3 y^+} \tag{3.40}$$

3.1.3. Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği Çalışmaları İçin Sayısal Yöntem

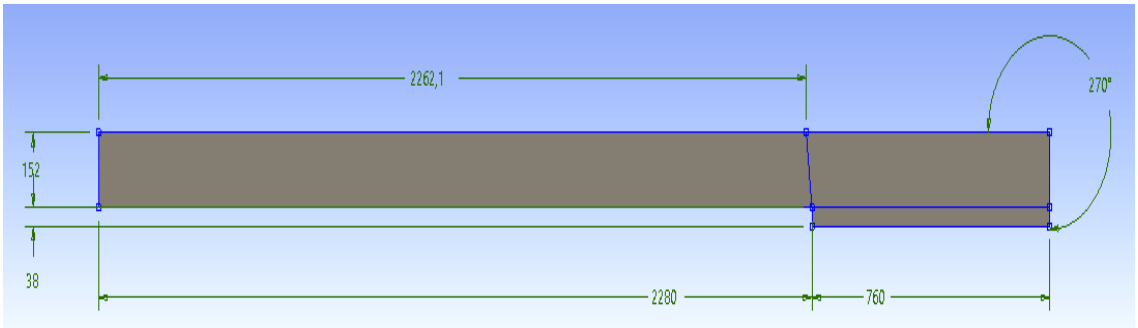
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarının geçerliliği ve kabul edilebilirliği, yapılan çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçların doğrulanabilir olmasına bağlıdır. Doğrulamanın (validation) gerçekleştirilmesine bağlı olarak yeni değişkenlerle yeni analizlerin yapılabilmesi, yapılan yeni analizlerin sonuçlarının değerlendirilebilmesi hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmasının doğrulanması sonucunda mümkün olmaktadır. Doğrulama çalışmaları birkaç adımdan oluşmakta olup bu işlem adımları sayısal yöntem uygulama adımları olarak adlandırılmıştır. Bu adımlar Şekil 3.3'te belirtilmiştir.



Şekil 3.3. Sayısal yöntem uygulama adımları

3.1.3.1. Geometrik Modeller ve Modifikasyonlar

Sayısal yöntem uygulamasının ilk adımı olarak Vogel ve Eaton (1985) çalışmasının geometrik modeli oluşturulmuştur. Bu modeldeki akış geometrisi; giriş yüksekliği 152 mm, çıkış yüksekliği 190 mm, basamak yüksekliği 38 mm, basamak sonrası kanal uzunluğu 760 mm ve kanalın toplam uzunluğu 3040 mm olacak şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan geometri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Vogel ve Eaton (1985) geometrisi

Çalışmanın temelini teşkil eden Şekil 3.4'teki geometri üzerinde modifikasyonlar uygulanarak farklı genişleme oranlarına sahip modeller elde edilmiştir. Genişleme oranı, akışın gerçekleştiği kanaldaki çıkış yüksekliğinin giriş yüksekliğine oranı olarak ifade edilmekte ve akış karakteristiklerine olan etkisi ile ilgili literatürde birçok çalışmanın var

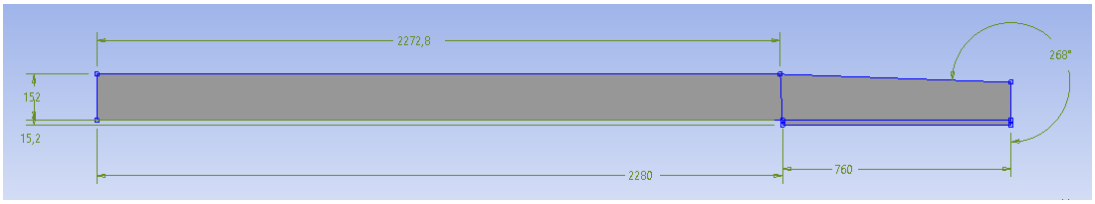
olduğu bilinmektedir. Basamak çıkış yüksekliklerinde yapılan bu değişiklikler vasıtasıyla genişleme oranının akış ve ısı transferi karakteristiklerine etkisi incelenmiştir.

Basamak yüksekliğindeki değişimler Driver ve Seegmiller (1985) tarafından yapılan çalışmada ve Isomoto ve Honami (1989) tarafından yapılan çalışmada kullanılan genişleme oranlarına göre kurgulanmıştır. Böylelikle genişleme oranı 1,25 olan Vogel ve Eaton (1985) çalışmasının yanına genişleme oranı 1,1 ve 1,43 olan iki yeni geometri de eklenmiştir.

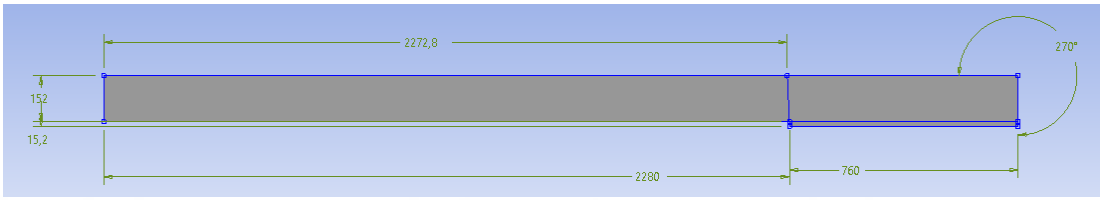
Genişleme oranı değişiklikleri ile birlikte basınç gradyeninin etkisi de incelemeye alınmıştır. Böylelikle her iki olayın akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristikleri üzerine olan etkisinin değerlendirilme fırsatı elde edilecek, ayrıca bu iki değişkenin birbirleriyle olan etkileşimlerinin de incelenmesi söz konusu olacaktır. Bu amaç doğrultusunda farklı genişleme oranına sahip geometriler için, Driver ve Seegmiller (1985) çalışmasındaki açısal değişim uygulaması yapılmıştır. Bu açısal değişim kanalın üst duvarında belirlenen noktadan itibaren pozitif ve negatif yönlü olarak uygulanmıştır. Uygulama noktası ise basamak öncesinde 0,47 H mesafeden başlamıştır. 4 farklı açı uygulaması ile farklı genişleme oranına sahip geometrilerin çıkış yükseklikleri de çeşitlendirilmiştir. Böylelikle basınç gradyeni değişimlerinin de akış ve ısı karakteristikleri üzerine etkisi incelenebilmiştir. Bu çalışma kapsamında ele alınan tüm geometrilere alt detaylar Çizelge 3.1'de ve Şekil 3.5 - 3.19'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Simülasyon geometrileri

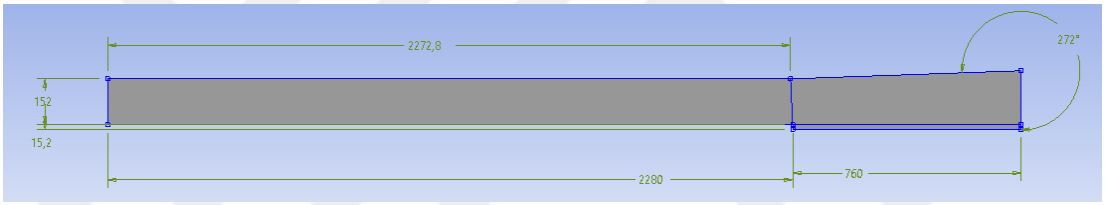
		Driver ve Seegmiller (1985) Geometrisi Analojisi	Vogel ve Eaton (1985) Geometrisi ve Analojisi	Isomoto ve Honami (1989) Geometrisi Analojisi
Genişleme Oranı (GO)		1,1	1,25	1,43
Basamak Yüksekliği (H)		15,2 mm	38 mm	65,36 mm
Giriş Yüksekliği (H_g)		152 mm	152 mm	152 mm
Giriş Uzunluğu (L_g)		2280 mm	2280 mm	2280 mm
Basamak Öncesi Açısal Değişim Noktası (0,47H)		2272,85 mm	2262,14 mm	2249,28 mm
Açısal Değişime Göre Çıkış Yüksekliği ($H_ç$)	$\alpha = -2^o$	140,43 mm	162,85 mm	189,76 mm
	$\alpha = 0^o$	167,20 mm	190,00 mm	217,36 mm
	$\alpha = 2^o$	193,97 mm	217, 15 mm	244,96 mm
	$\alpha = 4^o$	220,82 mm	244,37 mm	272,63 mm
	$\alpha = 6^o$	247,83 mm	271,75 mm	300,46 mm
Basamak Sonrası Kanal Uzunluğu (L)		760 mm	760 mm	760 mm
Kanalın Toplam Uzunluğu (L_t)		3040 mm	3040 mm	3040 mm



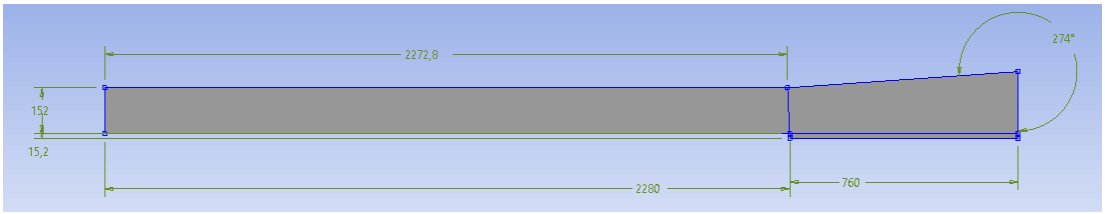
Şekil 3.5. -2 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS1)



Şekil 3.6. 0 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS2)



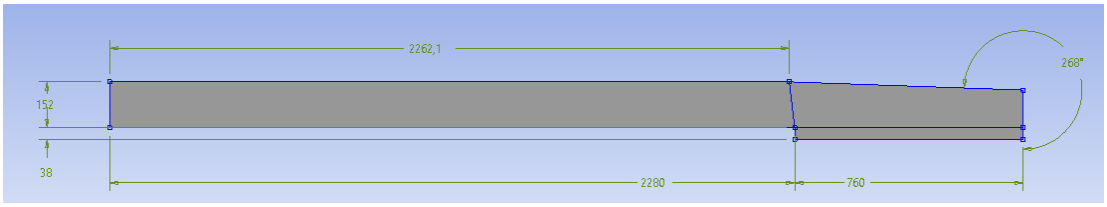
Şekil 3.7. 2 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS3)



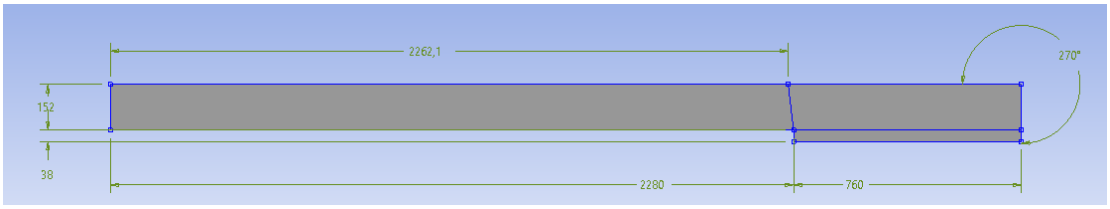
Şekil 3.8. 4 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS4)



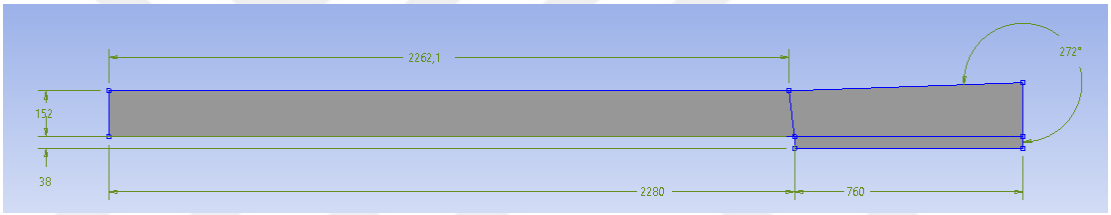
Şekil 3.9. 6 derece açılı Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi (DS5)



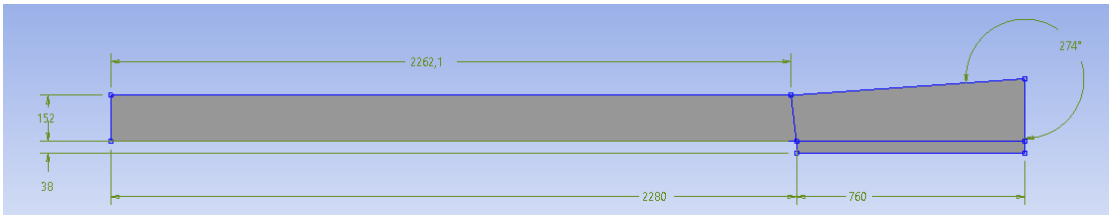
Şekil 3.10. -2 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi (VE1)



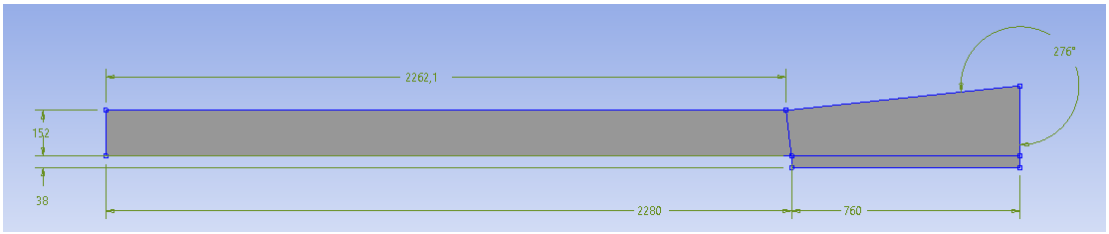
Şekil 3.11. 0 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi (VE2)



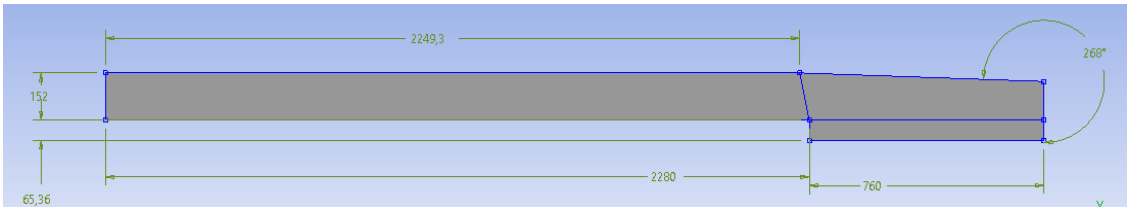
Şekil 3.12. 2 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi (VE3)



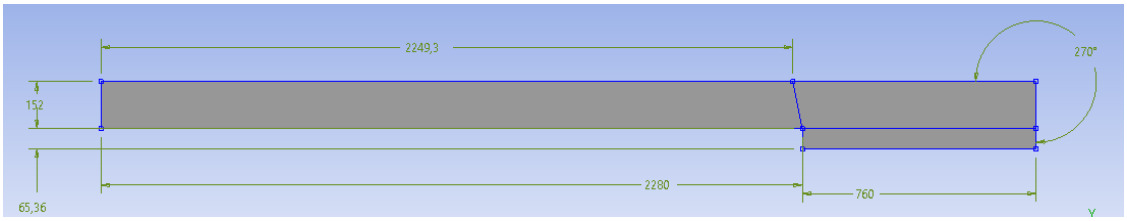
Şekil 3.13. 4 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi (VE4)



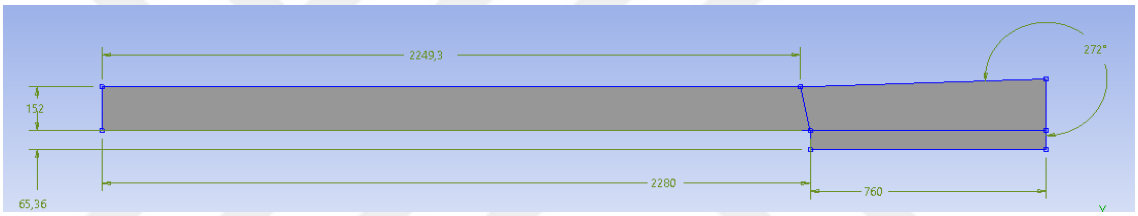
Şekil 3.14. 6 derece açılı Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi (VE5)



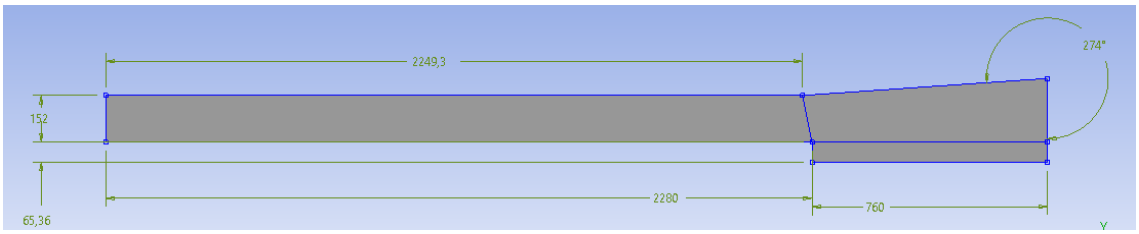
Şekil 3.15. -2 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH1)



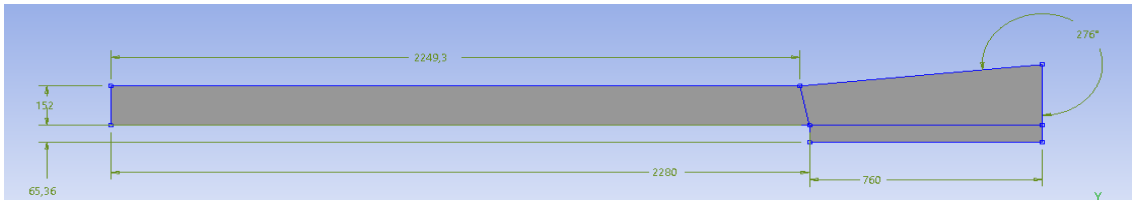
Şekil 3.16. 0 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH2)



Şekil 3.17. 2 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH3)



Şekil 3.18. 4 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH4)



Şekil 3.19. 6 derece açılı Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi (IH5)

3.1.3.2. Sınır Şartları

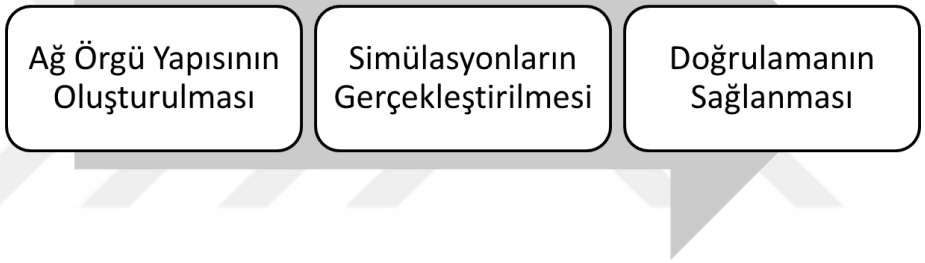
Bu çalışma kapsamındaki modifikasyonlar sonucunda farklı simülasyonların ve farklı değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimlerinin incelenmesi için hazırlanan geometrilerde kullanılan sınır şartları ve fiziksel büyüklükleri Çizelge 3.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Sınır şartları ve fiziksel büyüklükleri

	Driver ve Seegmiller (1985) Geometrisi Analojisi	Vogel ve Eaton (1985) Geometrisi Analojisi	Isomoto ve Honami (1989) Geometrisi Analojisi
Giriş Hızı	11,3 m/sn	11,3 m/sn	11,3 m/sn
Giriş Sıcaklığı	20 ºC	20 ºC	20 ºC
Türbülans Seviyesi (%)	0,2; 1,3; 3,3; 5,5; 7,4	0,2; 1,3; 3,3; 5,5; 7,4	0,2; 1,3; 3,3; 5,5; 7,4
Isı Akısı	270 W/m^2	270 W/m^2	270 W/m^2
Adiyabatik Duvar	u = 0 v = 0	u = 0 v = 0	u = 0 v = 0
Çıkış Basıncı	P = 0 T = T∞	P = 0 T = T∞	P = 0 T = T∞
Giriş	Hız Girişi	Hız Girişi	Hız Girişi
Basamak Sonrası Alt Duvar	Sabit Isı Akısı Uygulanmış Duvar	Sabit Isı Akısı Uygulanmış Duvar	Sabit Isı Akısı Uygulanmış Duvar
Diğer Duvarlar	Adiyabatik Duvar	Adiyabatik Duvar	Adiyabatik Duvar
Çıkış	Basınç Çıkışı	Basınç Çıkışı	Basınç Çıkışı

3.1.3.3. Simülasyon ve Doğrulama

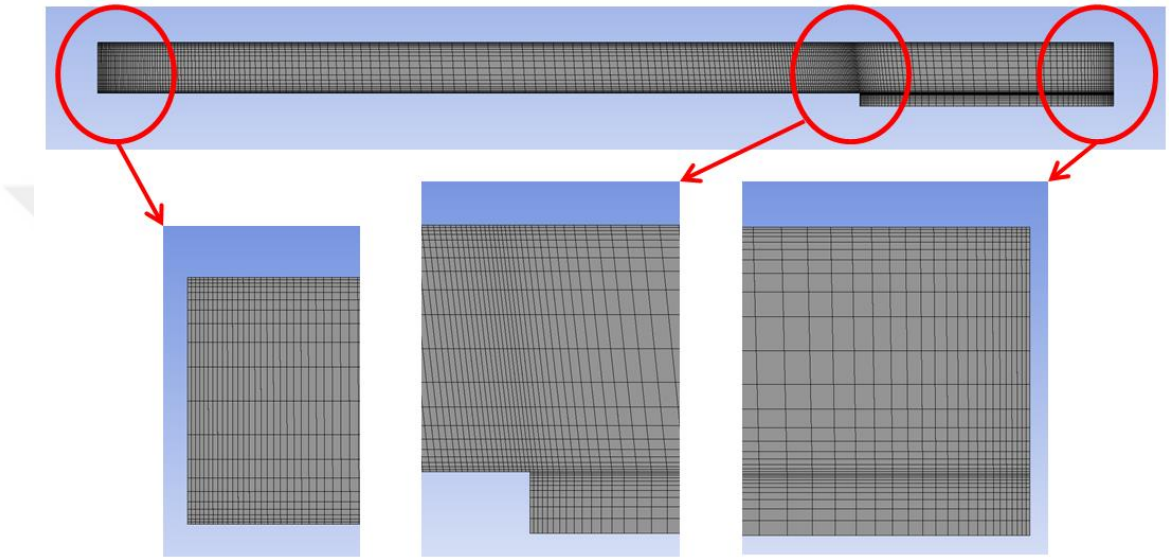
Gerçekleştirilen çalışmanın bu aşamasında Vogel ve Eaton (1985) tarafından yapılan deneysel çalışmanın uygun simülasyon metodu kullanılarak doğrulanması için uygun simülasyonunun bulunmasına yönelik işlemler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'teki belirtilen geometri ve türbülans seviyesi 0,2 olmak üzere Çizelge 3.2'deki Vogel ve Eaton (1985) Geometrisi Analojisi sınır şartları ve fiziksel büyüklükleri kullanılarak bu kapsamda değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.20'de belirtilen birbiri ardına gerçekleştirilen bu doğrulama çalışmalarında her simülasyon için ağ örgü yapısı kontrolü ve sonrasında ise Vogel ve Eaton (1985) deneysel çalışmasında elde edilen ve yeniden birleşme uzunluğu ile Stanton sayısının etkileşim grafiği kontrol edilmiştir.



Şekil 3.20. Simülasyon ve doğrulama uygulama adımları

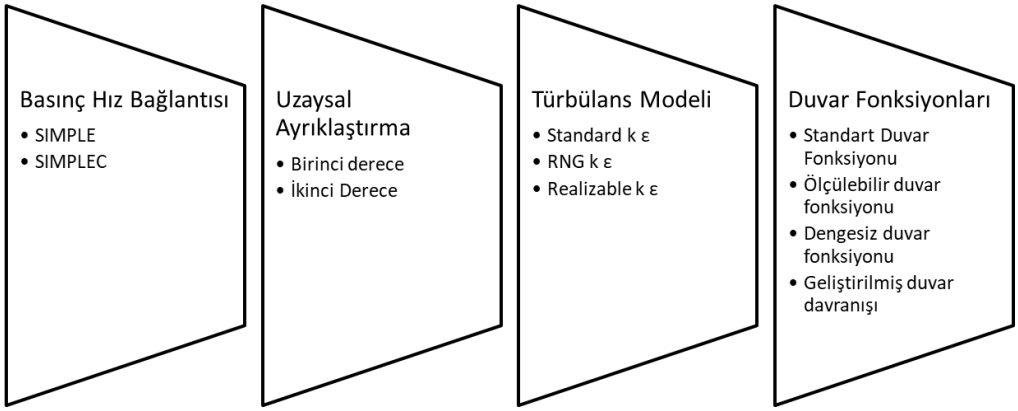
Simülasyon ve doğrulama çalışmaların ilk adımı olarak değerlendirilebilecek olan ağ örgü çalışmaları elde edilen sonuçların güvenilirliğini sağlamak adına oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışma ile analizleri gerçekleştirilecek olan geometriler daha küçük parçalara ayrılmaktadır. Bu ayırma işlemi analiz sırasında çözülmesi gereken diferansiyel denklemlerin daha kolay gerçekleştirilmesi amacını taşımaktadır. Ağ örgü yapısının oluşturulmasında gerçekleştirilen çalışmaların sonuçlarının başarısız olarak sonuçlanmasına neden olabilmektedir. Bunun nedeni ağ örgü yapısının homojen bir yapıya sahip olmaması, çok kaba ya da çok seyrek olmasından ileri gelmektedir. Bu güvenilirliği sağlamak adına yapılan çalışmaların başında da y^+ değerinin kontrolü gelmektedir.

Salim ve Cheah (2009) y^+ tanımlaması gerçekleştirirken, y^+ boyutsuz bir sayı olduğunu ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği uygulamalarında ağ örgü yapısının ne kadar sık ya da seyrek olduğunu belirttiğini aktarmış ve türbülanslı akışlar için bu değerin 30'dan yüksek olması gerektiğini belirtmiştir. Şekil 3.21'de yer alan ağ örgü yapısı Şekil 3.4'teki geometrik model için uygulanmış ve gerekli y^+ şartını sağlamıştır. Bu uygulama gerçekleştirilirken birçok örgü varyasyonu denemesi gerçekleştirilmiştir.



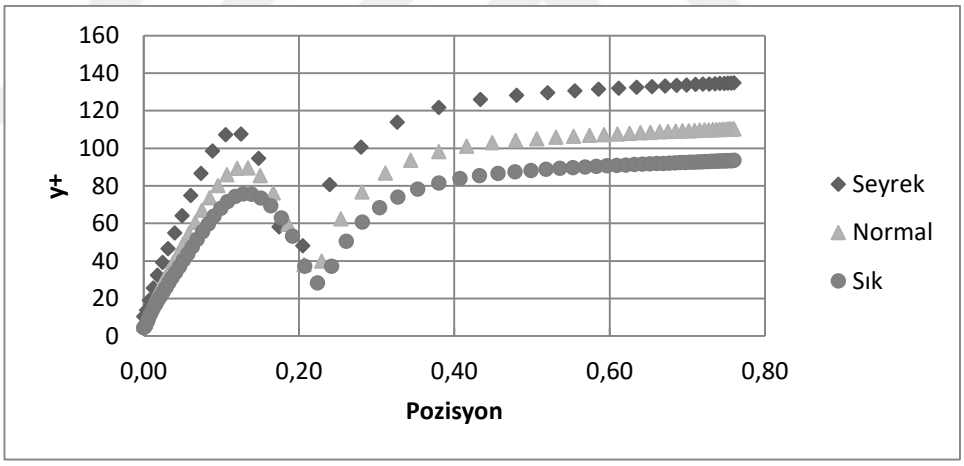
Şekil 3.21. Vogel ve Eaton (1985) ağ örgü yapısı

Simülasyon ve doğrulama çalışmaların ikinci adımı simülasyon uygulamaları kapsamında yapılan analizler sonrasında elde edilen sonuçlar, deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.22'de belirtilen farklı algoritma seçenekleri üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu algoritma seçenekleri türbülans modeli (sub-viscous model), duvar fonksiyonları (near wall treatment), basınç hız bağlantısı (pressure velocity coupling) ve uzaysal ayrıklaştırma (spatial discreatization) olarak ANSYS Fluent programında yer almaktadır.



Şekil 3.22. Simülasyon uygulama algoritma seçenekleri

Bu seçeneklerin her bir alternatifi değerlendirilerek toplamda 48 farklı simülasyon algoritmasının sonuçlarının y^+ kontrolü yapılmıştır. Uygulanan simülasyon algoritmalarının tamamında Şekil 3.23'te gösterilen ve normal olarak adlandırılmış olan eğride olduğu gibi, Şekil 3.21'deki ağ örgü yapısına ait y^+ değerlerinin 30'dan yüksek olduğu tespit edilmiştir.



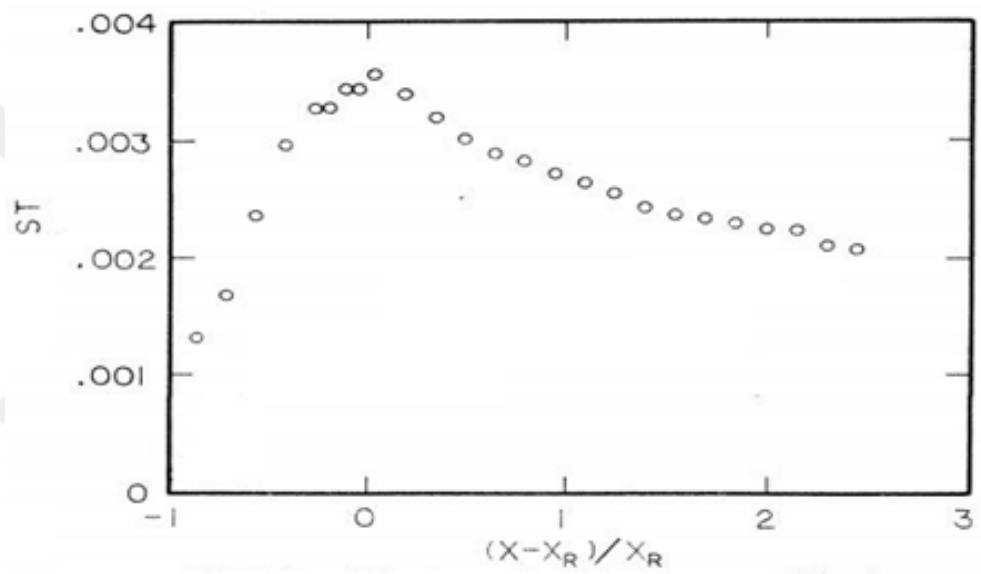
Şekil 3.23. Ağ örgü yapılarının y+ karşılaştırması

Şekil 3.21'de gösterilen ağ örgü yapısının, daha sık ve daha seyrek yapılı versiyonları için y^+ değerlerinin de karşılaştırması yapılarak sonraki aşamalar için ağdan bağımsızlık şartı sağlanmış; gerçekleştirilen analizlerde uygulanan ağ örgü yapısının güvenilir olduğu değerlendirilmiştir. Bu ağ örgü yapılarının düğüm ve element sayıları Çizelge 3.3' te, y^+ karşılaştırması ise Şekil 3.23'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Ağ örgü yapılarının düğüm ve element sayıları

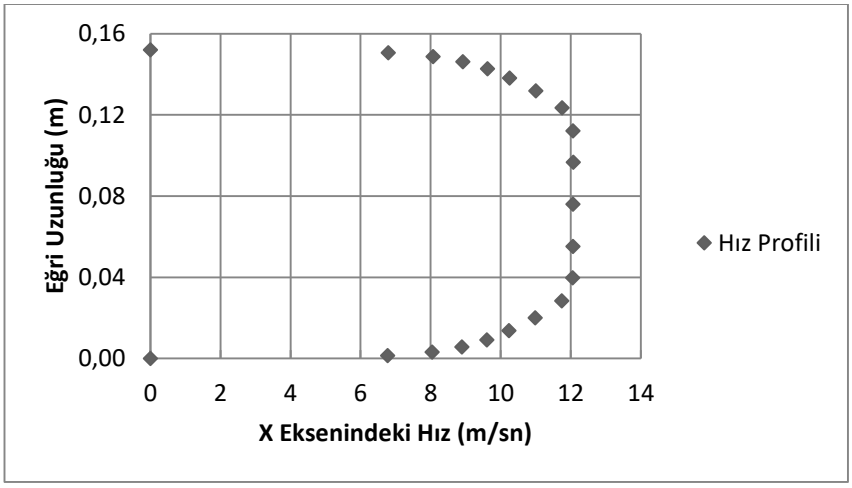
Ağ Örgü Yapısı	Düğüm Sayısı	Element Sayısı
Seyrek	4147	3920
Normal	5671	5400
Sık	7435	7120

Doğrulama çalışmalarının temel kaynağı ise Vogel ve Eaton (1985) çalışmasında elde edilen ve yeniden birleşme uzunluğu ile Stanton sayısının etkileşim grafiğidir. Bu grafik Şekil 3.24' te orijinal haliyle gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Stanton sayısı ve yeniden birleşme etkileşimi doğrulama grafiği (Vogel ve Eaton, 1985)

Şekil 3.24'te gösterilen grafik, Vogel ve Eaton (1985) tarafından gerçekleştirilen çalışmada tam gelişmiş akış sınırı ile basamak yüksekliğinin (δ/H) 1,1 olduğu durumda elde edilmiş olup, gerçekleştirilen tüm analiz çalışmalarında hız profili kontrolü de gerçekleştirilmiştir. Ampirik ifadeler ile saptanan basamağın 4H gerisindeki bölgede hız profili ölçümü yapılmıştır. Basamaktan 144 mm geride hesaplanan bu bölgede sınır tabaka kalınlığı kontrolü yapılmış ve deneysel çalışmadaki sınır tabaka yüksekliği olan 41,8 mm'ye oldukça yakın bir tabaka kalınlığına sahip (40 mm) tam gelişmiş akış profili olduğu tespit edilmiş ve deneysel çalışmanın hız parametresi bakımından da doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Yapılan hız profili ölçümü Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Gerçekleştirilen analizlerin hız profili

3.2. Deney Tasarımı

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri sonucunda elde edilen verilerin deney tasarımı çalışmaları kapsamında kullanılmasında bazı istatistiki tanımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu istatistiki tanımlar ve uygulanan deney tasarım yöntemleri bir istatistik programı olan Minitab 20 aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. İstatistiki Tanımlar

3.2.1.1. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizi, deneysel bilgilerin kullanılarak gerekli kararların verilmesinde yardımcı olan, bir grup değerin ortalama performansa kıyasla oluşturduğu farkı inceleyen istatistiksel bir yöntemdir. Test edilen grupların ortalama performansındaki değişimi tespit etmek amacıyla ve temelde varyansın yani değişkenliğin değil, faktörlerin ve bu faktörlerin farklı seviyelerinin yol açtığı değişimlerin ölçülmesinde kullanılır (Savaşkan, 2003).

Varyans analizi gerçekleştirilirken elde edilen tüm veriler ANOVA tablosunda ele alınır. ANOVA tablosu hazırlanırken izlenecek adımlar yokluk ve alternatif hipotezin

kurulması; tek veya iki yönlü olarak hipotezin yönünün belirlenerek birinci tür hata oranı olan alfa seviyesine karar verilmesi; örneklem için F değerinin hesaplanması hipotezin değerlendirilmesidir. F değeri, en yüksek grup varyansının en düşük grup varyansına bölünerek elde edilmekte ve varyansların homojenliğinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. F değeri tablo değerinden düşükse varyansların homojen olduğunu belirten yokluk hipotezi kabul edilemez (Başol, 2014).

Minitab programı çerçevesinde gerçekleştirilen ANOVA tablosu değerlendirmelerinde ise F değeri yerine P değeri üzerinden değerlendirme yapılır. P değerinin belirlediğimiz anlamlılık değerinden küçük olması beklenir. Örnek bir ANOVA tablosu Çizelge 3.4' te gösterilmektedir. Çizelge 3.4' te yer alan terimlerin açıklaması Çizelge 3.5' te belirtilmiştir.

Çizelge 3.4. ANOVA tablosu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Gruplar Arası	SSB	k – 1	MSB		
Gruplar İçi (Hatalar)	SSW	n - k	MSW		
Toplam	SST				

Çizelge 3.5. ANOVA tablosunda kullanılan terimler

SSB	Grup ortalamalarının genel ortalamadan olan fark karelerinin gruplardaki eleman sayısı ile çarpımlarının toplamı
SSW	Grup içi farklar karesi toplamı
SST	Aritmetik ortalamadan farklar karelerinin toplamı
MSB	Gruplar arası farklar karesi ortalaması
MSW	Grup içi farklar karesi ortalaması

n	Gruplardaki toplam eleman sayısı
k	Grup sayısı
F	Varyans homojenliği
P	Hipotez testinin olasılık değeri

3.2.1.2. Sinyal / Gürültü Oranı

Deney tasarımları metotlarından biri olan Taguchi Metodu'nda kullanılan bir metottur. Ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranı kalite karakteristiklerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesinde kullanılır. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder (Savaşkan, 2003).

Sinyal / gürültü oranının hesaplanmasında deneyler sonucunda ulaşılması hedeflenen kalite değerinin özelliği de önemlidir. En düşük değere ulaşmayı hedefleyen en düşük en iyi yaklaşımı; nominal değere ulaşmayı hedefleyen nominal değer en iyi yaklaşımı ve en yüksek değere ulaşmayı hedefleyen en büyük en iyi yaklaşımı, hedeflenen kalite değerinin özelliğini belirten üç önemli kategoriyi ifade etmektedir (Savaşkan, 2003)

3.2.1.3. Regresyon Analizi

Regresyon analizinin amacı göz önüne alınan değişkenler arasında anlamlı bir ilişki bulunup bulunmadığını belirlemek, böyle bir ilişki varsa bu ilişkiyi ifade eden regresyon denklemini elde etmek ve bu denklemi kullanarak yapılacak tahminlerin güven aralıklarını hesaplamaktır (Bayazıt ve Yeğen Oğuz, 2005).

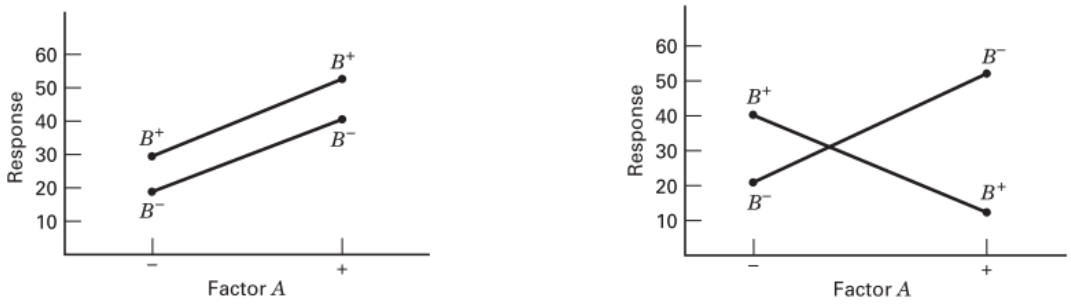
Regresyon analizine başlarken aralarında bir ilişki aranacak olan değişkenlerin hangileri olduğuna karar vermek, sonra da bu değişkenler arasında ilişkiyi gösteren denklemin biçimi için bir kabul yapmak gerekir. Basit doğrusal regresyon analizi, çok değişkenli doğrusal regresyon analizi ve doğrusal olmayan regresyon analizi bu kabule ilişkin sınıflandırma olarak belirtilebilir (Bayazıt ve Yeğen Oğuz, 2005).

Regresyon analizi, varyans analizi ile beraber istatistiki problemlerin çözümünde kullanılan yollardan birisi olup, deney tasarımı metodu uygulanarak yapılmış deneylerin incelenmesinde de önemli bir kullanımı vardır (Savaşkan, 2003).

3.2.2. Faktöriyel Tasarım

İki ya da daha fazla faktörün ve seviyelerinin tüm kombinasyonlarının yanıt değişkeni üzerine etkilerinin araştırıldığı çalışmalara literatürde faktöriyel tasarım ya da faktöriyel deneyler denilmektedir. Çeşitli faktörlerin etkileri arasındaki etkileşimin araştırılmasında ya da belirli bir aralıktaki faktörlerin her birinin etkisinin hızlı bir şekilde belirlenmesi gerektiği durumlarda faktöriyel tasarım uygulanabilmektedir. Faktörler arasındaki etkileşimin temel nedeni, deneyde kullanılacak herhangi bir faktör düzeyinin tamamının diğer faktörlerin her bir düzeyinde aynı olmasıdır. (Kılıç, 2018).

Şekil 3.26'da iki faktör arasındaki etkileşim gösterilmektedir. *A* ve *B* faktörlerinin ektremum noktaları arasındaki ilişki gösterilmektedir. *B* faktörünün ektremum noktaları birbirine paralel bir hat boyunca ilerlemekte ise *A* ve *B* faktörleri arasında bir ilişki olmadığı; B faktörünün ektremum noktaları birbirlerini birbirine paralel değilse *A* ve *B* faktörleri arasında bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.26. Faktöriyel tasarım etkileşimi (Montgomery, 2012)

Tekrar sayısı *n* olmak üzere, *n* defa ($n \geq 1$) ve iki faktörlü faktöriyel tasarımların doğrusal modeli; y_{ijk} k. tekrarda, *A* faktörünün *i* düzeyinde ve *B* faktörünün *j* düzeyindeki gözlem değeri, μ genel ortalama, α_i *A* faktörünün *i*. düzeyinin etkisi, β_j *B* faktörünün *j*. düzeyinin etkisi ve $(\alpha\beta)_{ij}$ *A* ve *B* faktörlerinin etkileşiminin etkisini göstermek üzere şöyledir (Hasgül, 2010).

$$y_{ijk} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1,2,\dots,a \\ j = 1,2,\dots,b \\ k = 1,2,\dots,n \end{cases} \tag{3.41}$$

$$\mu_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} \tag{3.42}$$

İki faktörlü faktöriyel tasarımlar, *a* düzeyli *A* faktörü, *b* düzeyli *B* faktörü, *c* düzeyli *C* faktörü gibi genelleştirilebilir. Genel olarak tam deneylerde *abc…n* toplam gözlem için *n* tekrar yapılır. Modelde olası etkileşimler bulunuyorsa, hataya ilişkin kareler toplamını hesaplama için $n \geq 2$ olmalıdır (Hasgül, 2010).

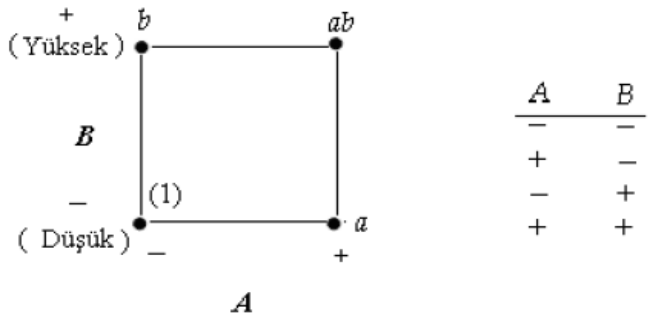
Faktöriyel tasarımların özel tipleri süreç geliştirmede yararlı olup, bu biri iki düzeyli *k* faktörlü faktöriyel tasarımlardır. Tasarımın her bir tekrarı 2^k defa gerçekleştirildiğinden dolayı bu şekilde adlandırılmaktadır. Diğer tasarımlara temel oluşturacak düzeyde basitleştirilmiş tasarımlardır. Burada her bir faktör iki düzey içermektedir. Yalnız iki düzeyi içeren durum önemsiz gibi görünse de en az iki nedenden dolayı çok yararlıdır. Bu nedenlerden birincisi daha karışık düzeylerin tartışılmasında yararlı olacak gösterim ve kavramları tanıtmak, ikincisi de uygulamada gerçekten var olan ana etki ve etkileşimlerin ne olduğunu açıklamaktır (Hasgül, 2010).

3.2.2.1. 2^2 Faktöriyel Tasarım

2^2 faktöriyel tasarım, 2^k tasarımlarım en basiti olarak adlandırabileceğimiz iki seviyeli *A* ve *B* faktörlerinin olduğu tasarımlardır. Faktörlerin seviyelerini var/yok, düşük/yüksek ya da pozitif/negatif olarak adlandırmamız mümkündür. 2^2 faktöriyel tasarımın matematiksel modeli; y_{ij} *A* faktörünün *i*. seviyedeki ve *B* faktörünün *j*. seviyedeki *k*. gözlem değeri, μ genel ortalama, α_i *A* faktörünün *i*. düzeyinin etkisi, β_j *B* faktörünün *j*. düzeyinin etkisi ve $(\alpha\beta)_{ij}$ *A* ve *B* faktörlerinin etkileşiminin etkisi, ε_{ij} hata terimi ve *i=1,2* ve *j=1,2* olmak üzere şöyledir.

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij} \qquad (3.43)$$

2^2 faktöriyel tasarım geometrik olarak Şekil 3.27'de $2^2 = 4$ denemeye karşılık gelen bir karenin köşeleri olarak gösterilmektedir. Ayrıca yine Şekil 2.27'de gösterildiği gibi matris olarak düzenlenebilmektedir. Karedeki her bir köşe, *A* ve *B* faktörlerinin seviyelerine bağlı olarak test matrisinde (+) ve (-) ile gösterilmektedir (Hasgül, 2010).



Şekil 3.27. 2^2 faktöriyel tasarım geometrik ve matris gösterimi (Hasgül, 2010)

2^2 faktöriyel tasarı için *A* ve *B* şeklinde gösterilen iki faktörü ifade etmekte ve etkileşim ise, *AB* şeklinde gösterilmektedir. Faktör etkilerinin belirlenmesi için de hesaplamalar yapılmaktadır. Örnek olarak *A* faktörünün etkisinin tahmini istendiğinde karenin sağ tarafındaki değerler ortalamasından karenin sol tarafındaki değerlerin ortalaması çıkarılmaktadır (Hasgül, 2010).

$$A = \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} = \frac{a+ab}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} = \frac{1}{2n}\,[a+ab-b-(1)] \qquad (3.44)$$

$$B = \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B} = \frac{b+ab}{2n} - \frac{a+(1)}{2n} = \frac{1}{2n}\,[b+ab-a-(1)] \qquad (3.45)$$

$$AB = \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B} = \frac{ab+1}{2n} - \frac{a+b}{2n} = \frac{1}{2n}\,[ab+1-a-b] \qquad (3.46)$$

Bu bağıntılar doğrusal bağıntı olarak adlandırılmakta ve bu eşitliklerdeki bağıntı katsayıları her zaman ya +1 ya da -1 olmaktadır. Faktöriyel etkileri ise Çizelge 3.6' da gösterilmektedir.

Çizelge 3.6. 2^2 faktöriyel tasarımda etkilerin işaretleri (Hasgül, 2010)

		Faktöriyel Etki			
Deneme		I	A	B	AB
1	(1)	+	-	-	+
2	a	+	+	-	-
3	b	+	-	+	-
4	ab	+	+	+	+

Çizelge 3.6‘ daki verilerin kullanılması ile kareler toplamları bulunarak, 4n-1 serbestlik dereceli KT_{Genel} ve 4(n-1) serbestlik dereceli KT_{Hata} ‘nın hesaplaması ile varyans analizi yapılır (Hasgül, 2010).

$$KT = \frac{(Bağıntı)^2}{n\sum(Bağıntı\ Sayısı)^2} \tag{3.47}$$

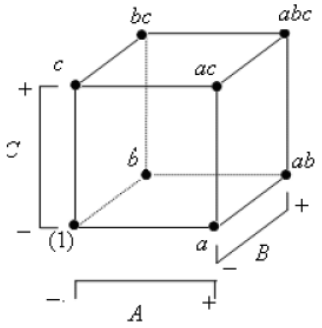
$$KT_A = \frac{[a + ab - b - (1)]^2}{4n} \tag{3.48}$$

$$KT_B = \frac{[b + ab - a - (1)]^2}{4n} \tag{3.49}$$

$$KT_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b)]^2}{4n} \tag{3.50}$$

3.2.2.2. 2^3 Faktöriyel Tasarım

2^2 faktöriyel tasarımların genişletilmesiyle daha fazla faktörlü tasarımlar gerçekleştirilebilir. 2^3 faktöriyel tasarım geometrik olarak Şekil 3.28’de $2^3 = 8$ denemeye karşılık gelen bir küpün köşeleri olarak gösterilmektedir. Ayrıca yine Şekil 3.28’de gösterildiği gibi matris olarak düzenlenebilmektedir. Küpteki her bir köşe *A*, *B* ve *C* faktörlerinin seviyelerine bağlı olarak test matrisinde (+) ve (-) ile gösterilmektedir.



A	B	C
−	−	−
+	−	−
−	+	−
+	+	−
−	−	+
+	−	+
−	+	+
+	+	+

Şekil 3.28. 2^3 faktöriyel tasarım geometrik ve matris gösterimi (Hasgül, 2010)

2^3 faktöriyel tasarım *A*, *B*, *C* olmak üzere üç ana etkinin, *AB*, *AC*, *BC* iki faktör etkileşimlerinin ve *ABC* üç faktör etkileşiminin tahminine olanak sağlamaktadır. *A*

faktörünün ana etkisinin tahmini için önce küpün sağ tarafındaki değerlerin yani yüksek düzeyine ilişkin değerlerin ortalaması alınır ve sol taraftaki değerlerin ortalaması bundan çıkarılır (Hasgül, 2010).

$$A = \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} = \frac{1}{4n}\left[a + ab + ac + abc - b - c - bc - (1)\right] \tag{3.51}$$

$$B = \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-} = \frac{1}{4n}\left[b + ab + bc + abc - a - c - ac - (1)\right] \tag{3.52}$$

$$C = \bar{y}_{C^+} - \bar{y}_{C^-} = \frac{1}{4n}\left[c + ac + bc + abc - a - b - ab - (1)\right] \tag{3.53}$$

AB etkileşiminin tahmininde *C* faktörünün yüksek ve düşük düzeylerine ilişkin elde edilen değerlerin ortalamalarının farkı değerlendirilmektedir (Hasgül, 2010).

$$AB(C^-) = \frac{1}{2n}\left[(ab - b)\right] - \frac{1}{2n}\left[(a - (1)\right] \tag{3.54}$$

$$AB(C^+) = \frac{1}{2n}\left[(abc - bc)\right] - \frac{1}{2n}\left[(ac - c)\right] \tag{3.55}$$

AB etkileşiminin etkisi bu iki bileşenin ortalaması ise küpün köşegen yüzeylerinin dikkate alınması ile tahmin edilmektedir. *AC* ve *BC* etkileşimleri de benzer şekilde tahmin edilmektedir (Hasgül, 2010).

$$AB = \frac{1}{4n}\left[ab + (1) + abc + c - b - a - bc - ac\right] \tag{3.56}$$

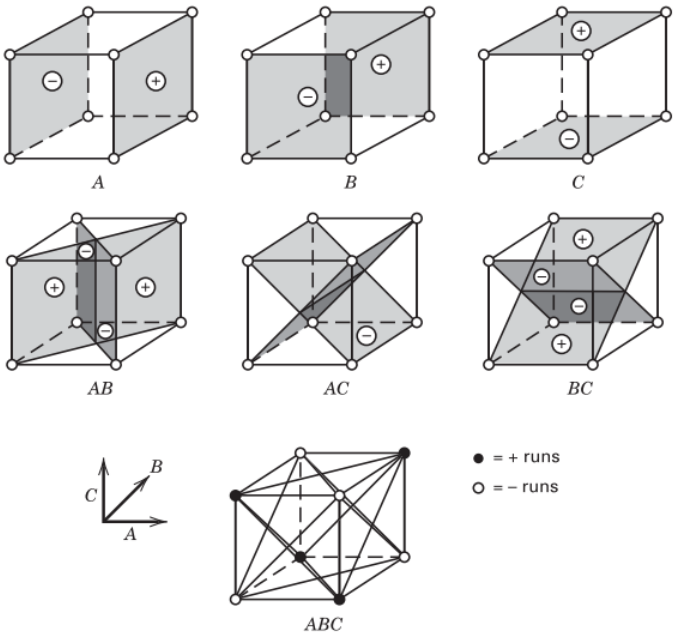
$$AC = \frac{1}{4n}\left[ac + (1) + abc + b - a - c - ab - bc\right] \tag{3.57}$$

$$BC = \frac{1}{4n}\left[bc + (1) + abc + a - b - c - ab - ac\right] \tag{3.58}$$

ABC etkisi ise *C* faktörünün iki düzeyinin ortalamasının *AB* etkileşimi ortalama farkı ile tahmin edilmektedir (Hasgül, 2010).

$$ABC = \frac{1}{4n}\left[abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)\right] \qquad (3.59)$$

2^3 faktöriyel tasarımdaki faktörlerin ana etkileri ve birbirleriyle olan etkileşimleri ise Şekil 3.29'da gösterilmektedir. Bu bağıntılar kullanılarak 2^3 faktöriyel tasarım için Çizelge 3.7' de verilen faktöriyel etkileri oluşturulur. Çizelge 3.7' deki (+) işareti yüksek seviyenin, (–) işareti de düşük seviyeyi belirtmektedir



Şekil 3.29. 2^3 faktöriyel tasarımdaki faktörlerin etki ve etkileşimleri (Montgomery, 2012)

Çizelge 3.7. 2^3 faktöriyel tasarımda etkilerin işaretleri (Hasgül, 2010)

Deneme Kombinasyonu	Faktöriyel Etki							
	I	*A*	*B*	*AB*	*C*	*AC*	*BC*	*ABC*
(1)	+	-	-	+	-	+	+	-
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	+	-	-	-	-
c	+	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	+	-	-	+	+	-	-
bc	+	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+	+

3.2.3. Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY)

Yanıt yüzey yöntemi, düşük maliyetle yüksek verim elde etmek amacıyla kimyasal reaksiyonları optimize ederek kimya endüstrisinde üretim süreçlerinin iyileştirilmesine yardımcı olma amacıyla Box ve Wilson tarafından 1951'de geliştirilmiştir (Dean ve Voss, 1999). Faktörlerin iki düzeyli olduğu deney tasarımı çalışmalarında bir faktörün doğrusal etkisi belirlendiği için merkez noktası tekrarlı tasarımlarla yani yanıt yüzey yöntemi kullanılarak eğrisel ilişkiler tahmin edilmeye çalışılmaktadır (Çelik 1996).

Yanıt yüzey yöntemi, üzerinde değerlendirmeler yapılan bir yanıtın birkaç değişken tarafından etkilendiği ve bu yanıtın optimizasyonunun amaçlandığı problemlerin modellenmesinde ya da analiz edilmesinde faydalı olan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir arada kullanıldığı bir yöntemdir (Montgomery, 2012). Bu yöntemde kullanılan temel eşitlik ise; y yanıt yüzey değişkenini, f bağımsız değişkenlerin (x_1, x_2) fonksiyonunu ve ϵ tesadüfi hata terimini göstermek üzere aşağıdaki gibidir.

$$y = f(x_1 + x_2) + \epsilon \tag{3.60}$$

Yanıt yüzey yöntemi çalışmalarının iki amacı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi yanıt değişkeninin maksimum, minimum ya da hedef değere ulaşmak amacıyla bağımsız değişkenlerin uygun kombinasyonunu bulmak ve faktörlerin ortalama yanıtta yerel etkilerini daha iyi anlayabilmek için bu konum veya bölgenin yakınındaki yanıt yüzeyini tahmin etmektir (Dean ve Voss, 1999).

Birçok yanıt yüzey yöntemi probleminde yanıt değişkeni ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki bilinmemektedir. Bu nedenle gerçekleştirilmesi gereken ilk adım, yanıt değişkeni ile bağımsız değişkenler arasında gerçek fonksiyonel ilişki için uygun bir yaklaşım bulmaktır. Yanıt değişkeni, bağımsız değişkenlerin doğrusal bir fonksiyonuysa ve modelleme doğru gerçekleştirilmiş ise birinci dereceden bir polinom kullanılarak yakınsama yapılır (Montgomery, 2012).

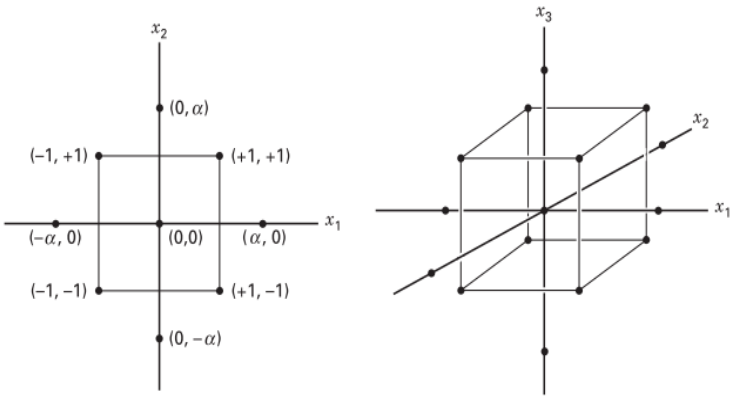
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \epsilon \tag{3.61}$$

Eğer değişkenler arasında doğrusal bir fonksiyon olmadığı durumlarda ya da birinci dereceden polinomların yetersiz kaldığı durumlarda ise ikinci dereceden polinomlar kullanılarak yakınsama gerçekleştirilir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^{n} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \qquad (3.62)$$

Denklem 3.61 ve 3.62'de gösterilen polinomlarda belirtilen y yanıt yüzey değişkenini, x değerleri yanıt değerlerini, β_0 sabit katsayıyı, diğer β katsayıları etkileşim katsayılarını ve ϵ ise hata değerini ifade etmektedir.

İkinci dereceden polinom kullanılarak yanıt yüzey yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalarda genellikle merkezi kompozit tasarımı kullanılmaktadır. Uluslararası literatürde central composite design (CCD) olarak adlandırılan merkezi kompozit tasarım (MKT), grafik oluşturmayı sağlayan ve genişletilmiş merkez noktaları içeren deneysel tasarım metodudur. Bu tasarımda bir küp oluşturularak küpün merkezi sıfır noktası, küpün köşelerinde yer alan faktöriyel noktalar için ± 1 birim, küpün dışında kalan faktöriyel noktalar ise $\pm\alpha$ birim uzaklık tanımlanır. Küpün dışında yer alan α noktaları üzerinde araştırma yapılan faktörlere bağlı olup, tasarımın hedeflerine de endekslidir. Şekil 3.30' da 2 ve 3 faktöre göre oluşturulan merkezi kompozit tasarımlar belirtilmektedir. Merkezi kompozit tasarımda küp dışındaki noktalar, deneysel tasarımın sınırlarını artırması bakımından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar arasında tasarımın döndürülebilmesi ilk sırada yer belirtilebilmektedir.



Şekil 3.30. 2 ve 3 faktör için merkezi kompozit tasarım (Montgomery, 2012)

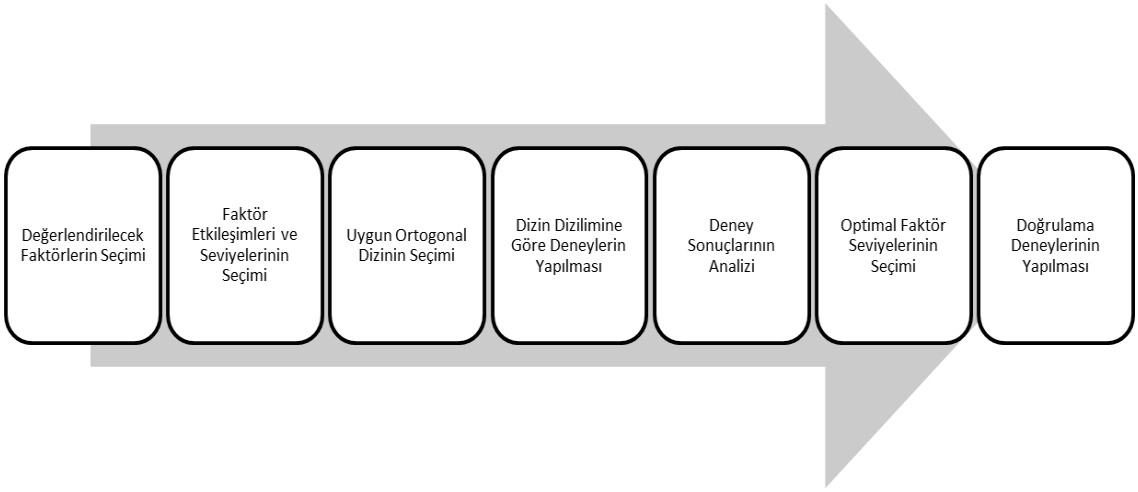
3.2.4. Taguchi Metodu

Modern deney tasarımı yöntemlerinden bahsedildiğinde ilk akla gelecek isim kendi ismiyle anılan deney tasarımı yaklaşımı ile Genichi Taguchi olup, Taguchi'nin getirdiği yaklaşım sadece deney tasarımına yönelik olmanın çok ötesindedir ve daha geniş bir perspektif ile değerlendirilmesi gerekmektedir (Savaşkan, 2003). Genichi Taguchi tarafından oluşturulan bu metotta kısmi faktöriyel tasarıma robust (sağlam) tasarım ve ortogonal dizilerin eklenmesi söz konusudur.

Sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımından oluşan robust tasarımın amacı; performansı gürültü faktörleri dolayısıyla oluşan değişime karşı duyarlı olmayan, yani bu istenmeyen ve kontrol edilemeyen etkilerden mümkün olduğunca etkilenmeyen bir sistem tasarlamaktır. Bu da kontrol edilebilen faktörlerin uygun şekilde seçimi ile sistemin kontrol edilemeyen gürültü faktörlerinden etkilenmemesini sağlayarak mümkündür (Savaşkan, 2003).

Savaşkan (2003), Taguchi metodunda deney öncesinde yapılan ayrıntılı analiz ve değerlendirmelerle gereken deney sayısını önemli şekilde düşürmek mümkün olduğunu ve bu metotun bir deney tasarımı tekniği olmanın ötesinde yüksek kalitede sistem tasarımı için son derece faydalı bir teknik olduğunu ifade etmiştir. Fakat deney sayısındaki azalmanın, faktörler arasındaki etkileşimin belirli bir oranda göz ardı edilmesini gerektirdiğini de aktarmıştır.

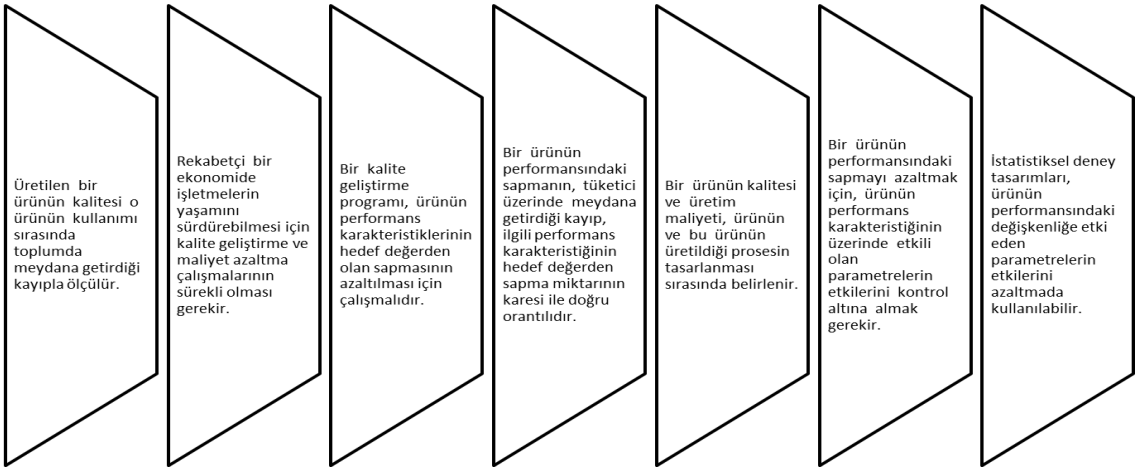
Taguchi metodunda elde edilen deney sonuçları sinyal / gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. Sinyal / gürültü oranı değeri küçük olan değer iyi, büyük olan değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerlerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir (Savaşkan, 2003). Yang ve Tarng (1998) Taguchi metodunun özetle 7 adımdan oluştuğunu ifade etmektedir. Bu adımlar sırasıyla Şekil.3.31' de gösterilmektedir.



Şekil 3.31. Taguchi metodu uygulama adımları

3.2.4.1. Taguchi Yöntemi Felsefesi

Taguchi, kurgulamış olduğu yeni tasarım metodu ile birlikte geliştirdiği kalite anlayışında; kalitenin maliyeti düşüren ve tasarım aşamasında oluşturulması gereken süreç olduğu ortaya koymuş ve bu süreci yedi temel felsefi yaklaşıma dayandırmıştır. Şanyılmaz (2006) tarafından belirtilen bu felsefi yaklaşımlar Şekil 3.32' de gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Taguchi yönteminin felsefesi

Şekil 3.32'de ifade edilen yaklaşımın daha iyi anlaşılabilmesi için bazı terimlerin açıklamasını yapmak gerekmektedir. Bu terimlerden biri olan performans karakteristiği, ürünün temel fonksiyonlarını yerine getirmesi için gerekli ve belirleyici olan özelliktir. Performans karakteristiğinin ideal değerine hedef değer, performans karakteristiğinin bu ideal değerden sapmasına da performans sapması denilmektedir. Bir diğer önemli terim olan kayıp fonksiyonu, üründeki kalitesizlikten dolayı meydana gelen tüketici memnuniyetsizliğinin derecesini belirleyen sürekli bir fonksiyondur (Şanyılmaz, 2006).

3.2.4.2. Taguchi Kalite Anlayışı

Şirvancı (1997), Taguchi'nin kaliteyi sağlamak amacıyla yapmış olduğu faaliyetleri iki bölümde incelediğini belirtmiştir. Bunlardan ilkinin pazar araştırması ile ürün ve üretim prosesinin geliştirilmesi sırasında gerçekleştirilen ve ürüne doğrudan müdahale yerine üretimin başlamasından önce gerçekleştirilen tasarım çalışmalarının olduğu çevrimdışı kalite çalışmaları olduğunu, ikincisinin ise ürünün üretimi ve satış sonrasındaki süreçleri kapsayan çevrimiçi kalite çalışmaları olduğunu ifade etmiştir. Deney tasarım metotları arasında belirttiğimiz Taguchi metodunun da çevrimdışı kalite çalışmaları arasında yer aldığını aktarmıştır.

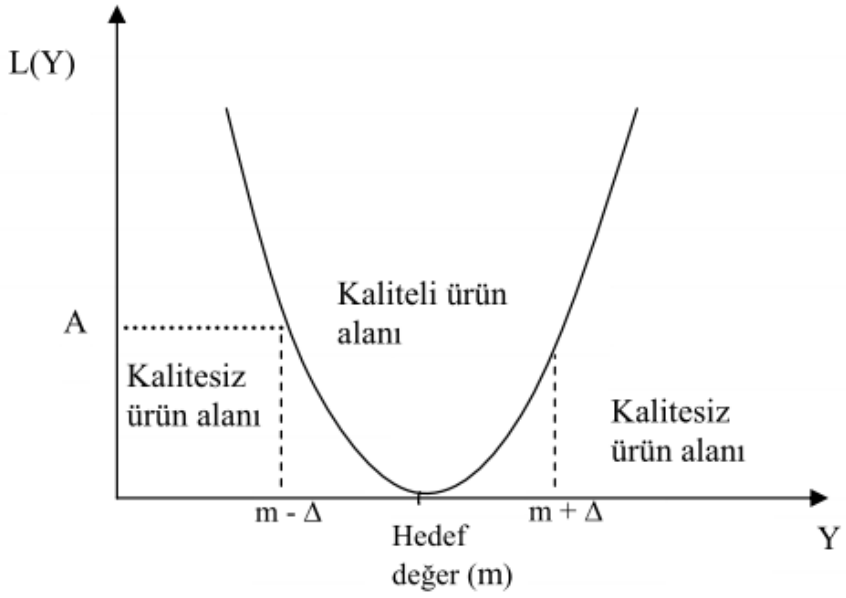
Şirvancı (1997), Taguchi'nin çevrimdışı kalite kontrol çalışmalarını ürün tasarımı ve proses tasarımı açısından ikiye ayırdığını ve hem ürün hem de proses tasarımı için kalite aşamalarını sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı olarak üç aşamaya ayırdığını belirtmiştir.

Sistem tasarımı, proses tasarımının ilk adımı olup bu adımda ürünün istenen özelliklere sahip olabilmesi için gerekli teknolojik süreçler tasarlanmakta ve ürün için en uygun olan süreç seçilmektedir. Parametre tasarımı, üründe farklı sonuçlara sebep olabilecek olan kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin seviyelerinin optimize edilerek üründe farklı sonuçlarla karşılaşma ihtimalini minimize etmektir (Taguchi, Chowdhury ve Wu, 2005). Tolerans tasarımında parametre belirleme çalışmaları sonucu istenilen hedefe ulaşılamadığı durumda yapılan ilave çalışmalar olup, bu aşamada gözlenen değerlerden faydalanılarak ürünün hedef değerden sapma göstermesinin

getirdiği kayıplar bulunur ve bu sapmalar azaltılır (Şanyılmaz, 2006). Taguchi'ye göre, ürünün kalitesini iyileştirmede en belirleyici çalışmaların yapılabileceği aşama hem ürün tasarımı hem de proses tasarımı için parametre tasarımı aşamasıdır (Şirvancı, 1997).

3.2.4.3. Taguchi Kayıp Fonksiyonu

Geleneksel kalite kontrolde; parçalar, hedef değerden sapmalarına bakmaksızın, spesifikasyonların içinde olup olmadıklarına göre değerlendirilir. Parçanın değeri sınırların dışındaysa, parça yeniden işlenir veya hurdaya sevk edilir; içindeyse, kabul edilir. Firma açısından kayıp tamdır, ya sıfırdır. Taguchi, bu geleneksel görüşün gerçeği aksettirmediğini düşünerek karesel kayıp fonksiyonunu geliştirmiştir (Şirvancı,1997). Şekil 3.33'te gösterilen Taguchi'nin kayıp fonksiyonu grafiğinde yatay eksen performans sapmasını dikey eksen ise mali kaybı belirtmektedir.



Şekil 3.33. Taguchi'nin kayıp fonksiyonu (Şanyılmaz, 2006)

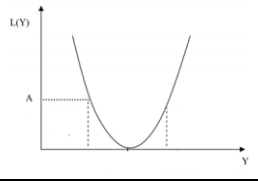
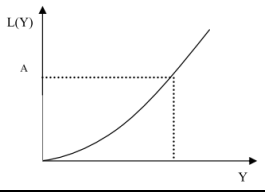
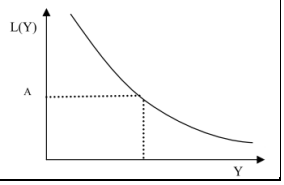
Şekil 3.33'te gösterildiği üzere performans karakteristiğini bir başka deyişle kalite değişkenini Y ile ve hedef değeri de m ile gösterildiği bir durumda; Y'nin m'den ıraksaması pek arzu edilen bir durum değildir. Tolerans değeri olarak Δ kabul edilip; $|Y - m| > \Delta$ olan ürünler tüketici tarafından kabul edilmiyorsa, Δ tüketici toleransını

ve $m-\Delta$ ile $m+\Delta$ ise tüketici tolerans sınırlarını ifade etmektedir. Performans karakteristiği *Y* olan bir ürünün herhangi bir tüketiciye vermiş olduğu kayıpların parasal değeri L(Y) ile gösterilir ve Y'nin kayıp fonksiyonu olarak adlandırılır (Şanyılmaz, 2006). Taguchi'nin kayıp fonksiyonu ise sürekli bir fonksiyon olup, şu şekilde ifade edilir.

$$yL(Y) = k(Y-m)^2 \tag{3.63}$$

Performans karakteristiğinin ya da bir başka deyişle kalite değişkeninin özelliği, kayıp fonksiyonunun biçimi belirlemede etkindir. Buna göre kayıp fonksiyonları bazen simetrik bazen simetrik olmayan yapılarda olabilir. En çok kullanılan kayıp fonksiyonları hedef değer en iyi, en küçük en iyi ya da en büyük en iyi fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlara ilişkin diğer detaylar ise Çizelge 3.8' de gösteriliştir.

Çizelge 3.8. Taguchi kayıp fonksiyon özellikleri

Kayıp Fonksiyon Adı	Hedef Değer En İyi	En Küçük En İyi	En Büyük En İyi
Eşitlik	$L(Y) = k(Y-m)^2$	$L(Y) = kY^2$	$L(Y) = k\frac{1}{Y^2}$
Grafik Gösterimi			

3.2.4.4. Performans Karakteristiği

Performans karakteristiği, bir ürün veya prosesin kalitesini belirleyen özellikleridir. Taguchi yönteminin amacı, bu karakteristiklerin hedef değer etrafındaki değişkenliğini azaltmaktır. Performans karakteristiğinin ideal değeri hedef değer olarak adlandırılır. Yüksek kaliteli bir ürün, ekonomik ömrü boyunca farklı çalışma koşulları altında fonksiyonunu daima hedef değer civarında yerine getirir. Performans karakteristiğinin

hedef değer civarındaki değişkenliği performans değişkenliği olarak adlandırılır. Hedef değer civarında daha küçük performans değişkenliği daha iyi kalite anlamına gelmektedir (Şanyılmaz, 2006).

3.2.4.5. Performans İstatistiği

Performans istatistiği, kontrol edilebilen faktörlerin farklı seviyelerinin karşılaştırılıp en uygun faktör seviye kombinasyonunun seçilmesini sağlayan bir değerlendirme metodudur. Taguchi'nin kontrol edilebilen faktörlerin ve kontrol edilemeyen faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisini ölçmek için ortalama ve standart sapma ile birlikte kullandığı performans istatistiklerinden bir tanesi de S/N (İşaret /Gürültü) olarak adlandırılan performans istatistiğidir (Şanyılmaz, 2006).

Taguchi ve diğerleri (2005) performans istatistiği olarak ortalama yerine sinyal / gürültü oranını verilerin daha anlaşılabilir ve toplanabilir olması nedeniyle tercih etmiştir. Böylelikle sinyal / gürültü oranı ortalamanın standart sapmaya oranı olarak kabul edilebilmektedir.

Sinyal / gürültü oranı ile ortalama ve ortalamanın etrafındaki değişkenlik kontrol edilebilmektedir. Ortalama dikkate alınmadığında varyans tek başına bir anlam taşımayacağından S/N oranı bulunurken dikkat edilmesi gereken nokta, ortalama ve varyansın aynı anda kontrol edilmesidir (Çelik, 1993).

Besterfield ve diğerleri (2012) birçok sinyal / gürültü oranı olduğunu ve bu oranlardan altısının temel olarak kullanıldığını belirtmiştir. Ross (1989) ise Taguchi'nin performans karakteristiğinin olması istenilen durumlarına göre geliştirdiği sinyal / gürültü oranlarından en fazla 3 tanesinin kullanıldığını ifade etmiştir. Şanyılmaz (2006) tarafından belirtilen bu eşitlikler, Çizelge 3.9' da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9. Performans karakteristiği işaret / gürültü oranı

Performans Karakteristiği	Eşitlik	Özellikleri
Hedef Değer En Küçük	$\frac{S}{N} = -10\log(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2)$	Performans karakteristiği y'nin hedef değeri 0'dır.
Hedef Değer En Büyük	$\frac{S}{N} = -10\log(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2})$	Performans karakteristiği y'nin hedef değeri sonsuzdur.
Hedef Değer En İyi	$\frac{S}{N} = 10\log(\frac{\bar{y}^2}{s^2})$	Performans karakteristiği y için belli bir hedef değer verilir.

3.2.4.6. Ortogonal Diziler

Ortogonal diziler temel olarak hangi denemede hangi faktörün hangi seviyesinin kullanılacağını belirler ve en önemli özelliği birçok faktörün minimum sayıda test ile değerlendirilmesini sağlaması ve klasik metottan farklı olarak faktör kademelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı olarak değiştirme yapmayı önermesidir. Normal 2^k faktörlü bir deneysel tasarım kurulacaksa tam faktöriyel tasarım gereği 2^k adet denemenin gerçekleştirilmesi beklenir. Kademelerden biri değiştirilip diğeri sabit tutularak deney yürütülür. Fakat Taguchi uzun çalışmalar sonucu standart deneme planları geliştirdi ve bu planların vereceği sonuçla 2^k denemenin sonuçları arasında bir fark olmayacağını iddia etti (Kamber, 2008).

Örneğin 2 seviyeli 7 faktör için tam faktöriyel tasarım gereği 128 deney yapılması gerekirken, Taguchi bu deney sayısını 8'e düşürmektedir. Bu sayede önemli derecede

zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanmaktadır (Mercan, 2019). Çizelge 3.10' da bu düşüşe ilişkin deney planı yer almaktadır.

Çizelge 3.10. 2^k deney tasarımı ve Taguchi deney tasarımı farkı (Mercan, 2019)

Deneme	Faktör No						
No	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	1	2	1
4	1	1	1	1	1	2	2
5	1	1	1	1	2	1	1
6	1	1	1	1	2	1	2
:	:	:	:	:	:	:	:
128	2	2	2	2	2	2	2

Deneme	Faktör No						
No	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Bu dizilere her faktörde eşit miktarda farklı seviye bulundurduğu için ortogonal dizi denilmektedir. Ortogonal diziler 2 seviyeli. 3 seviyeli ve 2 ve 3 seviyeli olmak üzere üç türlü belirlenmişlerdir. Belirlenen bu diziler standart olup Taguchi deneysel tasarımının temel taşlarını oluştururlar. Taguchi metodu kullanılarak yapılacak her deney bu standart dizilerden birini seçip kullanmak zorundadır. Şayet başlangıçta faktörlere uygun dizi bulunamadıysa faktörlerde bir takım yeni düzenlemeler yapıp dizilerden birine uydurmak gerekmektedir. En çok kullanılan diziler 2 seviyeliler için L_4, L_8, L_{12} ve L_{32} iken 3 seviyeliler için L_9, L_{18}, L_{27} dizileri olmaktadır. Her iki seviyenin karışık kullanıldığı dizilerden bazıları L_{18}, L_{36}, L_{54} dizileridir (Kamber, 2008).

Uygun dizinin seçilmesi tasarımdaki faktörlerin seviyelerine ve toplam serbestlik derecelerine bağlı olarak yapılır. Toplam serbestlik derecesi her bir faktörün serbestlik dereceleri toplamını ifade eder. Ayrı ayrı her bir faktörün serbestlik dereceleri toplamı bir dizinin toplam serbestlik derecesini verir (Mercan, 2019). V_A, A faktörünün serbestlik derecesi, V_{AB}, A faktörünün B faktörü ile etkileşiminin serbestlik derecesi ve k_A ise A faktörünün seviye sayısı olmak üzere serbestlik derecesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_A = (k_A - 1)\, V_{AB} \tag{3.64}$$

Tüm faktör ve faktör etkileşimlerinin serbestlik dereceleri toplamı ise faktör grubunun serbestlik derecesini verir. Toplam yapılacak deney sayısı ise faktör grubunun toplam serbestlik derecesine 1 eklenerek bulunur. Serbestlik derecesi belli olan faktörler için uygun ortogonal dizi seçimi kolaylıkla yapılabilir. (Mercan, 2019). Çizelge 3.11' de Taguchi metodunda kullanılabilecek olan uygun ortogonal diziler gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. Ortogonal dizi seçim tablosu (Gökçe ve Taşgetiren, 2009)

Seviye Sayısı								
Parametre Sayısı	2		3		4		5	
	P = 2,S = 2	L4	P = 2,S = 3	L9	P = 2,S = 4	L'16	P = 2,S = 5	L25
	P = 3,S = 2		P = 3,S = 3		P = 3,S = 4		P = 3,S = 5	
	P = 4,S = 2	L8	P = 4,S = 3		P = 4,S = 4		P = 4,S = 5	
	P = 5,S = 2		P = 5,S = 3	L18	P = 5,S = 4		P = 5,S = 5	
	P = 6,S = 2		P = 6,S = 3		P = 6,S = 4	L'32	P = 6,S = 5	
	P = 7,S = 2		P = 7,S = 3		P = 7,S = 4		P = 7,S = 5	L50
	P = 8,S = 2	L11	P = 8,S = 3		P = 8,S = 4		P = 8,S = 5	
	P = 9,S = 2		P = 9,S = 3	L27	P = 9,S = 4		P = 9,S = 5	
	P = 10,S = 2		P = 10,S = 3		P = 10,S = 4		P = 10,S = 5	
	P = 11,S = 2		P = 11,S = 3				P = 11,S = 5	
	P = 12,S = 2	L16	P = 12,S = 3				P = 12,S = 5	
	P = 13,S = 2		P = 13,S = 3					
	P = 14,S = 2		P = 14,S = 3	L36				
	P = 15,S = 2		P = 15,S = 3					
	P = 16,S = 2	L32	P = 16,S = 3					
	P = 17,S = 2		P = 17,S = 3					
	P = 18,S = 2		P = 18,S = 3					
	P = 19,S = 2		P = 19,S = 3					
	P = 20,S = 2		P = 20,S = 3					
	P = 21,S = 2		P = 21,S = 3					
	P = 22,S = 2		P = 22,S = 3					
	P = 23,S = 2		P = 23,S = 3					
	P = 24,S = 2							
	P = 25,S = 2							
	P = 26,S = 2							
	P = 27,S = 2							
	P = 28,S = 2							
	P = 29,S = 2							
	P = 30,S = 2							
	P = 31,S = 2							

3.2.5. Deney Tasarımı Çalışmaları İçin Sayısal Yöntem

Faktöriyel tasarım, yanıt yüzey yöntemi ve Taguchi metodu, deneysel sonuçların kullanılarak modelleme yapmak ve elde edilen sonuçları değerlendirmek amacıyla kullanılan deney tasarım teknikleridir. Fakat her bir tekniğin farklı metodolojik yaklaşımlar için uygulanması, elde edilen deneysel sonuçların özelliklerine göre bu tekniklerden birisinin tercih edilmesi gerekmektedir. Faktöriyel tasarım tekniği, sistem girdileri (faktörler) ile çıktıları (yanıtlar) arasında doğrusal ilişkilerin söz konusu olduğu modellemelerde; yanıt yüzey yöntemi ise sistem girdileri (faktörler) ile çıktıları (yanıtlar) arasında doğrusal olmayan ilişkilerin söz konusu olduğu modellemelerde tercih edilmektedir. Taguchi metodu ise sistem girdilerinin (faktörler) belirlenen bir durum için en iyi kombinasyonunun belirlenmesi için tercih edilmektedir.

İleri, Karaoğlan ve Atmanlı (2013), yanıt yüzey yöntemini Taguchi metodu ve faktöriyel tasarım ile karşılaştırdığında, yanıt yüzey yönteminin lineer olmayan sistemleri optimize etmek için kullanılabilmesi, ikinci dereceden tam kuadratik modeller ile modellenebilmesi ve faktör seviyelerinin ondalık sayıları ile optimal çözümler sunabilmesi avantajına sahip olduğunu; Taguchi metodunun verilen faktör seviyeleri faktörlerin optimumm dizilimini ve faktöriyel tasarımın birinci dereceden polinomlarla modellenebilen sistemler için uygun olguğunu belirtmiştir. Küçükkoç, Karaoğlan ve Yaman (2013), Taguchi deney tasarımı, daha az deney gerektiren ve en iyi parametre kombinasyonunu bulmak için kullanılan iyi bilinen ve etkili deney tekniklerinden birisi olduğunu, fakat Taguchi yönteminin bir dezavantajının parametreler arasındaki ilişkilerin matematiksel modelini vermemesinden dolayı ara değerleri tahmin etmenin imkansız olduğunu belirtmiştir.

3.2.5.1. Faktöriyel Tasarım

Faktöriyel tasarım tekniğinin deney tasarımı olarak kullanılması için girdiler (faktörler) ve çıktılar (yanıtlar) arasındaki ilişkinin doğrusal olması gerekmektedir. Fakat yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarından elde edilen sonuçlar doğrusal nitelikte olmadığı için gerçekleştirilecek olan deney tasarımı teknikleri doğrulanabilir ya da istatistiksel olarak mantıklı sonuçlar vermeyecektir. Bu durum göz önünde

bulundurulduğunda faktöriyel tasarım deney tekniği bu çalışma kapsamında değerlendirilemeye alınmamıştır.

3.2.5.2. Yanıt Yüzey Yöntemi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarından elde edilen veriler değerlendirildiğinde sistem girdisi olarak genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyesi ele alınmıştır. Genişleme oranının 3 farklı seviyesi (1,11, 1,25 ve 1,43), basınç gradyeninin 5 farklı seviyesi (-2º, 0º, 2º, 4º ve 6º) ve türbülans seviyesinin 5 farklı seviyesi (%0,2, %1,3, %3,3, %5,3 ve %7,4) hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları kapsamında değerlendirilmiştir. Yeniden birleşme uzunluğu, ortalama Stanton sayısı, maksimum Stanton sayısı, ortalama Nusselt sayısı, maksimum Nusselts sayısı ve maksimum kinetik enerji sistem çıktısı (yanıt) olarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonrasında genişleme oranının 1,43 olduğu durum için basınç gradyeninin 4º ve 6º olduğu analizlerde yeniden birleşmenin olmamasından ve türbülans seviyeleri arasında yaklaşık olarak aynı farkların değerlendirilmesi için %1,3 ve %5,3'lük türbülans seviyeleri değerlendirmeye alınmayarak 3 seviyeye sahip olan 3 faktörün, yeniden birleşme uzunluğu, ortalama Stanton sayısı ve maksimum Stanton sayıyı olarak 3 farklı çıktı için yanıt yüzey yöntemi kullanılmıştır.

Yanıt yüzey yöntemi ile bağımsız değişkenlerin modellemesi yapılarak optimizasyon yapılmış ve bu değişkenlerin birbirleri olan tepkimeleri ile de yorumlanmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen deneysel kombinasyonlar sonucunda elde edilen analiz sonuçları kullanılarak, oluşturulan matematiksel model yardımıyla bilinmeyen ara değerlerin tespiti gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen yanıtların, bağımsız değişkenler olarak tanımlanan sistem girdileri olan ilişkileri ikinci dereceden polinom ya da üssel fonksiyon olarak Denkem 3.62'deki gibi tanımlanmıştır. Uygulanan deney tekniği sonucunda ise ANOVA analizleri gerçekleştirilerek, giriş parametrelerinin yanıtlar ile olan ilişkileri ortaya çıkarılmıştır. Bu analizler %95 güven aralığı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar buna göre değerlendirilmiştir.

3.2.5.3. Taguchi Metodu

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarından elde edilen veriler değerlendirildiğinde sistem girdisi olarak genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyesi ele alınmıştır. Genişleme oranının 3 farklı seviyesi (1,11, 1,25 ve 1,43), basınç gradyeninin 5 farklı seviyesi (-2º, 0º, 2º, 4º ve 6º) ve türbülans seviyesinin 5 farklı seviyesi (%0,2, %1,3, %3,3, %5,3 ve %7,4) hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları kapsamında değerlendirilmiştir. Yeniden birleşme uzunluğu, ortalama Stanton sayısı, maksimum Stanton sayısı, ortalama Nusselt sayısı, maksimum Nusselts sayısı ve maksimum kinetik enerji sistem çıktısı (yanıt) olarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonrasında genişleme oranının 1,43 olduğu durum için basınç gradyeninin 4º ve 6º olduğu analizlerde yeniden birleşmenin olmamasından ve türbülans seviyeleri arasında yaklaşık olarak aynı farkların değerlendirilmesi için %1,3 ve %5,3'lük türbülans seviyeleri değerlendirmeye alınmayarak 3 seviyeye sahip olan 3 faktörün, yeniden birleşme uzunluğu, ortalama Stanton sayısı ve maksimum Stanton sayıyı olarak 3 farklı yanıt için Taguchi metodu kullanılmıştır.

Uygulanan deney tasarımı tekniği ile 3 farklı faktör ve her faktörün 3 seviyesi için normalde 27 farklı analiz gerçekleştirilmesi gerekirken Taguchi metodu kullanılarak toplamda dokuz deney yardımıyla gerekli sonuçlara ulaşılmıştır. Tasarıma uygun dizi olarak L_9 dizisi seçilmiş ve ulaşılmak istenilen değer için ise "hedef değer en büyük" yaklaşımı sergilenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en uzun yeniden birleşme uzunluğunu ve en yüksek ortalama ve maksimum Stanton sayılarını sağlayacak olan parametre kombinasyonlarına ulaşılmaya çalışılmıştır.

4. BULGULAR

4.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Uygulamaları

4.1.1. Deneysel Çalışmanın Doğrulanması

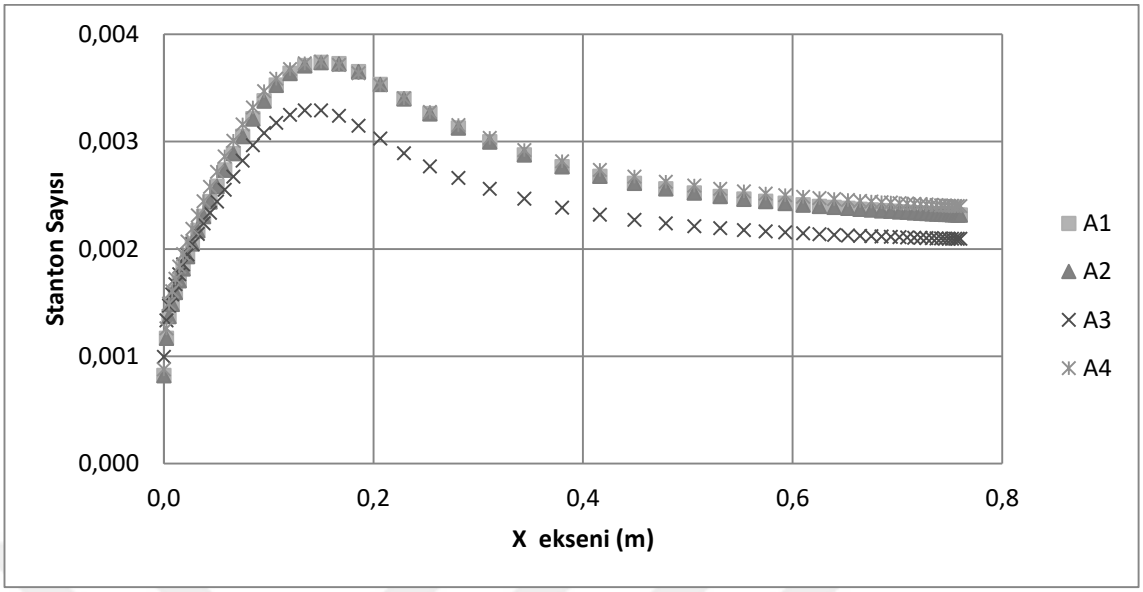
Şekil 3.4'te belirtilen temel geometri üzerinde yapılan analizlerde Şekil 3.23'teki y^+ karşılaştırması ve Şekil 3.25'teki hız profili analizleri ile gerekli güvenilirlik seviyesine ulaşılmıştır. Erişilen bu noktanın ardından, Vogel ve Eaton (1985) deneysel çalışmasında paylaşılan ve Şekil 3.24'te belirtilen doğrulama grafiğinde gösterilen sonuca Şekil 3.22'deki seçenekler kullanılarak ulaşılmaya çalışılmıştır. Toplam 48 farklı simülasyon algoritması ayrı ayrı gruplandırılarak yapılan bu çalışma ile ısı transferini en iyi tahmin eden basınç hız bağlantısı, uzaysal ayrıklaştırma algoritması, türbülans modeli ve duvar fonksiyonu sisteminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte basamak sonrasındaki alt duvarda oluşan yeniden birleşme uzunluğu da hesaplamak amacıyla basamak sonrasındaki yüzeye en yakın cidardaki ağ örgüsünün x-ekseni üzerindeki hız profili incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel çalışmasının doğrulanması için gerekli ampirik ifadelerde kullanılmıştır. Tüm bu doğrulama çalışmaları için oluşturulan simülasyon grupları Çizelge 4.1'de; gruplara göre yapılan analizler sonucunda elde edilen Stanton sayılarının basamak sonrasındaki alt duvara göre gösterimleri ve basamak sonrasında x-ekseni boyunca uzanan hız profilleri Şekil 4.1 - 4.24' te gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Simülasyon algoritmana göre gruplandırma

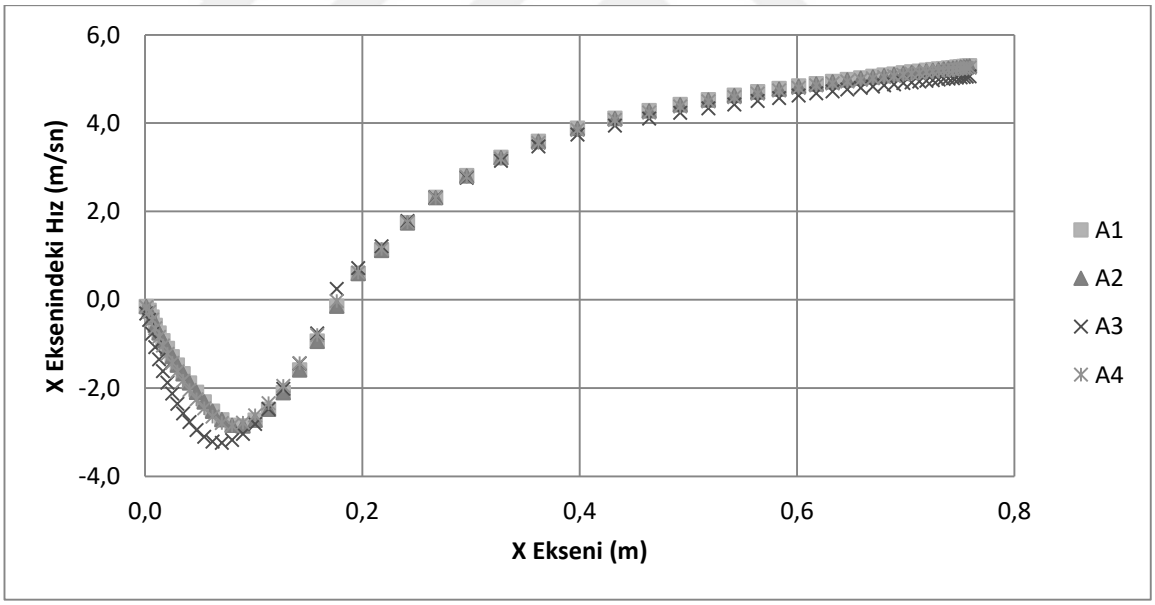
Grup	Analiz	Basınç Hız Bağlantısı	Uzaysal Ayrıklaştırma	Türbülans Modeli	Duvar Fonksiyonu
A	1	SIMPLE	Birinci Derece	Standart k ε	Standart
	2	SIMPLE	Birinci Derece	Standart k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLE	Birinci Derece	Standart k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLE	Birinci Derece	Standart k ε	Güçlendirilmiş
B	1	SIMPLE	İkinci Derece	Standart k ε	Standart
	2	SIMPLE	İkinci Derece	Standart k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLE	İkinci Derece	Standart k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLE	İkinci Derece	Standart k ε	Güçlendirilmiş

Çizelge 4.1. Simülasyon algoritmana göre gruplandırma (devam)

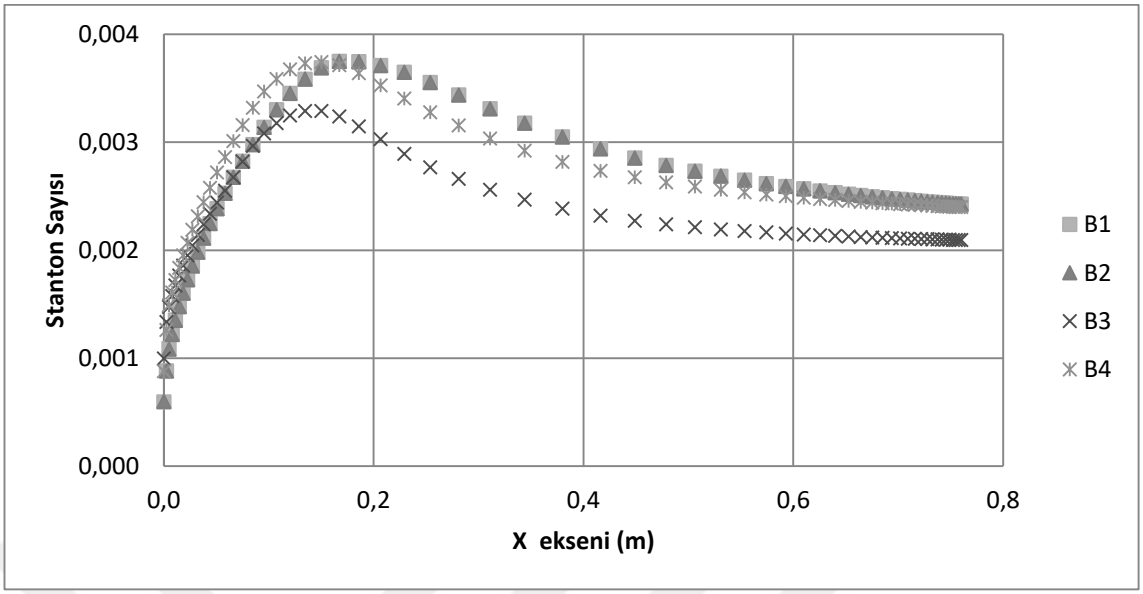
Grup	Analiz	Basınç Hız Bağlantısı	Uzaysal Ayrıklaştırma	Türbülans Modeli	Duvar Fonksiyonu
C	1	SIMPLEC	Birinci Derece	Standart k ε	Standart
	2	SIMPLEC	Birinci Derece	Standart k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLEC	Birinci Derece	Standart k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLEC	Birinci Derece	Standart k ε	Güçlendirilmiş
D	1	SIMPLEC	İkinci Derece	Standart k ε	Standart
	2	SIMPLEC	İkinci Derece	Standart k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLEC	İkinci Derece	Standart k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLEC	İkinci Derece	Standart k ε	Güçlendirilmiş
E	1	SIMPLE	Birinci Derece	RNG k ε	Standart
	2	SIMPLE	Birinci Derece	RNG k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLE	Birinci Derece	RNG k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLE	Birinci Derece	RNG k ε	Güçlendirilmiş
F	1	SIMPLE	İkinci Derece	RNG k ε	Standart
	2	SIMPLE	İkinci Derece	RNG k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLE	İkinci Derece	RNG k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLE	İkinci Derece	RNG k ε	Güçlendirilmiş
G	1	SIMPLEC	Birinci Derece	RNG k ε	Standart
	2	SIMPLEC	Birinci Derece	RNG k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLEC	Birinci Derece	RNG k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLEC	Birinci Derece	RNG k ε	Güçlendirilmiş
H	1	SIMPLEC	İkinci Derece	RNG k ε	Standart
	2	SIMPLEC	İkinci Derece	RNG k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLEC	İkinci Derece	RNG k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLEC	İkinci Derece	RNG k ε	Güçlendirilmiş
I	1	SIMPLE	Birinci Derece	Realizable k ε	Standart
	2	SIMPLE	Birinci Derece	Realizable k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLE	Birinci Derece	Realizable k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLE	Birinci Derece	Realizable k ε	Güçlendirilmiş
J	**1**	**SIMPLE**	**İkinci Derece**	**Realizable k ε**	**Standart**
	2	SIMPLE	İkinci Derece	Realizable k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLE	İkinci Derece	Realizable k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLE	İkinci Derece	Realizable k ε	Güçlendirilmiş
K	1	SIMPLEC	Birinci Derece	Realizable k ε	Standart
	2	SIMPLEC	Birinci Derece	Realizable k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLEC	Birinci Derece	Realizable k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLEC	Birinci Derece	Realizable k ε	Güçlendirilmiş
L	1	SIMPLEC	İkinci Derece	Realizable k ε	Standart
	2	SIMPLEC	İkinci Derece	Realizable k ε	Ölçülebilir
	3	SIMPLEC	İkinci Derece	Realizable k ε	Dengesiz.
	4	SIMPLEC	İkinci Derece	Realizable k ε	Güçlendirilmiş



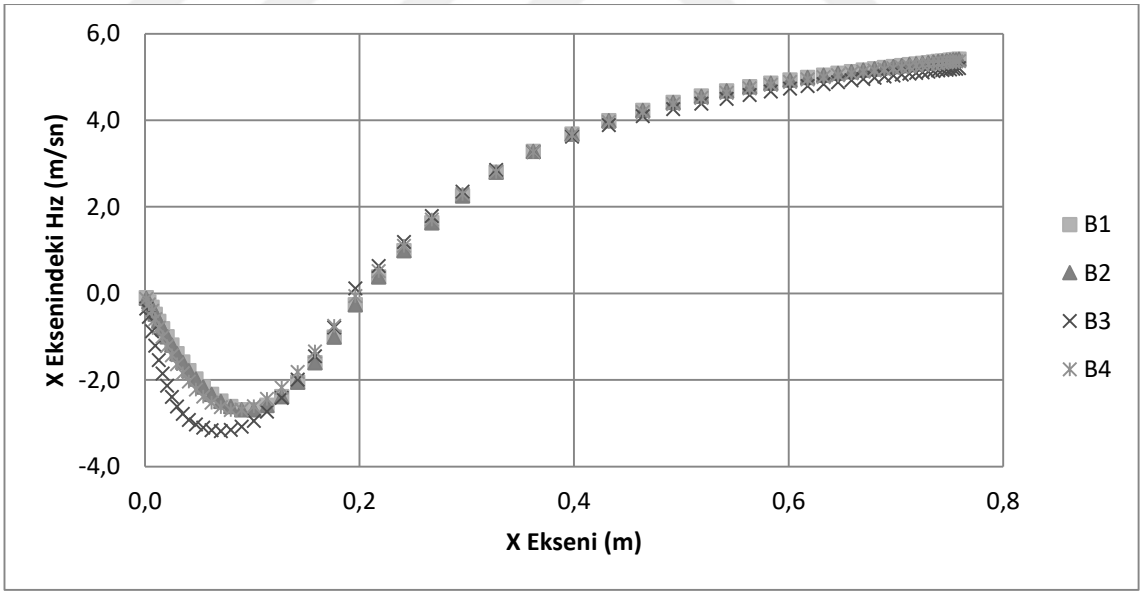
Şekil 4.1. A grubu simülasyonları Stanton grafikleri



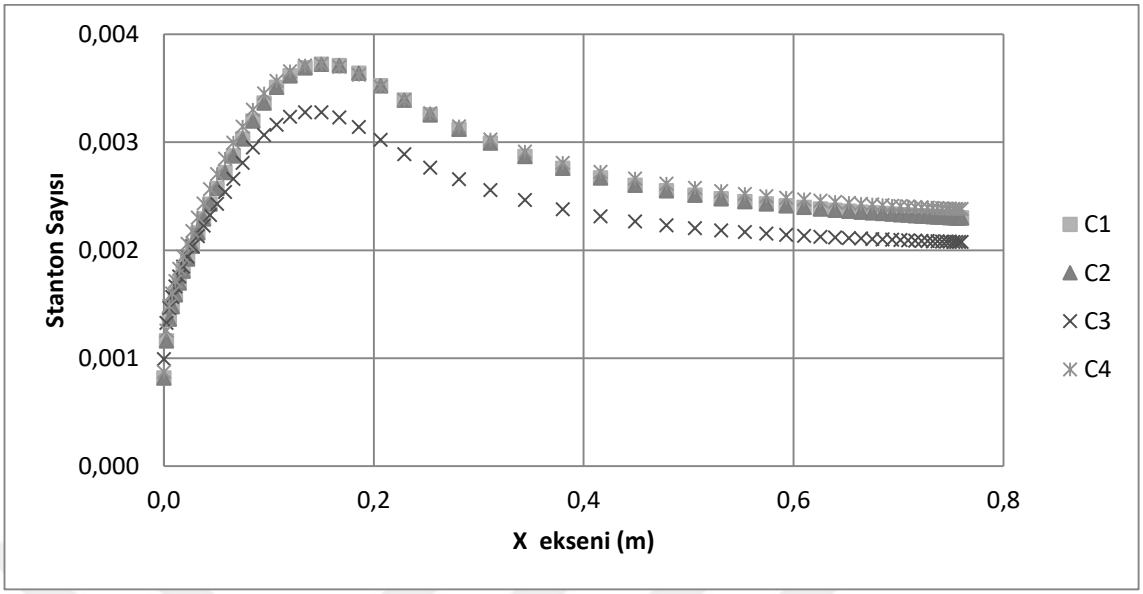
Şekil 4.2. A grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



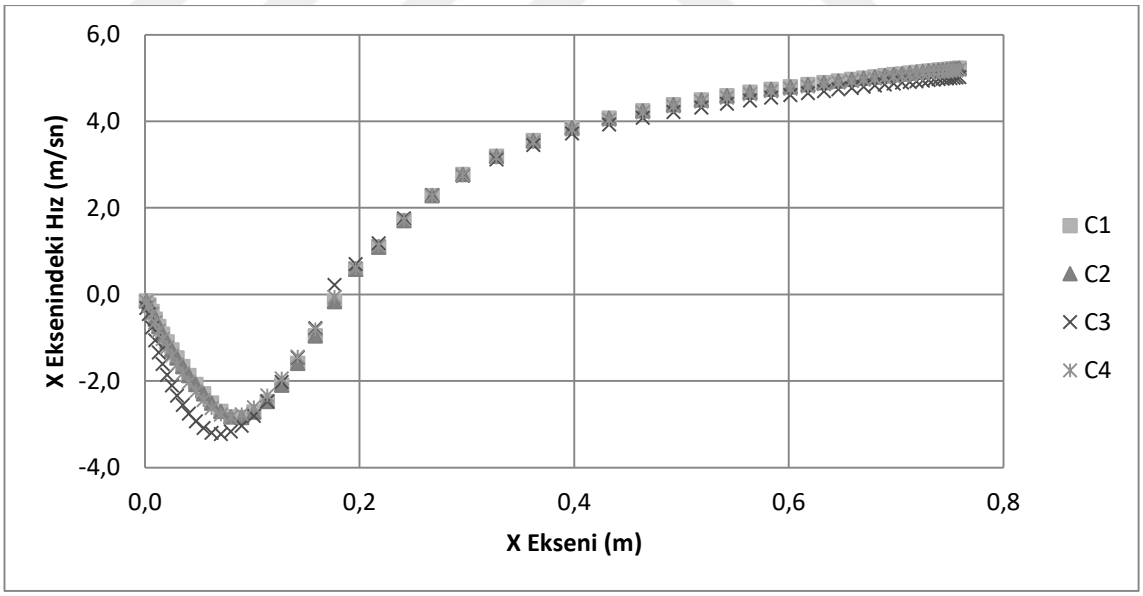
Şekil 4.3. B grubu simülasyonları Stanton grafikleri



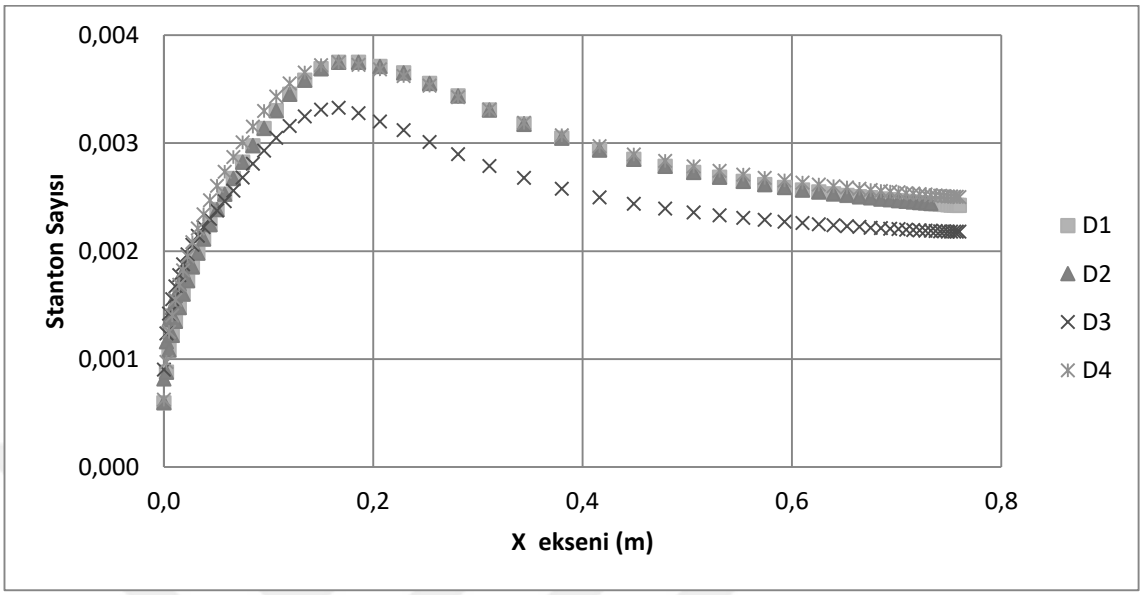
Şekil 4.4. B grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



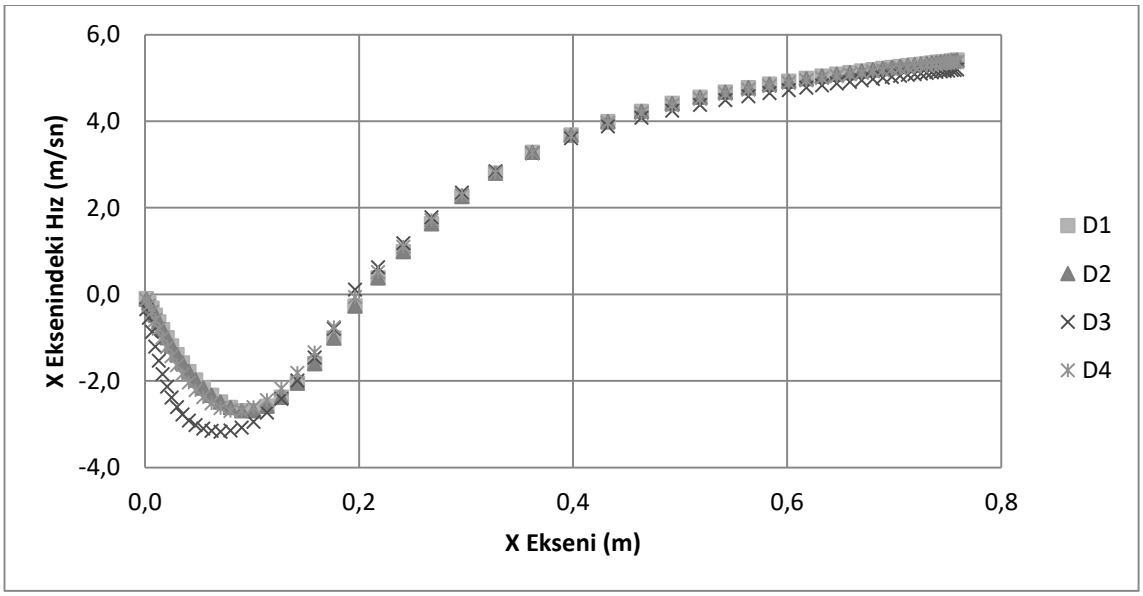
Şekil 4.5. C grubu simülasyonları Stanton grafikleri



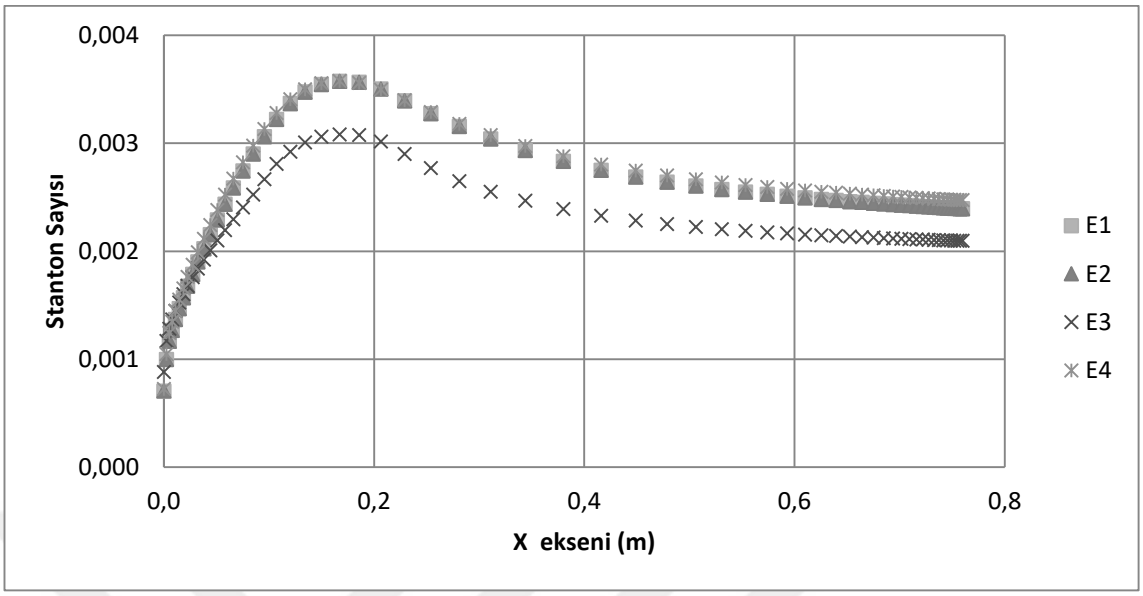
Şekil 4.6. C grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



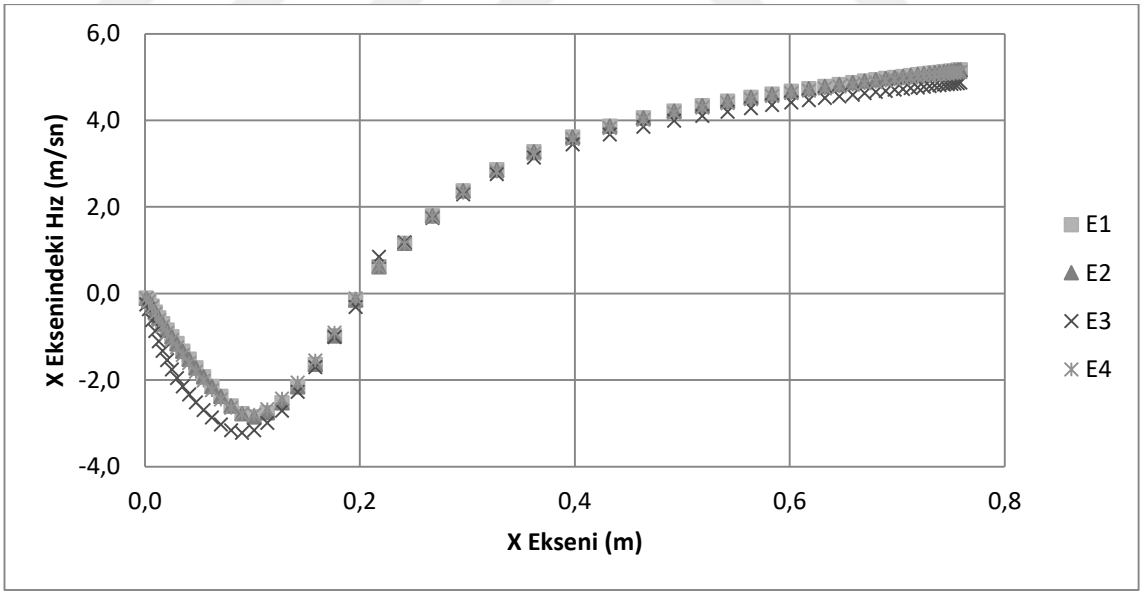
Şekil 4.7. D grubu simülasyonları Stanton grafikleri



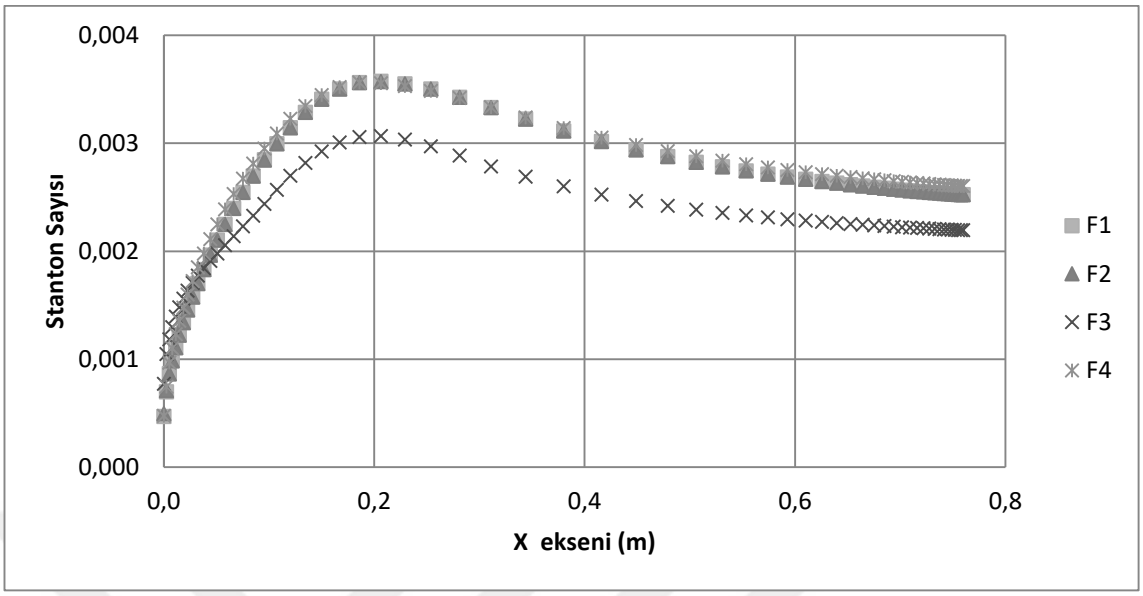
Şekil 4.8. D grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



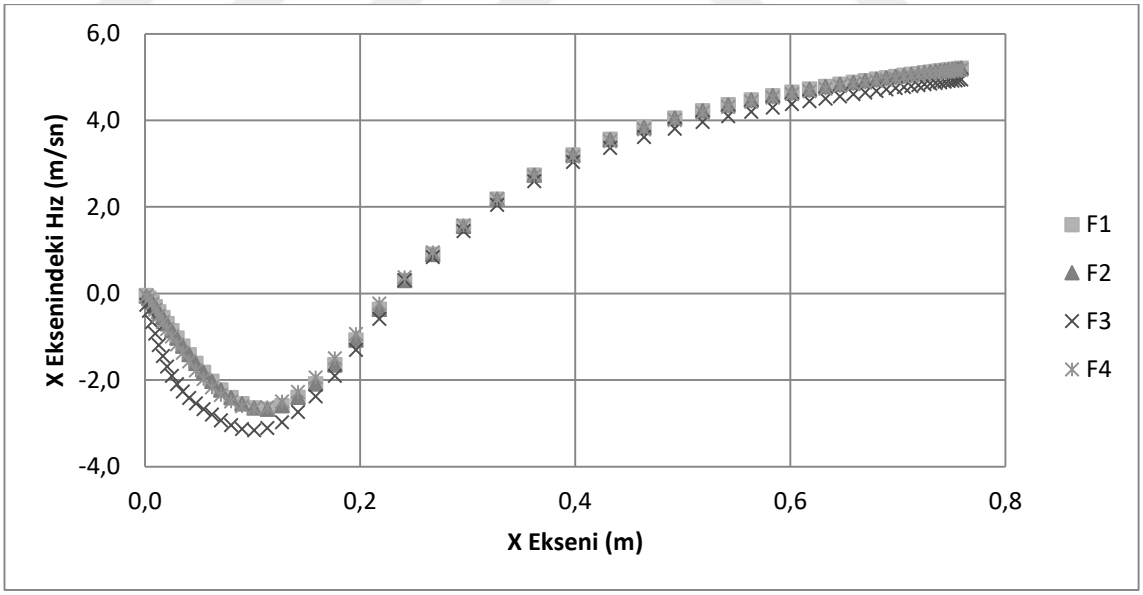
Şekil 4.9. E grubu simülasyonları Stanton grafikleri



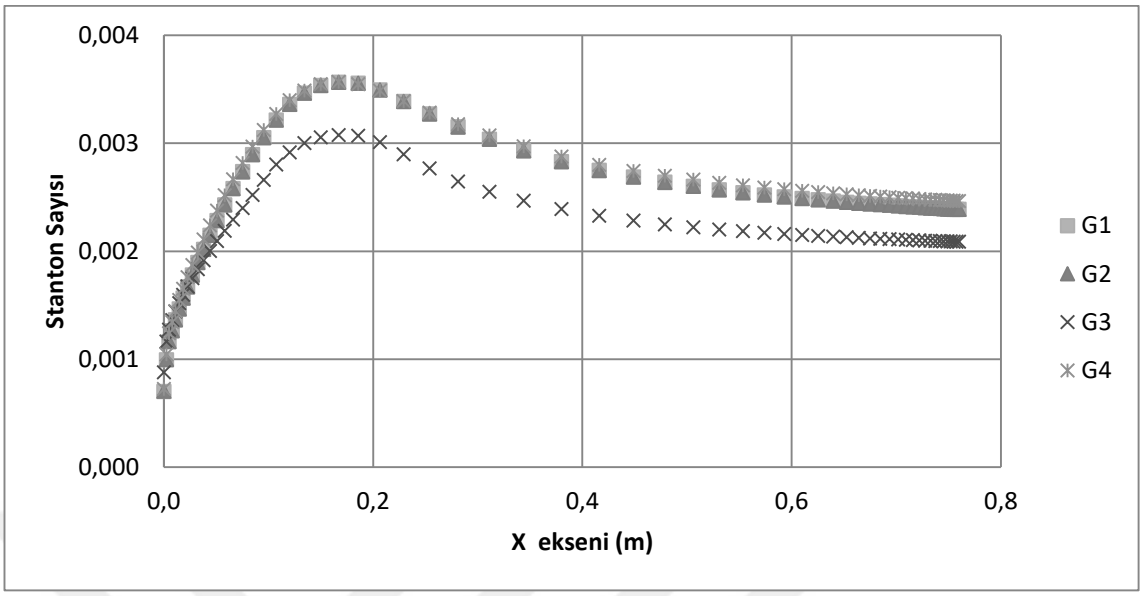
Şekil 4.10. E grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



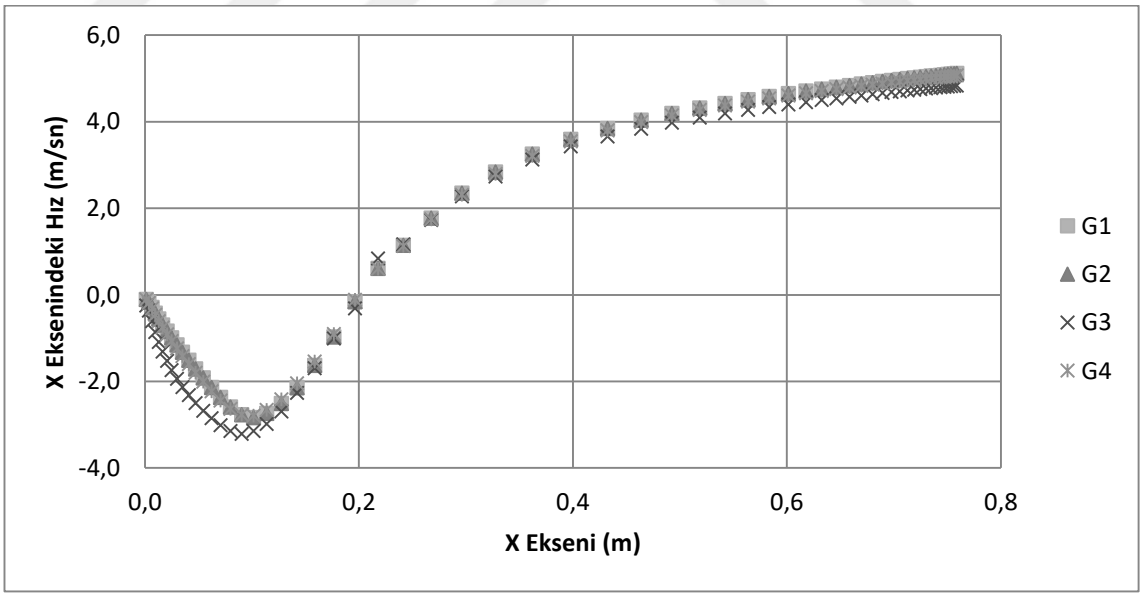
Şekil 4.11. F grubu simülasyonları Stanton grafikleri



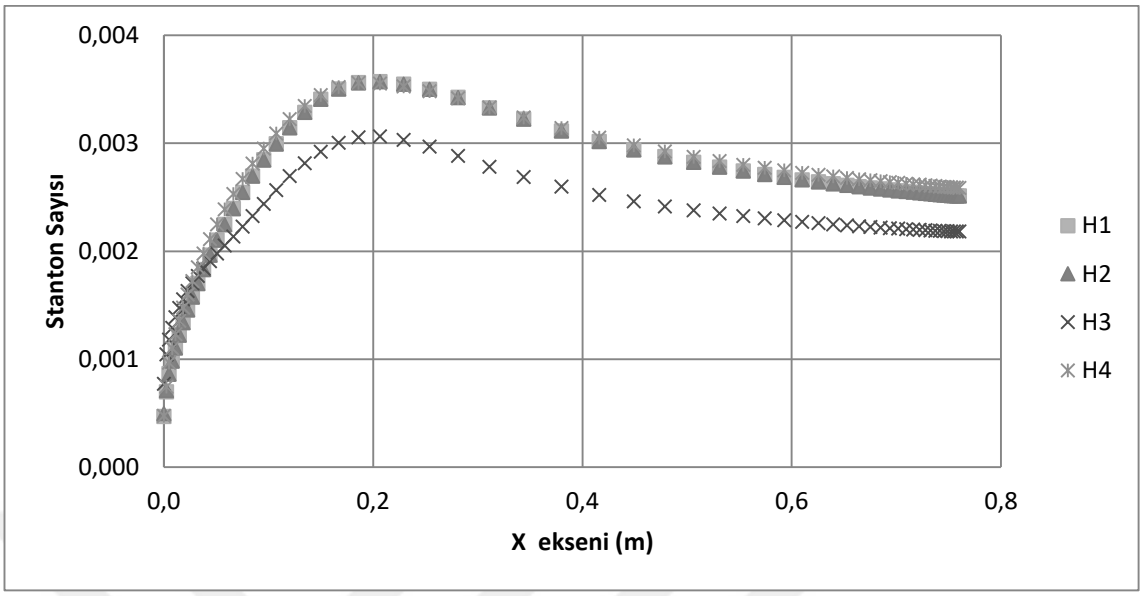
Şekil 4.12. F grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



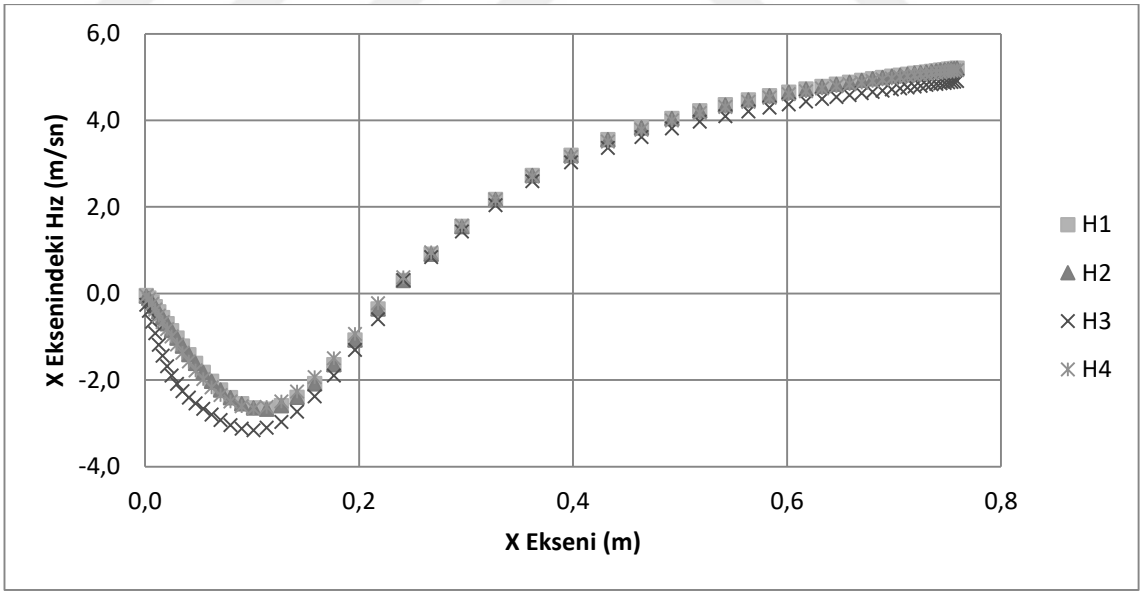
Şekil 4.13. G grubu simülasyonları Stanton grafikleri



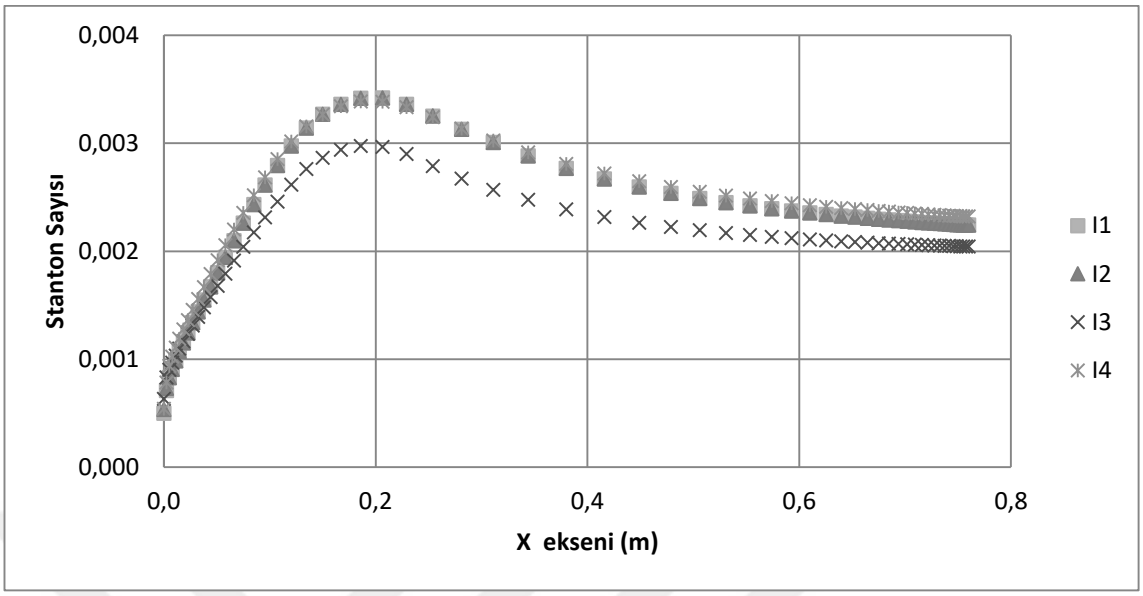
Şekil 4.14. G grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



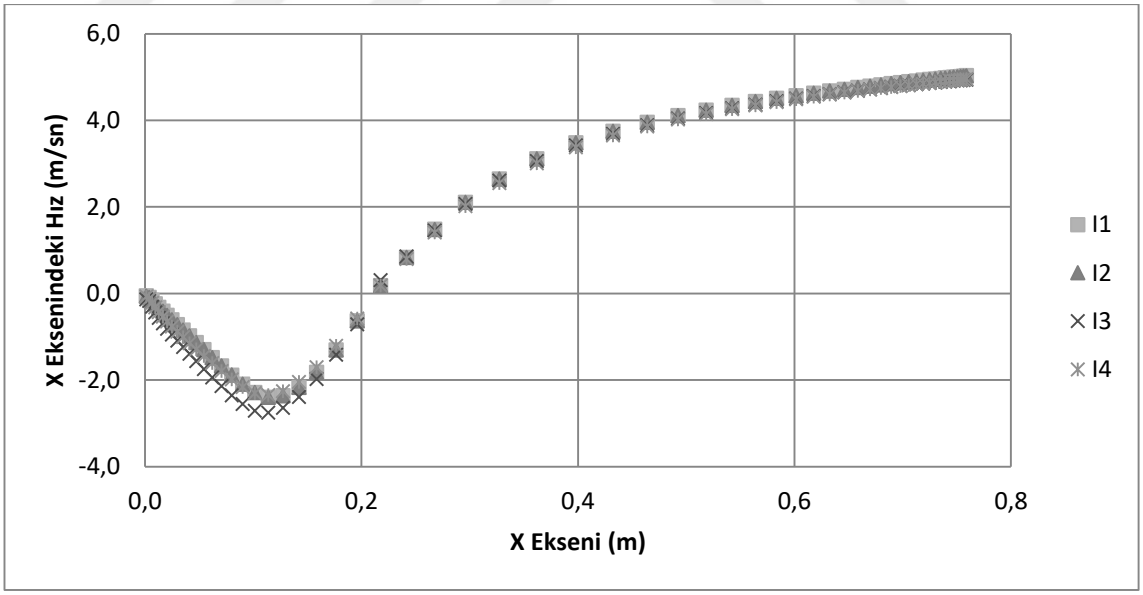
Şekil 4.15. H grubu simülasyonları Stanton grafikleri



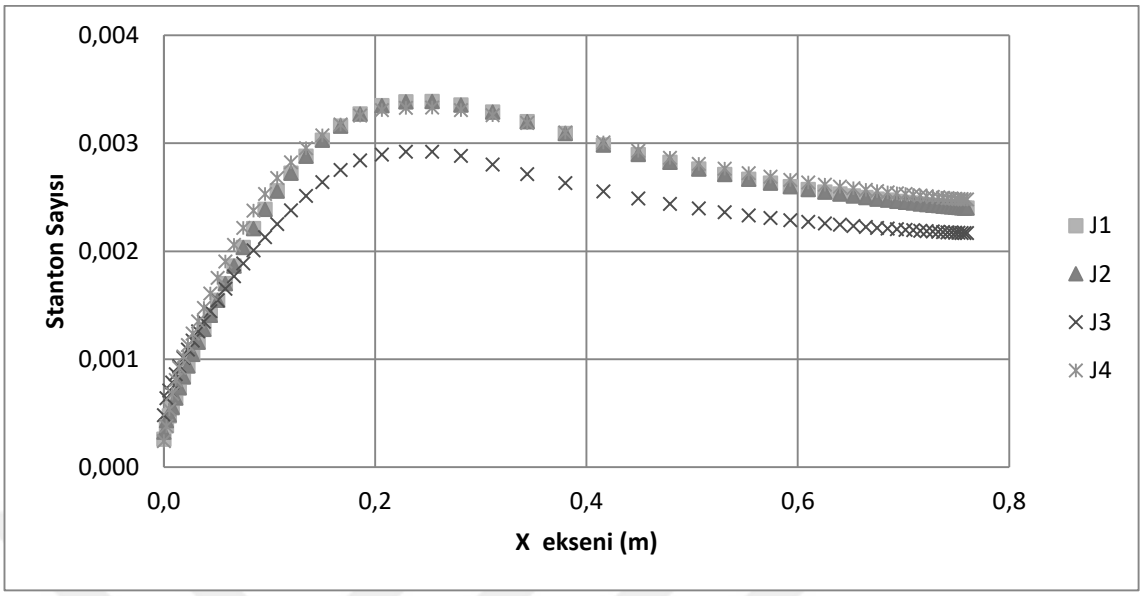
Şekil 4.16. H grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



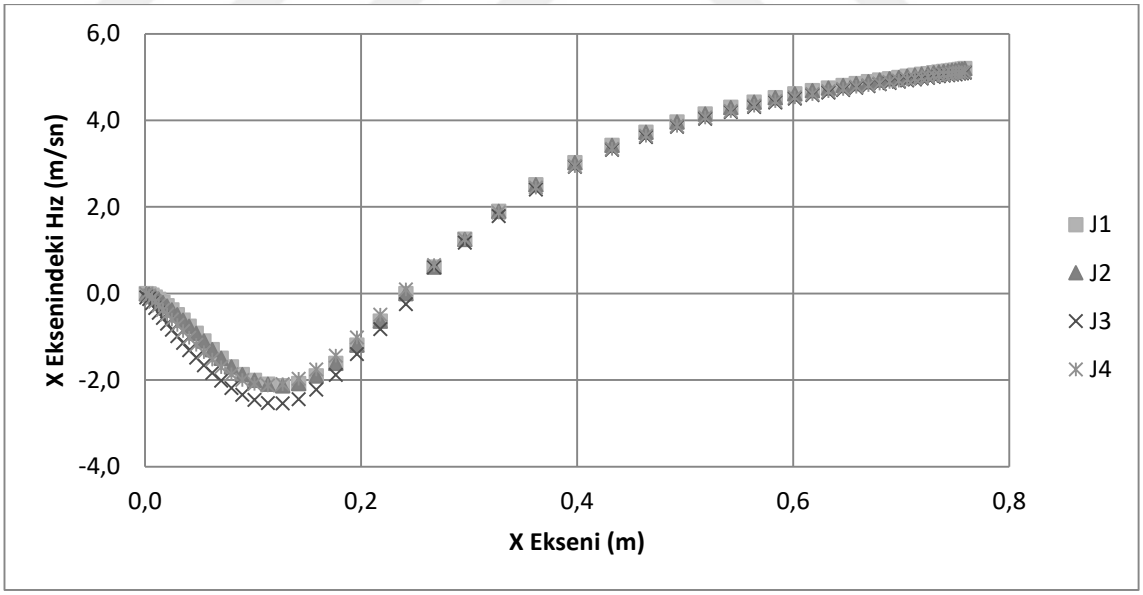
Şekil 4.17. I grubu simülasyonları Stanton grafikleri



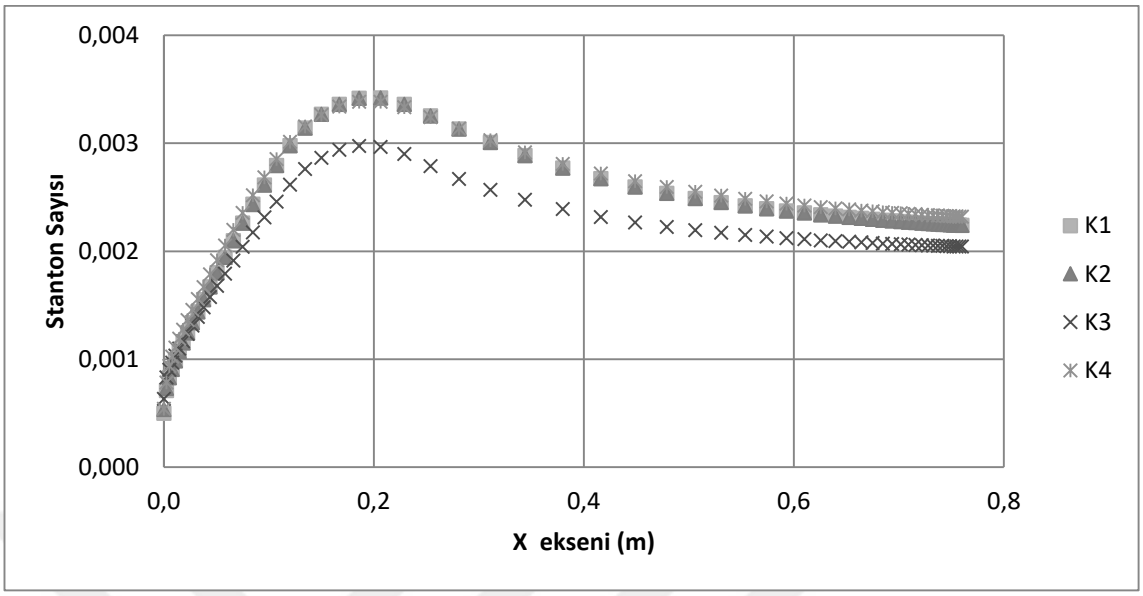
Şekil 4.18. I grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



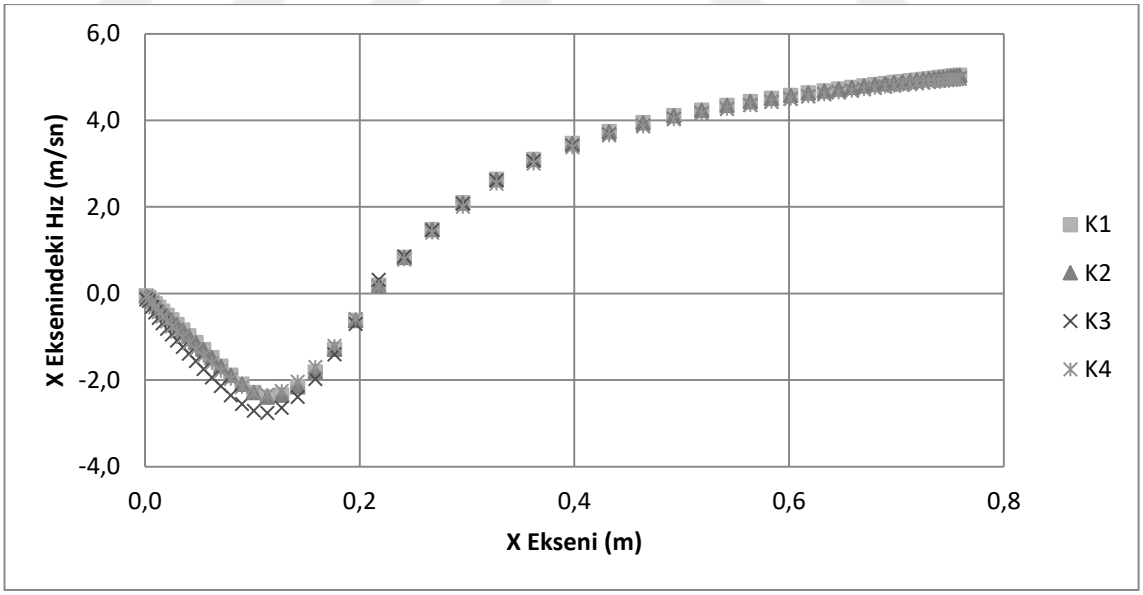
Şekil 4.19. J grubu simülasyonları Stanton grafikleri



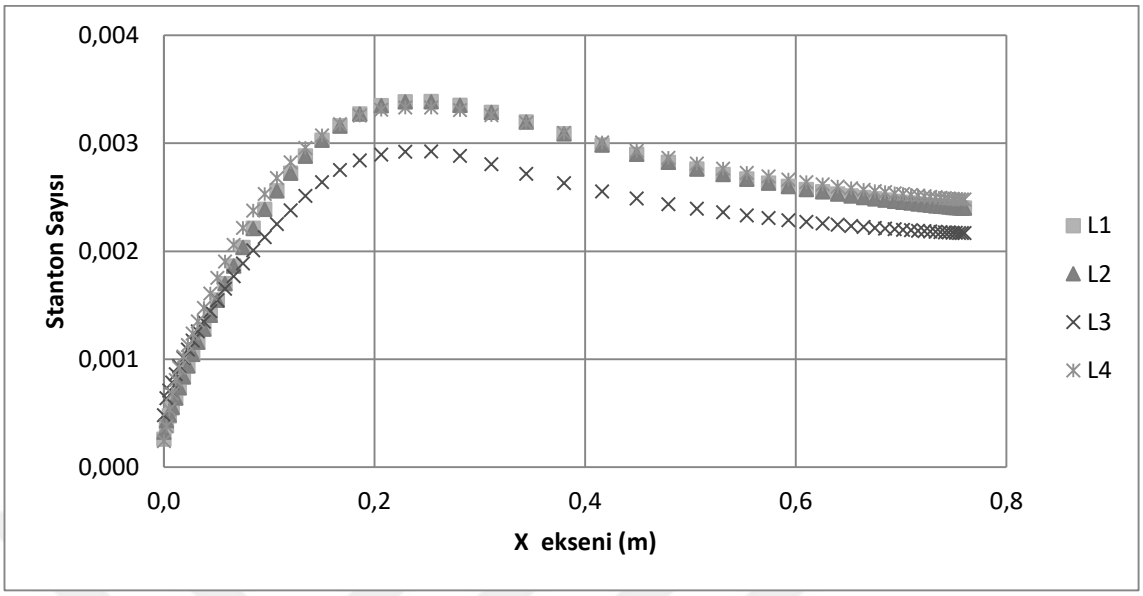
Şekil 4.20. J grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



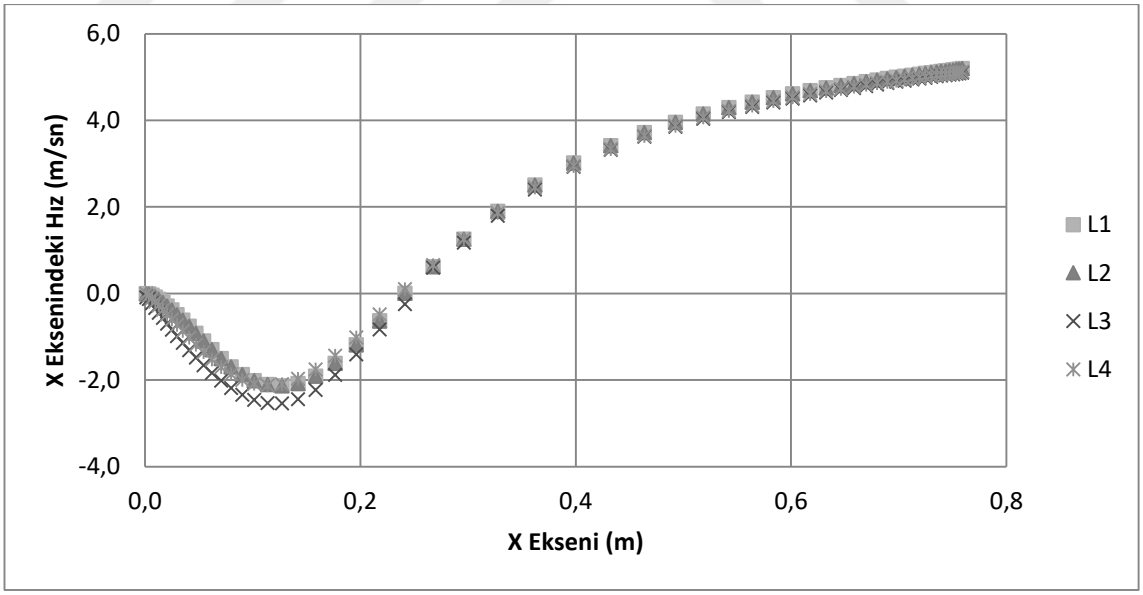
Şekil 4.21. K grubu simülasyonları Stanton grafikleri



Şekil 4.22. K grubu simülasyonları x-ekseni hız profili



Şekil 4.23. L grubu simülasyonları Stanton grafikleri



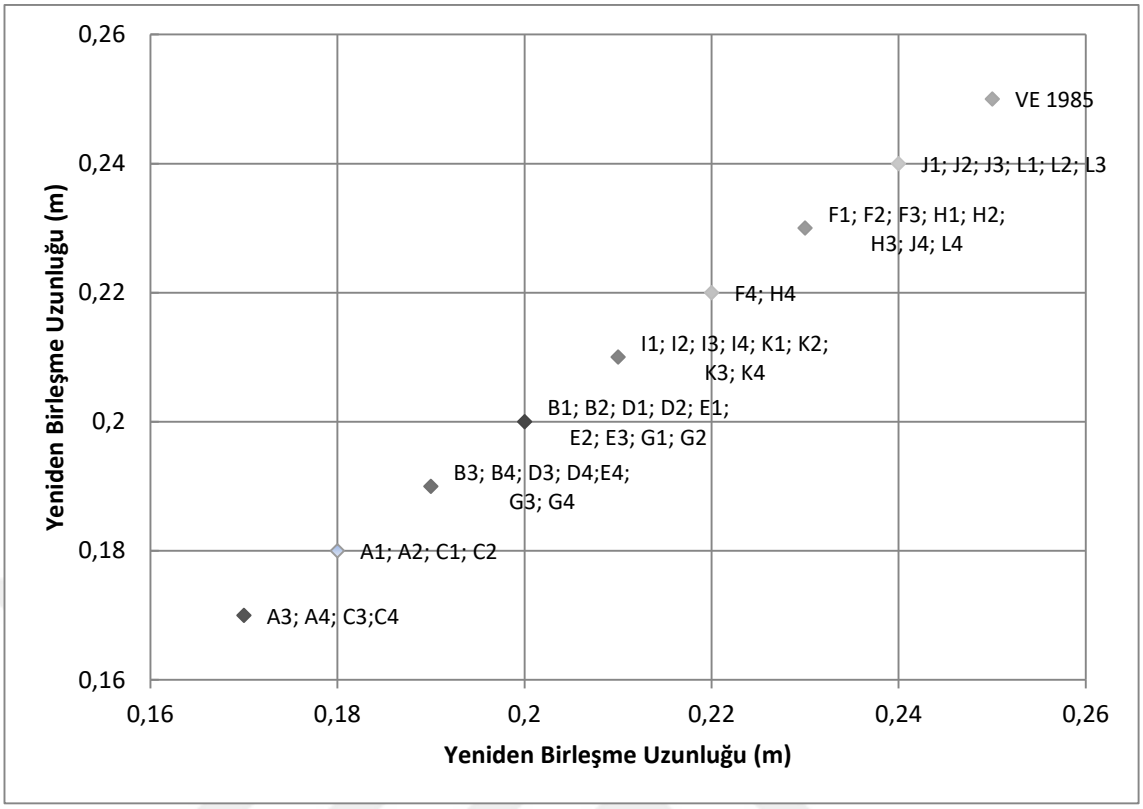
Şekil 4.24. L grubu simülasyonları x-ekseni hız profili

Deneysel çalışma doğrulaması için gerçekleştirilen analizlerde ısı transfer karakteristiğini yansıtan Stanton sayısı grafiklerinin, Şekil 3.24'teki doğrulama grafiği ile karşılaştırılmasının yapılması her bir simülasyonun yeniden birleşme uzunluğunun tespiti

sonrasında gerçekleştirilmesi mümkündür. Dolayısıyla her bir simülasyonun yeniden birleşme uzunluğunun tespiti için x ekseni hız profil grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerin elde edilmesinin amacı ise Haque ve diğerleri (2007) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada kullanılan yol ile yeniden birleşme uzunluğunun elde edilmeye çalışılmasıdır. Haque ve diğerleri (2007), basamak sonrası yüzeyde cidara en yakın ağ örgüsünün x-ekseni boyunca olan hız profilini inceleyerek, x-eksenindeki hız bileşenenin negatif değerden pozitif değere geçtiği noktanın yeniden birleşme uzunluğu olduğunu ifade etmiştir. Buna göre her bir simülasyon için elde edilen yeniden birleşme uzunlukları Çizelge 4.2' de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmadaki yeniden birleşme uzunluğunun karşılaştırılması ise Şekil 4.25' te gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Yeniden birleşme uzunlukları

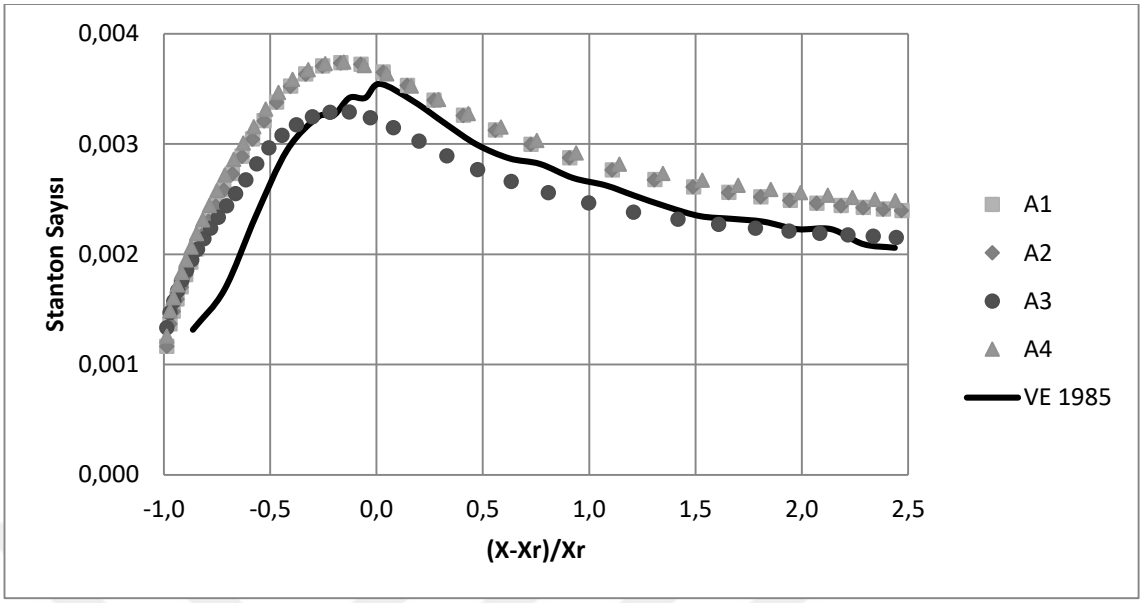
Grup	Analiz	Yeniden Birleşme Uzunluğu (mm)	Grup	Analiz	Yeniden Birleşme Uzunluğu (mm)	Grup	Analiz	Yeniden Birleşme Uzunluğu (mm)
A	1	180	E	1	200	I	1	212
	2	180		2	200		2	212
	3	172		3	201		3	211
	4	178		4	199		4	212
B	1	204	F	1	230	J	1	241
	2	204		2	230		2	241
	3	193		3	232		3	248
	4	198		4	226		4	237
C	1	180	G	1	200	K	1	212
	2	180		2	200		2	212
	3	172		3	199		3	211
	4	178		4	197		4	212
D	1	205	H	1	230	L	1	241
	2	205		2	230		2	241
	3	193		3	233		3	249
	4	198		4	226		4	237



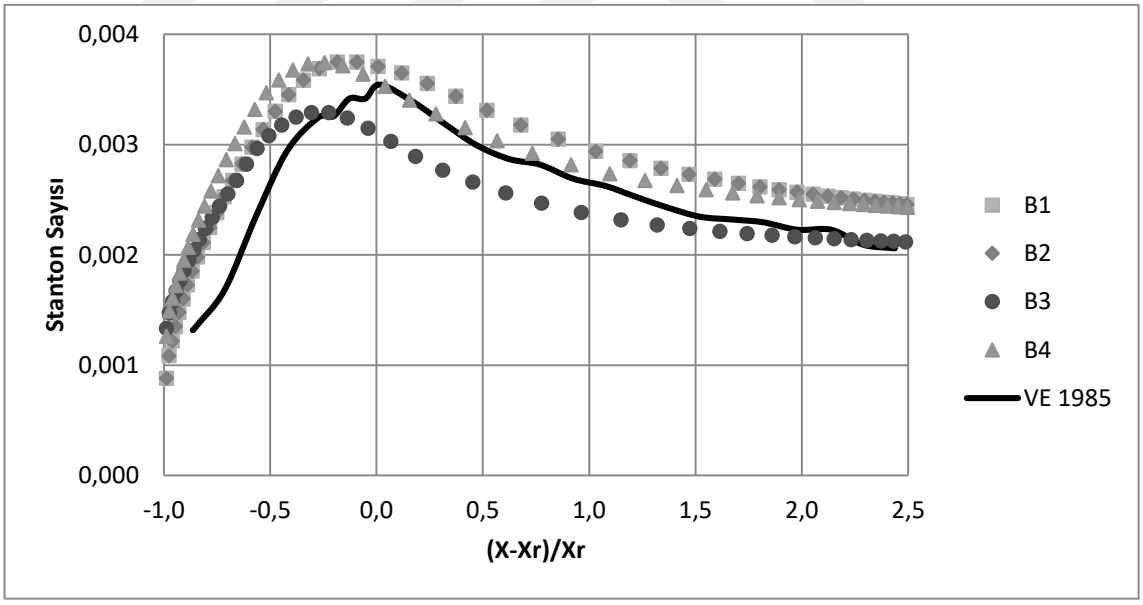
Şekil 4.25. Yeniden birleşme uzunluklarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Şekil 4.25' te görülebileceği gibi deneysel çalışmadaki yeniden birleşme uzunluğunun 0,253 m olduğu göz önünde bulundurulduğunda, gerçekleştirilen analizlerde altı farklı simülasyon algoritmasının akış karakteristiklerinin tahmin edilmesi bakımından deneysel sonuçlara oldukça yakınsak olduğu ortaya görülmüştür. Özellikle J ve L grubu simülasyon gruplarının akış karakteristiklerindeki iyi tahminleri aynı şekilde ısı transferi karakteristikleri bakımından da iyi tahminlerde bulunacağını düşündürmüştür.

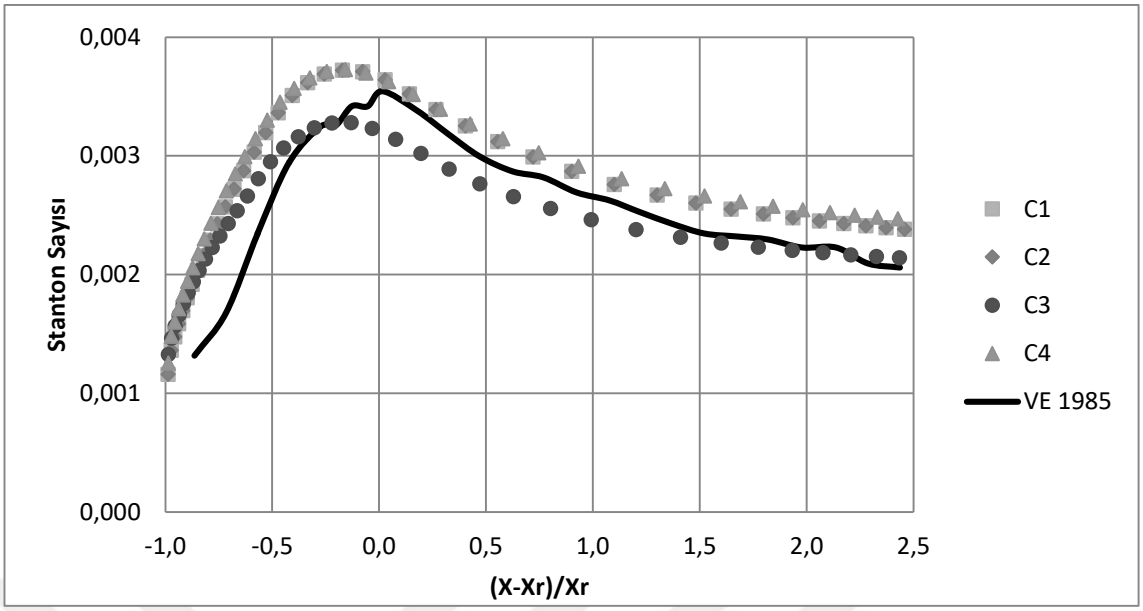
Çizelge 4.2' de belirlenen yeniden birleşme uzunluklarının kullanılmasıyla birlikte gerçekleştirilen analiz sonuçlarının ısı transferini tahmini açısından deneysel sonuçlarla karşılaştırması yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.26 – 4.37' de gösterilmiştir.



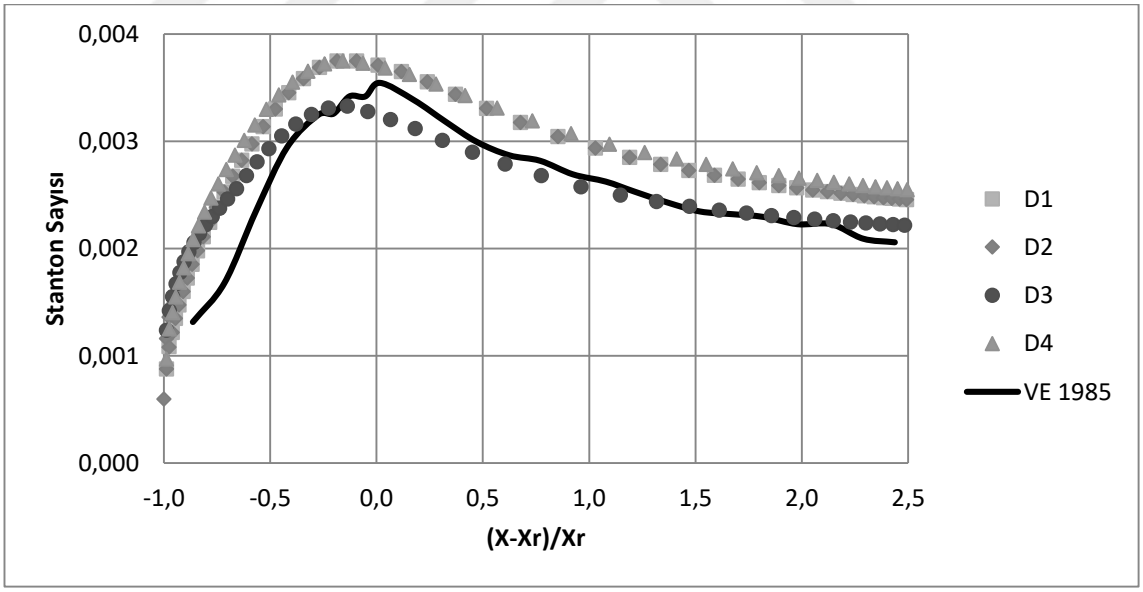
Şekil 4.26. A grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



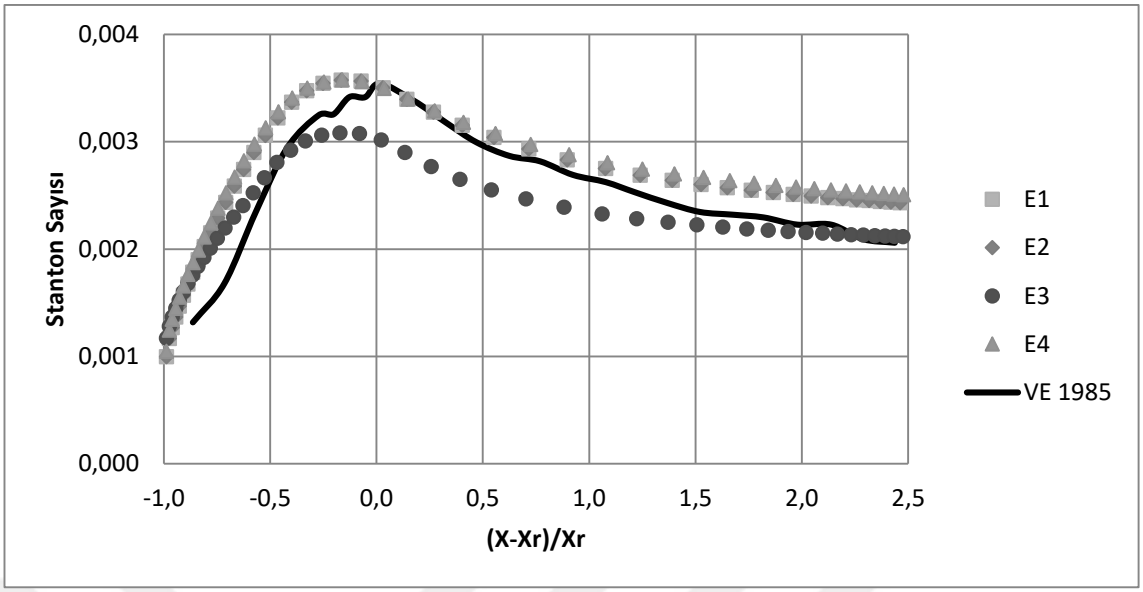
Şekil 4.27. B grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



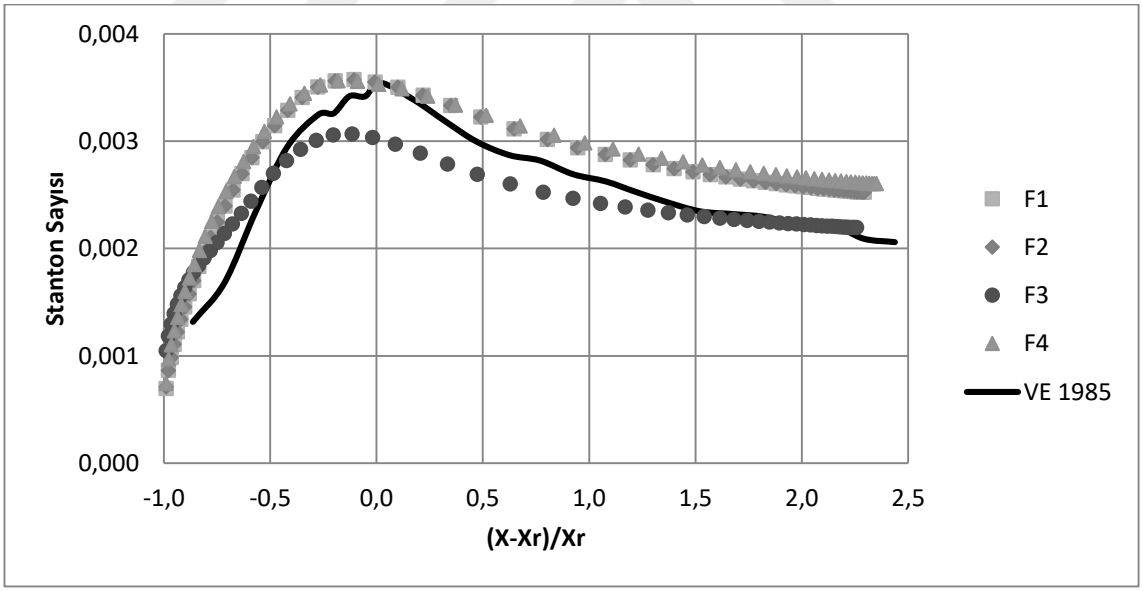
Şekil 4.28. C grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



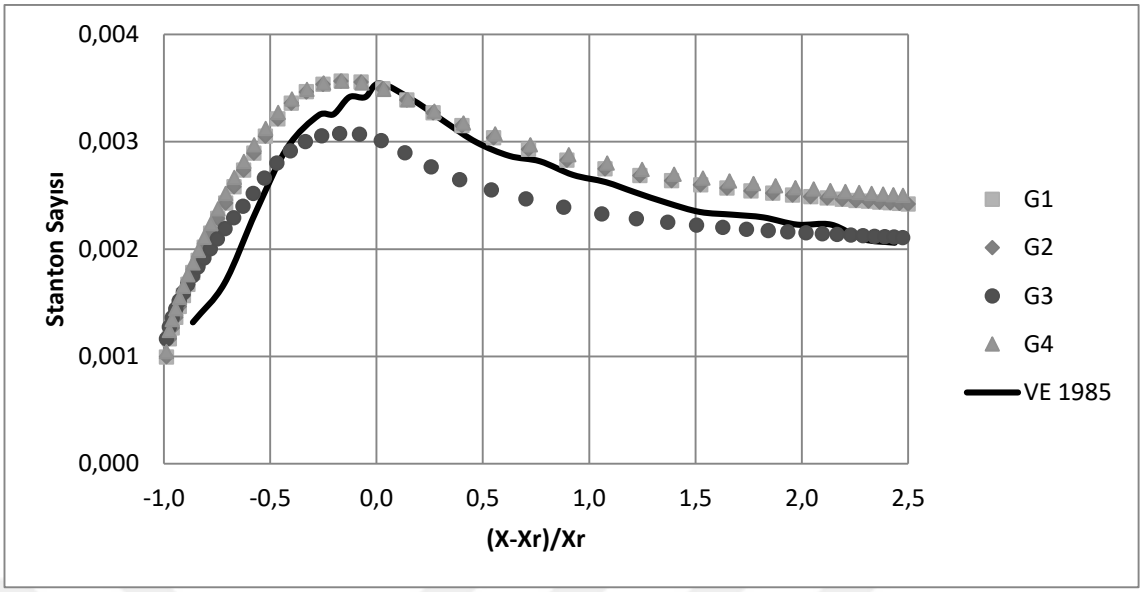
Şekil 4.29. D grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



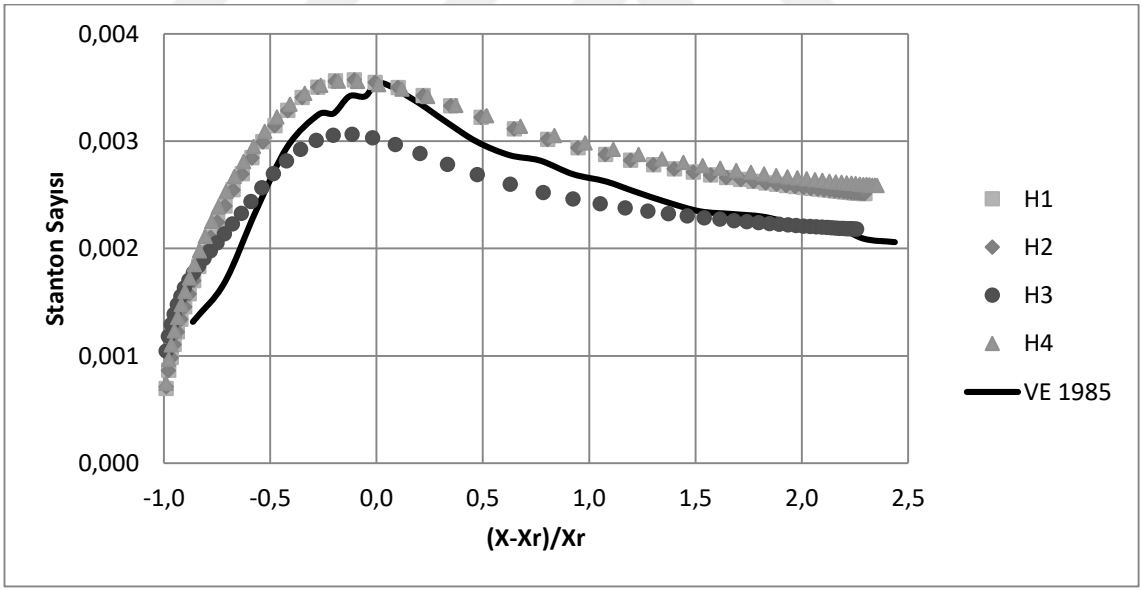
Şekil 4.30. E grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



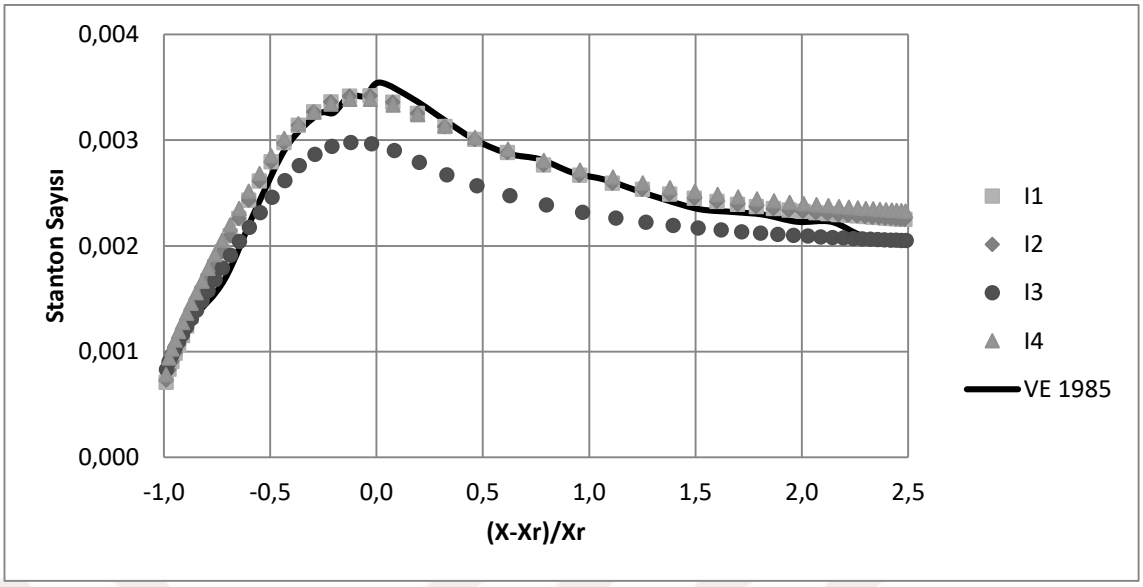
Şekil 4.31. F grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



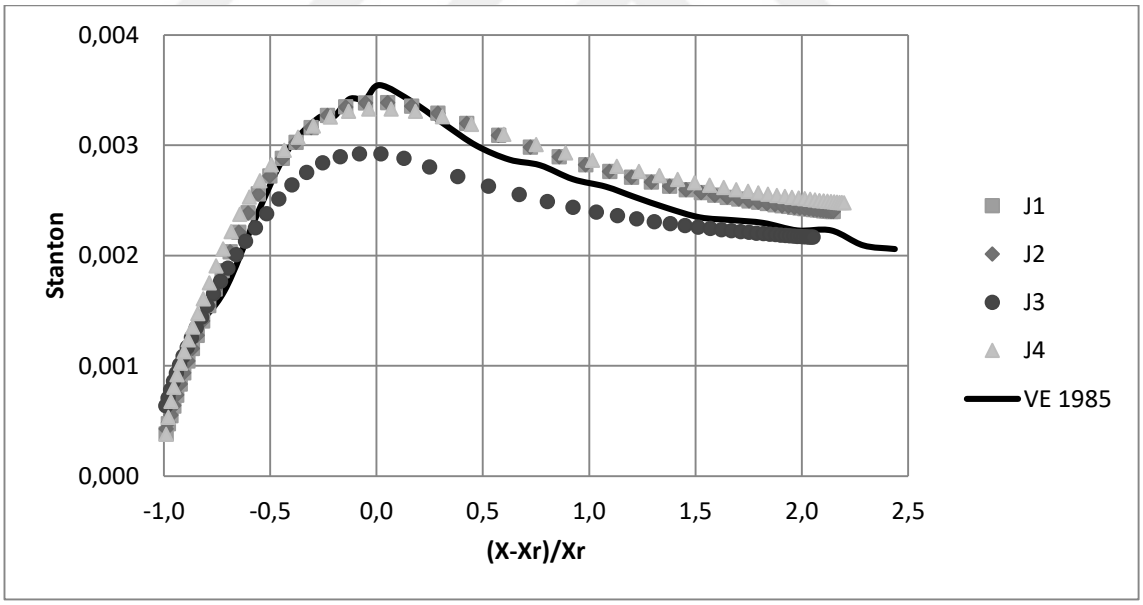
Şekil 4.32. G grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



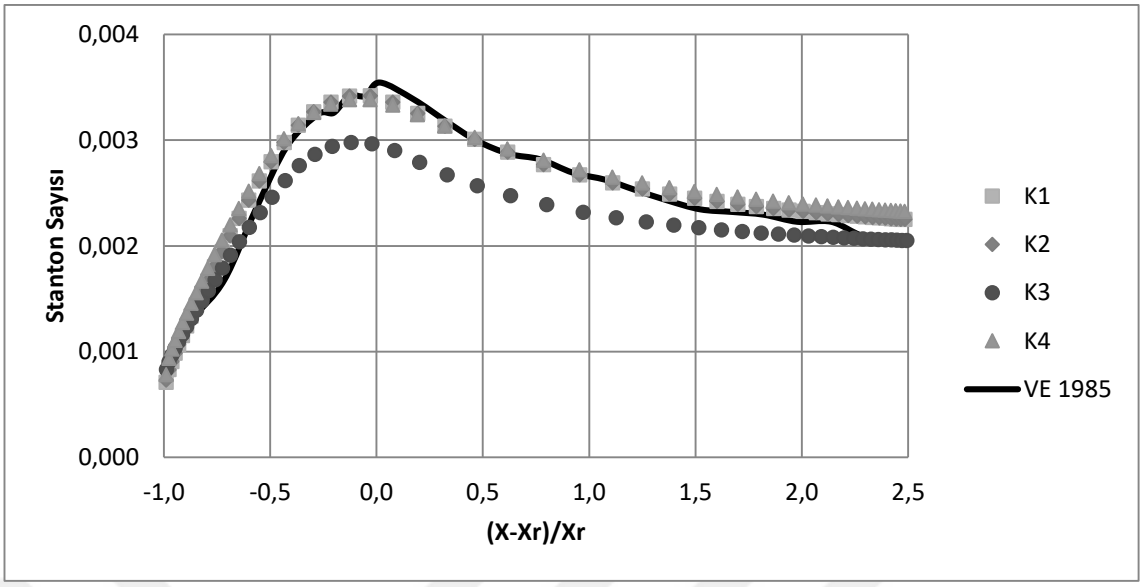
Şekil 4.33. H grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



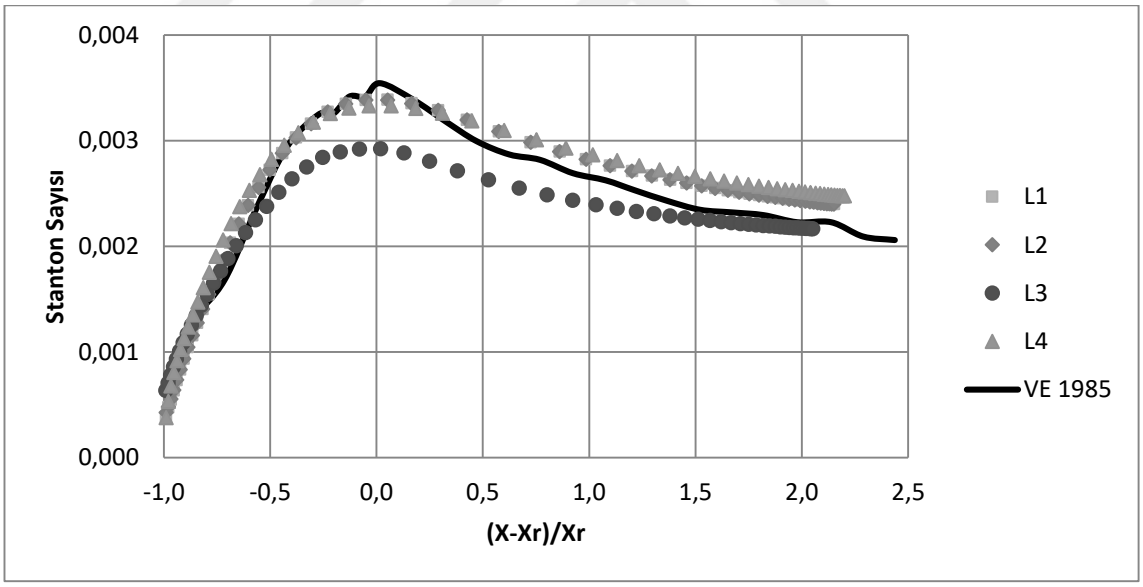
Şekil 4.34. I grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



Şekil 4.35. J grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması



Şekil 4.36. K grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması

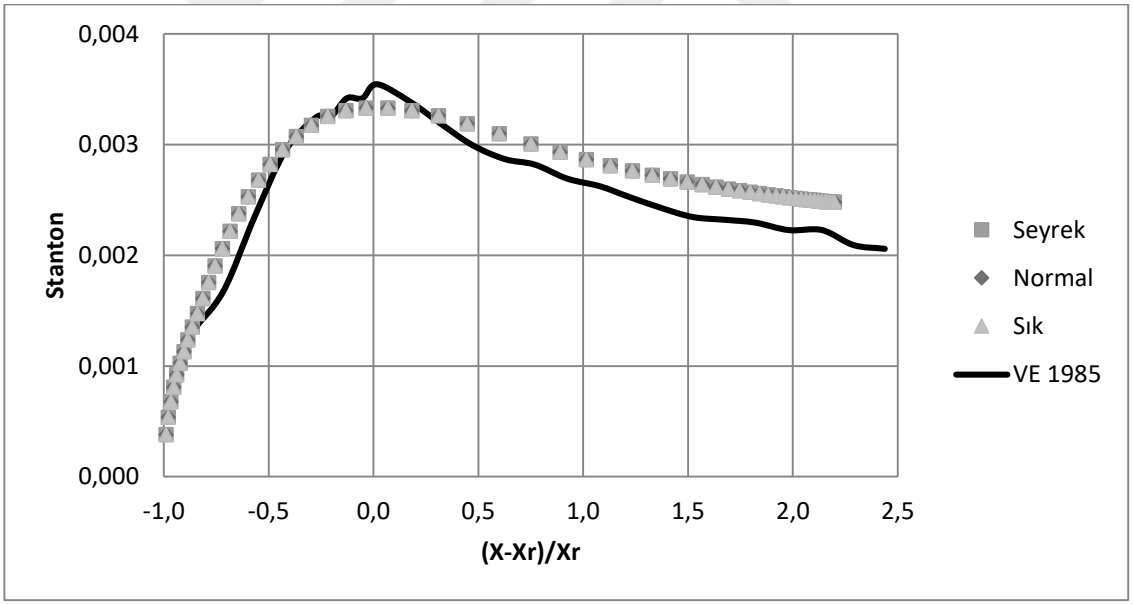


Şekil 4.37. L grubu Stanton sayılarının deneysel çalışma ile karşılaştırılması

Gerçekleştirilen analizler sonucunda Şekil 4.35'te gösterildiği gibi deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar türbülans modelinin Realizable k ε türbülans modeli; duvar fonksiyonu olarak standart duvar fonksiyonu; basınç hız bağlantısı olarak SIMPLE algoritması ve uzaysal ayrıklaştırmanın ikinci derece olduğu simülasyon olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Uygulanan bu simülasyonda akış karakteristiğini tahmininde yeniden birleşme uzunluğu

241 mm olarak elde edilmektedir. Bu sonuç deneysel çalışmada 253 mm olarak elde edilmiş ve deneysel sonuçlar ile sapma payı yaklaşık %5 olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada yeniden birleşme uzunluğunun basamak yüksekliğine oranı 6,67 olarak belirtilmiş; değerlendirilen sonuçlara göre bu oran 6,34 olarak elde edilmiştir. Ayrıca ısı transferi tahmininde de deneysel çalışmada belirtilen grafik ile aynı şekilde bir artış gözlemlenmekte ve ısı transferinin maksimum noktası neredeyse birebir eşleşmektedir. Diğer analizler ile karşılaştırma yapıldığında Stanton sayısı ile yeniden birleşme etkileşiminin bu derecede olmadığı görülmektedir.

Şekil 4.35'te elde edilen sonuçların ağdan bağımsızlığının kontrolü Şekil 3.23'te ve Çizelge 3.3'te belirtilen seyrek ve sık ağ örgü modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seyrek, normal ve sık ağ örgü yapılarına göre elde edilen Stanton sayısı ve yeniden birleşme etkileşimin birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği ve elde edilen sonuçların ağ örgü yapısından bağımsız olarak elde edildiği Şekil 4.38'de görülmektedir.



Şekil 4.38. Uygun simülasyonun ağdan bağımsızlığı

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonrasında Şekil 4.35'te belirtildiği üzere deneysel çalışma sonuçlarına hem akış karakteristiği hem de ısı transferi karakteristiği tahmininde en yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir. Modelde kullanılan ağ örgü yapısının daha sık ve daha seyrek modellerinde bile y^+ değerinin 30'dan yüksek olması; simülasyon

algoritmasının ağ örgü yapısından bağımsız olarak aynı tahminlerde bulunması nedeniyle bu çalışmadaki diğer hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmalarına bu simülasyon algoritması kullanılarak devam edilmiştir.

4.1.2. Modifiye Edilmiş Çalışmaların Değerlendirilmesi

Deneysel çalışma sonuçlarının gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması sonrasında en uygun simülasyon bulunmuş ve bu simülasyonun doğrulaması da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinin genişleme oranı, türbülans seviyesi ve basınç gradyeni değişimlerine göre incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu incelemelerden elde edilen sonuçların yorumlanması sırasında yeniden birleşme uzunlukları, Stantan sayısı grafikleri, yeniden birleşme uzunluğu ile Stanton sayısının etkileşim grafiği öncelikli olarak ele alınmıştır. Ayrıca ortalama Stanton ve ortalama Nusselt sayıları, maksimum Stanton sayısı ve Nusselt sayısı grafikleri, yeniden birleşme noktasının Stanton grafikleri üzerinde gösterilmesi sonrasında akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinin bir arada değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Türbülans kinetik enerjisi ve akış çizgilerinin oluşum konturları da gösterilmiştir.

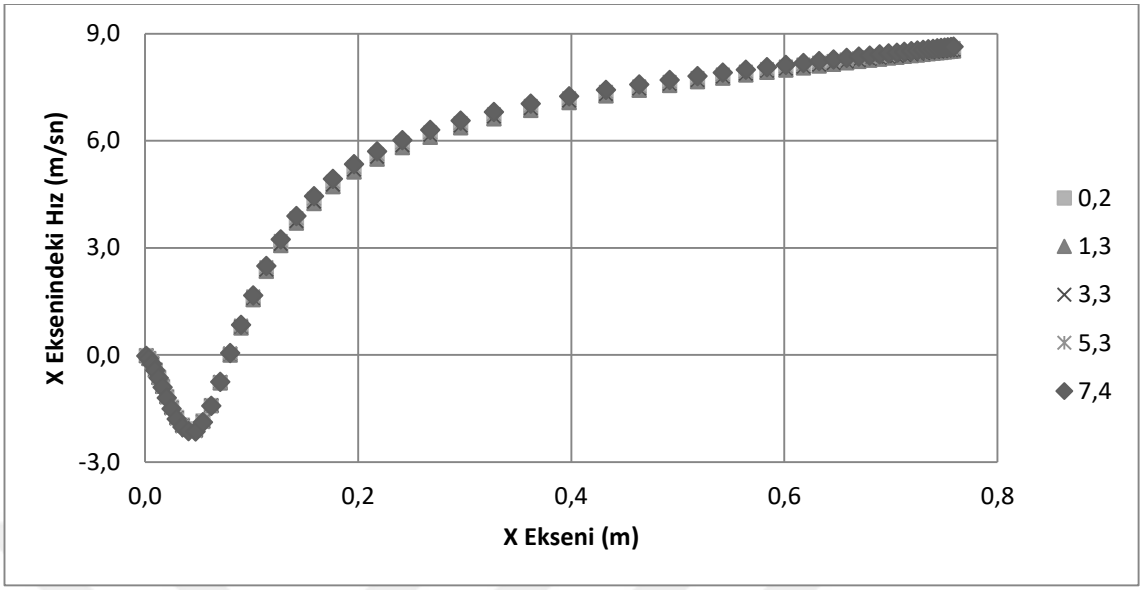
4.1.2.1. Driver ve Seegmiller (1985) Geometrisi Analojisi

Genişleme oranının 1,11 olarak ele alındığı bu bölümde, Driver ve Seegmiller (1985) çalışmasında ele alınan geometrinin Vogel ve Eaton (1985) çalışmasına uyarlanmış halidir. Çizelge 3.1'de geometrik boyutları belirtilen ve Şekil 3.5 – 3.9' da geometrileri belirtilen bu analojide Çizelge 3.2'deki ilgili şartlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Beş farklı türbülans seviyesi ve geometri kullanılarak toplam 25 simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin gruplandırılması Çizelge 4.3' te gösterilmektedir.

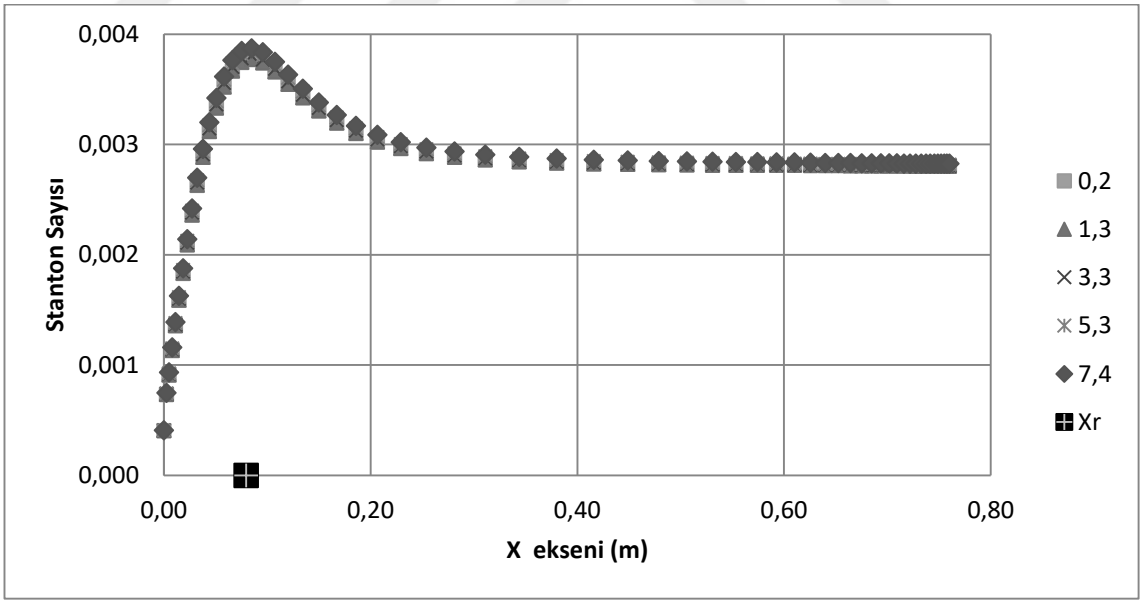
Çizelge 4.3. Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi simülasyon grupları

Grup	Analiz	Basınç Gradyeni Değişim Açısı (Derece)	Türbülans Seviyesi (%)
DS1	a	-2	0,2
	b	-2	1,3
	c	-2	3,3
	d	-2	5,3
	e	-2	7,4
DS2	a	0	0,2
	b	0	1,3
	c	0	3,3
	d	0	5,3
	e	0	7,4
DS3	a	2	0,2
	b	2	1,3
	c	2	3,3
	d	2	5,3
	e	2	7,4
DS4	a	4	0,2
	b	4	1,3
	c	4	3,3
	d	4	5,3
	e	4	7,4
DS5	a	6	0,2
	b	6	1,3
	c	6	3,3
	d	6	5,3
	e	6	7,4

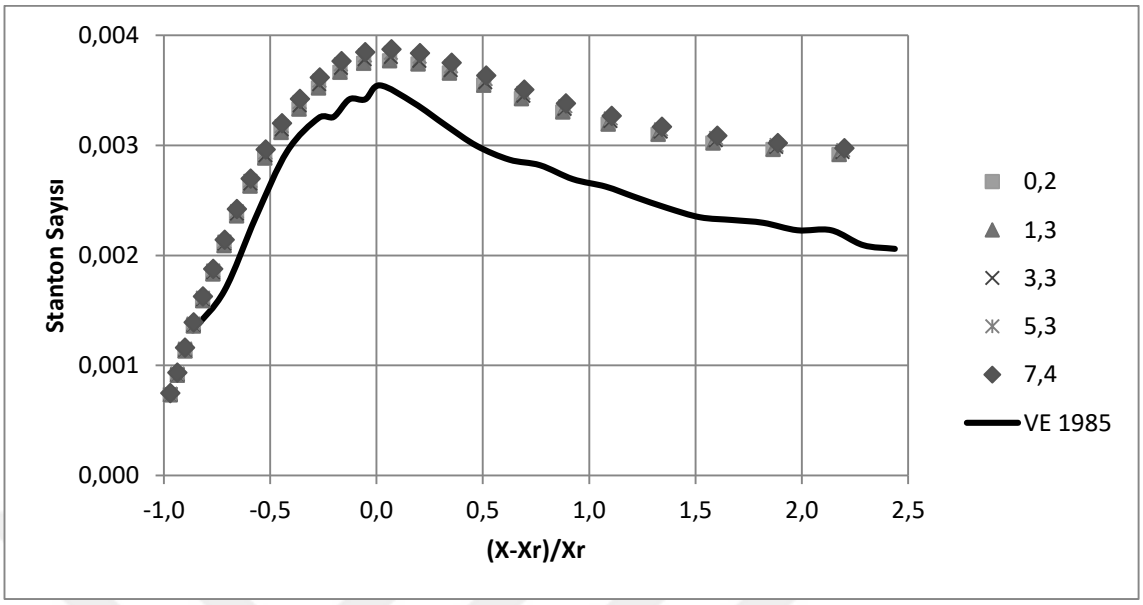
Çizelge 4.3'te DS1 olarak belirlenen ilk grupta, Şekil 3.5'te belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,1 olduğu geometri için kanal çıkışında bir daralma olduğu durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.39 – 4.43'te gösterilmiştir.



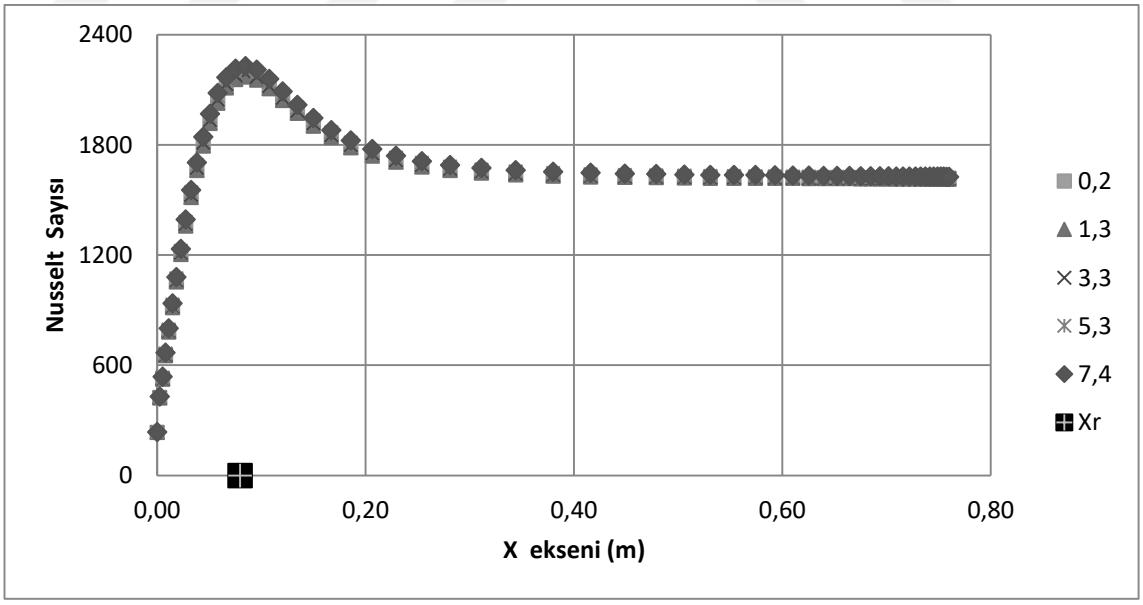
Şekil 4.39. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS1)



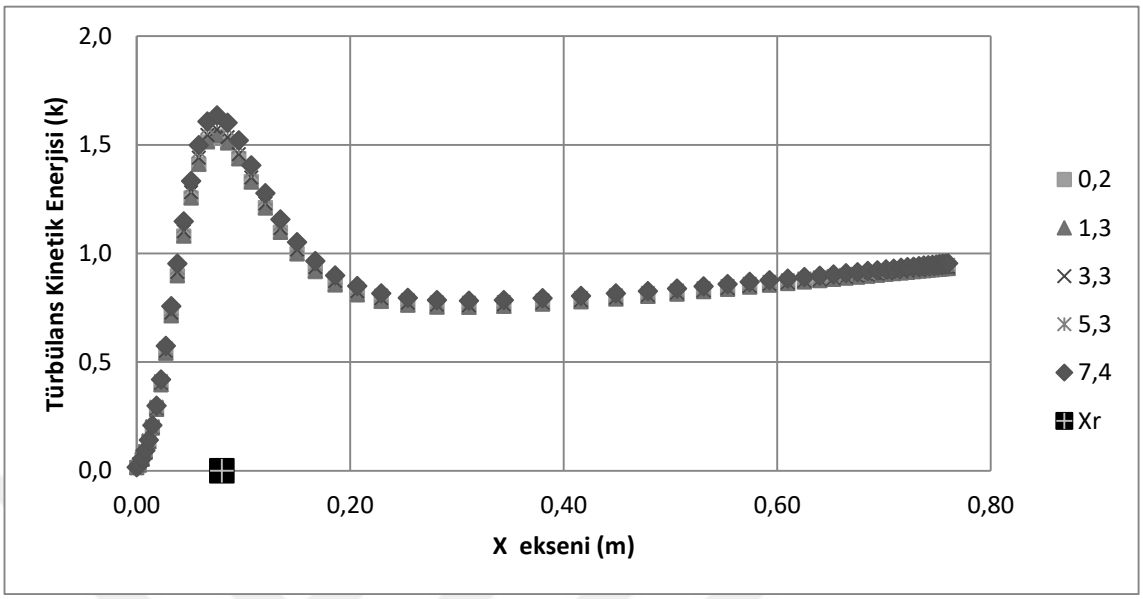
Şekil 4.40. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS1)



Şekil 4.41. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS1)



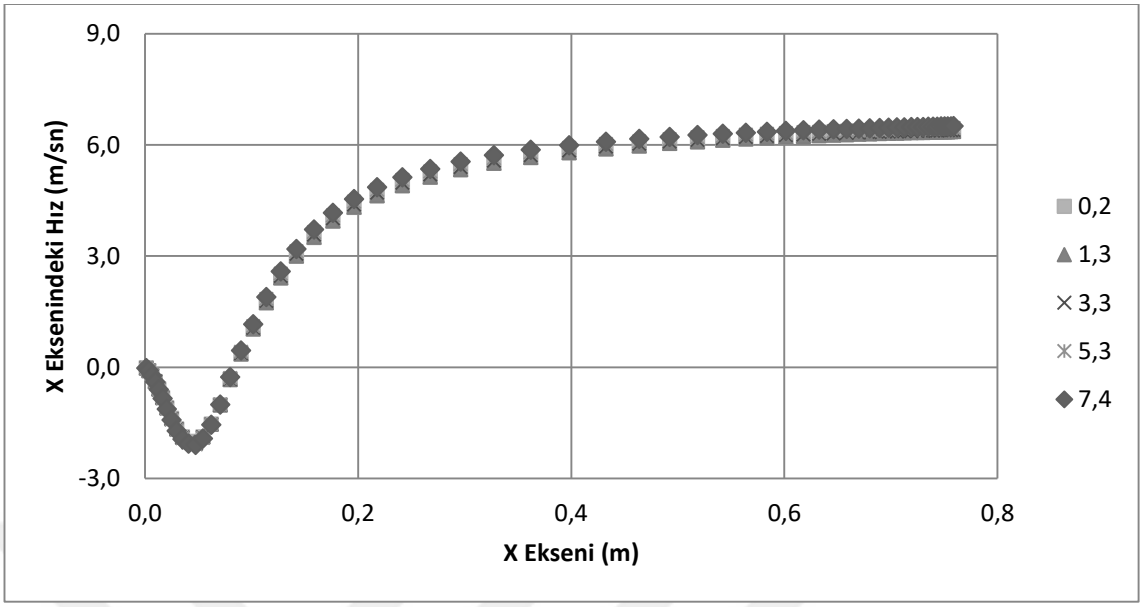
Şekil 4.42. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS1)



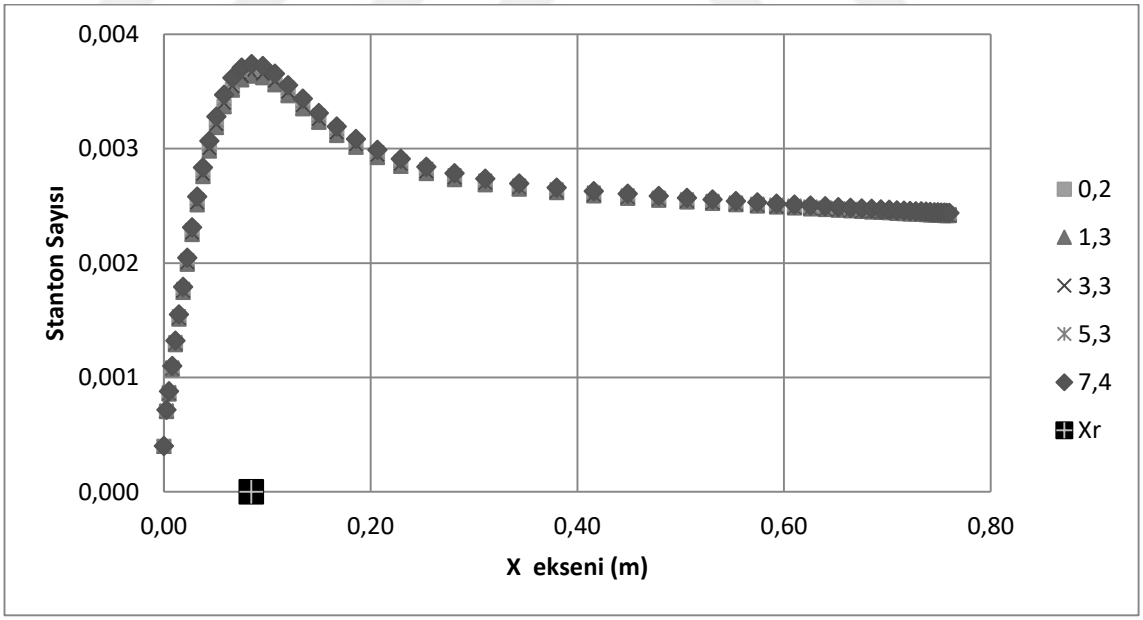
Şekil 4.43. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS1)

DS1 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.41'de belirtilen deneysel sonuçlara göre daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.

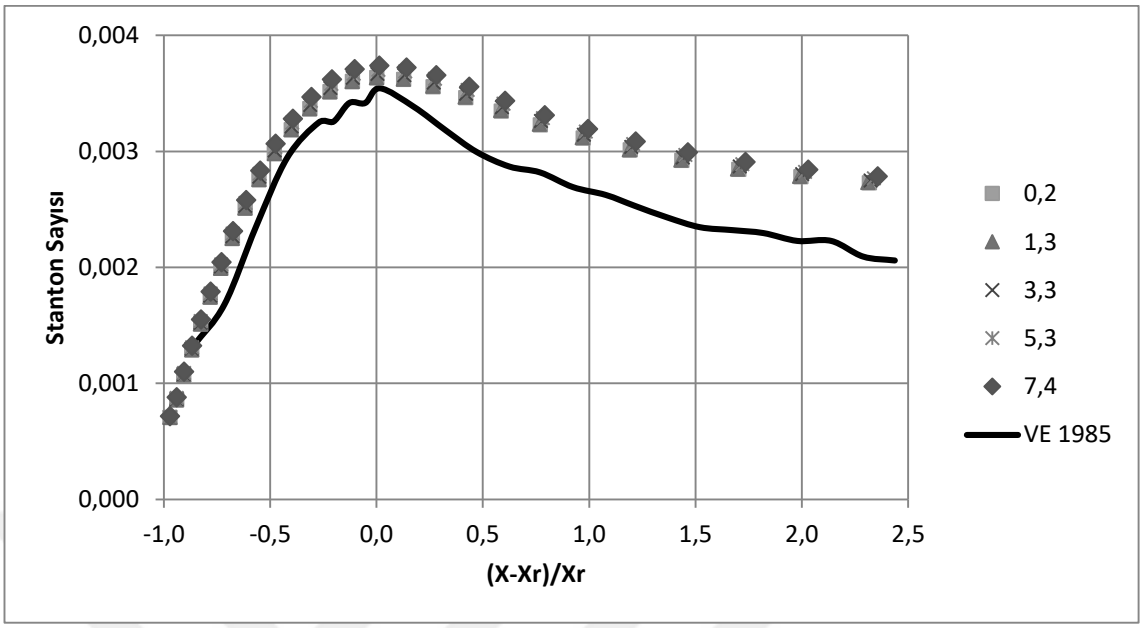
Çizelge 4.3'te DS2 olarak belirlenen ikinci grupta, Şekil 3.6'da belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,1 olduğu geometri için kanal çıkışında bir daralma ya da genişlemenin olmadığı durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.44 – 4.48'te gösterilmiştir.



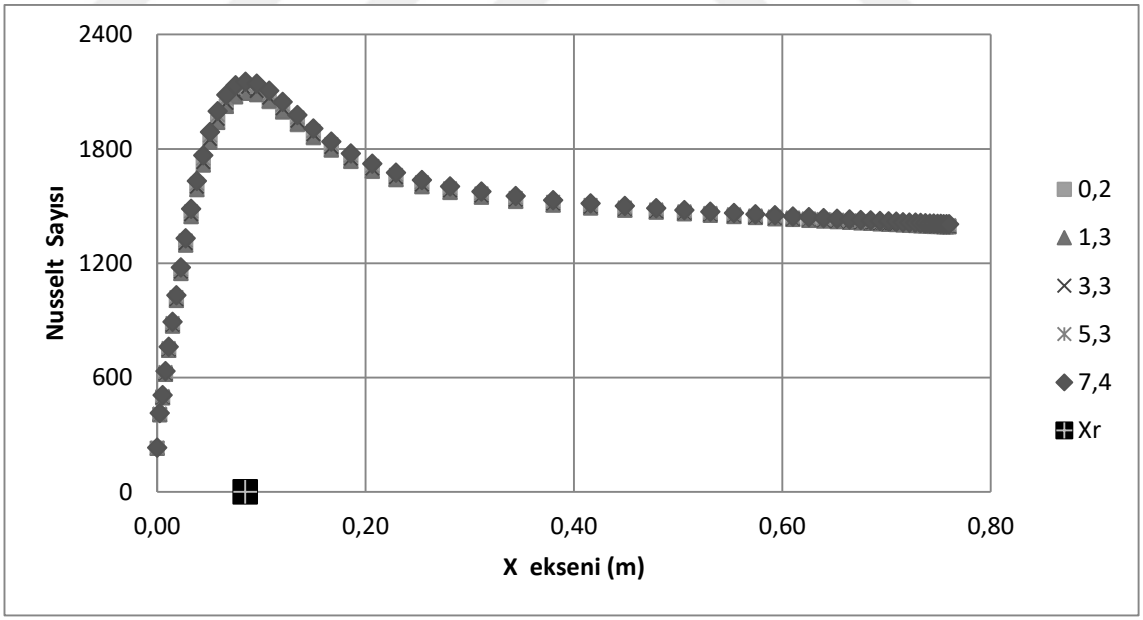
Şekil 4.44. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS2)



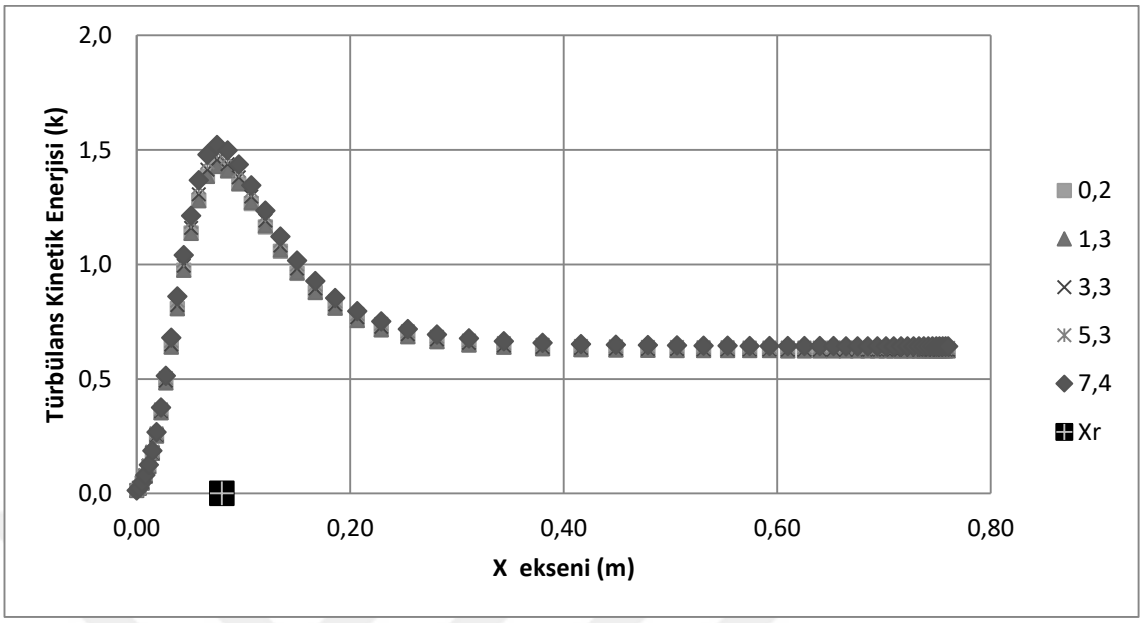
Şekil 4.45. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS2)



Şekil 4.46. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS2)



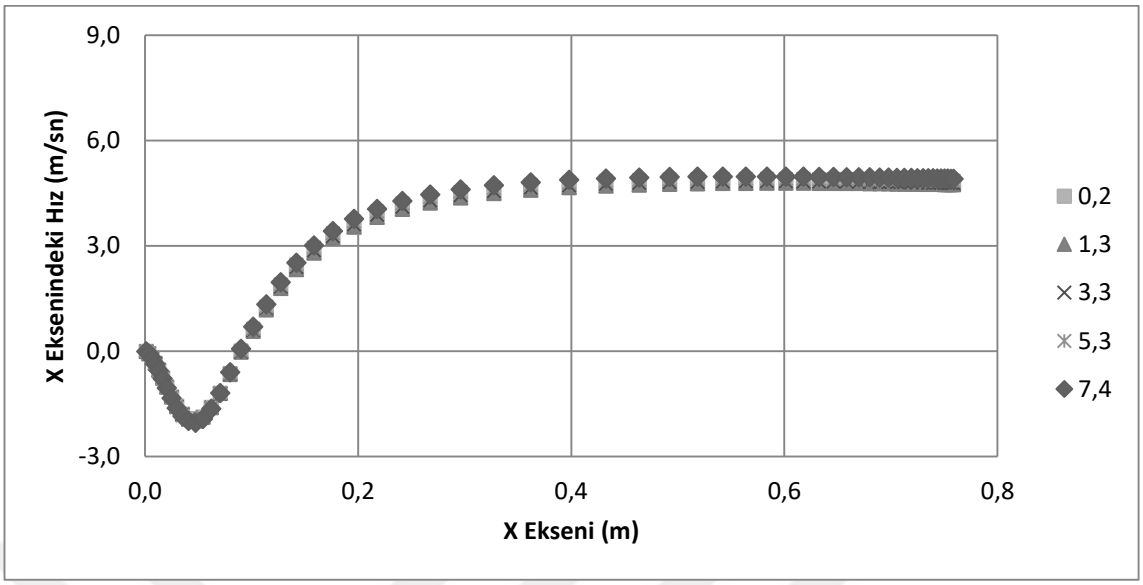
Şekil 4.47. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS2)



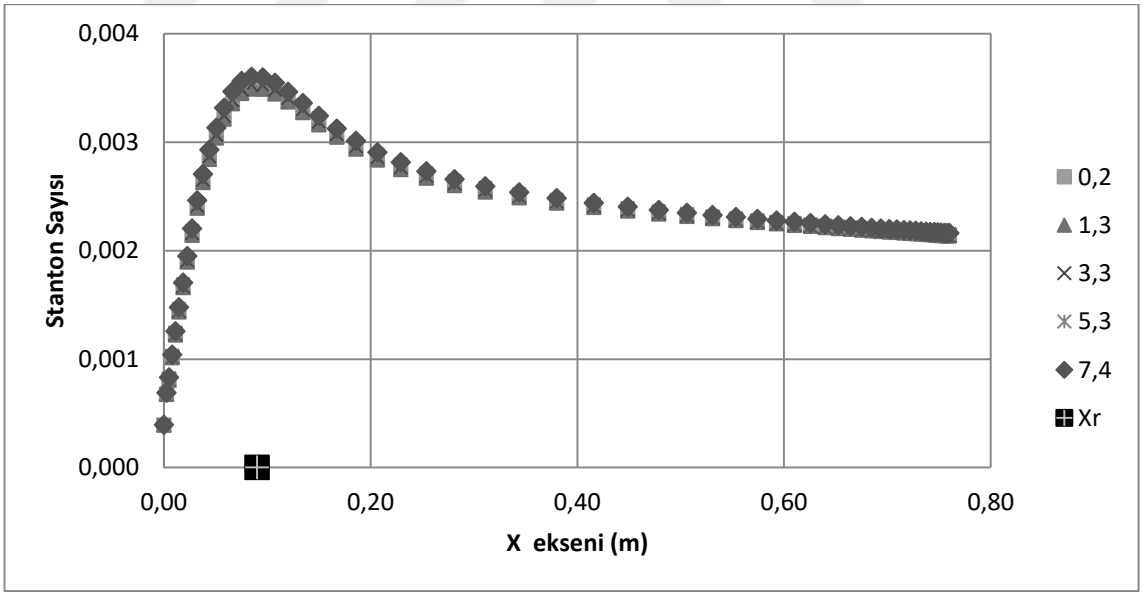
Şekil 4.48. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS2)

DS2 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde DS1 grubundaki sonuçlara benzer şekilde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.46'da belirtilen deneysel sonuçlara göre daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.

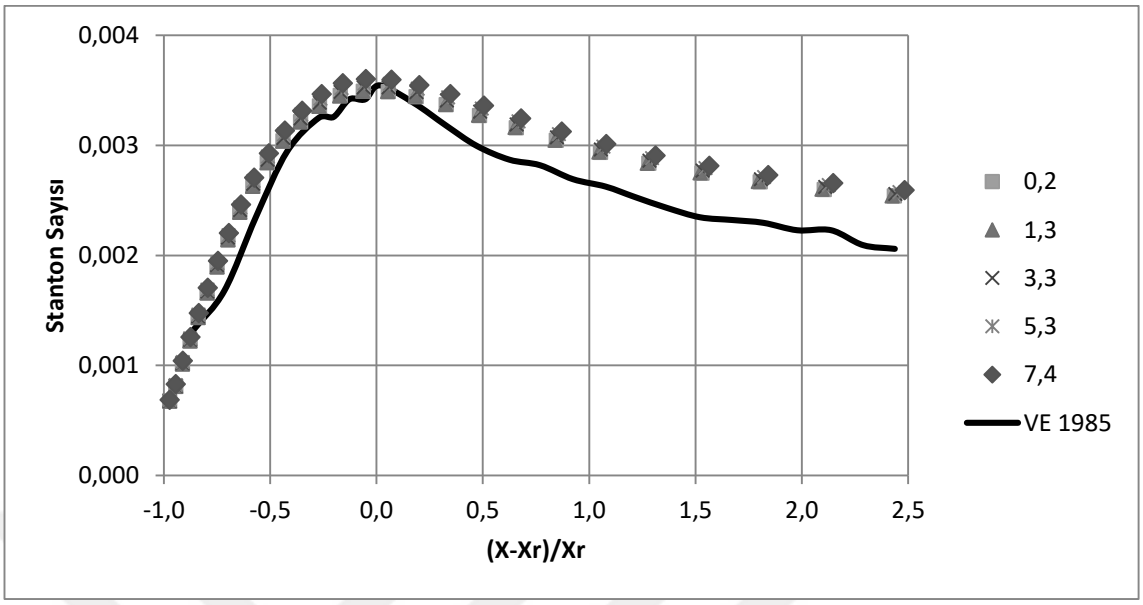
Çizelge 4.3'te DS3 olarak belirlenen üçüncü grupta, Şekil 3.7'da belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,1 olduğu geometri için kanal çıkışında küçük bir genişlemenin olduğu durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.49 – 4.53'te gösterilmiştir.



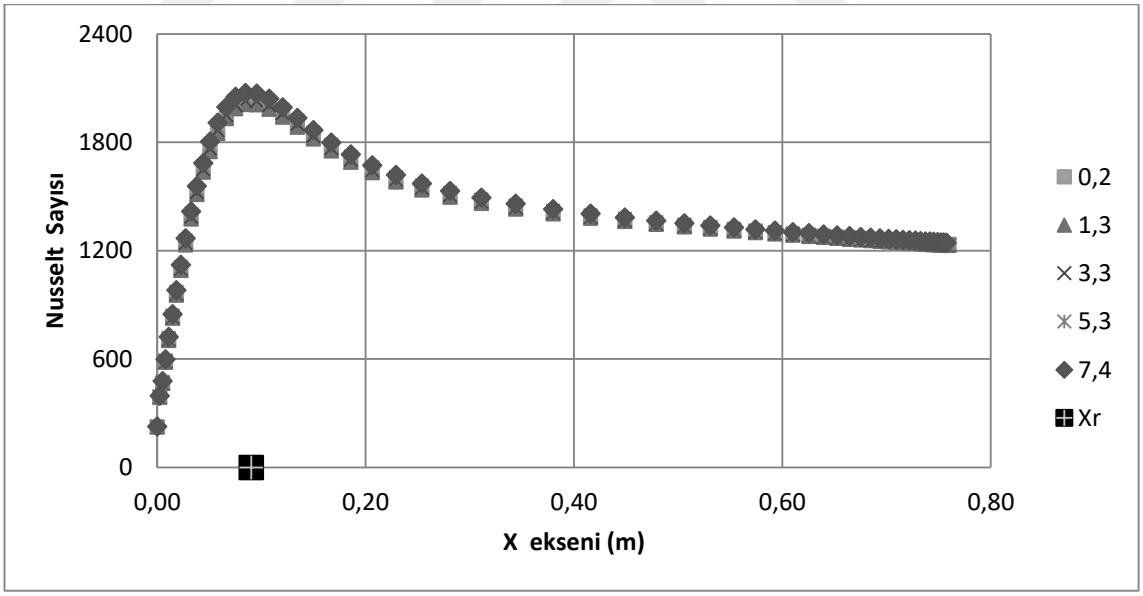
Şekil 4.49. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS3)



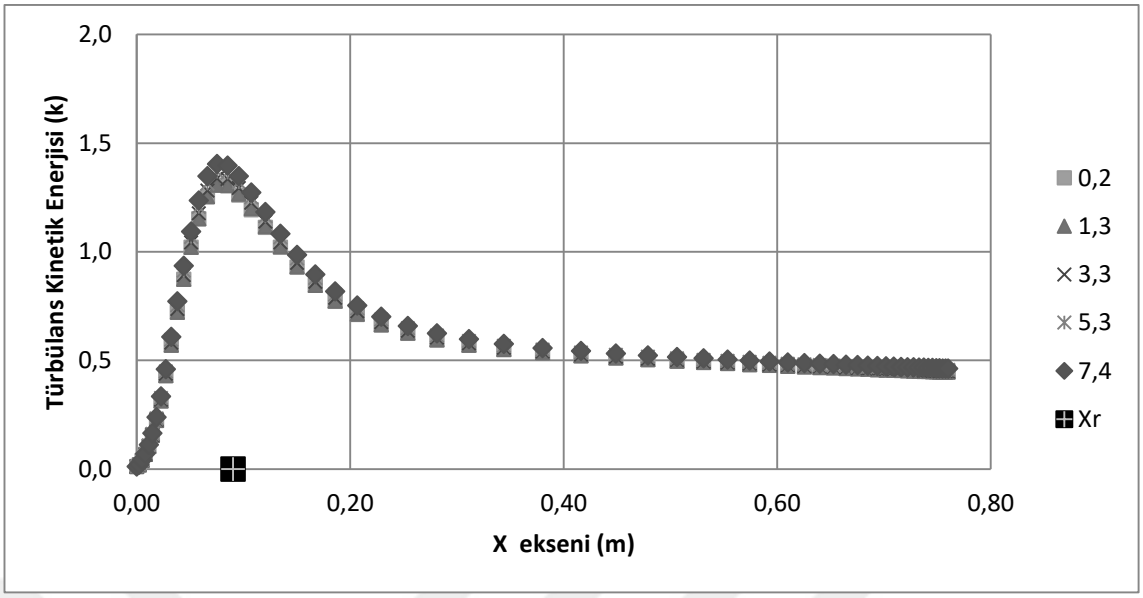
Şekil 4.50. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS3)



Şekil 4.51. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS3)



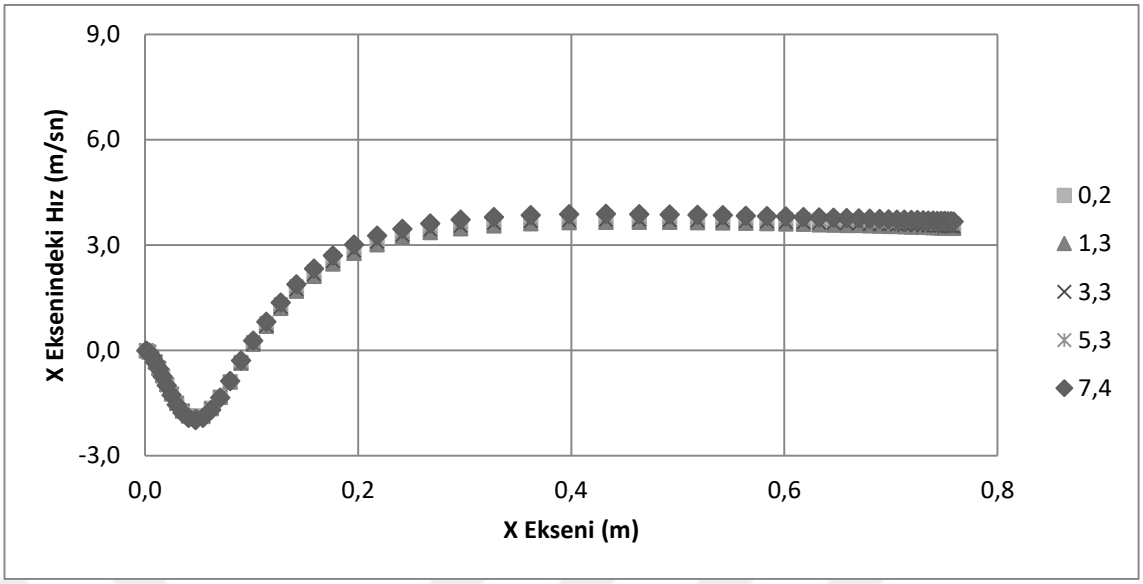
Şekil 4.52. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS3)



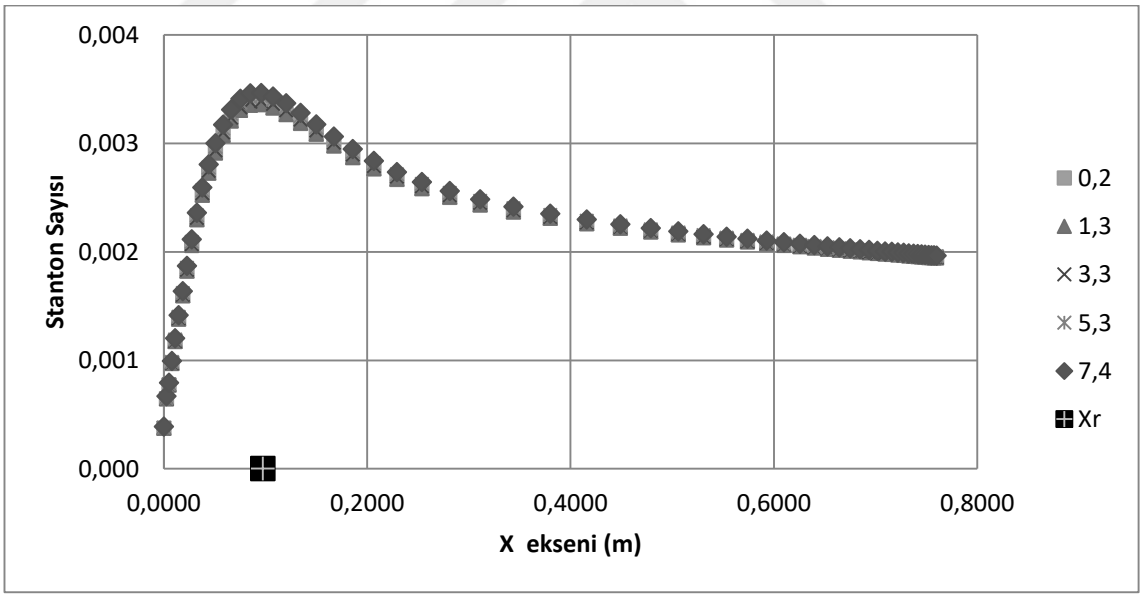
Şekil 4.53. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS3)

DS3 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde daha önceki grup sonuçlarına benzer şekilde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.51'de belirtilen deneysel sonuçlara göre yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yani genişleme oranının düşürülmesi, basınç gradyeninin artırılması ile tolere edilebilmektedir.

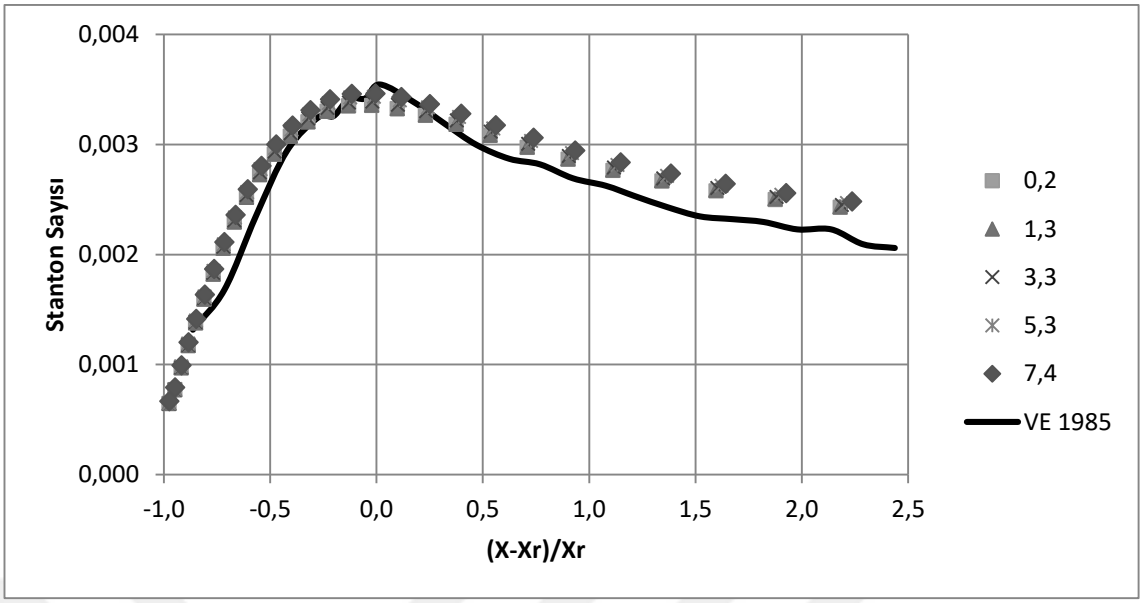
Çizelge 4.3'te DS4 olarak belirlenen dördüncü grupta, Şekil 3.8'de belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,1 olduğu geometri için kanal çıkışında büyük bir genişlemenin olduğu durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.54 – 4.58'de gösterilmiştir.



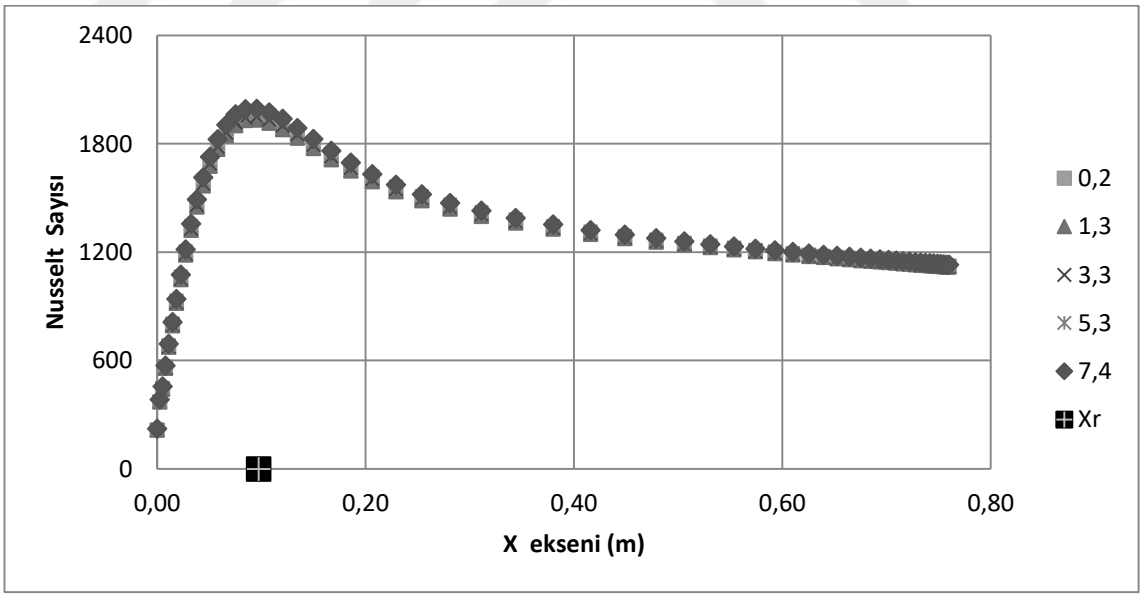
Şekil 4.54. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS4)



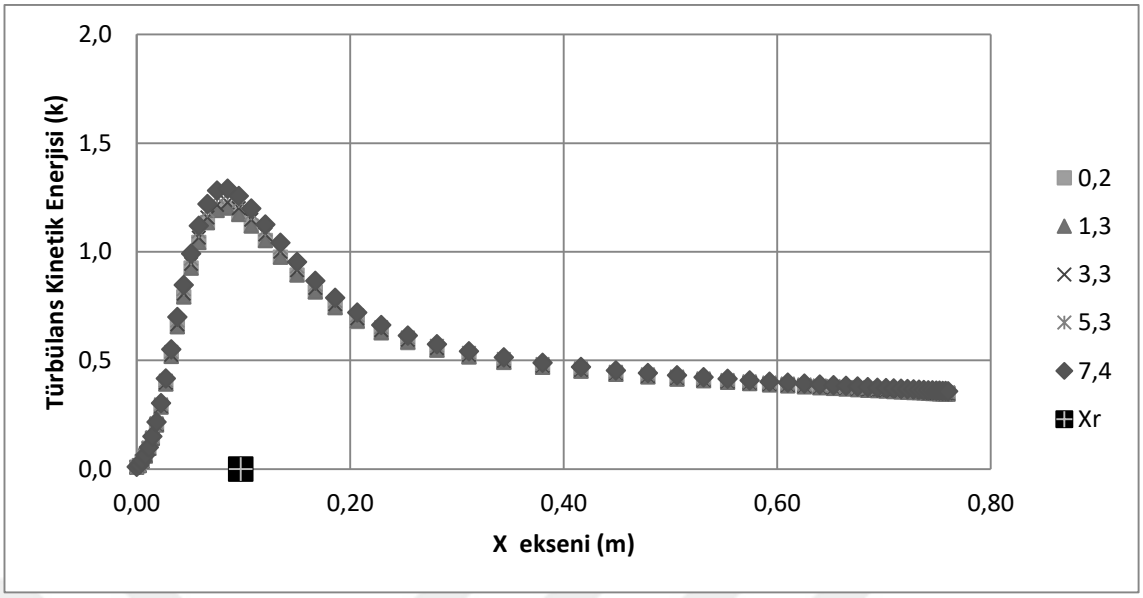
Şekil 4.55. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS4)



Şekil 4.56. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS4)



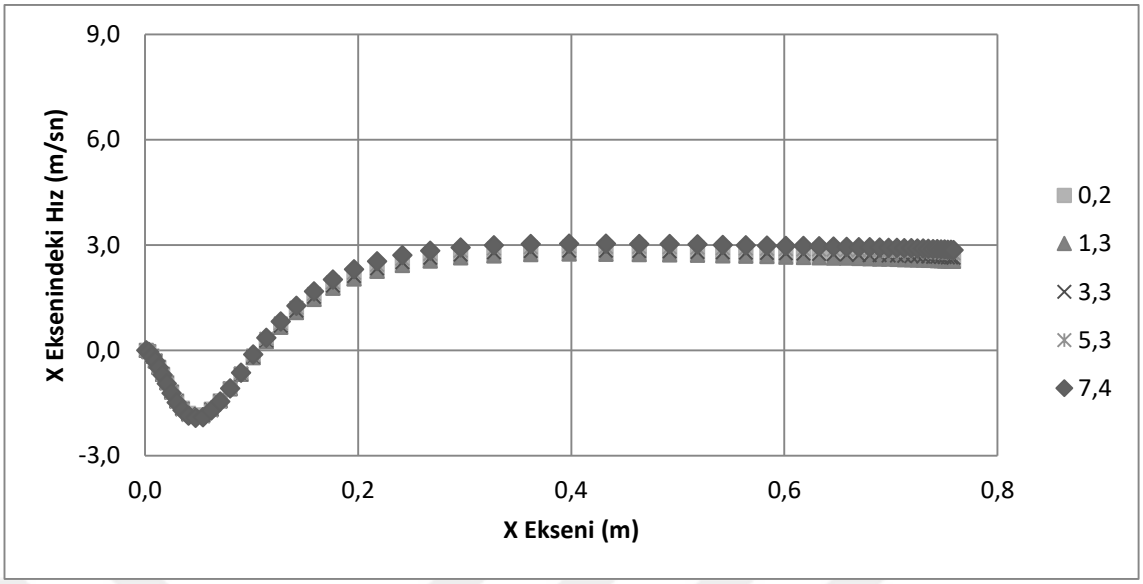
Şekil 4.57. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS4)



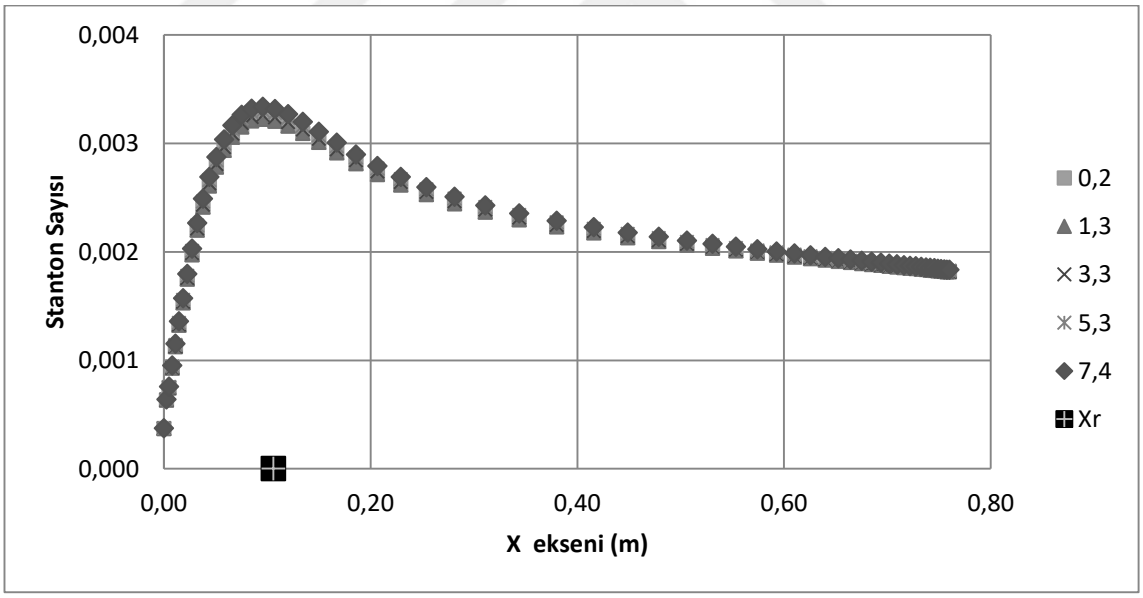
Şekil 4.58. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS4)

DS4 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde daha önceki grup sonuçlarına benzer şekilde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.56'da belirtilen deneysel sonuçlara göre yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yani genişleme oranının düşürülmesi, basınç gradyeninin artırılması ile tolere edilebilmektedir.

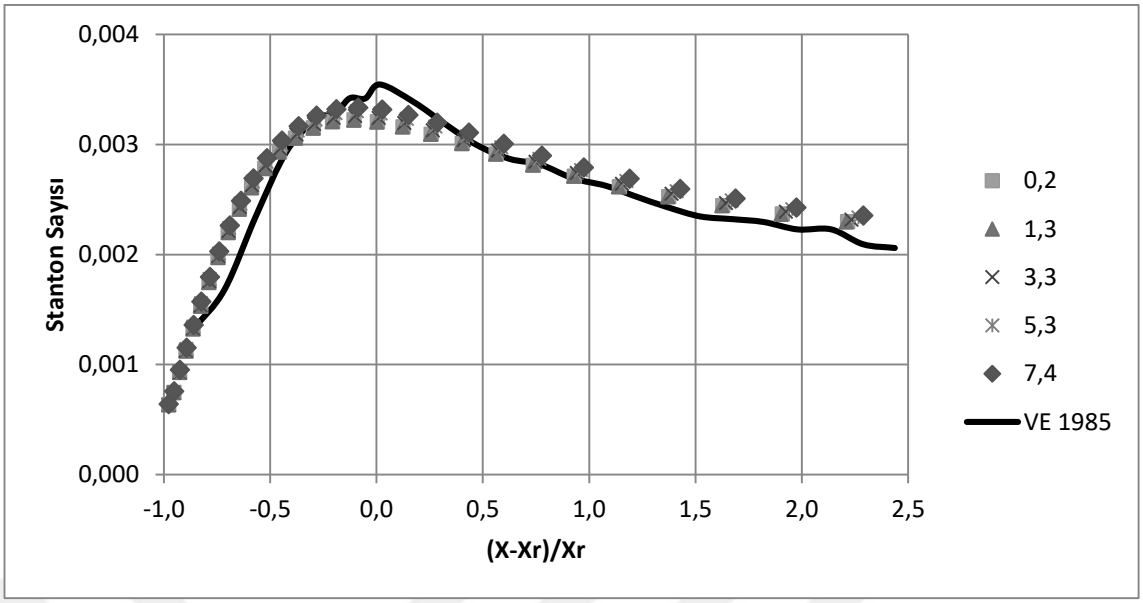
Çizelge 4.3'te DS5 olarak belirlenen beşinci grupta, Şekil 3.9'de belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,1 olduğu geometri için kanal çıkışında daha büyük bir genişlemenin olduğu durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.59 – 4.63'te gösterilmiştir.



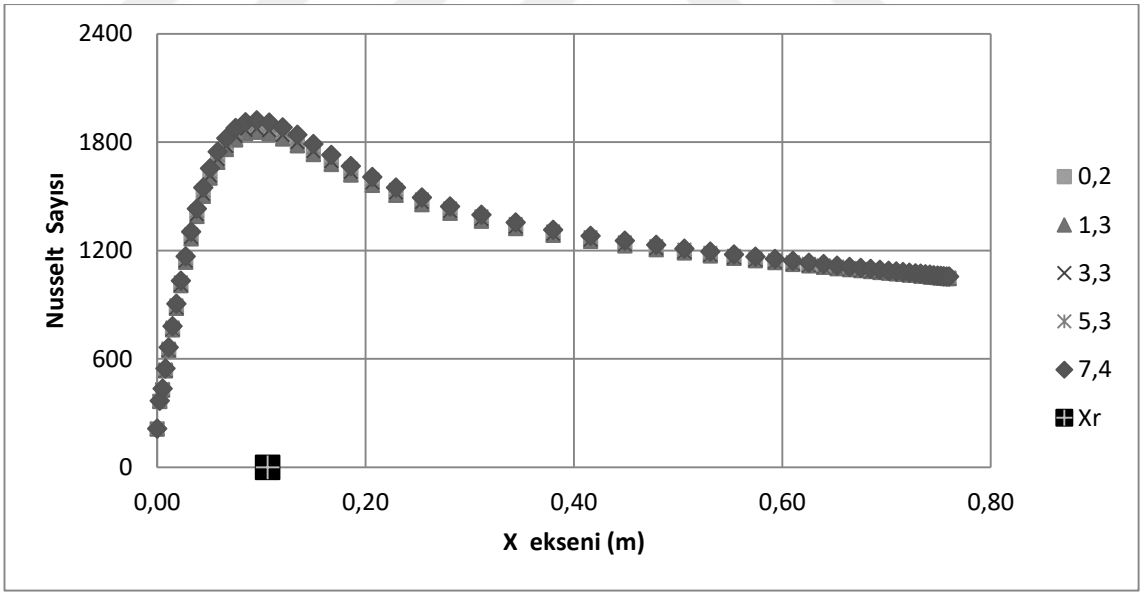
Şekil 4.59. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (DS5)



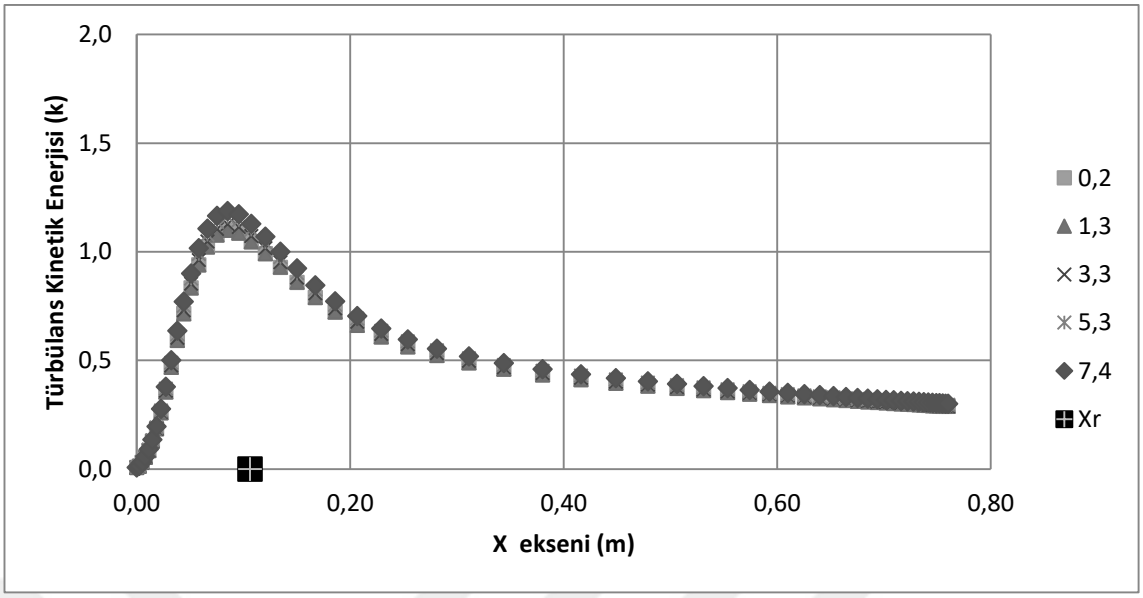
Şekil 4.60. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS5)



Şekil 4.61. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS5)



Şekil 4.62. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (DS5)



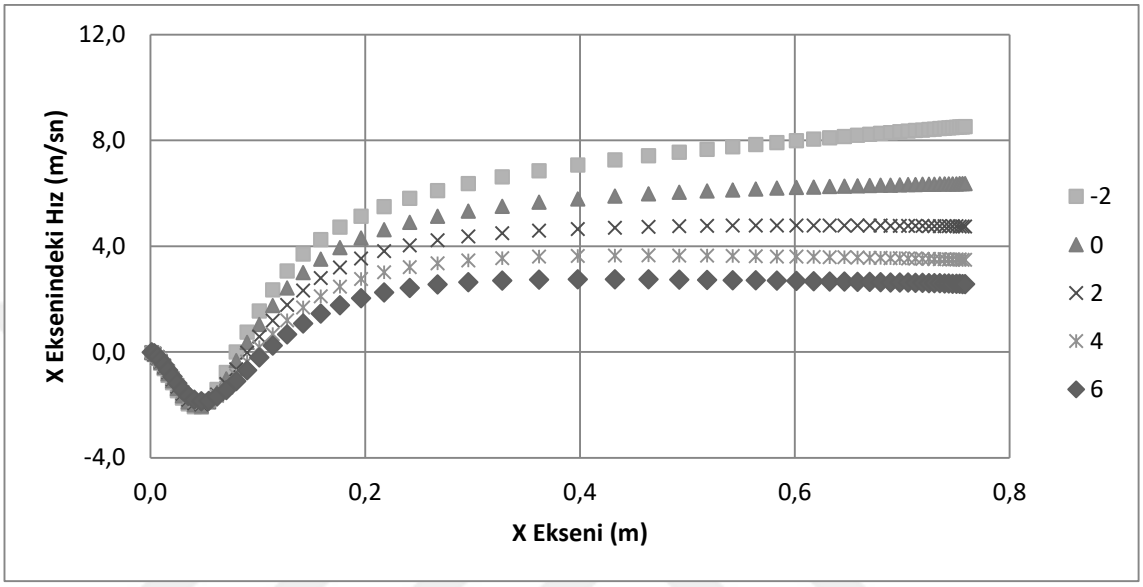
Şekil 4.63. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (DS5)

DS5 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde daha önceki grup sonuçlarına benzer şekilde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.61'da belirtilen deneysel sonuçlardan daha avantajlı sonuçlara ulaşılamamıştır. Bu durumda 4 dereceden daha fazla bir artışın bu analoji için uygun olmadığı ortaya çıkarılmıştır.

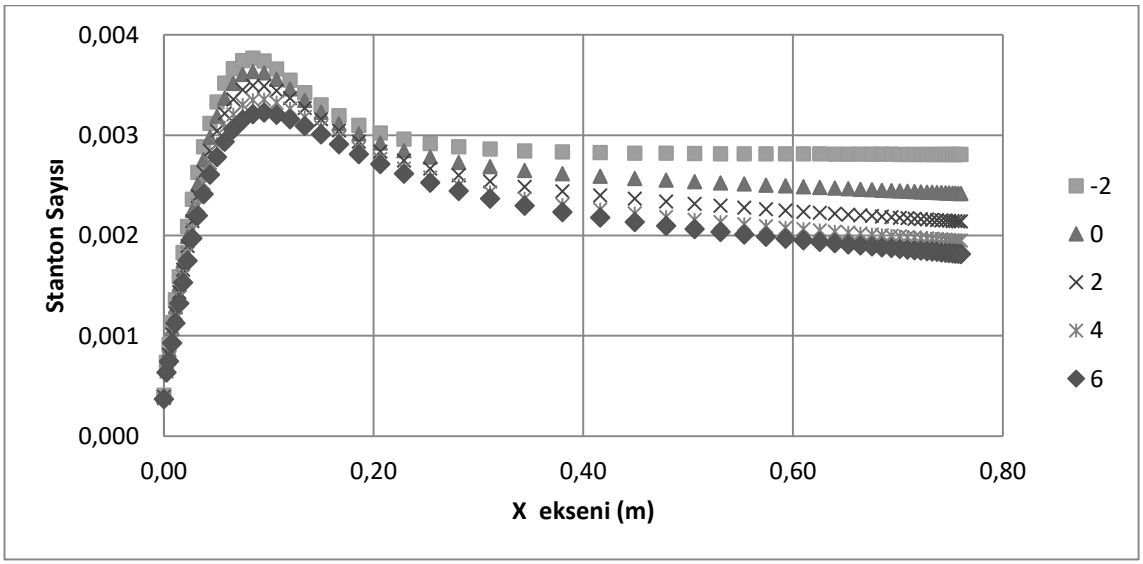
Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi üzerinde yapılan analizler sonrasında beş farklı geometride basınç gradyeni değişimine bağlı olmaksızın türbülans seviyesindeki değişikliklerin ısı ve akış transferi karakteristikleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Buna göre aynı geometride türbülans seviyesi arttıkça yeniden birleşme noktası basamağa doğru yaklaşmakta ve geri dönme bölgesi küçülmekte; ortalama ve maksimum Stanton ve Nusselt sayıları yükselmektedir. Türbülans kinetik enerjisi ise türbülans seviyesinin artmasıyla doğru orantılı bir yaklaşım sergilemektedir.

Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi kullanılarak elde edilen sonuçlar üzerinde yapılan bir diğer değerlendirme de aynı türbülans seviyesi için farklı basınç gradyenlerinde akış ve ısı transferi karakteristiklerinin incelenmesi olmuştur. Buna göre Çizelge 4.3'te belirtilen beş farklı türbülans seviyesinin her biri için beş farklı basınç

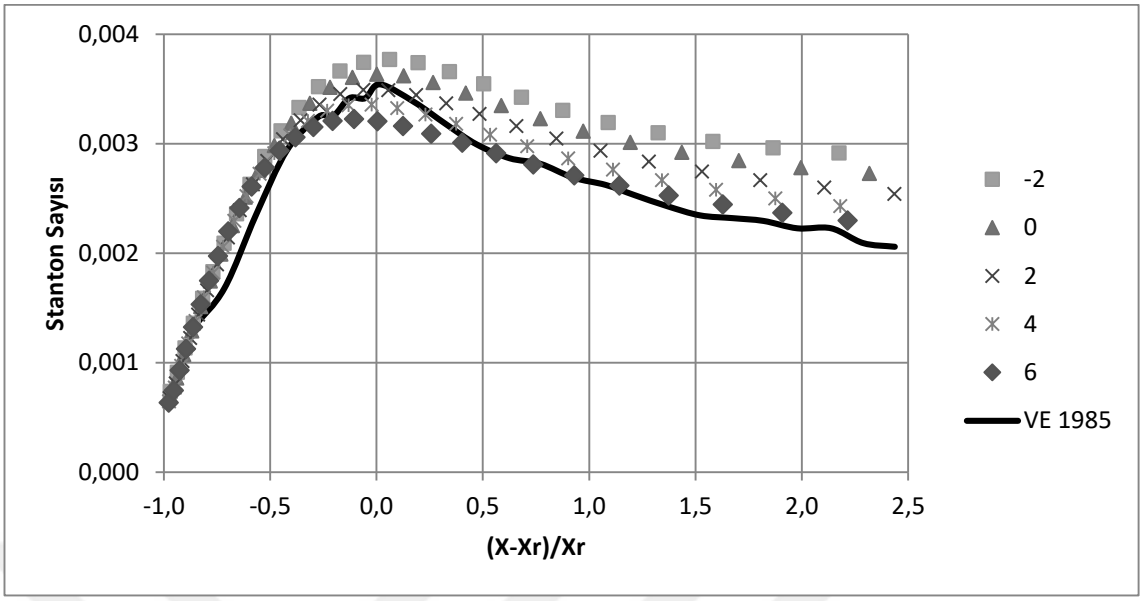
gradyeninin sonuçları bir arada değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda türbülans seviyesi % 0,2 için sonuçlar Şekil 4.64 – 4.68'de; türbülans seviyesi % 1,3 için sonuçlar Şekil 4.69 – 4.73'te; türbülans seviyesi % 3,3 için sonuçlar Şekil 4.74 – 4.78' de; türbülans seviyesi % 5için sonuçlar Şekil 4.79 – 4.83'te ve türbülans seviyesi % 7,4 için sonuçlar ise Şekil 4.84 – 4.88' de gösterilmiştir.



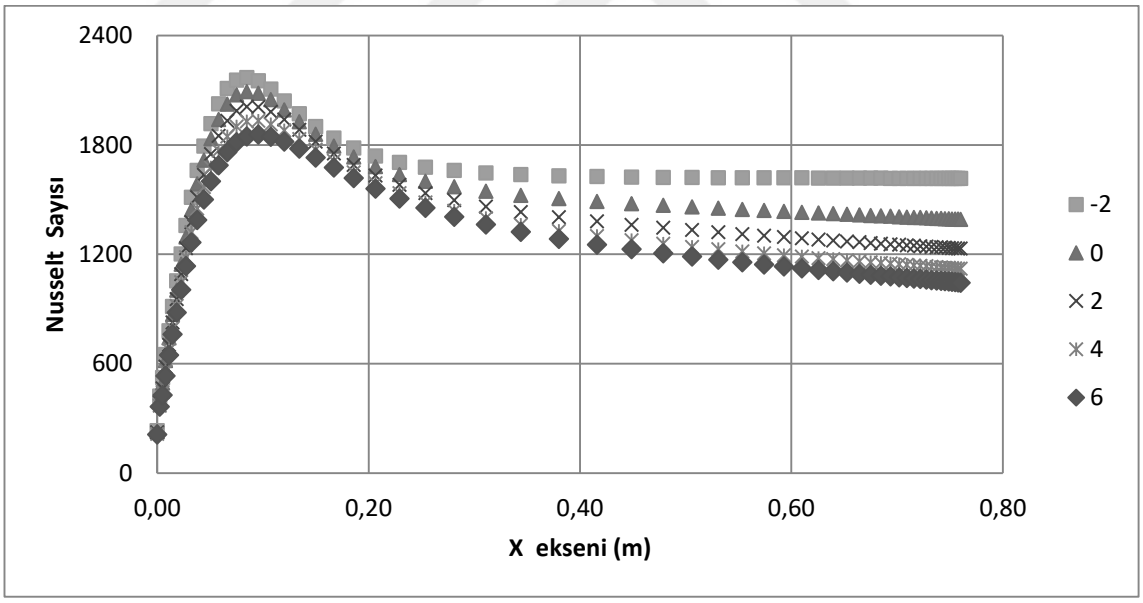
Şekil 4.64. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS)



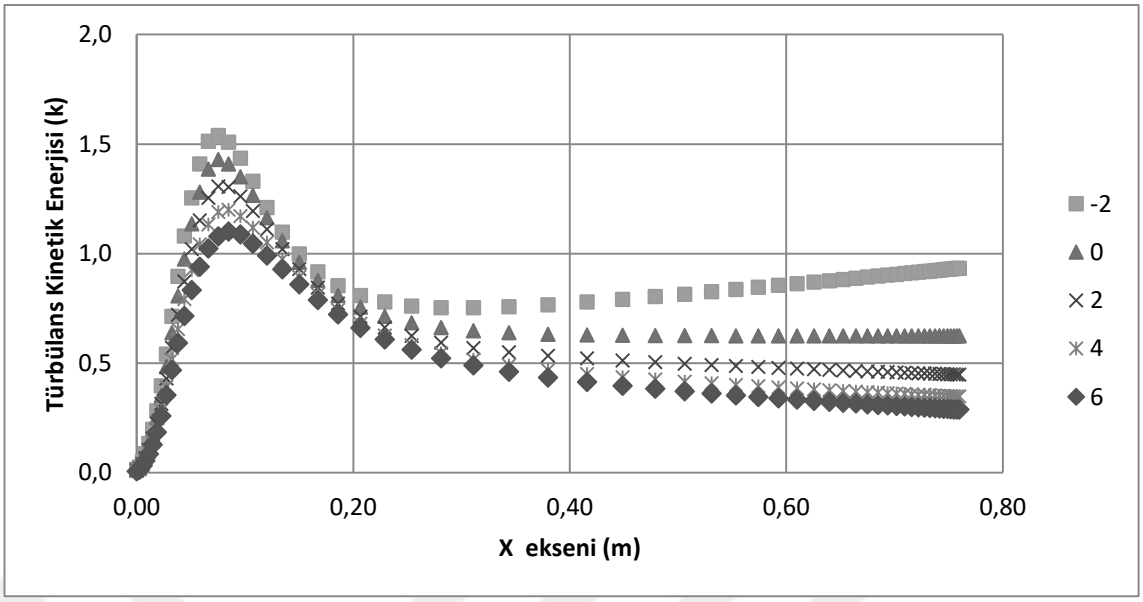
Şekil 4.65. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS)



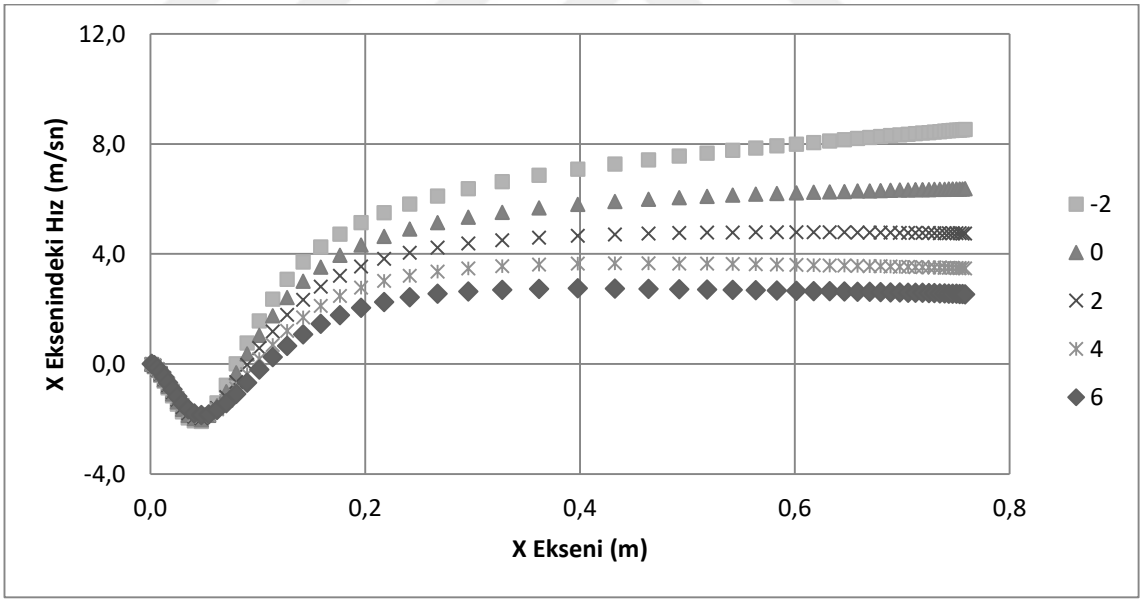
Şekil 4.66. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS)



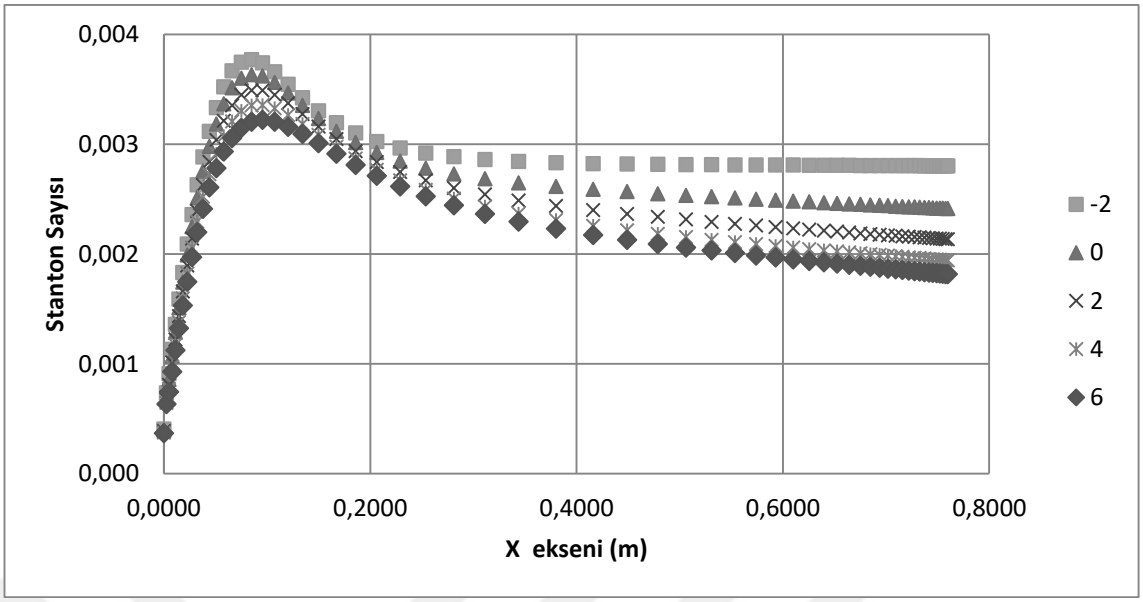
Şekil 4.67. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS)



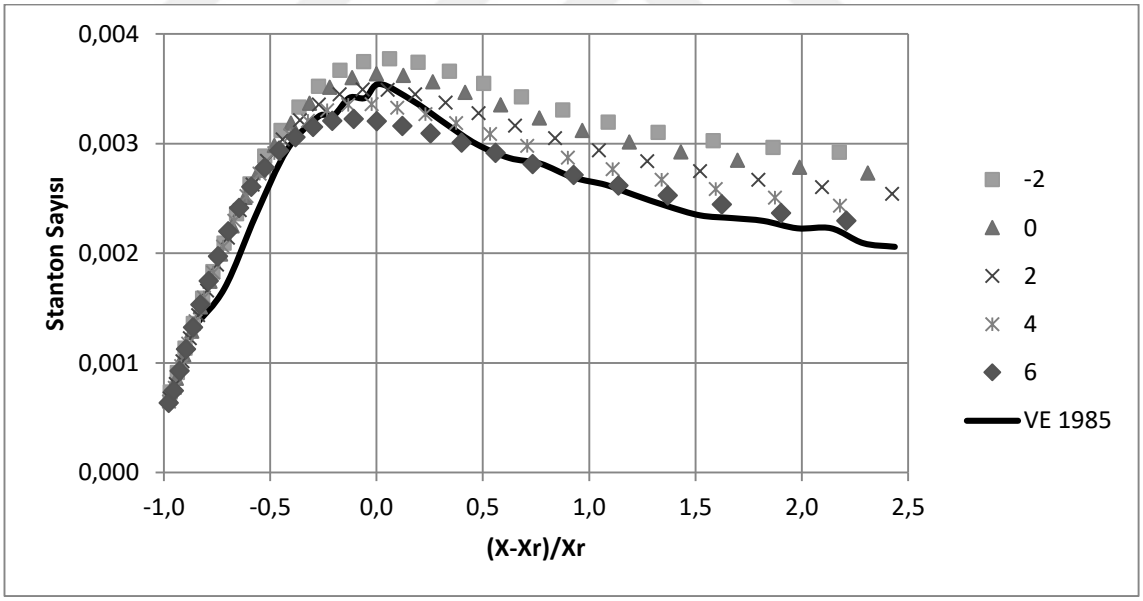
Şekil 4.68. % 0,2 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS)



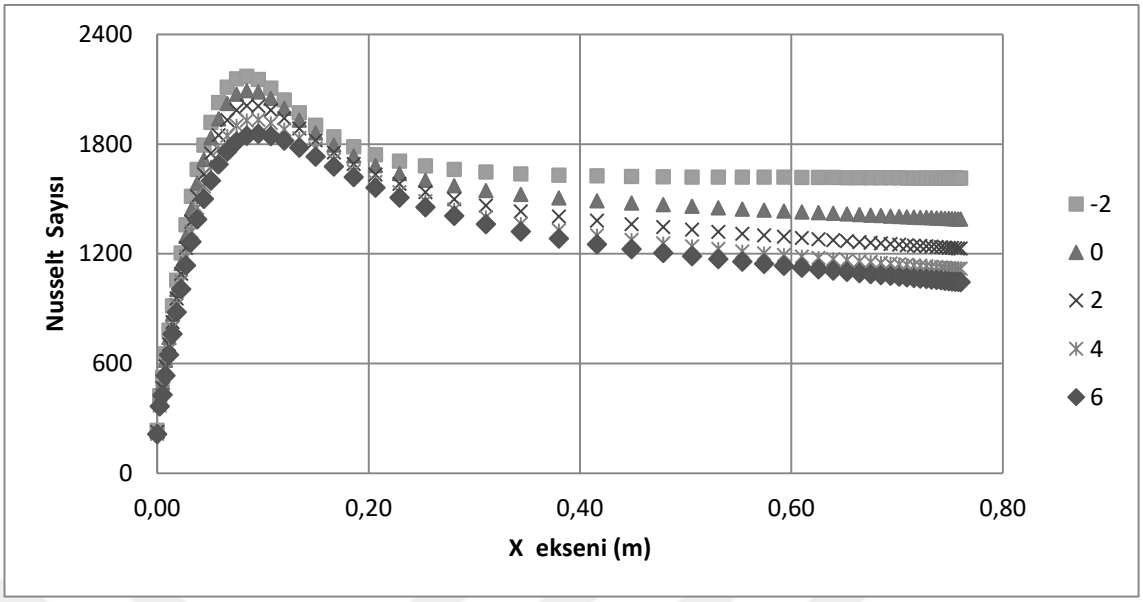
Şekil 4.69. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS)



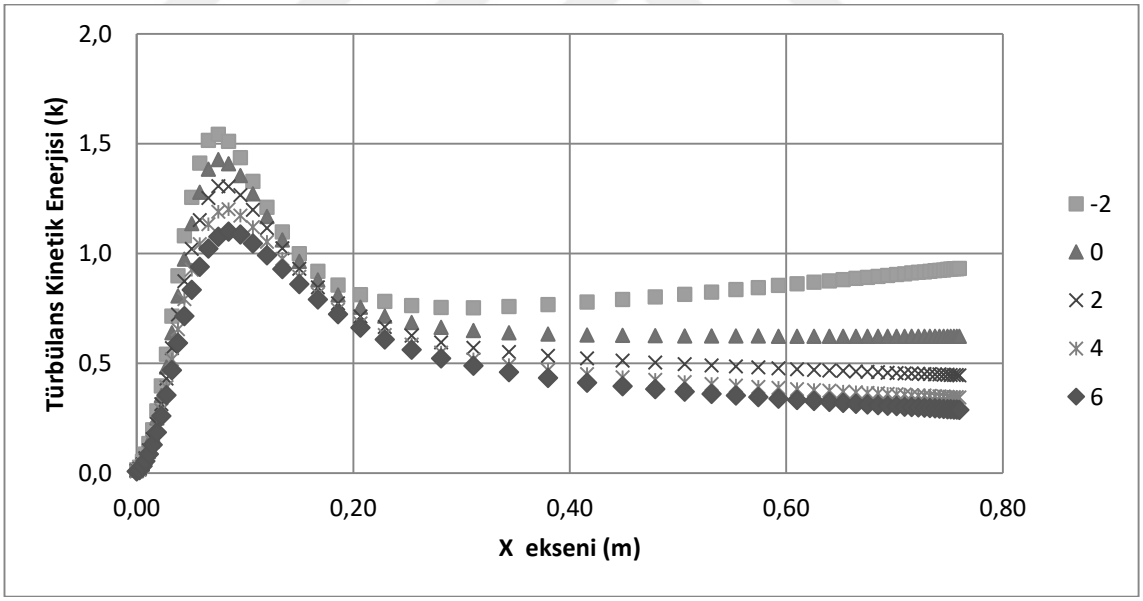
Şekil 4.70. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS)



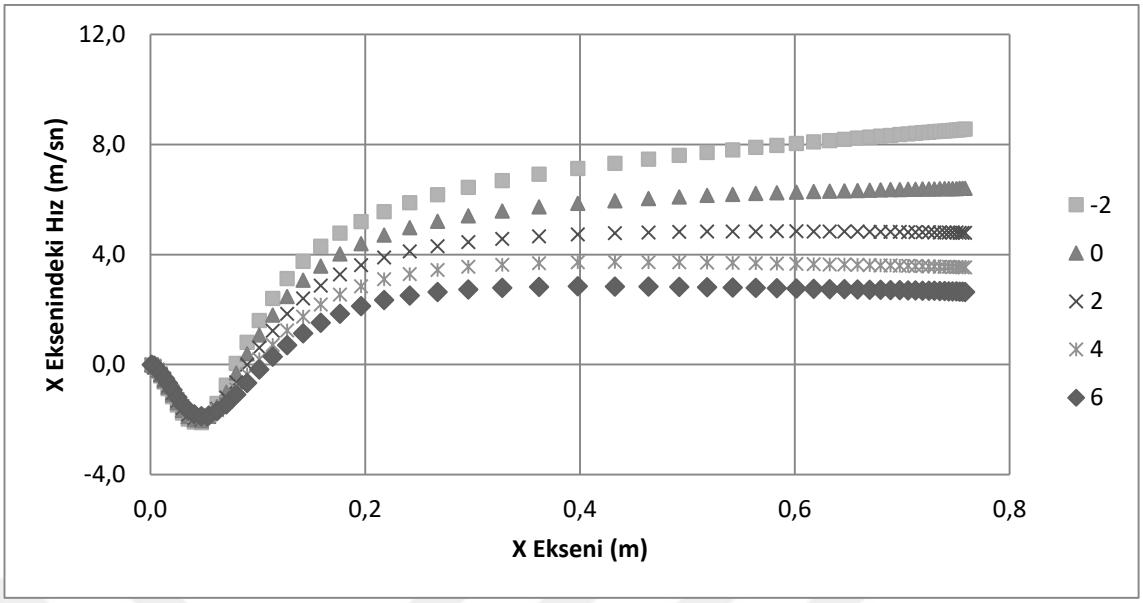
Şekil 4.71. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS)



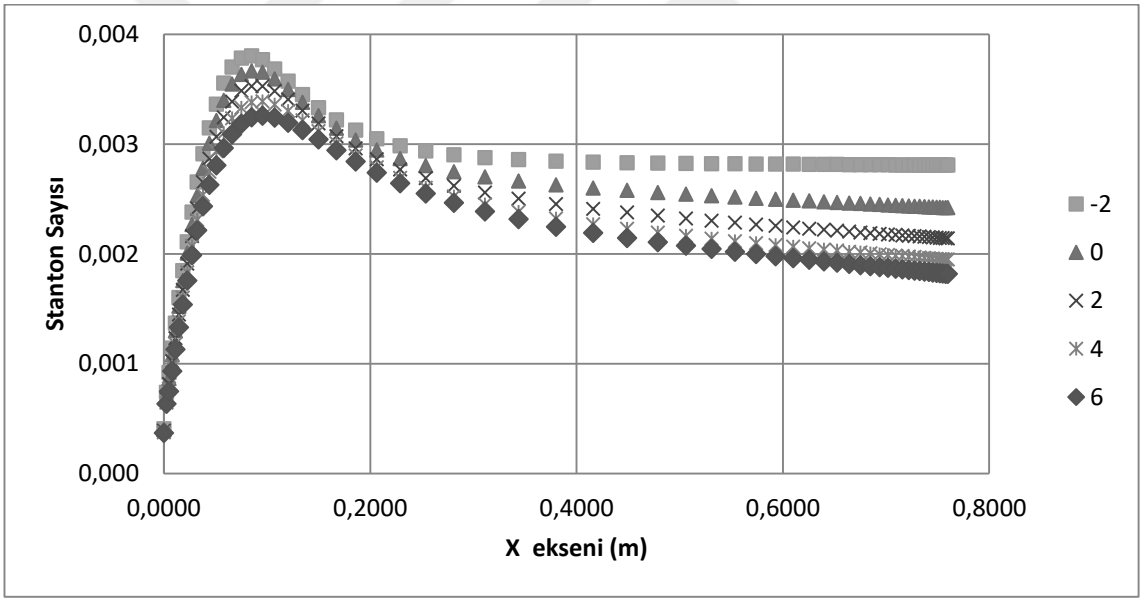
Şekil 4.72. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS)



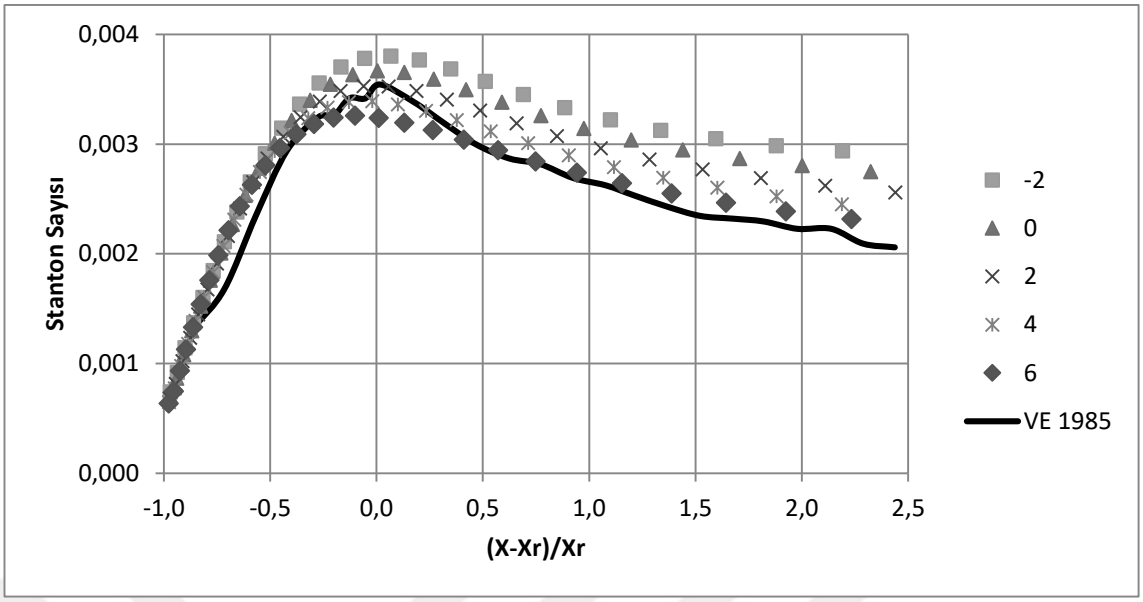
Şekil 4.73. % 1,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS)



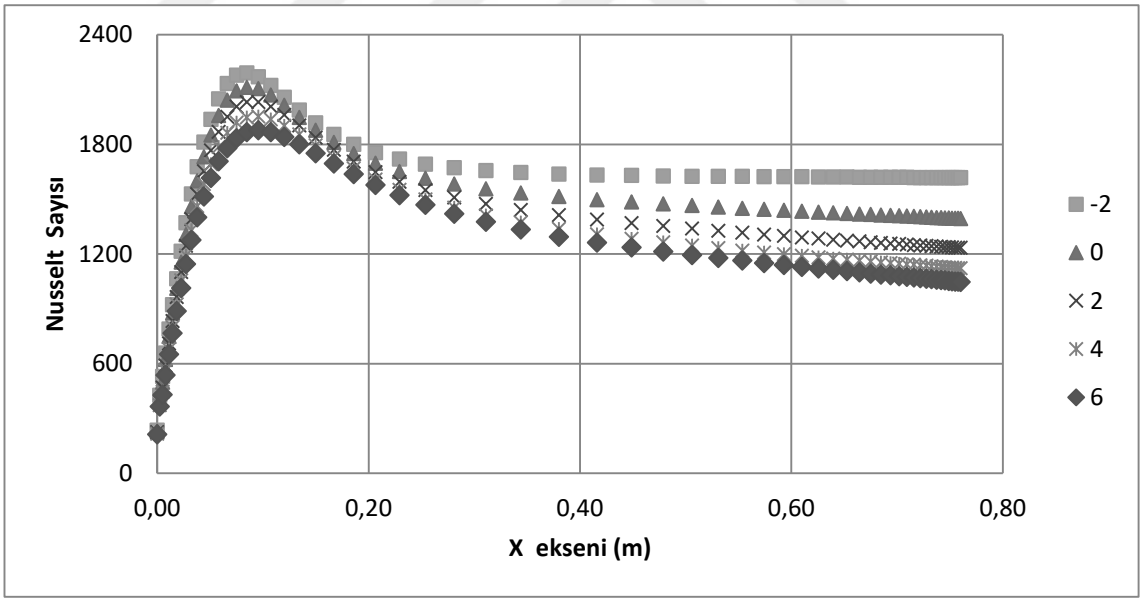
Şekil 4.74. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS)



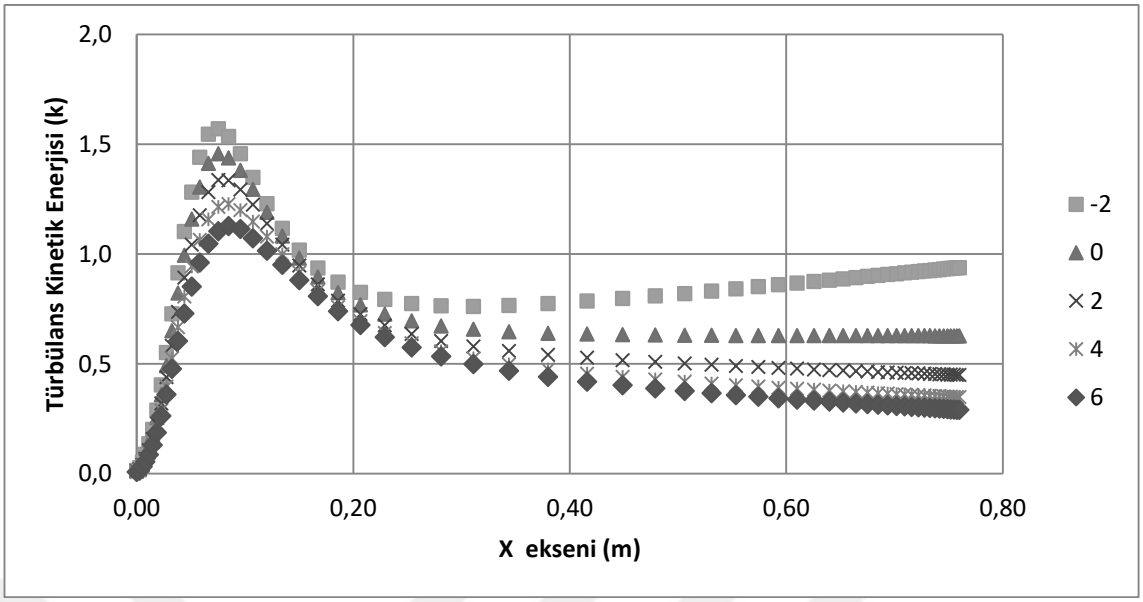
Şekil 4.75. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS)



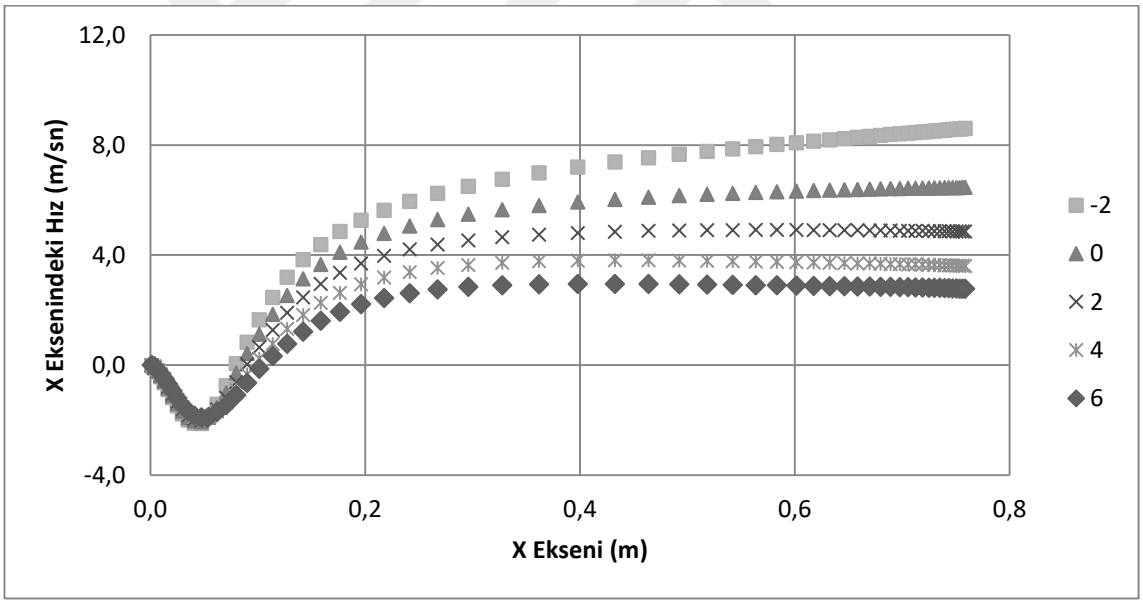
Şekil 4.76. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS)



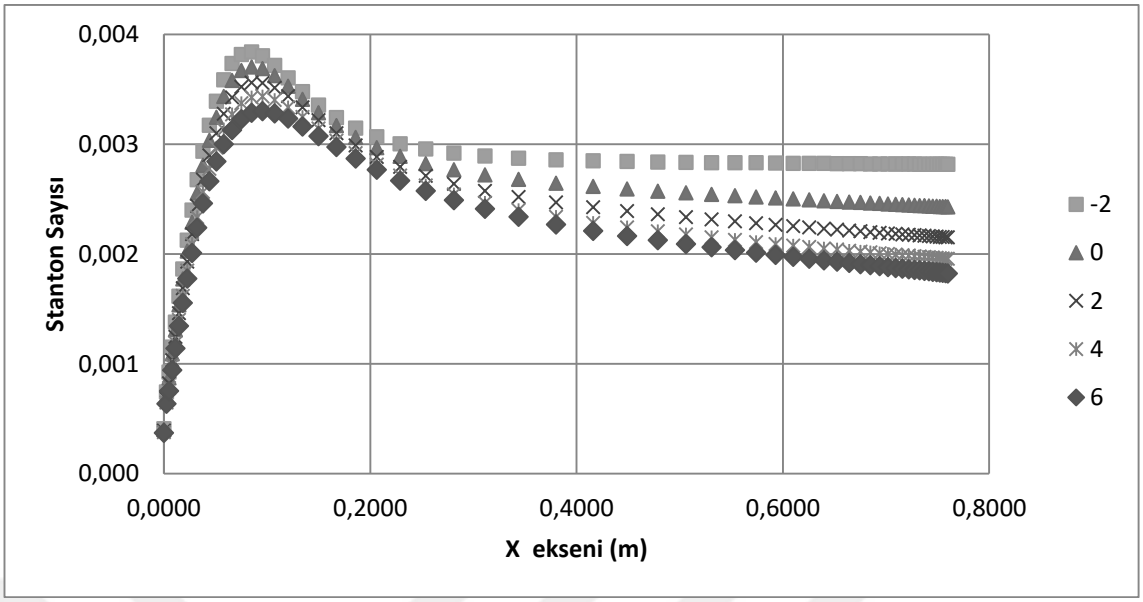
Şekil 4.77. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS)



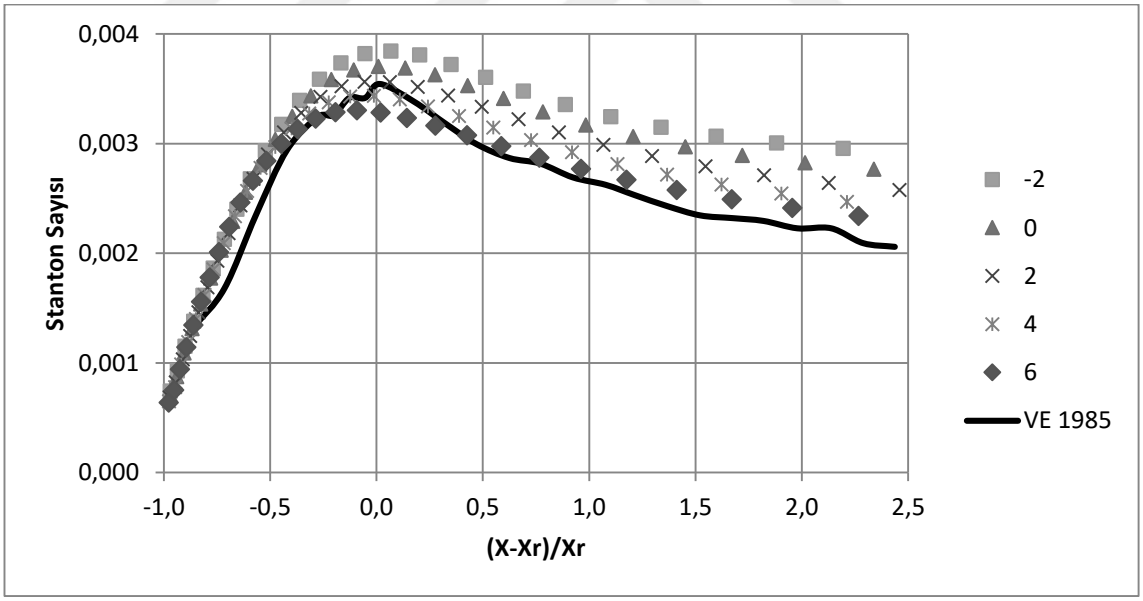
Şekil 4.78. % 3,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS)



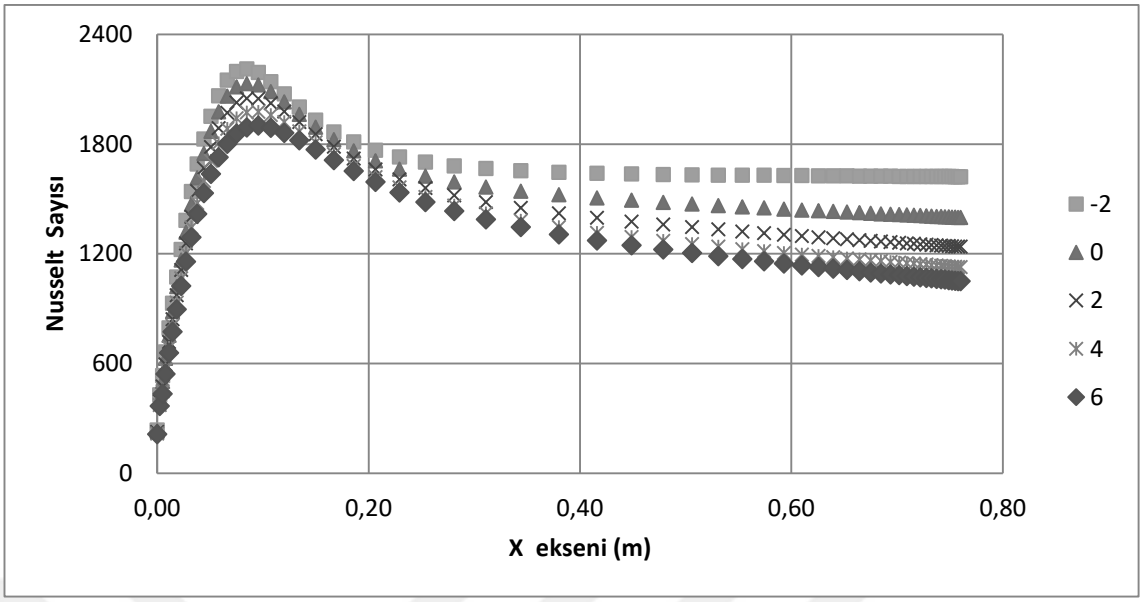
Şekil 4.79. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS)



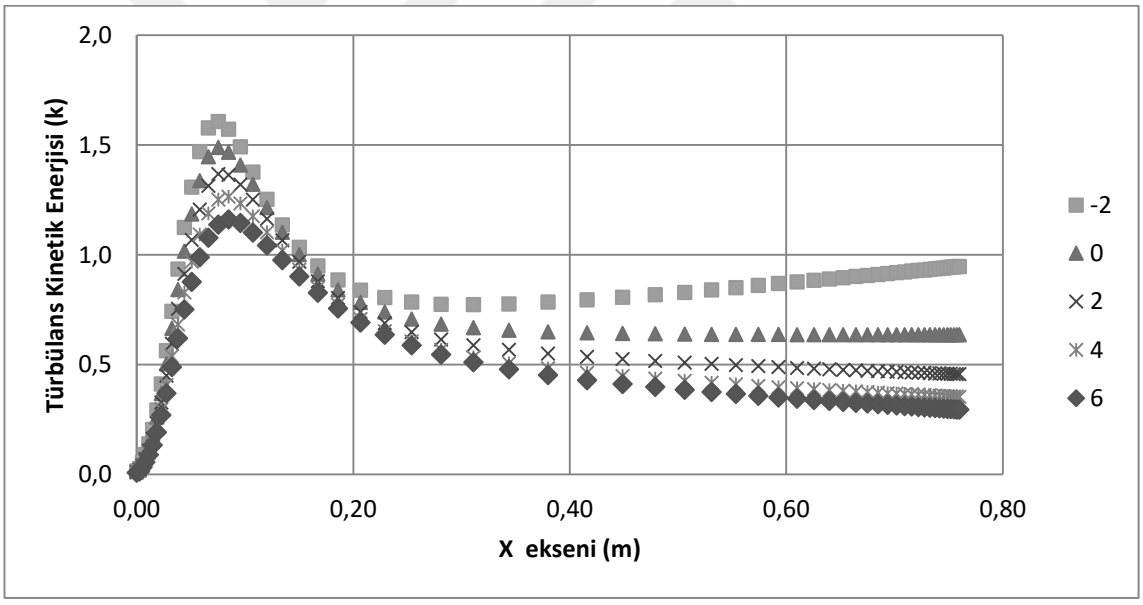
Şekil 4.80. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS)



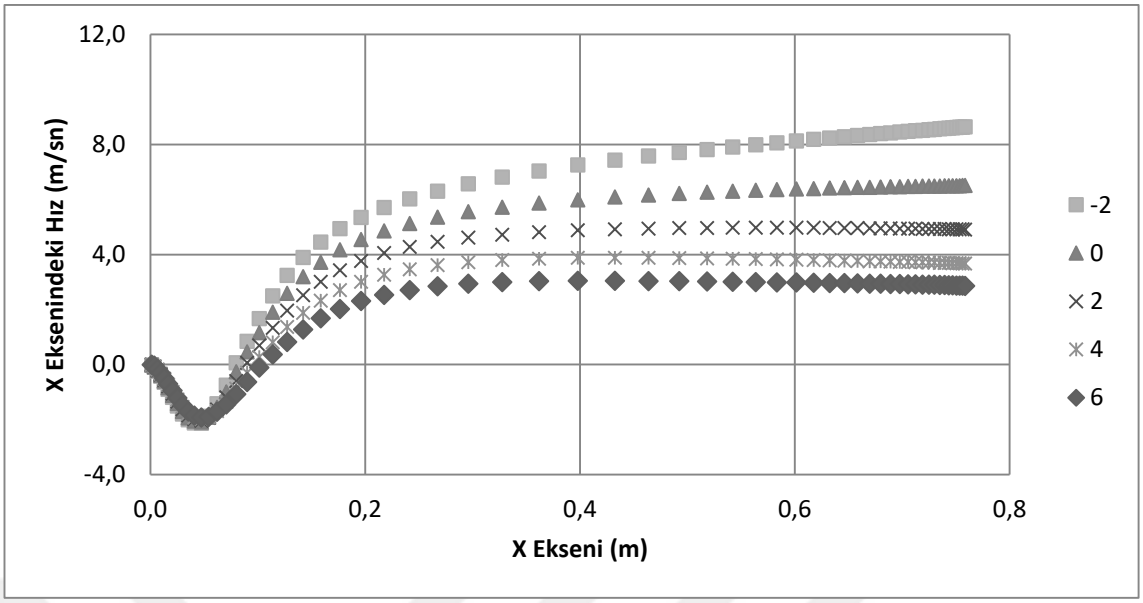
Şekil 4.81. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS)



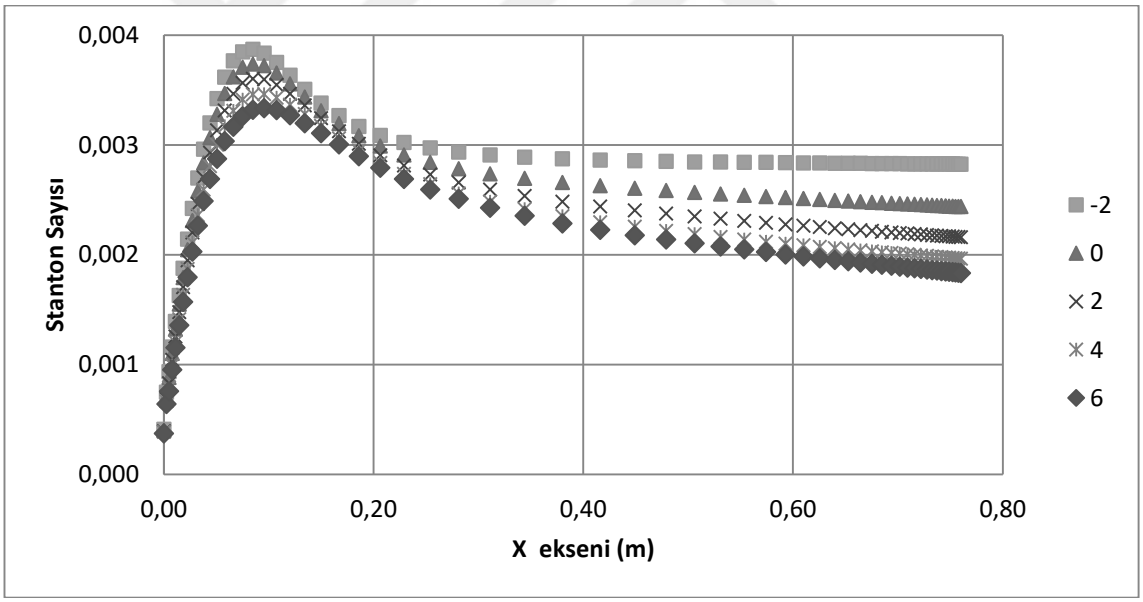
Şekil 4.82. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS)



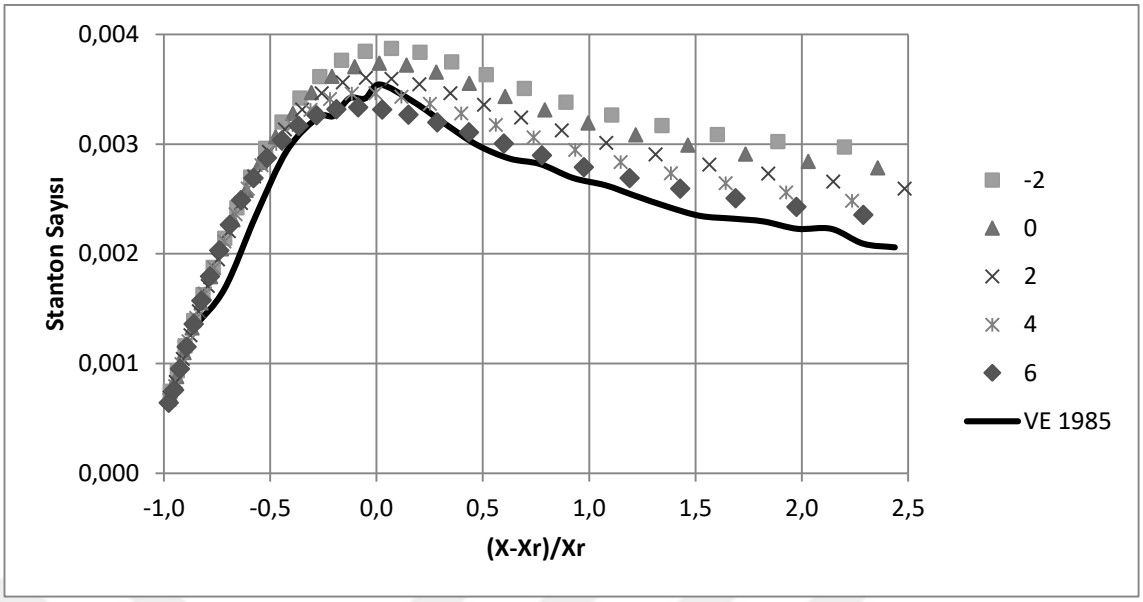
Şekil 4.83. % 5,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS)



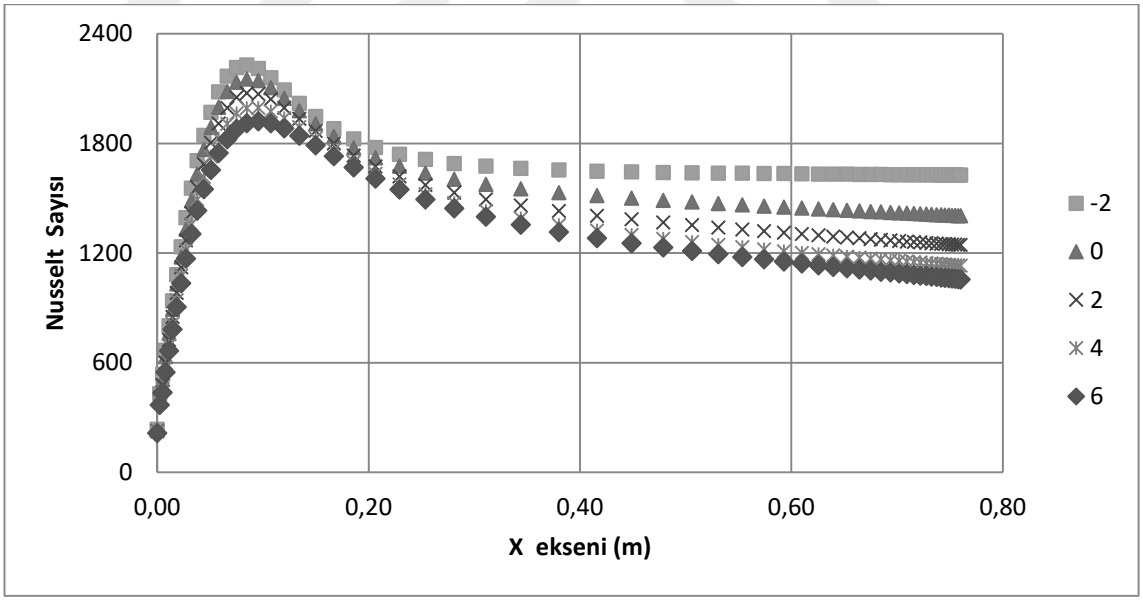
Şekil 4.84. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (DS)



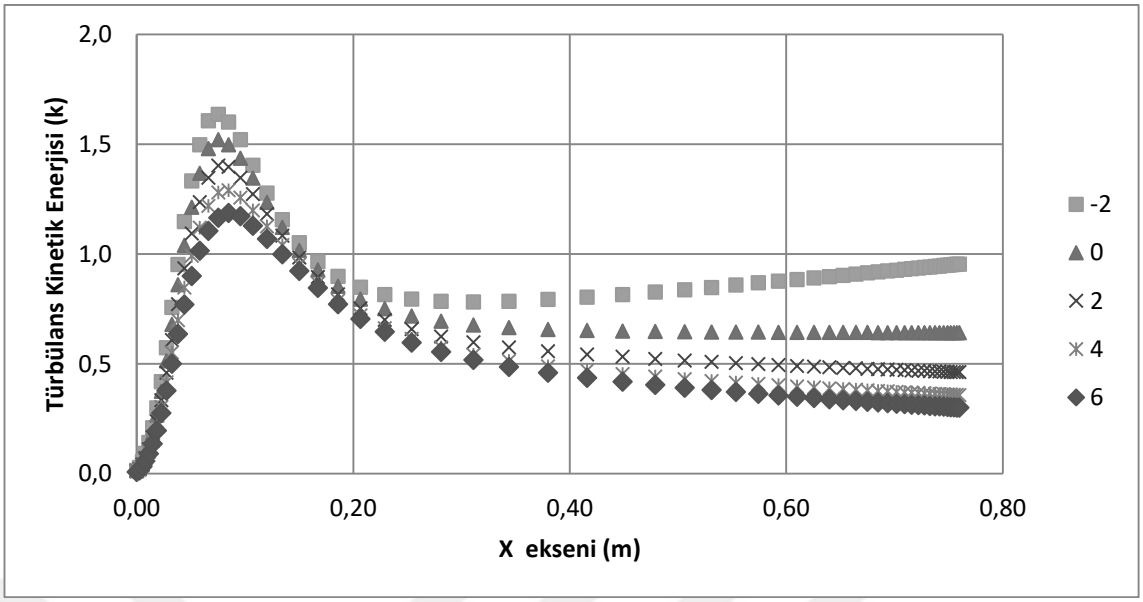
Şekil 4.85. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (DS)



Şekil 4.86. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (DS)



Şekil 4.87. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (DS)



Şekil 4.88. % 7,4 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (DS)

Yapılan analizler sonucunda basınç gradyeninde yaşanan değişikliklerin aynı şartlar altında akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde de değişiklere neden olduğu sonucuna varılmıştır. Bu değişiklikler ise türbülans seviyesindeki değişiklikler gibi minimal boyutta gerçekleşmemiş, aksine daha belirgin bir şekilde meydana gelmiştir. Buna göre basınç gradyeni arttıkça yeniden birleşme noktası basamaktan uzaklaşmakta ve geri dönme bölgesi büyümektedir. Ayrıca Stanton sayısı ve Nusselt sayısı büyüklüklerinde de azalma söz konusu olmaktadır. Aynı azalma türbülans kinetik enerjisi ölçümünde de görülmektedir. Dolayısıyla genişleme oranının 1,1 olduğu bu analojide ısı transferini maksimize etmek için türbülans seviyesinin yükseltilmesi ve basınç gradyeninin düşürülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen tüm sayısal veriler ve yeniden birleşme noktasının basamak yüksekliğine bölümü olarak adlandırılan H değeri ise Çizelge 4.4' te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.4. Driver ve Seegmiller (1985) geometrisi analojisi simülasyon grupları sayısal verileri

DS1 → Basınç Gradyeni -2º
DS2 → Basınç Gradyeni 0º
DS3 → Basınç Gradyeni 2º
DS4 → Basınç Gradyeni 4º
DS5 → Basınç Gradyeni 6º

Grup	Analiz	Türbülans Seviyesi	Yeniden Birleşme (Xr)	H	Stanton Sayısı (Ort)	Stanton Sayısı (Mak)	Nusselt Sayısı (Ort)	Nusselt Sayısı (Mak)
DS1	a	0,2	0,080	5,26	0,0027	0,0038	1583	2170
	b	1,3	0,080	5,26	0,0027	0,0038	1582	2171
	c	3,3	0,080	5,23	0,0028	0,0038	1590	2189
	d	5,3	0,080	5,23	0,0028	0,0038	1599	2212
	e	7,4	0,079	5,22	0,0028	0,0039	1607	2229
DS2	a	0,2	0,085	5,58	0,0025	0,0036	1453	2093
	b	1,3	0,085	5,59	0,0025	0,0036	1452	2092
	c	3,3	0,085	5,57	0,0025	0,0037	1460	2111
	d	5,3	0,084	5,54	0,0026	0,0037	1470	2131
	e	7,4	0,084	5,51	0,0026	0,0037	1479	2152
DS3	a	0,2	0,091	5,96	0,0023	0,0035	1350	2011
	b	1,3	0,091	5,98	0,0023	0,0035	1349	2010
	c	3,3	0,090	5,95	0,0024	0,0035	1357	2030
	d	5,3	0,090	5,92	0,0024	0,0036	1367	2050
	e	7,4	0,089	5,88	0,0024	0,0036	1376	2074
DS4	a	0,2	0,098	6,43	0,0022	0,0034	1272	1932
	b	1,3	0,098	6,44	0,0022	0,0034	1271	1933
	c	3,3	0,098	6,42	0,0022	0,0034	1279	1951
	d	5,3	0,097	6,37	0,0022	0,0034	1289	1977
	e	7,4	0,096	6,32	0,0023	0,0035	1298	1994
DS5	a	0,2	0,107	7,04	0,0021	0,0032	1216	1856
	b	1,3	0,107	7,05	0,0021	0,0032	1215	1855
	c	3,3	0,106	7,00	0,0021	0,0033	1224	1876
	d	5,3	0,105	6,93	0,0021	0,0033	1234	1901
	e	7,4	0,105	6,88	0,0022	0,0033	1244	1920

4.1.2.2. Vogel ve Eaton (1985) Geometrisi ve Analojisi

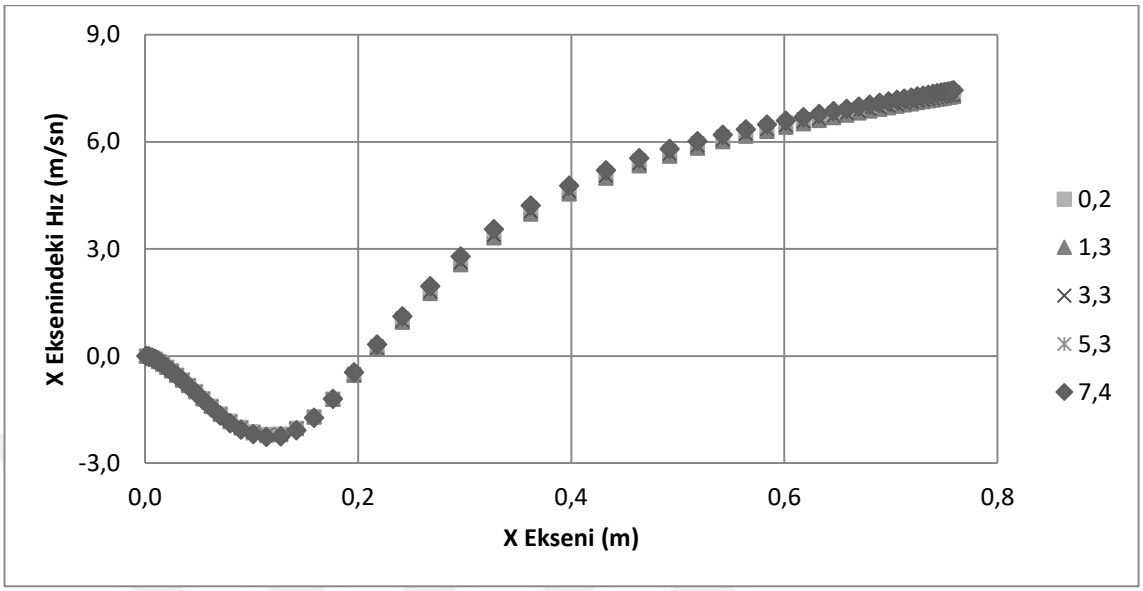
Genişleme oranının 1,25 olarak kullanıldığı bu geometride Driver ve Seegmiller (1985) çalışmasında uygulanan basınç gradyeni değişimleri Vogel ve Eaton (1985) çalışmasına uyarlanmıştır. Çizelge 3.1‘ de geometrik boyutları belirtilen ve Şekil 3.10 – 3.14’te geometrileri belirtilen bu analojide Çizelge 3.2’deki ilgili şartlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Toplam 25 analizin gerçekleştirildiği bu analojideki analizlerin gruplandırılması Çizelge 4.5’ te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi simülasyon grupları

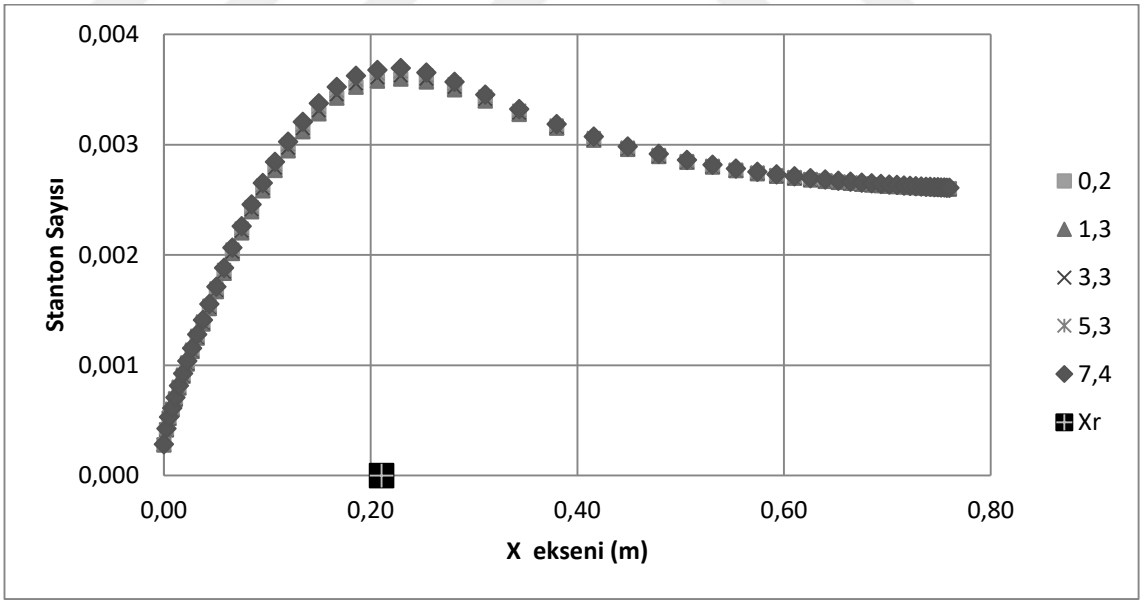
Grup	Analiz	Basınç Gradyeni Değişim Açısı (Derece)	Türbülans Seviyesi (%)
VE1	a	-2	0,2
	b	-2	1,3
	c	-2	3,3
	d	-2	5,3
	e	-2	7,4
VE2	a	0	0,2
	b	0	1,3
	c	0	3,3
	d	0	5,3
	e	0	7,4
VE3	a	2	0,2
	b	2	1,3
	c	2	3,3
	d	2	5,3
	e	2	7,4
VE4	a	4	0,2
	b	4	1,3
	c	4	3,3
	d	4	5,3
	e	4	7,4
VE5	a	6	0,2
	b	6	1,3
	c	6	3,3
	d	6	5,3
	e	6	7,4

Çizelge 4.5’te VE1 olarak belirlenen ilk grupta, Şekil 3.10’da belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,25 olduğu geometri için kanal çıkışında bir daralma olduğu durum

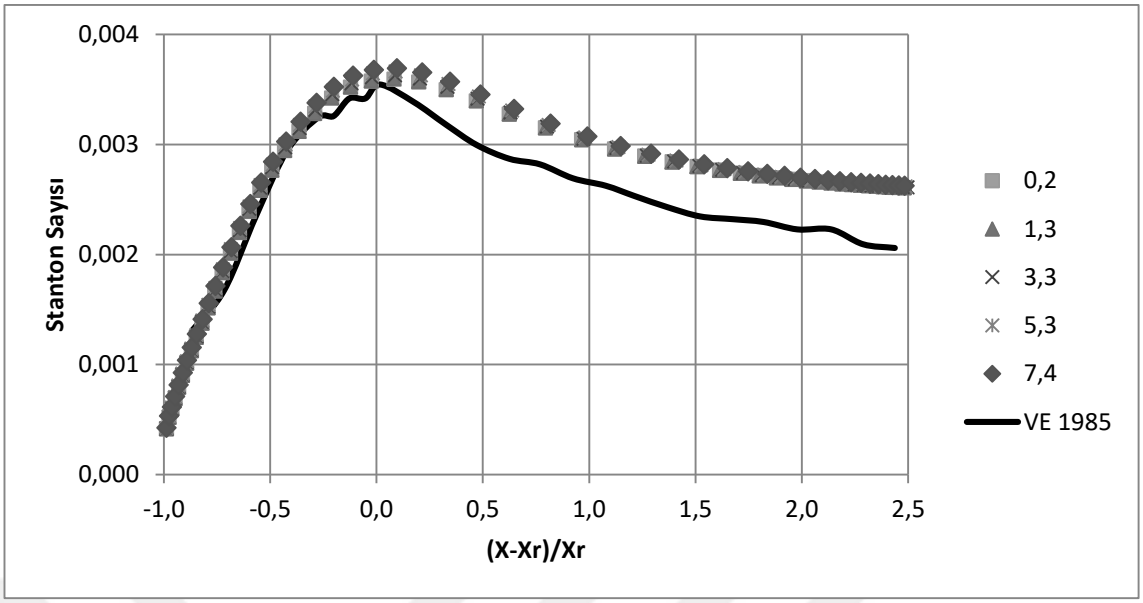
için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.89 – 4.93'te gösterilmiştir.



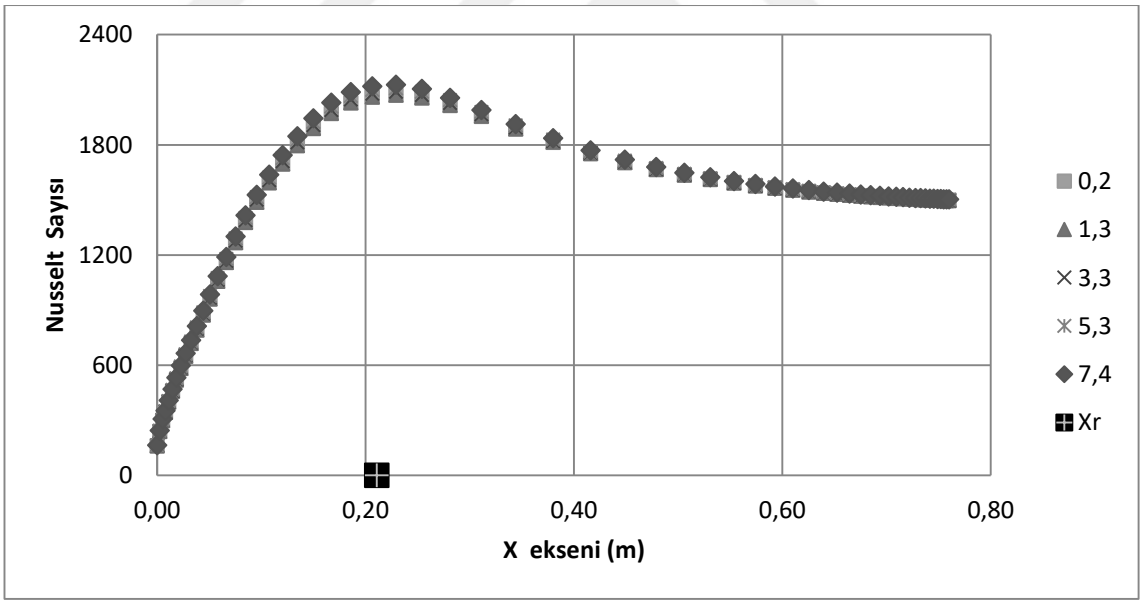
Şekil 4.89. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE1)



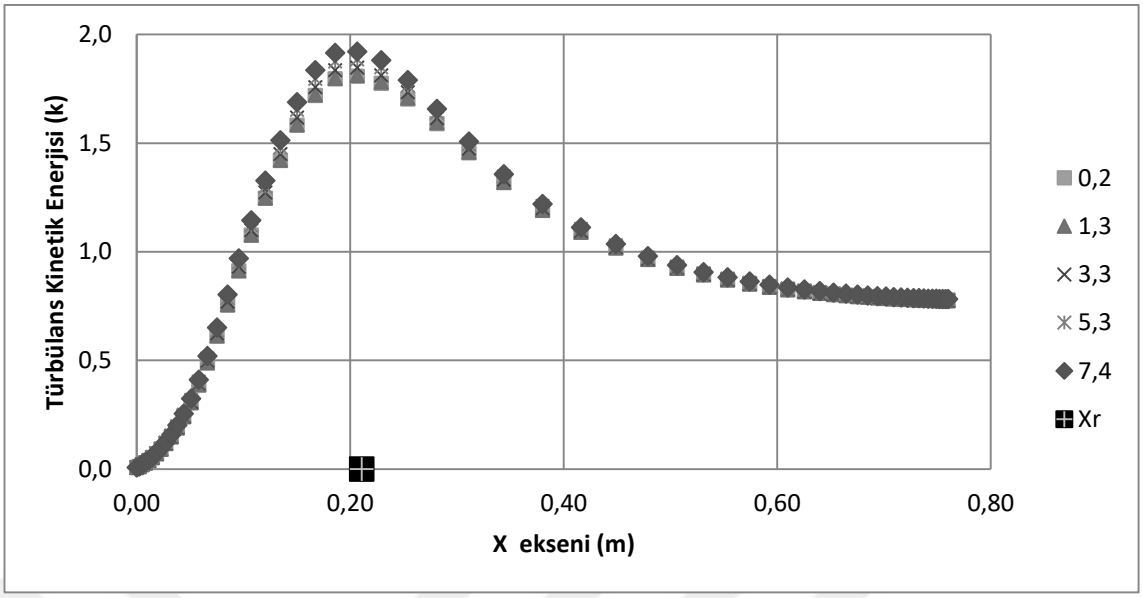
Şekil 4.90. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE1)



Şekil 4.91. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE1)



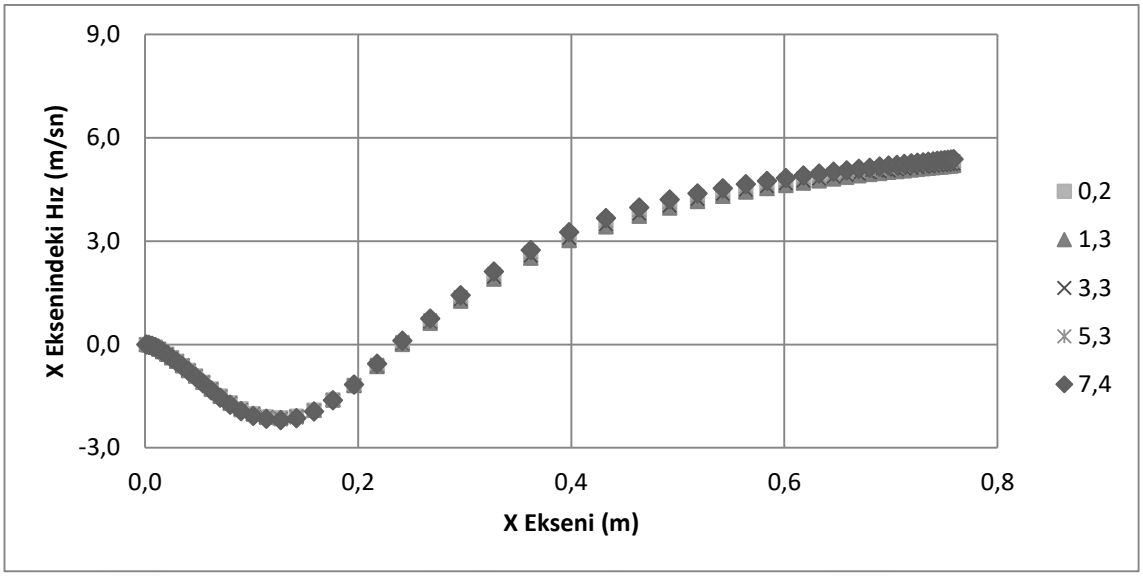
Şekil 4.92. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE1)



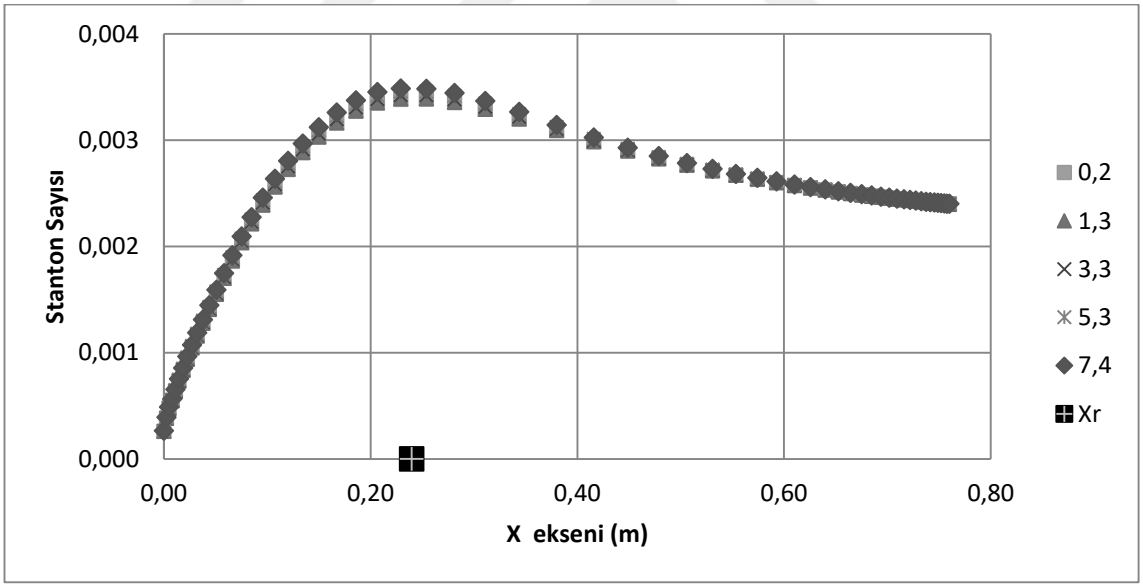
Şekil 4.93. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE1)

VE1 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.91'de belirtilen deneysel sonuçlara göre daha düşük bir Stanton sayısı ve yeniden birleşme etkileşimi meydana gelmektedir.

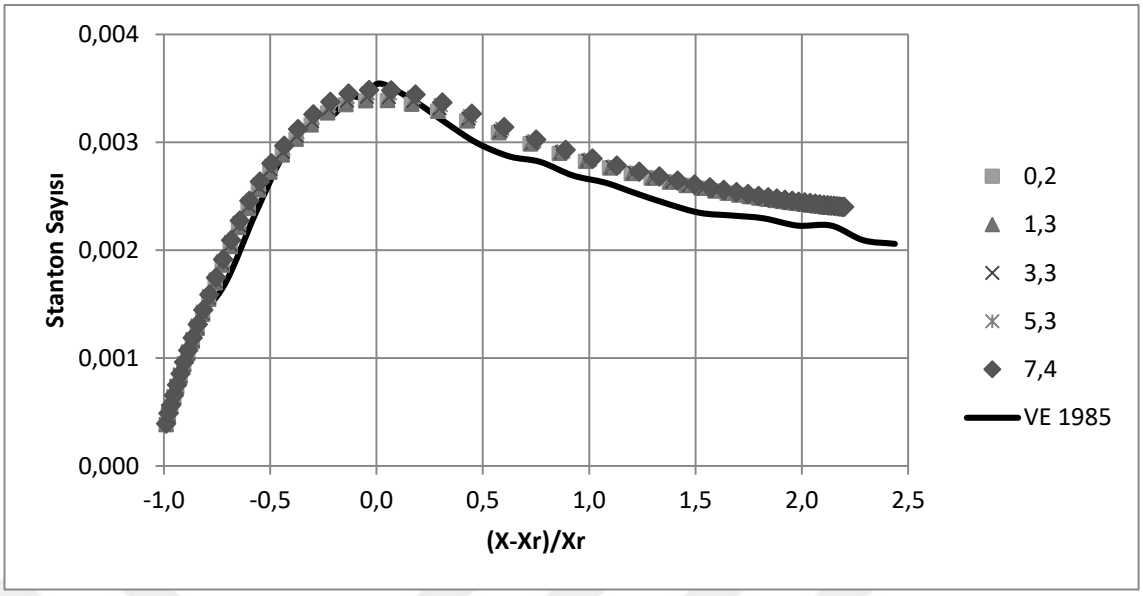
Çizelge 4.5'te VE2 olarak belirlenen ikinci grupta, Şekil 3.11'de belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,25 olduğu geometri için kanal çıkışında bir daralma ya da genişlemenin olmadığı durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.94 – 4.98'te gösterilmiştir.



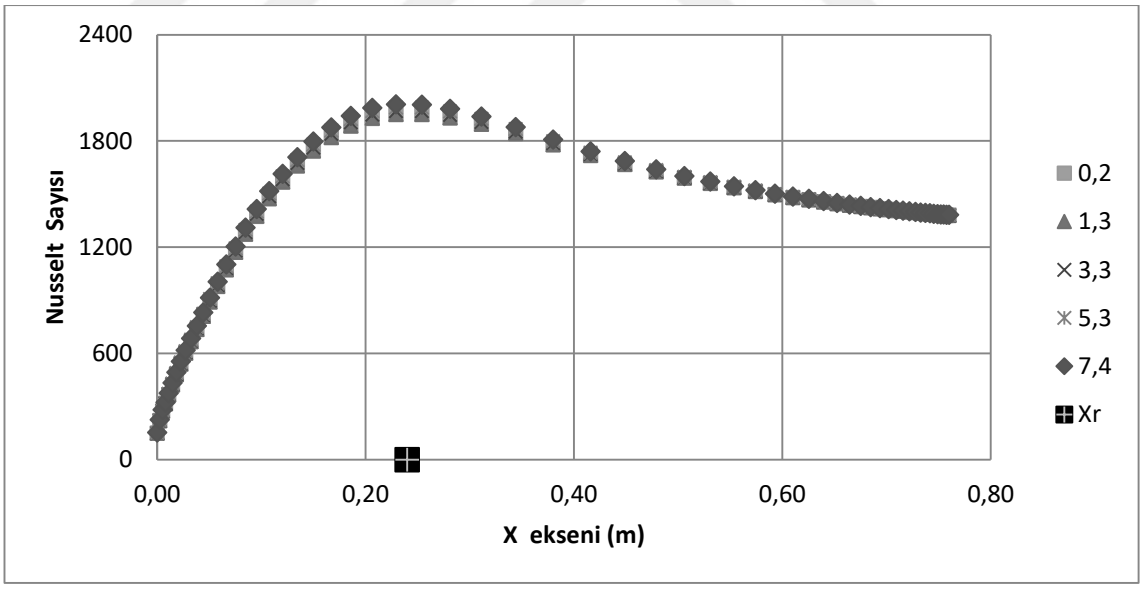
Şekil 4.94. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE2)



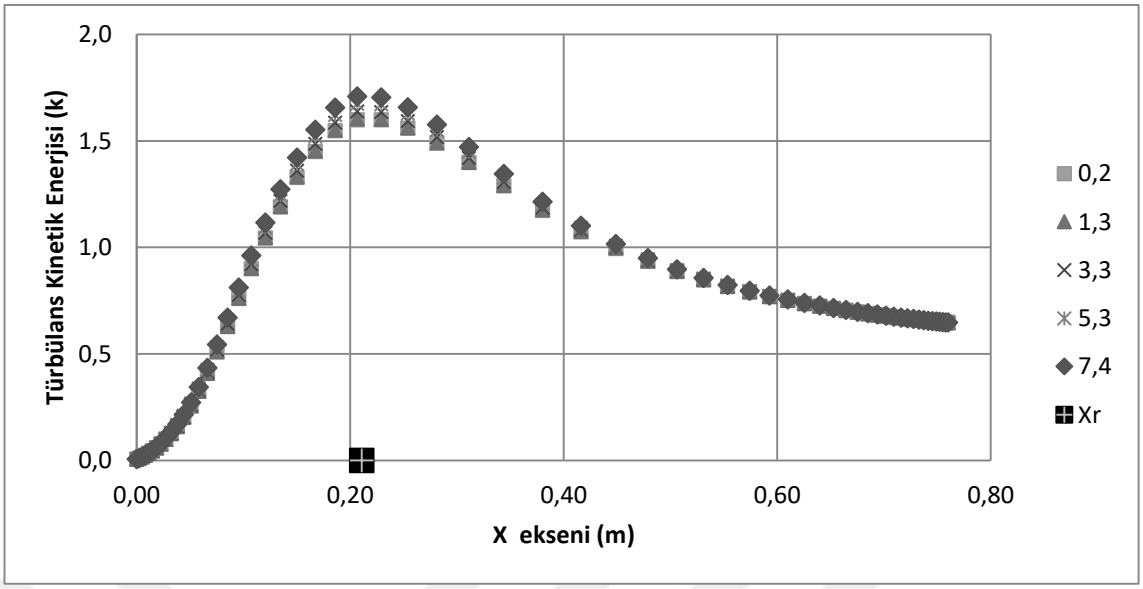
Şekil 4.95. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE2)



Şekil 4.96. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE2)



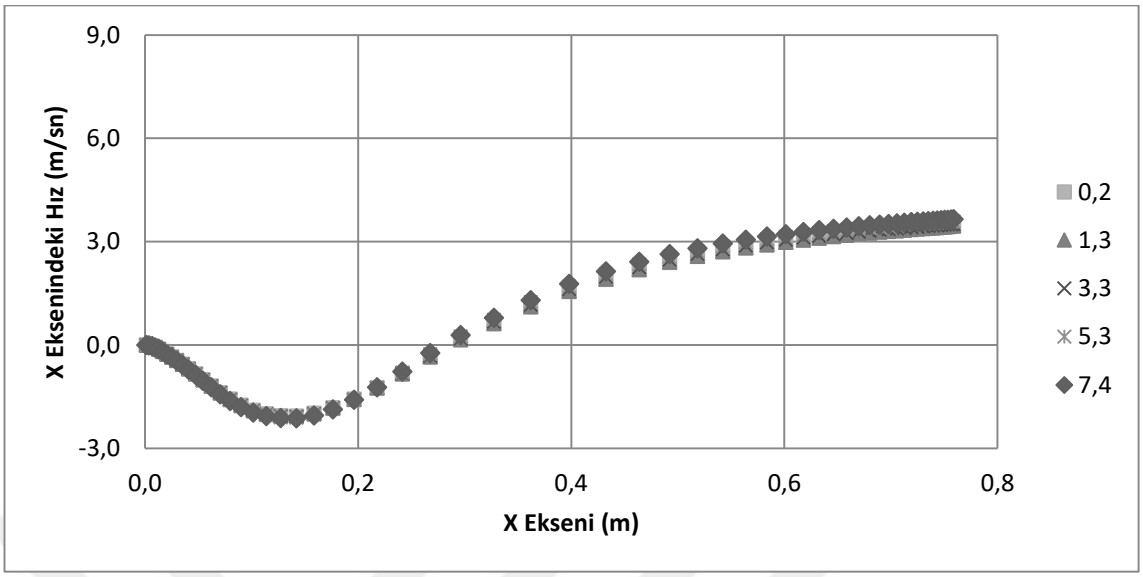
Şekil 4.97. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE2)



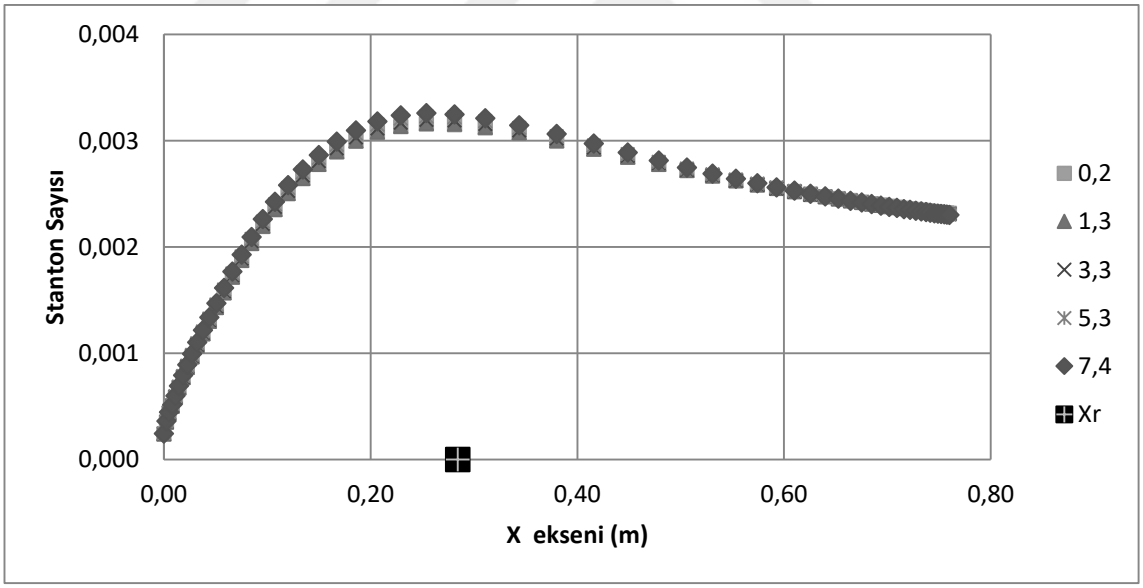
Şekil 4.98. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE2)

VE2 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.96'de belirtilen deneysel sonuçlara göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme etkileşimi oldukça benzerdir. Bu analiz ayrıca deneysel çalışmandaki tepe noktasını tam olarak yakalaması bakımından geçerliliğini sağlayan analiz olarak değerlendirilmektedir.

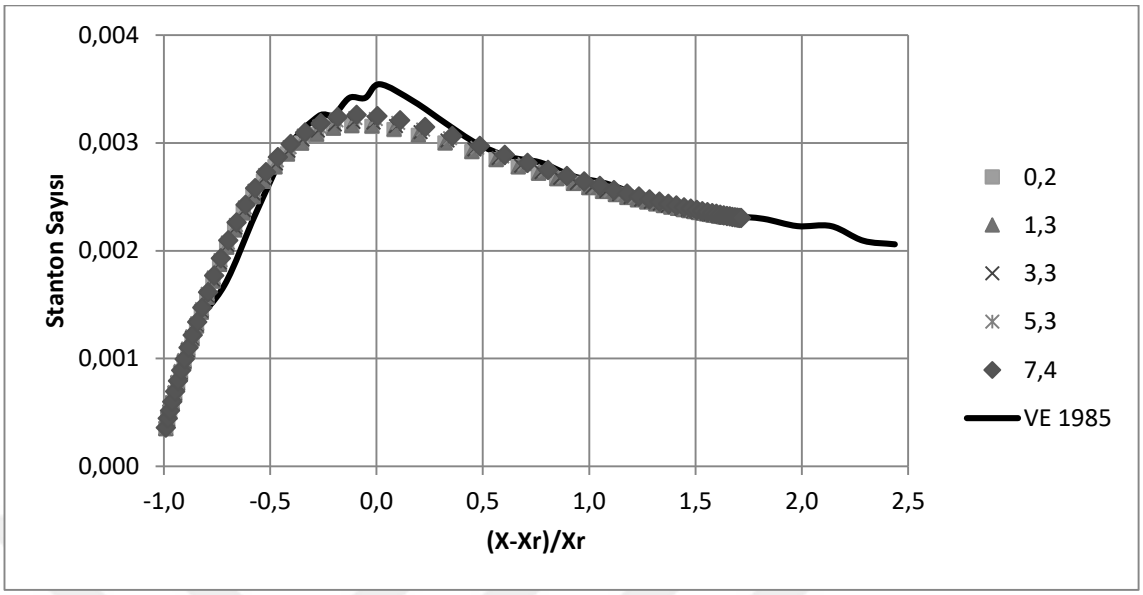
Çizelge 4.5'te VE3 olarak belirlenen üçüncü grupta, Şekil 3.12'de belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,25 olduğu geometri için kanal çıkışında küçük bir genişlemenin olmadığı durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.99 – 4.103'te gösterilmiştir.



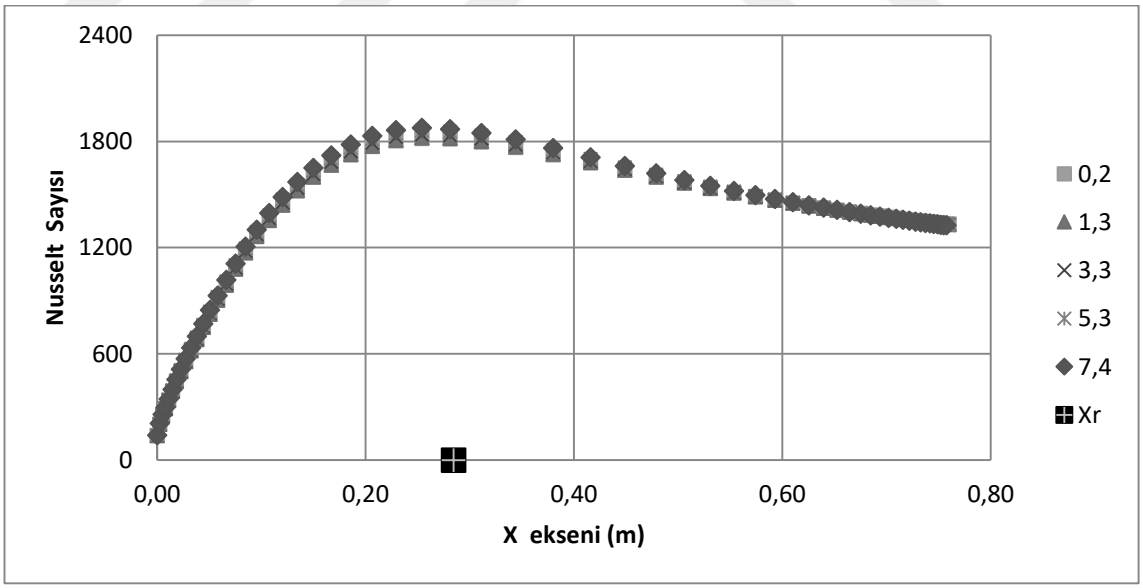
Şekil 4.99. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE3)



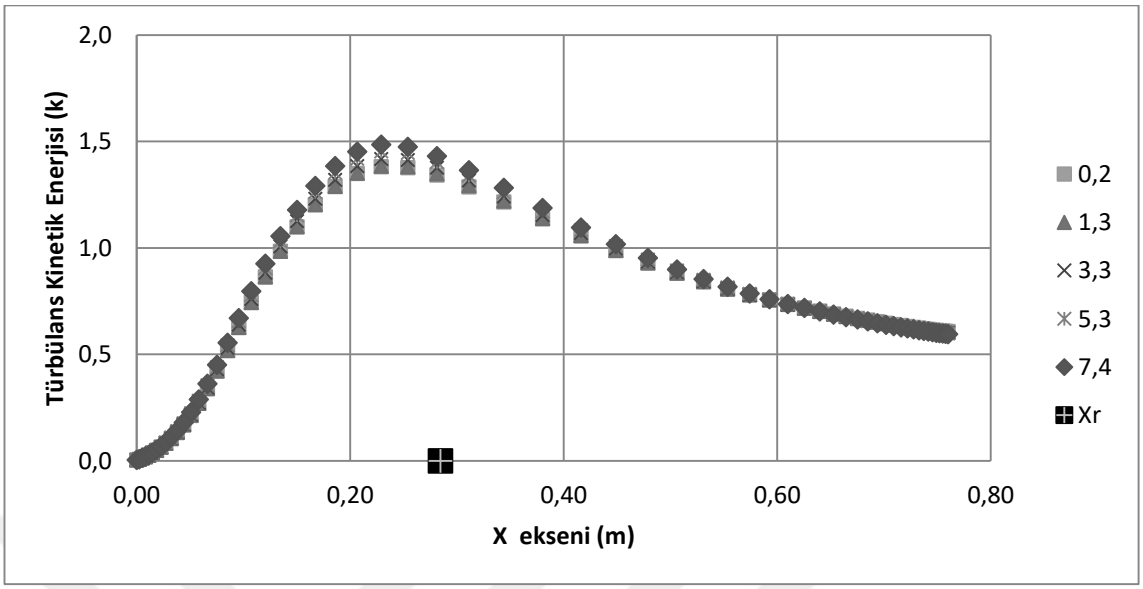
Şekil 4.100. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası hızı (VE3)



Şekil 4.101. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE3)



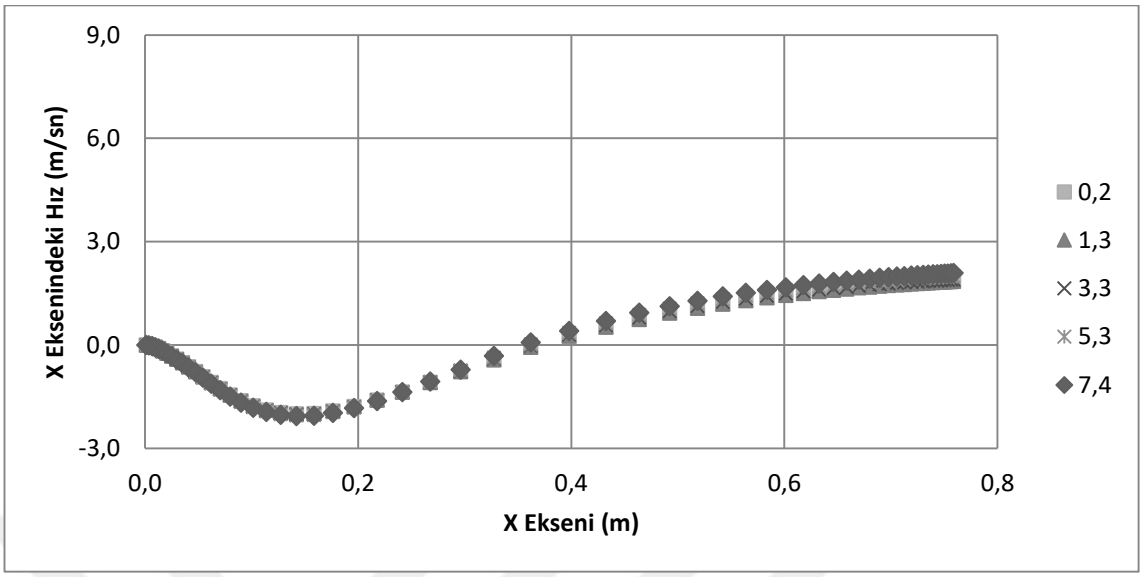
Şekil 4.102. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE3)



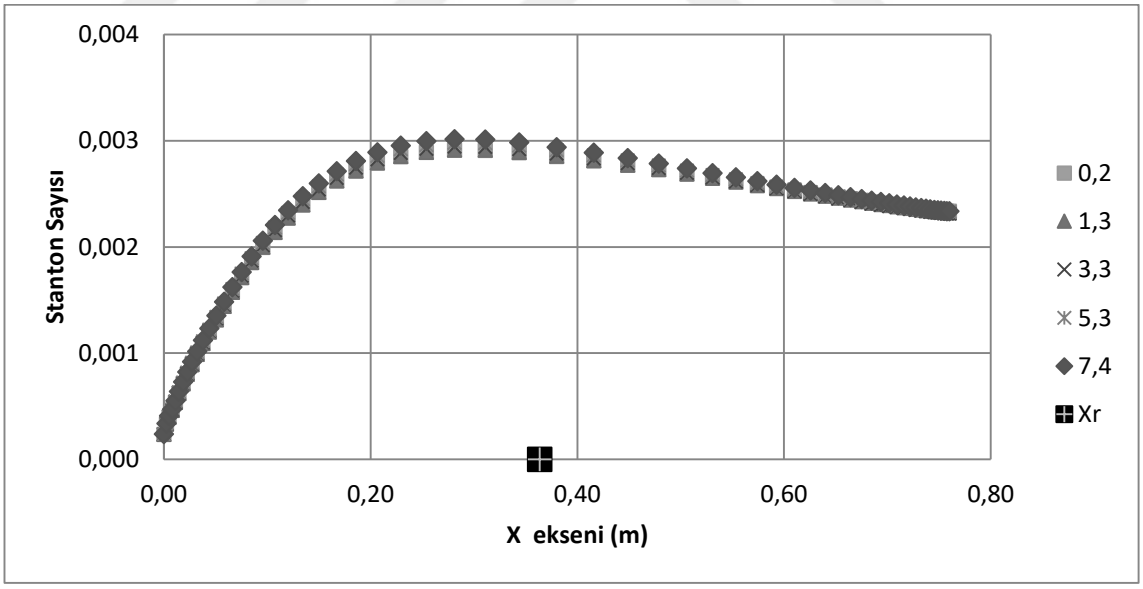
Şekil 4.103. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE3)

VE3 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.101'de belirtilen deneysel sonuçlara göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme etkileşimi, iyi sonuçlar vermemeye başlamakta; fakat şekilsel benzerlik devam etmektedir.

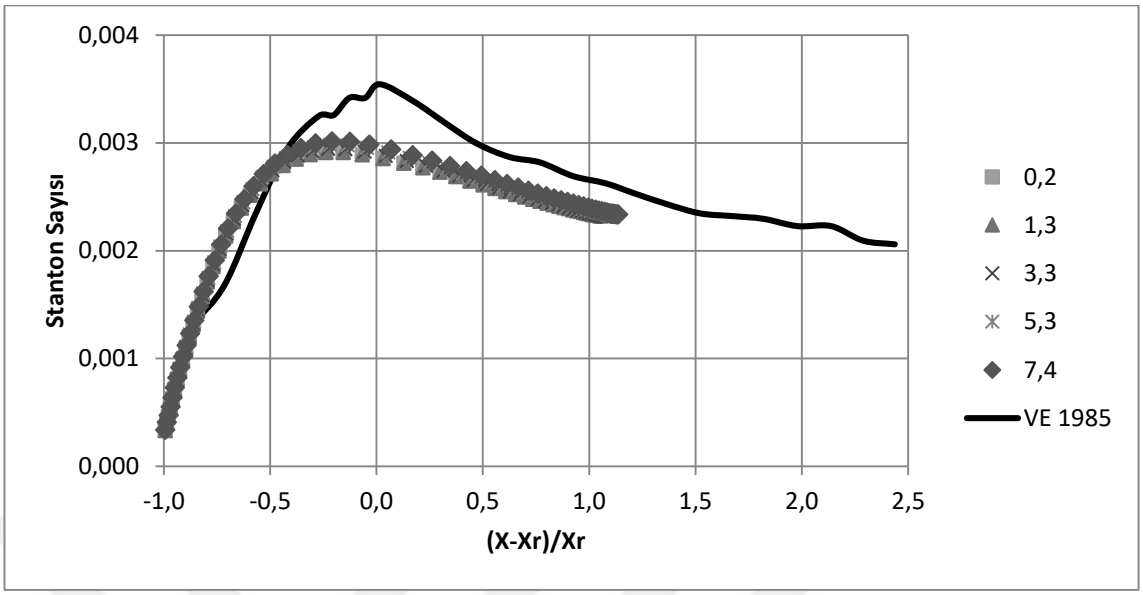
Çizelge 4.5'te VE4 olarak belirlenen dördüncü grupta, Şekil 3.13'te belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,25 olduğu geometri için kanal çıkışında büyük bir genişlemenin olmadığı durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.104 – 4.108'te gösterilmiştir.



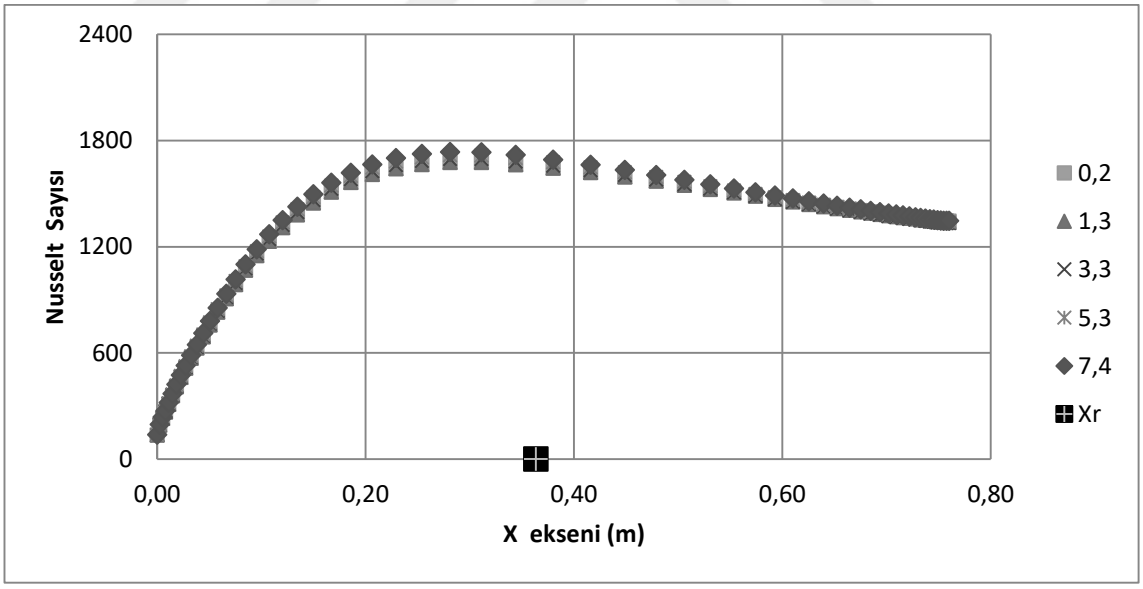
Şekil 4.104. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE4)



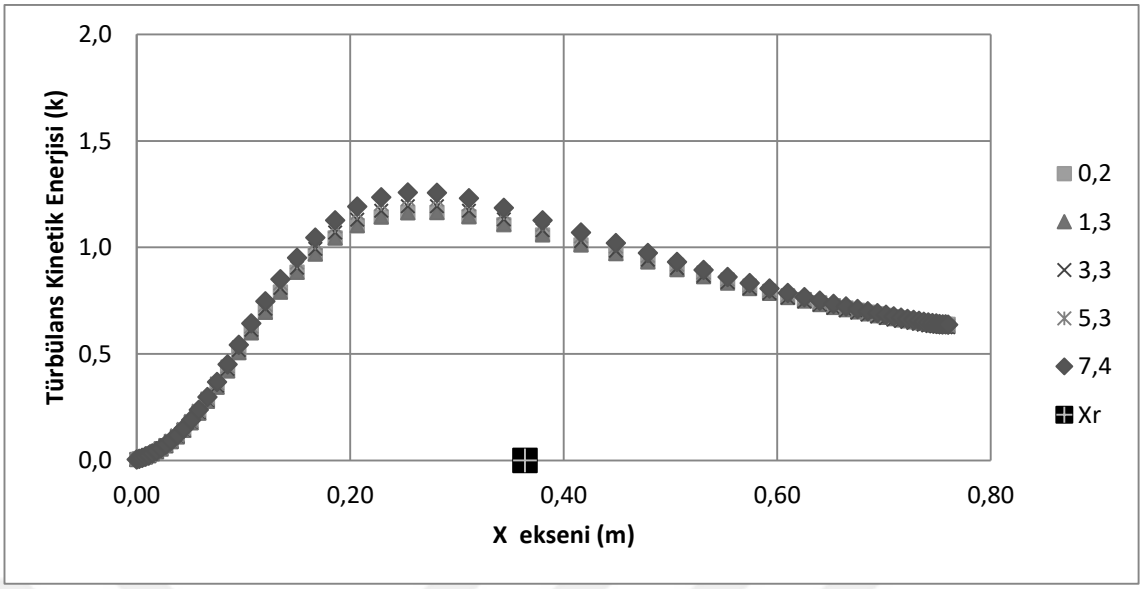
Şekil 4.105. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE4)



Şekil 4.106. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE4)



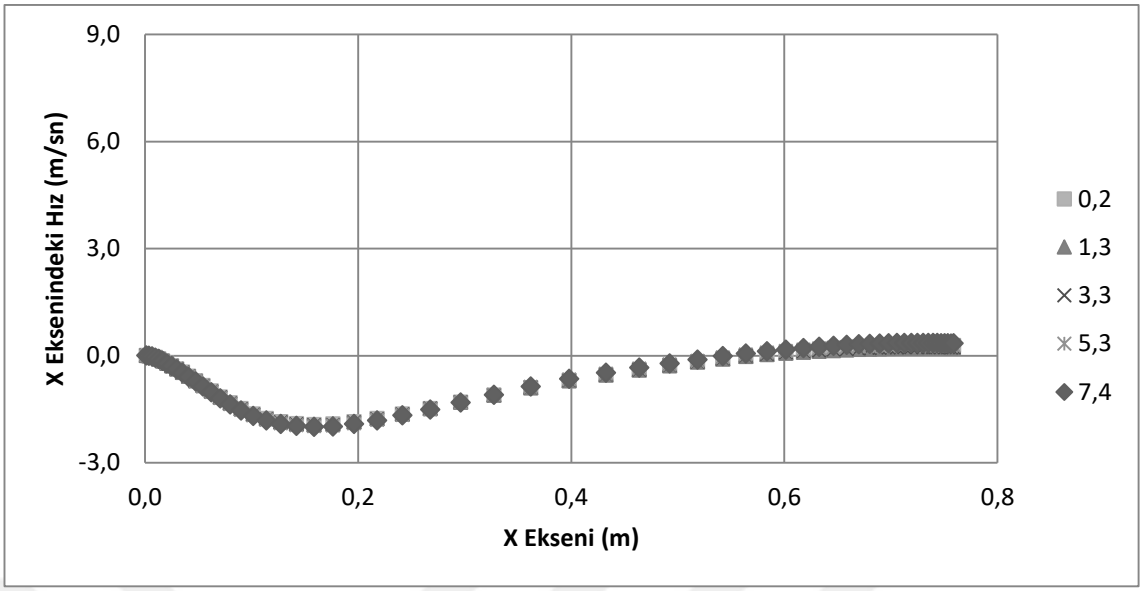
Şekil 4.107. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE4)



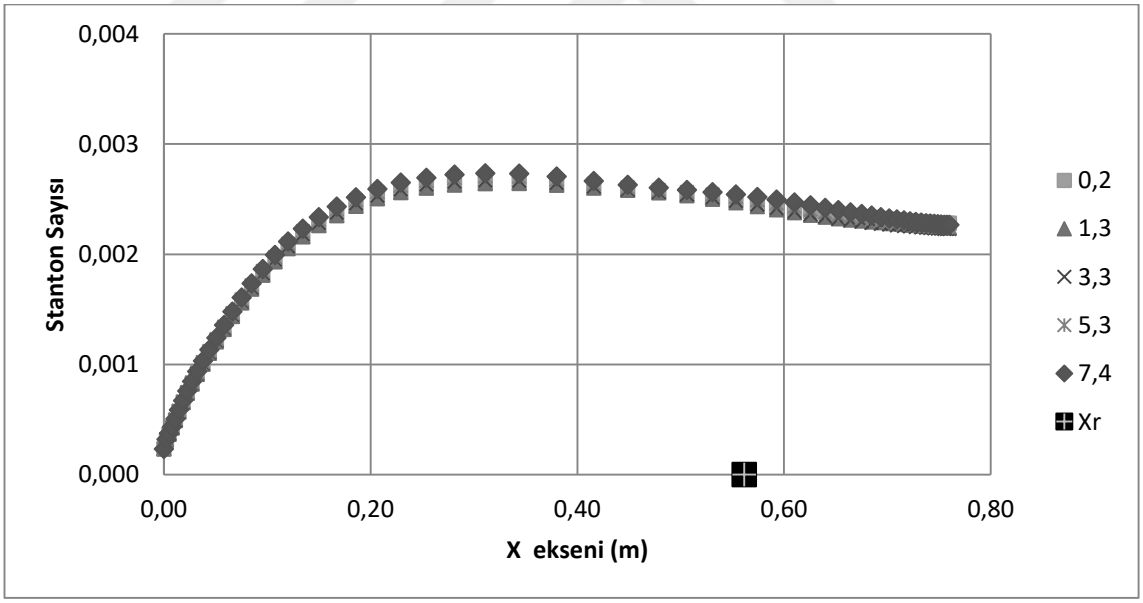
Şekil 4.108. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE4)

VE4 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.106'da belirtilen deneysel sonuçlara göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme etkileşimi, yeniden birleşme noktasının artmasına bağlı olarak şekilsel benzerlikten uzaklaşmakta, fakat benzer yaklaşım sergilemeye devam etmektedir..

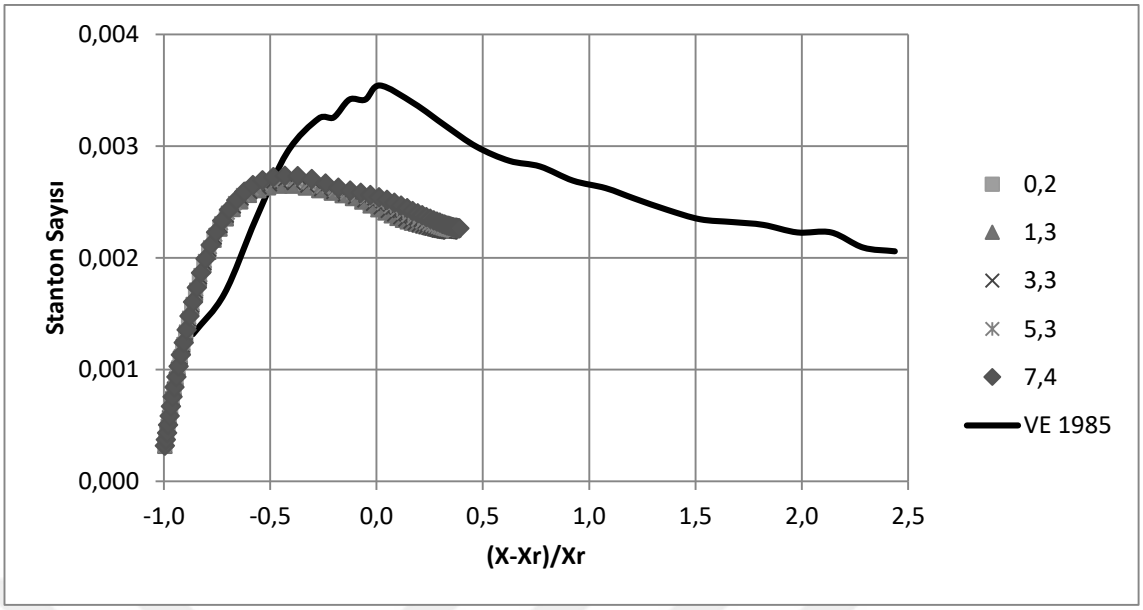
Çizelge 4.5'te VE5 olarak belirlenen beşinci grupta, Şekil 3.14'te belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,25 olduğu geometri için kanal çıkışında daha büyük bir genişlemenin olmadığı durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.109 – 4.113'te gösterilmiştir.



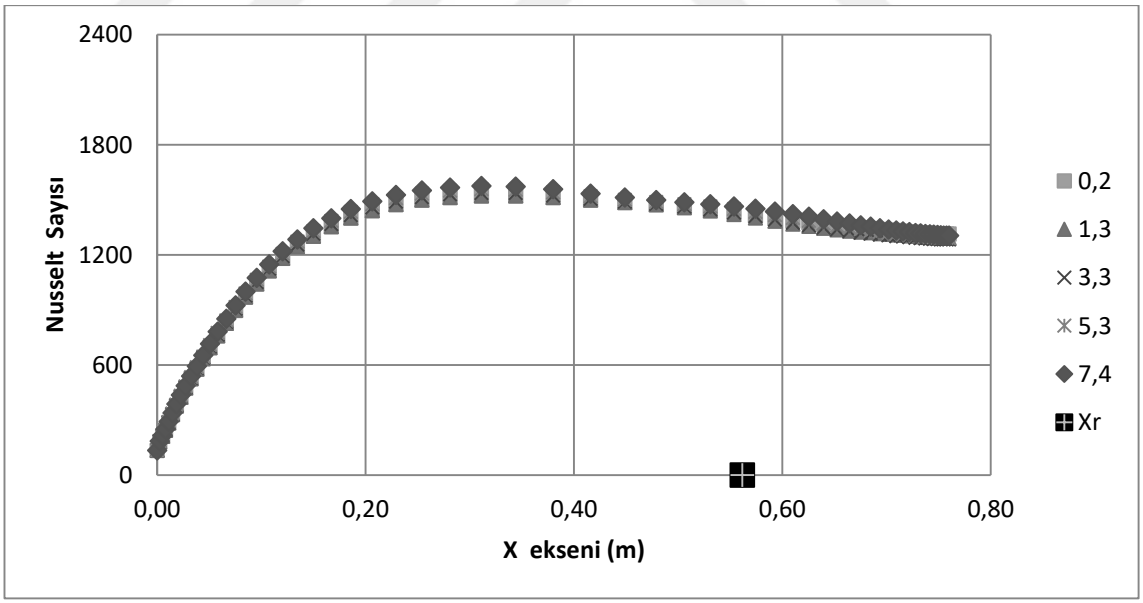
Şekil 4.109. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (VE5)



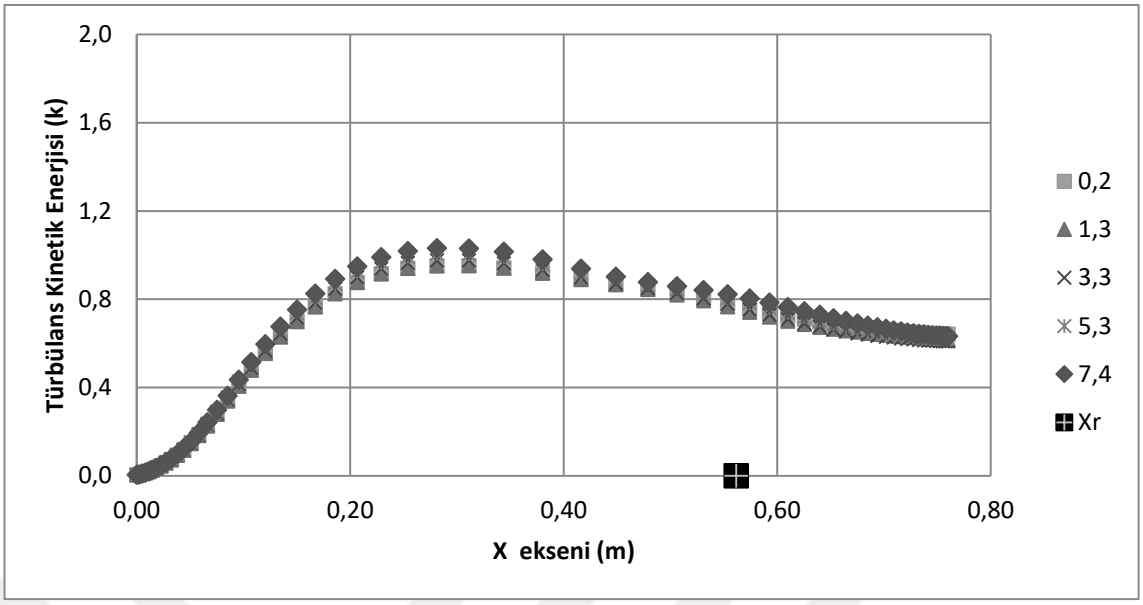
Şekil 4.110. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE5)



Şekil 4.111. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE5)



Şekil 4.112. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (VE5)



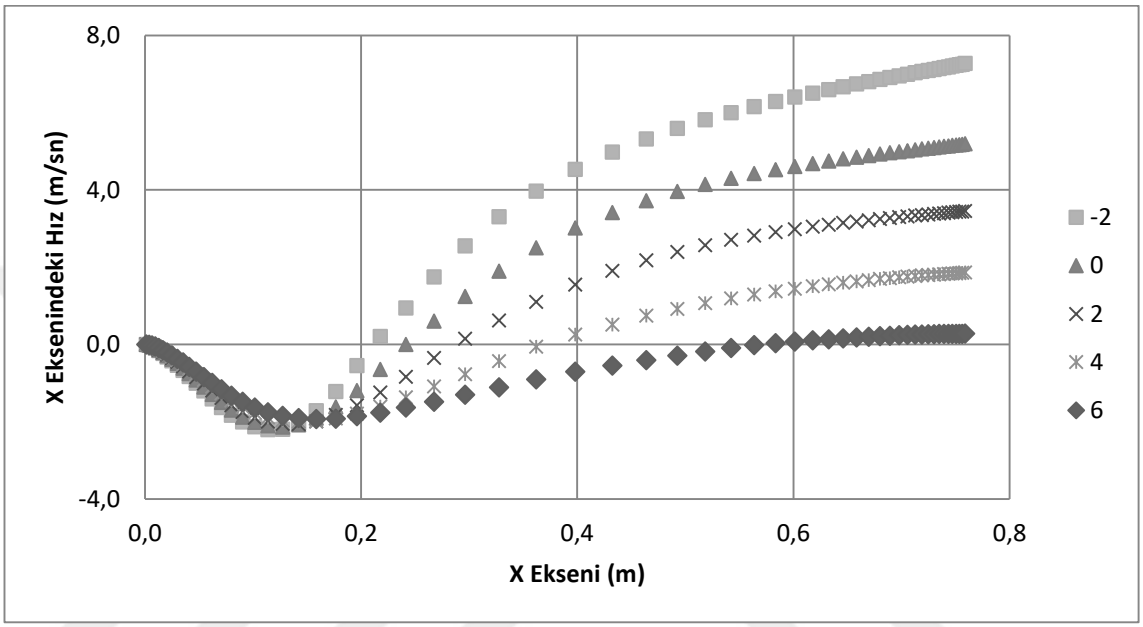
Şekil 4.113. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (VE5)

VE5 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde daha önceki grup sonuçlarına benzer şekilde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.111'de belirtilen deneysel sonuçlardan oldukça uzaklaşılmaktadır.

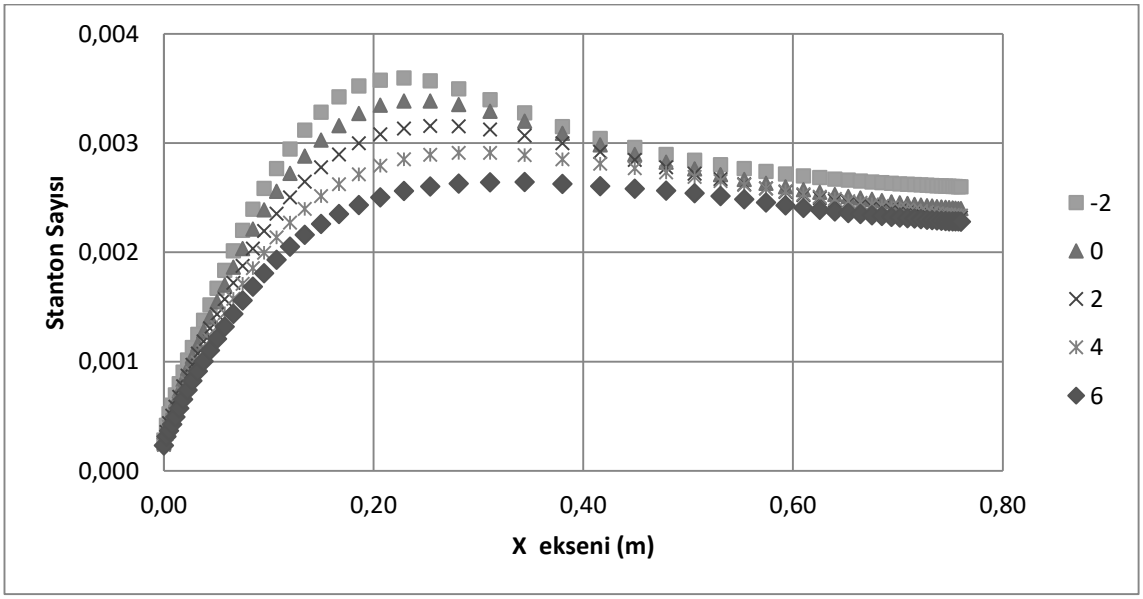
Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi üzerinde yapılan analizler sonrasında beş farklı geometride basınç gradyeni değişimine bağlı olmaksızın türbülans seviyesindeki değişikliklerin ısı ve akış transferi karakteristikleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Buna göre aynı geometride türbülans seviyesi arttıkça yeniden birleşme noktası basamağa doğru yaklaşmakta ve geri dönme bölgesi küçülmekte; ortalama ve maksimum Stanton ve Nusselt sayıları yükselmektedir. Türbülans kinetik enerjisi ise türbülans seviyesinin artmasıyla doğru orantılı bir yaklaşım sergilemektedir.

Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi kullanılarak elde edilen sonuçlar üzerinde yapılan bir diğer değerlendirme de aynı türbülans seviyesi için farklı basınç gradyenlerinde akış ve ısı transferi karakteristiklerinin incelenmesi olmuştur. Buna göre Çizelge 4.5'te belirtilen beş farklı türbülans seviyesinin her biri için beş farklı basınç

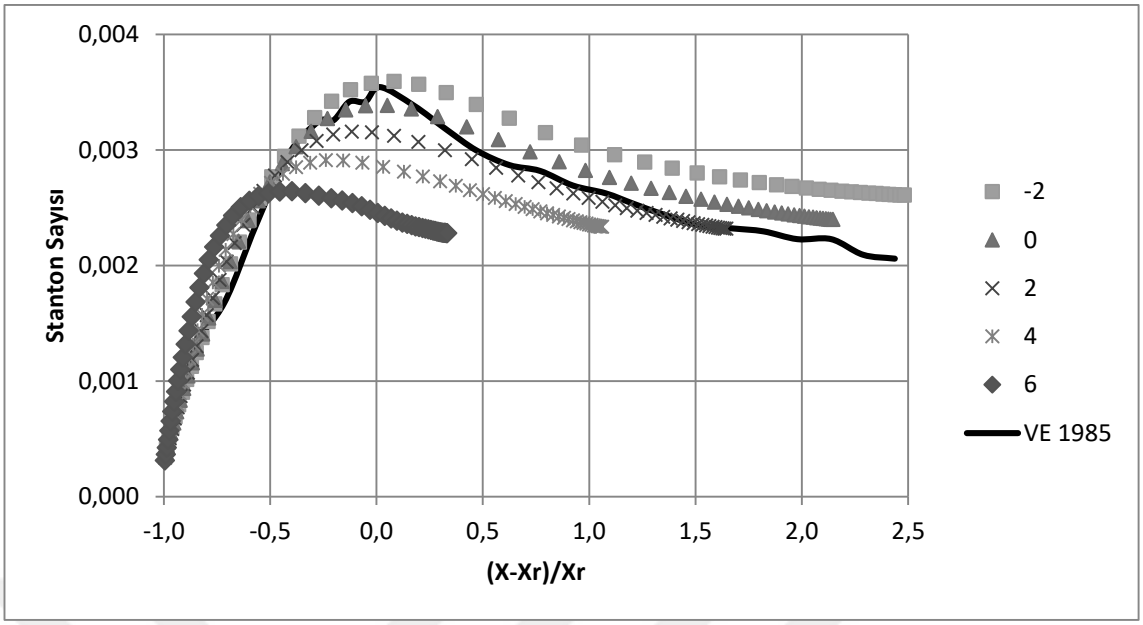
gradyeninin sonuçları bir arada değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda türbülans seviyesi % 0,2 için sonuçlar Şekil 4.114 – 4.118'de; türbülans seviyesi % 1,3 için sonuçlar Şekil 4.119 – 4.123'te; türbülans seviyesi % 3,3 için sonuçlar Şekil 4.124 – 4.128' de; türbülans seviyesi % 5 için sonuçlar Şekil 4.129 – 4.133'te ve türbülans seviyesi % 7,4 için sonuçlar ise Şekil 4.134 – 4.138' de gösterilmiştir



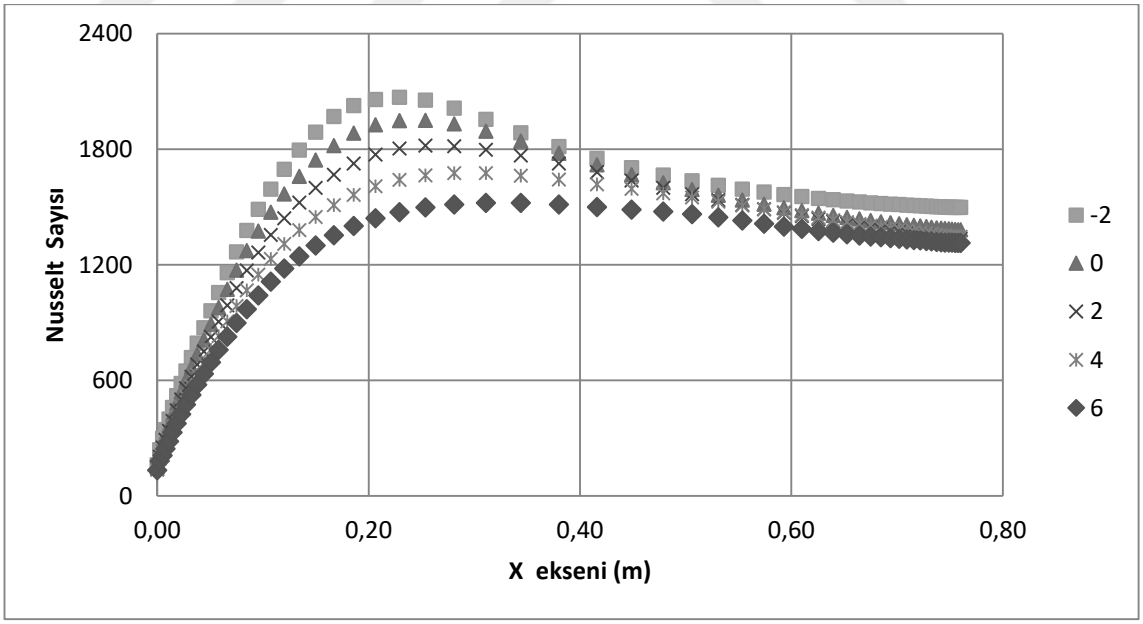
Şekil 4.114. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE)



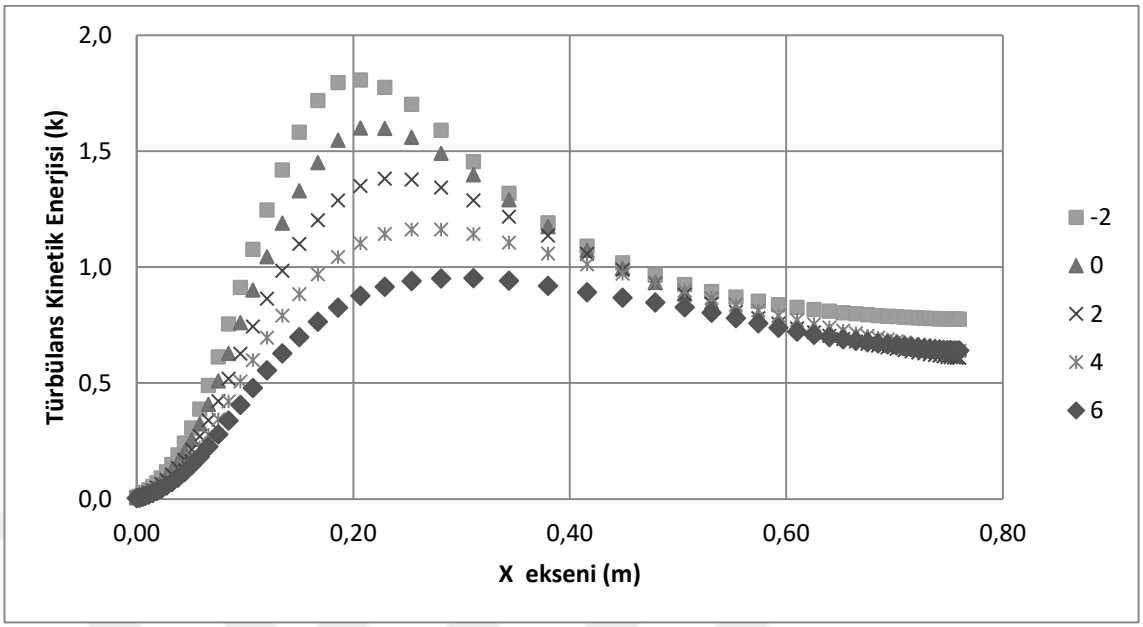
Şekil 4.115. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE)



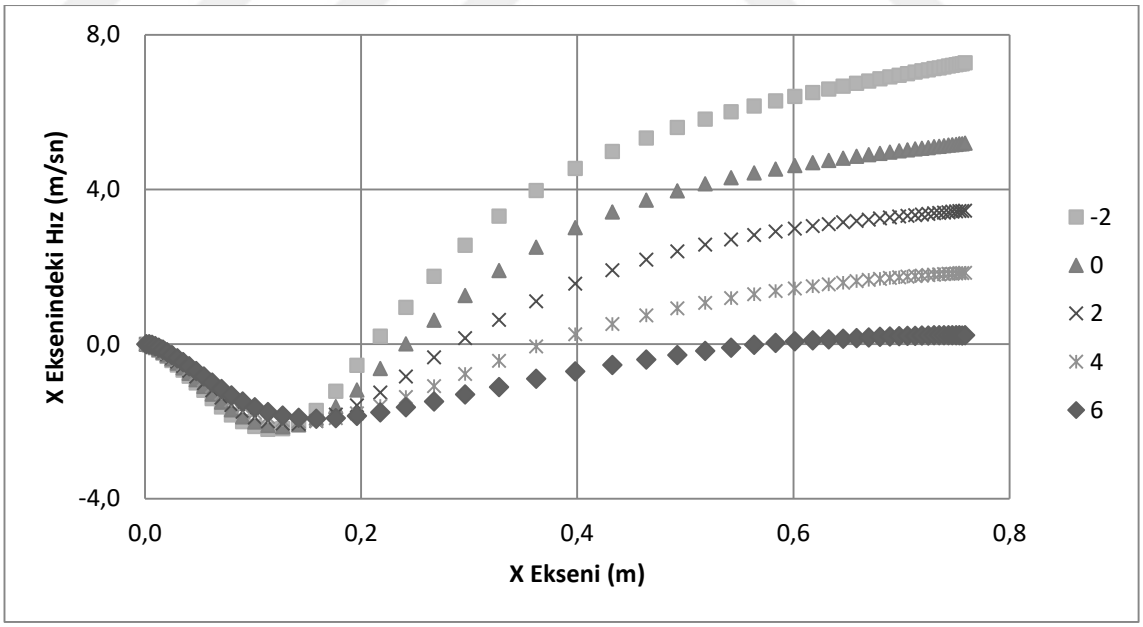
Şekil 4.116. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE)



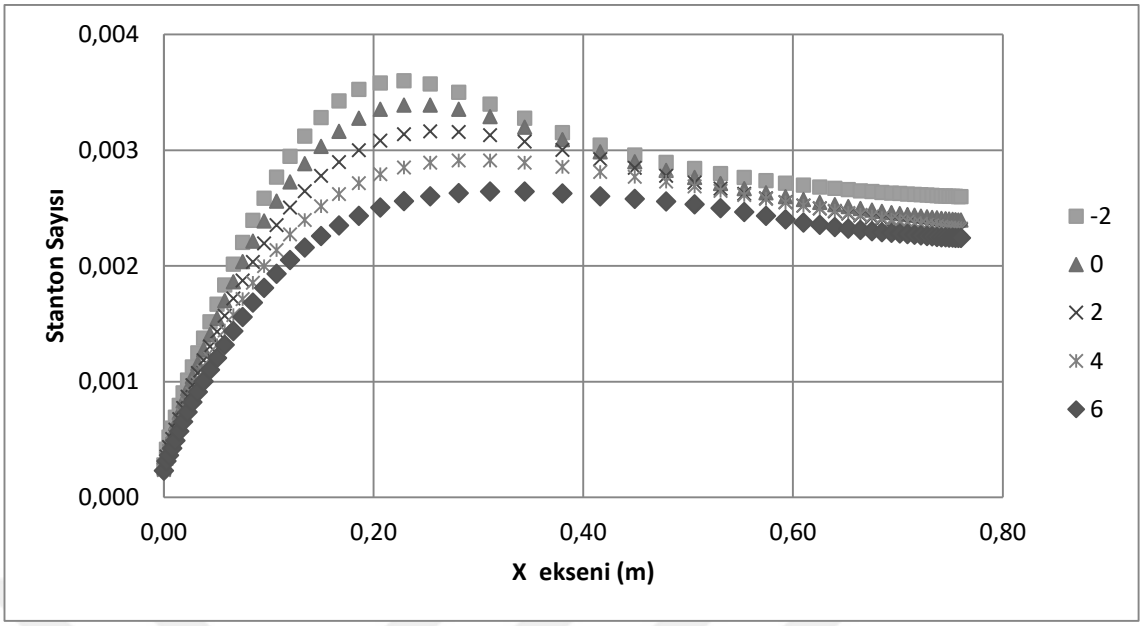
Şekil 4.117. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE)



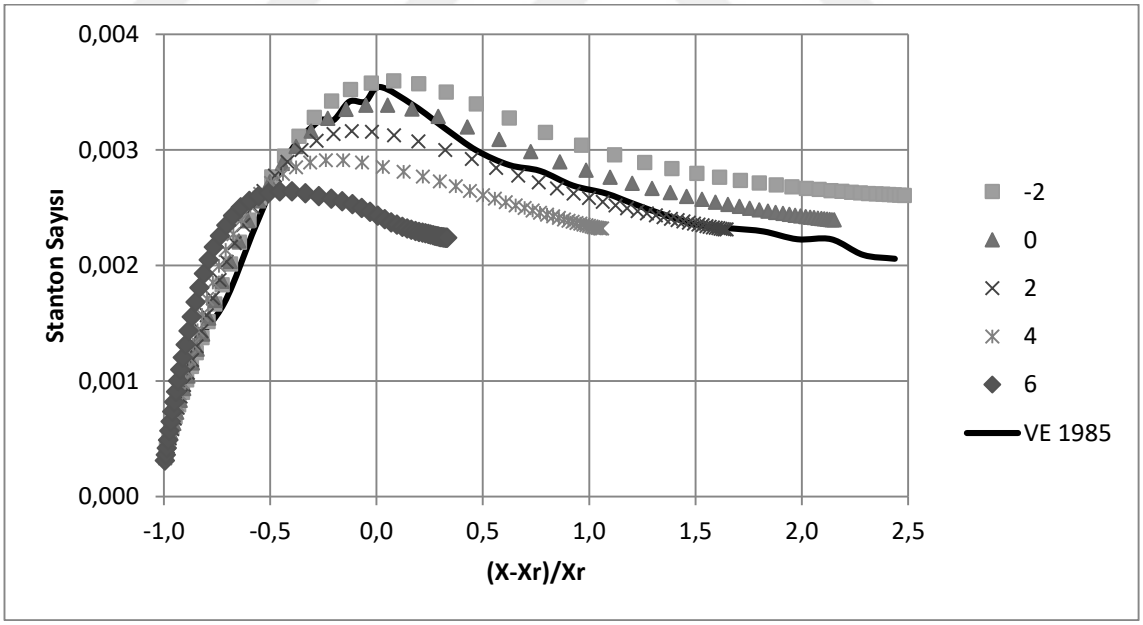
Şekil 4.118. % 0,2 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE)



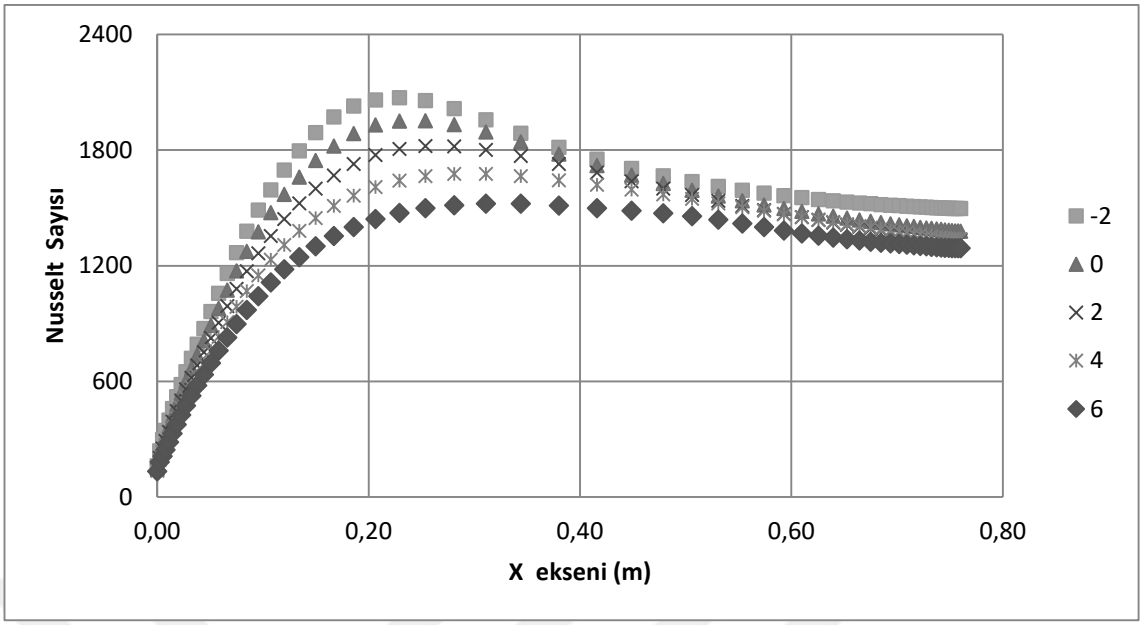
Şekil 4.119. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE)



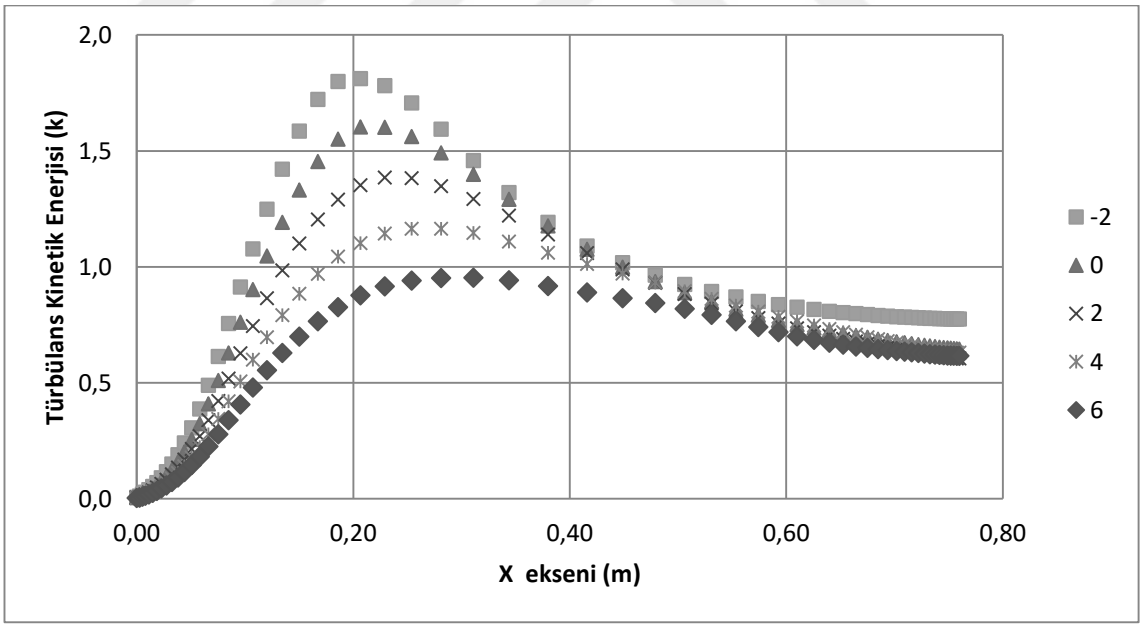
Şekil 4.120. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE)



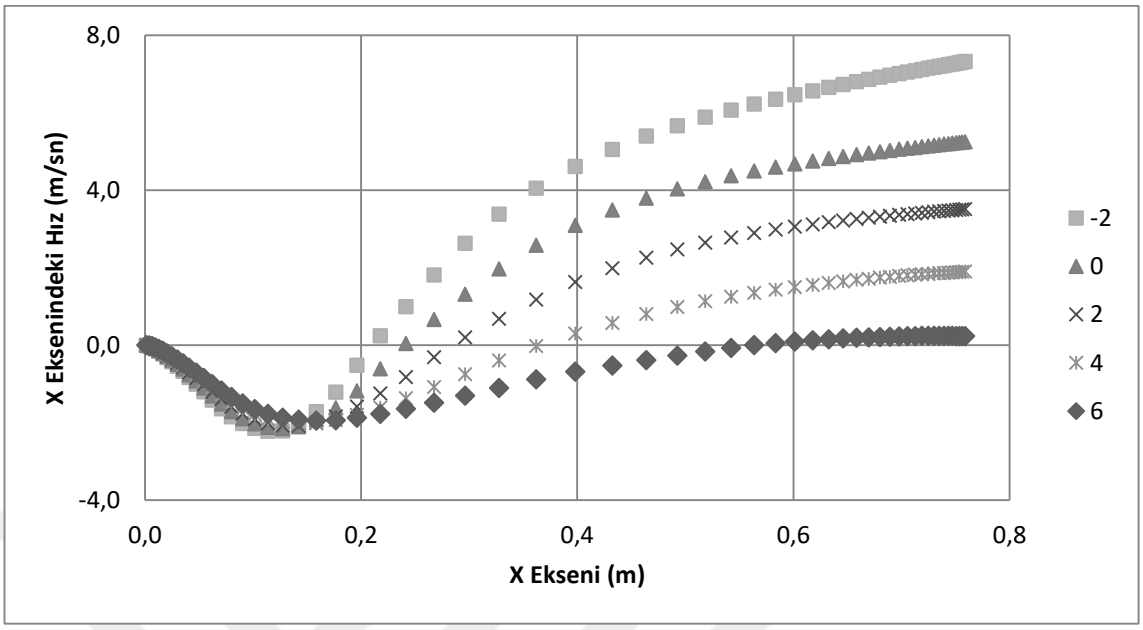
Şekil 4.121. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE)



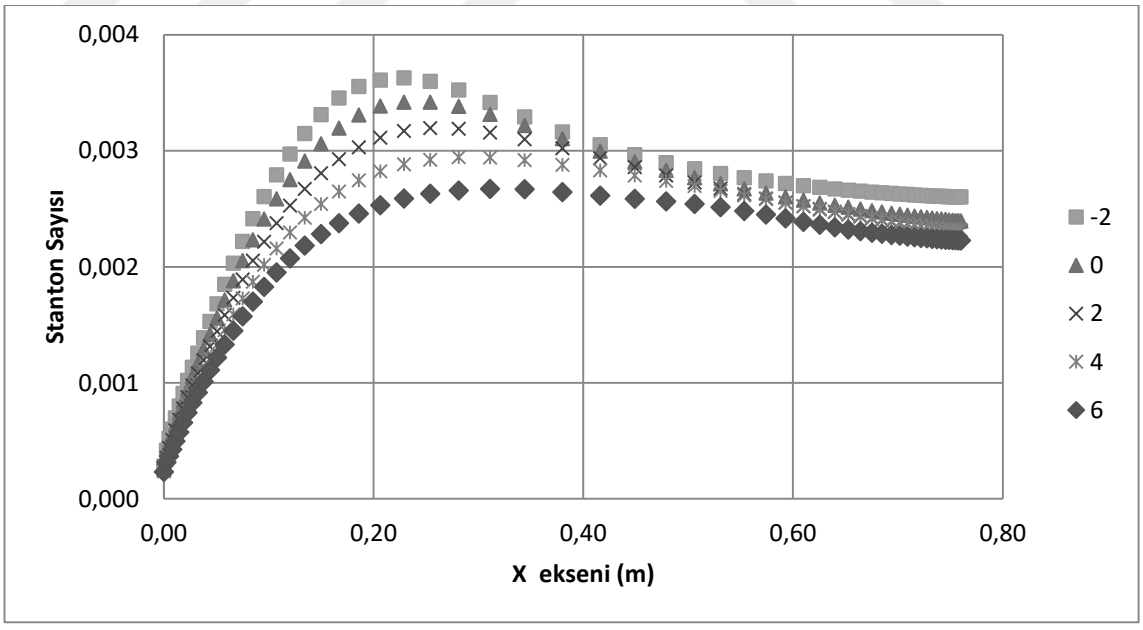
Şekil 4.122. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE)



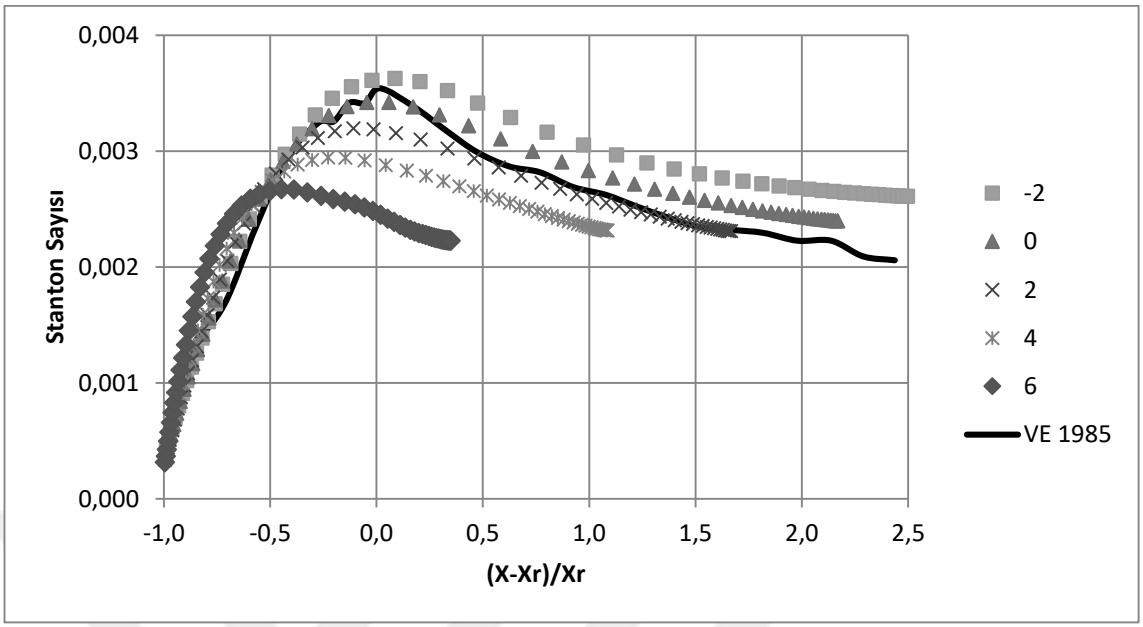
Şekil 4.123. % 1,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE)



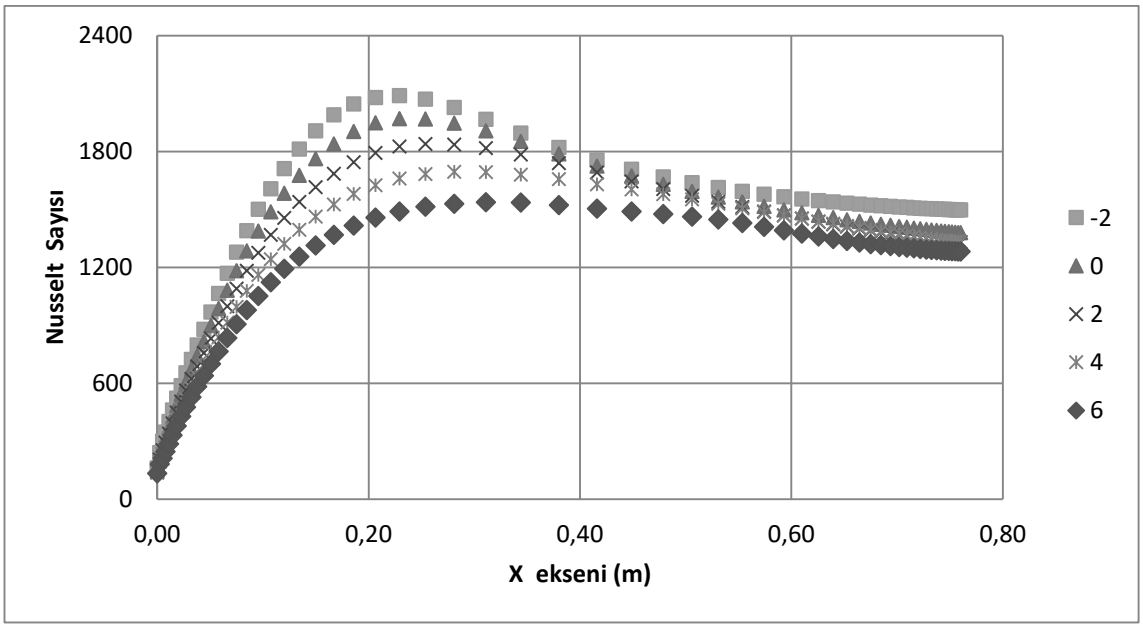
Şekil 4.124. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE)



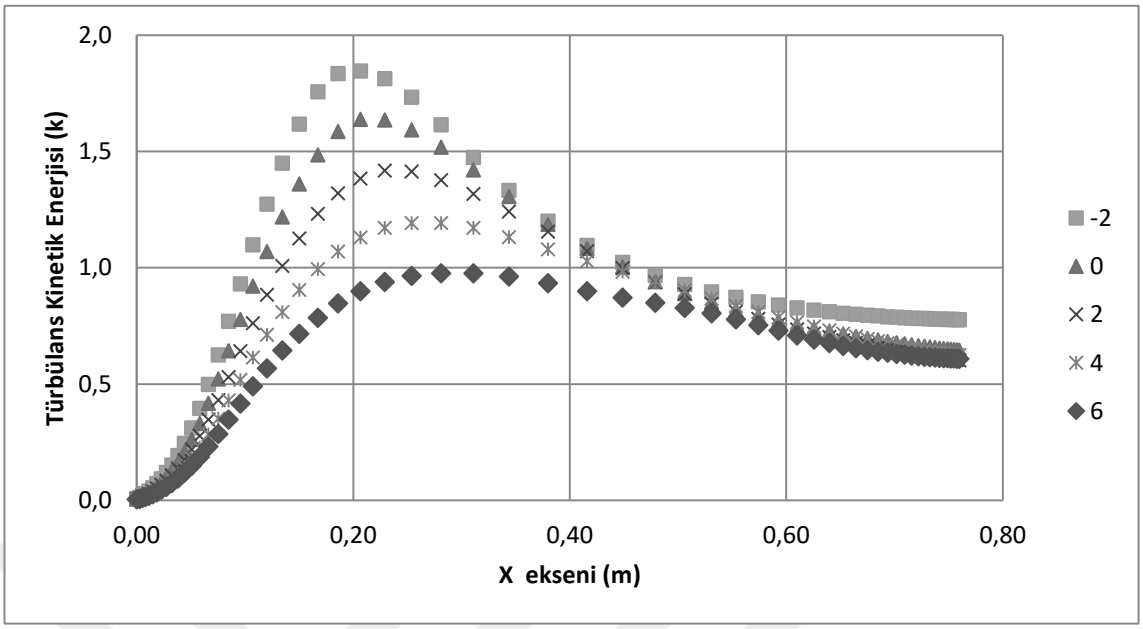
Şekil 4.125. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE)



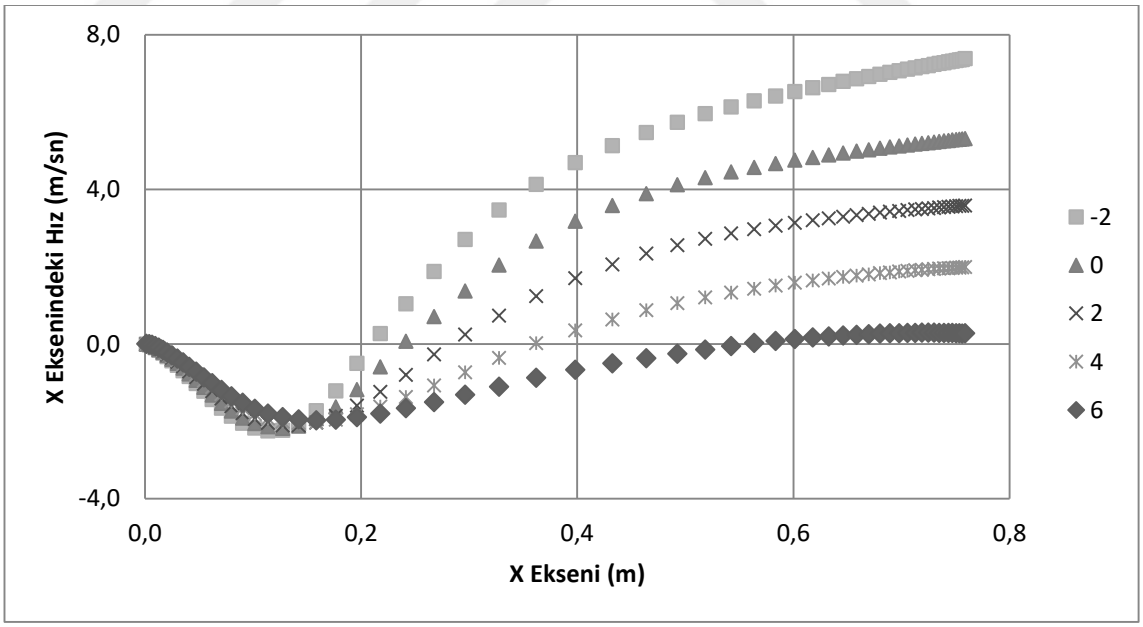
Şekil 4.126. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE)



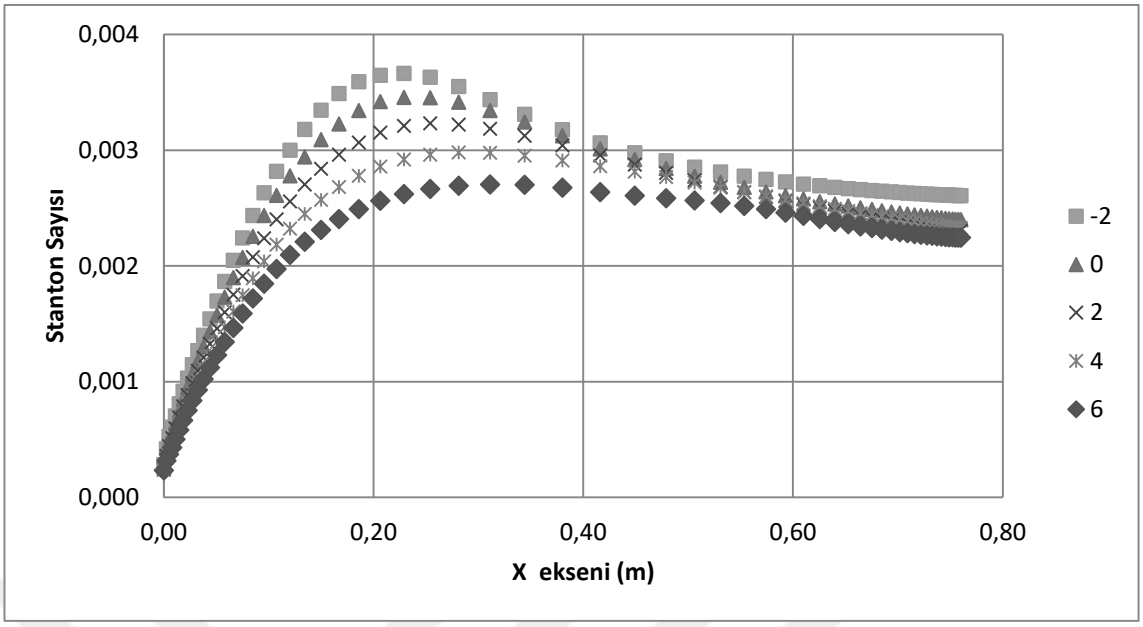
Şekil 4.127. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE)



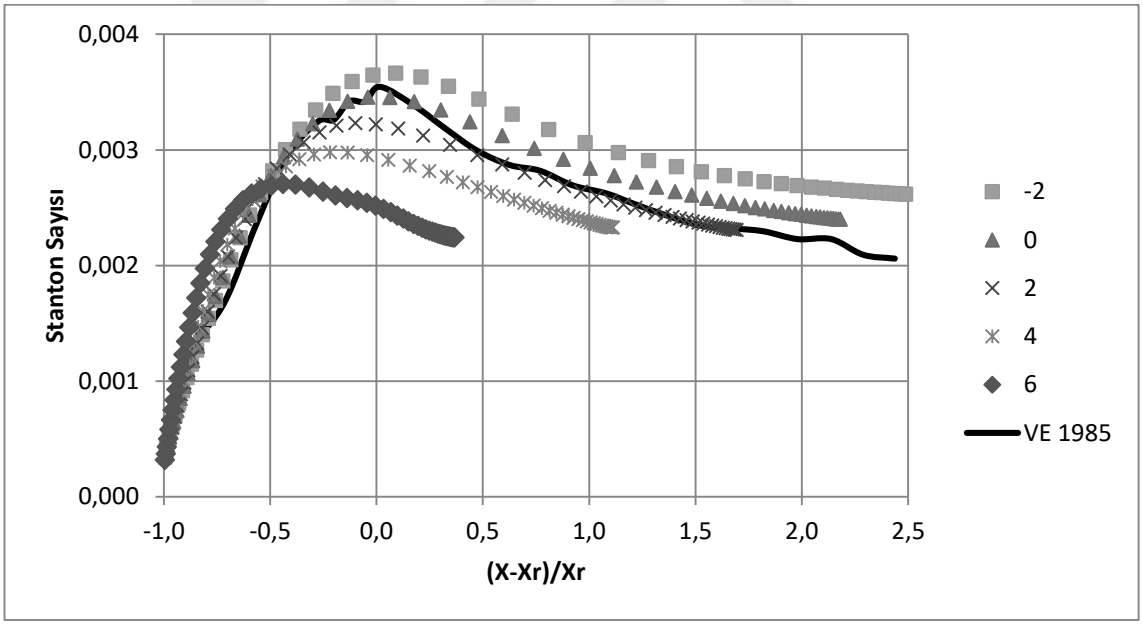
Şekil 4.128. %3,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE)



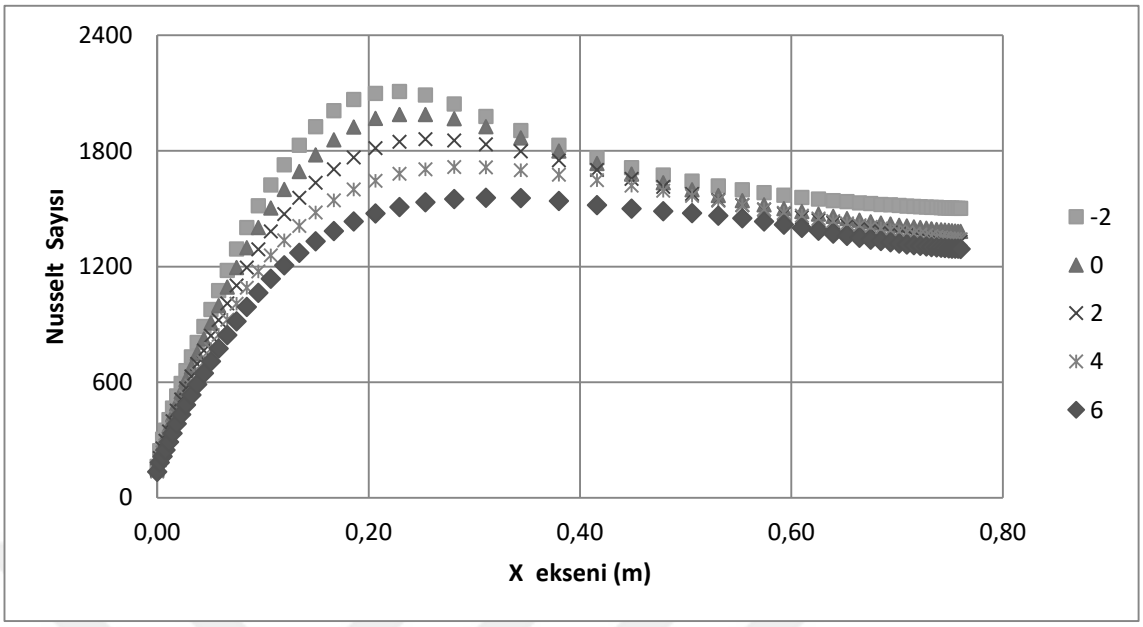
Şekil 4.129. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE)



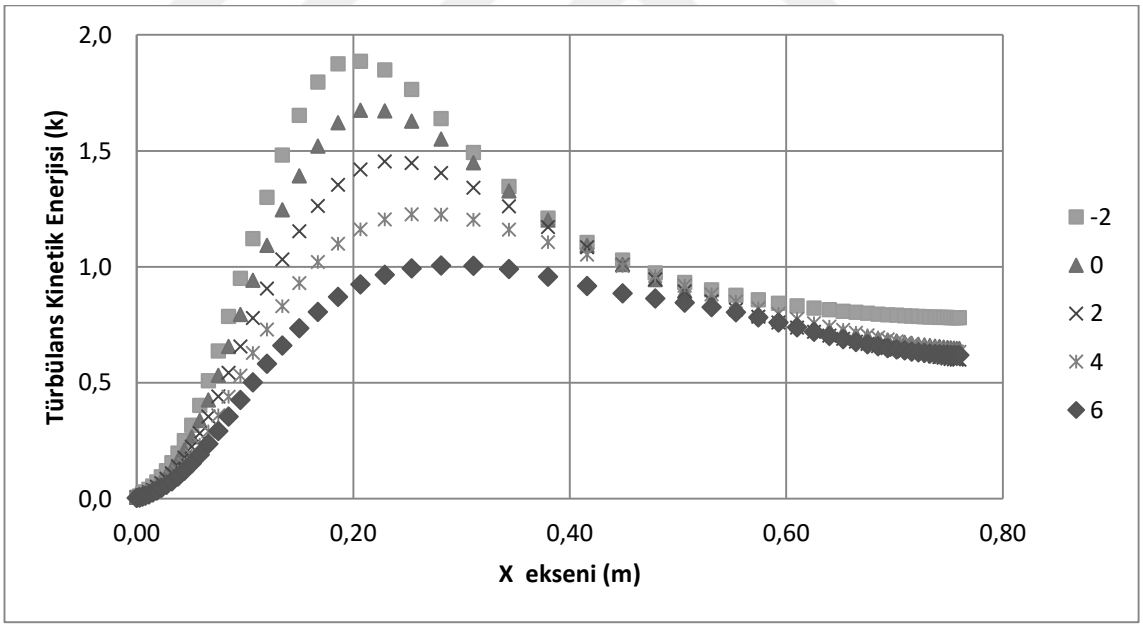
Şekil 4.130. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE)



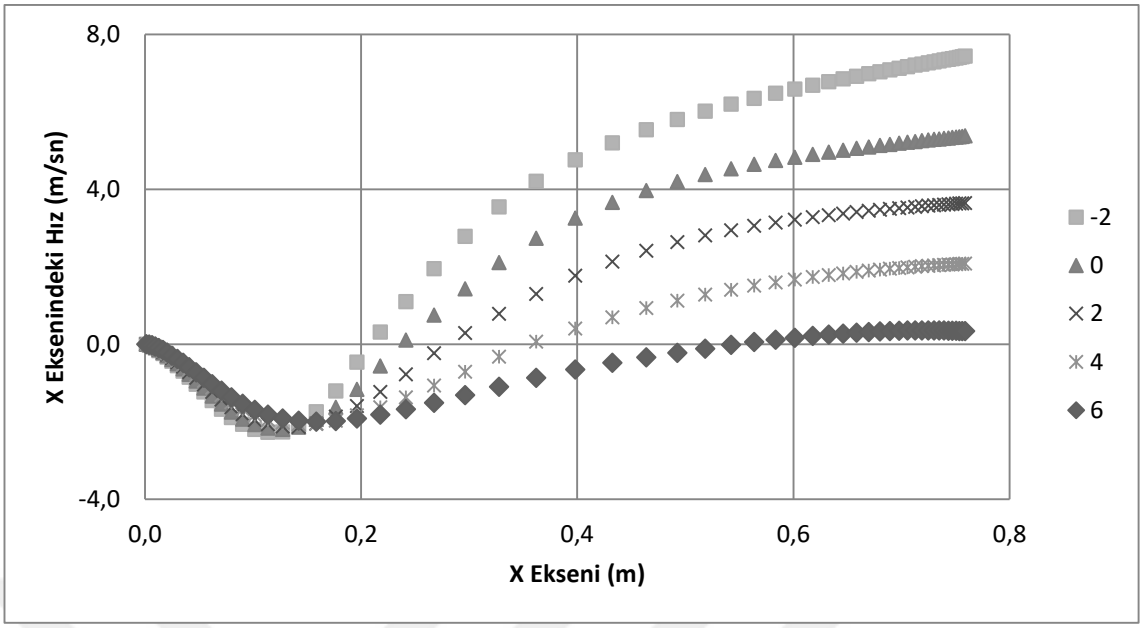
Şekil 4.131. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE)



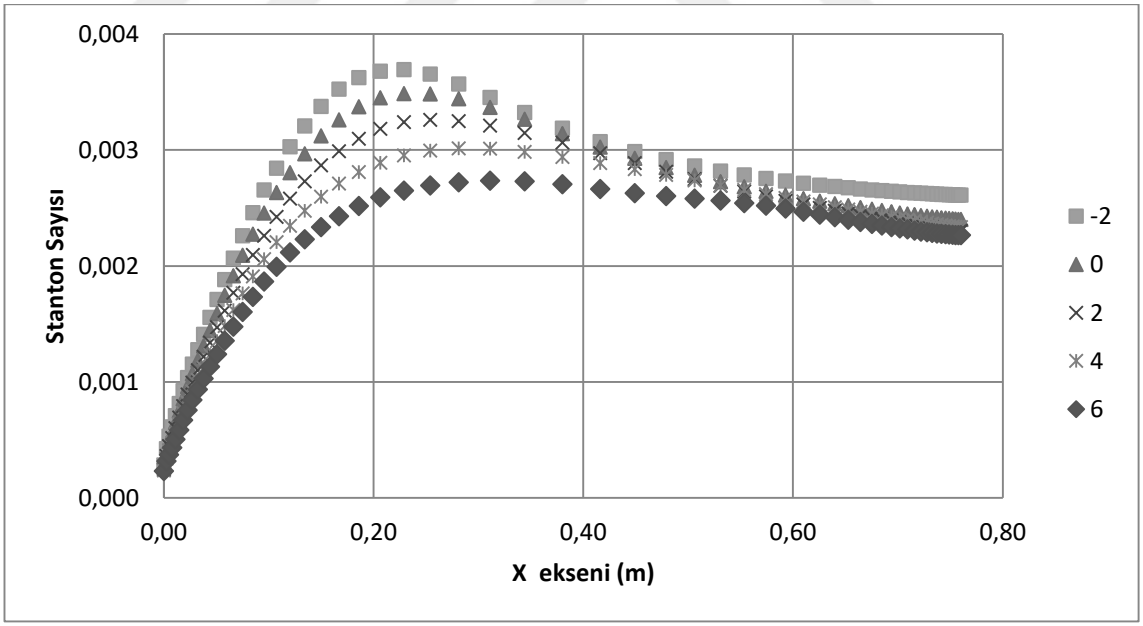
Şekil 4.132. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE)



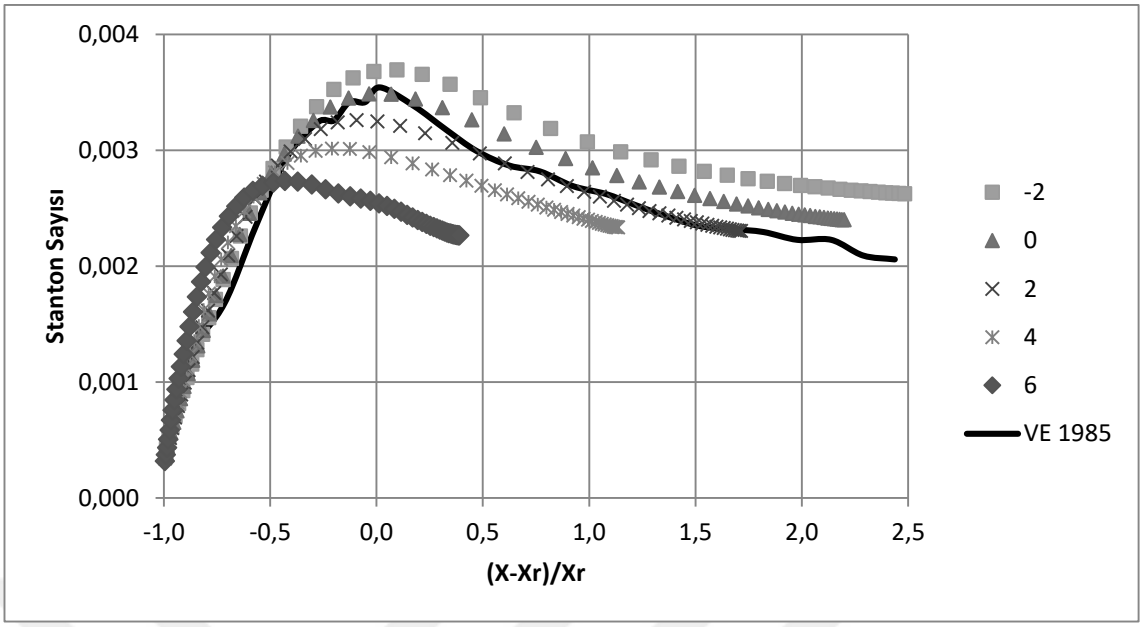
Şekil 4.133. % 5,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE)



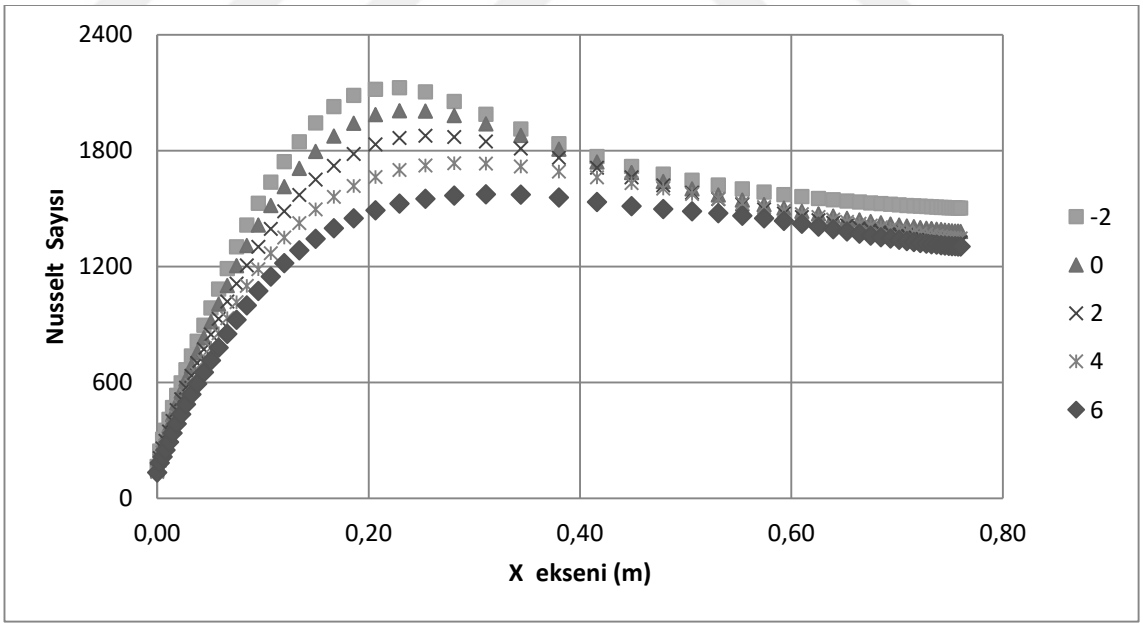
Şekil 4.134. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (VE)



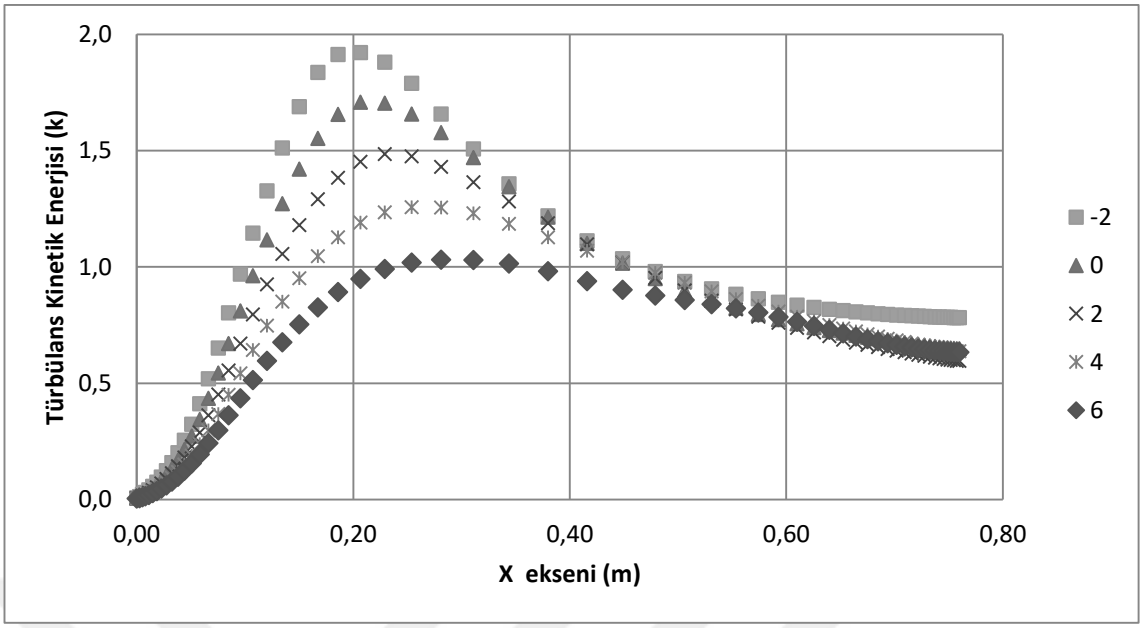
Şekil 4.135. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (VE)



Şekil 4.136. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (VE)



Şekil 4.137. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (VE)



Şekil 4.138. % 7,4 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (VE)

Yapılan analizler sonucunda basınç gradyeninde yaşanan değişikliklerin aynı şartlar altında akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde de değişiklere neden olduğu sonucuna varılmıştır. Bu değişiklikler ise türbülans seviyesindeki değişiklikler gibi minimal boyutta gerçekleşmemiş, aksine daha belirgin bir şekilde meydana gelmiştir. Buna göre basınç gradyeni arttıkça yeniden birleşme noktası basamaktan uzaklaşmakta ve geri dönme bölgesi büyümektedir. Ayrıca Stanton sayısı ve Nusselt sayısı büyüklüklerinde de azalma söz konusu olmaktadır. Aynı azalma türbülans kinetik enerjisi ölçümünde de görülmektedir. Dolayısıyla genişleme oranının 1,25 olduğu bu analojide ısı transferini maksimize etmek için türbülans seviyesinin yükseltilmesi ve basınç gradyeninin düşürülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen tüm sayısal veriler ve yeniden birleşme noktasının basamak yüksekliğine bölümü olarak adlandırılan H değeri ise Çizelge 4.6’ da paylaşılmıştır.

Çizelge 4.6. Vogel ve Eaton (1985) geometrisi analojisi simülasyon grupları sayısal verileri

VE1 → Basınç Gradyeni -2º
VE2 → Basınç Gradyeni 0º
VE3 → Basınç Gradyeni 2º
VE4 → Basınç Gradyeni 4º
VE5 → Basınç Gradyeni 6º

Grup	Analiz	Türbülans Seviyesi	Yeniden Birleşme (Xr)	H	Stanton Sayısı (Ort)	Stanton Sayısı (Mak)	Nusselt Sayısı (Ort)	Nusselt Sayısı (Mak)
VE1	a	0,2	0,212	5,57	0,0024	0,0036	1386	2069
	b	1,3	0,212	5,57	0,0024	0,0036	1386	2072
	c	3,3	0,211	5,55	0,0024	0,0036	1392	2089
	d	5,3	0,210	5,53	0,0024	0,0037	1399	2109
	e	7,4	0,209	5,50	0,0024	0,0037	1406	2126
VE2	a	0,2	0,242	6,36	0,0023	0,0034	1304	1949
	b	1,3	0,241	6,35	0,0023	0,0034	1304	1951
	c	3,3	0,240	6,31	0,0023	0,0034	1310	1970
	d	5,3	0,239	6,29	0,0023	0,0035	1316	1989
	e	7,4	0,238	6,25	0,0023	0,0035	1322	2007
VE3	a	0,2	0,287	7,56	0,0022	0,0032	1244	1818
	b	1,3	0,287	7,56	0,0022	0,0032	1243	1821
	c	3,3	0,285	7,50	0,0022	0,0032	1249	1840
	d	5,3	0,282	7,43	0,0022	0,0032	1255	1860
	e	7,4	0,280	7,37	0,0022	0,0033	1260	1877
VE4	a	0,2	0,369	9,70	0,0021	0,0029	1199	1676
	b	1,3	0,369	9,71	0,0021	0,0029	1197	1676
	c	3,3	0,364	9,59	0,0021	0,0029	1202	1695
	d	5,3	0,360	9,47	0,0021	0,0030	1212	1716
	e	7,4	0,356	9,36	0,0021	0,0030	1221	1735
VE5	a	0,2	0,571	15,02	0,0020	0,0026	1125	1521
	b	1,3	0,571	15,02	0,0019	0,0026	1116	1521
	c	3,3	0,563	14,83	0,0019	0,0027	1120	1537
	d	5,3	0,556	14,63	0,0020	0,0027	1132	1557
	e	7,4	0,547	14,39	0,0020	0,0027	1145	1574

4.1.2.3. Isomoto ve Honami (1989) Geometrisi Analojisi

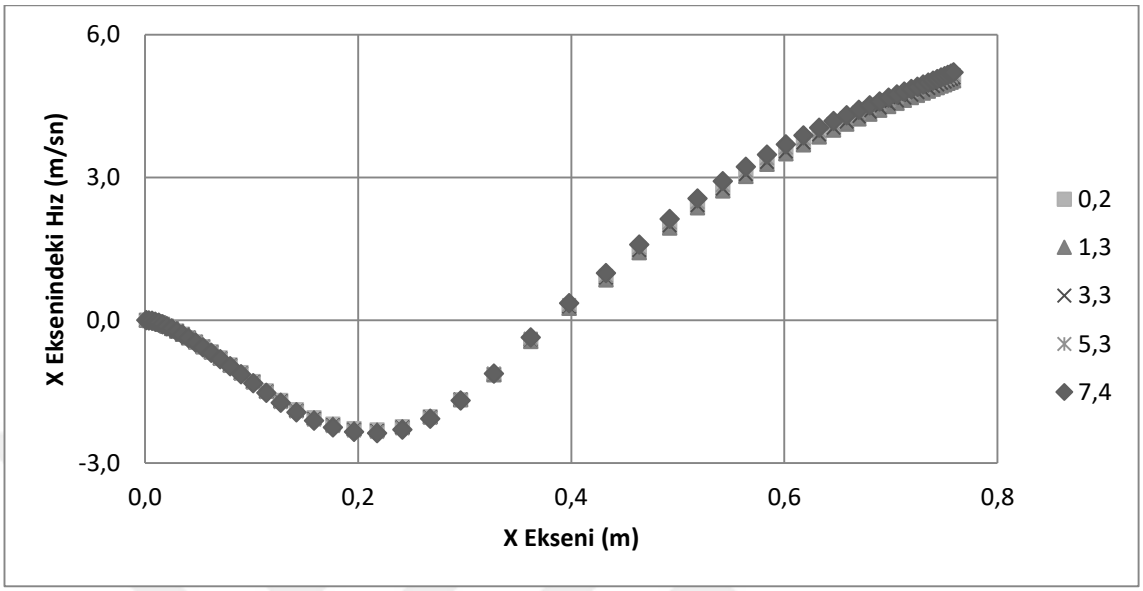
Genişleme oranının 1,43 olarak kullanıldığı bu geometri, Isomoto ve Honami (1989) çalışmasında uygulanan basamak yüksekliği ve Driver ve Seegmiller (1985) çalışmasında uygulanan basınç gradyeni değişimleri Vogel ve Eaton (1985) çalışmasına uyarlanmıştır. Çizelge 3.1'de geometrik boyutları, Şekil 3.15 – 3.19' da geometrileri belirtilen bu analojide Çizelge 3.2.'deki ilgili şartlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Toplam 25 analizin gruplandırılması Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi simülasyon grupları

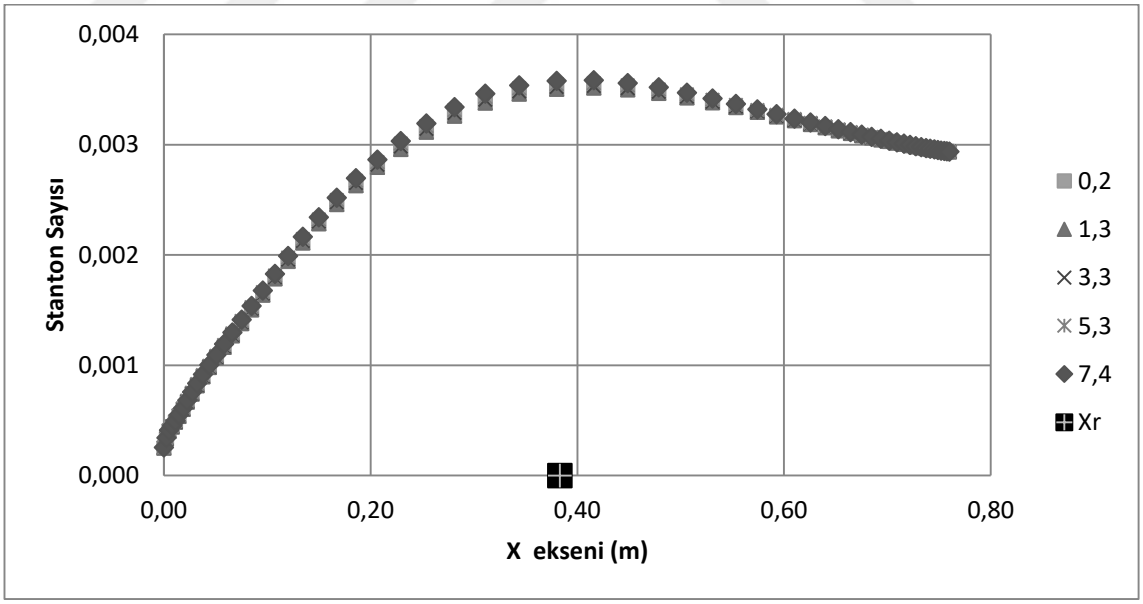
Grup	Analiz	Basınç Gradyeni Değişim Açısı (Derece)	Türbülans Seviyesi (%)
IH1	a	-2	0,2
	b	-2	1,3
	c	-2	3,3
	d	-2	5,3
	e	-2	7,4
IH2	a	0	0,2
	b	0	1,3
	c	0	3,3
	d	0	5,3
	e	0	7,4
IH3	a	2	0,2
	b	2	1,3
	c	2	3,3
	d	2	5,3
	e	2	7,4
IH4	a	4	0,2
	b	4	1,3
	c	4	3,3
	d	4	5,3
	e	4	7,4
IH5	a	6	0,2
	b	6	1,3
	c	6	3,3
	d	6	5,3
	e	6	7,4

Çizelge 4.7'te IH1 olarak belirlenen ilk grupta, Şekil 3.15'te belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,43 olduğu geometri için kanal çıkışında bir daralma olduğu durum

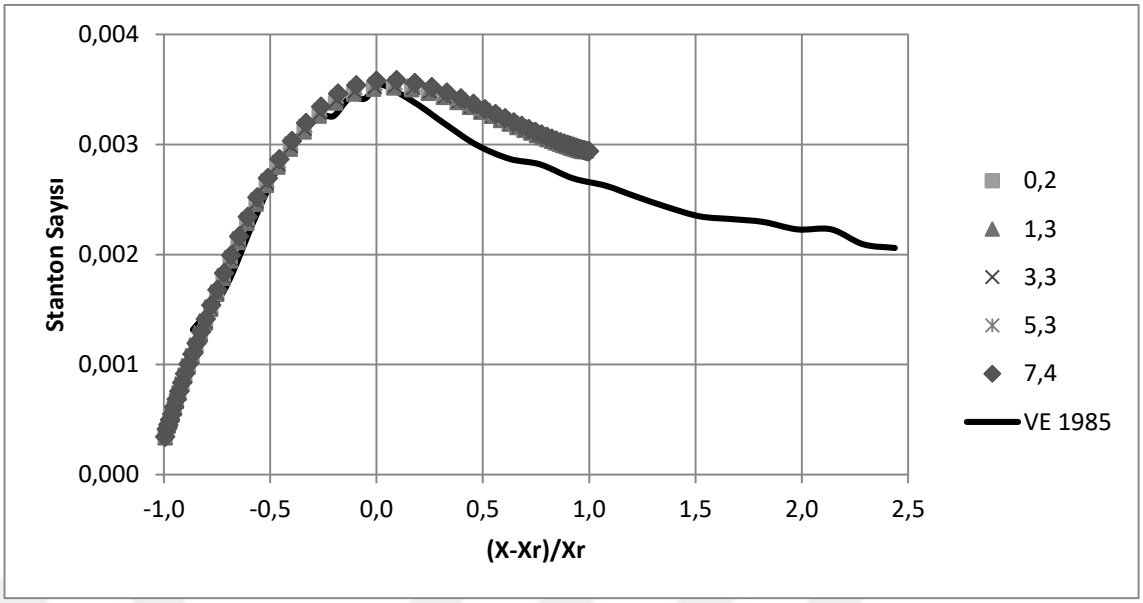
için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.139 – 4.143'te gösterilmiştir.



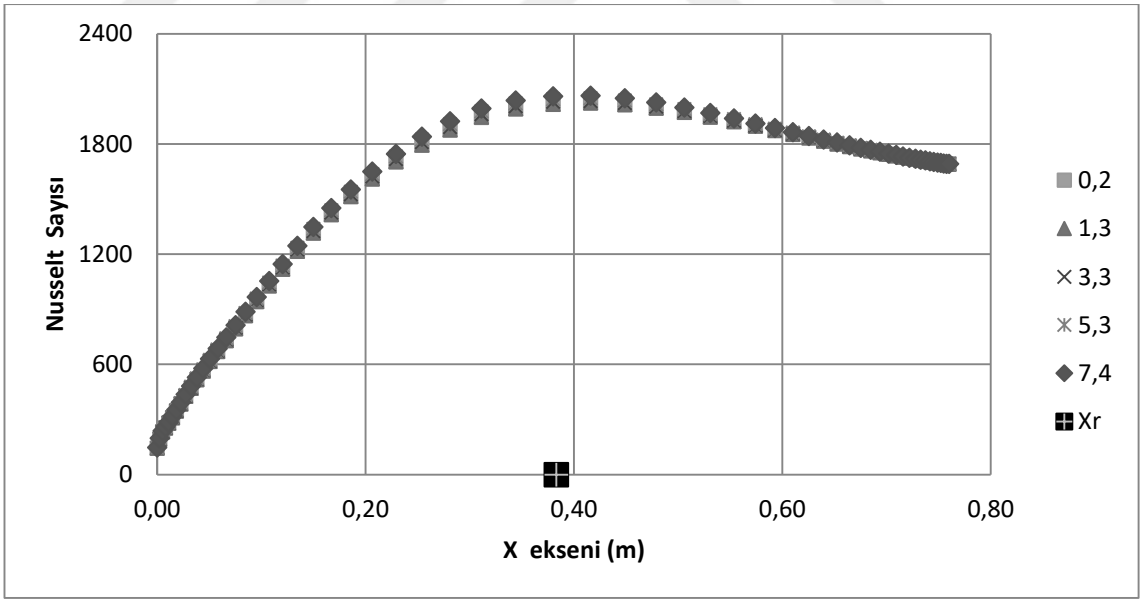
Şekil 4.139. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH1)



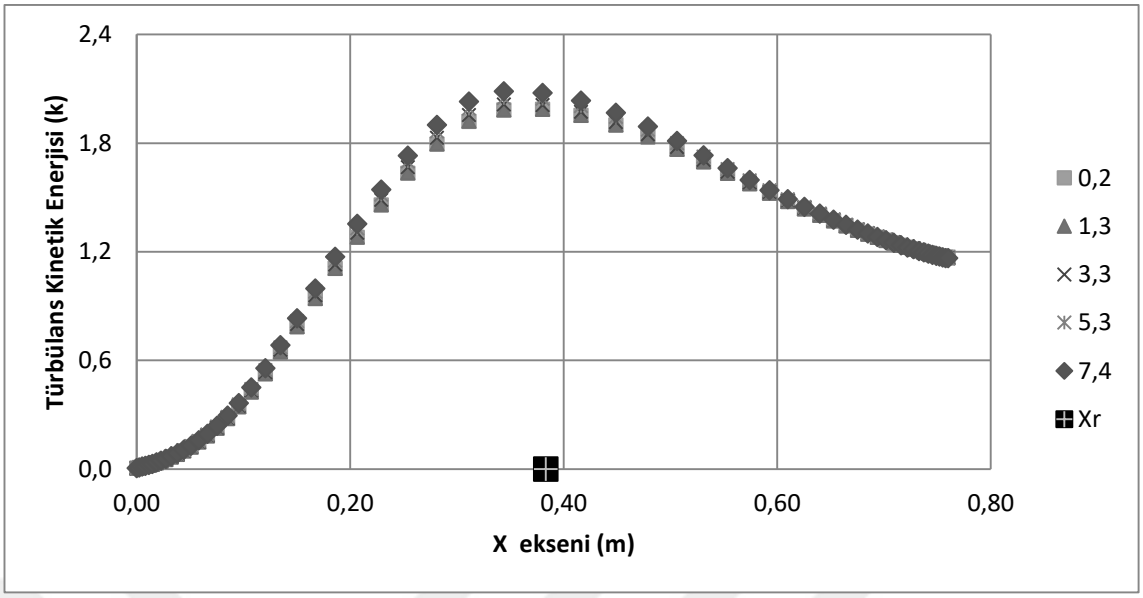
Şekil 4.140. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH1)



Şekil 4.141. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH1)



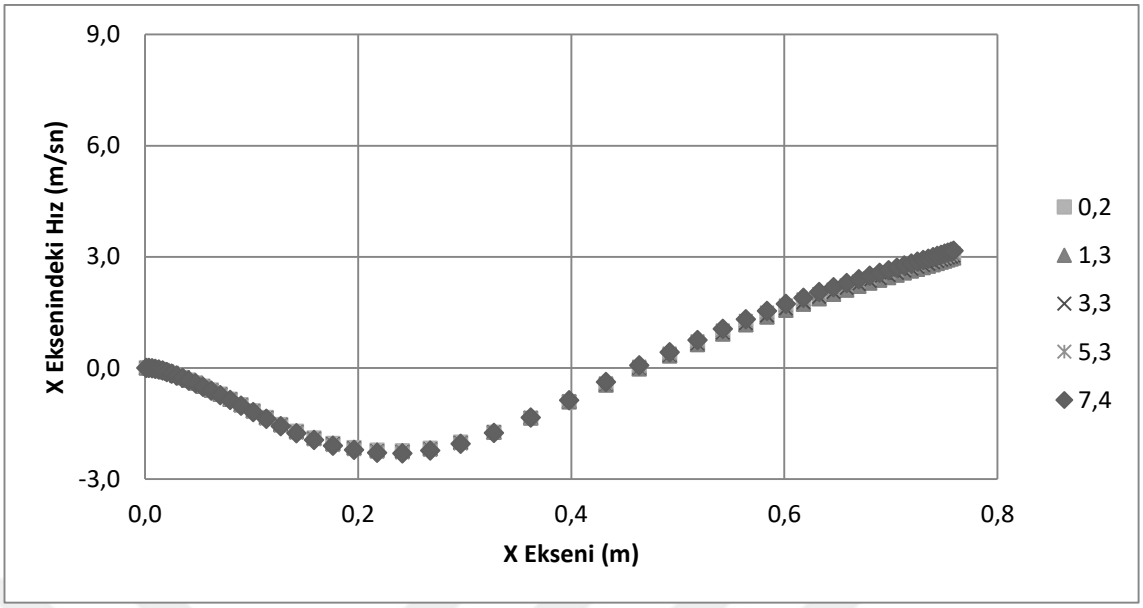
Şekil 4.142. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH1)



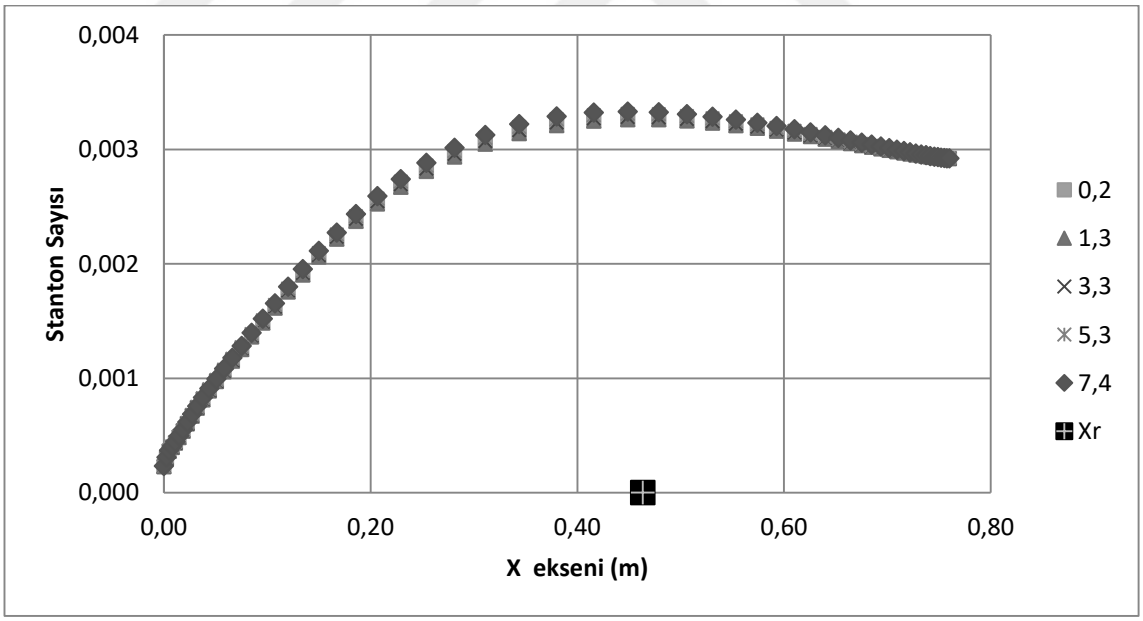
Şekil 4.143. -2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH1)

IH1 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.141'de belirtilen deneysel sonuçlara benzer yaklaşım elde edilmektedir. Fakat yeniden birleşme noktasının büyük olmasından kaynaklı olarak benzerlik bir noktada son bulmaktadır.

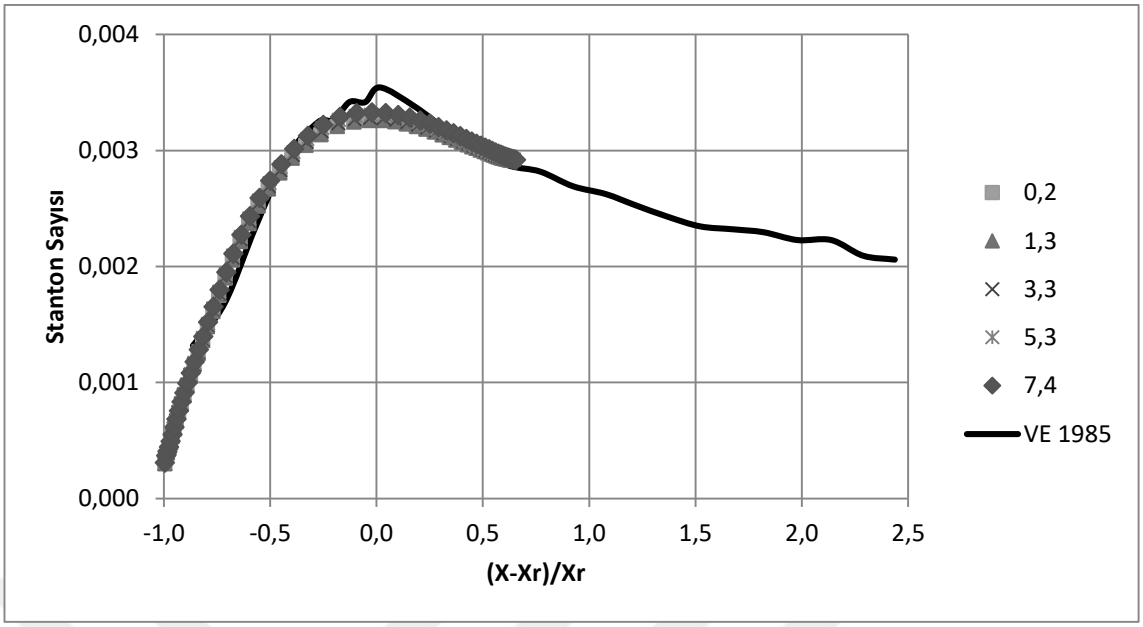
Çizelge 4.7'de IH2 olarak belirlenen ikinci grupta, Şekil 3.16'da belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,43 olduğu geometri için kanal çıkışında bir daralma ya da genişlemenin olmadığı durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.144 – 4.148'te gösterilmiştir.



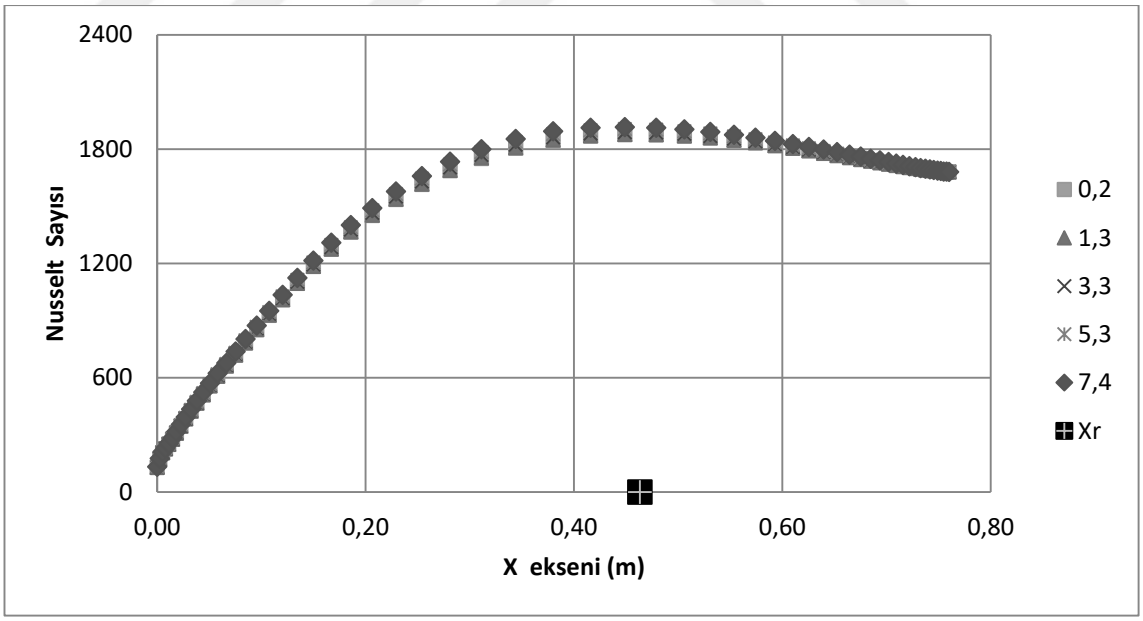
Şekil 4.144. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH2)



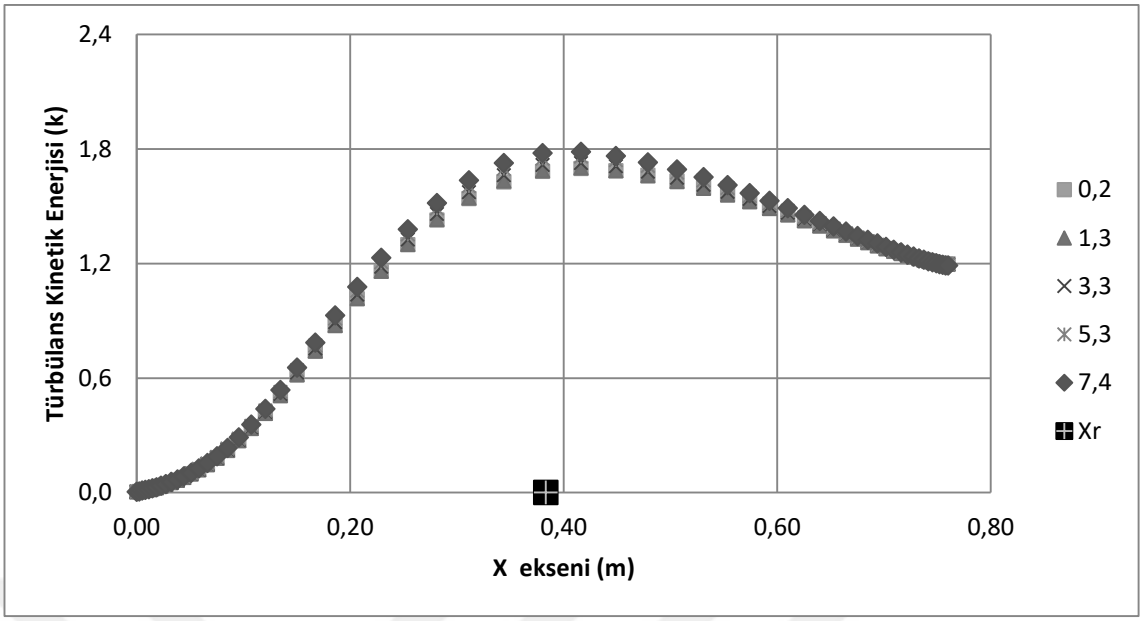
Şekil 4.145. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH2)



Şekil 4.146. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH2)



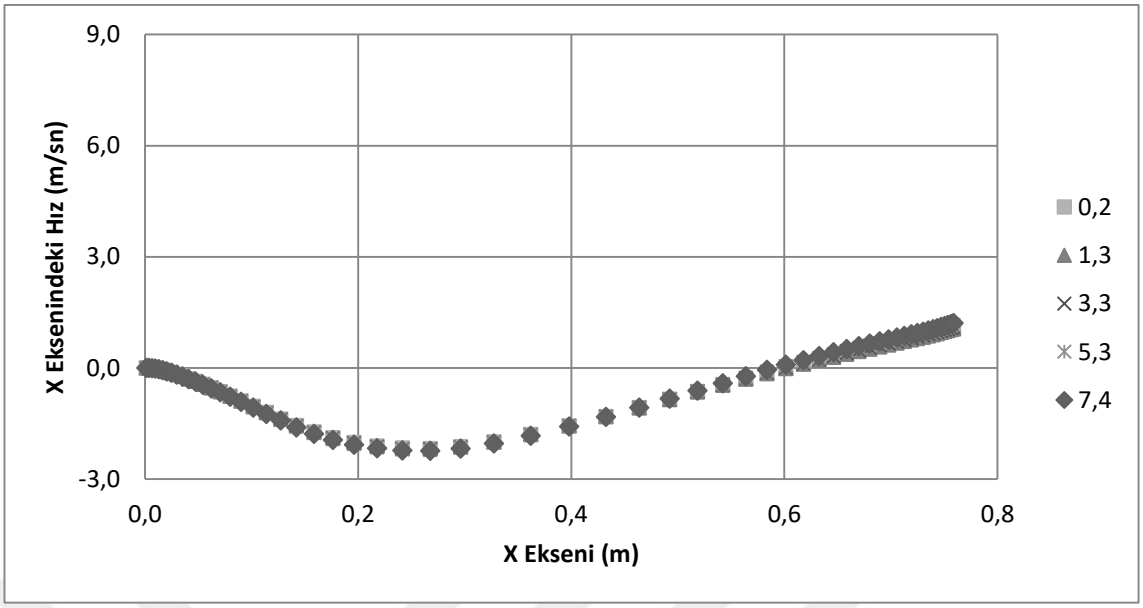
Şekil 4.147. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH2)



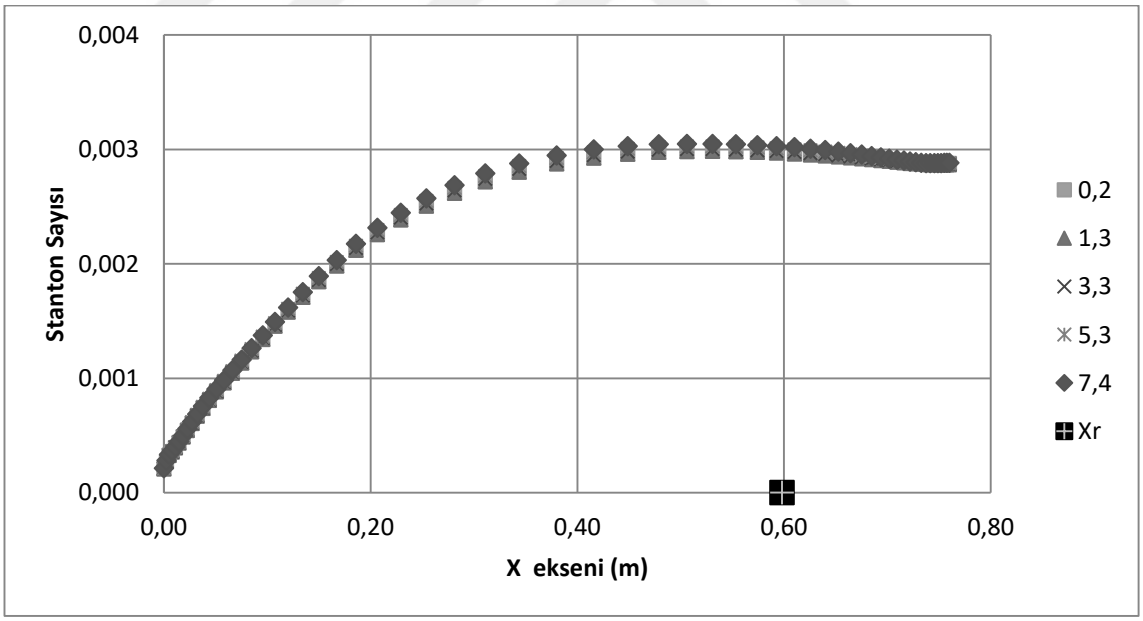
Şekil 4.148. 0 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH2)

IH2 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.146'da belirtilen deneysel sonuçlara benzer yaklaşım elde edilmektedir. Fakat yeniden birleşme noktasının büyük olmasından kaynaklı olarak benzerlik bir noktada son bulmaktadır.

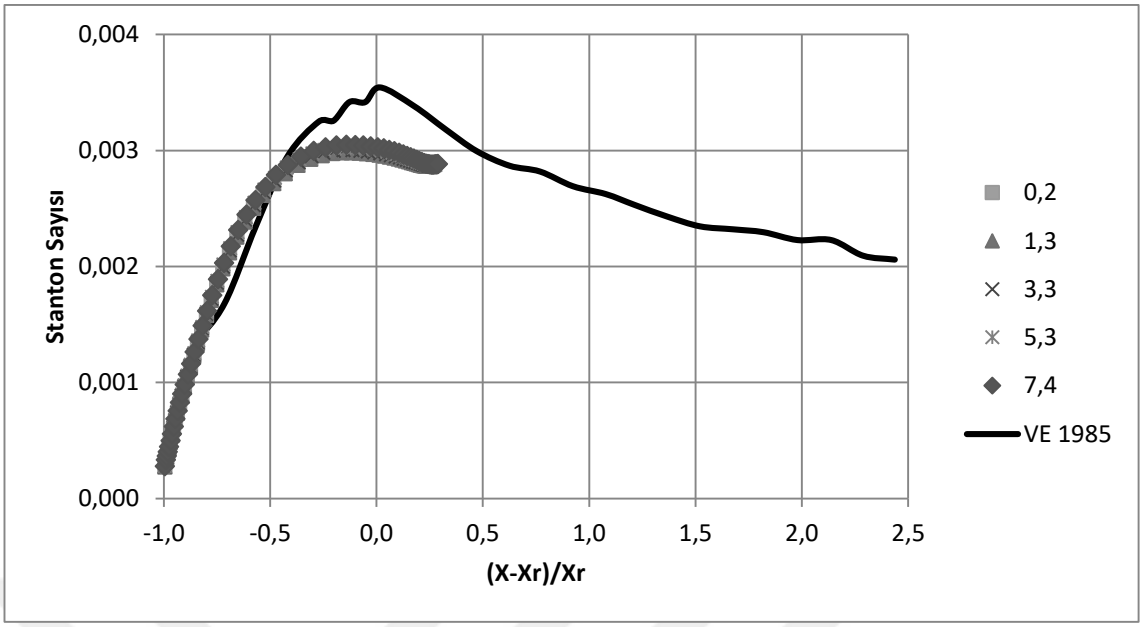
Çizelge 4.7'de IH3 olarak belirlenen üçüncü grupta, Şekil 3.17'de belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,43 olduğu geometri için kanal çıkışında küçük bir genişlemenin olmadığı durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.149 – 4.153'te gösterilmiştir.



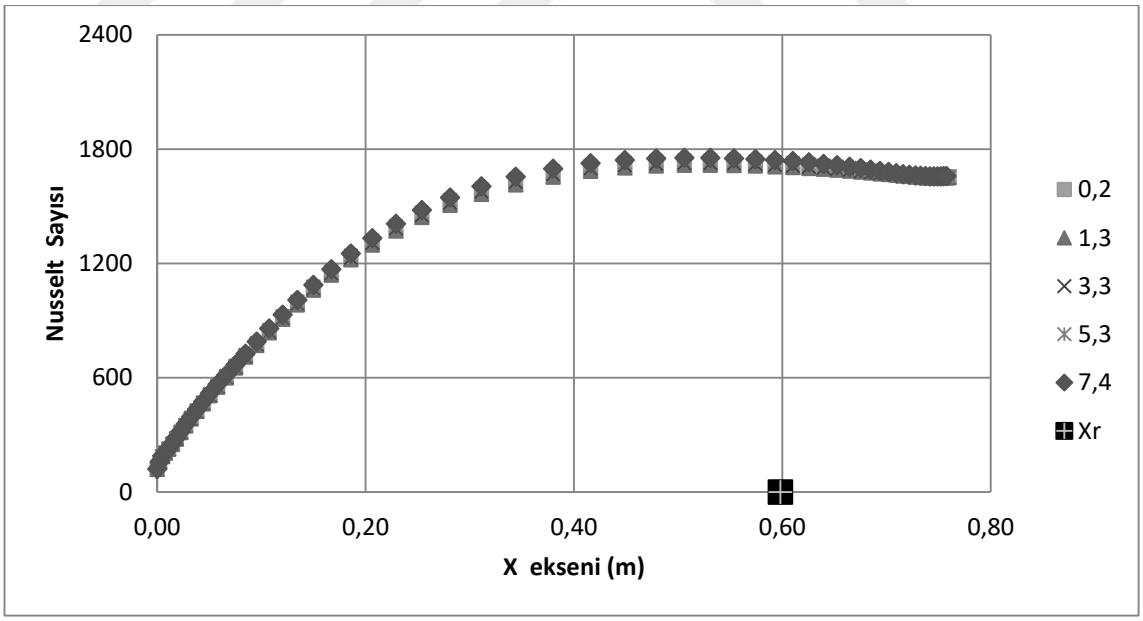
Şekil 4.149. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH3)



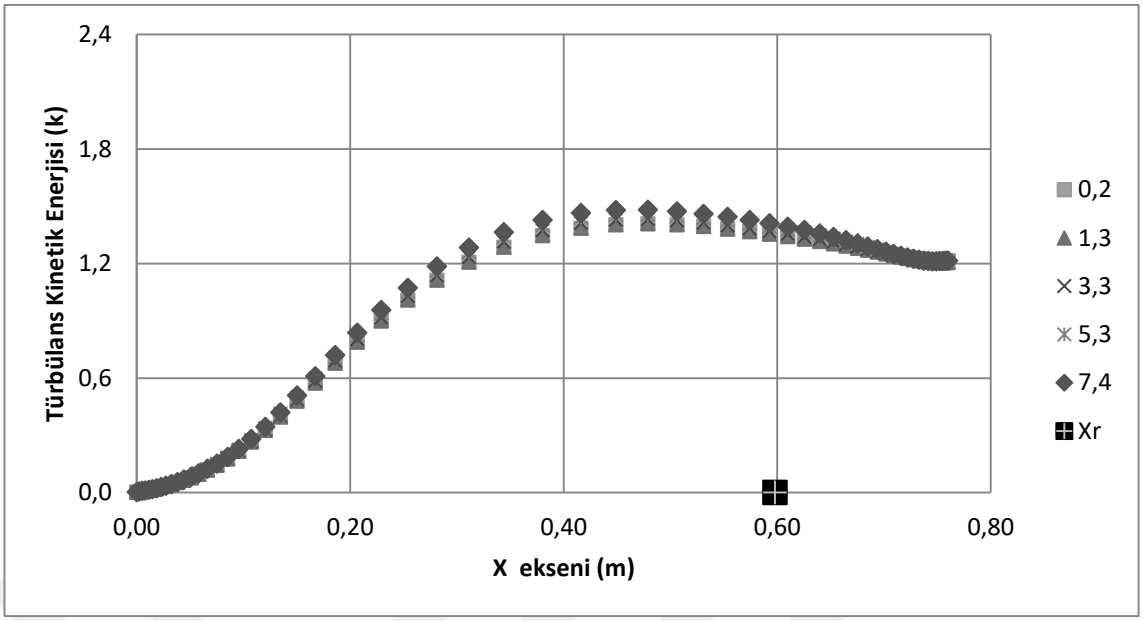
Şekil 4.150. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH3)



Şekil 4.151. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH3)



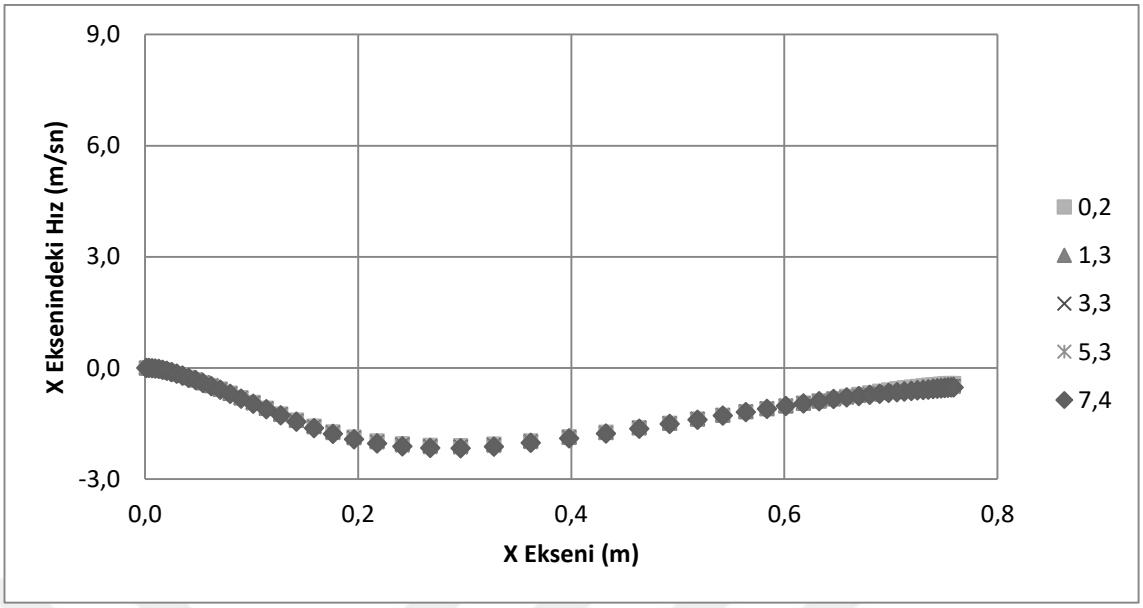
Şekil 4.152. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH3)



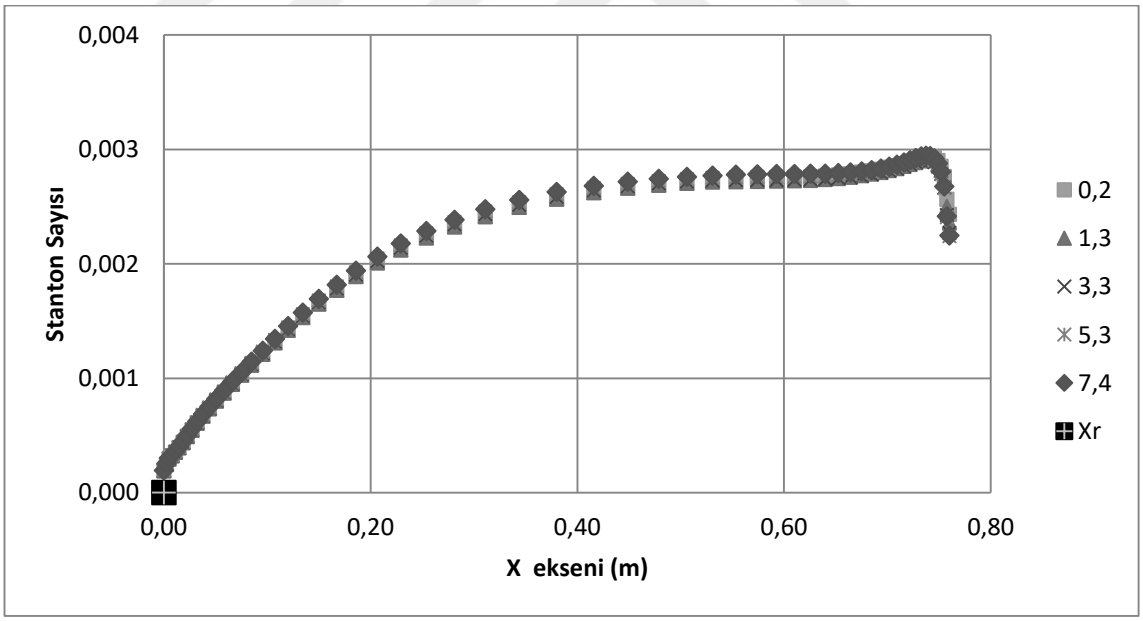
Şekil 4.153. 2 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH3)

IH3 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Belirlenen geometri kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı transferini maksimize edebilmek adına farklı optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca Şekil 4.151'de belirtilen deneysel sonuçlardan oldukça uzaklaşılmaktadır.

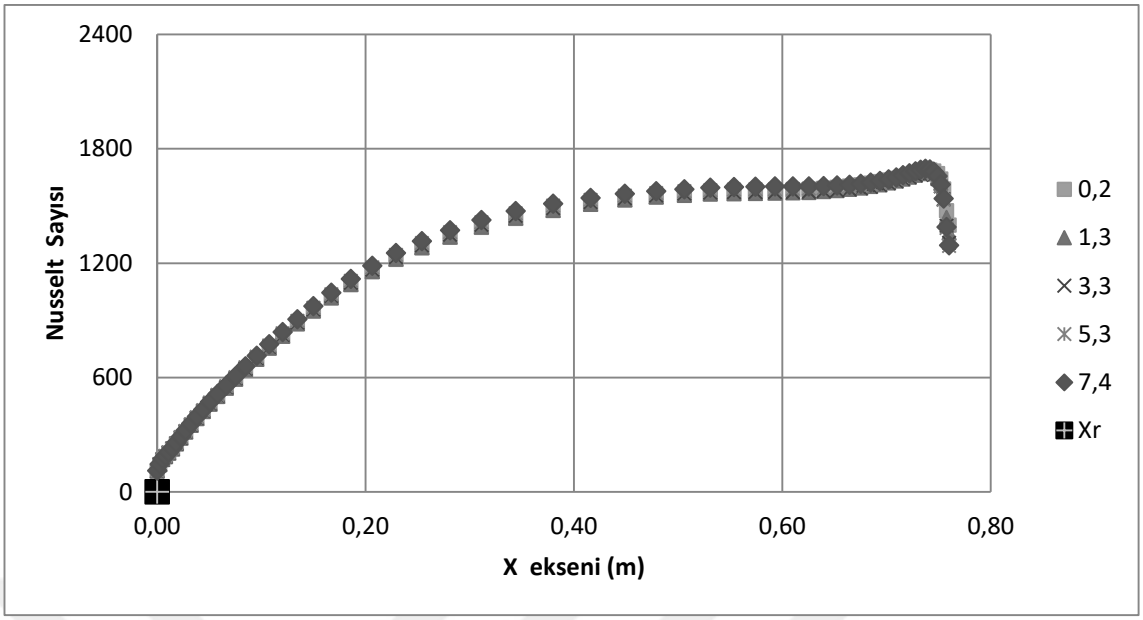
Çizelge 4.7'de IH4 olarak belirlenen dördüncü grupta, Şekil 3.18'de belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,43 olduğu geometri için kanal çıkışında büyük bir genişlemenin olmadığı durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.154 – 4.157'de gösterilmiştir



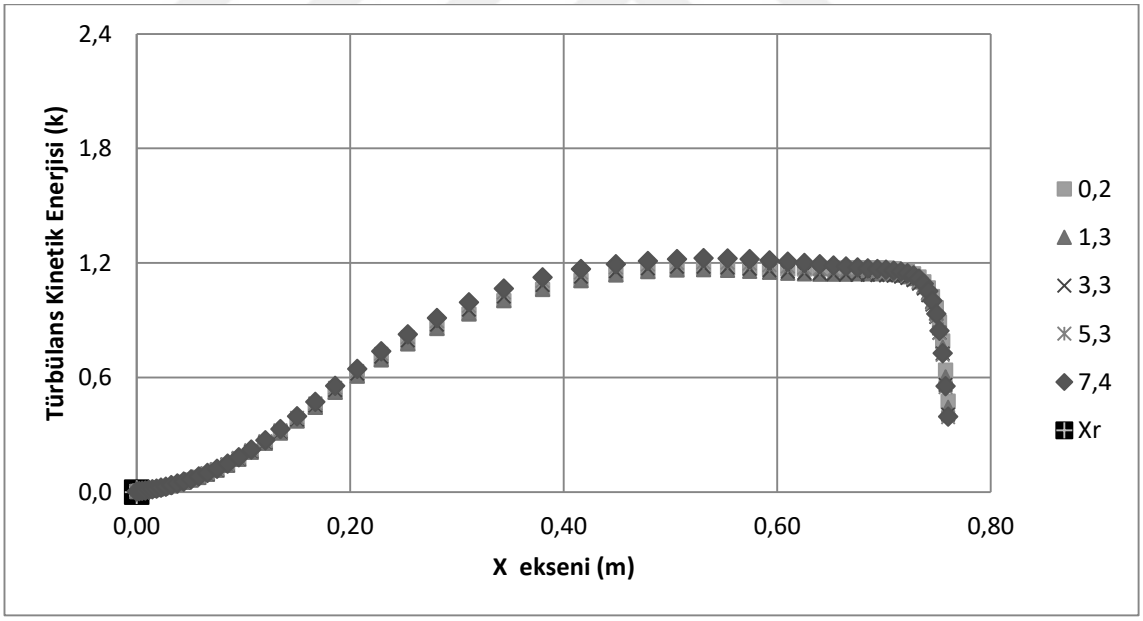
Şekil 4.154. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH4)



Şekil 4.155. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH4)



Şekil 4.156. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH4)

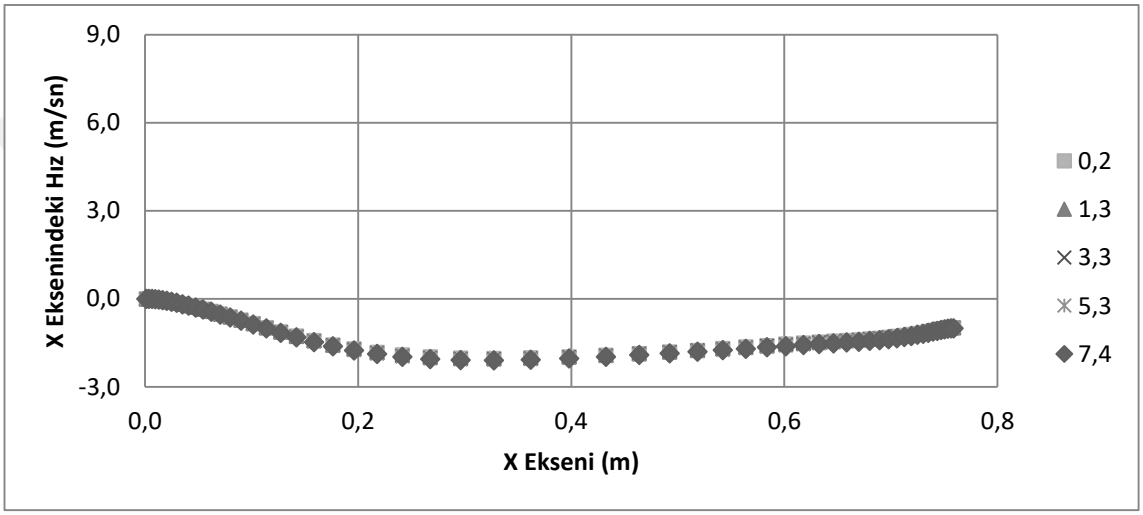


Şekil 4.157. 4 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH4)

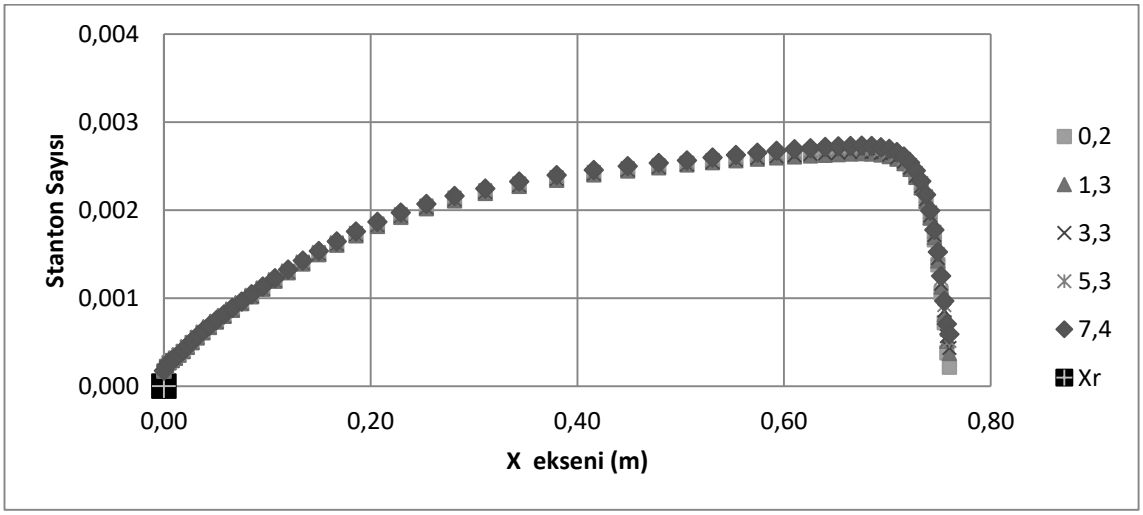
IH4 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça sadece ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Kanal çıkışında 4 derecelik bir genişleme söz konusu olduğunda basamak üzerinden gelen akış taban

yüzeyine çarpmamakta ve yeniden birleşme olayı oluşmamaktadır. Bu yüzden deneysel çalışma ile karşılaştırma da gerçekleştirilememiştir.

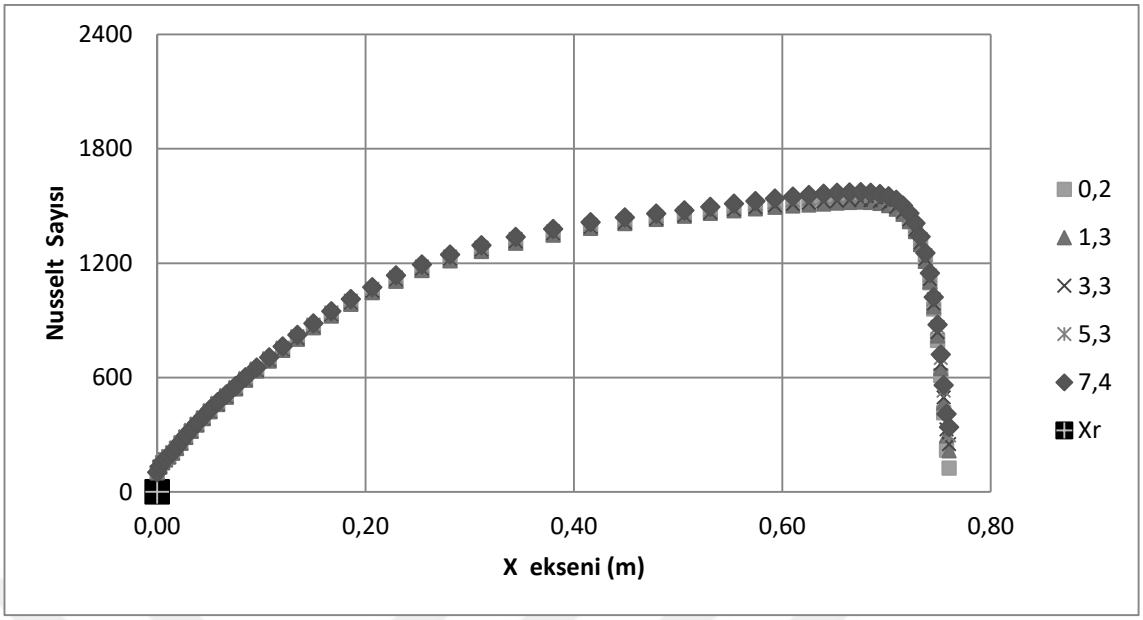
Çizelge 4.7'de IH5 olarak belirlenen beşinci grupta, Şekil 3.19'da belirtilen ve basamak genişleme oranının 1,43 olduğu geometri için kanal çıkışında daha büyük bir genişlemenin olmadığı durum için türbülans seviyesindeki değişimler göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.158 – 4.161'de gösterilmiştir



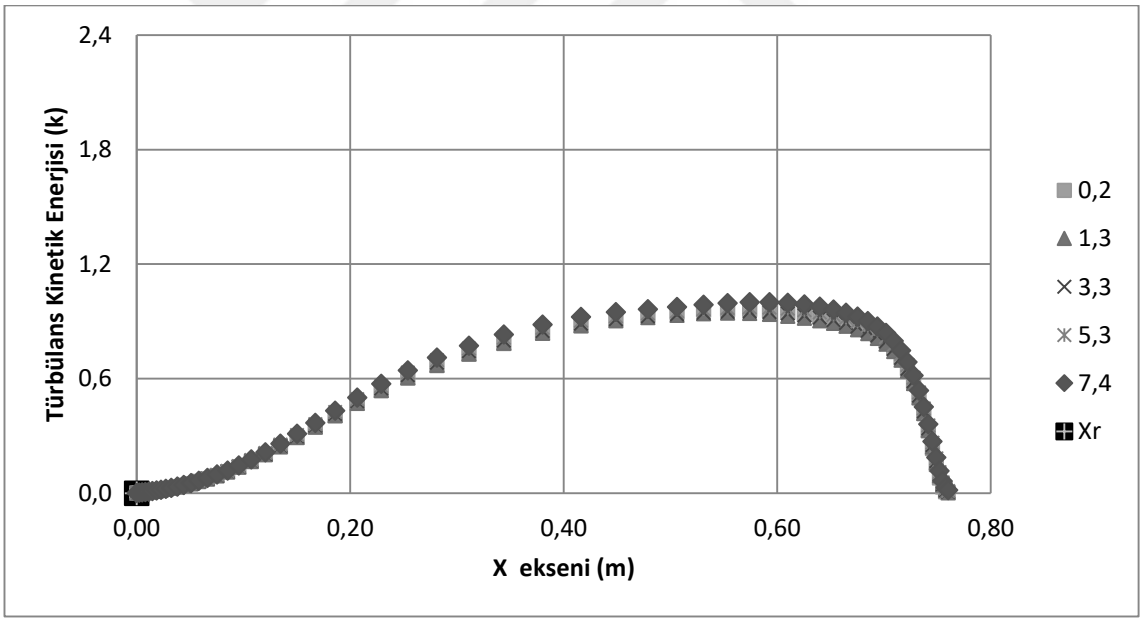
Şekil 4.158. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre x ekseni hızı (IH5)



Şekil 4.159. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH5)



Şekil 4.160. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre Nusselt sayısı ve yeniden birleşme noktası (IH5)



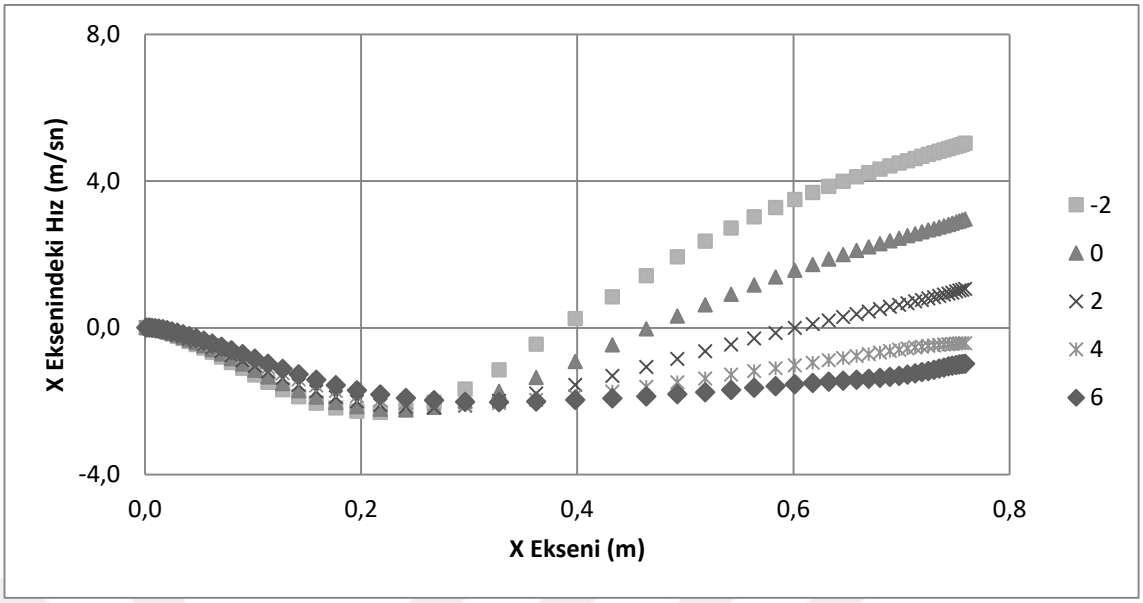
Şekil 4.161. 6 derece için türbülans seviyesine değişimine göre türbülans kinetik enerjisi ve yeniden birleşme noktası (IH5)

IH5 grubu kapsamında yapılan analizlere göre türbülans seviyesi arttıkça sadece ısı transferi karakteristiklerinde minimal değişiklikler gözlemlenmektedir. Kanal çıkışında 6 derecelik bir genişleme söz konusu olduğunda basamak üzerinden gelen akış taban

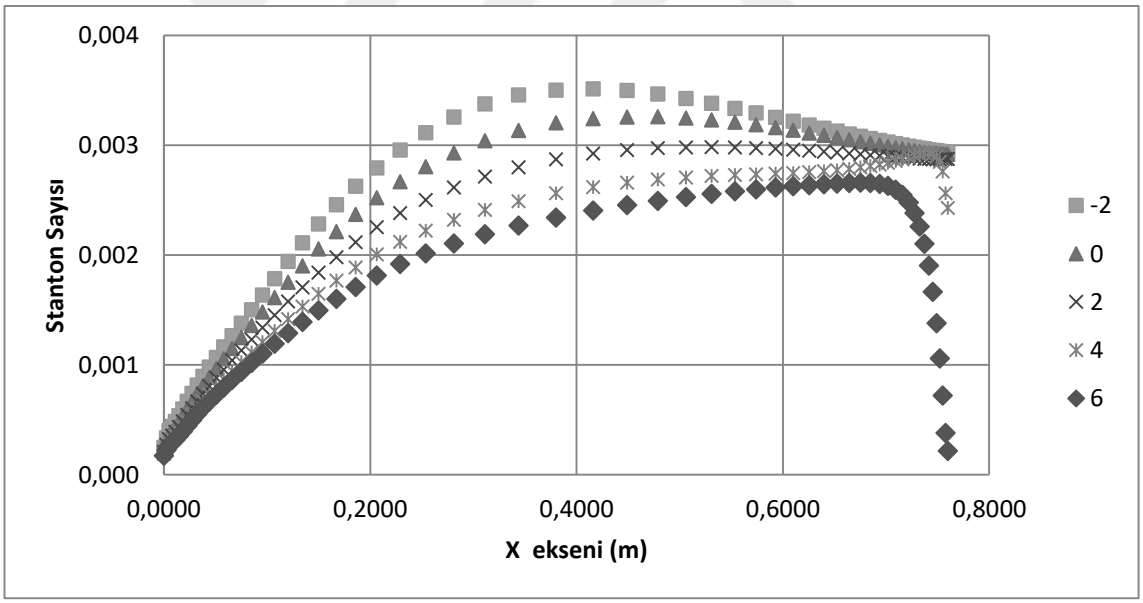
yüzeyine çarpmamakta ve yeniden birleşme olayı oluşmamaktadır. Bu yüzden deneysel çalışma ile karşılaştırma da gerçekleştirilememiştir.

Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi üzerinde yapılan analizler sonrasında beş farklı geometride basınç gradyeni değişimine bağlı olmaksızın türbülans seviyesindeki değişikliklerin ısı transferi karakteristikleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Basınç gradyenine bağlı olarak 2 dereceden daha yüksek genişleme oranlarında yeniden birleşmenin oluşmadığı tespit edilmiştir. Fakat yapılan düğer analizlerde türbülans seviyesindeki değişikliklerin akış karakteristikleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Buna göre -2, 0 ve 2 derecelik basınç gradyeni analizlerinde aynı geometride türbülans seviyesi arttıkça yeniden birleşme noktası basamağa doğru yaklaşmakta ve geri dönme bölgesi küçülmekte; ortalama ve maksimum Stanton ve Nusselt sayıları yükselmektedir. Türbülans kinetik enerjisi ise türbülans seviyesinin artmasıyla doğru orantılı bir yaklaşım sergilemektedir.

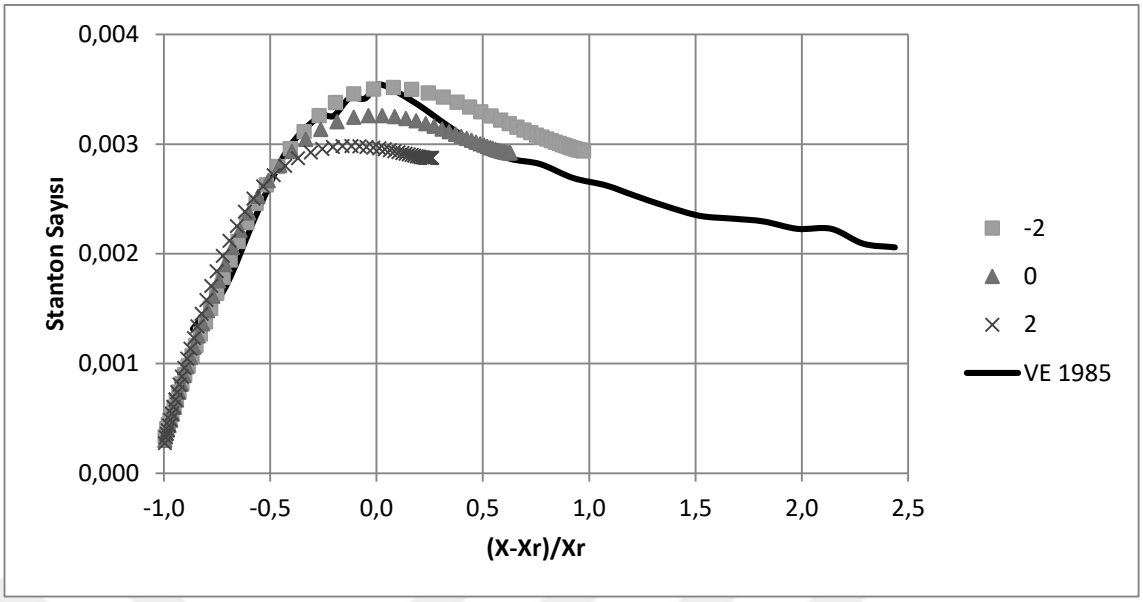
Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi kullanılarak elde edilen sonuçlar üzerinde yapılan bir diğer değerlendirme de aynı türbülans seviyesi için farklı basınç gradyenlerinde akış ve ısı transferi karakteristiklerinin incelenmesi olmuştur. Buna göre Çizelge 4.7'de belirtilen beş farklı türbülans seviyesinin her biri için beş farklı basınç gradyeninin sonuçları bir arada değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda türbülans seviyesi % 0,2 için sonuçlar Şekil 4.162 – 4.166'da; türbülans seviyesi % 1,3 için sonuçlar Şekil 4.167 – 4.171'de; türbülans seviyesi % 3,3 için sonuçlar Şekil 4.172 – 4.176' da; türbülans seviyesi % 5,3 için sonuçlar Şekil 4.177 – 4.181'de ve türbülans seviyesi % 7,4 için sonuçlar ise Şekil 4.182 – 4.186' da gösterilmiştir



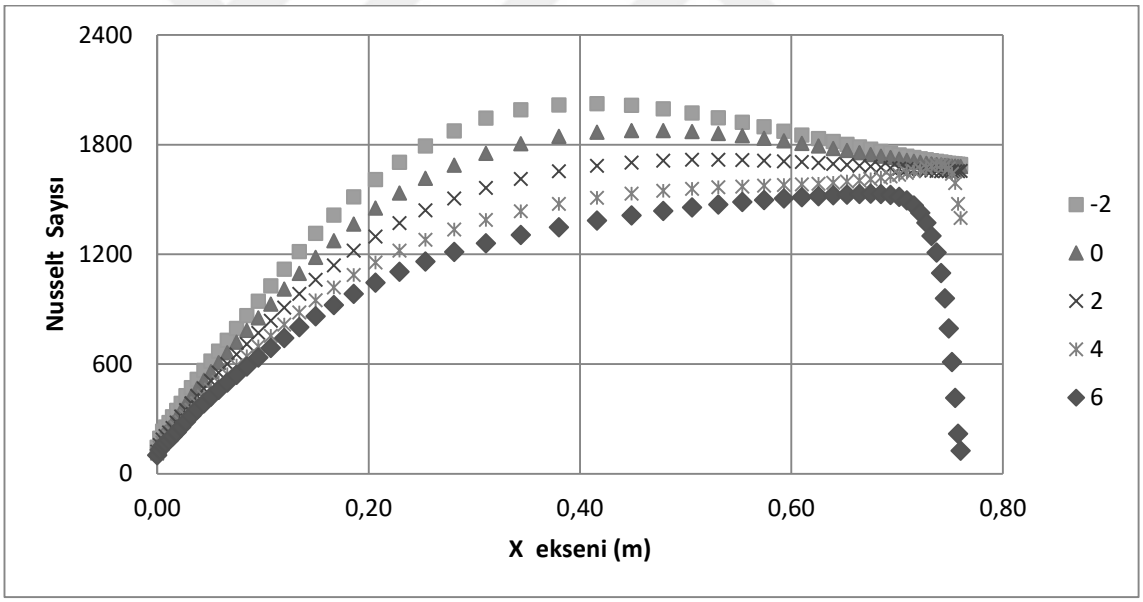
Şekil 4.162. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH)



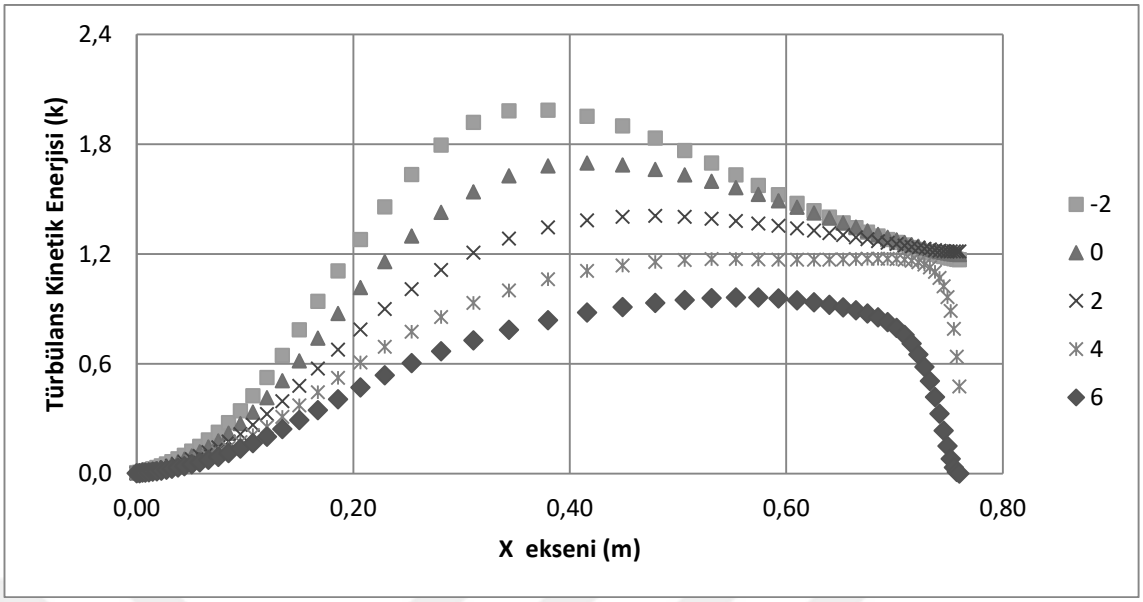
Şekil 4.163. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH)



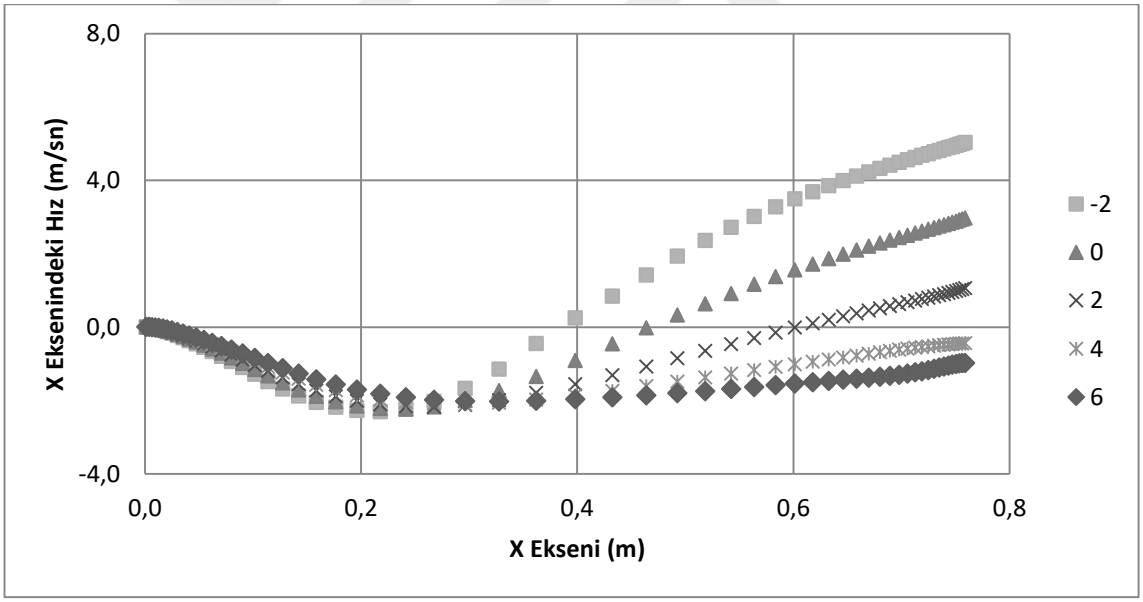
Şekil 4.164. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH)



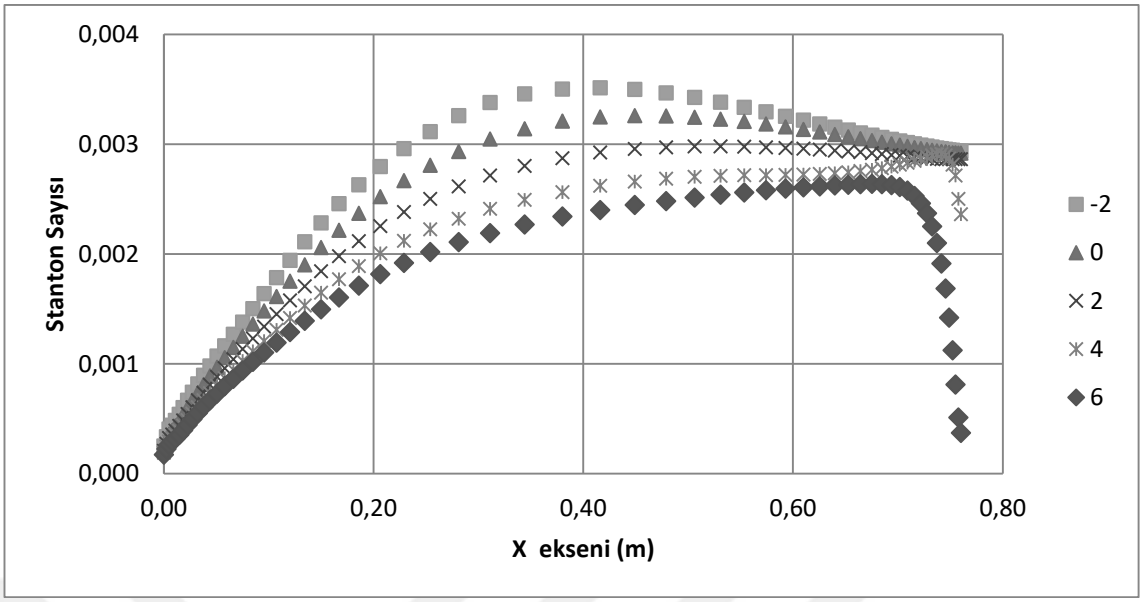
Şekil 4.165. %0,2 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (IH)



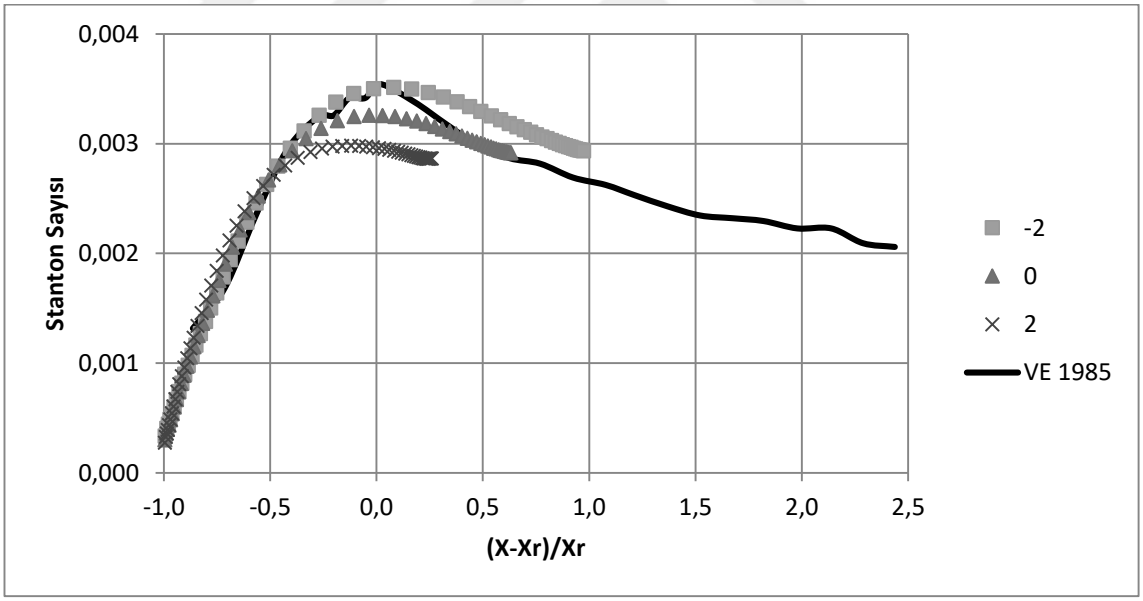
Şekil 4.166. % 0,2 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH)



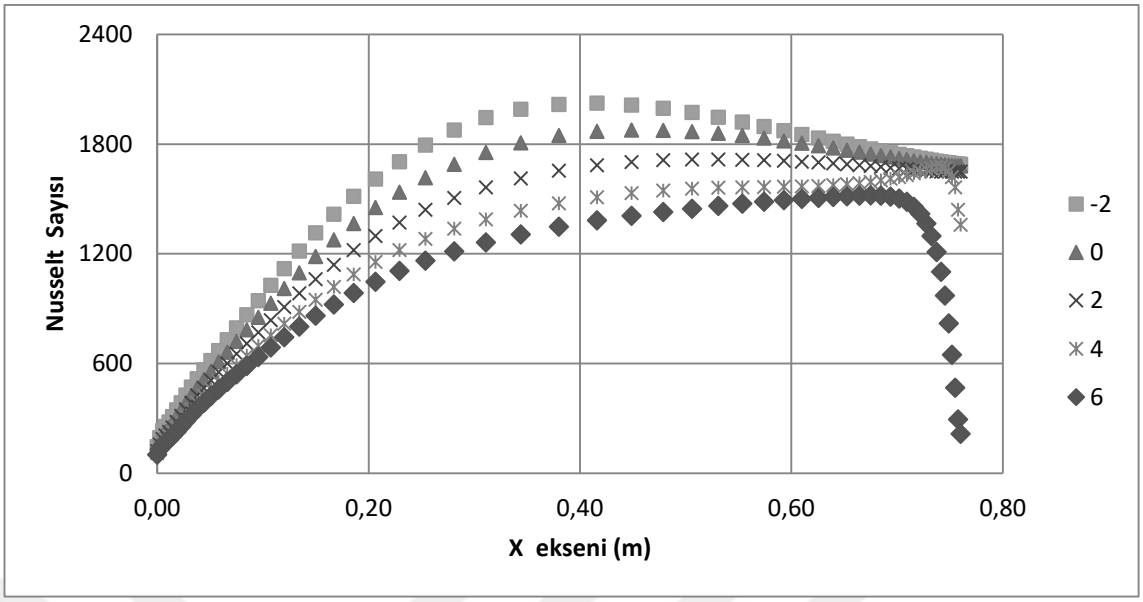
Şekil 4.167. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH)



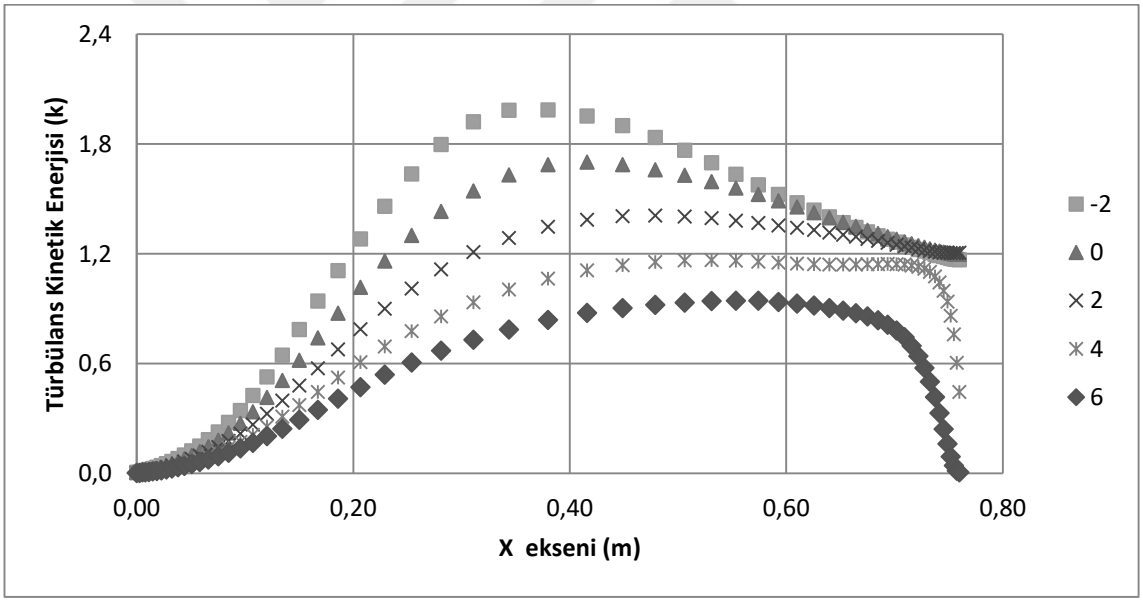
Şekil 4.168. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH)



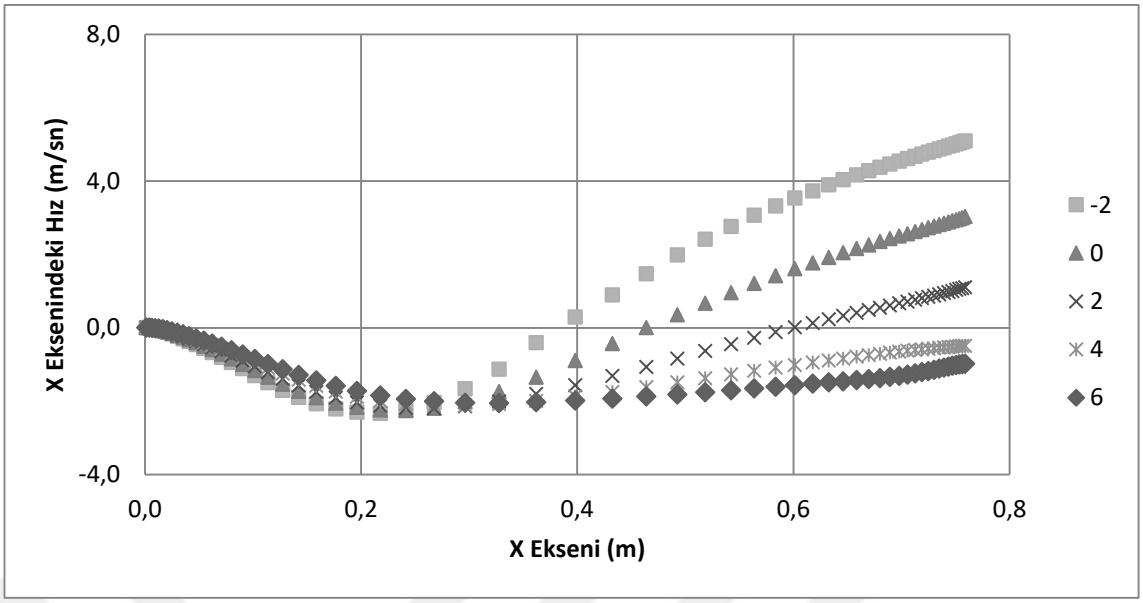
Şekil 4.169. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH)



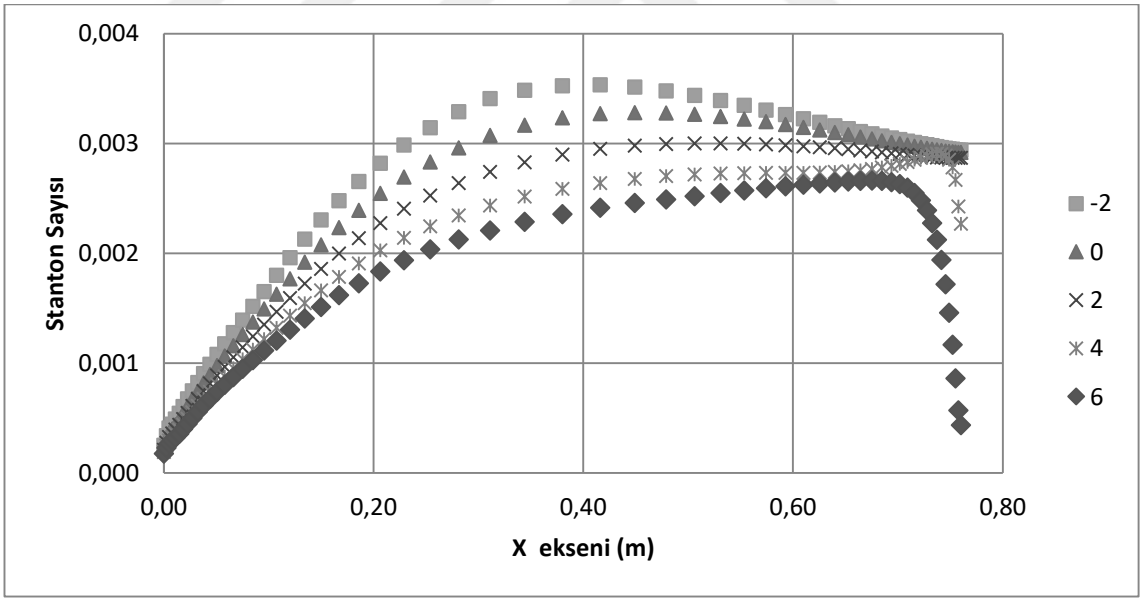
Şekil 4.170. %1,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (IH)



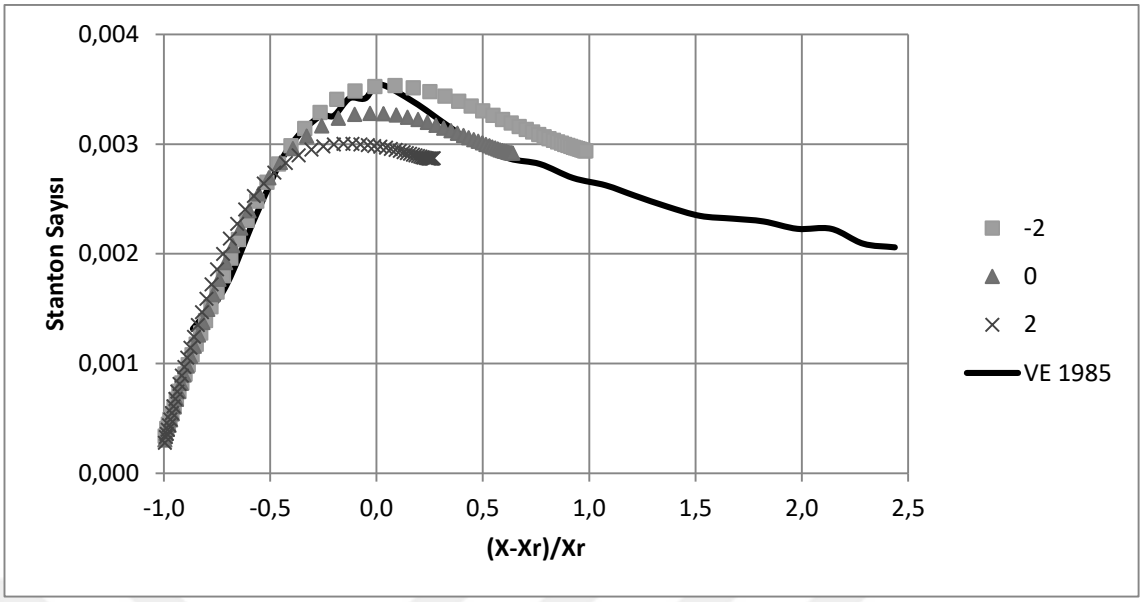
Şekil 4.171. % 1,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH)



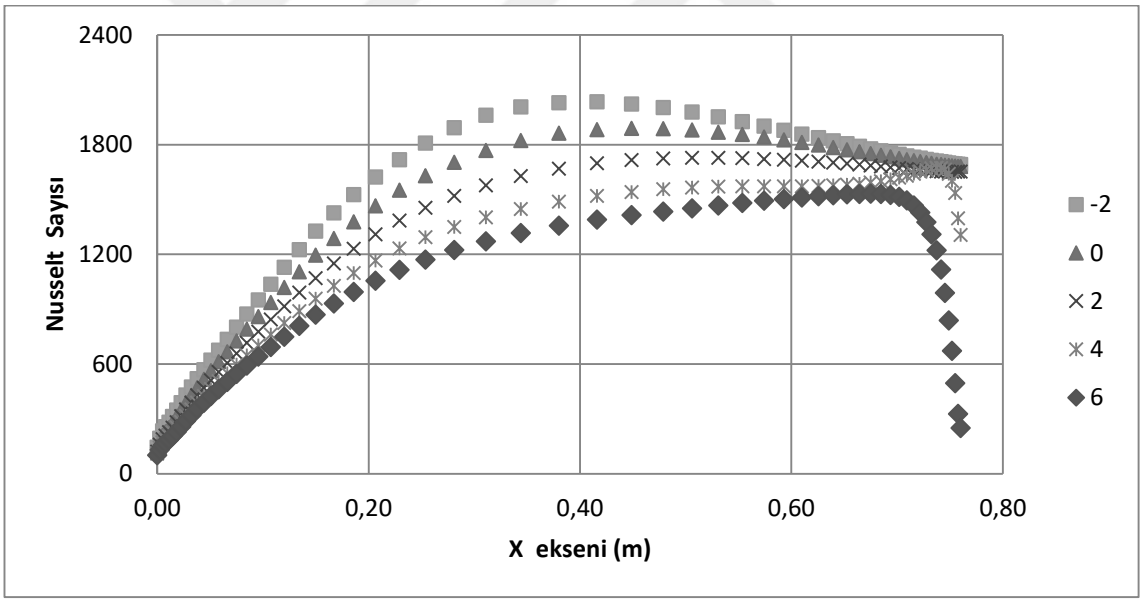
Şekil 4.172. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH)



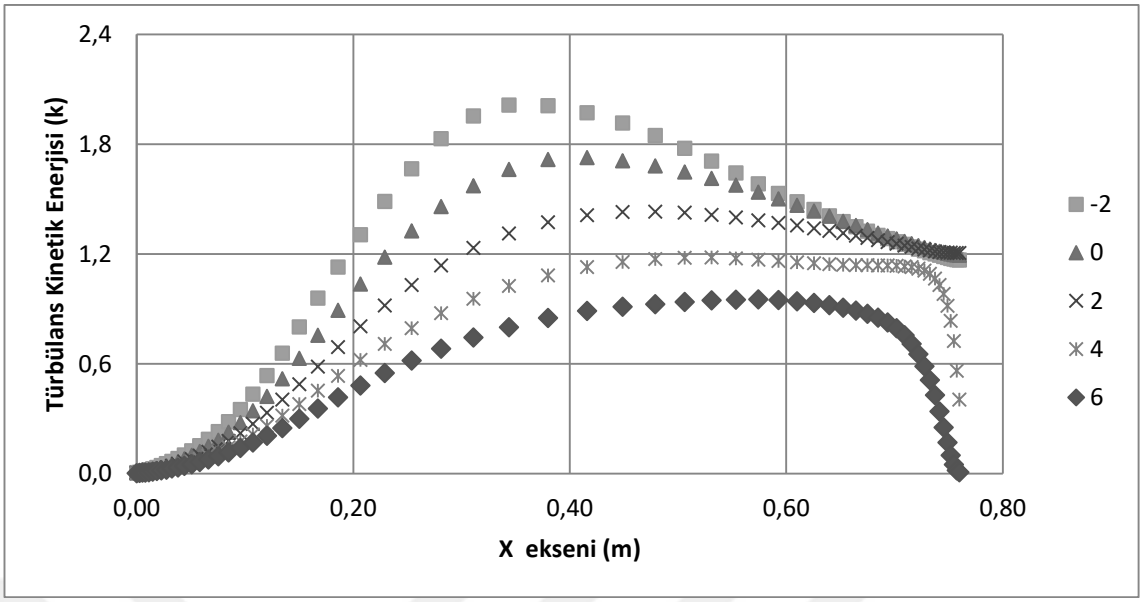
Şekil 4.173. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH)



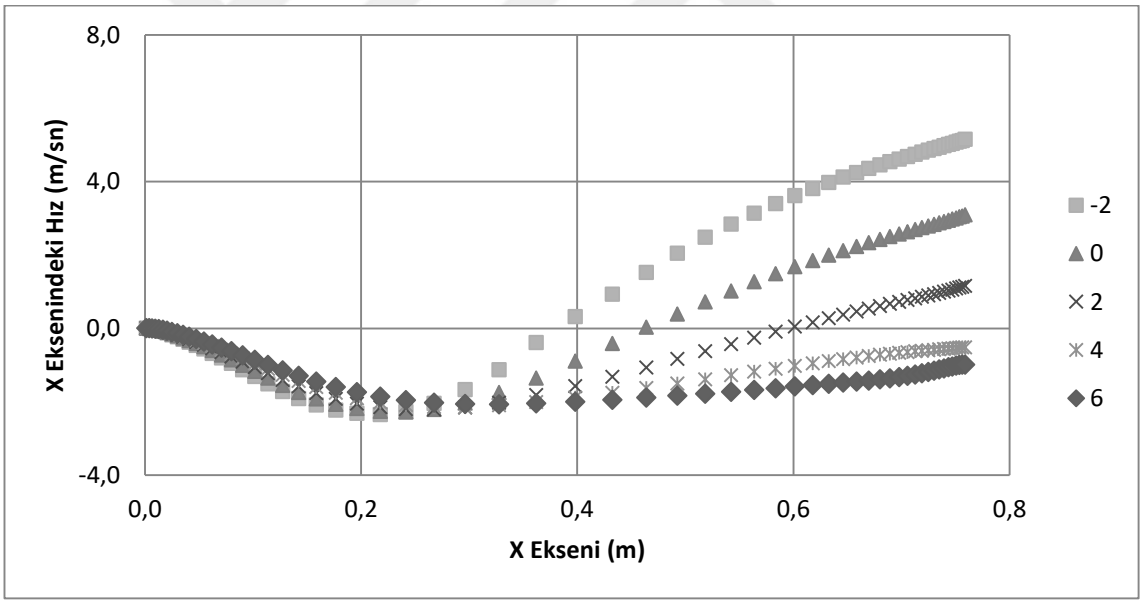
Şekil 4.174. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH)



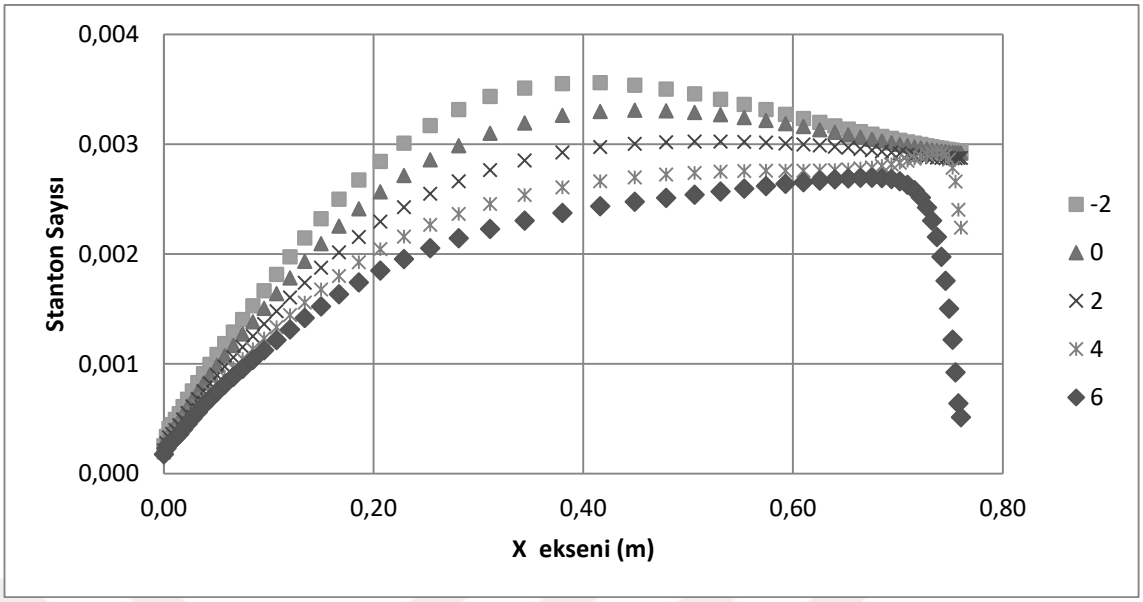
Şekil 4.175. %3,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt Sayısı (IH)



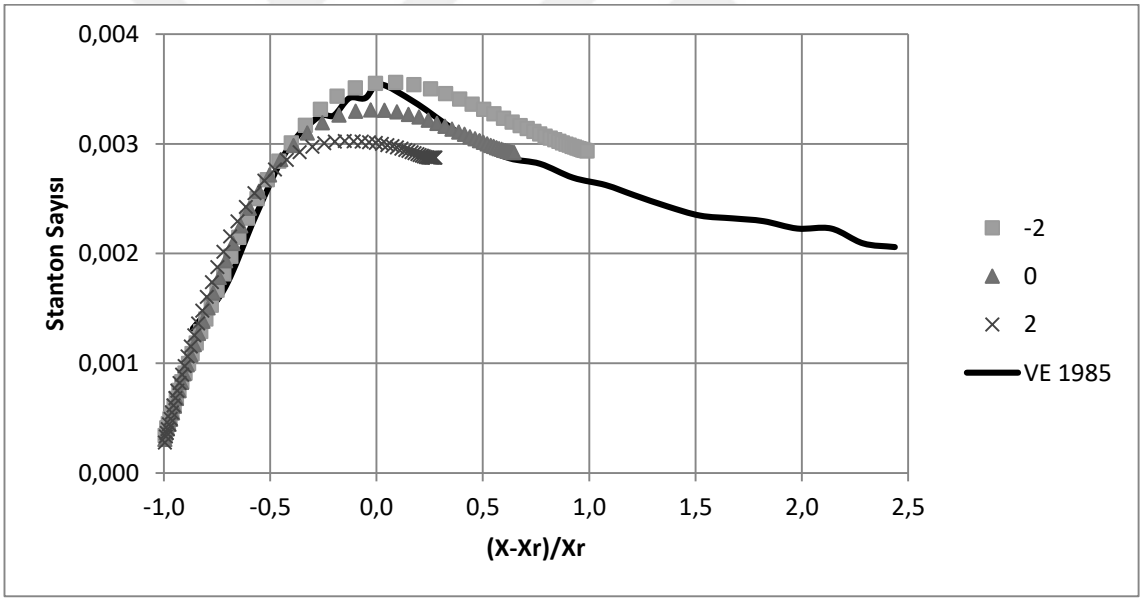
Şekil 4.176. % 3,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH)



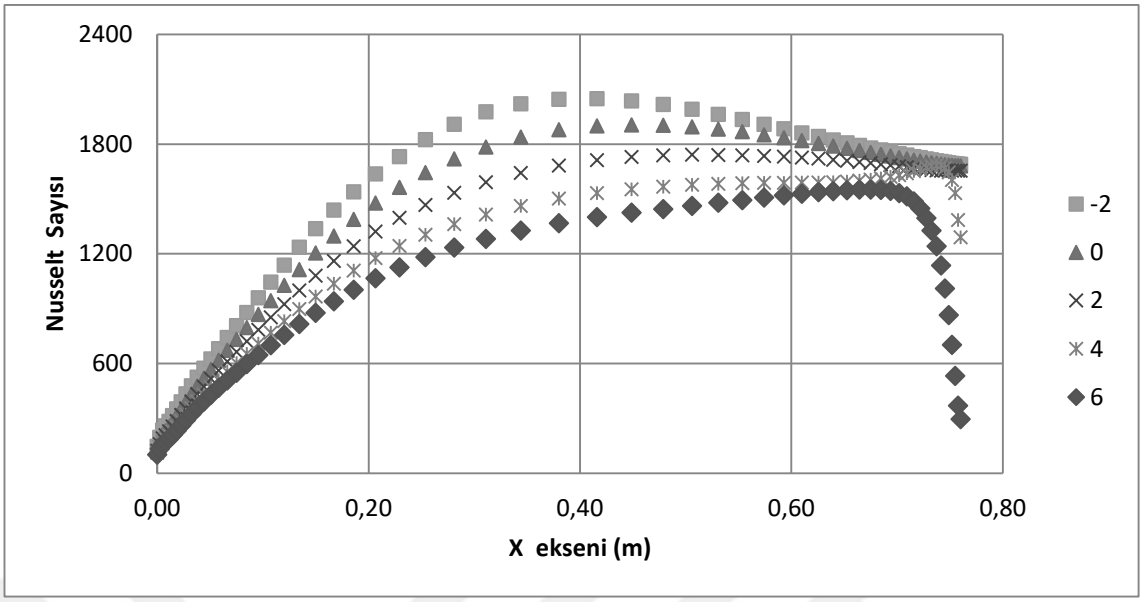
Şekil 4.177. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH)



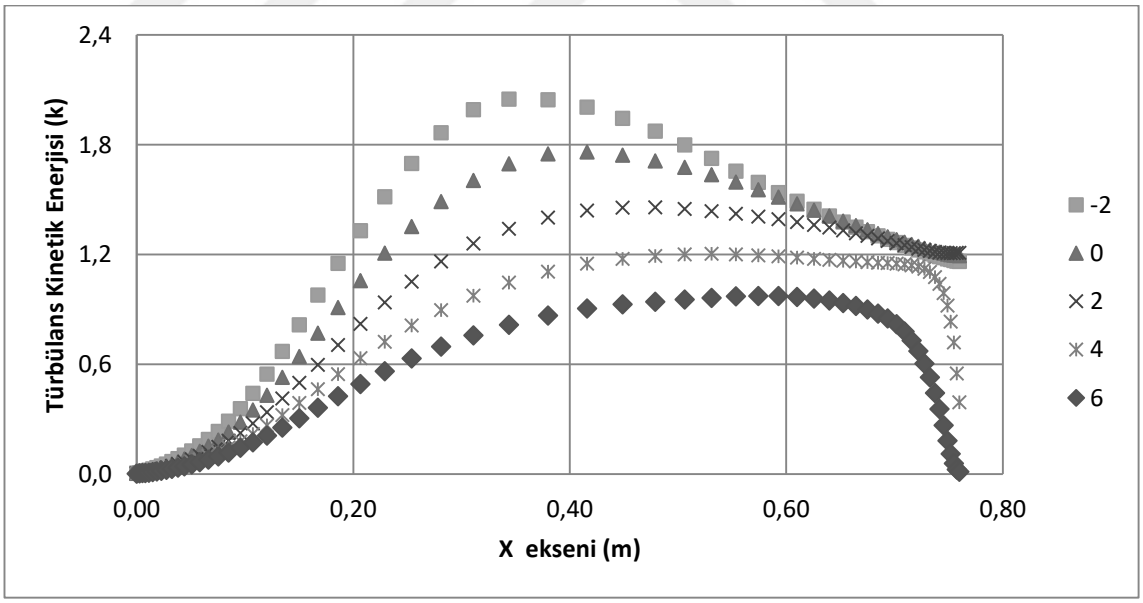
Şekil 4.178. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH)



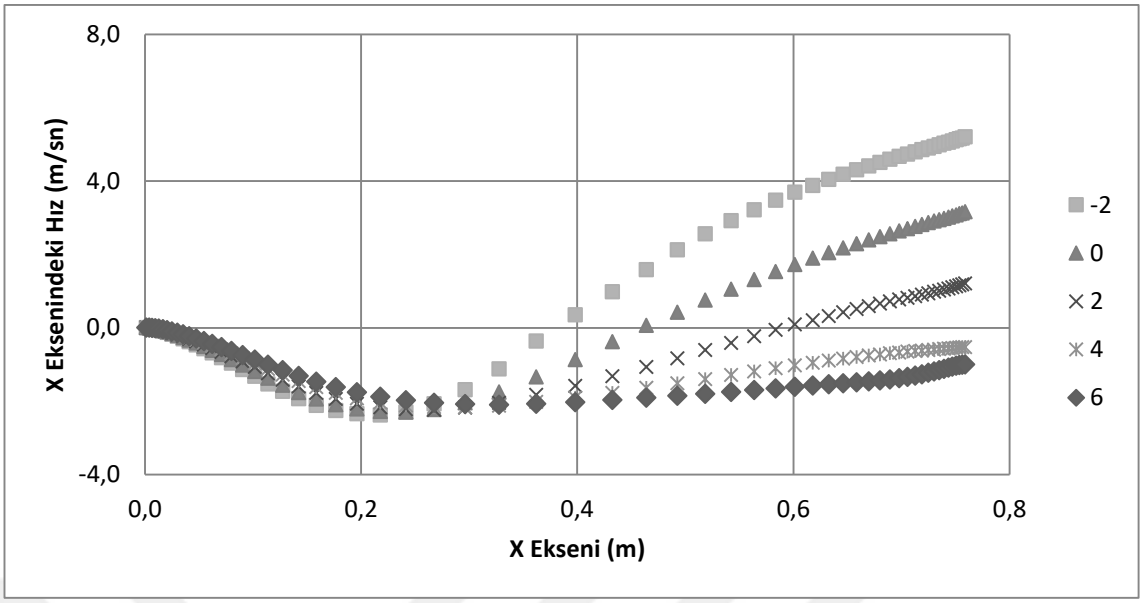
Şekil 4.179. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi sayısı (IH)



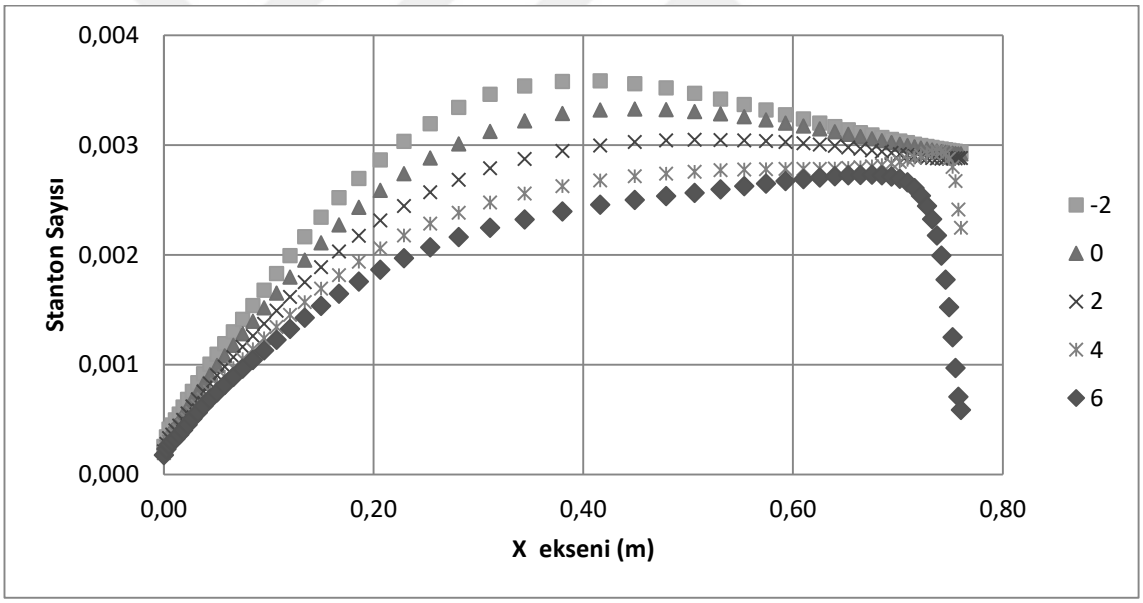
Şekil 4.180. %5,3 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (IH)



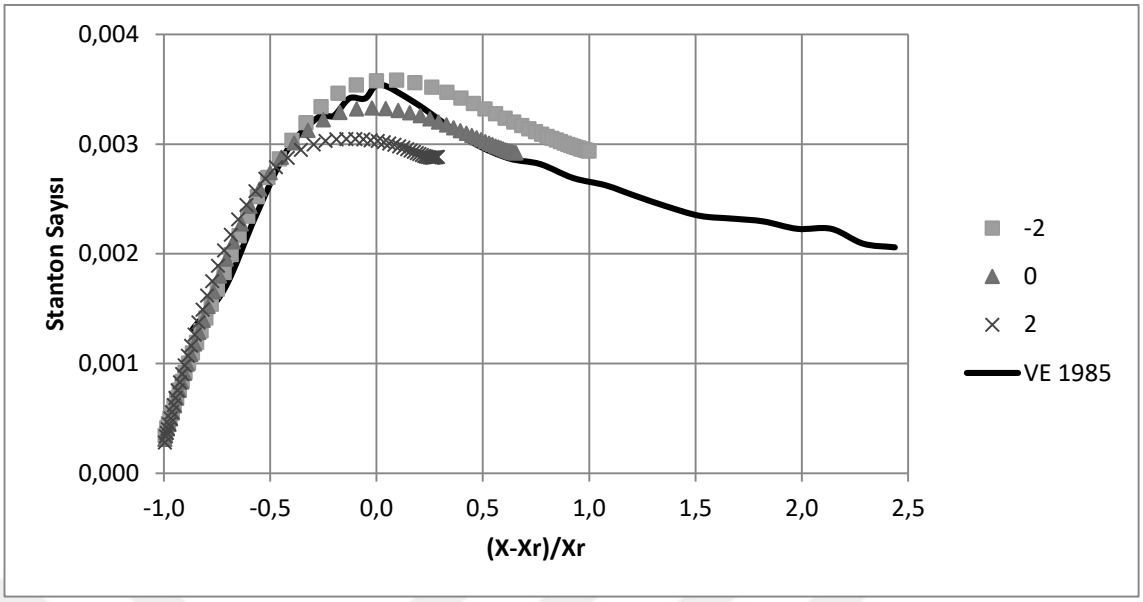
Şekil 4.181. % 5,3 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH)



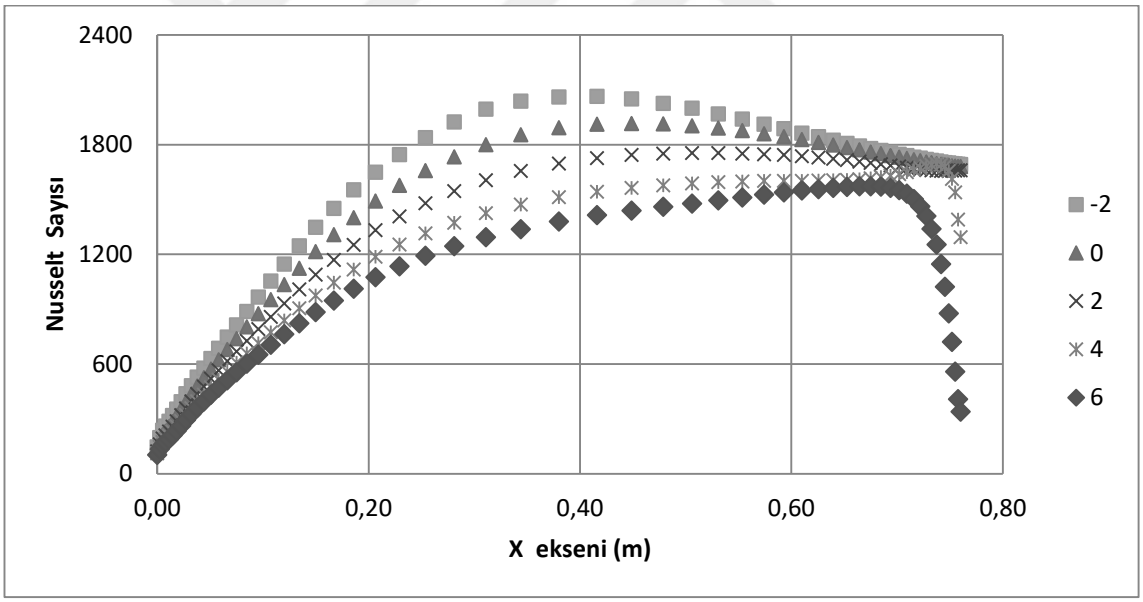
Şekil 4.182. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre x ekseni hızı (IH)



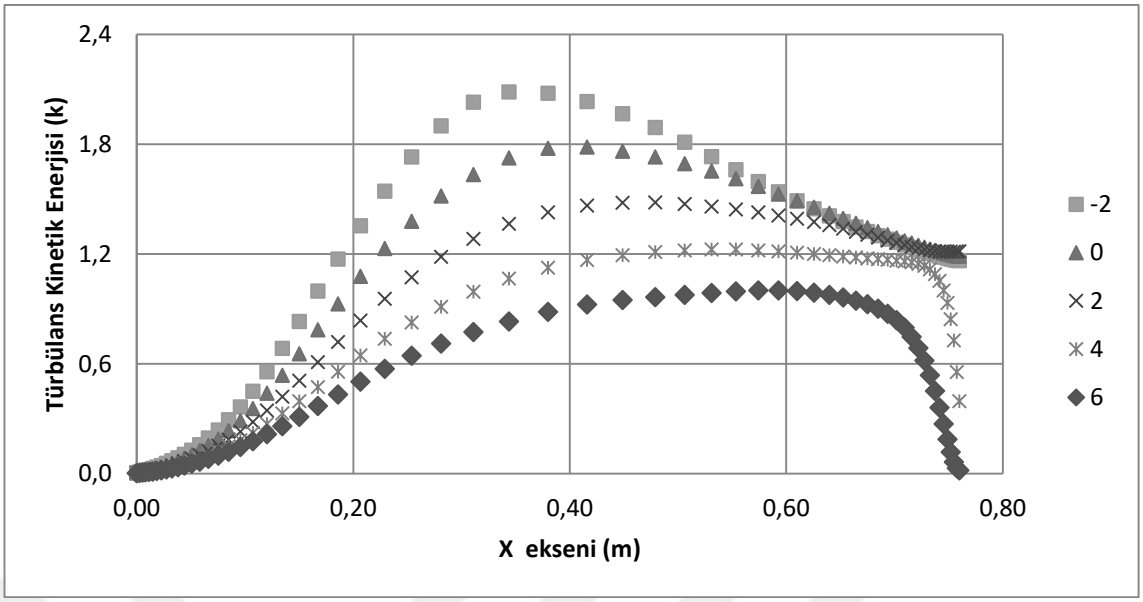
Şekil 4.183. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı (IH)



Şekil 4.184. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi (IH)



Şekil 4.185. %7,4 türbülans seviyesi için basınç gradyenine göre Nusselt sayısı (IH)



Şekil 4.186. % 7,4 türbülans seviyesi için türbülans kinetik enerjisi (IH)

Yapılan analizler sonucunda basınç gradyeninde yaşanan değişikliklerin aynı şartlar altında akış karakteristikleri ve ısı transferi karakteristiklerinde de değişiklere neden olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat genişleme oranının 1,43 olduğu bu geometride basınç gradyeninin 2 dereceden daha fazla bir genişlemeyle değiştiği durumlar için yeniden birleşme noktası oluşmadığı tespit edilmiştir. Buna göre basamak üzerinden gelen akış, taban yüzeyine temas etmeden doğrudan çıkışa gitmektedir.4 ve 6 derecelik basınç gradyeni değişimleri hariç olmak üzere basınç gradyeni değişimleri, türbülans seviyesindeki değişiklikler gibi minimal boyutta gerçekleşmemiş, aksine daha belirgin bir şekilde meydana gelmiştir. Buna göre basınç gradyeni arttıkça yeniden birleşme noktası basamaktan uzaklaşmakta ve geri dönme bölgesi büyümektedir. Ayrıca Stanton sayısı ve Nusselt sayısı büyüklüklerinde de azalma söz konusu olmaktadır. Aynı azalma türbülans kinetik enerjisi ölçümünde de görülmektedir. Dolayısıyla genişleme oranının 1,43 olduğu bu analojide ısı transferini maksimize etmek için türbülans seviyesinin yükseltilmesi ve basınç gradyeninin düşürülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen tüm sayısal veriler ve yeniden birleşme noktasının basamak yüksekliğine bölümü olarak adlandırılan H değeri ise Çizelge 4.8’ de paylaşılmıştı

Çizelge 4.8. Isomoto ve Honami (1989) geometrisi analojisi simülasyon grupları sayısal verileri

IH1 → Basınç Gradyeni -2º
IH2 → Basınç Gradyeni 0º
IH3 → Basınç Gradyeni 2º
IH4 → Basınç Gradyeni 4º
IH5 → Basınç Gradyeni 6º

Grup	Analiz	Türbülans Seviyesi	Yeniden Birleşme (Xr)	H	Stanton Sayısı (Ort)	Stanton Sayısı (Mak)	Nusselt Sayısı (Ort)	Nusselt Sayısı (Mak)
IH1	a	0,2	0,385	5,89	0,0024	0,0035	1365	2024
	b	1,3	0,385	5,89	0,0024	0,0035	1365	2023
	c	3,3	0,383	5,86	0,0024	0,0035	1370	2034
	d	5,3	0,382	5,84	0,0024	0,0036	1376	2049
	e	7,4	0,380	5,81	0,0024	0,0036	1381	2064
IH2	a	0,2	0,466	7,13	0,0023	0,0033	1297	1877
	b	1,3	0,466	7,12	0,0023	0,0033	1297	1876
	c	3,3	0,463	7,09	0,0023	0,0033	1303	1889
	d	5,3	0,462	7,06	0,0023	0,0033	1310	1905
	e	7,4	0,459	7,02	0,0023	0,0033	1316	1916
IH3	a	0,2	0,602	9,21	0,0021	0,0030	1215	1717
	b	1,3	0,603	9,22	0,0021	0,0030	1214	1716
	c	3,3	0,599	9,16	0,0021	0,0030	1221	1728
	d	5,3	0,595	9,10	0,0021	0,0030	1228	1741
	e	7,4	0,590	9,02	0,0021	0,0030	1234	1755
IH4	a	0,2	0,000	0,00	0,0020	0,0029	1136	1689
	b	1,3	0,000	0,00	0,0020	0,0029	1129	1675
	c	3,3	0,000	0,00	0,0020	0,0029	1131	1674
	d	5,3	0,000	0,00	0,0020	0,0029	1139	1684
	e	7,4	0,000	0,00	0,0020	0,0029	1147	1694
IH5	a	0,2	0,000	0,00	0,0016	0,0027	938	1532
	b	1,3	0,000	0,00	0,0016	0,0026	939	1520
	c	3,3	0,000	0,00	0,0016	0,0027	948	1532
	d	5,3	0,000	0,00	0,0017	0,0027	961	1552
	e	7,4	0,000	0,00	0,0017	0,0027	973	1572

4.1.3. Modifiye Edilmiş Çalışmaların Karşılaştırılması

Vogel ve Eaton (1985) deneysel çalışmasındaki sonuçlara gerçekleştirilen analizler sonrasında ulaşılmasının ardından, bu çalışmadaki geometrik model üzerinde; Driver ve Seegmiller (1985) çalışmasındaki basınç gradyeni değişiklikleri, Isomoto ve Honami (1989) çalışmasındaki türbülans seviyesi değişiklikleri ve her iki deneysel çalışmadaki genişleme oranları uygulanarak farklı parametrelerin ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan incemeler sonucunda her bir genişleme oranında aynı geometriler kullanılması durumunda türbülans seviyesindeki artışın ısı transferi karakteristikleri üzerinde minimal bir artışa neden olduğu fakat akış karakteristiği olarak değerlendirebileceğimiz yeniden birleşme bölgesinde ise küçülmeye neden olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca yine her bir genişleme oranında aynı geometriler kullanılması durumunda basınç gradyenindeki artışın da ısı transferi karakteristikleri üzerinde daha belirgin bir düşüşe neden olduğu fakat akış karakteristiği olarak değerlendirebileceğimiz yeniden birleşme bölgesinde ise oldukça belirgin bir şekilde büyümesine neden olduğu görülmüştür.

Genişleme oranının 1,1 olduğu Drive ve Seegmiller (1985) analojisi ile 1,25 olduğu Vogel ve Eaton (1985) analojisinde her bir basınç gradyeni için değerlendirilebilir sonuçlara ulaşılmıştır. Genişleme oranının 1,43 olduğu Isomoto ve Honami (1989) analojisinde ise 4 ve 6 derecelik basınç gradyenlerinde ise değerlendirilebilir sonuçlara ulaşılamamıştır. Bunun nedeni ise kanal çıkış yüksekliğinin oldukça büyümesi basamak üzerinden gelen akışın taban yüzeyine temas etmeden kanaldan çıkmasıdır.

4.1.3.1. Genişleme Oranı Değişimine Göre Karşılaştırmalar

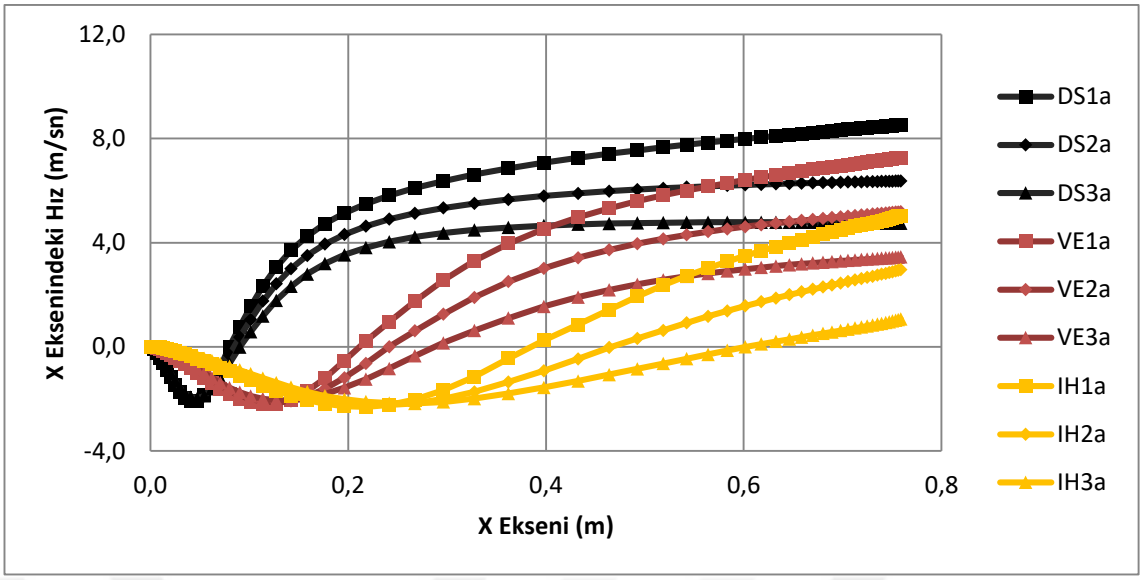
Modifiye edilmiş çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre genişleme oranı değişimine göre karşılaştırmalar gerçekleştirilmiş ve genişleme oranı değişiminin ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi yapılmıştır. Genişleme oranının 1,43 olduğu Isomoto ve Honami (1989) analojisinde 4 ve 6 derecelik basınç gradyeni uygulamasında akış karakteristikleri için değerlendirilebilir sonuçların elde edilememesinin ardından her üç genişleme oranı için -2, 0 ve 2 derecelik basınç gradyeni

değişimleri için değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca türbülans seviyesindeki değişimler için de kullanılan seviyeler aradaki farkların daha iyi anlaşılabilir olması açısından sadece %0,2, %3,3 ve %7,4'lik türbülans seviyesi ele alınmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar ise toplam dokuz grupta değerlendirmiş ve ele alınan gruplar Çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

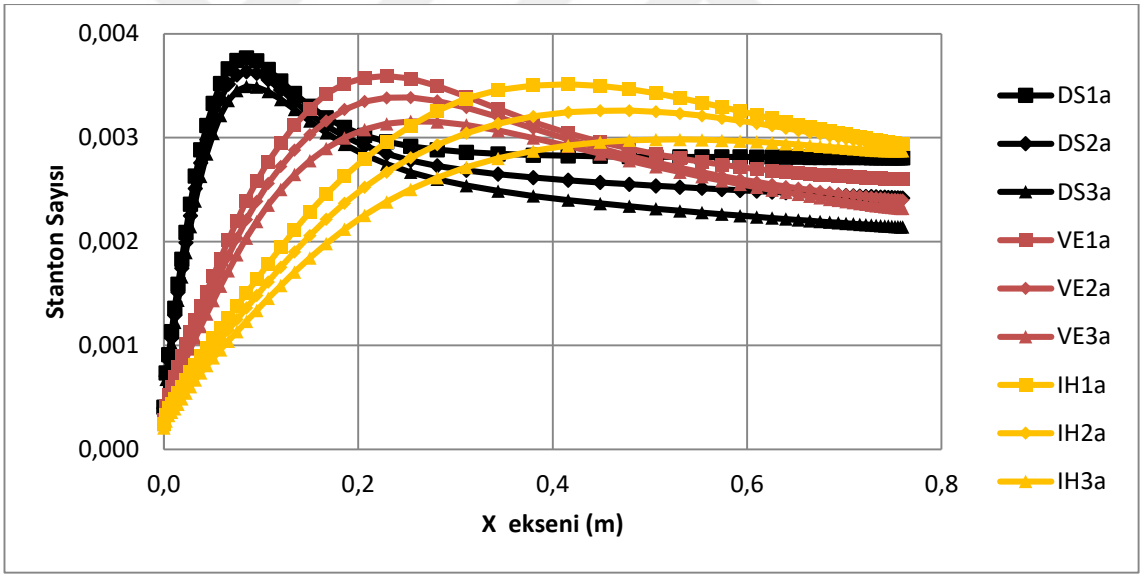
Çizelge 4.9. Genişleme oranına göre karşılaştırma grupları

Grup	Alt Grup	Basınç Gradyeni ve Türbülans Seviyesi	Grup	Alt Grup	Basınç Gradyeni ve Türbülans Seviyesi	Grup	Alt Grup	Basınç Gradyeni ve Türbülans Seviyesi
A	DS1a	-2º; %0,2	D	DS1c	-2º; %3,3	C	DS1e	-2º; %7,4
	VE1a			VE1c			VE1e	
	IH1a			IH1c			IH1e	
B	DS2a	0º; %0,2	E	DS2c	0º; %3,3	F	DS2e	0º; %7,4
	VE2a			VE2c			VE2e	
	IH2a			IH2c			IH2e	
C	DS3a	2º; %0,2	F	DS3c	2º; %3,3	I	DS3e	2º; %7,4
	VE3a			VE3c			VE3e	
	IH3a			IH3c			IH3e	

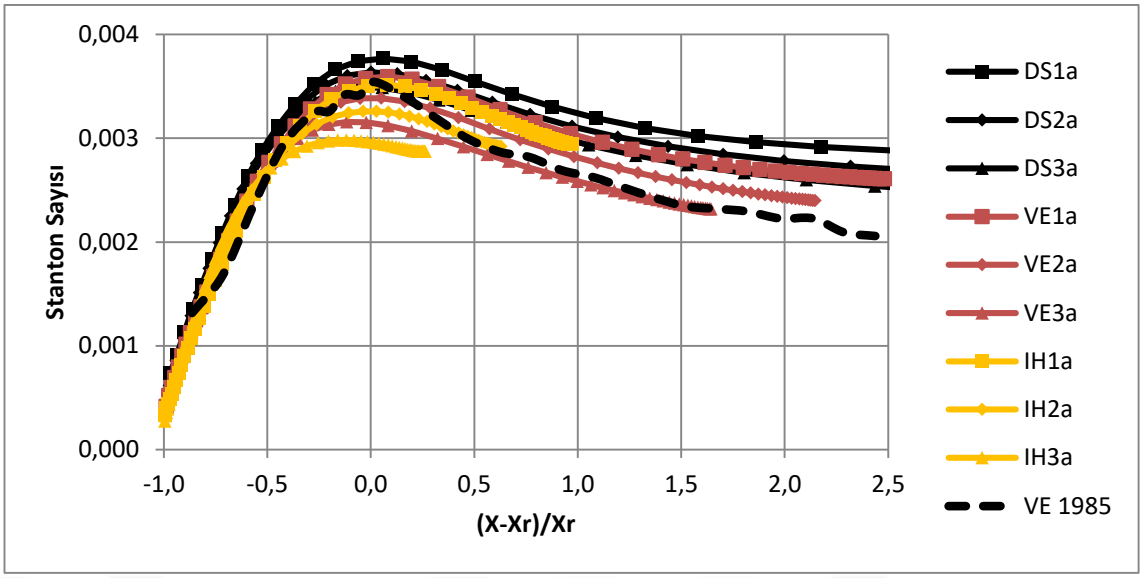
Çizelge 4.9'da belirtilen %0,2'lik türbülans seviyesinin uygulanmış olduğu A, B ve C gruplarında, aynı türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.187 – 4. 4.191'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar genişleme oranında basınç gradyeni arttıkça yeniden birleşme bölgesinin büyüdüğünü, Stanton ve Nusselt sayılarında azalma olduğunu ve buna bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca genişleme oranının artmasına bağlı olarak da aynı basınç gradyeninde yeniden birleşme bölgesinde dikkati çeken bir artışın olduğunu, Stanton ve Nusselt sayılarında artışın oluştuğunu ve buna bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin arttığını ortaya koymuştur.



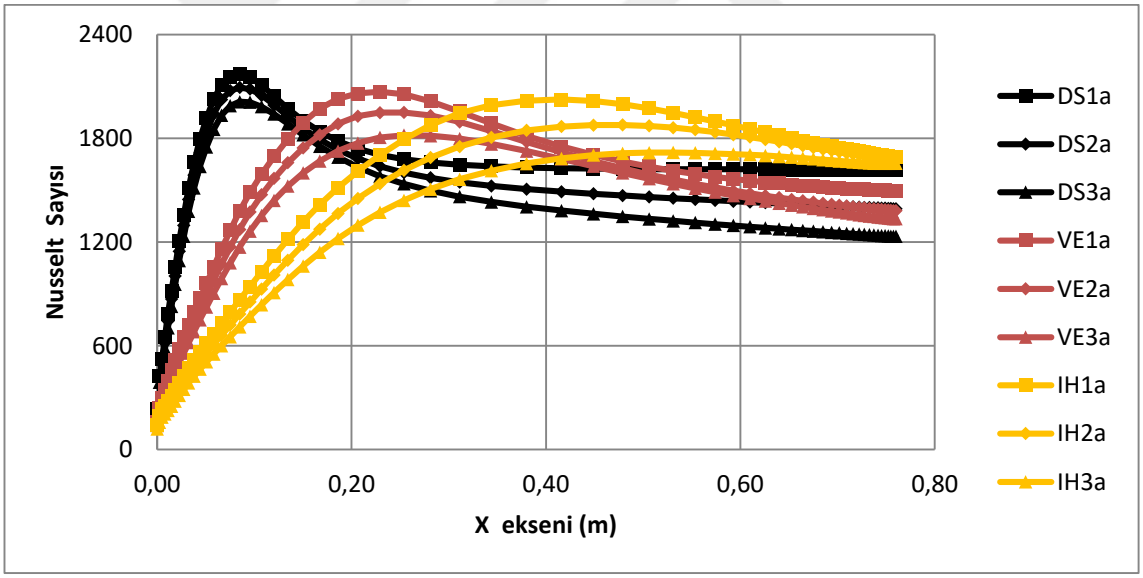
Şekil 4.187. %0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre x ekseni hızı



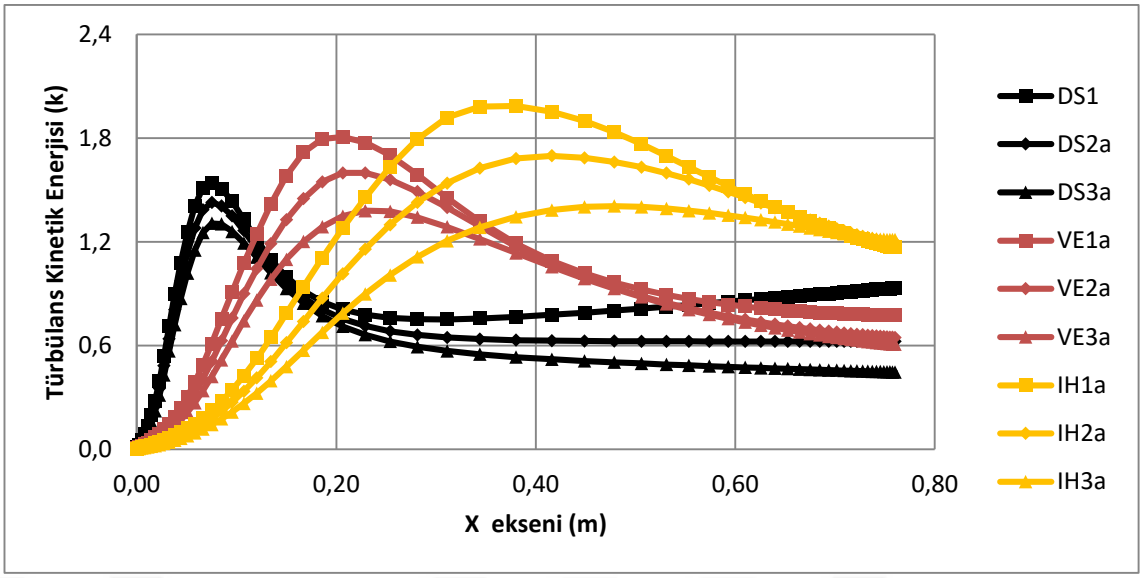
Şekil 4.188. %0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı



Şekil 4.189. %0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi

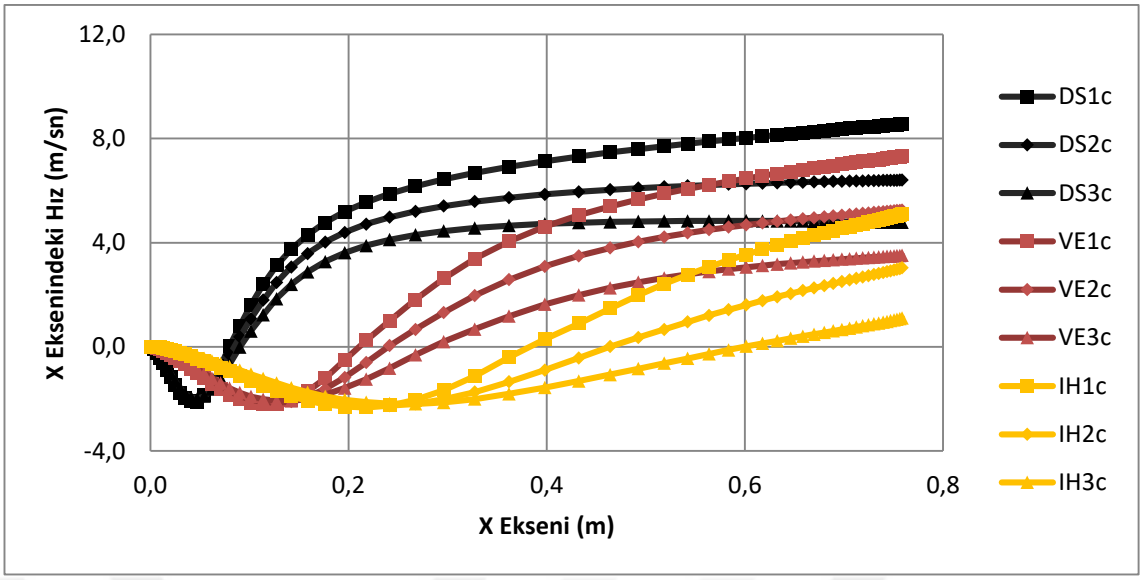


Şekil 4.190. %0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Nusselt sayısı

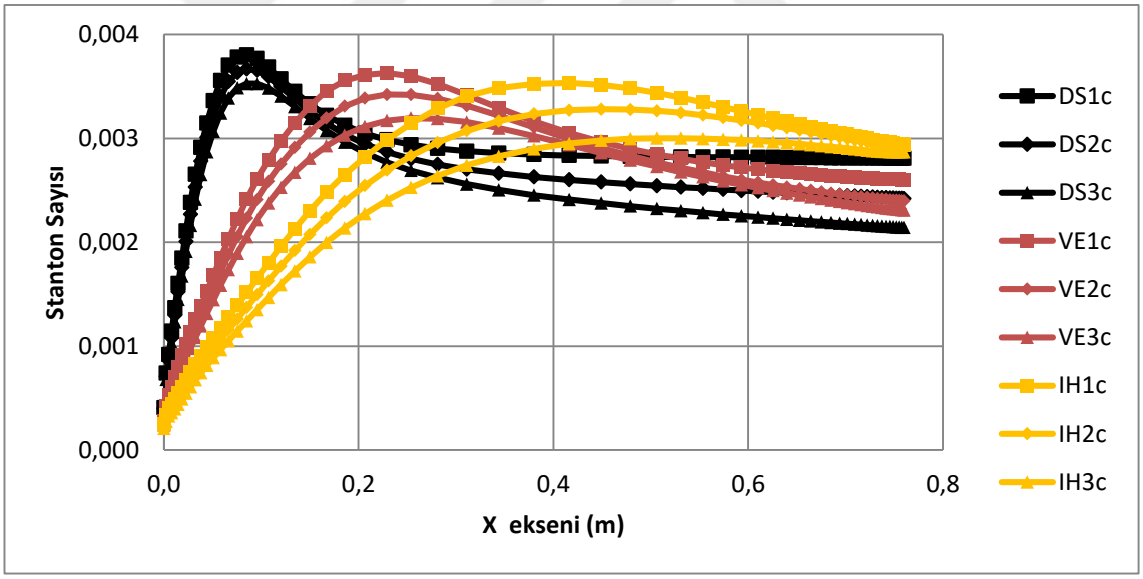


Şekil 4.191. %0,2 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre türbülans kinetik enerjisi

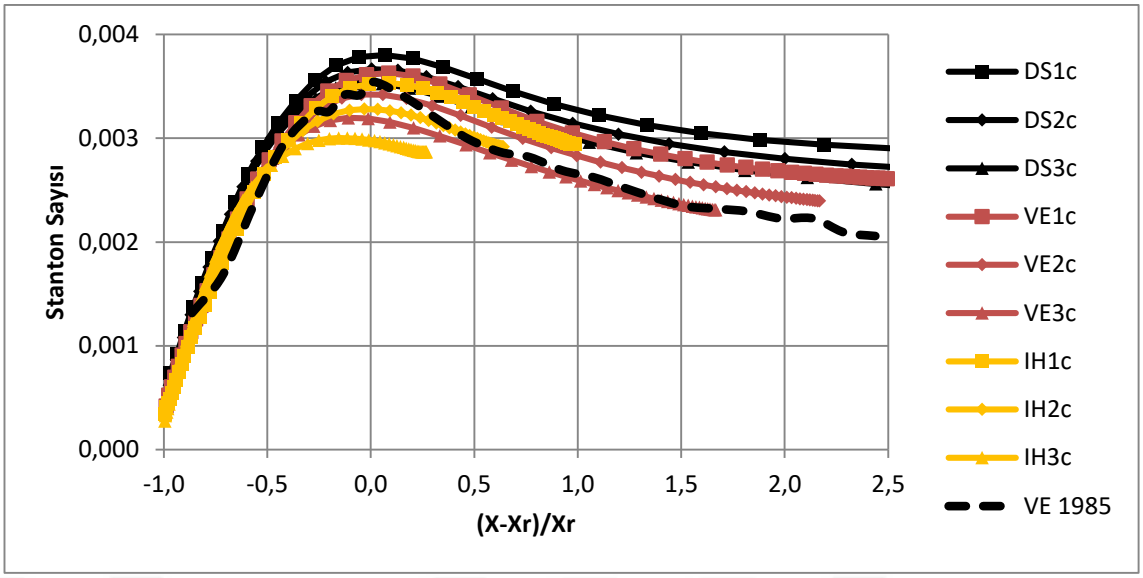
Çizelge 4.9'da belirtilen %3,3'lük türbülans seviyesinin uygulanmış olduğu D, E ve F gruplarında, aynı türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.192 – 4.196'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar %0,2'lik türbülans seviyesinde olduğu gibi aynı genişleme oranında basınç gradyeni arttıkça yeniden birleşme bölgesinin büyüdüğünü, Stanton ve Nusselt sayılarında azalma olduğunu ve buna bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca genişleme oranının artmasına bağlı olarak da aynı basınç gradyeninde yeniden birleşme bölgesinde dikkati çeken bir artışın olduğunu, Stanton ve Nusselt sayılarında artışın oluştuğunu ve buna bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin arttığını ortaya koymuştur.



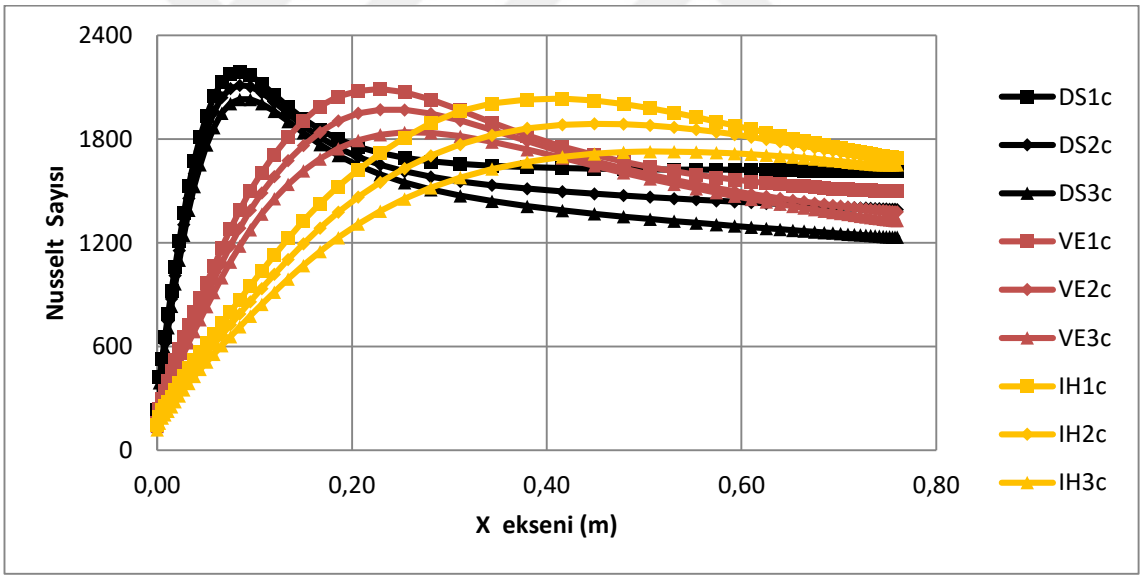
Şekil 4.192. %3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre x ekseni hızı



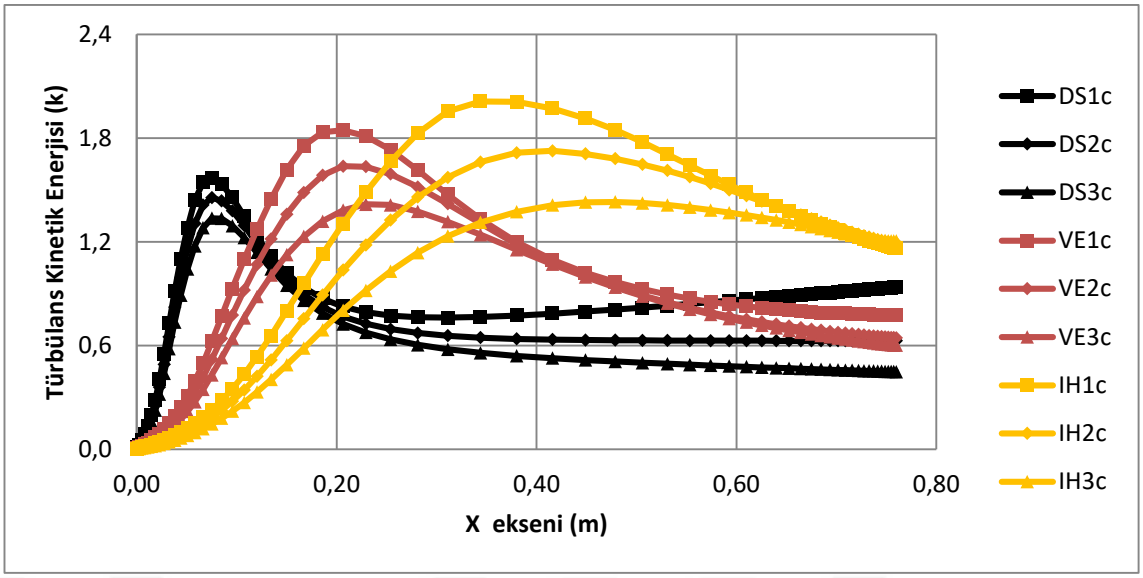
Şekil 4.193. %3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı



Şekil 4.194. %3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi

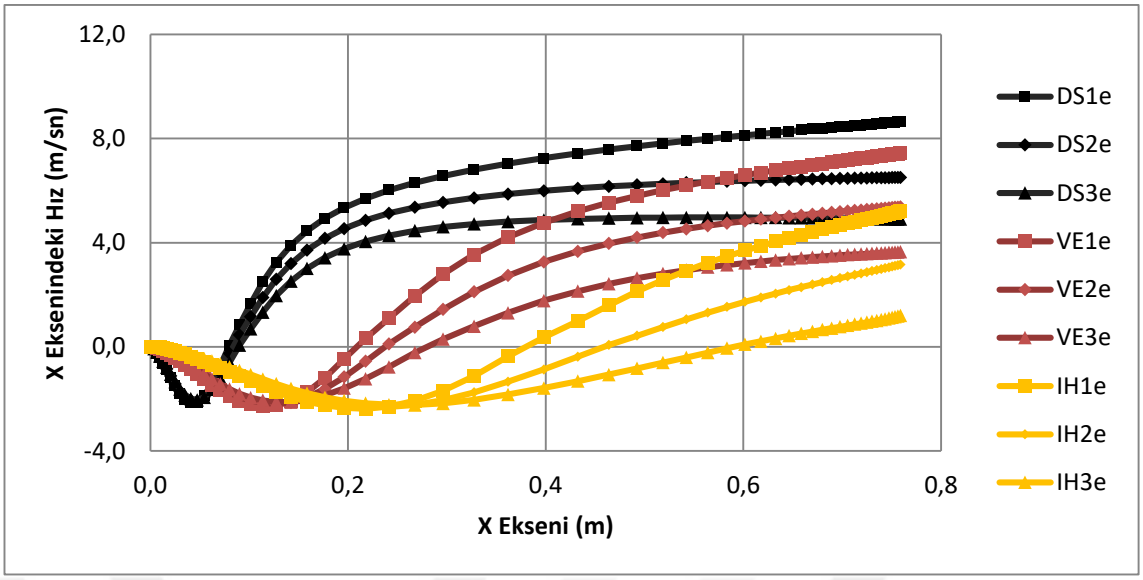


Şekil 4.195. %3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Nusselt sayısı

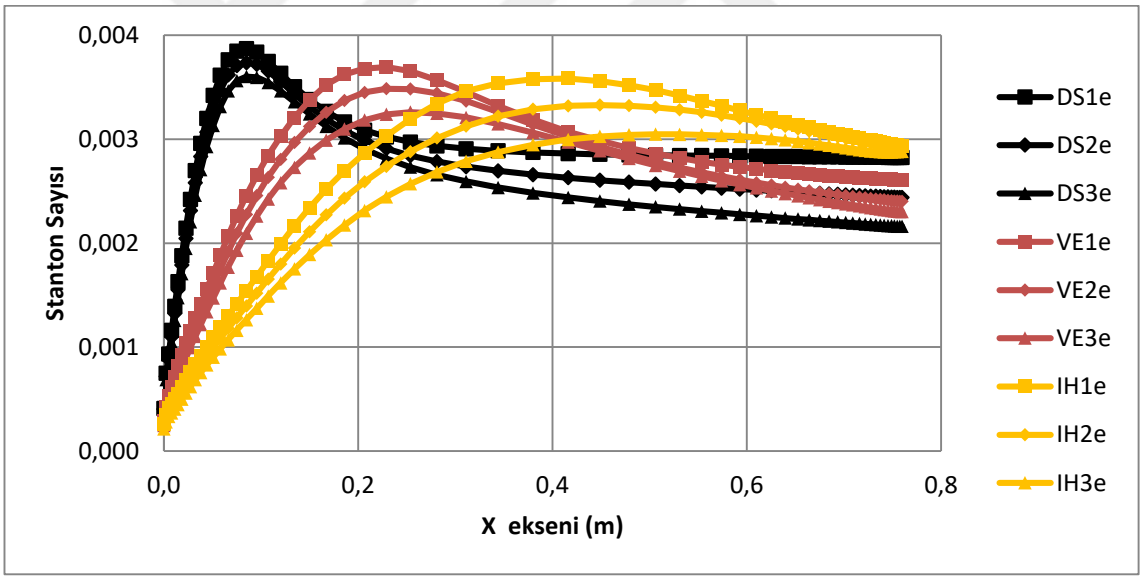


Şekil 4.196. %3,3 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre türbülans kinetik enerjisi

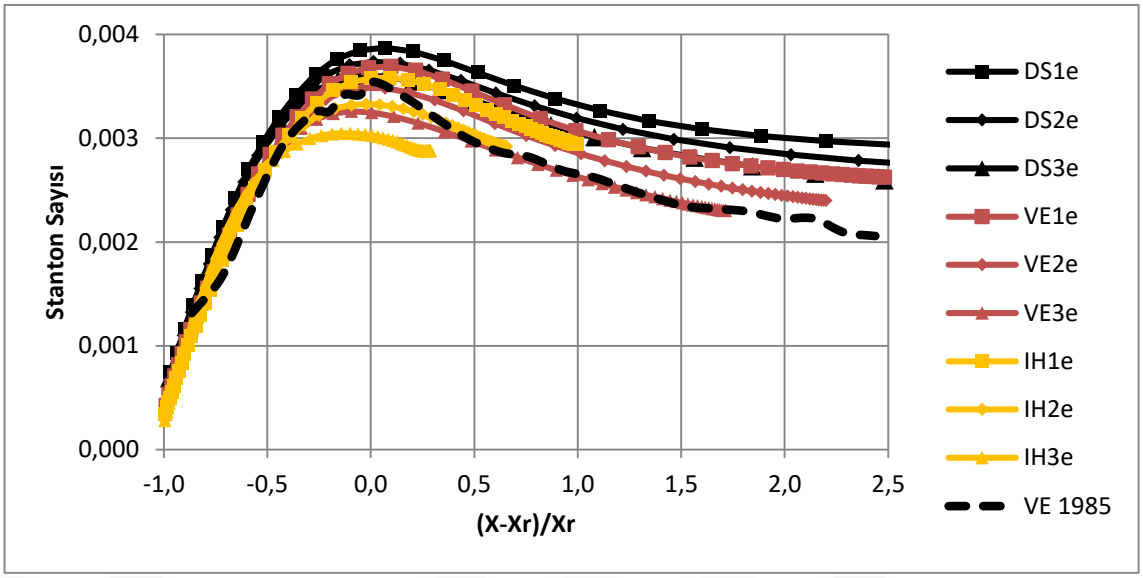
Çizelge 4.9'da belirtilen %7,4'lük türbülans seviyesinin uygulanmış olduğu G, H ve I gruplarında, aynı türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.197 – 4.201'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar %0,2'lik ve %3,3'lik türbülans seviyelerinde olduğu gibi aynı genişleme oranında basınç gradyeni arttıkça yeniden birleşme bölgesinin büyüdüğünü, Stanton ve Nusselt sayılarında azalma olduğunu ve buna bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca genişleme oranının artmasına bağlı olarak da aynı basınç gradyeninde yeniden birleşme bölgesinde dikkati çeken bir artışın olduğunu, Stanton ve Nusselt sayılarında artışın oluştuğunu ve buna bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin arttığını ortaya koymuştur.



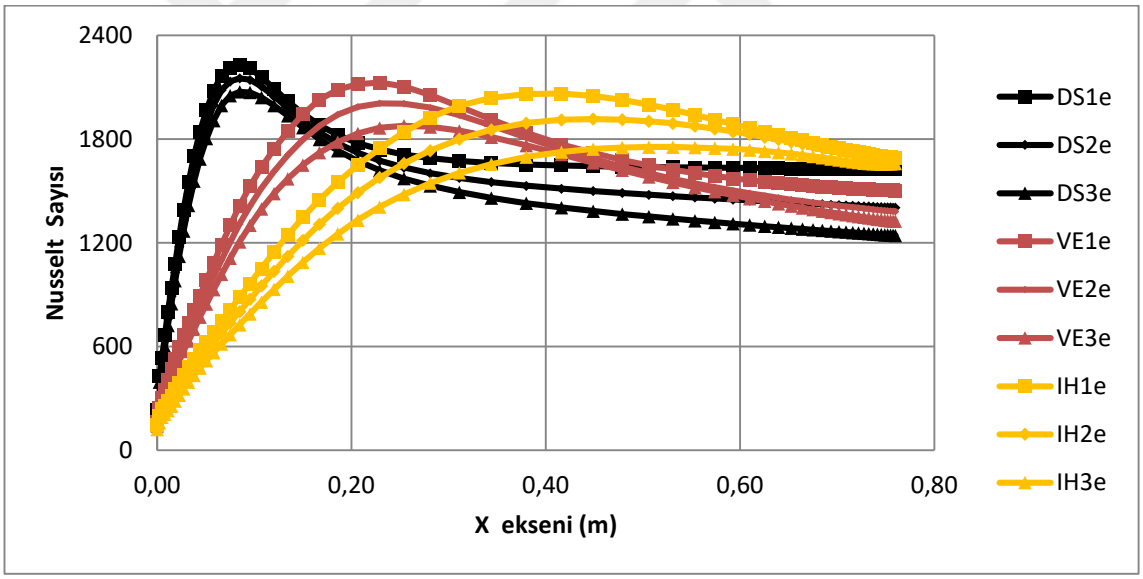
Şekil 4.197. %7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre x ekseni hızı



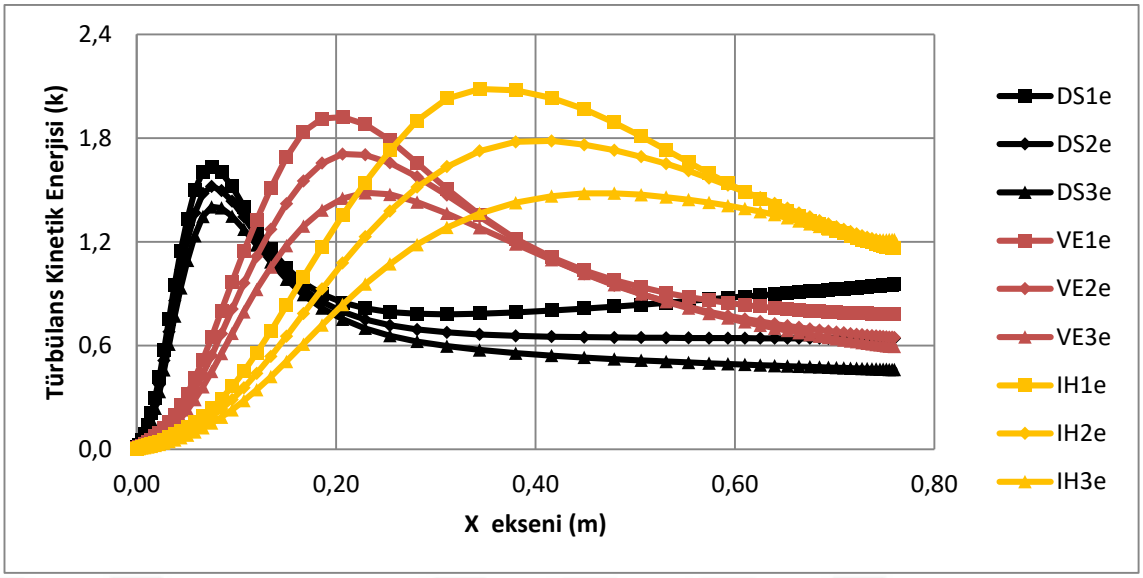
Şekil 4.198. %7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı



Şekil 4.199. %7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi



Şekil 4.200. %7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre Nusselt sayısı



Şekil 4.201. %7,4 türbülans seviyesi için genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimine göre türbülans kinetik enerjisi

Aynı türbülans seviyesine sahip durumlarda gerçekleştirilen genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimlerine göre yapılan analizler sonucunda ortaya çıkan en dikkat çekici hususlar ise aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

1. Genişleme oranının düşük olduğu durumlar için basınç gradyeninin artması akış karakteristiğini değerlendirme açısından dikkat edebileceğimiz yeniden birlikte bölgesinin büyümesinde etkili olmasına rağmen bu büyüme miktarı oldukça düşüktür. Aynı şekilde basınç gradyeninin artışı ısı transferi karakteristiklerini de değerlendirme açısından dikkat edebileceğimiz Stanton ve Nusselt sayılarında azalmaya sebep olmakta, ancak bu azalma da oldukça düşük gerçekleşmektedir.
2. Genişleme oranı büyüdükçe basınç gradyeninin artması, yeniden birleşme bölgesinin büyümesinde daha yüksek etki oluşturmaktadır. Aynı şekilde Stanton ve Nusselt sayılarındaki azalmayı da daha belirginleşmektedir.
3. Türbülans kinetik enerjisi ise genişleme oranının düşük olduğu durumlar için daha az, genişleme oranının artmasına bağlı olarak artış eğilimi göstermektedir. Aynı genişleme oranı için farklı gradyenlerdeki değerlendirmelerde ise düşük basınç gradyeni yüksek kinetik enerji oluşturmaktadır. Bunun sebebi ise oluşan daha yoğun geri dönme bölgesinden kaynaklanmaktadır.

4.1.3.2. Türbülans Seviyesi Değişimine Göre Karşılaştırmalar

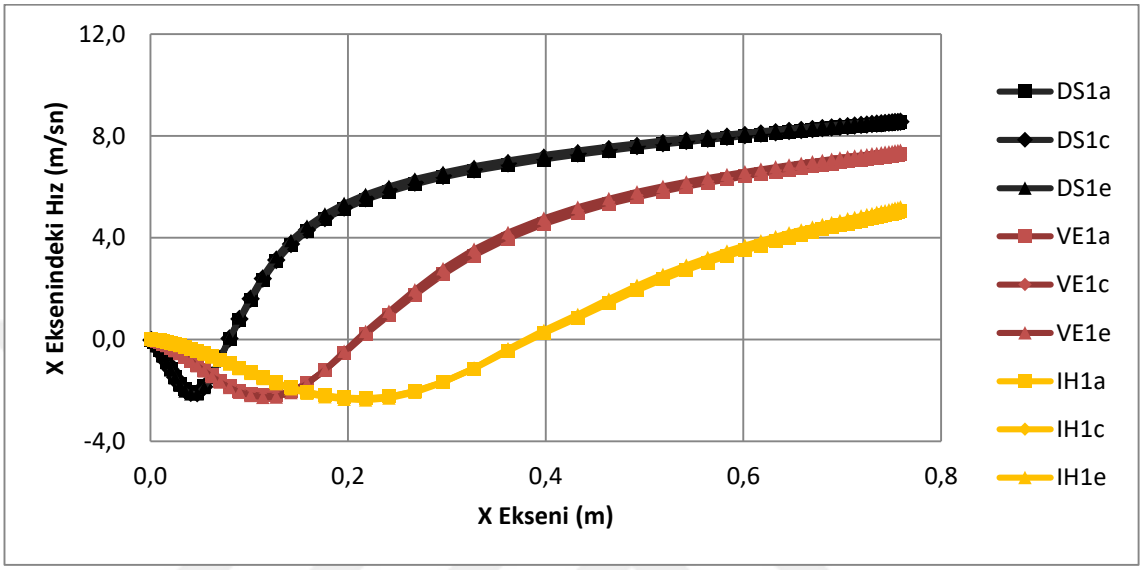
Modifiye edilmiş çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre türbülans seviyesi değişimine göre karşılaştırmalar gerçekleştirilmiş ve türbülans seviyesi değişiminin ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi yapılmıştır. Genişleme oranının 1,43 olduğu Isomoto ve Honami (1989) analojisinde 4 ve 6 derecelik basınç gradyeni uygulamasında akış karakteristikleri için değerlendirilebilir sonuçların elde edilememesinin ardından her üç genişleme oranı için -2, 0 ve 2 derecelik basınç gradyeni değişimleri için değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca türbülans seviyesindeki değişimler için de kullanılan seviyeler aradaki farkların daha iyi anlaşılabilir olması açısından sadece %0,2, %3,3 ve %7,4'lik türbülans seviyesi ele alınmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar ise toplam dokuz grupta değerlendirmiş ve ele alınan gruplar Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Türbülans seviyesine göre karşılaştırma grupları

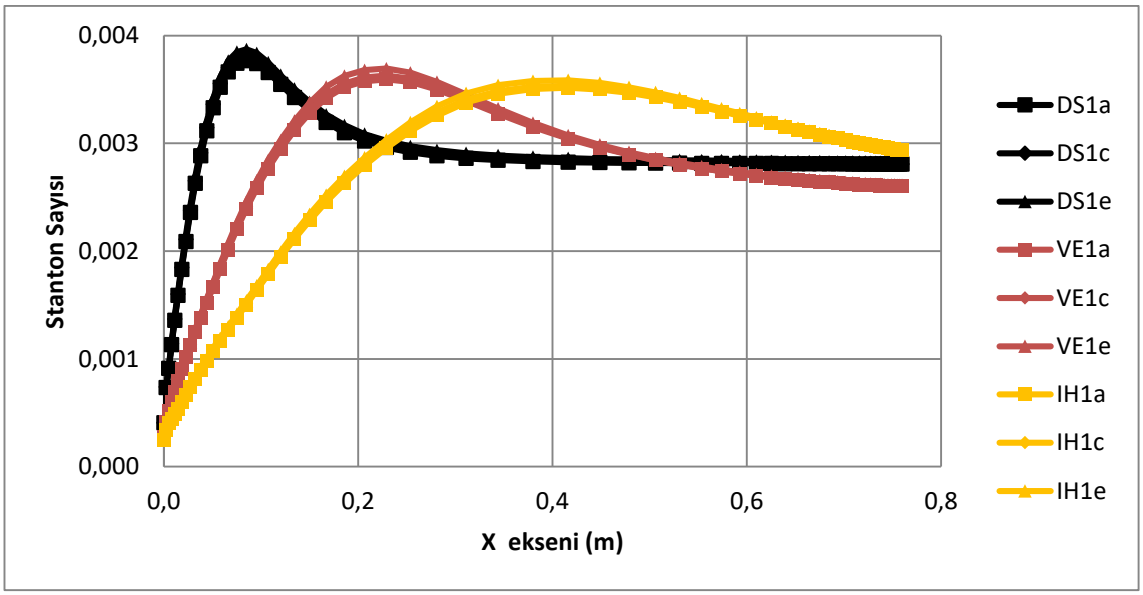
Grup	Alt Grup	Genişleme Oranı ve Basınç Gradyeni	Grup	Alt Grup	Genişleme Oranı ve Basınç Gradyeni	Grup	Alt Grup	Genişleme Oranı ve Basınç Gradyeni
A	DS1a	1,11; -2º	D	DS2a	1,11; 0º	G	DS3a	1,11; 2º
	DS1c			DS2c			DS3c	
	DS1e			DS2e			DS3e	
B	VE1a	1,25; -2º	E	VE2a	1,25; 0º	H	VE3a	1,25; 2º
	VE1c			VE2c			VE3c	
	VE1e			VE2e			VE3e	
C	IH1a	1,43; -2º	F	IH2a	1,43; 0º	I	IH3a	1,43; 2º
	IH1c			IH2c			IH3c	
	IH1e			IH2e			IH3e	

Çizelge 4.10'da belirtilen -2º'lik basınç gradyeni uygulanmış olduğu A, B ve C gruplarında, aynı basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4. 202 – 4. 206'da gösterilmiştir. Aynı genişleme oranı için türbülans seviyesindeki artışın akış ve ısı karakteristikleri üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Buna göre türbülans seviyesi arttıkça yeniden birleşme bölgesi neredeyse değişmemekte ya da oldukça az küçülmektedir. Fakat genişleme oranındaki artış, yeniden birleşme bölgesinin

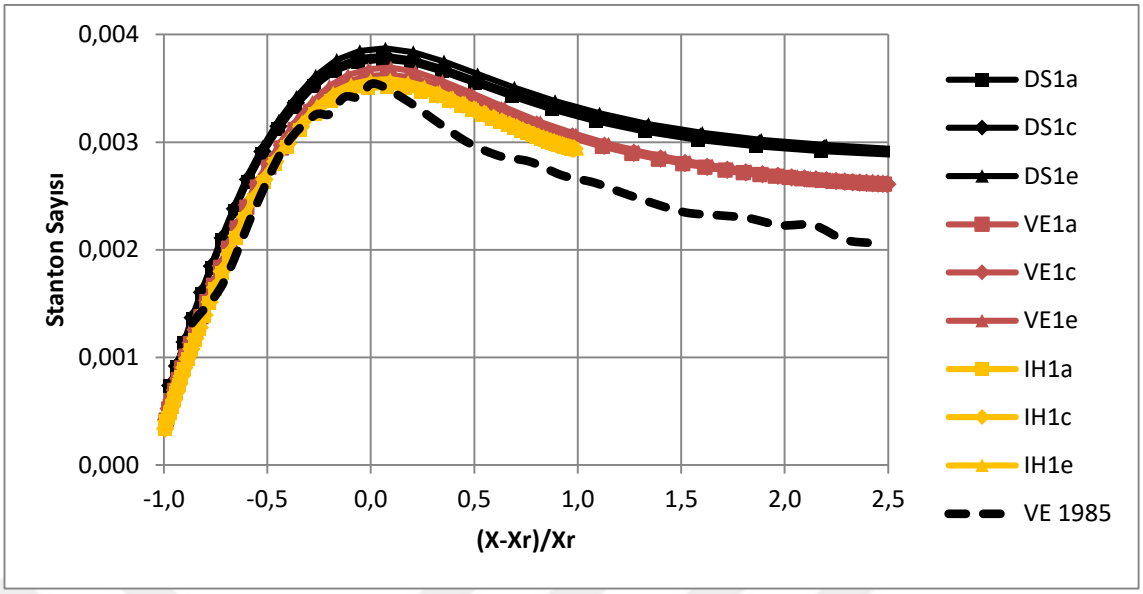
büyümesinde oldukça önemli büyük bir etkiye sahiptir. Isı karakteristikleri açısından değerlendirme yapılacak olursa da genişleme oranındaki artış Stanton ve Nusselt sayılarının artmasına neden olmaktadır. Aynı şekilde bu artışın türbülans kinetik enerjisini de arttırdığı görülmüştür.



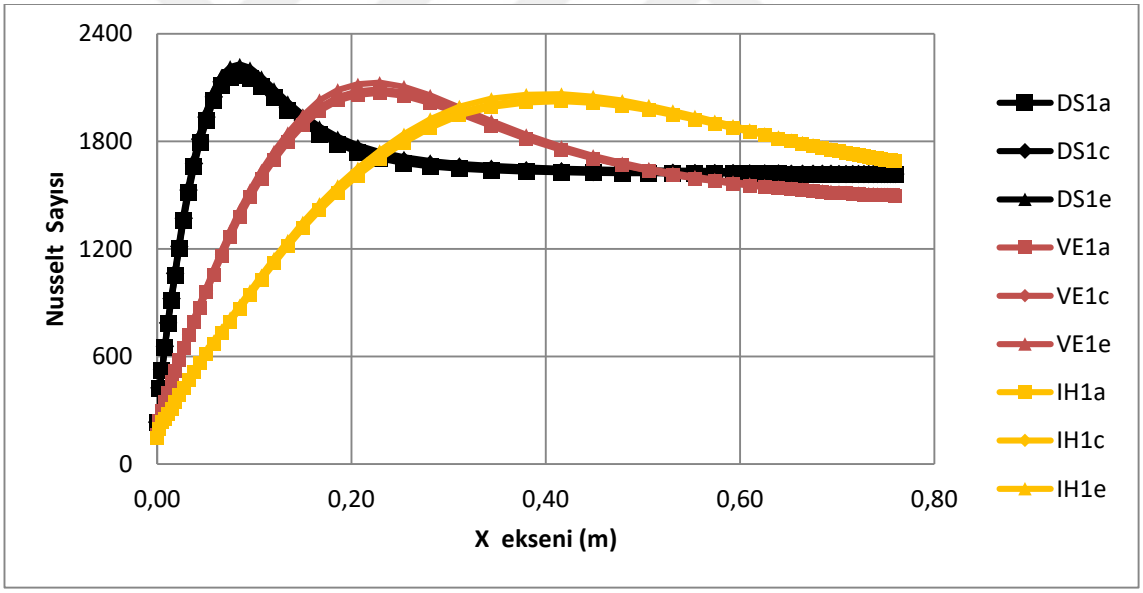
Şekil 4.202. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı



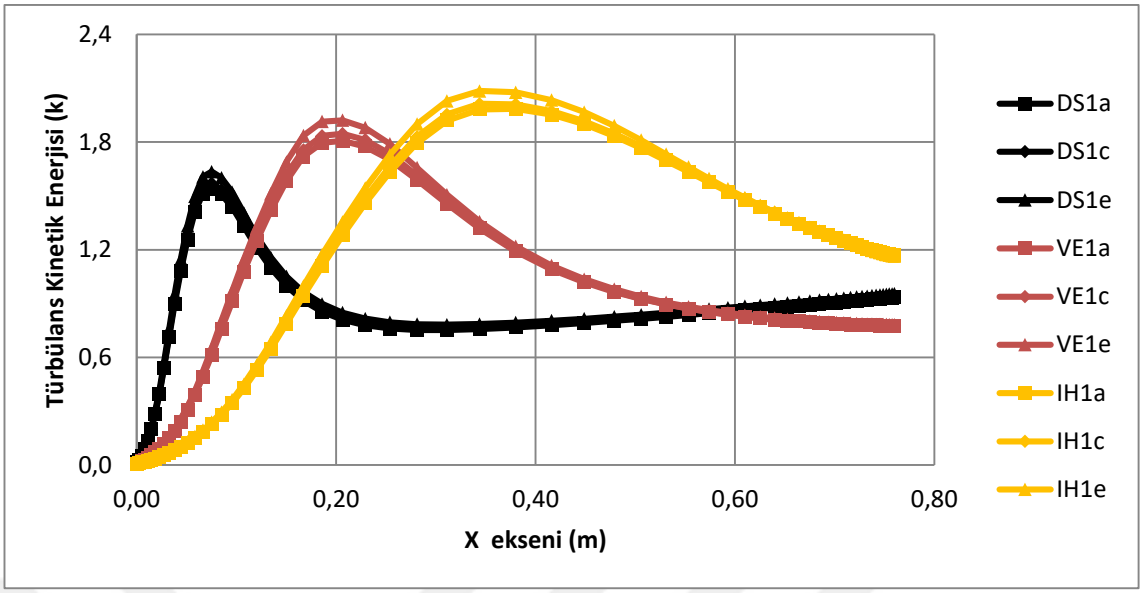
Şekil 4.203. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı



Şekil 4.204. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi

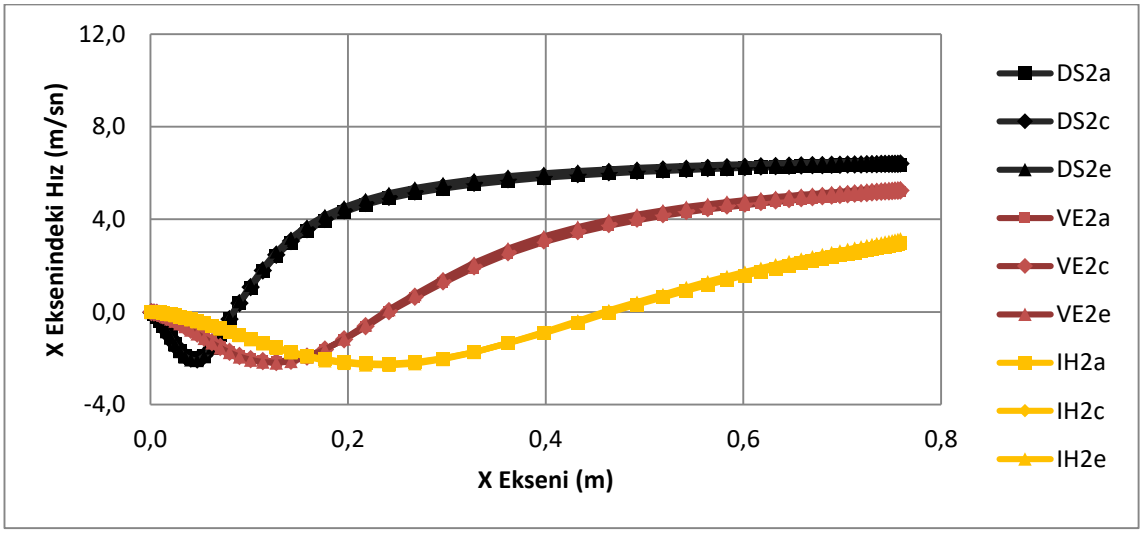


Şekil 4.205. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı

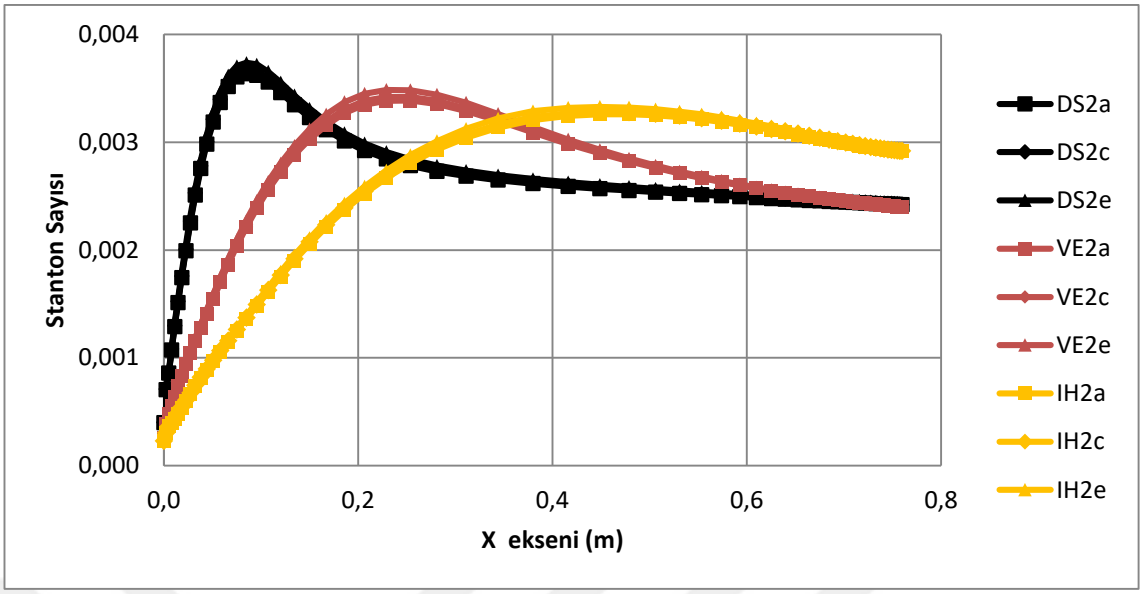


Şekil 4.206. -2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi

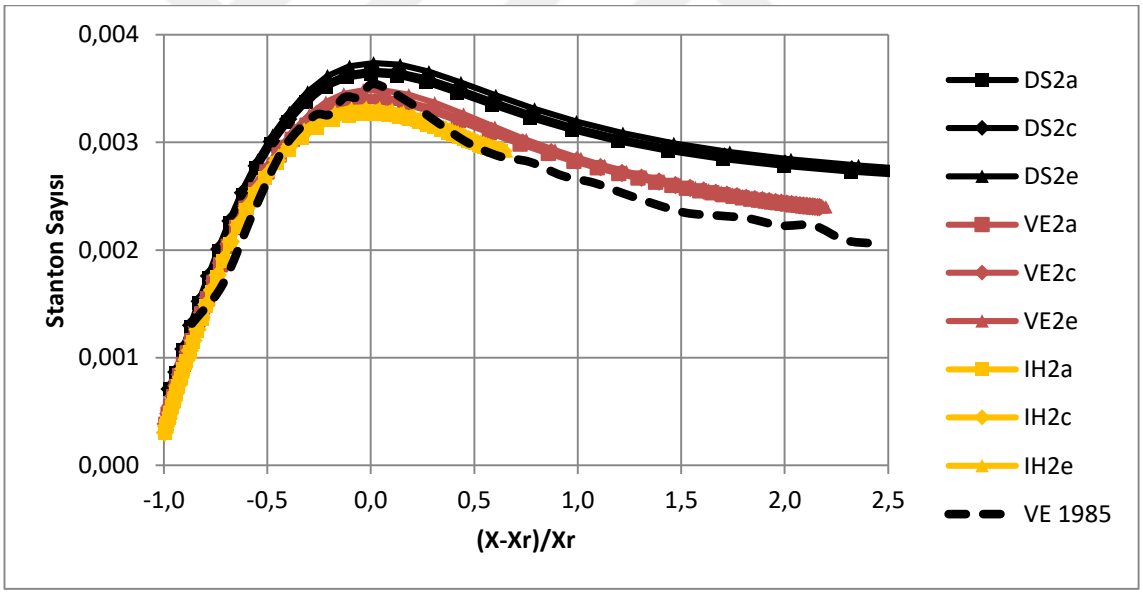
Çizelge 4.10'da belirtilen 0º'lik basınç gradyeni uygulanmış olduğu D, E ve F gruplarında, aynı basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4. 207 – 4. 211'de gösterilmiştir. Bu kapsamda yapılan değerlendirmeler sonucunda da -2º'lik basınç gradyeni uygulanmış modeldeki sonuçlara ulaşılmıştır.



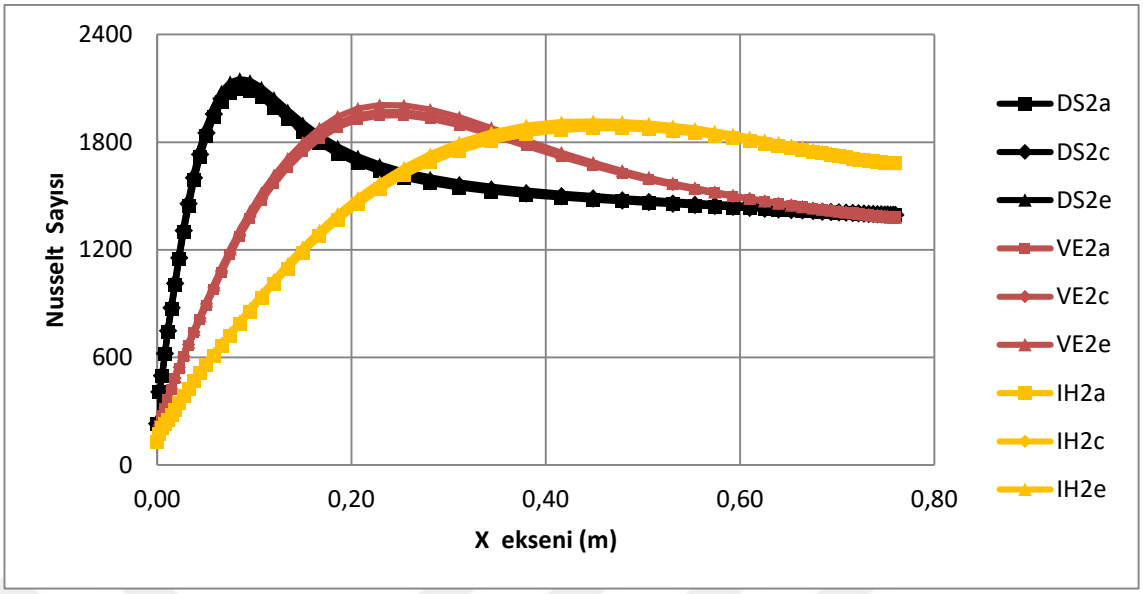
Şekil 4.207. 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı



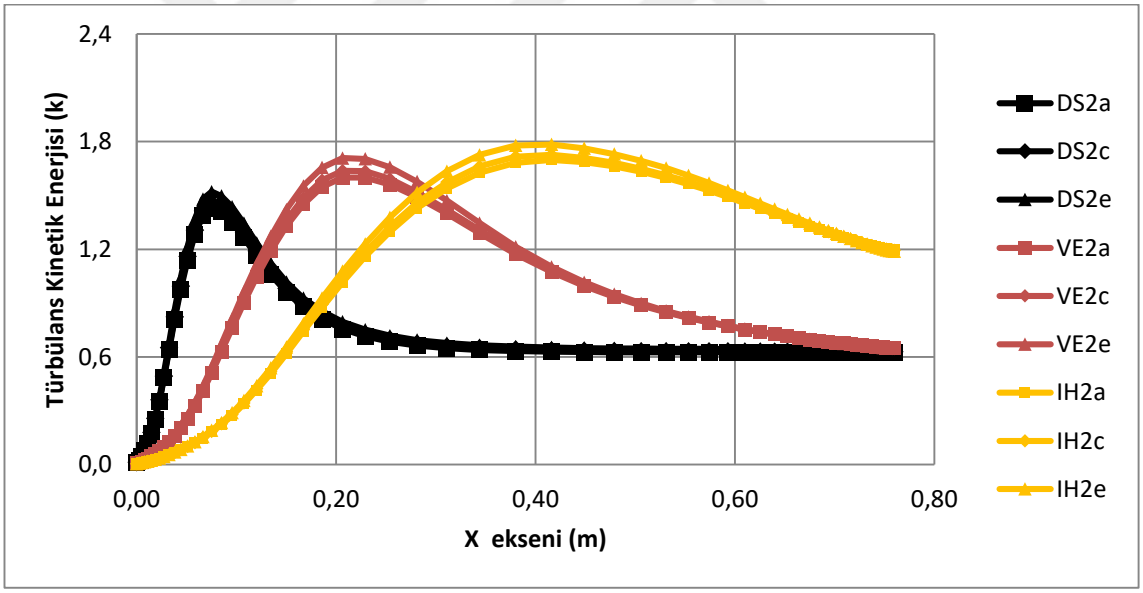
Şekil 4.208. 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı



Şekil 4.209. 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi



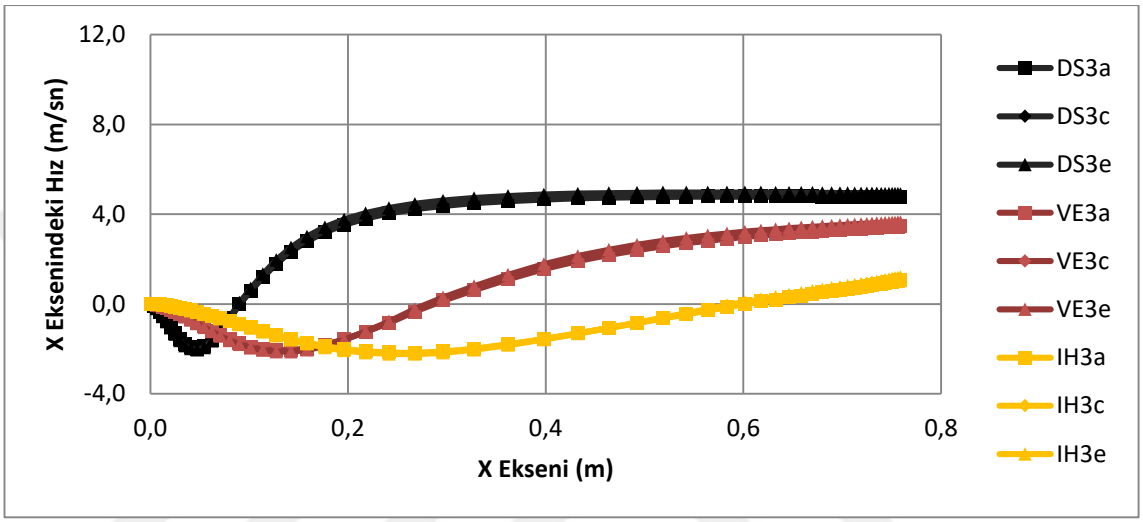
Şekil 4.210. 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı



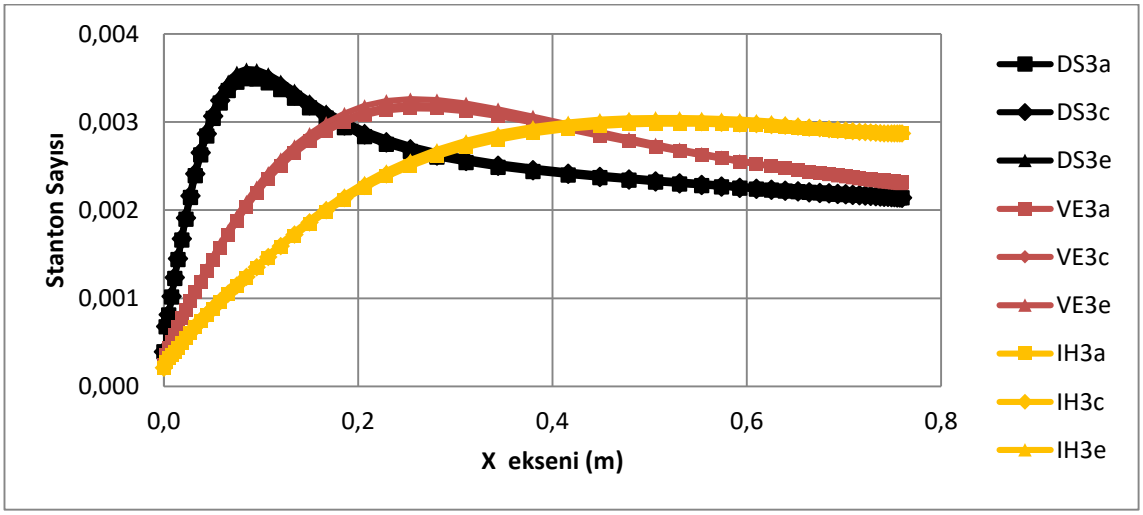
Şekil 4.211 0 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi

Çizelge 4.10'da belirtilen 2º'lik basınç gradyeni uygulanmış olduğu G, H ve I gruplarında, aynı basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4. 212 – 4. 216'da gösterilmiştir. Bu kapsamda yapılan değerlendirmeler sonucunda da diğer basınç gradyeni uygulanmış modellerdeki sonuçlara ulaşılmıştır. Bu sonuçlara göre aynı

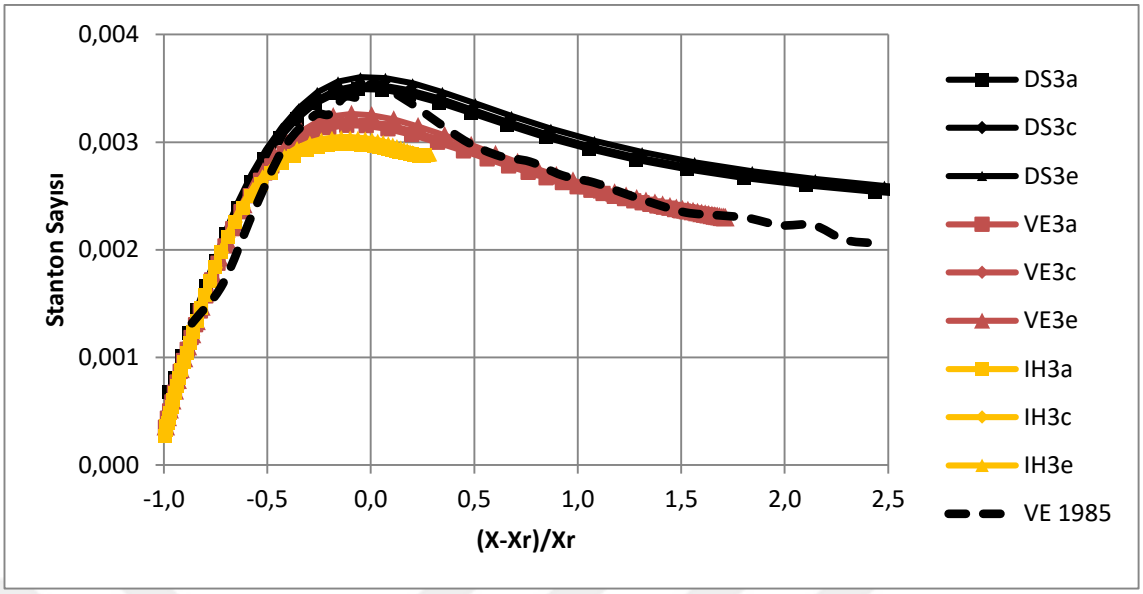
genişleme oranı için türbülans seviyesindeki artışın akış ve ısı karakteristikleri üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Türbülans seviyesi arttıkça yeniden birleşme bölgesinde neredeyse değişim olmamaktadır. Genişleme oranındaki artma ise yeniden birleşme bölgesinde büyük bir büyümeye neden olmaktadır. Aynı şekilde genişleme oranındaki artış, Stanton ve Nusselt sayıları ile türbülans kinetik enerjisini de arttırmaktadır.



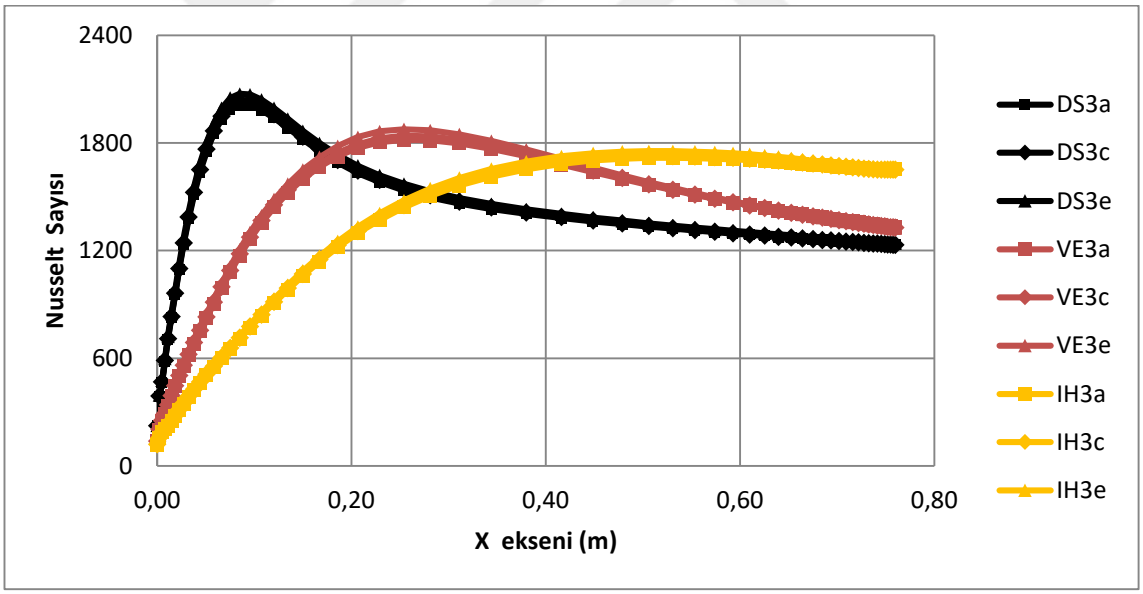
Şekil 4.212. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı



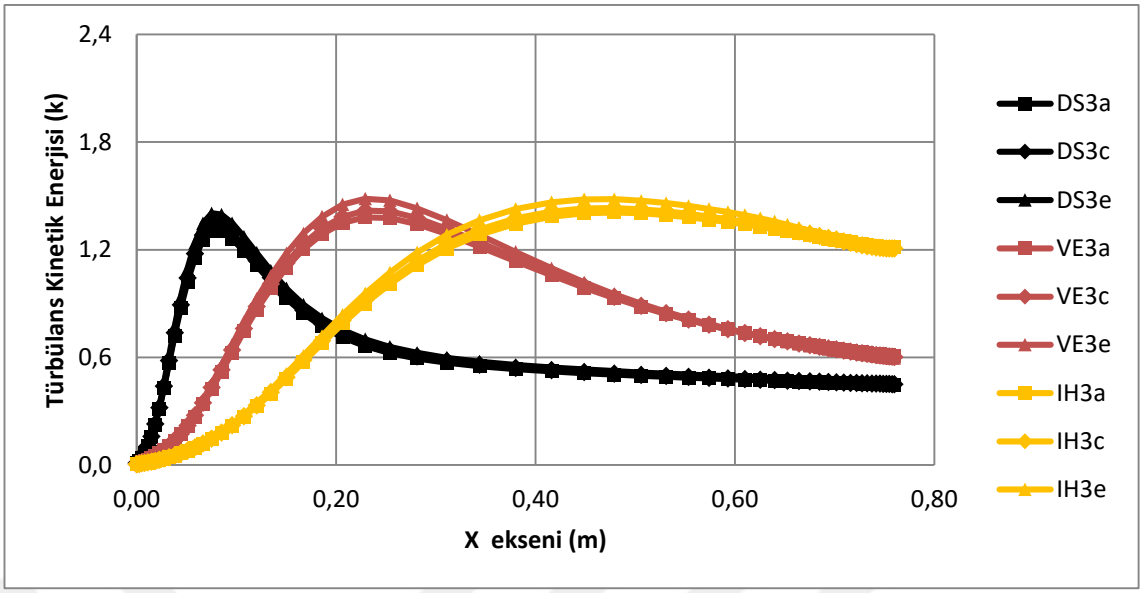
Şekil 4.213. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı



Şekil 4.214. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi



Şekil 4.215. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı



Şekil 4.216. 2 derece basınç gradyeni için genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi

Aynı basınç gradyeni değişimine sahip durumlarda gerçekleştirilen genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimlerine göre yapılan analizler sonucunda ortaya çıkan en dikkat çekici hususlar ise aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

1. Türbülans seviyesindeki değişimler aynı genişleme oranı üzerinde neredeyse herhangi bir etkiye sahip değil ya da oldukça düşük bir etkiye sahiptir.
2. Aynı genişleme oranında türbülans seviyesindeki artış akış karakteristiği değerlendirmesi bakımından yeniden birleşme bölgesinde ihmal edilebilecek kadar az bir küçülmeye neden olmaktadır. Aynı genişleme oranında türbülans seviyesindeki artış ise ısı karakteristikleri değerlendirmesi bakımından Stanton ve Nusselt sayılarında düşük bir değişime sebebiyet vermektedir. Türbülans seviyesi arttıkça Stanton ve Nusselt sayılarında da artış görülmüştür.
3. Hem ısı hem de akış karakteristiklerinin belirlenmesinde genişleme oranının etkisinin oldukça yüksek tespit edilmiştir. Aynı türbülans seviyesinde genişleme oranındaki artış için yeniden birleşme noktasında oldukça büyük bir büyümeye neden olmuştur. Fakat bu artış Stanton ve Nusselt sayılarında da azalmaya sebebiyet vermiştir. Bu düşüşün sebebi ise geri dönme bölgesindeki vortekslerin yoğunluğunun azalmasına bağlıdır.

4.1.3.3. Basınç Gradyeni Değişimine Göre Karşılaştırmalar

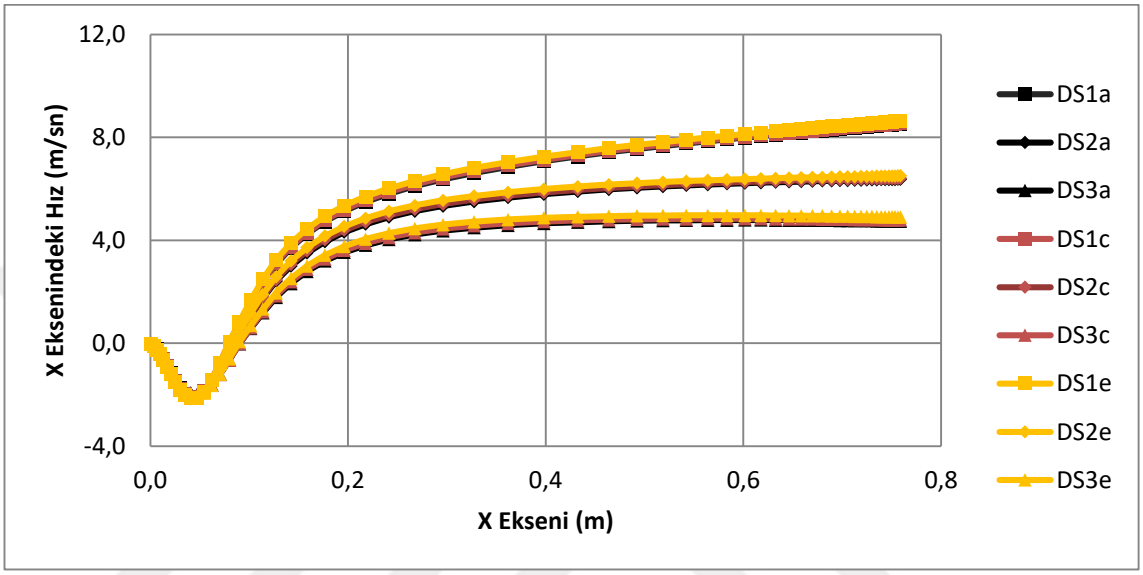
Modifiye edilmiş çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre basınç gradyeni değişimine göre karşılaştırmalar gerçekleştirilmiş ve basınç gradyeni değişiminin ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi yapılmıştır. Genişleme oranının 1,43 olduğu Isomoto ve Honami (1989) analojisinde 4 ve 6 derecelik basınç gradyeni uygulamasında akış karakteristikleri için değerlendirilebilir sonuçların elde edilememesinin ardından her üç genişleme oranı için -2, 0 ve 2 derecelik basınç gradyeni değişimleri için değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca türbülans seviyesindeki değişimler için de kullanılan seviyeler aradaki farkların daha iyi anlaşılabilir olması açısından sadece %0,2, %3,3 ve %7,4'lik türbülans seviyesi ele alınmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar ise toplam dokuz grupta değerlendirmiş ve ele alınan gruplar Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Basınç gradyenine göre karşılaştırma grupları

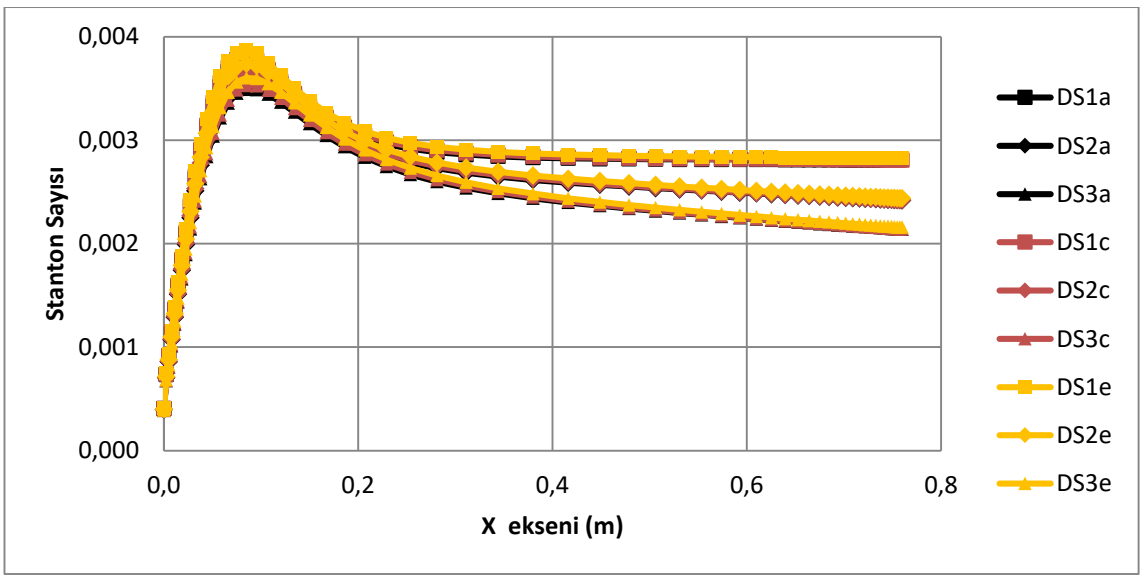
Grup	Alt Grup	Genişleme Oranı ve Türbülans Seviyesi	Grup	Alt Grup	Genişleme Oranı ve Türbülans Seviyesi	Grup	Alt Grup	Genişleme Oranı ve Türbülans Seviyesi
A	DS1a	1,1; %0,2	D	VE1a	1,25; %0,2	G	IH1a	1,43; %0,2
	DS2a			VE2a			IH2a	
	DS3a			VE3a			IH3a	
B	DS1c	1,11; %3,3	E	VE1c	1,25; %3,3	H	IH1c	1,43; %3,3
	DS2c			VE2c			IH2c	
	DS3c			VE3c			IH3c	
C	DS1e	1,11; %7,4	F	VE1e	1,25; %7,4	I	IH1e	1,43; %7,4
	DS2e			VE2e			IH2e	
	DS3e			VE3e			IH3e	

Çizelge 4.11'de belirtilen 1,1'lik genişleme oranına sahip A, B ve C gruplarında, aynı genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4. 217 – 4. 221'de gösterilmiştir. Aynı genişleme oranı için türbülans seviyesindeki artışın akış ve ısı karakteristikleri üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Buna göre türbülans seviyesi arttıkça yeniden birleşme bölgesi neredeyse değişmemekte ya da oldukça az küçülmektedir. Fakat basınç gradyenindeki artış, türbülans seviyesindeki artışa göre

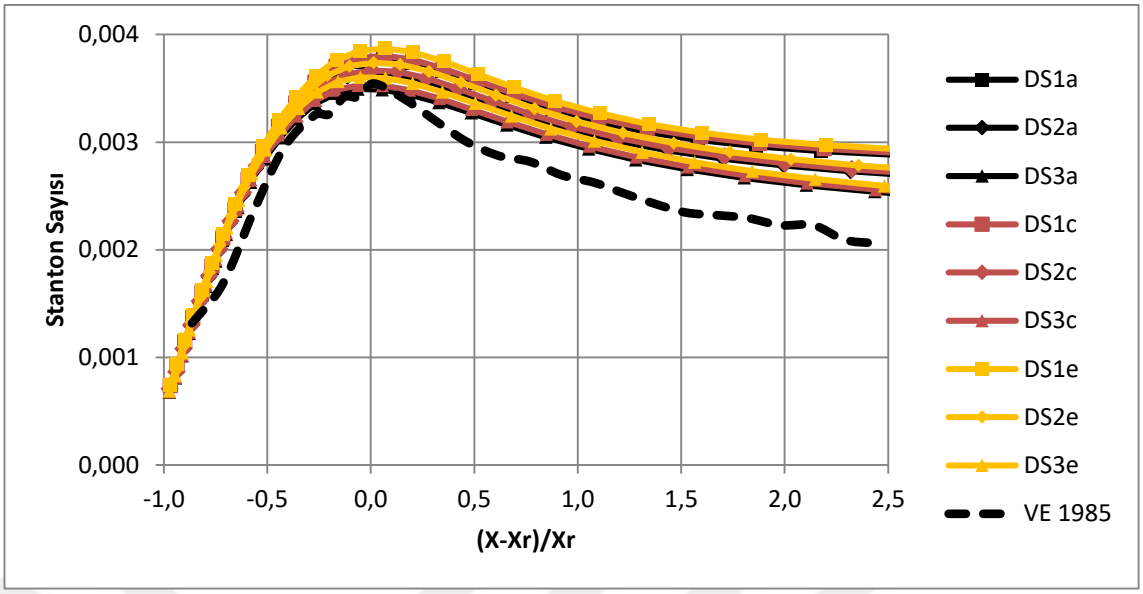
yeniden birleşme bölgesinin büyümesinde küçük bir etkiye sahip olmaktadır. Isı karakteristikleri açısından değerlendirme yapılacak olursa da türbülans seviyesindeki ve basınç gradyenindeki artış Stanton ve Nusselt sayılarının artmasına neden olmaktadır. Fakat bu artış görece daha azdır. Aynı şekilde bu artışın türbülans kinetik enerjisini de arttırdığı görülmüştür.



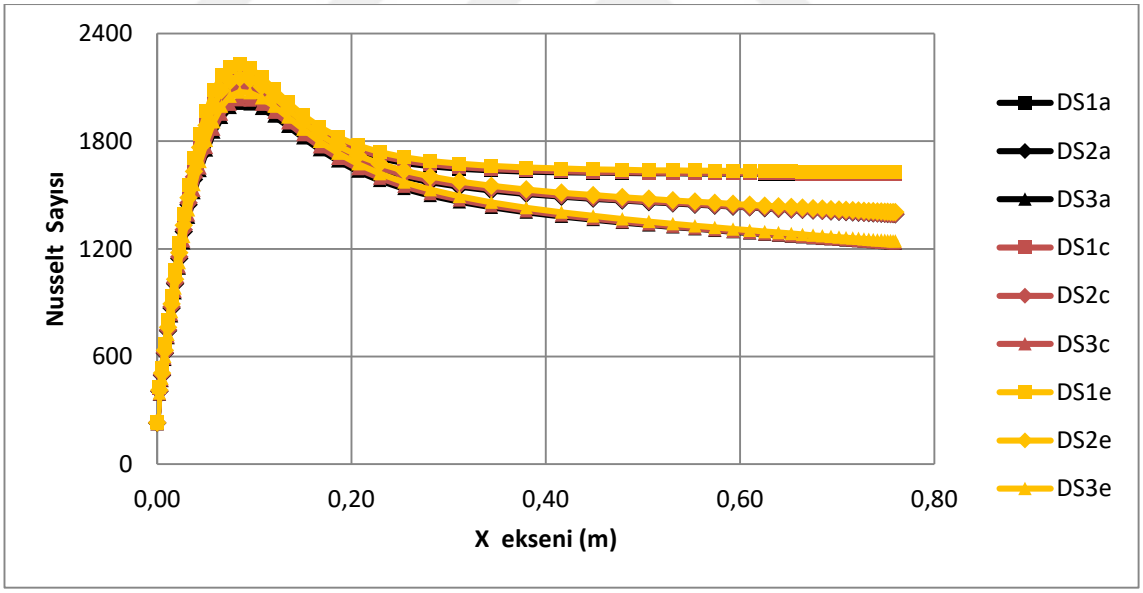
Şekil 4.217. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı



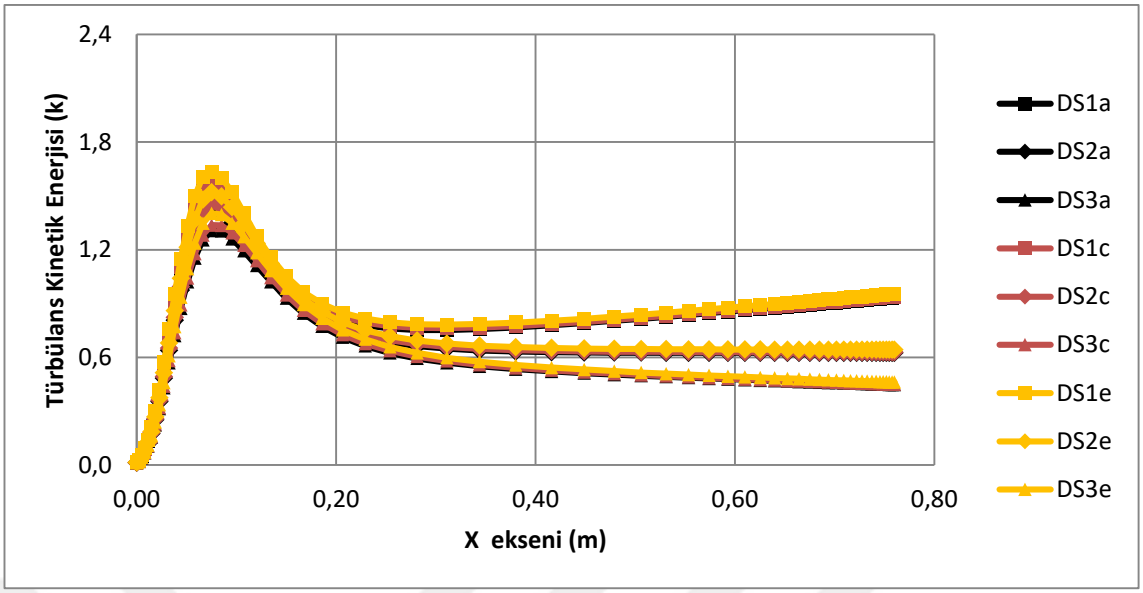
Şekil 4.218. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı



Şekil 4.219. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi

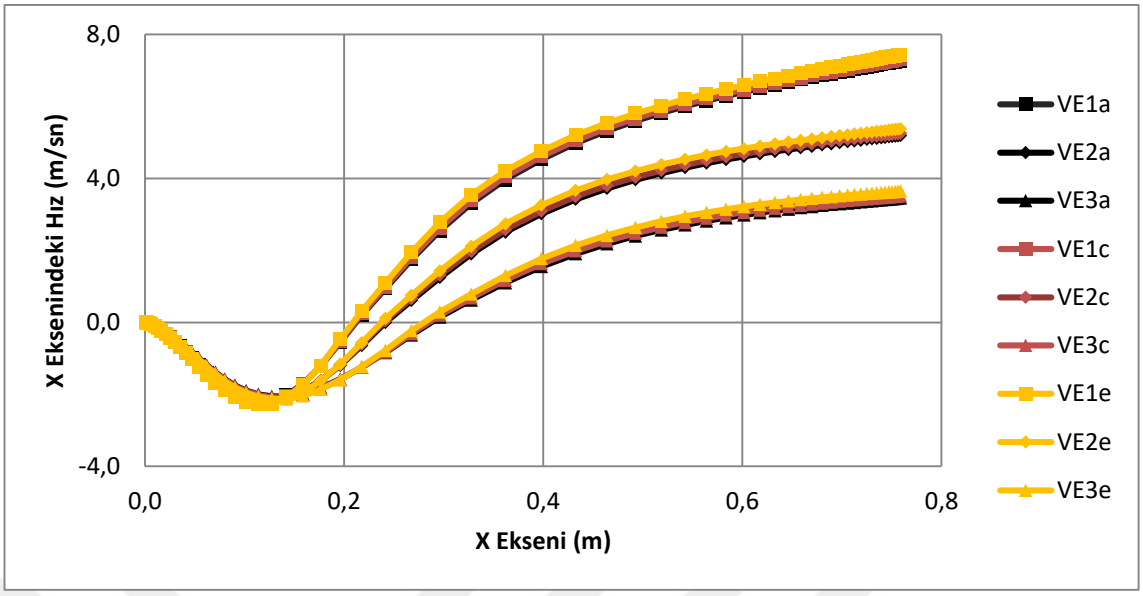


Şekil 4.220. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı

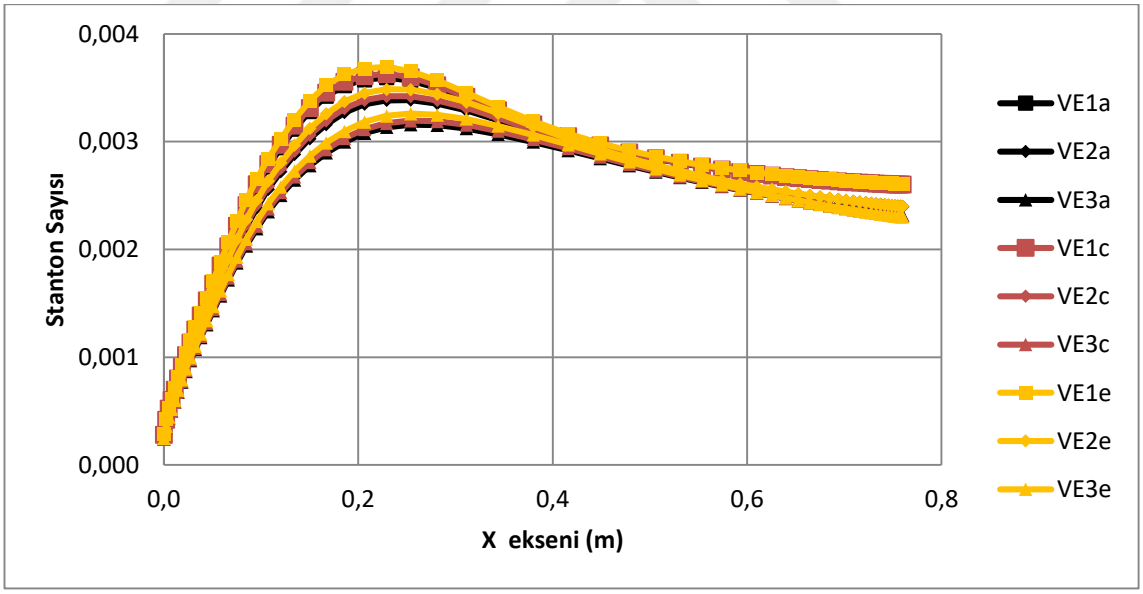


Şekil 4.221. 1,1 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi

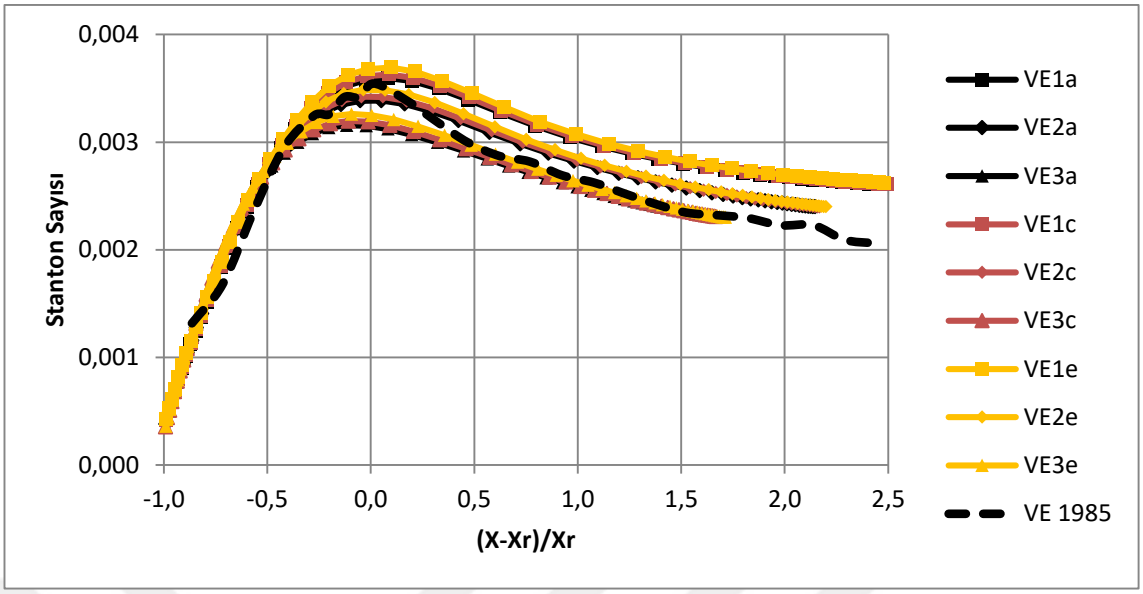
Çizelge 4.11'de belirtilen 1,25'lik genişleme oranına sahip D, E ve F gruplarında, aynı genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4. 222 – 4. 226'de gösterilmiştir. Aynı genişleme oranı için türbülans seviyesindeki artışın akış ve ısı karakteristikleri üzerindeki etkisinin oldukça düşük kalmaya devam etmektedir. Buna göre türbülans seviyesi arttıkça yeniden birleşme bölgesi neredeyse değişmemekte ya da oldukça az küçülmektedir. Fakat basınç gradyenindeki artış, genişleme oranının artmasıyla türbülans seviyesindeki artışa göre yeniden birleşme bölgesinin büyümesinde daha etkin bir karaktere sahip olmaktadır. Yeniden birleşme bölgesinde büyüme ve Stanton vil Nusselt sayılarındaki düşüş daha da belirginleşmektedir.



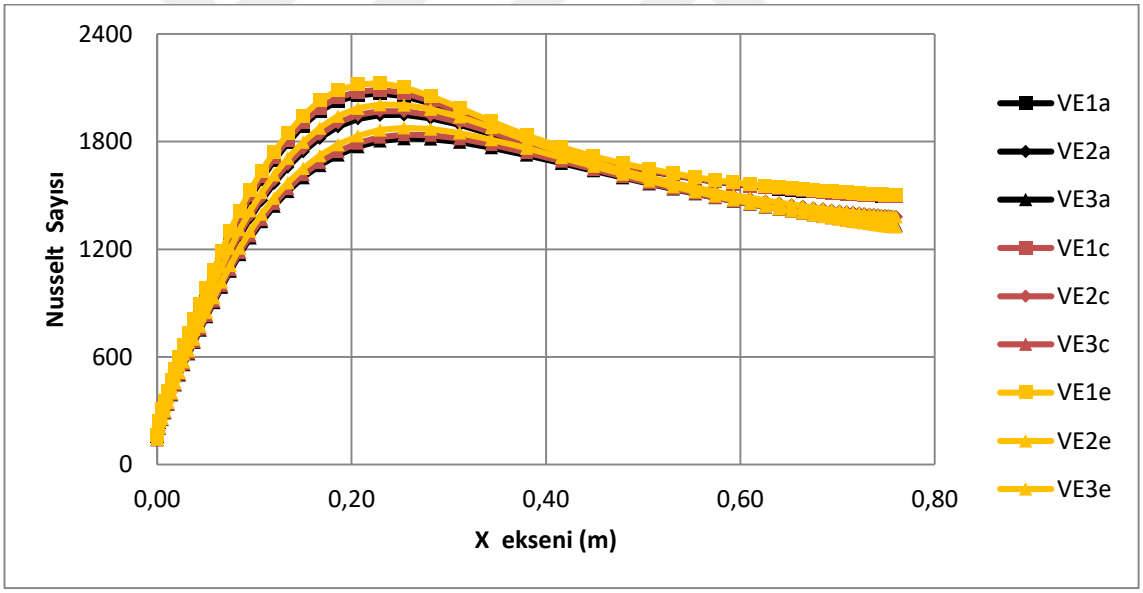
Şekil 4.222. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı



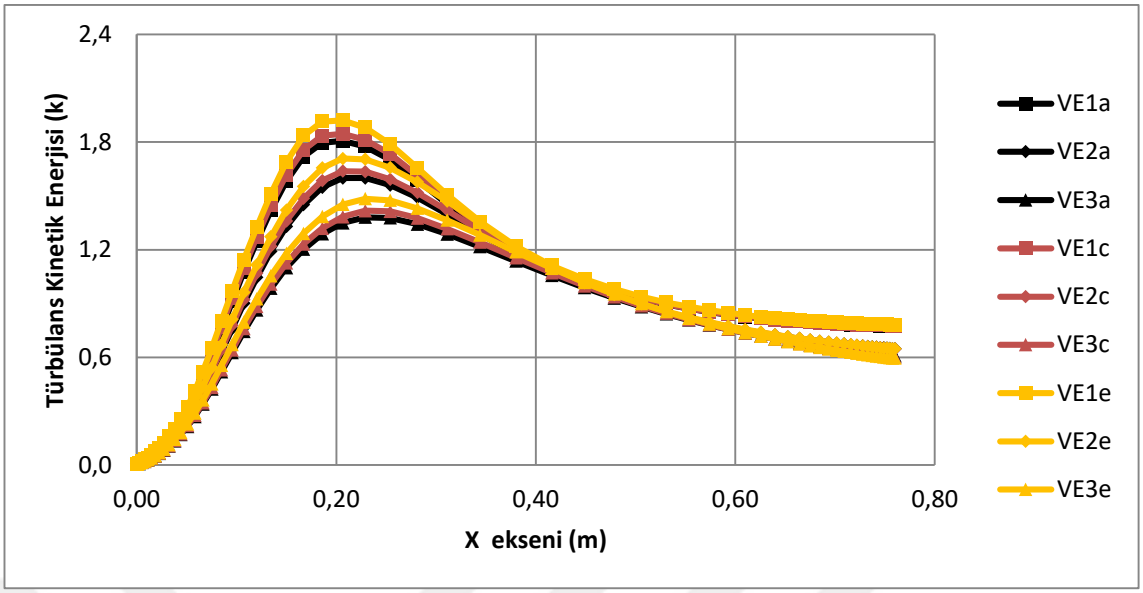
Şekil 4.223. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı



Şekil 4.224. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi

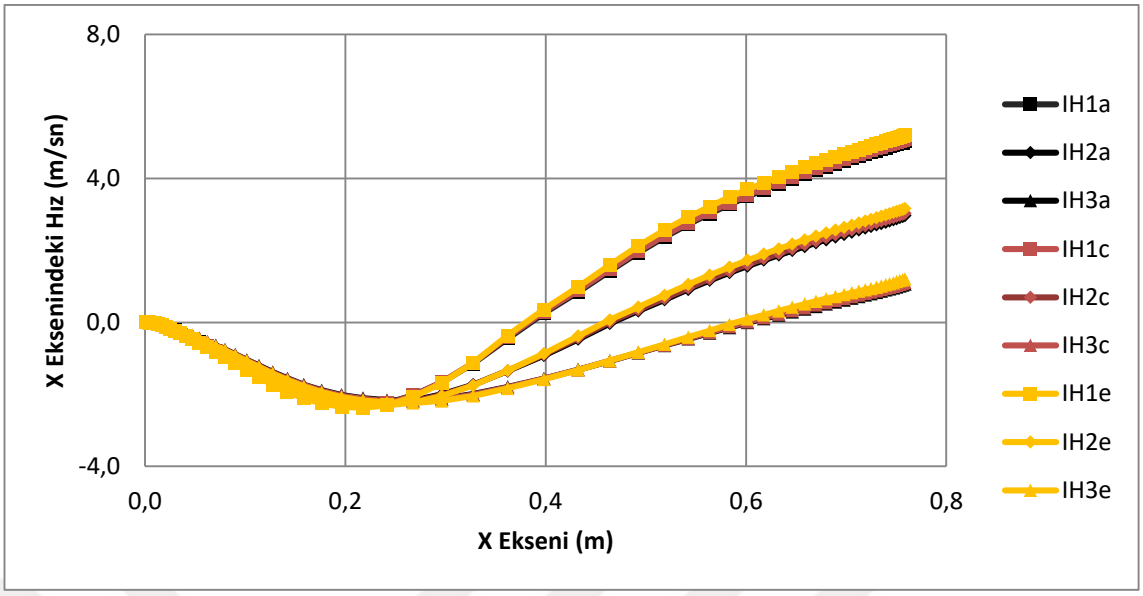


Şekil 4.225. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı

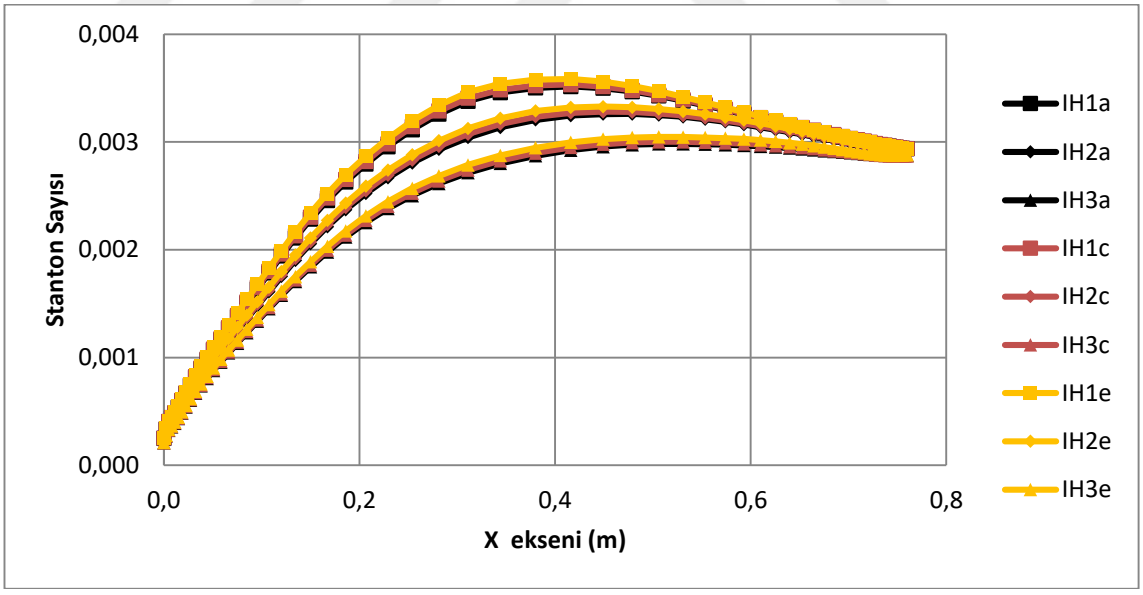


Şekil 4.226. 1,25 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi

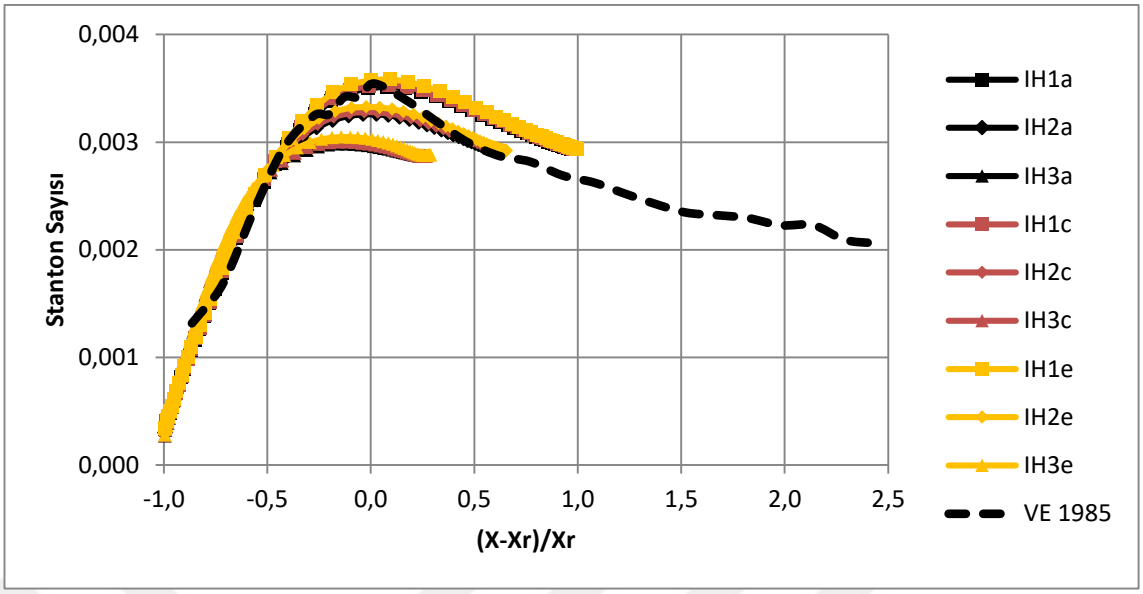
Çizelge 4.11'de belirtilen 1,43'lük genişleme oranına sahip G, H ve I gruplarında, aynı genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4. 227 – 4. 231'de gösterilmiştir. Aynı genişleme oranı için türbülans seviyesindeki artışın akış ve ısı karakteristikleri üzerindeki etkisinin oldukça düşük kalmaya devam etmektedir. Buna göre türbülans seviyesi arttıkça yeniden birleşme bölgesi neredeyse değişmemekte ya da oldukça az küçülmektedir. Fakat basınç gradyenindeki artış, genişleme oranının daha da artmasıyla türbülans seviyesindeki artışa göre yeniden birleşme bölgesinin büyümesinde daha etkin bir karaktere sahip olmaktadır. Yeniden birleşme bölgesinde büyüme ve Stanton ile Nusselt sayılarındaki düşüş daha da belirginleşmektedir. Bu düşüş kendisini türbülans kinetik enerjisinde de göstermektedir.



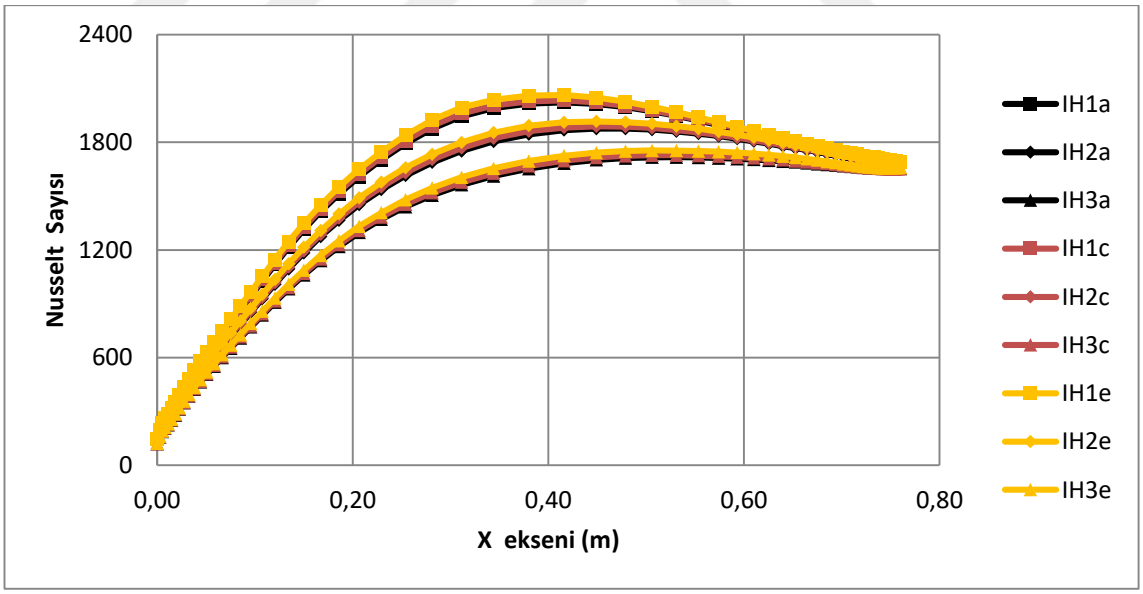
Şekil 4.227. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre x ekseni hızı



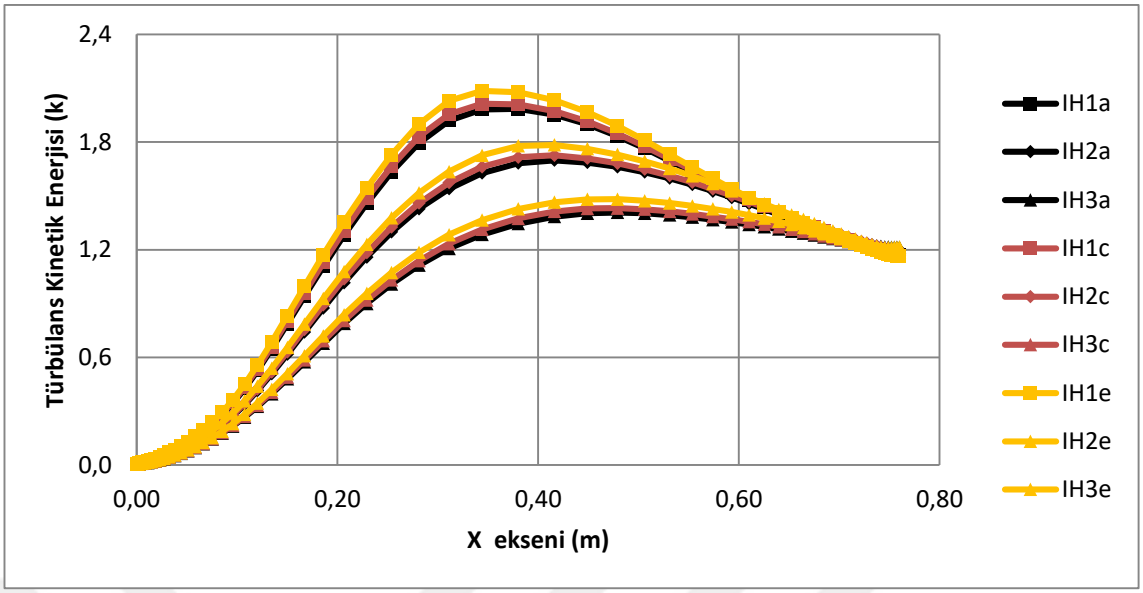
Şekil 4.228. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı



Şekil 4.229. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Stanton sayısı ve yeniden birleşme noktası etkileşimi



Şekil 4.230. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre Nusselt sayısı



Şekil 4.231. 1,43 genişleme oranı için basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimine göre türbülans kinetik enerjisi

Aynı genişleme oranında gerçekleştirilen basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimlerine göre yapılan analizler sonucunda ortaya çıkan en dikkat çekici hususlar ise aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

1. Türbülans seviyesindeki değişimler aynı basınç gradyeni üzerinde neredeyse herhangi bir etkiye sahip değil ya da oldukça düşük bir etkiye sahiptir. Fakat genişleme oranı arttıkça bu etki nispeten artmaktadır.
2. Aynı basınç gradyeninde türbülans seviyesindeki artış akış karakteristiği değerlendirmesi bakımından yeniden birleşme bölgesinde ihmal edilebilecek kadar az bir küçülmeye neden olmaktadır. Aynı basınç gradyeninde türbülans seviyesindeki artış ise ısı karakteristikleri değerlendirmesi bakımından Stanton ve Nusselt sayılarında düşük bir değişime sebebiyet vermektedir. Türbülans seviyesi arttıkça Stanton ve Nusselt sayılarında da artış görülmüştür. Bu değişiklikler genişleme oranının artmasına bağlı olarak daha da belirginleşmiştir.
3. Hem ısı hem de akış karakteristiklerinin belirlenmesinde basınç gradyeninin etkili tespit edilmiştir. Aynı türbülans seviyesinde basınç gradyenindeki artış için yeniden birleşme noktasının büyümesine neden olmuştur. Fakat bu artış Stanton ve Nusselt sayılarında da azalmaya sebebiyet vermiştir. Bu düşüşün sebebi ise geri dönme bölgesindeki vortekslerin yoğunluğunun azalmasına bağlıdır.

4.1.3.4. Yapılan Karşılaştırmalar Sonucunda Elde Edilen Sayısal Veriler

Modifiye edilmiş çalışmalar kapsamında elde edilen sayısal veriler Çizelge 4.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Modifiye çalışmalardan elde edilen sayısal veriler

Grup	Alt Grup	BG	TS (%)	YBN (Xr)	H	Stanton (Ort.)	Stanton (Maks.)	Nusselt (Ort.)	Nusselt (Maks.)
DS1	a	-2	0,2	0,080	5,26	0,0027	0,0038	1583	2170
	c		3,3	0,080	5,23	0,0028	0,0038	1590	2189
	e		7,4	0,079	5,22	0,0028	0,0039	1607	2229
DS2	a	0	0,2	0,085	5,58	0,0025	0,0036	1453	2093
	c		3,3	0,085	5,57	0,0025	0,0037	1460	2111
	e		7,4	0,084	5,51	0,0026	0,0037	1479	2152
DS3	a	2	0,2	0,091	5,96	0,0023	0,0035	1350	2011
	c		3,3	0,090	5,95	0,0024	0,0035	1357	2030
	e		7,4	0,089	5,88	0,0024	0,0036	1376	2074
VE1	a	-2	0,2	0,212	5,57	0,0024	0,0036	1386	2069
	c		3,3	0,211	5,55	0,0024	0,0036	1392	2089
	e		7,4	0,209	5,50	0,0024	0,0037	1406	2126
VE2	a	0	0,2	0,242	6,36	0,0023	0,0034	1304	1949
	c		3,3	0,240	6,31	0,0023	0,0034	1310	1970
	e		7,4	0,238	6,25	0,0023	0,0035	1322	2007
VE3	a	2	0,2	0,287	7,56	0,0022	0,0032	1244	1818
	c		3,3	0,285	7,50	0,0022	0,0032	1249	1840
	e		7,4	0,280	7,37	0,0022	0,0033	1260	1877
IH1	a	-2	0,2	0,385	5,89	0,0024	0,0035	1365	2024
	c		3,3	0,383	5,86	0,0024	0,0035	1370	2034
	e		7,4	0,380	5,81	0,0024	0,0036	1381	2064
IH2	a	0	0,2	0,466	7,13	0,0023	0,0033	1297	1877
	c		3,3	0,463	7,09	0,0023	0,0033	1303	1889
	e		7,4	0,459	7,02	0,0023	0,0033	1316	1916
IH3	a	2	0,2	0,602	9,21	0,0021	0,0030	1215	1717
	c		3,3	0,599	9,16	0,0021	0,0030	1221	1728
	e		7,4	0,590	9,02	0,0021	0,0030	1234	1755

Çizelge 4.12'de genişleme oranına, türbülans seviyesine ve basınç gradyeni değişimine göre karşılaştırmalarda kullanılan modellerden elde edilen sayısal veriler ve her bir modelden elde edilen yeniden birleşme uzunluğu ve bu uzunluğun basamak yüksekliğine oranın belirten (h) değeri, ortalama Stanton ve Nusselt sayıları ile maksimum Stanton ve

Nusselt sayılarına yer verilmiştir. Çizelge 4.12'de basınç gradyeni *BG*, türbülans seviyesi *TS*, yeniden birleşme noktası ise *YBN* ile ifade edilmiştir

4.2. Deney Tasarımı Uygulamaları

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamaları sonrasında elde edilen verilerin gerek yanıt yüzey yöntemi gerekse Taguchi metodu aracılığıyla yorumlaması gerçekleştirilmiştir. Yeniden birleşme noktası, ortalama ve maksimum Stanton sayılarının yanıt yüzey yöntemi kullanılarak matematiksel modeli çıkarılmış, ANOVA analizi gerçekleştirilmiş ve optimizasyonu yapılmıştır. Aynı parametrelerin Taguchi metodu kullanılarak sinyal / gürültü oranları hesaplanmış ve ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm yanıtlar için sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu oluşturularak belirtilen parametrelerin ortalama S/N oranlarının bir arada incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Yanıt Yüzey Yöntemi Uygulaması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen ve analiz sonuçları paylaşılan Çizelge 4.12' deki veriler kullanılarak uygulanan yanıt yüzey yöntemi çalışmaları kapsamında yeniden birleşme uzunluğu, ortalama Stanton sayısı ve maksimum Stanton sayılarının genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyesi bağımsız değişkenleri ile olan ilişkisi incelenmiştir.

4.2.1.1. Yeniden Birleşme Noktası İçin Matematiksel Model ve ANOVA Analizi

Genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyelerinin giriş parametresi ve yeniden birleşme uzunluğunun ise sistem çıktısı olarak değerlendirildiği ikinci dereceden polinom olarak oluşturulan tahmin denklemi, yeniden birleşme uzunluğu ile ile ilgili matematiksel modeli ortaya çıkarmıştır. Çizelge 4.13'te belirtilen katsayı tahminlerine göre oluşturulan

Denklem 4.1' de gösterilen bu modelde *GO* genişleme oranını, *BG* basınç gradyenini, *TS* türbülans seviyesini ve *YB* ise yeniden birleşme uzunluğunu ifade etmektedir.

Çizelge 4.13. Yeniden birleşme uzunluğu için katsayı tahminleri

Terim	Katsayı	Standart Katsayı Hatası	T Değeri	P Değeri
Sabit	-0,095	0,24	-0,4	0,698
GO	-0,653	0,381	-1,71	0,105
BG	-0,1711	0,0111	-15,45	0,000
TS	0,00318	0,00657	0,48	0,635
GO * GO	0,737	0,15	4,9	0,000
BG * BG	0,00289	0,00101	2,85	0,011
TS * TS	-0,000036	0,00032	-0,11	0,912
GO * BS	0,15591	0,00867	17,99	0,000
GO *TS	-0,00282	0,0048	-0,59	0,565
BG * TS	-0,000141	0,000396	-0,36	0,726

$$\begin{aligned} \text{YB} = {} & -0{,}095 - 0{,}653\,\text{GO} - 0{,}1711\,\text{BG} + 0{,}00318\,\text{TS} + 0{,}737\,GO^2 \\ & + 0{,}00289\,BG^2 - 0{,}000036\,TS^2 + 0{,}15591\,(GO * BG) \\ & - 0{,}00282\,(GO * TS) - 0{,}000141\,(BG * TS) \end{aligned} \qquad (4.1)$$

Denklem 4.1' de oluşturulan modelin R^2 değeri ise yapılan analizler sonucunda %99,79 olarak elde edilmiştir. Bu değer regresyon denkleminin tahmin kapasitesini göstermektedir. R^2' nin %90'dan fazla olması tepkilerin %95 güven aralığı içerisinde gerçeğine yakın bir şekilde tahmin edildiğini ortaya çıkarmıştır.

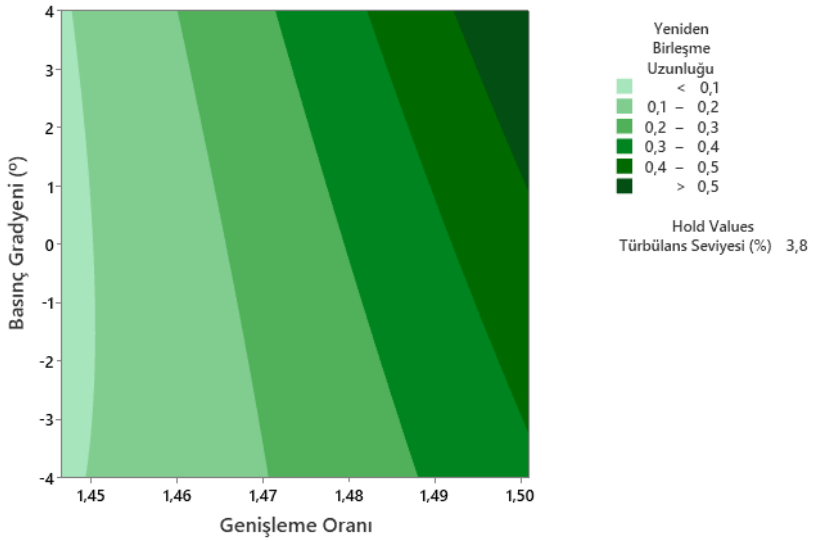
Çizelge 4.14. Yeniden birleşme için ANOVA tablosu

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Model	9	0,791488	0,087943	893,61	0,000
Lineer	3	0,023804	0,007935	80,63	0,000
GO	1	0,000289	0,000289	2,93	0,105
BG	1	0,023485	0,023485	238,63	0,000
TS	1	0,000023	0,000023	0,23	0,635
Kare	3	0,003169	0,001056	10,73	0,000
GO * GO	1	0,002367	0,002367	24,05	0,000
BG * BG	1	0,000801	0,000801	8,14	0,011
TS * TS	1	0,000001	0,000001	0,01	0,912
Etkileşim	3	0,031898	0,010633	108,04	0,000
GO * BG	1	0,031852	0,031852	323,65	0,000
GO * TS	1	0,000034	0,000034	0,35	0,565
BG * TS	1	0,000012	0,000012	0,13	0,726
Hata	17	0,001673	0,000098		
Toplam	26	0,793161			

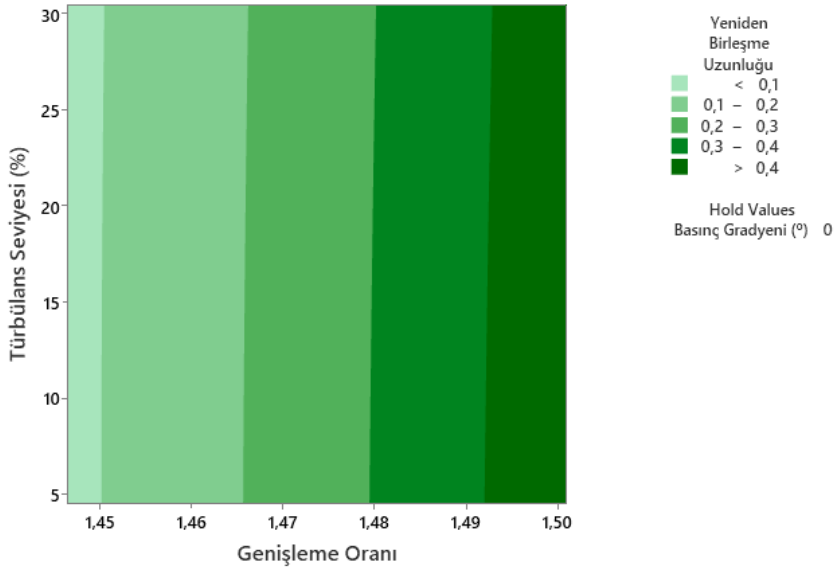
GO ile genişleme oranının, *BG* ile basınç gradyeninin ve *TS* ile türbülans seviyesini temsil edildiği Çizelge 4.14' te belirtilen ANOVA tablosu ile giriş parametrelerinin yeniden birleşme uzunluğu üzerindeki hem tekil hemde etkileşimli etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. %95' lik güven aralığı göz önünde bulundurularak yapılan analizlerde P değerinin 0,05' ten düşük olduğu parametrelerin yeniden birleşme üzerinde etkili olduğu söylenebilmektedir. Buna göre basınç gradyeninin hem tekil hemde etkileşimli etkilerinin P değerinin 0,05' ten küçük olması yeniden birleşme uzunluğunun belirlenmesi öenmli bir etkiye sahip olduğu tespiti gerçekleştirilmiştir. Ayrıca genel model, tekil etki ve etkileşimli etkilerin de P değeri incelendiğinde regresyon denklemindeki yüksek R^2 regresyon katsayısının etkisi görülmüştür.

Şekil 4.232 – 234'te belirtilen kontur grafikleri ve Şekil 4.235 – 237'de belirtilen üç boyutlu grafikler ile giriş parametrelerinin yeniden birleşme uzunluğu üzerindeki etkisi bir kez daha gösterilmiştir. Şekil 4.232 – 237'deki grafikler incelendiğinde genişleme oranı ve basınç gradyeni etkileşimindeki faktörlerin artışı yeniden birleşme uzunluğunu artımakta; genişleme oranı ve türbülans seviyesi etkileşimindeki her faktörlerin artışı yine yeniden birleşmeyi artırmaktadır. Fakat basınç gradyeni ve türbülans seviyesindeki

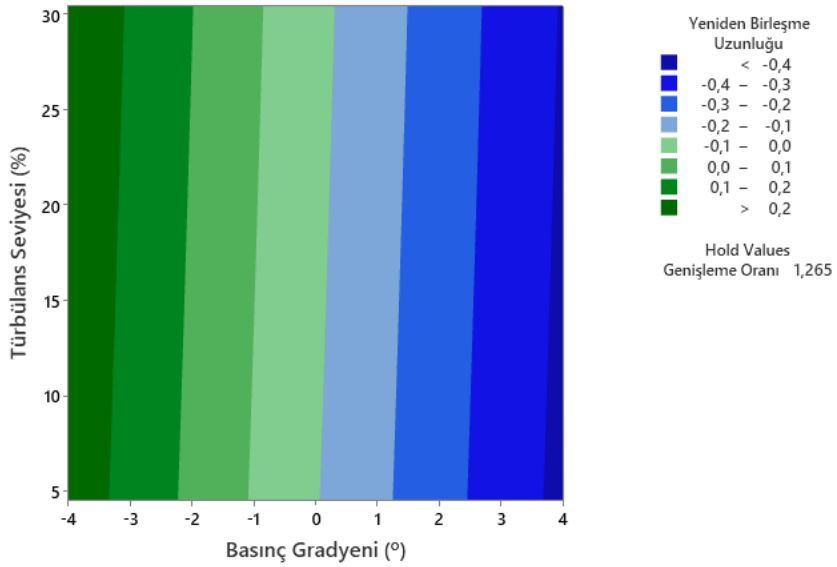
etkileşimde yeniden birleşme uzunluğunun artması için basınç gradyeninin düşmesi ve buna zıt olarak türbülans seviyesinin artması gerektiği ortaya çıkmıştır.



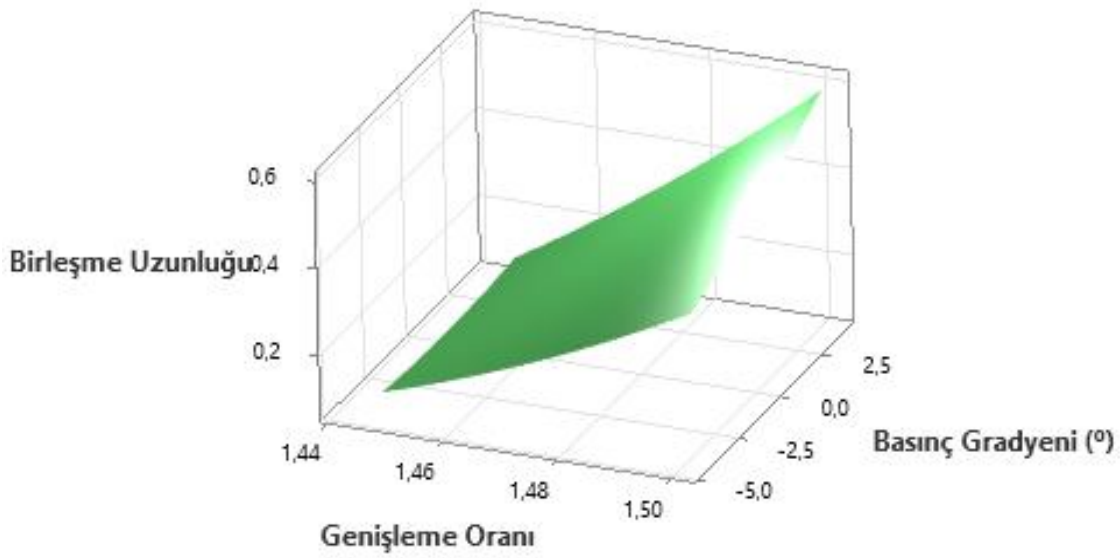
Şekil 4.232. Yeniden birleşme uzunluğu için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (kontur)



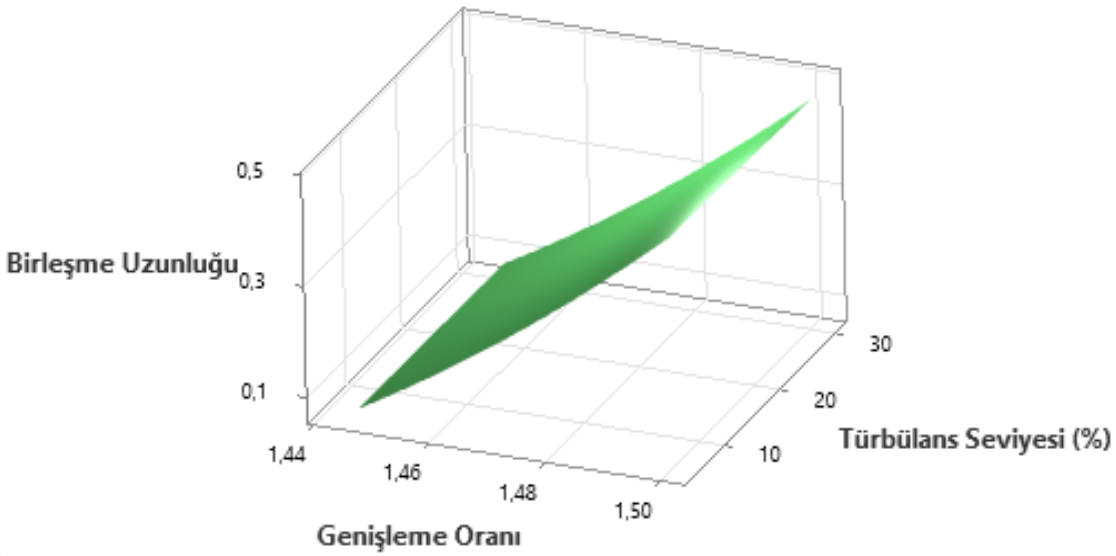
Şekil 4.233. Yeniden birleşme uzunluğu için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur)



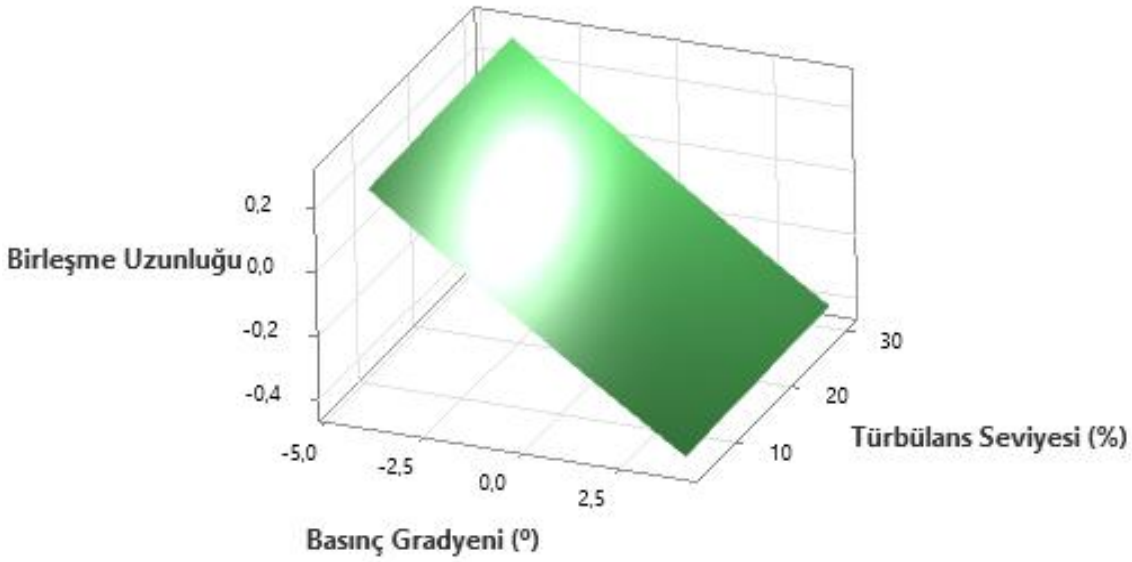
Şekil 4.234. Yeniden birleşme uzunluğu için türbülans seviyesi - basınç gradyeni etkileşimi (kontur)



Şekil 4.235. Yeniden birleşme uzunluğu için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (3D)



Şekil 4.236. Yeniden birleşme uzunluğu için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (3D)



Şekil 4.237. Yeniden birleşme uzunluğu için türbülans seviyesi - basınç gradyeni etkileşimi (3D)

4.2.1.2. Ortalama Stanton Sayısı İçin Matematiksel Model ve ANOVA Analizi

Genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyelerinin giriş parametresi ve ortalama Stanton sayısının ise sistem çıktısı olarak değerlendirildiği ikinci dereceden polinom olarak oluşturulan tahmin denklemi, ortalama Stanton sayısı ile ilgili matematiksel modeli ortaya çıkarmıştır. Çizelge 4.15'te belirtilen katsayı tahminlerine göre oluşturulan Denklem 4.2' de gösterilen bu modelde *GO* genişleme oranını, *BG* basınç gradyenini, *TS* türbülans seviyesini ve ST_{ort} ise ortalama Stanton sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 4.15. Ortalama Stanton sayısı için katsayı tahminleri

Terim	Katsayı	Standart Katsayı Hatası	T Değeri	P Değeri
Sabit	0,01056	0,00116	9,11	0
GO	-0,01237	0,00184	-6,73	0
BG	-0,000162	0,000053	-3,02	0,008
TS	0,00006	0,000032	1,88	0,078
GO * GO	0,004602	0,000724	6,35	0
BG * BG	-0,000001	0,000005	-0,28	0,779
TS * TS	-0,000001	0,000002	-0,4	0,693
GO * BS	0,000069	0,000042	1,64	0,119
GO *TS	-0,00004	0,000023	-1,72	0,103
BG * TS	0	0,000002	0	1

$$\begin{aligned} \text{STort} = {} & 0{,}01056 - 0{,}01237\ \text{GO} - 0{,}000162\ \text{BG} + 0{,}00006\ \text{TS} \\ & + 0{,}004602\ GO^2 - 0{,}000001\ BG^2 - 0{,}000001\ TS^2 \\ & + 0{,}00069\ (GO * BG) - 0{,}00004(GO * TS) \end{aligned} \qquad (4.2)$$

Denklem 4.2' de oluşturulan modelin R^2 değeri ise yapılan analizler sonucunda %95,73 olarak elde edilmiştir. Bu değer regresyon denkleminin tahmin kapasitesini göstermektedir. R^2' nin %90'dan fazla olması tepkilerin %95 güven aralığı içerisinde gerçeğine yakın bir şekilde tahmin edildiğini ortaya çıkarmıştır.

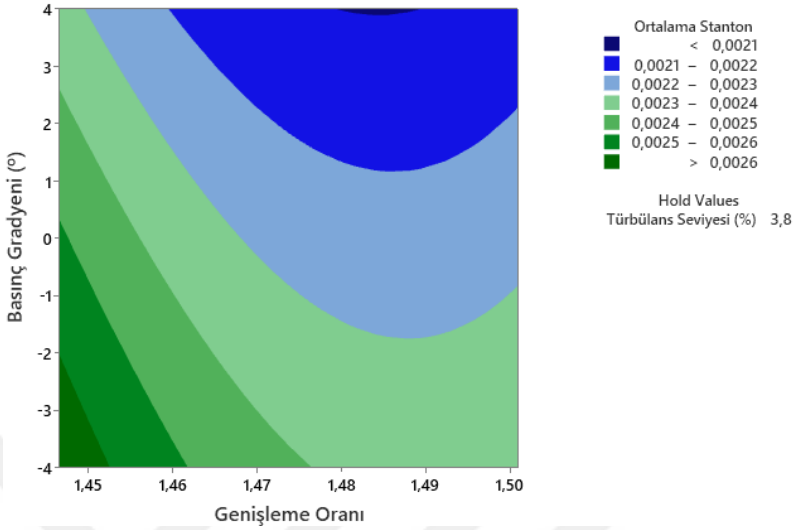
Çizelge 4.16. Ortalama Stanton sayısı için ANOVA tablosu

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Model	9	0,000001	0,000	42,39	0,000
Lineer	3	0,000	0,000	19,7	0,000
GO	1	0,000	0,000	45,26	0,000
BG	1	0,000	0,000	9,15	0,008
TS	1	0,000	0,000	3,53	0,078
Kare	3	0,000	0,000	13,54	0,000
GO * GO	1	0,000	0,000	40,37	0,000
BG * BG	1	0,000	0,000	0,08	0,779
TS * TS	1	0,000	0,000	0,16	0,693
Etkileşim	3	0,000	0,000	1,89	0,17
GO * BG	1	0,000	0,000	2,7	0,119
GO * TS	1	0,000	0,000	2,96	0,103
BG * TS	1	0,000	0,000	0	1
Hata	17	0	0		
Toplam	26	0,000001			

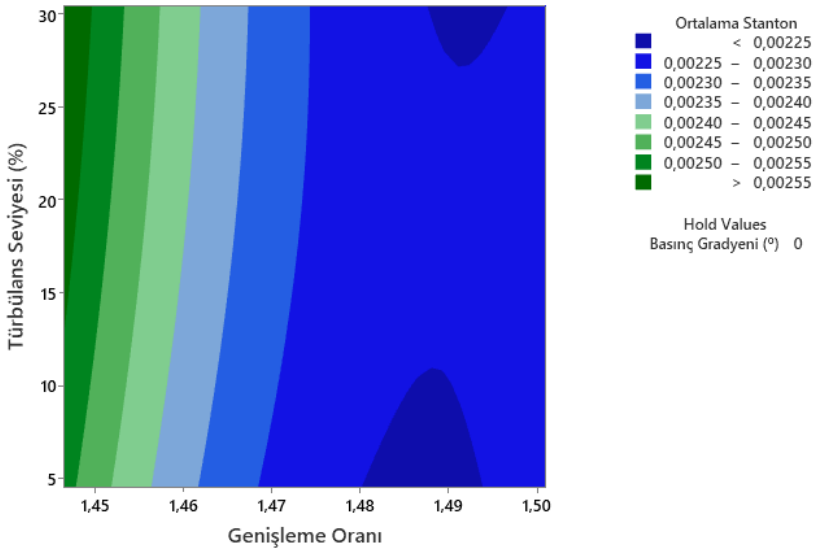
GO ile genişleme oranının, *BG* ile basınç gradyeninin ve *TS* ile türbülans seviyesini temsil edildiği Çizelge 4.16' da belirtilen ANOVA tablosu ile giriş parametrelerinin ortalama Stanton sayısı üzerindeki hem tekil hemde etkileşimli etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. %95' lik güven aralığı göz önünde bulundurularak yapılan analizlerde P değerinin 0,05' ten düşük olduğu parametrelerin ortalama Stanton sayısı üzerinde etkili olduğu söylenebilmektedir. Buna göre genişleme oranının hem tekil hemde etkileşimli etkilerinin P değerinin 0,05' ten küçük olması yeniden birleşme uzunluğunun belirlenmesi önemmli bir etkiye sahip olduğu tespiti gerçekleştirilmiştir. Ayrıca genel model, tekil etki ve etkileşimli etkilerin de P değeri incelendiğinde regresyon denklemindeki yüksek R^2 regresyon katsayısının etkisi görülmüştür.

Şekil 4.238 – 240'ta belirtilen kontur grafikleri ve Şekil 4.241 – 243'de belirtilen üç boyutlu grafikler ile giriş parametrelerinin ortalama Stanton sayısı üzerindeki etkisi bir kez daha gösterilmiştir. Şekil 4.238 – 243'teki grafikler incelendiğinde genişleme oranı ve basınç gradyeni etkileşimindeki faktörlerin azalması ortalama Stanton sayısı artırmaktadır. Genişleme oranı ve türbülans seviyesi etkileşimde ortalama Stanton sayısının artması için genişleme oranının azalması ve buna zıt olarak türbülans seviyesinin artması gerektiği ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde basınç gradyeni ve türbülans

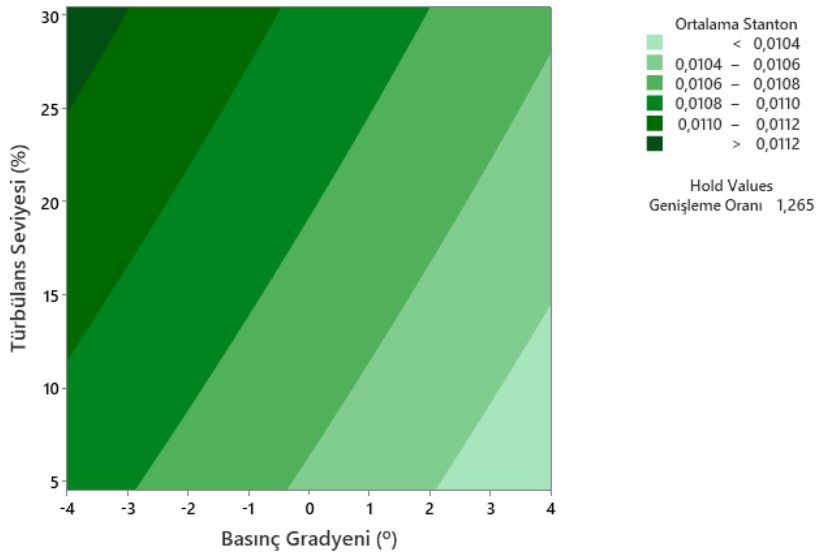
seviyesindeki etkileşimde de ortalama Stanton sayısının artması için basınç gradyenin azalması ve buna zıt olarak türbülans seviyesinin ise artması gerektiği tespit edilmiştir.



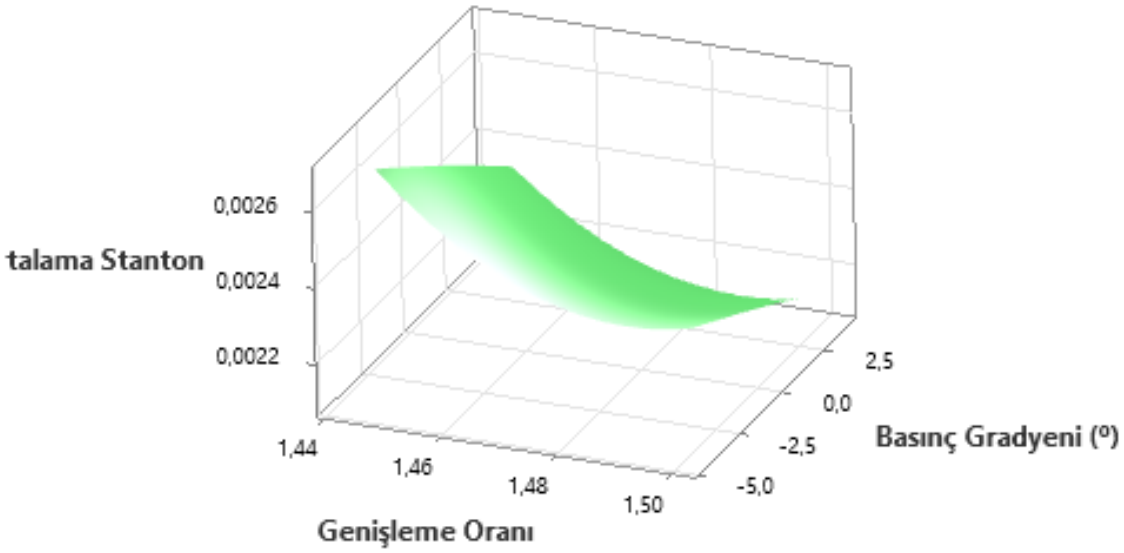
Şekil 4.238. Ortalama Stanton sayısı için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (kontur)



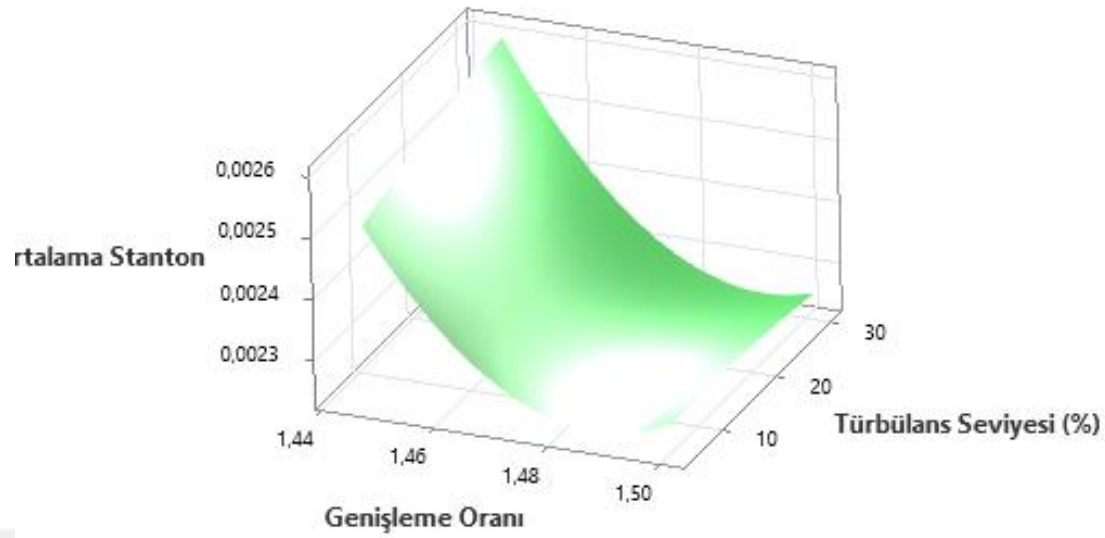
Şekil 4.239. Ortalama Stanton sayısı için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur)



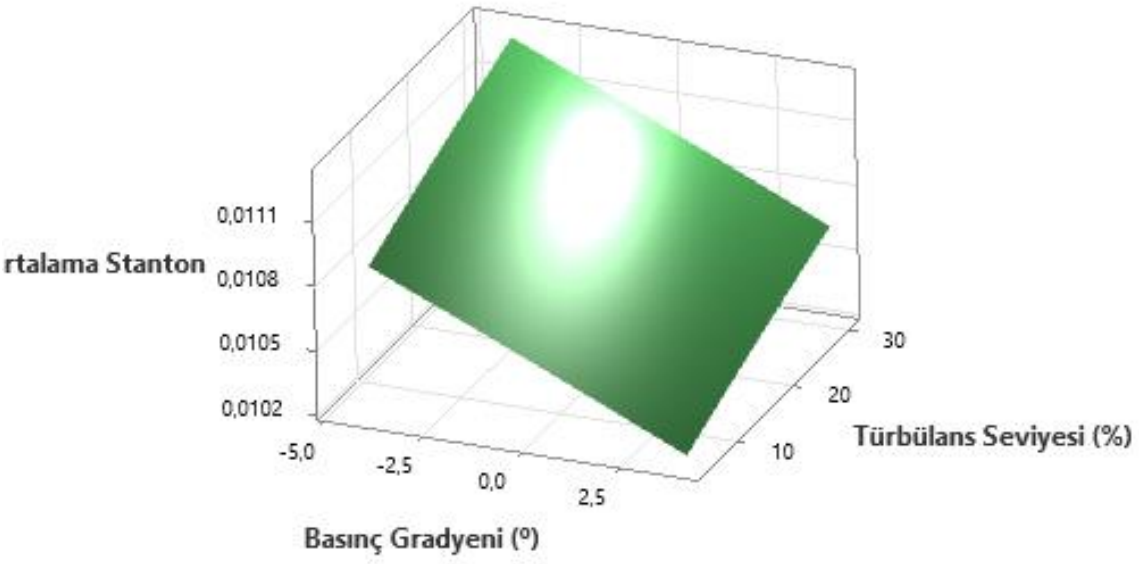
Şekil 4.240. Ortalama Stanton sayısı için basınç gradyeni - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur)



Şekil 4.241. Ortalama Stanton sayısı için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (3D)



Şekil 4.242. Ortalama Stanton sayısı için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (3D)



Şekil 4.243. Ortalama Stanton sayısı için basınç gradyeni - türbülans seviyesi etkileşimi (3D)

4.2.1.3. Maksimum Stanton Sayısı İçin Matematiksel Model ve ANOVA Analizi

Genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyelerinin giriş parametresi ve maksimum Stanton sayısının ise sistem çıktısı olarak değerlendirildiği ikinci dereceden polinom olarak oluşturulan tahmin denklemi, maksimum Stanton sayısı ile ilgili matematiksel modeli ortaya çıkarmıştır. Çizelge 4.17'te belirtilen katsayı tahminlerine göre oluşturulan Denklem 4.3' te gösterilen bu modelde *GO* genişleme oranını, *BG* basınç gradyenini, *TS* türbülans seviyesini ve ST_{mak} ise ortalama Stanton sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 4.17. Maksimum Stanton sayısı için katsayı tahminleri

Terim	Katsayı	Standart Katsayı Hatası	T Değeri	P Değeri
Sabit	0,008503	0,00067	12,69	0,000
GO	-0,00698	0,00106	-6,56	0,000
BG	0,000125	0,000031	4,04	0,001
TS	0,000034	0,000018	1,84	0,084
GO * GO	0,002319	0,000419	5,54	0,000
BG * BG	-0,000001	0,000003	-0,49	0,629
TS * TS	0,000002	0,000001	1,97	0,065
GO * BS	-0,000177	0,000024	-7,33	0,000
GO *TS	-0,000029	0,000013	-2,15	0,047
BG * TS	-0,000001	0,000001	-1,09	0,292

$$\begin{aligned} \mathrm{STmak} = {} & 0{,}008503 - 0{,}00698\,\mathrm{GO} + 0{,}000125\,\mathrm{BG} + 0{,}000034\,\mathrm{TS} \\ & + 0{,}002319\,GO^2 - 0{,}000001\,BG^2 + 0{,}000002\,TS^2 \\ & - \ 0{,}00177\,(\,GO * BG\,) - 0{,}000029\,(GO * TS) \\ & - 0{,}00001\,(BG * TS) \end{aligned} \tag{4.2}$$

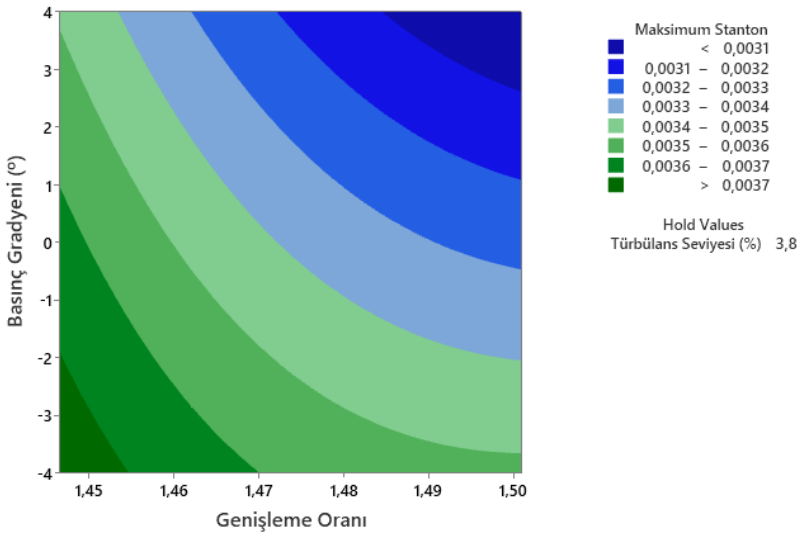
Denklem 4.3' te oluşturulan modelin R^2 değeri ise yapılan analizler sonucunda %99,18 olarak elde edilmiştir. Bu değer regresyon denkleminin tahmin kapasitesini göstermektedir. R^2' nin %90'dan fazla olması tepkilerin %95 güven aralığı içerisinde gerçeğine yakın bir şekilde tahmin edildiğini ortaya çıkarmıştır.

Çizelge 4.18. Maksimum Stanton sayısı için ANOVA tablosu

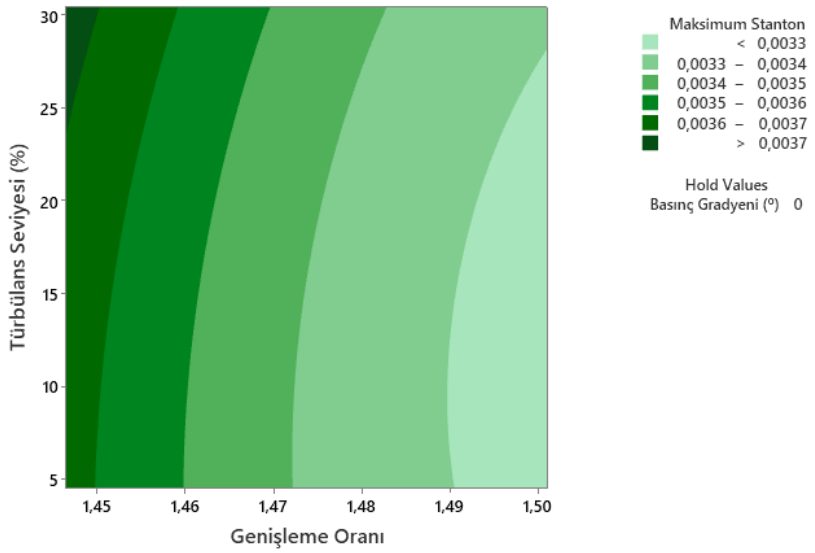
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Model	9	0,000002	0,000	227,9	0,000
Lineer	3	0,000	0,000	21,25	0,000
GO	1	0,000	0,000	43,01	0,000
BG	1	0,000	0,000	16,29	0,001
TS	1	0,000	0,000	3,37	0,084
Kare	3	0,000	0,000	11,6	0,000
GO * GO	1	0,000	0,000	30,66	0,000
BG * BG	1	0,000	0,000	0,24	0,629
TS * TS	1	0,000	0,000	3,9	0,065
Etkileşim	3	0,000	0,000	19,82	0,000
GO * BG	1	0,000	0,000	53,66	0,000
GO * TS	1	0,000	0,000	4,61	0,047
BG * TS	1	0,000	0,000	1,18	0,292
Hata	17	0,000	0,000		
Toplam	26	0,000002			

GO ile genişleme oranının, *BG* ile basınç gradyeninin ve *TS* ile türbülans seviyesini temsil edildiği Çizelge 4.18' de belirtilen ANOVA tablosu ile giriş parametrelerinin maksimum Stanton sayısı üzerindeki hem tekil hemde etkileşimli etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. %95' lik güven aralığı göz önünde bulundurularak yapılan analizlerde P değerinin 0,05' ten düşük olduğu parametrelerin maksimum Stanton sayısı üzerinde etkili olduğu söylenebilmektedir. Buna göre genişleme oranının hem tekil hemde etkileşimli etkilerinin P değerinin 0,05' ten küçük olması yeniden birleşme uzunluğunun belirlenmesi önemmli bir etkiye sahip olduğu tespiti gerçekleştirilmiştir. Ayrıca genel model, tekil etki ve etkileşimli etkilerin de P değeri incelendiğinde regresyon denklemindeki yüksek R^2 regresyon katsayısının etkisi görülmüştür.

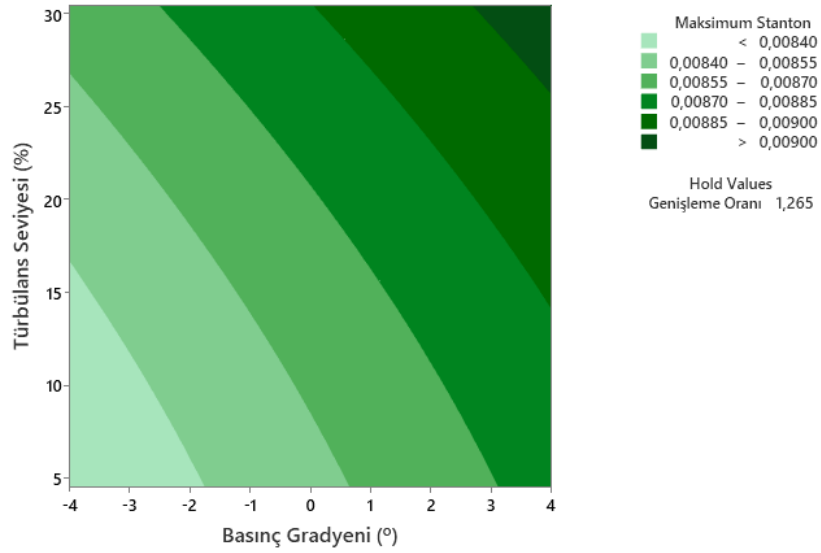
Şekil 4.244 – 246'da belirtilen kontur grafikleri ve Şekil 4.247 – 249'da belirtilen üç boyutlu grafikler ile giriş parametrelerinin maksimum Stanton sayısı üzerindeki etkisi bir kez daha gösterilmiştir. Şekil 4.234 – 249'teki grafikler incelendiğinde genişleme oranı ve basınç gradyeni etkileşimindeki genişleme oranının artması ve buna zıt olarak basınç gradyenindeki azalma maksimum Stanton sayısında artışa yol açmaktadır. Genişleme oranı ve türbülans seviyesi etkileşimde maksimum Stanton sayısının artması için genişleme oranının azalması ve buna zıt olarak türbülans seviyesinin artması gerektiği ortaya çıkmıştır. Basınç gradyeni ve türbülans seviyesindeki etkileşimde de maksimum Stanton sayısının artması için her iki faktörün artış eğiliminde olması gerektiği tespit edilmiştir.



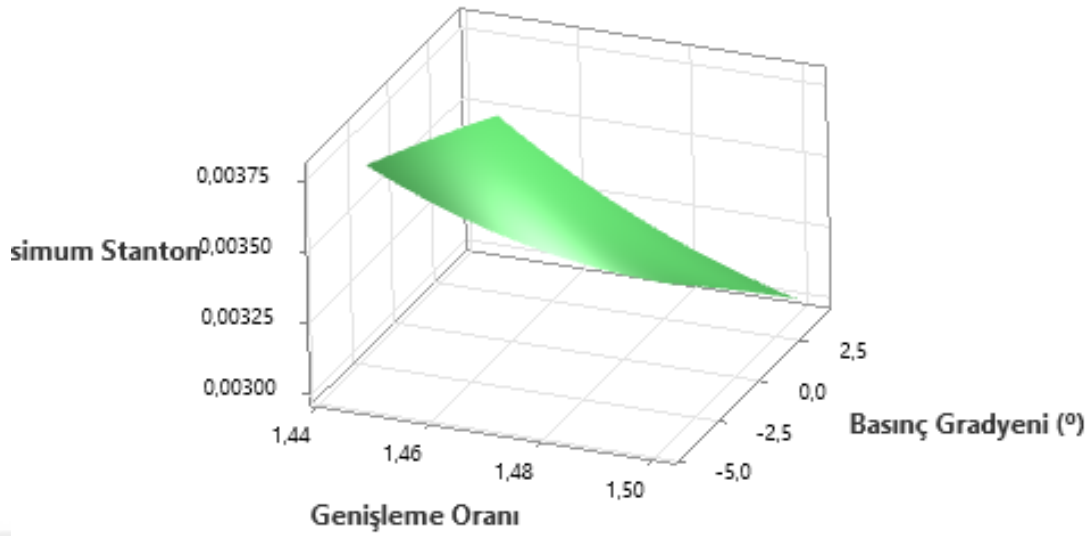
Şekil 4.244. Maksimum Stanton sayısı için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (kontur)



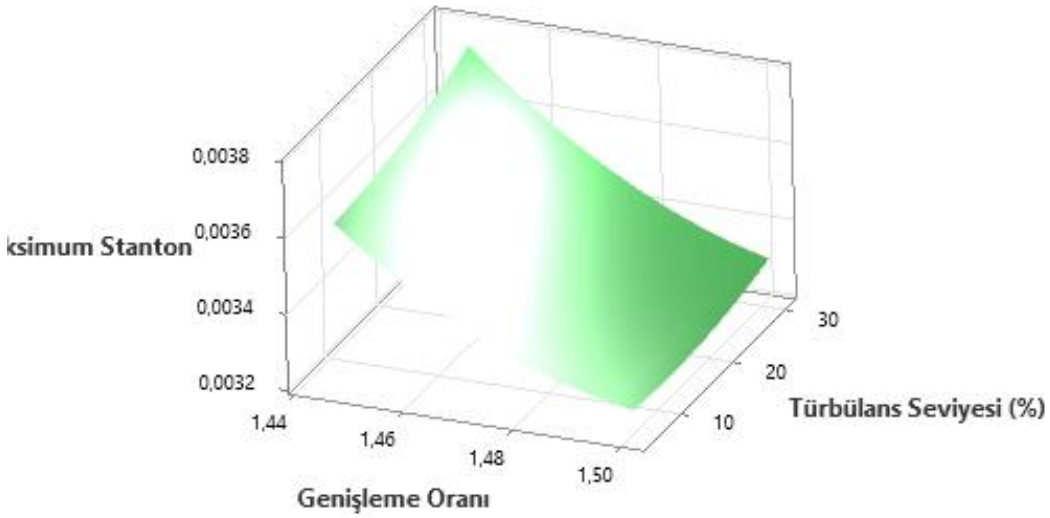
Şekil 4.245. Maksimum stanton sayısı için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur)



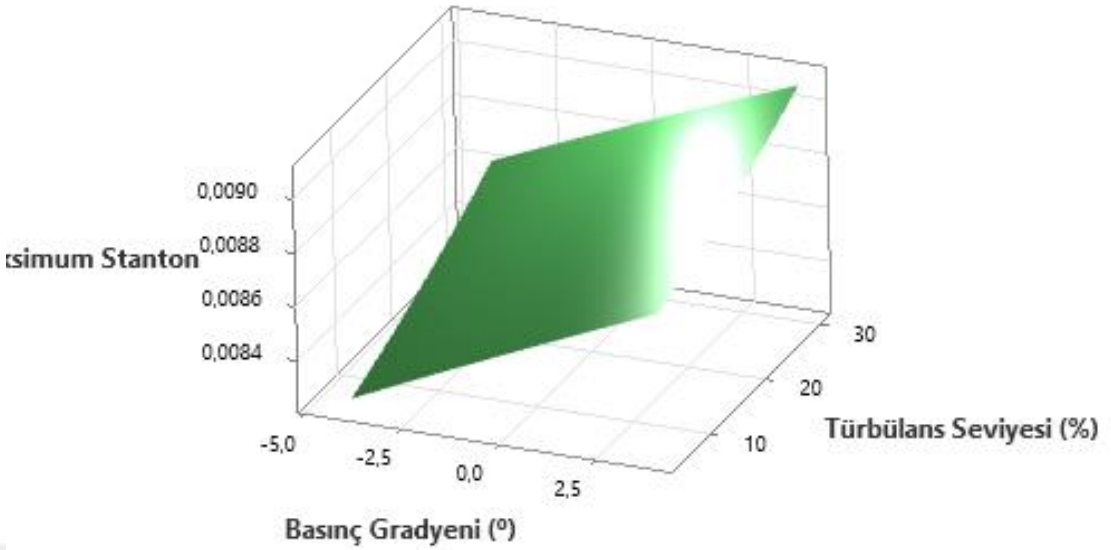
Şekil 4.246. Maksimum Stanton sayısı için basınç gradyeni - türbülans seviyesi etkileşimi (kontur)



Şekil 4.247. Maksimum Stanton sayısı için genişleme oranı - basınç gradyeni etkileşimi (3D)



Şekil 4.248. Maksimum Stanton sayısı için genişleme oranı - türbülans seviyesi etkileşimi (3D)

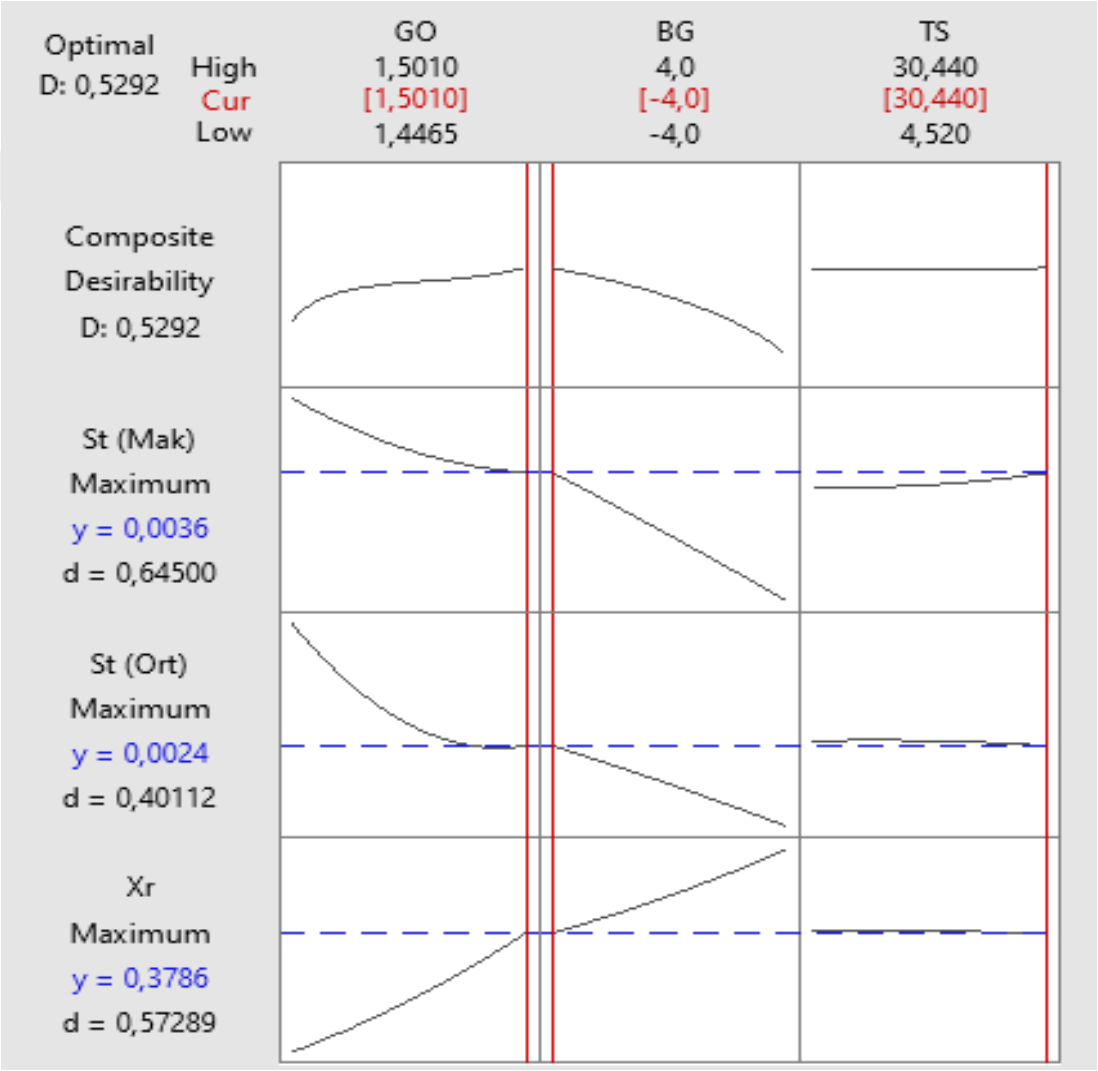


Şekil 4.249. Maksimum Stanton sayısı için basınç gradyeni - türbülans seviyesi etkileşimi (3D)

4.2.1.4. Yanıt Yüzey Yöntemi Giriş Parametrelerinin Optimizasyonu

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmaları kapsamında üç farklı giriş parametresiyle gerçekleştirilen analizler sonucunda, yeniden birleşme uzunluğu, ortalama Stanton sayısı ve maksimum Stanton sayısının tahminine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu verilerin yanıt yüzey yöntemi aracılığıyla değerlendirilmesi sonucunda da her bir parametrenin çıktılar üzerindeki matematiksel modeli, etkisi ve etkileşimleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonrasında elde edilen tahminlerin güvenilir sonuçlar olduğuna kanaat getirilmesinin ardından, yapılan analizlere endeksli olarak her bir çıktı için elde edilen regresyon katsayıları yardımıyla parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kullanılan istatistik programı aracılığıyla giriş parametrelerinin analizlerde yer almayan değerleri de tahmin edilerek, maksimum yanıtlar için gereken giriş parametrelerinin kombinasyonu ve yanıt değerleri elde edilmiştir. *GO'*nun genişleme oranını, *BG*'nin basınç gradyenini ve *TS'*nin türbülans seviyesini temsil ettiği Şekil 4.250'de belirtilen grafikte maksimum yanıtlar için giriş parametrelerinin uygun kombinasyonu belirtilmiştir. Buna göre genişleme oranının 1,5; basınç gradyeninin -4º ve türbülans seviyesinin %30 olacağı bir durumda maksimum yanıt değerlerine belirlenen şartlar altında yapılan tahminlere göre ulaşılabilecektir. Bu

durumda da elde edilecek olan yeniden birleşme uzunluğunun 0,378 m olması beklenmektedir. Sırasıyla ortalama ve maksimum Stanton sayılarının ise 0,0024 ve 0,0036 olması tahmin edilmektedir. Şekil 4.250'de "*composite desirability*" olarak ifade edilen terim ise bileşik arzu edilirlik olarak ifade edilebilir. Bileşik arzu edilirlik, optimizasyon çalışmaları kapsamında yapılan taleplerin yüzdesel olarak karşılanabilirlik derecesidir. Bu satırda belirtilen maksimum değerler ile giriş parametrelerinin kesişimi, uygun kombinasyon için kullanılması gereken değerleri ifade etmektedir.



Şekil 4.250. Optimizasyon grafikleri

4.2.2. Taguchi Metodu Uygulamaları

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarında ana gruplar olarak ele alınan genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyesinin girdi (faktör) olarak ele alındığı bu deney tasarım tekniğinde, her bir faktör ve faktör seviyeleri Çizelge 4.19'da gösterilmiştir. Taguchi metodunun uygulanabilmesi için belirlenen faktörler ve seviyeleri kullanılarak tayin edilen serbestlik derecesine göre uygun ortogonal dizinin seçilmesi gerekmektedir. Çizelge 4.19'de ayrıca faktörlerin serbestlik dereceleri de gösterilmiştir.

Çizelge 4.19. Taguchi Metodu uygulaması için faktörler, faktör seviyeleri ve faktör serbestlik dereceleri

Faktörler	Faktör Seviyeleri			Faktör Serbestlik Dereceleri		
	-1	0	1	Toplam Seviye Sayısı (k)	Serbestlik Derecesi (v = k - 1)	Toplam Serbestlik Derecesi ($v_t = 3*v$)
Genişleme Oranı	1,11	1,25	1,43	3	2	6
Basınç Gradyeni (º)	-2	0	2	3	2	
Türbülans Seviyesi (%)	0,2	3,3	7,4	3	2	

Çizelge 4.19'da belirtilen göstergeler ele alınan tekniğin uygulanabilmesi için 6 serbestlik derecesini değerlendirilebileceği bir ortogonal dizi seçimi yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Taguchi metodunun minimum sayıda deney ile çalıştığı ve toplam serbestlik derecesi göz önünde bulundurulduğunda, seçilebilecek olan uygun ortogonal dizinin 3 faktör ve 3 seviyenin uygulanabileceği ve Çizelge 3.11'de görülebilecek olan L9 dizisinin kullanımı uygun bulunmuştur. Çizelge 4.20'de uygun ortogonal diziye göre seçilen deneyler ve bu deneyler için belirlenen faktör değerleri ifade edilmiştir.

Çizelge 4.20. Taguchi metodu uygulaması faktör seviyeleri, faktör değerleri ve yanıt değerleri

Deney Numarası	L9 (3^3) Ortogonal Dizi Dağılımı			Faktör Seviyesi			Yanıt Değerleri		
	Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (°)	Türbülans Seviyesi (%)	Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (°)	Türbülans Seviyesi (%)	Yeniden Birleşme Uzunluğu	Ortalama Stanton Sayısı	Maksimum Stanton Sayısı
1	-1	-1	-1	1,11	-2	0,2	0,080	0,0027	0,0038
2	-1	0	0	1,11	0	3,3	0,085	0,0025	0,0037
3	-1	1	1	1,11	2	7,4	0,089	0,0024	0,0036
4	0	-1	0	1,25	-2	3,3	0,211	0,0024	0,0036
5	0	0	1	1,25	0	7,4	0,238	0,0023	0,0035
6	0	1	-1	1,25	2	0,2	0,287	0,0022	0,0032
7	1	-1	1	1,43	-2	7,4	0,380	0,0024	0,0036
8	1	0	-1	1,43	0	0,2	0,466	0,0023	0,0033
9	1	1	0	1,43	2	3,3	0,599	0,0021	0,0030

4.2.2.1. Yeniden Birleşme Noktası İçin S/N Oranı ve ANOVA Analizi

L9 ortogonal dizi dağılımı kullanılarak elde edilen yeniden birleşme uzunlukları ve S/N oranları Çizelge 4.21'de belirtilmiştir. Çizelge 4-21'de verilen S/N oranları, deneyler sonucunda elde edilen yeniden birleşme uzunlukları kullanılarak Çizelge 3.9' da belirtilen hedef değer en büyük yaklaşımına göre hesaplanmıştır.

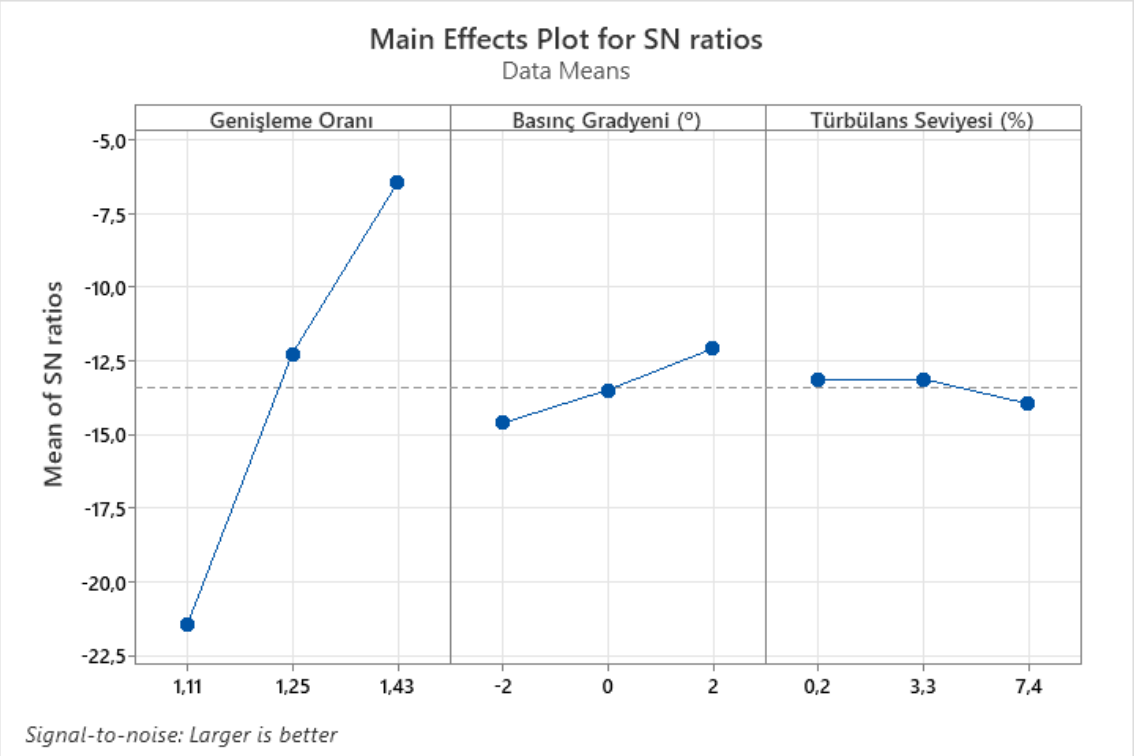
Çizelge 4.21. L9 ortogonal dizi dağılımı için yeniden birleşme uzunluğu ve S/N oranları

Deney No	Faktör Seviyesi			Yanıt Değerleri	
	Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (º)	Türbülans Seviyesi (%)	Yeniden Birleşme Uzunluğu	S / N Oranı
1	1,11	-2	0,2	0,080	-21,9382
2	1,11	0	3,3	0,085	-21,4116
3	1,11	2	7,4	0,089	-21,0122
4	1,25	-2	3,3	0,211	-13,5144
5	1,25	0	7,4	0,238	-12,4685
6	1,25	2	0,2	0,287	-10,8424
7	1,43	-2	7,4	0,380	-8,4043
8	1,43	0	0,2	0,466	-6,6323
9	1,43	2	3,3	0,599	-4,4515

Çizelge 4.21'de belirtilen ortalama S/N oranları parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonrasında her bir parametre için belirlenen en büyük S/N oranı, en iyi deney sonucunu yani en yüksek yeniden birleşme noktası değerini ifade etmektedir. Buna göre Çizelge 4.22'de belirtilen yıldızlı ortalama S/N oranları ve Şekil 4.251'de gösterilen S/N oranlarının grafiksel gösterimine göre maksimum yeniden birleşme uzunluğu için deney kombinasyonu $GO_3BG_3TS_1$ yani genişleme oranı 1,43, basınç gradyeni 2º ve türbülans seviyesi %0,2 olmalıdır.

Çizelge 4.22. Yeniden birleşme uzunluğu için sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu

Level	Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (º)	Türbülans Seviyesi (%)
1	-21,454	-14,619	-13,118*
2	-12,275	-13,504	-13,126
3	-6,496*	-12,102*	-13,962
Delta	14,958	2,517	0,836
Rank	1	2	3



Şekil 4.251. Yeniden birleşme uzunluğu için parametrelerin ortalama S/N oranları

Çizelge 4.22'de belirtilen rank değeri ise yeniden birleşme uzunluğunun belirlenmesinde hangi faktörün en fazla etkili olduğunu göstermektedir. Buna göre yeniden birleşme uzunluğuna en fazla etkiyen faktörler sırasıyla genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyesi olmuştur.

Yeniden birleşme uzunluğuna incelenen faktörlerin hangi oranda etkilediklerini ortaya koymayı amaçlayan varyans analizi için, Çizelge 4.23'te belirtilen ANOVA tablosunda bu faktörlerin yüzdesel etkisi görülebilmektedir. Buna göre yeniden birleşme uzunluğuna genişleme oranının etkisi %89,74, basınç gradyeninin etkisi %5,87 ve türbülans seviyesinin etkisi ise %2,29' dur. Uygulanan teknik sonrasında sonucunda oluşan %2,09 hata payı ihmal edilebilir niteliktedir. Ayrıca genişleme oranı için hesaplanan p değeri 0.05'den küçük olduğu için bu faktörün yeniden birleşme üzerinde istatistiksel ve fiziksel öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer parametreler için hesaplanan p değeri 0.05'den büyük olduğu için, bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı ya da ihmal edilebilir düzeyde olduğu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.23. Yeniden birleşme uzunluğu için ANOVA tablosu

Değişim Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Yüzdesel Etki	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Genişleme Oranı	2	89,74%	0,239276	0,119638	42,88	0,023
Basınç Gradyeni	2	5,87%	0,015660	0,007830	2,81	0,263
Türbülans Seviyesi	2	2,29%	0,006118	0,003059	1,10	0,477
Hata	2	2,09%	0,005580	0,002790		
Toplam	8	100,00%				

4.2.2.2. Ortalama Stanton Sayısı İçin S/N Oranı ve ANOVA Analizi

L9 ortogonal dizi dağılımı kullanılarak elde edilen ortalama Stanton sayıları ve S/N oranları Çizelge 4.24'te belirtilmiştir. Çizelge 4-24'te verilen S/N oranları, deneyler sonucunda elde edilen ortalama Stanton sayıları kullanılarak Çizelge 3.9' da belirtilen hedef değer en büyük yaklaşımına göre hesaplanmıştır.

Çizelge 4.24. L9 ortogonal dizi dağılımı için ortalama Stanton sayıları ve S/N oranları

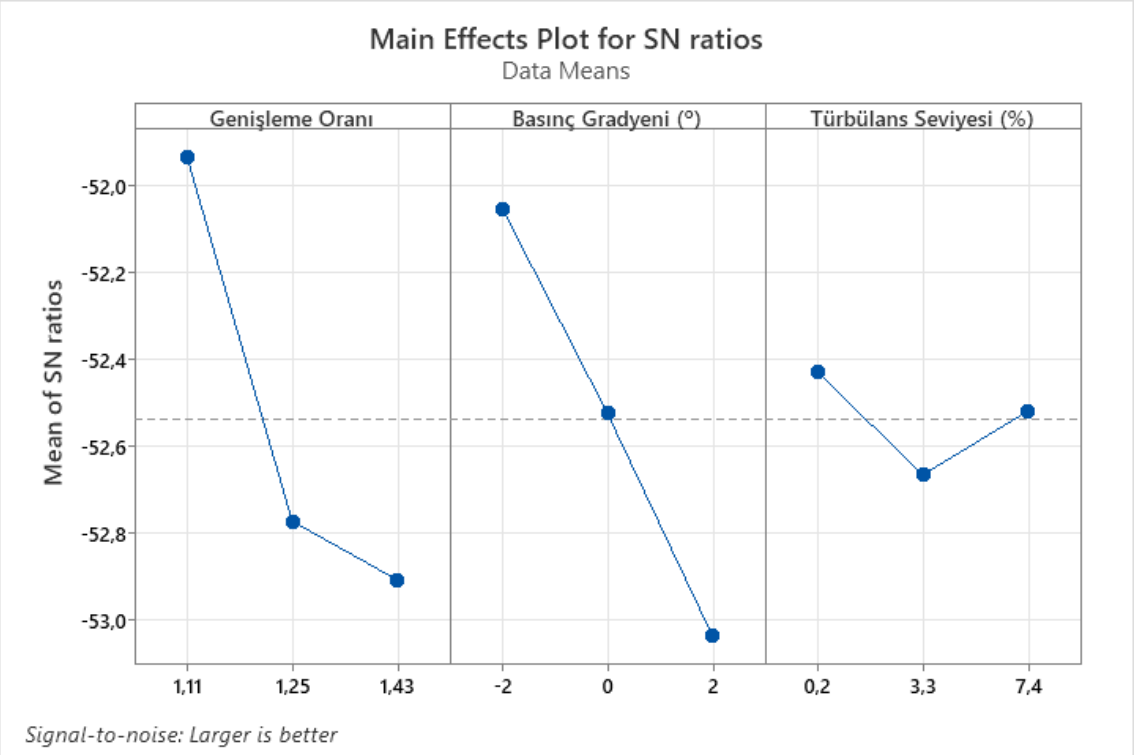
Deney Numarası	Faktör Seviyesi			Yanıt Değerleri	
	Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (º)	Türbülans Seviyesi (%)	Ortalama Stanton Sayıları	S / N Oranı
1	1,11	-2	0,2	0,0027	-51,3727
2	1,11	0	3,3	0,0025	-52,0412
3	1,11	2	7,4	0,0024	-52,3958
4	1,25	-2	3,3	0,0024	-52,3958
5	1,25	0	7,4	0,0023	-52,7654
6	1,25	2	0,2	0,0022	-53,1515
7	1,43	-2	7,4	0,0024	-52,3958
8	1,43	0	0,2	0,0023	-52,7654
9	1,43	2	3,3	0,0021	-53,5556

Çizelge 4.24' da belirtilen ortalama S/N oranları parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonrasında her bir parametre için belirlenen en büyük S/N oranı, en iyi deney sonucunu yani en yüksek ortalama Stanton sayısını ifade etmektedir.

Buna göre Çizelge 4.25'te belirtilen yıldızlı ortalama S/N oranları ve Şekil 4.252'de gösterilen S/N oranlarının grafiksel gösterimine göre maksimum ortalama Stanton sayısı için deney kombinasyonu $GO_1BG_1TS_1$ yani genişleme oranı 1,1, basınç gradyeni -2º ve türbülans seviyesi %0,2 olmalıdır.

Çizelge 4.25. Ortalama Stanton sayısı için sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu

Level	Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (º)	Türbülans Seviyesi (%)
1	-51,94*	-52,05*	-52,43*
2	-52,77	-52,52	-52,66
3	-52,91	-53,03	-52,52
Delta	0,97	0,98	0,23
Rank	2	1	3



Şekil 4.252. Ortalama Stanton sayısı için parametrelerin ortalama S/N oranları

Çizelge 4.25'te belirtilen rank değeri ise ortalama Stanton sayısının belirlenmesinde hangi faktörün en fazla etkili olduğunu göstermektedir. Buna göre ortalama Stanton sayısına en fazla etkiyen faktörler sırasıyla basınç gradyeni, genişleme oranı ve türbülans seviyesi olmuştur.

Ortalama Stanton sayısına incelenen faktörlerin hangi oranda etkilediklerini ortaya koymayı amaçlayan varyans analizi için, Çizelge 4.26'da belirtilen ANOVA tablosunda bu faktörlerin yüzdesel etkisi görülebilmektedir. Buna göre ortalama Stanton sayısına genişleme oranının etkisi %52,78, basınç gradyeninin etkisi %44,44 ve türbülans seviyesinin etkisi ise %2,78' dir. Ortalama Stanton sayısı için genişleme oranı ile basınç gradyeninin etkisinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ortalama Stanton sayısı için hesaplanan p değerleri 0.05'den küçük olduğu için ele alınan faktörlerin ortalama Stanton sayısı üzerinde istatistiksel ve fiziksel öneme sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.26. Ortalama Stanton sayısı için ANOVA tablosu

Değişim Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Yüzdesel Etki	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Genişleme Oranı	2	52,78%	0,0	0,0	1,75E-30	0,00
Basınç Gradyeni	2	44,44%	0,0	0,0	1,48E-30	0,00
Türbülans Seviyesi	2	2,78%	0,0	0,0	9,23E-28	0,00
Hata	2	0,00%	0,0	0,0		
Toplam	8	100,00%				

4.2.2.3. Maksimum Stanton Sayısı İçin S/N Oranı ve ANOVA Analizi

L9 ortogonal dizi dağılımı kullanılarak elde edilen maksimum Stanton sayıları ve S/N oranları Çizelge 4.27'de belirtilmiştir. Çizelge 4.27'de verilen S/N oranları, deneyler

sonucunda elde edilen maksimum Stanton sayıları kullanılarak Çizelge 3.9' da belirtilen hedef değer en büyük yaklaşımına göre hesaplanmıştır.

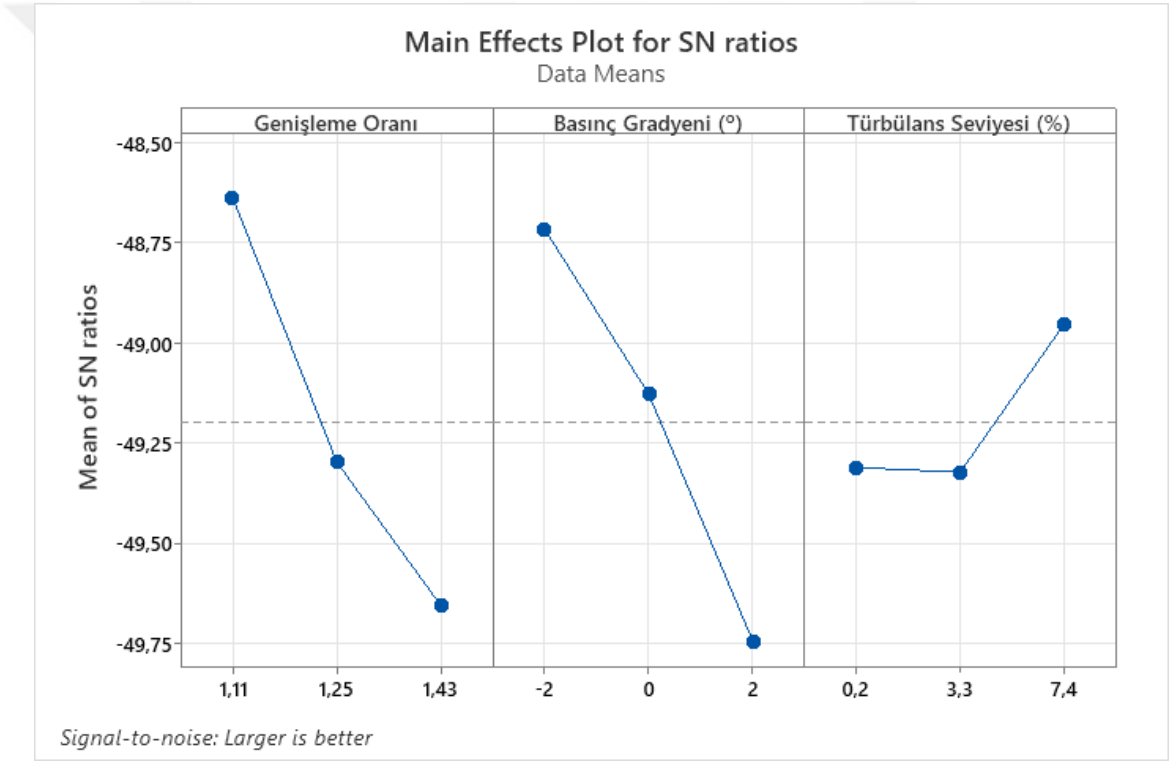
Çizelge 4.27. L9 ortogonal dizi dağılımı için maksimum Stanton sayıları ve S/N oranları

Deney Numarası	Faktör Seviyesi			Yanıt Değerleri	
	Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (º)	Türbülans Seviyesi (%)	Maksimum Stanton Sayıları	S / N Oranı
1	1,11	-2	0,2	0,0038	-48,4043
2	1,11	0	3,3	0,0037	-48,6360
3	1,11	2	7,4	0,0036	-48,8739
4	1,25	-2	3,3	0,0036	-48,8739
5	1,25	0	7,4	0,0035	-49,1186
6	1,25	2	0,2	0,0032	-49,8970
7	1,43	-2	7,4	0,0036	-48,8739
8	1,43	0	0,2	0,0033	-49,6297
9	1,43	2	3,3	0,0030	-50,4576

Çizelge 4.27' de belirtilen ortalama S/N oranları parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonrasında her bir parametre için belirlenen en büyük S/N oranı, en iyi deney sonucunu yani en yüksek maksimum Stanton sayısı değerini ifade etmektedir. Buna göre Çizelge 4.28' de belirtilen yıldızlı ortalama S/N oranları ve Şekil 4.253'te gösterilen S/N oranlarının grafiksel gösterimine göre maksimum Stanton sayısı için deney kombinasyonu $GO_1BG_1TS_3$ yani genişleme oranı 1,1, basınç gradyeni -2º ve türbülans seviyesi %7,4 olmalıdır.

Çizelge 4.28. Maksimum Stanton sayısı için sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu

Level	Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (º)	Türbülans Seviyesi (%)
1	-48,64*	-48,72*	-49,31
2	-49,30	-49,13	-49,32
3	-49,65	-49,74	-48,96*
Delta	1,02	1,03	0,37
Rank	2	1	3



Şekil 4.253. Maksimum Stanton sayısı için parametrelerin ortalama S/N oranları

Çizelge 4.28' de belirtilen rank değeri ise maksimum Stanton sayısının belirlenmesinde hangi faktörün en fazla etkili olduğunu göstermektedir. Buna göre maksimum Stanton sayısına en fazla etkiyen faktörler sırasıyla basınç gradyeni, genişleme oranı ve türbülans seviyesi olmuştur.

Maksimum Stanton sayısına incelenen faktörlerin hangi oranda etkilediklerini ortaya koymayı amaçlayan varyans analizi için, Çizelge 4.29'da belirtilen ANOVA tablosunda

bu faktörlerin yüzdesel etkisi görülebilmektedir. Buna göre maksimum Stanton sayısına genişleme oranının etkisi %46,47, basınç gradyeninin etkisi %45,23 ve türbülans seviyesinin etkisi ise %6,64' tür. Maksimum Stanton sayısı için genişleme oranı ile basınç gradyeninin etkisinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca maksimum Stanton sayısı için hesaplanan p değeri 0.05'den küçük olduğu için genişleme oranı ve basınç gradyeni faktörlerinin maksimum Stanton sayısı üzerinde istatistiksel ve fiziksel öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer parametre için hesaplanan p değeri 0.05'den büyük olduğu için, bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı ya da ihmal edilebilir düzeyde olduğu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.29. Maksimum Stanton sayısı için ANOVA tablosu

Değişim Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Yüzdesel Etki	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Genişleme Oranı	2	46,47%	0,0	0,0	28,00	0,034
Basınç Gradyeni	2	45,23%	0,0	0,0	27,25	0,035
Türbülans Seviyesi	2	6,64%	0,0	0,0	4,00	0,200
Hata	2	1,66%	0,0	0,0		
Toplam	8	100,00%				

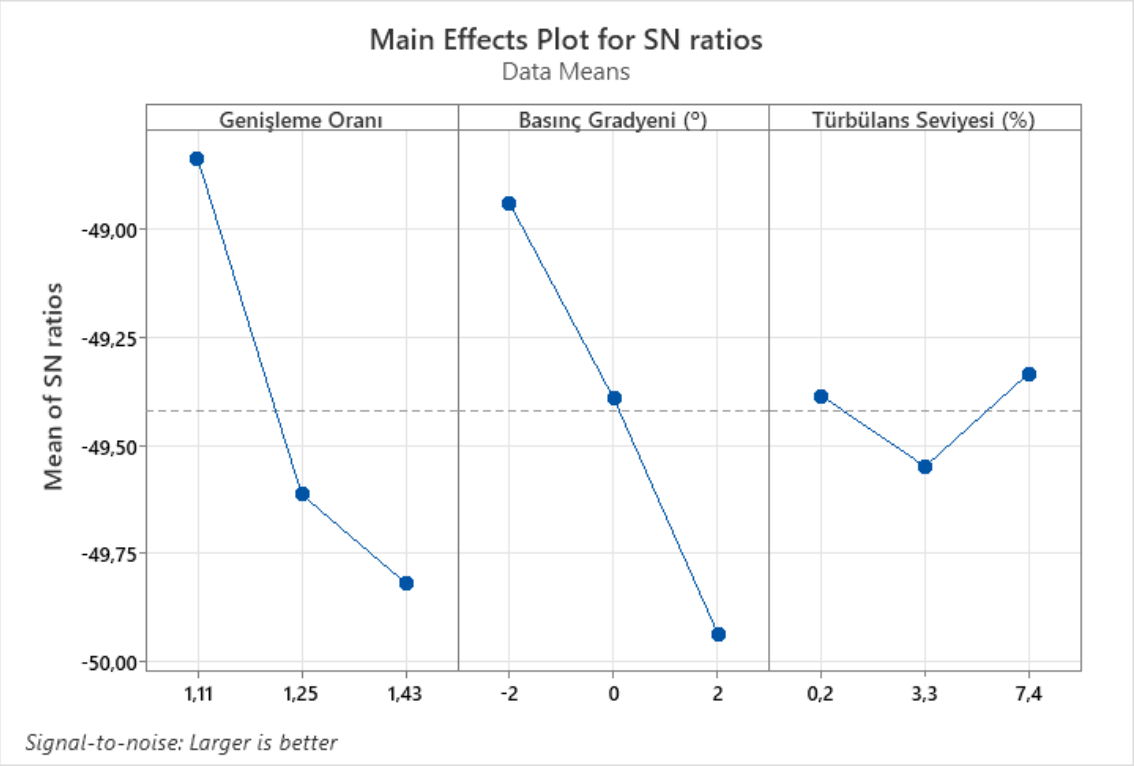
4.2.2.4. Taguchi Metodu Giriş Parametrelerinin S/N Oranı

Her bir yanıt için giriş parametrelerinin ayrı ayrı tahmin edilmesinin ardından, tüm yanıtlar birlikte değerlendirmeye alınarak giriş parametrelerinin her üç yanıta göre tahmini gerçekleştirilmiştir. Akış ve ısı transferi karakteristiklerinin en büyük değerlerine ulaşabilmek için giriş parametrelerinin sıralamasının basınç gradyeni, genişleme oranı ve türbülans seviyesi olduğu tespit edilmiştir. Buna göre yanıt değerlerinin hedef değer en büyük yaklaşımına göre elde edilen ve Çizelge 4.30'da belirtilen ortalama S/N oranları ve Şekil 4.254'te gösterilen S/N oranlarının grafiksel gösterimine göre uygun deney

kombinasyonu $GO_1BG_1TS_3$ yani genişleme oranı 1,1, basınç gradyeni -2º ve türbülans seviyesi %7,4 olmalıdır.

Çizelge 4.30. Tüm yanıtlar için sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu

Level	Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (º)	Türbülans Seviyesi (%)
1	-48,84*	-48,94*	-49,39
2	-49,61	-49,39	-49,55
3	-49,82	-49,93	-49,33*
Delta	0,98	0,99	0,22
Rank	2	1	3



Şekil 4.254. Tüm yanıtlar için parametrelerin ortalama S/N oranları

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada geri basamak geometrisinde akış ve ısı transfer karakteristikleri üzerine etki eden parametrelerin farklı deney tasarımı yöntemleri ile araştırılmıştır. Literatürde oldukça bilinen ve kabul gören deneysel bir çalışma temel alınarak sayısal yöntemlerle analizle gerçekleştirilmiş; sayısal yöntemlerle gerçekleştirilen analiz sonuçlarına deney tasarım metotları uygulanarak optimizasyon ve tahmin çalışmaları yapılmıştır.

İlk olarak Vogel ve Eaton (1985) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmanın geometrik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan geometrik modelde ağ örgü yapısının oluşturulmasının ardından, k – ε tabanlı türbülans modelleri kullanılarak farklı basınç hız bağıntıları, uzaysal ayrıklaştırmalar, türbülans modelleri ve duvar fonksiyonları kombinasyonları ile deneysel sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır. Toplam 48 farklı model kurgulanarak deneysel sonuçlara en yakın olan model tespit edilmiştir. Realizable k – ε türbülans modelinin SIMPLE basınç hız bağıntısı, ikinci derece uzaysal ayrıklaştırma ve standart duvar fonksiyonu kombinasyonlarıyla birlikte kullanıldığında deneysel sonuçlara en yakın sonuçlara ulaştığı tespit edilmiştir. Bu simülasyonda yeniden birleşme uzunluğu 241 mm olarak elde edilmiş ve deneysel çalışmada 253 mm olarak elde edilen sonuç ile aradaki sapma payı yaklaşık %5 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ısı transferi tahmininde de deneysel çalışmadaki ısı transferi ile akış karakteristiği etkileşim grafiği ile sayısal çalışmadan elde edilen grafik aynı davranışı göstermiş ve ısı transferinin maksimum noktası birebir eşleşmiştir. Elde edilen sonucun ağdan bağımsızlığı da tespit edildikten sonra ele alınan geometrik modelde genişleme oranı ve basınç gradyeni modifikasyonları gerçekleştirilmiştir. Basınç gradyeni modifikasyonları Driver ve Seegmiller (1985) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmadaki gibi basamaktan hemen önce -2º' lik bir daralma ve 2,4 ve 6º lik genişleme şeklinde uygulanmıştır. Genişleme oranındaki modifikasyonlar ise yine Driver ve Seegmiller (1985) ile Isomoto ve Honami (1989) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalardaki oranlar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Basınç gradyeni ve genişleme oranındaki değişimlere ek olarak yine Isomoto ve Honami (1989) deneysel çalışmasında ele alınan farklı türbülans seviyeleri de çalışmaya eklenmiştir. Böylelikle üç farklı genişleme oranı (1,1, 1,25 ve 1,43), beş farklı basınç gradyeni (-2, 0, 2, 4 ve 6º) ve beş farklı türbülans seviyesi (%0,2, %1,3, %3,3,

%5,3 ve %7,4) için analizler gerçekleştirilerek farklı parametrelerin akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Gerçekleştirilen modifikasyonlara bağlı olarak toplam 75 farklı kombinasyonun her birinin ayrı aynı türbülans modeli kullanılarak ayrı ayrı analizi gerçekleştirilmiştir. Her bir analizde basamak sonrası x ekseni hızı grafiği, Stanton sayısı grafiği, x ekseni hızına bağlı olarak belirlenen yeniden birleşme noktası ile Stanton sayısının etkileşim grafiği, Nusselt sayısı grafiği ve türbülans kinetik enerjisi grafiği incelenmiştir. Her bir genişleme oranı için yeniden birleşme uzunlukları ve bu uzunlukların basamak yüksekliği olan oranı, ortalama ve maksimum Stanton ile Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara her bir genişleme oranı için akış ve ısı transferi karakteristikleri için değerlendirmeler Çizelge 5.1'de ifade edilmiştir.

Çizelge 5.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları için etkileşim tablosu

Bağımsız Değişkenler			Bağımlı Değişkenler		
Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni	Türbülans Seviyesi	Yeniden Birleşme	Stanton ve Nusselt Sayıları	Türbülans Kinetik Enerjisi
Sabit	Sabit	Artıyorsa	Düşer	Artar	Artar
Sabit	Artıyorsa	Sabit	Artar	Düşer	Düşer
Artıyorsa	Sabit	Sabit	Artar	Düşer	Artar

Yeniden birleşme bölgesinin uzunluğu, genişleme oranının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Aynı şekilde yeniden birleşme bölgesinin uzunluğu basınç gradyeninin büyümesine bağlı olarak da artmaktadır. Dolayısıyla her iki parametrenin eş zamanlı olarak artması belirli bir noktadan sonra yeniden birleşme olmaksızın akışın basamaktan geçtikten sonra doğrudan çıkış yapacağını işaret etmektedir. Yapılan analizlerde de bu durumla karşı karşıya kalınmıştır. Genişleme oranının 1,43 olduğu durum için basınç gradyeninin 4 ve 6 derece olduğu durumlarda yeniden birleşme oluşmadan akış doğrudan kanal çıkışına varacağı tespit edilmiştir. Türbülans seviyesinden bağımsız olarak gerçekleşen bu duruma ilişkin özet bilgiler Çizelge 5.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.2 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları için yeniden birleşme oluşum tablosu

Genişleme Oranı	Basınç Gradyeni (º)	Türbülans Seviyesi (%)	Yeniden Birleşme
1,1	-2, 0, 2, 4, 6	Bağımsız	Oluşur
1,25	-2, 0, 2, 4, 6	Bağımsız	Oluşur
1,43	-2, 0, 2	Bağımsız	Oluşur
	4, 6	Bağımsız	Oluşmaz

Yapılan incelemeler sonucunda her bir genişleme oranında aynı geometriler kullanılması durumunda türbülans seviyesindeki artışın ısı transferi karakteristikleri üzerinde minimal bir artışa neden olduğu fakat akış karakteristiği olarak değerlendirebileceğimiz yeniden birleşme bölgesinde ise küçülmeye neden olduğu sonucuna varılmıştır. Türbülans kinetik enerjisi ise türbülans seviyesindeki artışa bağlı olarak minimal düzeyde artmıştır. Ayrıca yine her bir genişleme oranında aynı geometriler kullanılması durumunda basınç gradyenindeki artışın da ısı transferi karakteristikleri üzerinde daha belirgin bir düşüşe neden olduğu fakat akış karakteristiği olarak değerlendirebileceğimiz yeniden birleşme bölgesinde ise oldukça belirgin bir şekilde büyümesine neden olduğu görülmüştür. Türbülans kinetik enerjisinde ise basınç gradyeninin artışına bağlı olarak bir düşüş gözlemlenmiştir. Basınç gradyeni ile türbülans seviyesinin aynı olduğu durumda ise genişleme oranının artmasına bağlı olarak hem akış karakteristiği değerlendirmesinde ele alınan yeniden birleşme uzunluğunda belirgin bir artış, ısı transferi karakteristiği olarak değerlendirdiğimiz Stanton ve Nusselt sayılarında ise bir düşüş gerçekleşmiştir.

Genişleme oranının 1,43 olduğu durumda 4 ve 6 derecelik basınç gradyeni uygulamasında akış karakteristikleri için değerlendirilebilir sonuçların elde edilememesinin ardından her üç genişleme oranı için -2, 0 ve 2 derecelik basınç gradyeni göz önünde bulundurularak değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca türbülans seviyesindeki değişimler için de kullanılan seviyeler aradaki farkların daha iyi anlaşılabilir olması açısından sadece %0,2, %3,3 ve %7,4'lik türbülans seviyesi ele alınmıştır. Böylelikle toplam 27 farklı kombinasyon kullanılarak kapsamlı bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

Aynı türbülans seviyesine sahip durumlarda gerçekleştirilen genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimlerinde;

1. Genişleme oranının düşük olduğu durumlar için basınç gradyeninin artması yeniden birlikte bölgesinin büyümesinde etkilidir. Aynı şekilde basınç gradyeninin artışı Stanton ve Nusselt sayılarında azalmasına neden olmaktadır. Fakat bu değişimler oldukça küçüktür.
2. Genişleme oranı büyüdükçe basınç gradyeninin artması, yeniden birleşme bölgesinin büyümesinde daha yüksek etki oluşturmaktadır. Aynı şekilde Stanton ve Nusselt sayılarındaki azalmayı da daha belirginleşmektedir.
3. Türbülans kinetik enerjisi ise genişleme oranının düşük olduğu durumlar için daha az, genişleme oranının artmasına bağlı olarak daha fazla artış eğilimi göstermektedir. Aynı genişleme oranı için farklı gradyenlerdeki değerlendirmelerde ise düşük basınç gradyeni yüksek kinetik enerji oluşturmaktadır. Bunun sebebi ise oluşan daha yoğun geri dönme bölgesinden kaynaklanmaktadır.

Aynı basınç gradyeni değişimine sahip durumlarda gerçekleştirilen genişleme oranı ve türbülans seviyesi değişimlerinde;

1. Türbülans seviyesindeki değişimler aynı genişleme oranı üzerinde neredeyse herhangi bir etkiye sahip değil ya da oldukça düşük bir etkiye sahiptir.
2. Türbülans seviyesindeki artış aynı genişleme oranında birleşme bölgesinde ihmal edilebilecek kadar az bir küçülmeye neden olmaktadır. Aynı genişleme oranında türbülans seviyesindeki artış ise Stanton ve Nusselt sayılarında düşük bir artışa sebebiyet vermektedir.
3. Hem ısı hem de akış karakteristiklerinin belirlenmesinde genişleme oranının etkisinin oldukça yüksek tespit edilmiştir. Aynı türbülans seviyesinde genişleme oranındaki artış yeniden birleşme noktasında oldukça büyük bir büyümeye neden olmuştur. Fakat bu artış Stanton ve Nusselt sayılarında da azalmaya sebebiyet vermiştir. Bu düşüşün sebebi ise geri dönme bölgesindeki vortekslerin yoğunluğunun azalmasına bağlıdır.

Aynı genişleme oranına sahip durumlarda gerçekleştirilen basınç gradyeni ve türbülans seviyesi değişimlerinde;

1. Aynı basınç gradyeni üzerinde türbülans seviyesindeki değişimler neredeyse herhangi bir etkiye sahip değil ya da oldukça düşük bir etkiye sahiptir. Fakat genişleme oranı arttıkça bu etki nispeten artmaktadır.
2. Aynı basınç gradyeninde türbülans seviyesindeki artış yeniden birleşme bölgesinde ihmal edilebilecek kadar az bir küçülmeye neden olmaktadır. Aynı basınç gradyeninde türbülans seviyesindeki artış ise Stanton ve Nusselt sayılarında düşük bir artışa sebebiyet vermektedir. Bu değişiklikler genişleme oranının artmasına bağlı olarak daha da belirginleşmiştir.
3. Hem ısı hem de akış karakteristiklerinin belirlenmesinde basınç gradyeninin etkili olduğu tespit edilmiştir. Aynı türbülans seviyesinde basınç gradyenindeki artış için yeniden birleşme noktası büyümüştür. Fakat bu artış Stanton ve Nusselt sayılarında da azalmaya sebebiyet vermiştir. Bu düşüşün sebebi ise geri dönme bölgesindeki vortekslerin yoğunluğunun azalmasına bağlıdır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarında türbülans seviyesinin genişleme oranı ve basınç gradyeni kadar etkili olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda genişleme oranı ve basınç gradyeni değişimleri göz önünde bulundurularak sabit türbülans seviyesi için akış diyagramları ve türbülans kinetik enerjisi dağılımlarına eklerde yer verilmiştir. Genişleme oranı artışına bağlı olarak yeniden birleşme bölgesinde oluşan büyüme hemen dikkat çekmektedir. Ayrıca basınç gradyenindeki değişim de genişleme oranının yüksek olduğu durumlar için yeniden birleşme bölgesinin büyümesinde etkili olmaktadır.

Yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarından elde edilen verilerin değerlendirilesinin ardından, giriş parametresi olarak tanımlanabilecek genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyelerinin yanıt olarak tanımlanabilecek yeniden birleşme uzunluğu, ortalama Stanton sayısı ve maksimum Stanton sayısı üzerindeki tekil etkileri ve birbirleriyle olan etkileşimlerin etkilerinin araştırılmıştır.

Yanıt yüzey yöntemi metodu kullanılarak her bir yanıt için matematiksel model oluşturulmuş ve oluşturulan modellerin ANOVA analizleri gerçekleştirilmiştir. Yanıt yüzey yöntemi çalışmaları kapsamında hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

çalışmalarında kullanılan 27 farklı kombinasyonun değerlerinin tamamı değerlendirilmiştir.

Yanıt yüzey yöntemi metodu kullanılarak yeniden birleşme uzunluğu için oluşturulan modelde en yüksek etkiye sahip olan parametrenin basınç gradyeni olduğu tespit edilmiştir. Oluşturulan modelin %95 güven aralığında oluşturulduğu göz önünde bulundurulduğunda regresyon katsayısının %99,97 olması oluşturulan modelle yapılan tahminin gerçeğe oldukça yakın olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca yanıt yüzey yöntemi kullanılarak oluşturulan etkileşim grafiklerinde yeniden birleşme uzunluğunun, genişleme oranı ile basınç gradyeni etkileşimindeki faktörlerin artışı ve genişleme oranı ile türbülans seviyesi etkileşimindeki faktörlerin artışı ile artış eğiliminde olduğu görülmüştür. Fakat basınç gradyeni ile türbülans seviyesindeki etkileşimde yeniden birleşme uzunluğunun artması için basınç gradyeninin düşmesi ve buna zıt olarak türbülans seviyesinin artması gerektiği tespit edilmiştir.

Yanıt yüzey yöntemi metodu kullanılarak ortalama Stanton sayısı için oluşturulan modelde en yüksek etkiye sahip parametrenin genişleme oranı olduğu tespit edilmiştir. Oluşturulan modelin %95 güven aralığında oluşturulduğu göz önünde bulundurulduğunda regresyon katsayısının %95,73 olması oluşturulan modelle yapılan tahminin gerçeğe oldukça yakın olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca yanıt yüzey yöntemi kullanılarak oluşturulan etkileşim grafiklerinde ortalama Stanton sayısının; genişleme oranı ve türbülans seviyesi etkileşiminde genişleme oranının azalırken türbülans seviyesinin artmasıyla, basınç gradyeni ve türbülans seviyesi etkileşiminde ise basınç gradyeni azalırken türbülans seviyesinin artmasıyla artacağı tespit edilmiştir. Ortalama Stanton sayısı genişleme oranı ve basınç gradyeni etkileşiminde ise her iki faktörün azalmasına bağlı olarak artış göstermektedir.

Yanıt yüzey yöntemi metodu kullanılarak maksimum Stanton sayısı için oluşturulan modelde ise en yüksek etkiye sahip parametrenin benzer şekilde genişleme oranı olduğu görülmüştür. Oluşturulan modelin %95 güven aralığında oluşturulduğu göz önünde bulundurulduğunda regresyon katsayısının %99,18 olması oluşturulan modelle yapılan tahminin gerçeğe oldukça yakın olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca yanıt yüzey yöntemi kullanılarak oluşturulan etkileşim grafiklerinde maksimum Stanton sayısının; genişleme

oranı ve basınç gradyeni etkileşiminde genişleme oranı artarken basınç gradyeninin artmasıyla, genişleme oranı ve türbülans seviyesi etkileşiminde ise genişleme oranı azalırken türbülans seviyesinin artmasıyla artacağı tespit edilmiştir. Maksimum Stanton sayısı basınç gradyeni ve türbülans seviyesi etkileşiminde ise her iki faktörün artmasına bağlı olarak artacağı görülmüştür.

Yanıt yüzey yöntemi aracılığıyla her bir giriş parametresinin çıktılar üzerindeki matematiksel modeli, etkisi ve etkileşimlerinin incelenmesi sonrasında elde edilen tahminlerin güvenilir sonuçlar olduğuna kanaat getirilmiştir. Yapılan analizlere endeksli olarak her bir çıktı için elde edilen regresyon katsayıları yardımıyla parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kullanılan istatistik programı aracılığıyla giriş parametrelerinin analizlerde yer almayan değerleri de tahmin edilerek, maksimum yanıtlar için gereken giriş parametrelerinin kombinasyonu ve yanıt değerleri elde edilmiştir. Yapılan optimizasyona göre genişleme oranının 1,5; basınç gradyeninin -4º ve türbülans seviyesinin %30 olacağı bir durumda maksimum yanıt değerlerine ulaşılabilecektir. Bu durumda da elde edilecek olan yeniden birleşme uzunluğunun 0,378 m olarak gerçekleşecek, sırasıyla ortalama ve maksimum Stanton sayılarının ise 0,0024 ve 0,0036 olacaktır.

Hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarında elde edilen verilerin yanıt yüzey yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışmalarının yapılmasının ardından bir diğer deney tasarımı tekniği olan Taguchi metodu kullanılarak giriş parametrelerinin yanıtlar üzerindeki tahmin değerleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Taguchi metodu kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada L_9 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Böylelikle hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarından elde edilen ve yanıt yüzey yöntemi çalışmalarında tamamı kullanılan 27 farklı kombinasyon yerine sadece 9 farklı kombinasyon değerlendirilmeye alınmıştır. Böylelikle daha az sayıda analiz çalışmasının değerlendirilmesiyle giriş parametrelerinin yanıt değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Taguchi metodu kullanılarak yeniden birleşme uzunluğu için yapılan değerlendirmede yeniden birleşme uzunluğuna en fazla etkiyen faktörler sırasıyla genişleme oranı, basınç gradyeni ve türbülans seviyesi olduğu anlaşılmıştır. Buna göre yeniden birleşme

uzunluğuna genişleme oranının etkisi %89,74, basınç gradyeninin etkisi %5,87 ve türbülans seviyesinin etkisi ise %2,29 olarak tespit edilmiştir. Maksimum yeniden birleşme uzunluğuna ulaşabilmek için ise uygun deney kombinasyonunda genişleme oranının 1,43, basınç gradyeninin 2º ve türbülans seviyesinin %0,2 olması gerektiği ortaya çıkarılmıştır.

Taguchi metodu kullanılarak ortalama Stanton sayısı için yapılan değerlendirmede ortalama Stanton sayısına en fazla etkiyen faktörler sırasıyla basınç gradyeni, genişleme oranı ve türbülans seviyesi olmuştur. Buna göre ortalama Stanton sayısına genişleme oranının etkisi %52,78 basınç gradyeninin etkisi %44,44 ve türbülans seviyesinin etkisi ise %2,78 olarak tespit edilmiştir. Maksimum ortalama Stanton sayısına ulaşabilmek için ise uygun deney kombinasyonunda genişleme oranının 1,1, basınç gradyeninin -2º ve türbülans seviyesinin %0,2 olması gerektiği ortaya çıkarılmıştır.

Taguchi metodu kullanılarak maksimum Stanton sayısı için yapılan değerlendirmede maksimum Stanton sayısına en fazla etkiyen faktörler sırasıyla basınç gradyeni, genişleme oranı ve türbülans seviyesi olmuştur. Buna göre maksimum Stanton sayısına genişleme oranının etkisi %46,47 basınç gradyeninin etkisi %45,23 ve türbülans seviyesinin etkisi ise %6,64 olarak tespit edilmiştir. Maksimum Stanton sayısına ulaşabilmek için ise uygun deney kombinasyonunda genişleme oranının 1,1, basınç gradyeninin -2º ve türbülans seviyesinin %7,4 olması gerektiği ortaya çıkarılmıştır.

Taguchi metodu ile her bir yanıt için giriş parametrelerinin ayrı ayrı tahmin edilmesinin ardından, tüm yanıtlar birlikte değerlendirmeye alınarak giriş parametrelerinin her üç yanıta göre tahmini gerçekleştirilmiştir. Akış ve ısı transferi karakteristiklerinin en büyük değerlerine ulaşabilmek için giriş parametrelerinin sıralamasının basınç gradyeni, genişleme oranı ve türbülans seviyesi olduğu tespit edilmiştir. Buna göre yanıt değerlerinin hedef değer en büyük yaklaşımına göre elde uygun deney kombinasyonda genişleme oranının 1,1, basınç gradyeninin -2º ve türbülans seviyesinin %7,4 olması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Abu-Mulaweh, H. I. 2003. A review of research on laminar mixed convection flowover backward- and forward-facing steps. *International Journal of Thermal Sciences*, 42: 897-909.

Abu-Mulaweh, H. I., Armaly, B.F., Chen, T.S. 2001. Turbulent mixed convection flow over a backward facing step. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44: 2661-2669.

Abu-Nada, E. 2008. Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29: 242-249.

Ahmed, H. E., Kherbeet, A. S., Ahmed, M. I., Salman, B. H. 2018. Heat transfer enhancement of micro-scale backward-facing step channel by using turbulators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126: 963-973.

Akman, G., Özkan, C. 2011. Sac imalatında karşılaşılan yapışma probleminin deney tasarımı ile çözümü. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 12(2): 187-199.

Anonim, 2006. Fluent User's Guide, Fluent Inc., Lebanon, NH.

Armaly, B. F., Durst, F., Pereira, J. C. F., Schönung, B. 1983. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow. *J. Fluid Mech*, 127: 473-496.

Armaly, B. F., Li, A., Nie, J. H. 2003. Measurements in three-dimensional laminar separated flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46: 3573-3582.

Ateş, M. 2015. Geri basamak akışlarında dış türbülansın ve basınç gradyeninin ısı transferi üzerine etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Ateş, M., Pulat, E. 2020. Geri basamak akışlarında dış türbülansın akış ve ısı transferi üzerine etkileri. 2nd International Eurasian Conference On Science, Engineering And Technology, 07-09 October 2020, Gaziantep, Turkey.

Ateş, M., Pulat, E. 2022. Geri basamak akışlarında basınç gradyeni değişiminin akış ve ısı transferi üzerine etkileri. *Eurasia Journal Of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 9(24): 86-94.

Aubrun, S., Kao, P. L., Boisson, H. C. 2000. Experimental coherent structures extraction and numerical semi-deterministic modelling in the turbulent flow behind a backward-facing step. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22: 93-101.

Bademlioğlu, A. H., Canbolat, A. S., Yamankaradeniz, N., Kaynaklı, Ö. 2019. A parametric analysis of the performance of organic Rankine cycle with heat recovery exchanger and its statistical evaluation. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 39(2): 121-135.

Barkley, D., Gomes, M. G. M., Henderson, R. D. 2002. Three-dimensional instability in flow over a backward-facing step. *J. Fluid Mech*, 473: 167-190.

Barrios-Pina, H., Viazzo, S., Rey, C. 2012. A numerical study of laminar and transitional mixed convection flow over a backward-facing step. *Computers & Fluids*, 56: 77-91.

Başol, G. 2014. Bölüm VI: ANOVA. https://www.slideshare.net/gbasol/anova-33163128/8 - (Erişim Tarihi: 26.3.2021).

Bayazıt, M., Yeğen Oğuz, E. B. 2005. Mühendisler İçin İstatistik. Birsen Yayınevi, İstanbul, 197 s.

Bayraktar, I., Landman, D., Cary, W. K., Wood, R., Flamm, J., Hunter, C. 2005. An Assessment of Drag Reduction Devices for Heavy Trucks Using Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics. *Journal Of Commercial Vehicles*, 114(2): 135-146.

Beaudoin, J. F., Cadot, O., Aider, J. L., Wesfried, J. E. 2004. Three-dimensional stationary flow over a backward-facing step. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 23: 147-155.

Besterfield, D. H., Besterfield-Michna, C., Besterfield, G. H., Besterfield-Sacre, M., Urdhwareshe, H., Urdhwareshe, R. 2012. Total Quality Management. Pearson Education, New Delhi, India, 454 p.

Beyazoglu, E., Yuce, B. E., Ates, M., Yalindag, R., Sokmen, K.F., Pulat, E. 2022. Cooling of heated blocks with triangular guide protrusions simulating printed circuit boards. *Sustainability*, 14: 15856.

Biswas, G., Breuer, M., Durst, F. 2004. Backward facing step flows for various expansion ratios at low and maoderate Reynolds number. *Journal of Fluids Engineering*, 126: 362-374.

Boudiaf, A., Danane, F., Benkahla, Y. K., Berabou, W., Benzema, M., Ouyahia, S. 2020. Heat transfer analysis of nanofluid flow through backward facing step. International Conference on Materials & Energy (ICOME'17 and ICOME'18), 10 February 2020, MATEC Web Conf.

Bradshaw, P., Wong, F. Y. F. 1972. The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 52: 113-135.

Chen, L., Asai, K., Nonomura, T., Xi, G., Liu, T. 2018. A review of backward facing step flow mechanism, heat transfer and control. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6: 194-216.

Chen, Y. T., Nie, J. H., Armaly, B. F., Hsieh, H. T. 2006. Turbulent separated convection flow adjacent to backward-facing step effects of step height. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46: 3670-3680.

Cheng, H. C., Chen, W. H., Chung, I. C. 2004. Integration of simulation and response surface methods for thermal design of multichip modules. *IEEE Transactions On Components And Packaging Technologies*, 24(2): 359-372.

Cheng, Y., Xu, G., Zhu, D., Zhu, W., Luo, L. 2006. Thermal analysis for ındirect liquid cooled multichip module using computational fluid dynamic simulation and response surface methodology. *IEEE Transactions On Components And Packaging Technologies*, 29(1): 39-46.

Chiang, T. P., Sheu, T. W. H., Tsai, S. F. 1997. Topological flow structures in backward-facing step channels. *Computers & Fluids*, 26(4): 321-337.

Chmielewski, M., Gieras, M. 2013. Three-zonal wall function for k-ε turbulence models. *Computational Methods In Science And Technology*, 19(2): 107-114.

Coşkun, S., Motorcu, A. R., Yamankaradeniz, N., Pulat, E. 2012. Evaluation of control parameters' effects on system performance with Taguchi method in waste heat recovery application using mechanical heat pump. *International Journal Of Refrigeration*, 35: 795-809.

Çelik, C. 1993. Kalite geliştirmede tasarım eniyileme problemine Taguchi yöntemlerinin uygulamasında sistematik bir yaklaşım. *Doktora Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir.

Çelik, C. 1996. Tasarımla yönlendirilmiş deney teknikleri. *Endüstri Mühendisliği*, 7(6): 14-20.

Dean, A., Voss, D. 1999. Design and Analysis of Experiment. Springer-Verlag, New York, USA, 740 p.

Driver, D. M., Seegmiller, H. L. 1985. Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow, *AIAA Journal*, 23:163-171.

Durst, F., Tropea, C. 1981. Turbulent, backward-facing step flows in two-dimensional ducts and channels. Proceedings of the 3rd Symposium Turbulent Shear Flows, 9-11 September 1981, Davis, USA.

Eaton, J. K., Johnston, J. P. 1981. A review of research on subsonic turbulent flow reattachment, *AIAA Journal*, 19(9):1093-1100.

Ertürk, E. 2008. Numerical solutions of 2-D steady incompressible flow over a backward-facing step, Part I: High Reynolds number solutions. *Computers & Fluids*, 37: 633-655.

Etheridge, D. W., Kemp, P. H. 1978. Measurements of turbulent flow downstream of rearward-facing step. *Journal of Fluid Mechanics*, 86(3): 545-566.

Fessler, J. R., Eaton, J. K. 1997. Particle response in a planar sudden expansion flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 15: 413-423.

Gökçe, B., Taşgetiren, S. 2009. Kalite için deney tasarımı, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6: 71-83.

Göktepeli, I., Atmaca, U., Abdullah Ç. 2020. Investigation of heat transfer augmentation between the ribbed plates via Taguchi approach and computational fluid dynamics. *Journal of Thermal Science*, 29(3): 647-666.

Haque, A., Ahmad, F., Yamada, S., Chaudhry, S. R. 2007. Assessment of turbulence models for turbulent flow over backward facing step. World Congress on Engineering, 2-4 July 2007, London, UK.

Hasgül, Ö. 2010. Üretim parametrelerinin güçlü tasarımı ve bir gıda işletmesinde uygulanması. *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, İstanbul.

Hoffman, H. M., Kaiser, R., Kind, M., Martin, H. 2007. Calculating of steady and pulsating impinging jets–an assessment of 13 widely used turbulence models. *Numerical Heat Transfer Fundamentals*, 51(6): 565-583.

Hossain, M. A., Rahman, T., Ridwan, S. 2013. Numerical investigation of fluid flow through a 2D backward facing step channel. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2: 3700-3708.

Isomoto, K., Honomi, S. 1989. The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment process over a backward facing step. *Journal of Fluids Engineering*, 111: 87-92.

Iwai, H., Nakabe, K., Suzuki, K. 2000. Flow and heat transfer characteristics of backward-facing step laminar flow in a rectangular duct. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43: 457–471.

İlday, Ö., Atlı, V. 2006. Geri basamak akışının deneysel incelenmesi. *İtüdergisi/d mühendislik*, 5(6): 27-38.

İleri, E., Karaoğlan, A. D., Atmanlı, A. 2013. Response surface methodology based prediction of engine performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with canola oil methyl ester. *Journal Of Renewable And Sustainable Energy*, 5: 033132.

Janani, M., Prakash, D., Harini, E., Harish, T. 2017. Enhancement of heat transfer over a double forward facing step with square obstacle through Taguchi's optimization technique. *International Journal of Engineering*, 30(8): 1253-1259.

Jürgens, W., Kaltenbach, H. J. 2012. The effect of sweep on the forced transitional flow over a backward-facing step. *Computers & Fluids*, 59: 1-10.

Kader, B. 1981. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 24: 1541-1544.

Kamber, Ö. Ş. 2008. Plastik enjeksiyon kalıplarında basınç ve sıcaklık parametrelerinin ürün kalitesine etkileri ve Taguchi yöntemi ile optimizasyonu. *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul.

Karasu, T. 2001. Geriye doğru basamaklar arkasında kompleks çevrintili türbülanslı akışın sayısal hesaplanması. II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, 8-11 Kasım 2001, İzmir, Türkiye.

Khanafer, K., Al-Azmi, B., Al-Shammari, A., Pop, I. 2008. Mixed convection analysis of laminar pulsating flow and heat transfer over a backward-facing step. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51: 5785–5793.

Kherbeet, A. S., Mohammed, H. A., Munisamy, K. M., Salman, B. H. 2014. The effect of step height of microscale backward-facing step on mixed convection nanofluid flow and heat transfer characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68: 554–566.

Kılıç, D. 2018. Faktöriyel denemeler için yanıt yüzeyi metodunun uygulanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim Dalı, Ankara.

Kılıç, M., Şentürk, S. 2019. Gelişmekte olan laminer akışta mini kanallı soğutucu bloğun çok yanıtlı Taguchi yöntemi kullanılarak optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(3): 433-450.

Kim, J. Y., Ghajar, A. J., Tang, C., Foutch, G. L. 2005. Comparison of near-wall treatment methods for high Reynolds number backward-facing step flow. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 19(7): 493-500.

Kim, S. E., Choudhury, D. 1995. A near-wall treatment using wall functions sensitized to pressure gradient. *ASME Fed. Separated and Complex Flow*, 217: 273-279.

Kostas, J., Soria, J., Chong, M. S. 2001. A study of a backward facing step flow at two Reynolds numbers. 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, 10-14 December 2001, Adelaide, Australia.

Kotcioğlu, I., Cansız, A., Khalaji, M. N. 2013. Experimental investigation for optimization of design parameters in a rectangular duct with plate-fins heat exchanger by Taguchi method. *Applied Thermal Engineering*, 50: 604-613.

Kumar, A., Dhiman, A. K. 2012. Effect of a circular cylinder on separated forced convection at a backward-facing step. *International Journal of Thermal Sciences*, 52: 176-185.

Küçükkoç, İ., Karaoğlan, A. D., Yaman, R. 2013. Using response surface design to determine the optimal parameters of genetic algorithm and a case study. *International Journal of Production Research*, 51(17), 5039 - 5054.

Lan, H., Armaly, B. F., Drallmeier, J. A. 2009. Three-dimensional simulation of turbulent forced convection in a duct with backward-facing step. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52: 1690–1700.

Launder, B. E., Spalding, D. B. 1972. Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London, UK.

Launder, B. E., Spalding, D. B. 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3: 269-289.

Lee, T., Mateescu, D. 1998. Experimental and numerical investigation of 2D Backward facing step flow. *Journal of Fluids and Structures*, 12: 703-716.

Lee, J. C., Park, S. H., Son, C., Min, J. K., Ha, M. Y., Cho, J. R. 2015. Numerical study on the thermal and flow characteristics of periodically formed inner wavy structures in a cooling channel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(9): 3911-3917.

Leman, O. Y., Wulandari, R., Bintara, R. D. 2019. Optimization of nozzle number, nozzle diameter and number of bucket of Pelton turbine using computational fluid dynamics and Taguchi methods. 1st International Symposium on Advances and Innovations in Mechanical Engineering, 9–10 October 2019, Jakarta, Indonesia.

Li, W., Ji, L., Shi, W., Zhou, L., Chang, H., Agarwal, R. K. 2020. Expansion of high efficiency region of wind energy centrifugal pump based on factorial experiment design and computational fluid dynamics. *Energies*, 13(2): 483-507.

Liakos, A., Malamatris, N. A. 2015. Topological study of steady state, three dimensional flow over a backward facing step. *Computers & Fluids*, 118: 1-18.

Louda, P., Prihoda, J., Kozel, K., Svacek, P. 2013. Numerical simulation of flows over 2D and 3D backward-facing inclined steps. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 43: 268–276.

Louda, P., Prihoda, J., Svacek, P., Kozel, K. 2012. Numerical simulation of separated flows in channels. *Journal of Thermal Science*, 21(2): 145-153.

Mamourian, M., Shirvan, K. M., Ellahi, R., Rahimi, A. B. 2016. Optimization of mixed convection heat transfer with entropy generation in a wavy surface square lid-driven cavity by means of Taguchi approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102: 544–554.

Mao, H. J., Hsiang, W. T., Yue, T. Y. 2017. Numerical simulation and optimization of nanofluids in a complex micro heat sink. *An International Journal of Computation and Methodology*, 71(3): 341- 359.

Mercan, Ş. 2019. Deney tasarımı ve yapay zeka tekniklerinden yararlanarak ürün kalitesinin geliştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir.

Mittal, R., Madanan, U., Goldstein, R. J. 2017. The heat/mass transfer analogy for a backward facing step. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113: 411–422.

Montgomert, D. C. 2012. Design And Analysis Of Experiment. John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 724 p.

Naderi, M., Khamehchi. 2018. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163: 58–66.

Nath, R., Krishnan, M. 2019. Optimization of double diffusive mixed convection in a BFS channel filled with alumina nanoparticle using Taguchi method and utility concept. *Scientific Reports*, 9(19536): 1-19.

Nie, J. H., Armaly, B. F. 2003. Reattachment of three-dimensional flow adjacent to backward-facing step. *Journal of Heat Transfer*, 125: 422-428.

Nie, J. H., Armaly, B. F. 2004. Reverse flow regions in three-dimensional backward-facing step flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47: 4713–4720.

Pulat, E., Diner, M. 2001. Geri basamak akışının nümerik analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 7(1): 29-34.

Pulat, E., Isman, M. K., Etemoğlu, A. B., Can, M. 2011. Effect of turbulnce models and near wall modeling approaches on numerical results in impingement heat transfer. *An International Journal of Computation and Methodology*, 60: 486-519.

Qi, C., Ding, Z., Tu, J., Wang, Y., Wang, Y. 2021. Study on backward-facing step flow and heat transfer characteristics of hybrid nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144: 2269–2284.

Ross, P. J. 1989. Taguchi Techniques For Quality Engineering, McGraw-Hill, New York, USA.

Rout, S. K., Hussein, A. K., Mohanty, C. P. 2015. Multi-objective optimization of a three-dimensional internally finned tube based on response surface methodology (RSM). *Journal of Thermal Engineering*, 1: 131-142.

Salim, M. S., Cheah, S. C. 2009. Wall y^+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows. International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 18-20 March 2009, Hong Kong.

Savaşkan, M. 2003. Deney tasarımı yöntemlerinin karşılaştırmalı kullanımı ile ince sert seramik kaplı matkap uçlarının performans değerlendirmesi ve optimizasyonu. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitisü, İstanbul.

Selimefendigil, F., Öztop, H. F. 2013. Numerical analysis of laminar pulsating flow at a backward facing step with an upper wall mounted adiabatic thin fin. *Computers & Fluids,* 88: 93–107.

Selimefendigil, F., Öztop, H. F. 2014. Effect of a rotating cylinder in forced convection of ferrofluid over a backward facing step. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 71: 142–148.

Selimefendigil, F., Öztop, H. F. 2015. Numerical investigation and reduced order model of mixed convection at a backward facing step with a rotating cylinder subjected to nanofluid. *Computers & Fluids,* 109: 27–37.

Seok, W., Kim, G. H., Seo, J., Rhee, S. H. 2019. Application of the design of experiments and computational fluid dynamics to bow design improvement. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7: 226-239.

Shih, T. H., Zhu, J., Lumley, J. L. 1994. NASA Tech. Rep. TM-16721.

Sıdık, N. A. C., Ghaderian, J., Sadeghipour, S. 2013. Simulation of turbulent flow over a backward facing step using Lattice-Boltzman method. *Journal of Engineering Science and Technology*, 8(6): 670-782.

Singh, A. P., Paul, A. R., Ranjan, P. 2011. Investigation of reattachment length for a turbulent flow over a backward facing step for different step angle. *International Journal of Engineering, Science and Technology,* 3(2): 84-88.

Sözen, A., Çiftçi, E. 2016. Isı tekerleği performansının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 19(4): 547-554.

Sun, X., Kim, S., Yang, S. D., Kim, H. S., Yoon, J. Y. 2017. Multi-objective optimization of a Stairmand cyclone separator using response surface methodology and computational fluid dynamics. *Powder Technology*, 320: 51–65.

Şirvancı, M. 1997. Kalite için Deney Tasarımı Taguci Yaklaşımı. Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 110 s.

Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y. 2005. Taguchi's Quality Engineering Handbook, John Willey & Sons Inc, New Jersey, USA.

Taylan, D. 2009. Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.

Terhaar, S., Velazquez, A., Arias, J. R., Sanchez-Sanz, M. 2010. Experimental study on the unsteady laminar heat transfer downstream of a backwards facing step. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: 457-462.

Tihon, J., Penkavova, V., Havlica, J., Simcik, M. 2012. The transitional backward-facing step flow in a water channel with variable expansion geometry. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 40: 112-125.

Togun, H., Safaei, M. R., Sadri, R., Kazi, S. N., Badarudin, A., Hooman, K., Sadeghinezhad, E. 2014. Numerical simulation of laminar to turbulent nanofluid flow and heat transfer over a backward-facing step. *Applied Mathematics and Computation*, 239: 153-170.

Tong, L. I., Su, C. T., Wang, C. H. 1997. The optimization of multi-response problems in the Taguchi method. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 14(4): 367-380.

Turgut, E., Dikici, A. 2011. Eş eksenli bir ısı değiştiricisinin tasarım parametrelerinin taguchi metodu ile optimizasyonu. 6th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.

Ünverdi, M., Küçük, H. 2019. Taguchi yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak tasarlanan levhalı ısı değiştiricilerin performanslarının karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4): 373-386.

Vogel, J. C., Eaton, J. K. 1985. Combined heat transfer and fluid dynamic measurements downstream of a backward facing step flow. *Journal of Heat Transfer*, 107: 922-929.

Wolfenstein, M. 1969. The velocity and temperature distribution of one-dimensional flow with turbulence augmentation and pressure gradient. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 12: 301-318.

Xie, W. A., Xi, G. N. 2017. Fluid flow and heat transfer characteristics of separation and reattachment flow over a backward-facing step. *International Journal of Refrigeration*, 74: 177-189.

Yang, W. H., Tarng, Y. S. 1988. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84: 122–129.

Yiğit, C. 2018. Improving the horizontal axis wind turbine blade profiles. *Sakarya University Journal of Science*, 22(5): 1432-1437.

Yoon, J., Lee, J. 2018. Parameter analysis and design for the hovering thrust of a quad-rotor air vehicle using CFD and design of experiment. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(2): 781-791.

Yue, T. Y., Hsiang, W. T., Kuan, Y. C. 2016. Numerical simulation and optimization of nanofluid in a C-shaped chaotic channel. *An International Journal of Computation and Methodology*, 70(4): 366–383.

Yue, T. Y., Hsiang, Shih, J. J. 2016. Numerical simulation and optimization of turbulent nanofluids in a three-dimensional wavy channel. *An International Journal of Computation and Methodology*, 69(10): 1169–1185.

Zhang, Y., Ho, S. L., Fu, W. 2018. Applying Response Surface Method to Oil-Immersed Transformer Cooling System for Design Optimization. IEEE Transactions on Magnetics, 54: article number 8401705.

EKLER

EK 1. -2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Akış Diagramı

EK 2. 0 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Akış Diagramı

EK 3. 2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Akış Diagramı

EK 4. 1,1 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Göre Akış Diagramı

EK 5. 1,25 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Göre Akış Diagramı

EK 6. 1,43 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Göre Akış Diagramı

EK 7. -2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Türbülans Kinetik Enerjisi

EK 8. 0 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Türbülans Kinetik Enerjisi

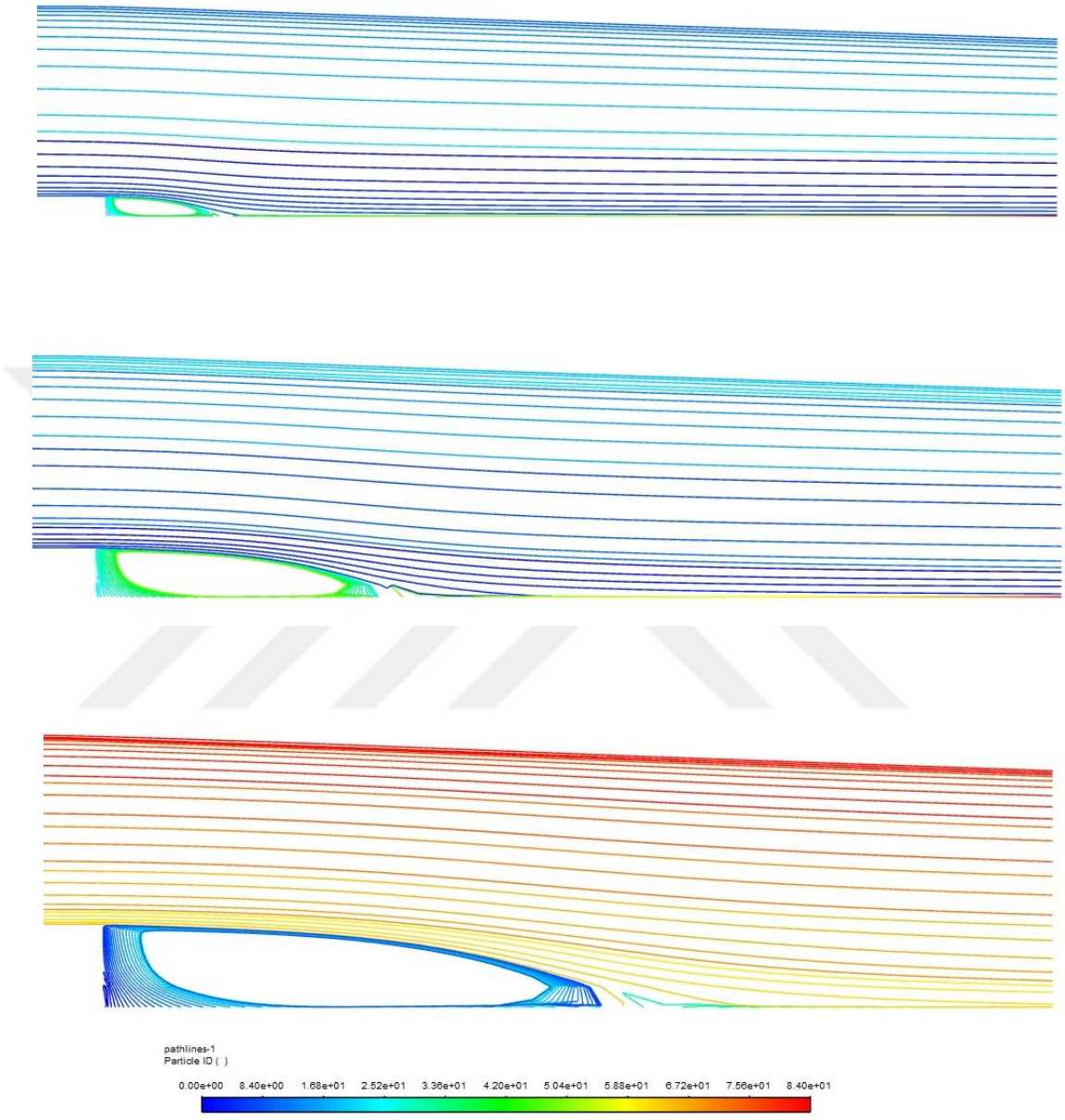
EK 9. 2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Türbülans Kinetik Enerjisi

EK 10. 1,1 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Türbülans Kinetik Enerjisi

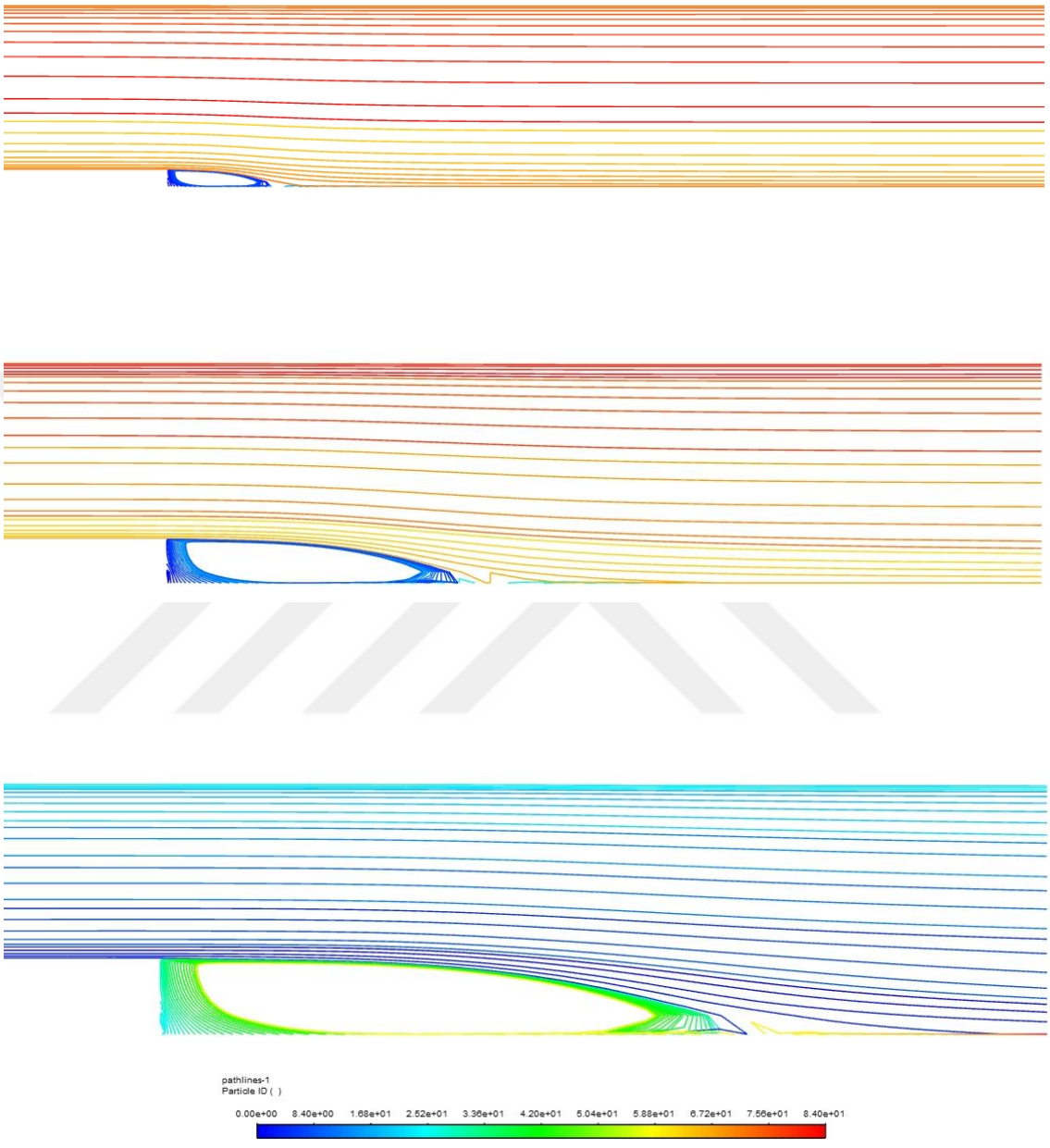
EK 11. 1,25 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Türbülans Kinetik Enerjisi

EK 12. 1,43 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Türbülans Kinetik Enerjisi

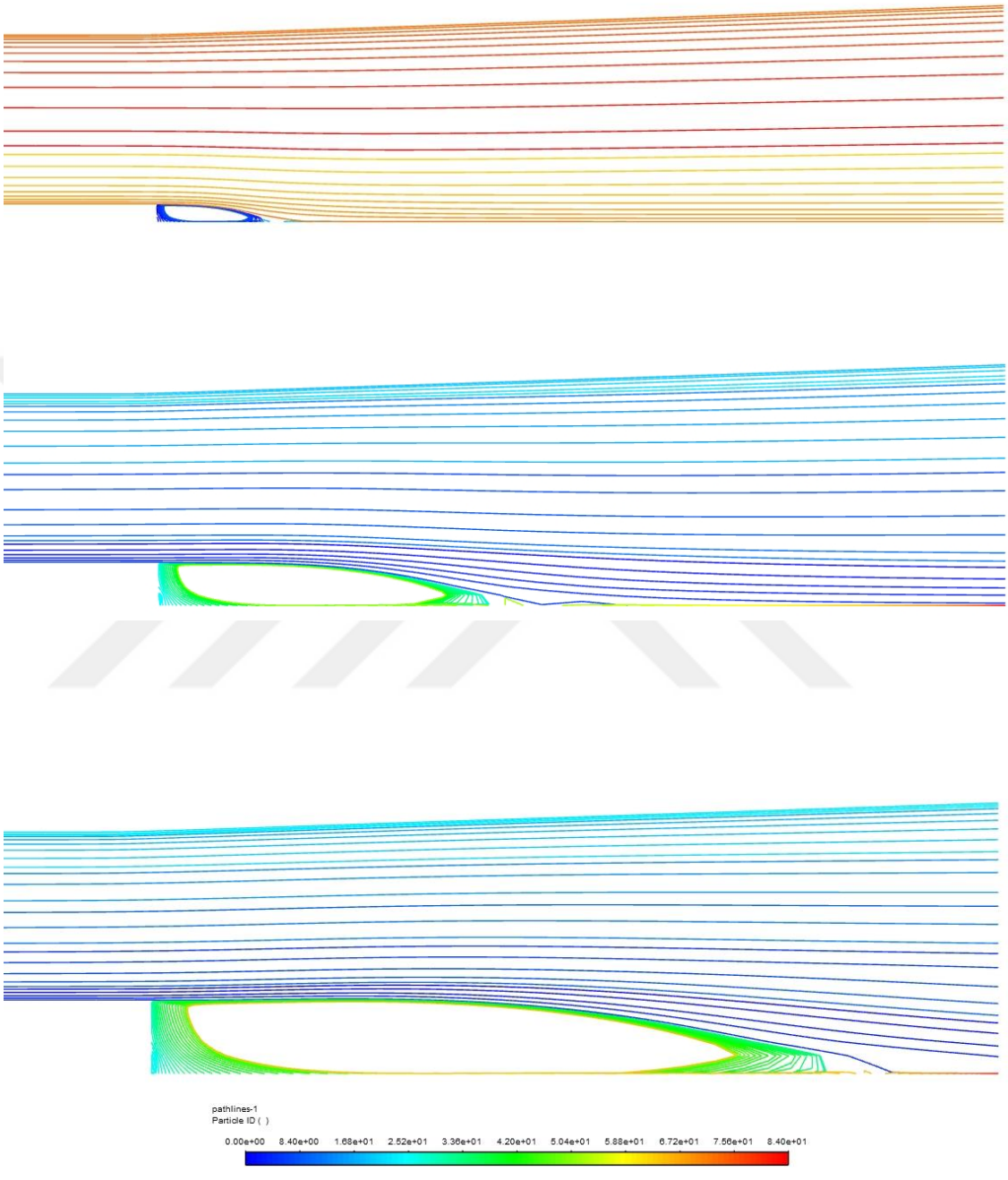
EK 1. -2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Akış Diagramı



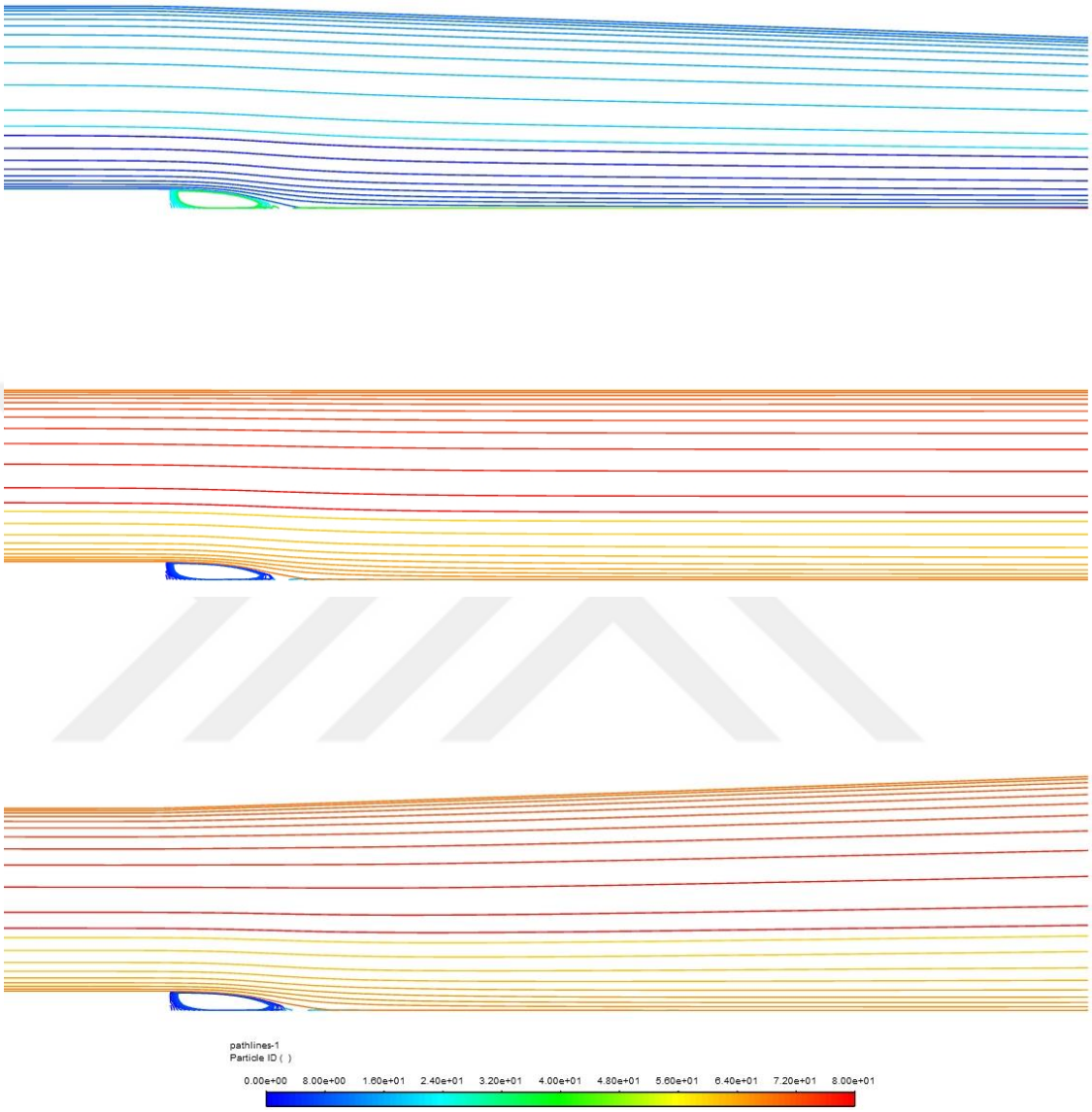
Ek 2. 0 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Akış Diagramı



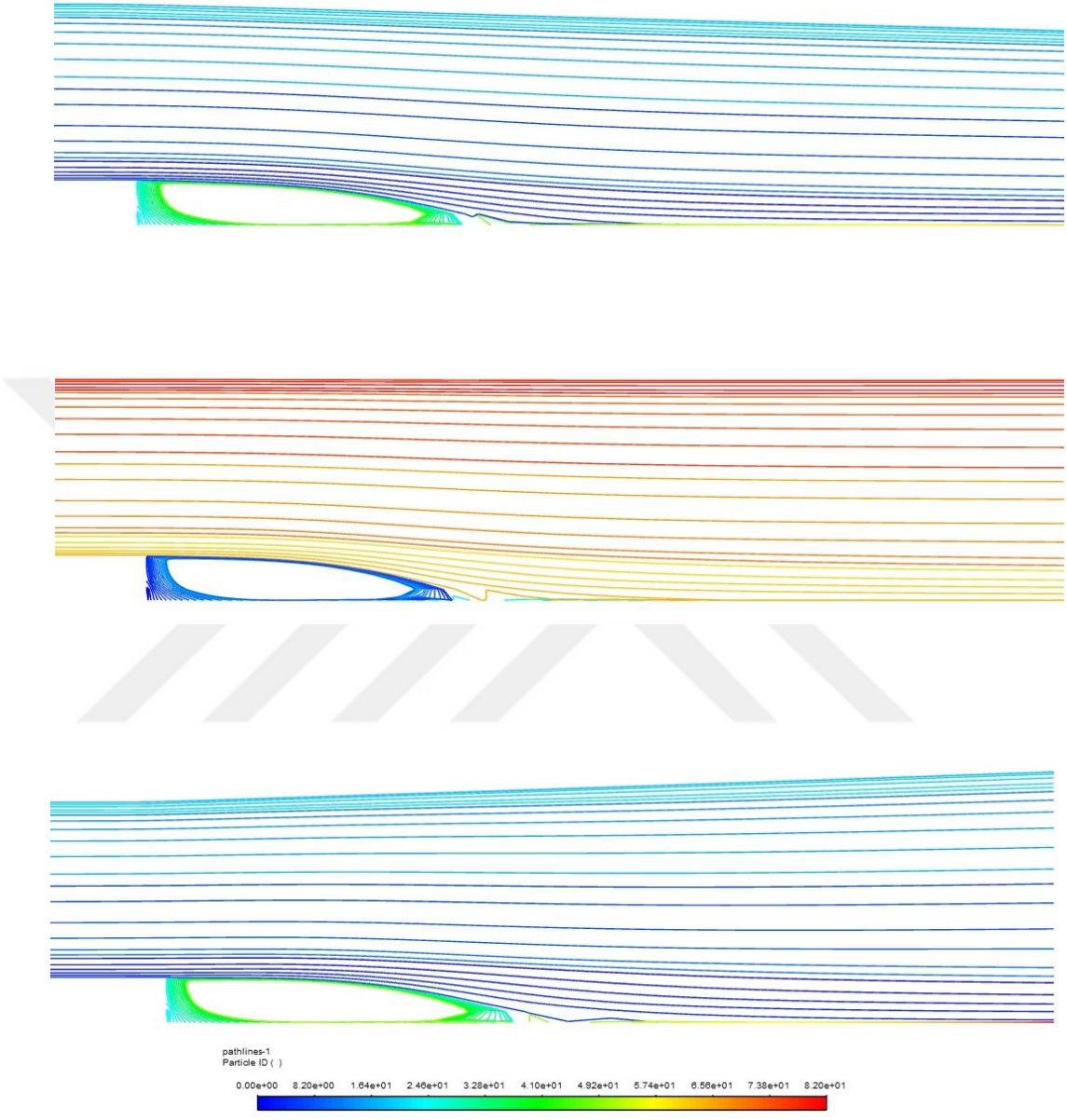
Ek 3. 2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Akış Diagramı



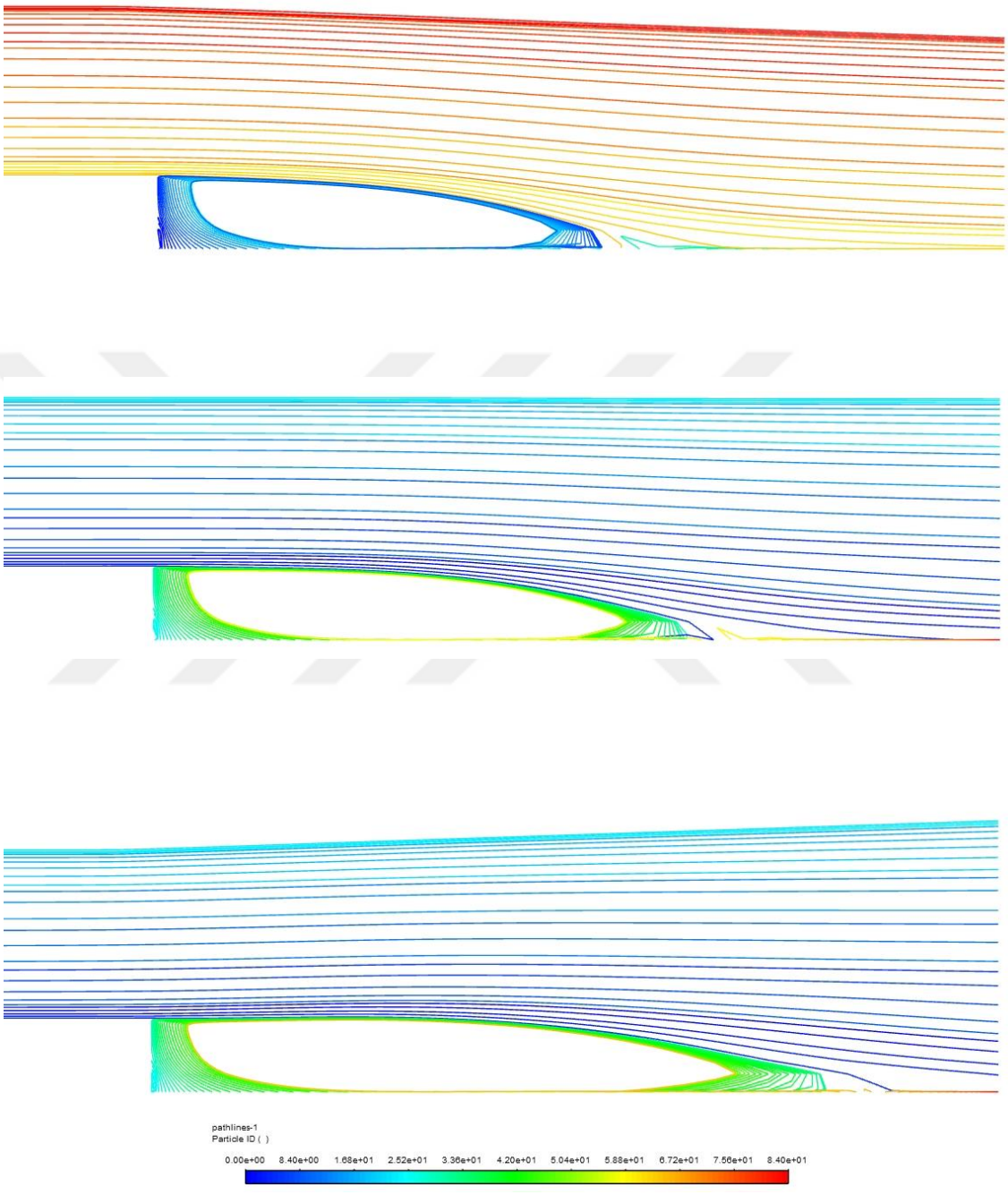
Ek 4. 1,1 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Göre Akış Diagramı



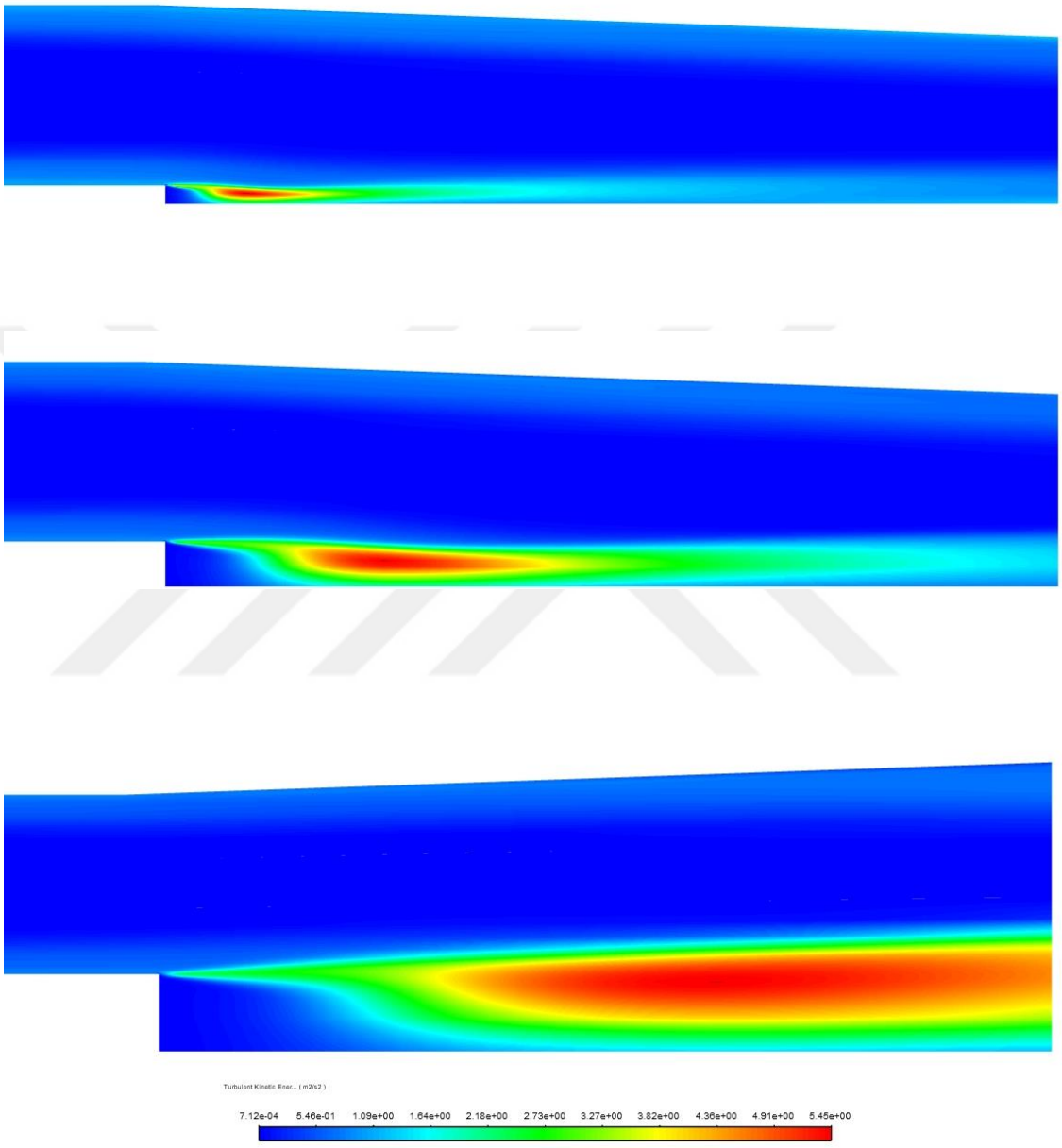
Ek 5. 1,25 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Göre Akış Diagramı



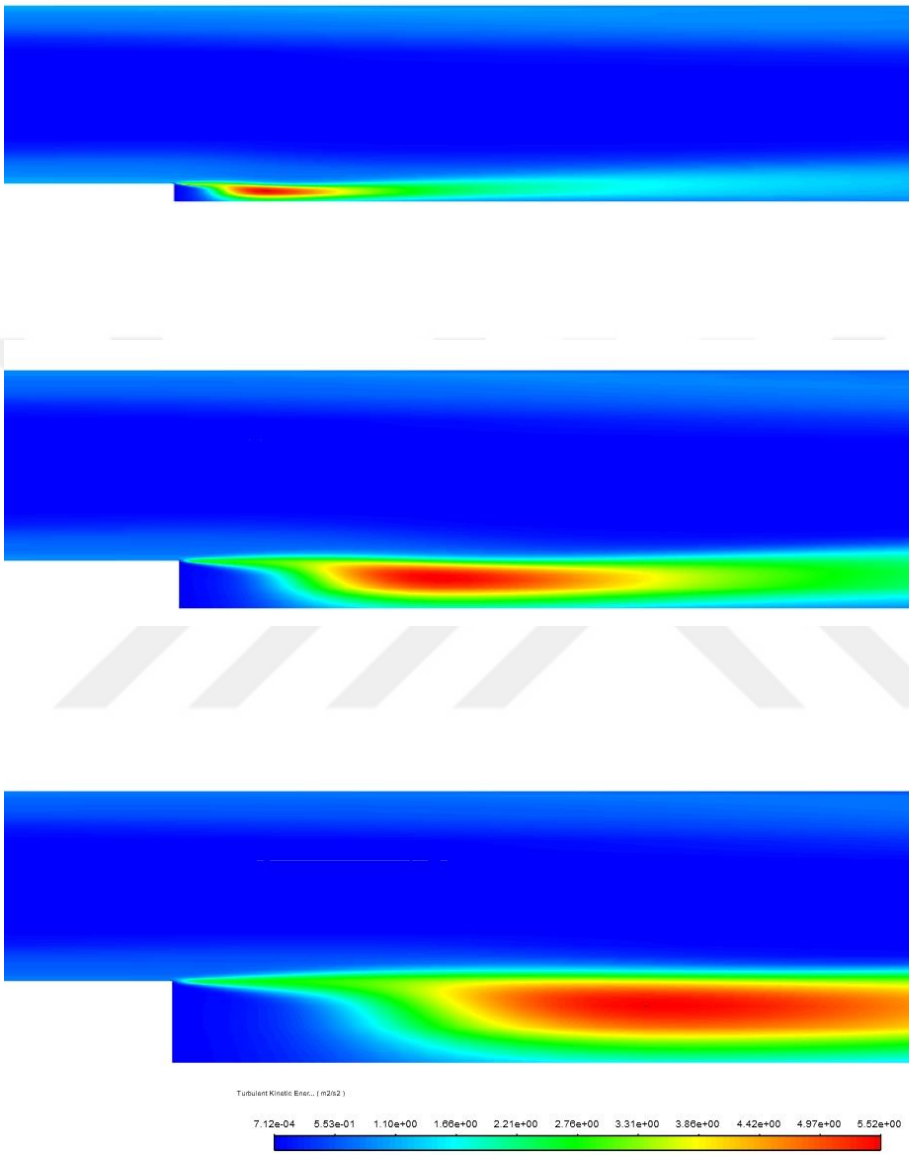
Ek 6. 1,43 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Göre Akış Diagramı



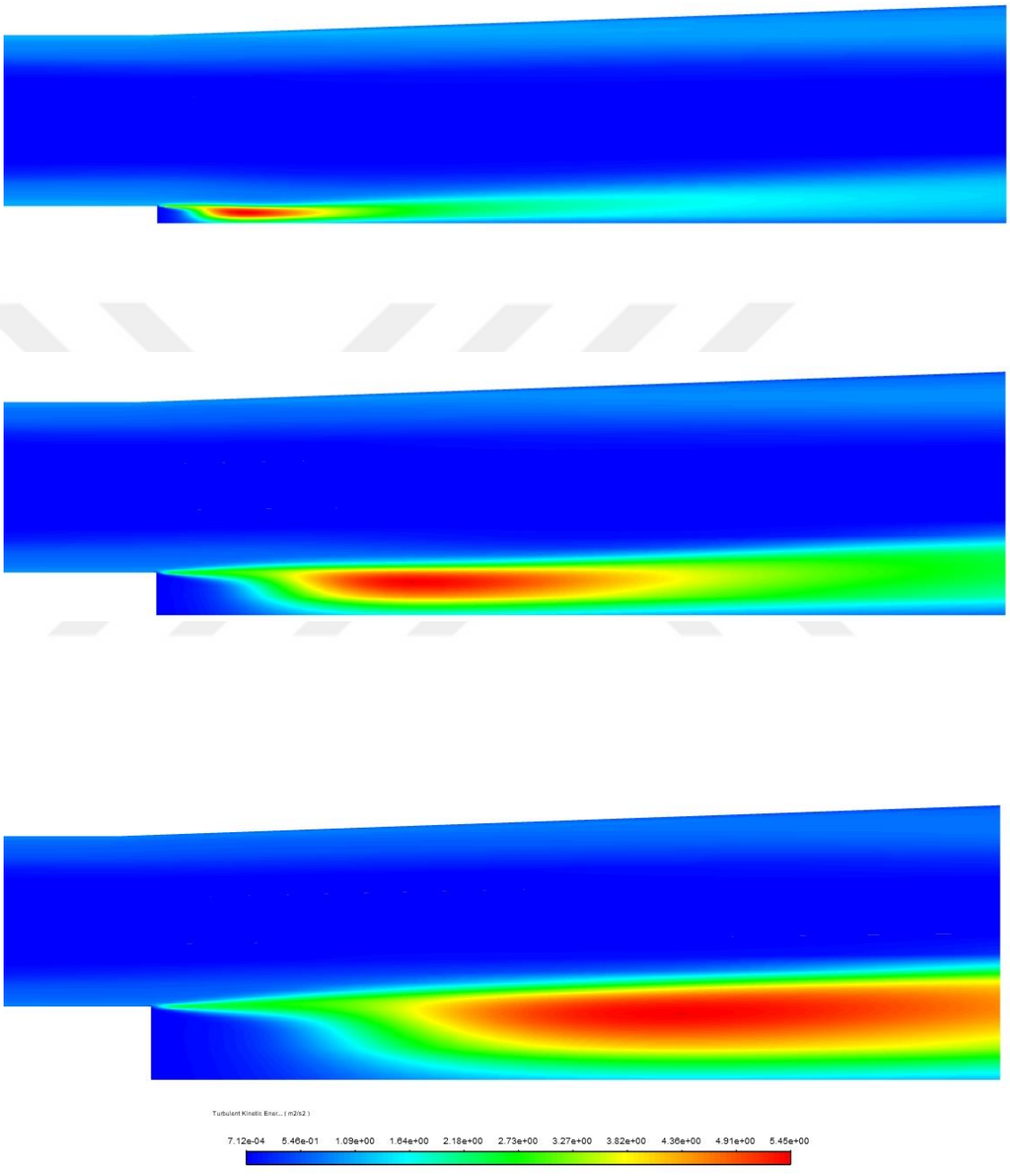
Ek 7. -2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Türbülans Kinetik Enerjisi



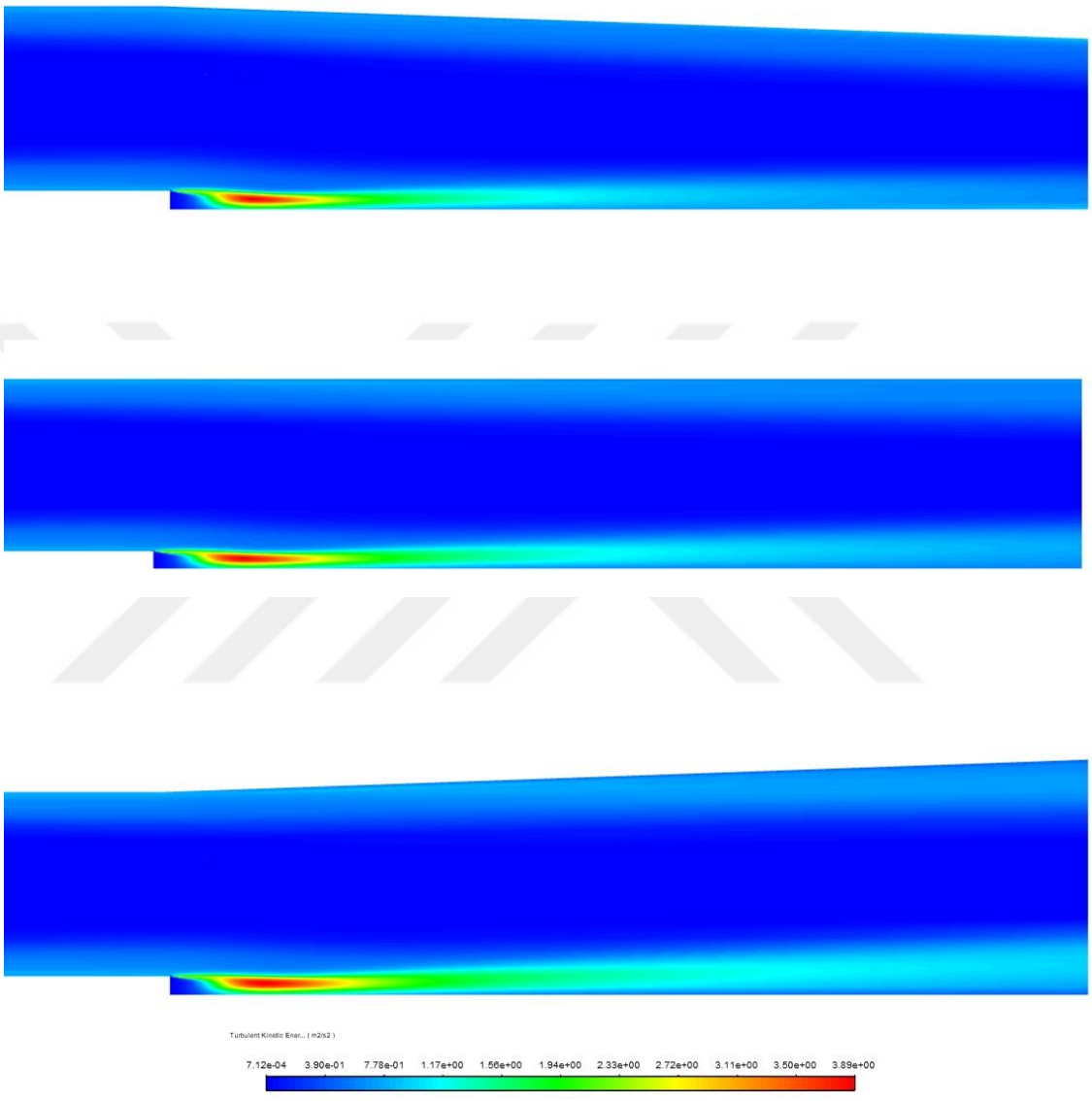
Ek 8. 0 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Türbülans Kinetik Enerjisi



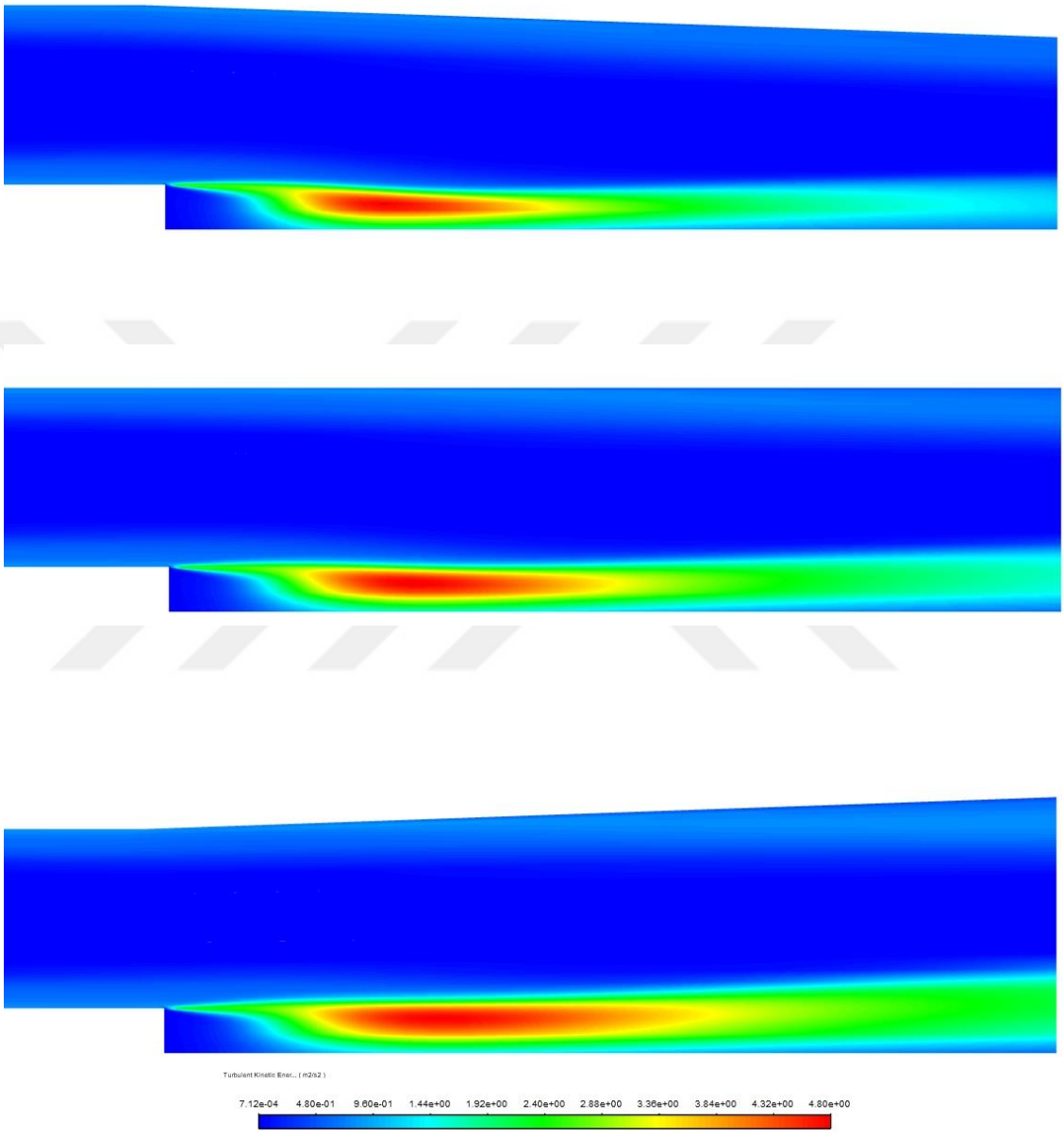
Ek 9. 2 Derece Basınç Gradyeni İçin Genişleme Oranına Göre Türbülans Kinetik Enerjisi



Ek 10. 1,1 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Türbülans Kinetik Enerjisi



Ek 11. 1,25 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Türbülans Kinetik Enerjisi



Ek 12. 1,43 Genişleme Oranı İçin Basınç Gradyeni Değişimine Türbülans Kinetik Enerjisi

