AERODİNAMİK KANATLI RADYAL FAN TASARIMI VE SAYISAL ANALİZİ

Sultan FİDAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AERODİNAMİK KANATLI RADYAL FAN TASARIMI VE SAYISAL ANALİZİ

Sultan FİDAN

0000-0002-8550-478X

Prof. Dr. Muhsin KILIÇ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AERODİNAMİK KANATLI RADYAL FAN TASARIMI VE SAYISAL ANALİZİ

Sultan FİDAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Bu tez çalışmasında aerodinamik kanatlı radyal fan tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Literatürde birçok fan sistemi bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı ilk olarak fanlar hakkında kapsamlı literatür çalışması yapılarak fan seçim kriterleri verilmiş ardından radyal fan tasarımı içerisinde değiştirilen kanat yapılarının sonuca olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ilk olarak farklı aerodinamik kanat yapıları analiz edilerek her bir kanat yapısının hız, basınç, akış çizgisi ve kaldırma katsayısı sonuçları verilmiştir. İncelenen analizler doğrultusunda NACA 0006 ve EPPLER 421 kanat yapıları seçilmiştir. Seçilen aerodinamik kanat yapıları ve sabit kesitli kanat yapısı kullanılarak altı farklı fan tasarımı CAD ortamında modellenmiştir ve analiz için uygun hale getirilmiştir. Analizler çark içerisinde bulunan kanat yapıları ve kanatların pozisyonları değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Aerodinamik kanat yapıları kullanılarak modellenen fan tasarımları analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analizler doğrultusunda seçilen aerodinamik kanatlı radyal fan ile sabit kesitli kanatlara sahip radyal fan sistemi farklı debiler altında çözümlenerek fan performans eğrileri elde edilmiş ve kanat yapısının performansa olan etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik Kanat Yapısı, Sabit Kesitli Kanat, Firar Kenarı, Radyal Fan, Enerji Verimliliği, Sayısal Analiz

2022, viii + 89 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

AERODYNAMIC BLADE RADIAL FAN DESIGN AND NUMERICAL ANALYSIS

Sultan FİDAN

Bursa Uludağ Unıversity
Graduate of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

In this thesis, it is aimed to design a radial fan with aerodynamic blades. There are many fan systems in the literature. For this reason, firstly, a comprehensive literature study on fans was made and fan selection criteria were given, and then the effect of the blade structures changed in the radial fan design on the result was examined. For this purpose, different aerodynamic blade structures were analyzed and the results of speed, pressure, streamline and lift coefficient of each blade structure were given. NACA 0006 and EPPLER 421 blade structures were selected in line with the analyzed analyses. By using selected aerodynamic blade structures and fixed section blade structure, six different fan designs were modeled in CAD and made available for analysis. The analyzes were carried out by changing the blade structures and the positions of the blades in the impeller. Fan designs modeled using aerodynamic blade structures were analyzed and the results were compared. The aerodynamic bladed radial fan selected in line with the analyzes and the radial fan system with fixed cross-section blades were analyzed under different flow rates and fan performance curves were obtained and the effect of blade structure on performance was examined.

Keywords: Aerodynamic Blade Structure, Fixed Section Blade, Trailing Edge, Radial Fan, Energy Efficiency, Numerical Analysis

2022, viii + 89 pages.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi ve tez çalışmasını hazırlamamdaki destek ve yardımlarından ötürü öncelikle kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Muhsin KILIÇ'a ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim. Tez çalışmam esnasında her koşulda yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Sultan FİDAN

../../…

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……..i
ABSTRACT……..ii
TEŞEKKÜR……..iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ……..v
ŞEKİLLER DİZİNİ……vi
ÇİZELGELER DİZİNİ……viii
1. GİRİŞ……1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI……4
2.1 Fan Çeşitleri……4
2.1.1 Eksenel Fanlar……..4
2.1.2 Radyal (Santrifüj) Fanlar……8
2.1.3 Karışık Akışlı Fanlar……14
2.2 Fan Tiplerinin Performans Kıyaslaması ve Verimi……15
2.3 Performans Karakteristikleri……17
2.3.1 Süreklilik Eşitliği……17
2.3.2 Bernoulli Eşitliği……17
2.4 Aerodinamik Kanat Yapısı……18
2.4.1 Aerodinamik Kuvvetler……19
2.4.2 Kanat Profili Etrafındaki Akımın Fiziksel Yapısı……20
2.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yönteminde Kullanılan Denklemler……20
2.5.1 Korunum Denklemleri……20
2.5.2 Standart k-ε Türbülans Modeli……22
2.6 Fan Tasarımı Kapsamında Yapılan Önemli Çalışmalar……23
3. MATERYAL ve YÖNTEM……27
3.1 Aerodinamik Kanat Analizinde Kullanılan Kanat Yapıları ve Ortak Ayarlar……27
3.2 Aerodinamik Kanatlar için Yapılan Analiz Sonuçları……31
3.3 Radyal Fan Tasarımı……41
3.3.1 Radyal Fanlarda Kullanılan Ortak Parçalar……41
3.3.2 Farklı Kanat Yapıları Kullanılan Çark Tasarımları……46
3.4 Fan Tasarımları için Sayısal Modelleme……47
4. BULGULAR ve TARTIŞMA……50
4.1 Sabit Kesitli Kanat Yapısı Kullanılan Fan Analizi……50
4.2 EPPLER 421 Aerodinamik Kanat Yapısı Kullanılan Fan Analizi……55
4.3 EPPLER 421 Aerodinamik Kanat Yapısı Daha Dik Konumlandırılan Fan Analizi.60
4.4 NACA 0006 Aerodinamik Kanat Yapısı Kullanılan Fan Analizi……65
4.5 NACA 0006 Aerodinamik Kanat Yapısı Ters Kullanılan Fan Analizi……70
4.6 EPPLER 421 Aerodinamik Kanat Yapısı Ters Kullanılan Fan Analizi……75
5. SONUÇ……83
KAYNAKLAR ……85
ÖZGEÇMİŞ ……89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
k	Türbülans kinetik enerjisi (J/kg)
Q	Debi (m^3/s)
ΔP	Toplam basınç farkı (Pa)
η_f	Fan verimi
P_h	Hidrolik güç (kW)
N_{fs}	Mil gücü (kW)
ΔP_s	Statik basınç (Pa)
ΔP_d	Dinamik basınç (Pa)
P_m	Motor gücü (kW)
η_m	Motor verimi
H	Düşü (mmSS)
v	Hız (m/s)
A	Kesit alanı (m^2)
P	Basınç (Pa)
z	Referans noktasına göre yükseklik farkı (m)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
N	Fan gücü (kW)
Δ	Kanat kalınlık oranı
t_{max}	Kanat için en yüksek kalınlık (mm)
c	Kanat uzunluğu (mm)
γ	Kamburluk oranı
e_{max}	Kanat için en yüksek kamburluk (mm)
ν	Kinematik viskozite (Pa.s)
ε	Türbülans kinetik enerji yayılımı
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
u_t	Türbülanslı viskozite (Pa.s)
u_k	x_k yönündeki hız bileşeni (m/s)
S_i	Birim hacim başına cisim kuvvetlerini temsil eden kaynak terimi
C_μ	Katsayı
C_p	Havanın sabit basınçta özgül ısısı (J/kgK)
λ	Isı iletim katsayısı (W/mK)
T	Sıcaklık (K)
S_k	Hacimsel kaynak terimi
G_k	Ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi
$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$	k-ε türbülans modeli için model sabitleri

Kısaltmalar	**Açıklama**
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CAD	Computer Aided Design
RPM	Revolutions Per Minute (dev/dak)
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1	Eksenel fanların yapısı…….....	5
Şekil 2.2	Eksenel fan çeşitleri……..	6
Şekil 2.3	Pervane tip eksenel fan…….....	6
Şekil 2.4	Borulu kanal boru fanı, Dönel çıkış kılavuz kanatlı, Sabit çıkış kılavuz kanatlı eksenel fan tasarımları…….…….....	7
Şekil 2.5	Radyal fan çarkı ve gövdesi……..……....	9
Şekil 2.6	Radyal fanların yapısı……	9
Şekil 2.7	Santrifüj fan tipleri……...…….....……	10
Şekil 2.8	Öne eğik kanatlı fanların performans karakteristikleri.....	11
Şekil 2.9	Radyal kanatlı fanların performans karakteristikleri…….	12
Şekil 2.10	Geriye eğik kanatlı fanların performans karakteristikleri……..	13
Şekil 2.11	Karışık akışlı fan……..……..	14
Şekil 2.12	Fan tiplerinin performans kıyaslaması…….……..	15
Şekil 3.1	Analiz edilen kanat yapıları..…… ……	28
Şekil 3.2	Analiz için oluşturulan akış geometrisi……..……..….	29
Şekil 3.3	Kanat analizlerinde kullanılan ağ yapısı……	30
Şekil 3.4	Hız sonuçları……..	34
Şekil 3.5	Basınç sonuçları……..……...	37
Şekil 3.6	Akış çizgileri sonuçları……...…….....	39
Şekil 3.7	Radyal fanın genel görüntüsü……..…….……	41
Şekil 3.8	Salyangoz gövde tasarımı……..……	43
Şekil 3.9	Flanş tasarımı…….……	44
Şekil 3.10	Tasarımda Kullanılan Motor……...……...	44
Şekil 3.11	Çark Tasarımı…….……...	45
Şekil 3.12	Farklı kanat yapıları kullanılan çark tasarımları……	47
Şekil 3.13	Radyal fanlarda kullanılan ağ yapısı…….…….	48
Şekil 4.1	Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı……..……..……	50
Şekil 4.2	Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri…….	51
Şekil 4.3	Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri……..……..	52
Şekil 4.4	Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi……..	53
Şekil 4.5	Basınç dağılımı……...…..…….....	54
Şekil 4.6	Çark üzerinde oluşan basınç değişimi…….……..	55
Şekil 4.7	Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı……..……..	56
Şekil 4.8	Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri……..…..…….	56
Şekil 4.9	Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri…….....……..	57
Şekil 4.10	Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi……..	58
Şekil 4.11	Basınç dağılımı …….……	59
Şekil 4.12	Çark üzerinde oluşan basınç değişimi…….....…....	60
Şekil 4.13	Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı……..……..	61
Şekil 4.14	Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri……..……...	61
Şekil 4.15	Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri……...……	62
Şekil 4.16	Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi……..	63
Şekil 4.17	Basınç dağılımı …….…….....	64
Şekil 4.18	Çark üzerinde oluşan basınç değişimi……...	65

Şekil 4.19 Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı…… 66
Şekil 4.20 Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri……...……. 66
Şekil 4.21 Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri……..…...……..... 68
Şekil 4.22 Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi…….……. 68
Şekil 4.23 Basınç dağılımı …….……..…….. 69
Şekil 4.24 Çark üzerinde oluşan basınç değişimi…….…..……. 70
Şekil 4.25 Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı……..…..... 71
Şekil 4.26 Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri……...……. 71
Şekil 4.27 Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri……..…….…..... 72
Şekil 4.28 Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi……..... 73
Şekil 4.29 Basınç dağılımı …….……..…….. 74
Şekil 4.30 Çark üzerinde oluşan basınç değişimi…….…...……... 75
Şekil 4.31 Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı……...……. 76
Şekil 4.32 Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri……..…..……. 77
Şekil 4.33 Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri……..... 78
Şekil 4.34 Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi……..... 79
Şekil 4.35 Basınç dağılımı …….…… 79
Şekil 4.36 Çark üzerinde oluşan basınç değişimi…….…….. 80
Şekil 4.37 Fanlara ait karakteristik eğriler…….…….....……... 82

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	Kanat profillerine ait elde edilen sonuçlar ……	40
Çizelge 3.2.	Aerodinamik kanat yapısı kullanılan fanlarda elde edilen statik basınç değerleri …….....	81

1. GİRİŞ

Fanlar, sistemde kullanılan akışkan üzerinde basınç farkı oluşturarak akış yolu içerisinde hareket etmesini sağlayan turbo makinelerdir. Fan sisteminde hareketli eleman olan çark, hava üzerinde iş yapar ve havaya statik ve kinetik enerji kazandırır. (Akköse, 2010) Fanlar akışkanın çarktan çıkış yönüne göre üç ana gruba ayrılır. Bunlar eksenel fan, radyal fan ve karışık akışlı fandır.

Eksenel fanlarda hava akışı pervanenin dönüş eksenine paraleldir. Eksenel fanlarda hava, fan çarkı ile yön değiştirmeden aynı eksen etrafında hareket eder. Yüksek hava debi değerleri ve düşük basınç sistemleri için uygun fanlardır. Eksenel fanlar uygulamada üç tip olarak bulunmaktadır. Bunlar; pervane kanat tip eksenel fan, borulu kanal tip eksenel fan, kılavuz kanatlı eksenel fandır. Pervane kanat tipi eksenel fanlar küçük bir göbek çevresine takılı iki veya daha fazla sabit kalınlıklı kanattan oluşmaktadır. Verimleri, debileri ve basınç değerleri düşüktür. (Uralcan, 2003). Tek çarklı eksenel akış fanı kullanarak bir kanal içerisindeki akışı hareket ettirmek için kullanılan fanlara borulu kanal veya kovanlı tip fan denir. Bu tip fanlarda akışkana bir dönme hareketi aktarılarak çıkış kesitinde helisel bir akış oluşturulur. Yüksek debiler için verimlidir. Kılavuz kanatsız borulu tip fanlar pervane çark tasarımına göre daha verimlidir. Dört ile sekiz arasında kanat kullanılır. Kullanılan kanatların yapıları aerodinamik ya da sabit kalınlık kesitli olabilir. Düşük ve orta basınçtaki sistemlerde kullanılırlar. (Canbazoğlu, 2020)

Radyal fanlar; salyangoz gövde, döner çark ve elektrik motoru olmak üzere üç ana elemandan oluşmaktadır. Çarkın merkezinden emilen hava dik bir açı yaparak dönen kanatlar arasından geçerek fandan çıkış yapmaktadır. Kanatların arasında, akışkanın dönmesi ile oluşan merkezkaç etki difüzörden emişi, statik basıncı arttırmayı ve salyangoz çıkışından akışkanı atmayı sağlar. Akışkan kanatları terk ederken akışkanın kinetik enerjisinin önemli bölümü çark ile salyangoz gövde arasındaki genişleme etkisiyle basınca dönüşür (Kuru, 2013) Radyal tip fanlar temelde dört gruba ayrılır.

Bunlar sabit kesitli, öne eğimli, geriye eğimli ve aerodinamik kanatlı radyal fan çeşitleridir. Öne eğik kanatlı radyal fanlarda kanatların şekli fan dönüş yönü ile aynı yöndedir. Yüksek debi, yüksek basınç ve düşük hız şartlarında çalışabilirler. Uygulama alanları alçak basınçlı havalandırma sistemleridir. Sabit kesitli fanların çark yapısı basittir ve nispeten dar kanatlardan oluşur. Genellikle öne eğik ve geriye eğik kanatlı radyal fanlara göre daha gürültülü çalışırlar. Geriye eğik kanatlı radyal fanlarda kanadın uçları dönme yönü ile ters olarak hareket eder. Kararlı hava debisi gerektiren sistemlerde tercih edilirler. Öne eğik kanatlı radyal fanlara göre verimleri yüksektir ancak çalışma hızları daha fazla olduğundan öne eğimli radyal fanlar kadar sessiz çalıştırılamazlar. Aerodinamik kanatlı fan en yüksek verime sahiptir. İşletme maliyetleri düşük olsa da ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Yüksek devirlerde çalışmalarına rağmen gürültü seviyeleri diğer fan tiplerine göre nispeten düşüktür (Canbazoğlu, 2020).

Akışkanın mile göre hem radyal hem de eksenel yönde hareket ederek çarkı 90°'den küçük bir açı ile terk ettiği bu tür fanlara karışık akışlı fanlar denir. Karışık akışlı fanlarda yüksek hava debisi sağlanmaktadır. Fan eğrilerinde kararsız bölge bulunmamaktadır. Karşı basınç değerinin düşük olduğu yerlerde motor aşırı akım tüketmez. Bu fanlardan elde edilen verim eksenel ve radyal fanlara kıyasla daha azdır (Canbazoğlu, 2020).

Bir fan sisteminden yüksek statik basınç elde edilmesi, sessiz çalışması ve az enerji harcaması istenmektedir. Fanların tahrik sistemleri için genellikle elektrik motorları kullanılır. Günümüzde sanayide ya da binalarda kullanılan fanların çoğu verimleri yüksek olmayan, fazla enerji tüketen eski teknoloji ürünleridir. Enerji tüketiminin azaltılması için verimin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında literatürde bulunan bilgiler doğrultusunda fanların özellikleri karşılaştırılmış, radyal fanlarda performans iyileştirilmesi için aerodinamik kanatlı radyal fan tasarımı yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, farklı kamburluk yapılarına sahip 12 adet aerodinamik kanat yapısı için sayısal analizler yapılmıştır. İncelenen aerodinamik kanat yapılarından NACA 0006 ve EPPLER 421 kanat yapıları seçilerek tasarım aşaması gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında da altı farklı fan çark tasarımı yapılarak sayısal analiz ile aşağıda belirtilen soruların cevapları aranmıştır.

Tez çalışmasında cevaplanması beklenen sorular:

- Farklı aerodinamik karakterlere sahip kanatların fan sisteminde kullanılması sonucu nasıl etkilemektedir?
- Aerodinamik kanat kullanılması sabit kesitli kanat kullanılmasına kıyasla radyal fanın performansını nasıl etkilemektedir?
- Çark içerisine yerleştirilen kanatların pozisyonu fan performansını nasıl etkilemektedir?
- Aerodinamik kanatların firar kenarlarının çark yönüne veya dışına doğru yerleştirilmesi sonucu nasıl etkilemektedir?

Tez çalışmasının 2. Bölümünde fanlar ile ilgili literatürde yer alan bilgiler paylaşılmış ardından aerodinamik kanat yapıları hakkında temel bilgiler sunulmuştur. Yapılan tasarımlar HAD yöntemi ile analiz edildiğinden dolayı yöntem içerisinde kullanılan denklemler de bu bölümde paylaşılmış ve fan tasarımı kapsamında yapılan önemli çalışmalar paylaşılmıştır. 3. Bölümde ilk olarak analiz edilen aerodinamik kanat yapıları verilerek sayısal modelleme, hız, basınç, akış çizgisi ve kaldırma katsayısı değerleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre NACA 0006 ve EPPLER 421 kanat yapıları seçilmiş ve bu iki aerodinamik kanat yapısı ile sabit kesitli kanat yapısı kullanılarak altı radyal fan tasarımı yapılmıştır. 4. Bölümde elde edilen bulgular değerlendirilmiş, yorumlanmış ve karşılaştırılmıştır. 5. bölümde ise sonuçlar kısmına yer verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bölüm 2.1'de fan çeşitleri, Bölüm 2.2'de fan performans eğrileri, Bölüm 2.3'de fan sistemlerinde kullanılan denklemler, Bölüm 2.4'de aerodinamik kanat yapısı, Bölüm 2.5'de hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kullanılan denklemler ve Bölüm 2.6'da literatürde fanlar hakkında yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

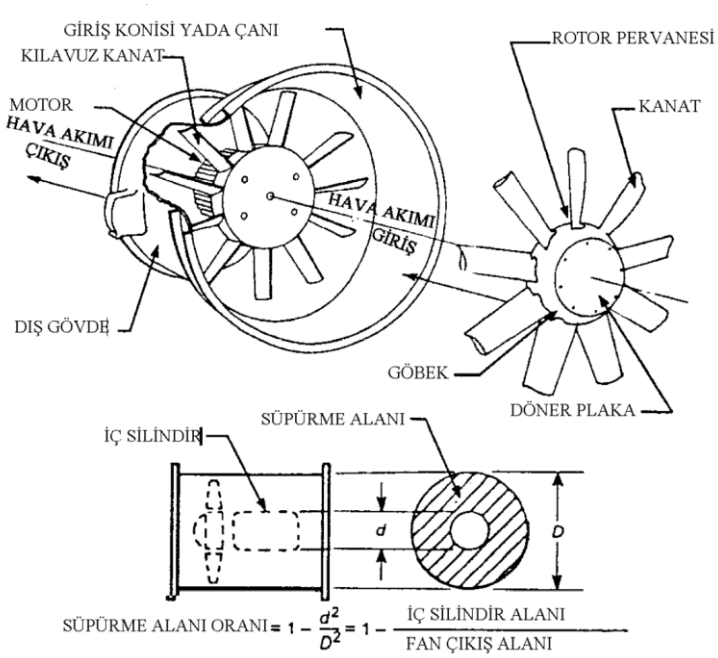
2.1 Fan Çeşitleri

Fanlar, sistemde kullanılan akışkan üzerinde basınç farkı oluşturarak belirli bir akış yolu içerisinde hareket etmesini sağlayan turbo makinelerdir. Fan sisteminde hareketli eleman olan çark, hava üzerinde iş yapar ve havaya statik ve kinetik enerji kazandırır. Fan türüne göre havaya kazandırılan statik ve kinetik enerjinin birbirlerine olan oranı değişmektedir. İyi bir fan sisteminde istenilen performansın yerine getirilmesinin yanı sıra enerji tüketiminin ve gürültü seviyesinin az, veriminin ise yüksek olması istenir. (Akköse, 2010). Fanlar akışkanın çarktan çıkış yönüne göre üç ana gruba ayrılır. Radyal fanlarda akışkan milin eksenine dik, eksenel fanlarda akışkan mil eksenine paralel, yarı eksenel veya yarı radyal fanlarda akışkan mil ekseni ile 90°'den küçük bir açı yapacak şekilde karışık akışlı olarak çarktan çıkış yapar. Radyal, karışık akışlı ve eksenel fan gibi farklı fan çeşitleri için boyutsuz parametreler kullanılarak çizilen karakteristik eğriler karşılaştırılabilir. (Canbazoğlu, 2020).

2.1.1 Eksenel Fanlar

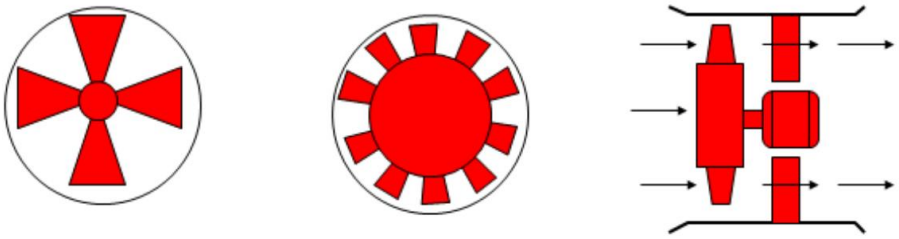
Eksenel fanlarda hava akışı pervanenin dönüş eksenine paraleldir. Eksenel fanlarda hava, fan çarkı ile yön değiştirmeden aynı eksen etrafında hareket eder. Fana giren ve çıkan hava birbirine paralel ise bu fanlar eksenel fan olarak isimlendirilir. Yüksek hava debi değerleri (10000-150000 m^3/h) ve düşük basınç (0 – 500 Pa) sistemleri için uygun fanlardır. Genellikle yüksek debi ve düşük basınç gerektiren sistemlerde tercih edilirler.

Gürültü seviyeleri oldukça yüksektir. Gövde yapıları tercih edildikleri alana göre değişiklik göstermektedir (Bulgurcu, 2015). Kullanım alanları çok geniştir. Kanal, duvar, çatı vb. gibi birçok alanda kullanılırlar. Piyasada daha çok egzoz fanları olarak kullanılırlar. Döner kanat hızı ise göbekten kanat ucuna doğru artış göstermektedir. Statik basınç değerinin fazla olduğu sistemlerde kanat bükümü daha önemlidir. Bu durum fan için verim değerini büyük bir ölçüde değiştirecektir. Sistemdeki küçük direnç değişimleri radyal fana göre büyük debi kayıplarına sebep olur. Karakteristik eğrileri radyal fanlarınkinden oldukça farklıdır; basınç sıfır debideki en yüksek değerinden hızlı düşüş gösterir. Eksenel fanların en büyük tercih sebebi maliyetlerinin düşük olması ve hafif olmalarıdır. Fanlar arasında kullanım alanları en geniş olan fan tipi eksenel fandır (Canbazoğlu, 2020). Eksenel fanların verimleri yaklaşık olarak %75'dir. Bu değer kılavuz kanatlar kullanılarak %85'e kadar çıkartılabilir. Eksenel fanların genel yapısı Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Eksenel fanların yapısı. (Şentürk, 2016)

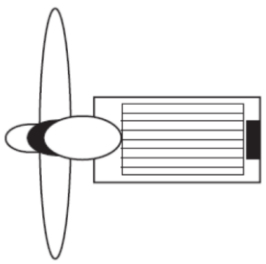
Eksenel fanlar uygulamada üç tip olarak bulunmaktadır. Bunlar; pervane kanat tip eksenel fan, borulu kanal tip eksenel fan, kılavuz kanatlı eksenel fandır (Şekil 2.2).



(a) (b) (c)

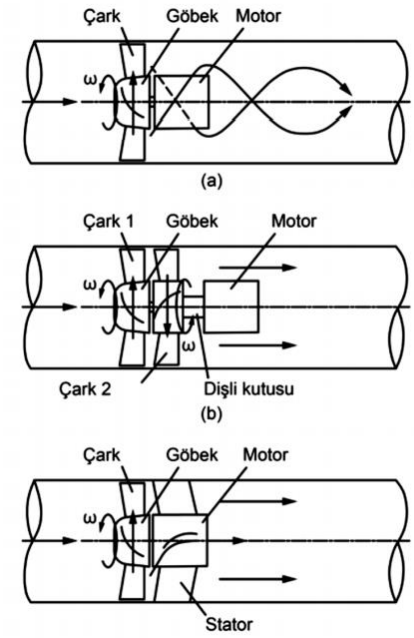
Şekil 2.2. Eksenel fan çeşitleri. (a) Pervane kanat, (b) Borulu kanal tip, (c) Kılavuz kanatlı (Bulgurcu, 2015)

Pervane kanat tipi eksenel fanlar düşük basınçta yüksek hava debisi sağlayan fanlardır. Basit bir yapıda oldukları için genellikle düşük verime sahiptirler ve bu diğerlerine kıyasla biraz daha gürültülü çalışmalarına neden olmaktadır. Diğer fan tiplerine göre daha ucuzdurlar. İki veya daha fazla kanat yapısına sahiptirler. (Şekil 2.3) Kanat kalınlıkları genellikle sabit olmakla birlikte profil kanatlı tasarımlarının kullanıldığı pervanelerde vardır (Akköse, 2010). Pervane tipi eksenel fanlarda hava debisi arttıkça güç gereksinimleri azalmaktadır. Pervane tip eksenel fanlar kanalsız veya düşük dirençli sistemler için uygundur. Bu fanlar genel olarak serbest hava debisine yakın bir değerde çalıştırılmak için imal edilirler. Pervane tip eksenel fanlar en çok tercih edilen fan tipi olmakla beraber verimleri düşüktür. Düşük basınç uygulamaları (0-125 Pa) için tercih edilirler. Düşük statik basınç ve yüksek hava debili sistemlerde tercih sebebidir. Fan verimleri yaklaşık olarak %45- 50 değer aralığındadır. Çark imal masrafları nispeten düşüktür. En çok tercih edildiği uygulamalar düşük basınçlı, yüksek debili hava hareketleri olan sistemlerdir (Canbazoğlu, 2020). Günümüzde en çok vantilatör tasarımlarında tercih edilirler.



Şekil 2.3. Pervane tip eksenel fan. (Akköse, 2010)

Tek çarklı eksenel akış fanı kullanılarak bir kanal içerisindeki akışı hareket ettirmek için kullanılan fanlara borulu kanal veya kovanlı tip fan denir. (Şekil 2.4) Bu tip fanlarda akışkana bir dönme hareketi aktarılarak çıkış kesitinde helisel bir akış oluşturulur. Sabit giriş kılavuz kanatlı fanlar bu dönmeyi engellemek için kullanılır. Borulu kanal tip fanlar 2000 – 3000 devir/dk aralığında çalışır. Yüksek debiler için verimlidir. Çark çapı en az kanal boyuna eşittir. Bu tip fanlarda gürültü seviyesini azaltmak için susturucu kullanılması gerekebilir. Çark yapıları pervane kanat tipi eksenel fanlar ile benzerlik gösterir. Boru tipi eksenel fanlarda ünite kısmı pervane tipi eksenel fanlara göre daha yüksek statik basınçlarda çalışabilir. Kullanıldığı birçok alan mevcuttur. Bunlar arasında mutfaktaki tahliye fanları, bina havalandırma kanalları, davlumbazlar ve otomobil radyatörleri bulunmaktadır. Dönen kanatların oluşturduğu akış bu gibi sistemlerde önemsizdir. Bazı sistemlerde bu dönme istenmemektedir. Örneğin torpido fanları ve maden ocağı fanlarında bu durum istenmeyen bir olaydır (Canbazoğlu, 2020). Bu fanlar çark yapıları sebebiyle pervane tip fanlara benzerler ancak bu fanlar silindirik bir sisteme yerleştirildiklerinden yüksek hız ve 900 Pa basınca kadar olan değerlerde kullanılabilirler. Silindirik gövde yerleştirilirken çarkla arasında bir çalışma boşluğu kalacak şekilde yerleştirilmelidir (Matkap, 2006).



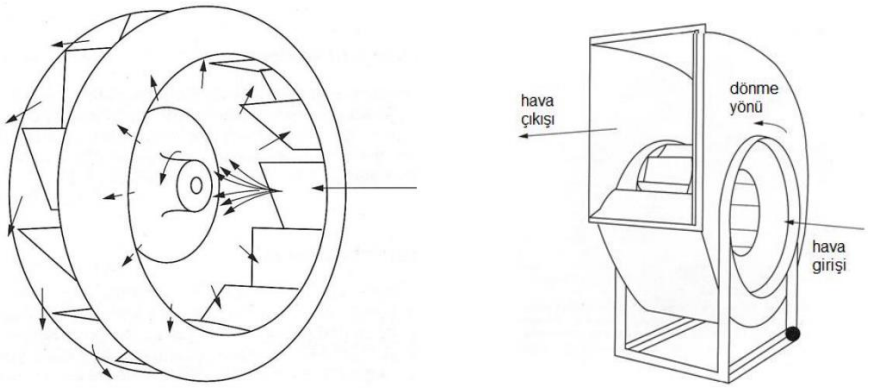
Şekil 2.4. (a) Borulu kanal boru fanı. (b) Dönel çıkış kılavuz kanatlı, (c) Sabit çıkış kılavuz kanatlı eksenel fan tasarımları (Canbazoğlu, 2020)

Boru tipi fanlarda yüksek verim elde edilmesi için yüksek debi ve orta basınç değerlerinde çalıştırılmaları gerekir. Emişin kritik olmadığı alçak ve orta basınçlar için ısıtma, havalandırma tesislerinde kullanılırlar. Ayrıca egzoz gazlarının tahliyesinde, boyama ve kurutma işlemlerinde de kullanılırlar (Uğural, 1992). Borulu kanal tip eksenel fanlarda silindirik gövde içerisinde tahrik motoru, motor tespit ayakları ve fan çarkı bulunur. Bu bölgede motorun olması türbülansa neden olması sebebiyle dezavantaj oluşturur. Bu nedenle de fan verimi etkilenir ve gürültü düzeyinde artışa neden olur. Burada bilinmesi gereken en önemli nokta kanatların türbülanslı bir akış içerisinde tam olarak çalışmalarının mümkün olmadığıdır. Bu sebepten fan çarkı önünde türbülans oluşması zararlıdır. Oluşan bu türbülans statik basıncı artırmasının yanı sıra kanatların da bu ortamda çalışmasına sebebiyet verir. Tüm bunların sonucunda da fan verimi düşer ve gürültü seviyesi artar.

Kılavuz kanatsız borulu tip fanlar pervane çark tasarımına göre daha verimlidir. Bu tip fanların verim değerleri %67 – 72 aralığındadır. 4 ile 8 arasında kanat kullanılır. Göbek çapı, fan dış çapından %50 daha küçüktür. Kullanılan kanatların yapıları aerodinamik ya da tek kalınlık kesitli olabilir. Düşük ve orta basınçtaki sistemlerde kullanılırlar. Endüstriyel alanlarda da kullanım alanı mevcuttur (Canbazoğlu, 2020).

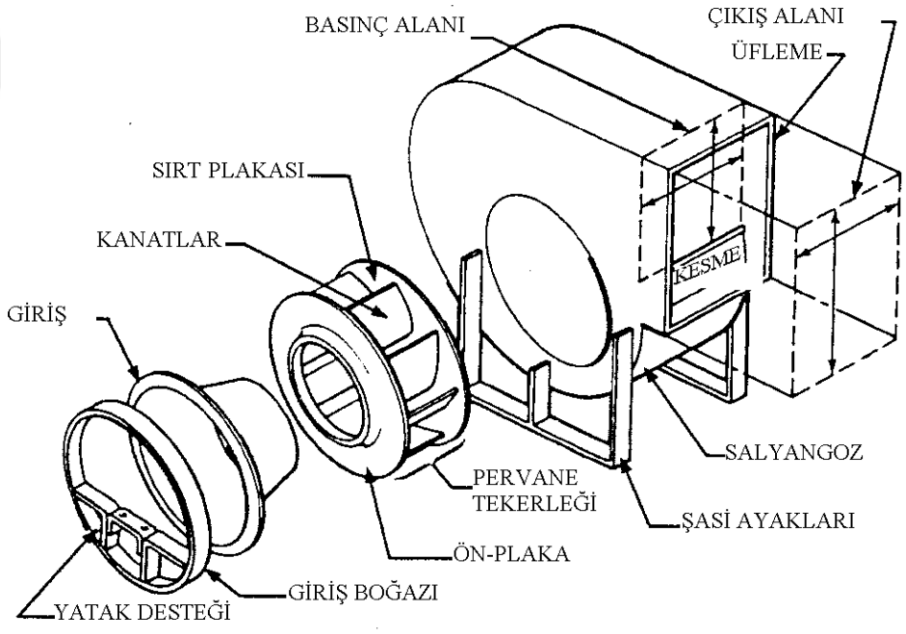
2.1.2 Radyal (Santrifüj) Fanlar

Radyal fanlarda hava, fan çarkını giriş kesitine göre dik bir açı ile kanatlara teğet olarak terk etmektedir (Bulgurcu, 2015). Radyal fanlarda akışkana merkezkaç kuvveti uygulanarak akışkan yönü eksenelden radyal yöne çevrilir ve eksenel fana göre daha fazla basınç artışı sağlanır. Radyal fanlarda daha yüksek basınç artışı oluşturulabildiğinden dolayı daha yüksek verim elde edilebilir. Daha çok endüstriyel fan olarak sanayide tercih edilir. Hava, dik açı ile fan miline gönderilir. Radyal fan çarkı genellikle salyangoz veya fan gövdesi adı verilen bir kabuk yapısı ile çevrelenmiştir. Çarktan gönderilen hava, salyangozun çıkış ağzından geçerek dışarıya yönlendirilir. (Şekil 2.5).



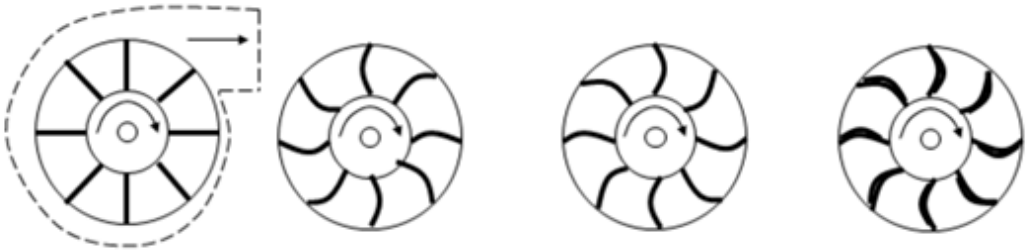
Şekil 2.5. Radyal fan çarkı ve gövdesi. (Canbazoğlu, 2020)

Uygulama aralığı oldukça geniştir. Sıcaklığın yüksek olduğu ve aşındırıcı ortamlarda kullanılabilir. Direkt tahrikli eksenel fanlara kıyasla motora ulaşım radyal fanlarda daha kolaydır. Değişken akış direncinin olduğu yerlerde daha verimli ve sessiz bir çalışma sağlar. Radyal fan yapısı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Radyal fanların yapısı. (Şentürk, 2016)

Radyal fanlarda hava hareketi merkezkaç kuvveti doğrultusundadır. Şekil 2.7'de radyal fan çeşitleri gösterilmiştir. Radyal tip fanlar temelde dört gruba ayrılır. Bunlar sabit kesitli kanatlara sahip, öne eğimli, geriye eğimli ve aerodinamik kanatlı radyal fan çeşitleridir.

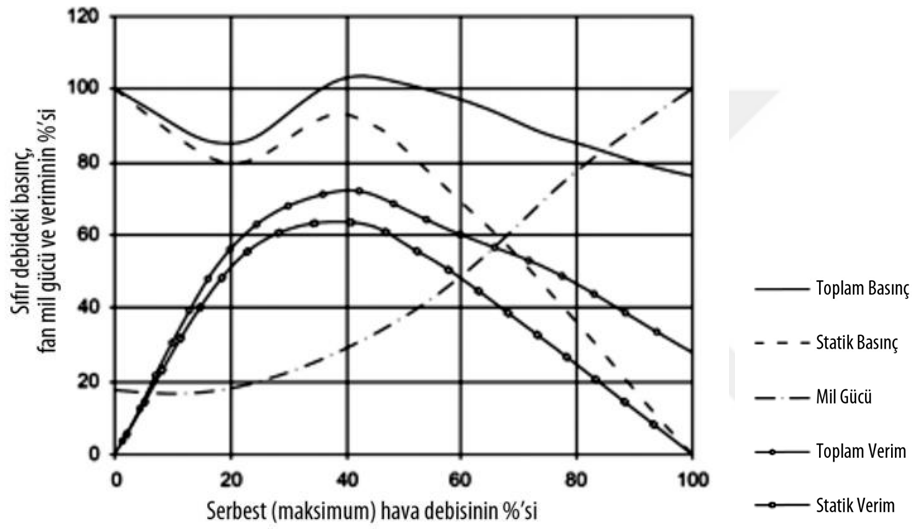


(a) (b) (c) (d)

Şekil 2.7. Radyal fan çeşitleri. (a) Sabit kesitli (b) Öne eğimli (c) Geriye eğimli (d) Aerodinamik kanatlı (Bulgurcu, 2015)

Öne eğik kanatlı radyal fanlarda kanatların şekli fan dönüş yönü ile aynı yöndedir. Yüksek debi, yüksek basınç ve düşük hız şartlarında çalışabilirler. Uygulama alanları alçak basınçlı havalandırma sistemleridir. Kanatların uçları dönme yönünde eğimlidir. Radyal fanlar arasında en yaygın olan çeşididir. Genellikle hava debisinin maksimum ve gürültü düzeyinin düşük olması gerektiği sistemlerde konut ısıtma, klima ve hafif egzoz sistemlerinde tercih edilir. Ortalama olarak 40 mmSS kadar basınç değeri elde edilebilir. Kanat sayısı 24 – 64 adet arasındadır. Öne eğik kanatlı radyal fanlar daha küçük bir çark çapına sahip olduğundan aynı kapasite için daha hafif ve az maliyetli bir yapıya sahiptir. Hava hızı çark hızından daha büyük olduğundan dolayı dinamik basınç yüksek, verim düşüktür. Fan gövdesinin salyangoz tip olması ile dinamik basınç statik basınca dönüştürülür. Öne eğimli kanatların kullanıldığı radyal fanlarda gövde yapısının salyangoz olması zorunludur. Basınç değerinin minimum, debi değerinin maksimum olduğu bölgelerde, motor gücü sürekli artarak motora zarar verebileceğinden dolayı öne eğik kanatlı fanlar, bu bölgede çalıştırılmamalıdır (Canbazoğlu, 2020). Bu fanların verimleri yaklaşık olarak %63 değerindedir.

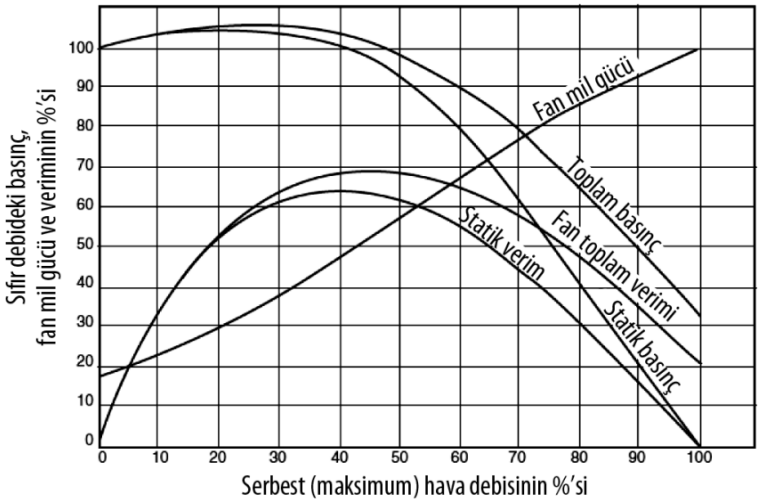
Şekil 2.8'de öne eğik kanatlı radyal fanların performans eğrileri gösterilmiştir. Öne eğik kanatlı radyal fanların verimi geriye eğik kanatlılardan daha düşüktür. Hafif ve ucuzdurlar. Bu tip fanlar maksimum debinin %45'inden yüksek olduğu bölgelerde çalıştırılmalıdır. Performans, gövde özelliklerinin bir bağlantısıdır (Matkap, 2006). Öne eğik kanatlı fanlar bütün debilerde, düşük ve orta basınçlarda temiz hava için seçilebilecek fanların iyisidir. Kapladığı hacim büyük değildir. Düşük dönme hızları sebebiyle gürültü seviyeleri düşüktür. Tüm bunların yanı sıra ise bu fanların verimleri yüksek değildir. Geriye eğik kanatlı tipin aksine debi arttıkça güç de artar.



Şekil 2.8. Öne eğik kanatlı radyal fanların performans karakteristikleri. (Canbazoğlu, 2020)

Sabit kesitli kanatlara sahip radyal fanların çark yapısı basittir ve nispeten dar kanatlardan oluşur. Sabit kesitli kanatlara sahip radyal fanlar yüksek hızlar olmadan 300 mmSS ve daha yüksek statik basınç değerlerinde çalışabilirler. Genellikle öne eğik ve geriye eğik kanatlı radyal fanlara göre daha gürültülü çalışırlar. Dayanıklı 6-10 adet kanat kullanılır. Verimlilik diğerlerine göre düşüktür. Geriye eğik kanatlı radyal fanlara göre daha yüksek basınçlarda çalışmak mümkündür. Bu tip fanlar, basınç eğrisinin en yüksek değerine ulaştığı noktanın sol tarafında çalıştırılmamalıdırlar. Motor gücü debinin yüksek, karşı basıncın ise düşük olduğu durumlarda sürekli olarak artma eğilimindedir ve bu durum motora zarar verir.

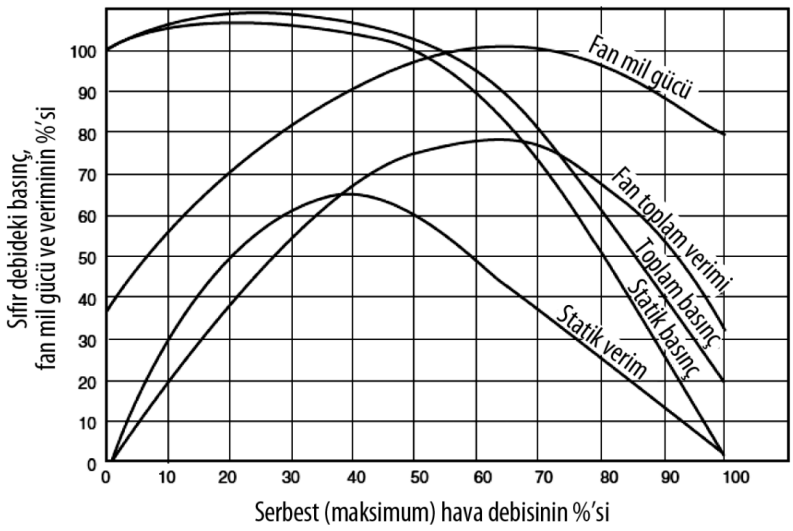
Sabit kesitli kanatlara sahip radyal fanlar genellikle yüksek basınçta düşük hava debisi gerektiren sistemlerde tercih edilirler. (Canbazoğlu, 2020). Verimleri yaklaşık olarak %65 değerindedir. Sabit kesitli kanatlara sahip radyal fanların verimleri diğer radyal fanlara göre daha düşüktür. Güç karakteristikleri öne eğik kanatlı radyal fanlar ile benzerlik gösterir. (Şekil 2.9) Bunlar orta hızda çalışan, yüksek mukavemetli fanlardır. Gövde yapısı en küçük olan fanlardır. Yapısının basit olması nedeniyle hızlı tamirat isteyen sanayi uygulamalarında tercih edilirler. Gürültü seviyeleri yüksektir. Kirli çevre ortamlarında kullanıma uygundurlar (Uğural, 1992).



Şekil 2.9. Sabit kesitli kanatlara sahip radyal fanların performans karakteristikleri. (Canbazoğlu, 2020)

Geriye eğik kanatlı radyal fanlarda kanadın uçları dönme yönü ile ters olarak hareket eder. Kararlı hava debisi gerektiren sistemlerde tercih edilirler. Öne eğik kanatlı radyal fanlara göre verimleri yüksektir ancak çalışma hızları daha fazla olduğundan öne eğimli radyal fanlar kadar sessiz çalıştırılamazlar. Statik basınç değeri 80 mmSS değerine kadar olan sistemler için uygundur. Radyal fanlar arasında verimleri yüksektir. Debi değerinin %50-60 arasında olduğu anda en yüksek verim değeri elde edilir. Verimin en yüksek olduğu noktada çalıştırıldıklarında maksimum güç ve neredeyse maksimuma yakın statik basınç değeri elde edilir (Bulgurcu, 2015).

Bu tip fanlar büyük kapasite ihtiyaçlarını karşılamak için en ideal fanlardır. Fan hızının artırılması ile daha yüksek debi ve basınç elde edilebilir. Geriye eğik kanatlı radyal fanlarda üç farklı kanat şekli kullanılır. Bunlar; sabit kesitli, eğimli ve aerodinamik şekilleridir. Geriye eğik kanatlı radyal fanlar ve aerodinamik kanatlı radyal fanlar, radyal fanlar içinde en yüksek verimliliğe sahip olan fanlardır. Aerodinamik kanatlı ve arkaya eğik kanatlı çarklarda, dönme yönünün tersine arkaya eğimli belirli sayıda kanat bulunur. Bu fanlar en yüksek çark hızına sahiptir (Akköse, 2010). Bu fanlarda verimlilik yaklaşık olarak %82 değerindedir. Geriye eğik kanatlı radyal fanlar genellikle yüksek basınç ve düşük debinin istenildiği durumlarda tercih edilen radyal fan tipidir. (Şekil 2.10)



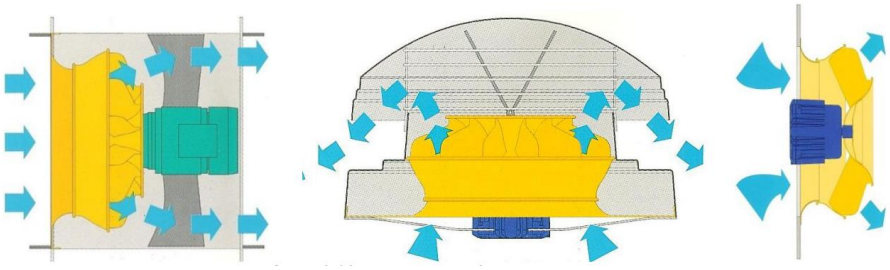
Şekil 2.10. Geriye eğik kanatlı radyal fanların performans karakteristikleri. (Canbazoğlu, 2020)

Aerodinamik kanatlı radyal fan en yüksek verime sahiptir. Serbest hava debisinin %50-75 aralığında yüksek verimli olarak çalışırlar. İşletme maliyetleri düşük olsa da ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Bu tip fanların verim değerleri %86 – 92 değerlerindedir. Gürültü seviyeleri maksimum çalışma noktasında en düşük değerini alır. Yüksek devirlerde (1500 – 3000 dev/dak) çalışmalarına rağmen gürültü seviyeleri diğer fan tiplerine göre nispeten düşüktür. Çarkta bulunan kanat sayısı 9 – ile 16 arasında değişkenlik gösterir.

Yüksek hız ve 30 inchSS (7475 Pa) basınç değerlerine ulaşabilmeleri için yüksek yapısal mukavemete sahip olarak imal edilirler. Performans eğrileri geriye eğik kanatlı radyal fanların performans eğrileri ile benzer olmasına rağmen verimleri daha yüksektir. Kanatlar arasındaki genişliğin yavaşça açılmasından dolayı minimum türbülans oluşur. Yüksek verimin istendiği ısıtma, soğutma, havalandırma ve klima sistemlerinde kullanımları uygundur. Kanat açısı ayarlanabilen aerodinamik kanatlı radyal fanlar ile verim artırılabilir. İlk yatırım maliyetleri yüksektir (Canbazoğlu, 2020).

2.1.3 Karışık Akışlı Fanlar

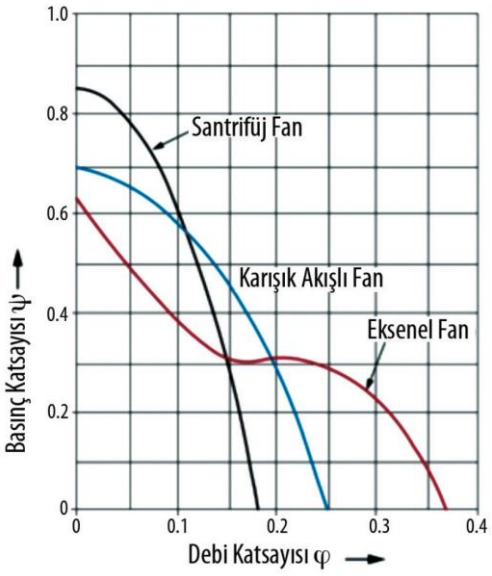
Akışkanın mile göre hem radyal hem de eksenel yönde hareket ederek çarkı 90°'den küçük bir açı ile terk ettiği bu tür fanlara karışık akışlı fanlar denir (Şekil 2.11). Uygulamada silindirik gövde içerisinden standart radyal fan çarkın olduğu, çark çıkışında ise öncelikle bir kılavuz kanal ve sonrasında motor etrafında bulunan sabit çıkışlı kılavuz kanatlar ile akışın eksenel harekete dönüştürüldüğü karışık akışlı fan uygulamaları mevcuttur. Radyal çarklarda salyangoz gövde yapısında öne eğik kanatların kullanılmasının tek sebebi yüksek performans sağlamaları değildir. Fan gövdesi kare, silindirik veya fıçı şeklinde tasarlanabilir. Kare gövde yapısına sahip olanlar kare ya da yuvarlak kanallara bağlanırken, gövde yapısı fıçı biçiminde olanlar çark çapından küçük çaplı giriş ve çıkış kanallarına bağlanabilir (Canbazoğlu, 2020). Çeşitli kullanım alanları mevcuttur. Karışık akışlı fanlarda yüksek hava debisi sağlanmaktadır. Fan eğrilerinde kararsız bölge bulunmamaktadır. Karşı basınç değerinin düşük olduğu yerlerde motor aşırı akım tüketmez. Bu fanlardan elde edilen verim eksenel ve radyal fanlara kıyasla daha azdır.



Şekil 2.11. Karışık akışlı fan. (Canbazoğlu, 2020)

2.2 Fan Tiplerinin Performans Kıyaslaması ve Verimi

Radyal fanlarda akış yönünün eksenel yönden radyal yöne çevrilmesi ve merkezkaç kuvveti nedeniyle eksenel fanlara göre daha fazla enerji artımı sağlanır. Ani basınç değişimlerinde performans eğrisinin eğimi nedeniyle sağlanan debi değerlerinde önemli kayıplar meydana gelmez. Eksenel fanlarda akış yönü sadece helizodial olarak yer değiştirdiğinden daha düşük basınç artımı sağlanır. Küçük direnç değişimlerinde sağlanan debi değerinde önemli kayıplar meydana gelir. Bu nedenle düşük basınç artımı olan sistemlerde kullanılırlar. Karışık akımlı fanlarda çıkış kesiti belirli bir açıda olduğundan hem eksenel hem de radyal fanların avantajları bir aradadır. Orta basınç artımı ve debi ihtiyaçlarında kullanılmaları uygundur (Akköse, 2010). Şekil 2.12'de radyal, eksenel ve karışık akımlı fanların yaklaşık olarak performans eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Fan tiplerinin performans kıyaslaması. (Canbazoğlu, 2020)

Fan verimliliği hava akışına uygulanan enerjinin motor tarafından verilen enerjiye oranı olarak tanımlanır. Fan performans eğrisinin en önemli noktası fanın en verimli olduğu nokta olan maksimum verim noktasıdır.

Bir fanın maksimum verim noktasına yakın bir noktada çalışması fanın performans değerini arttırırken bir yandan da aşınımını azaltır. Fan maksimum verim noktasından uzak bir noktada çalışıyor ise fandaki gürültü seviyesi ve yük mukavemeti artmış olur. Fanın dönüş hızı da fan performansını önemli bir ölçüde etkiler. Bu durum aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir (Akköse, 2010).

$$Q_2 = Q_1 \text{x} \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right) \tag{2.1}$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \text{x} \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)^2 \tag{2.2}$$

Burada Q fan debisini (m^3/s), ΔP toplam basıncı (Pa) ve RPM devir sayısını (dev/dak) ifade etmektedir.

Fan veriminin, hidrolik gücün, mil gücünün elde edilebilmesi için gerekli denklemler aşağıda verilmiştir (Akköse, 2010).

$$\eta_f = \frac{P_h}{1000\, N_{fs}} \tag{2.3}$$

$$P_h = \text{Q x } \Delta P_t \tag{2.4}$$

$$\Delta P_t = \Delta P_s + \Delta P_d \tag{2.5}$$

$$N_{fs} = P_{motor} \text{ x } \eta_{motor} \tag{2.6}$$

Burada η_{fan} fan verimini, P_h hidrolik gücü (kW), N_{fs} mil gücünü, Q hacimsel debiyi (m^3/s), ΔP_t toplam basıncı (Pa), ΔP_s statik basıncı (Pa), ΔP_d dinamik basıncı (Pa), P_{motor} motor gücünü (kW) ve η_{motor} motor verimini ifade etmektedir.

2.3 Performans Karakteristikleri

Fanların temel görevi, Q (m^3/s veya m^3/h) debi değerine sahip havayı, basınç farkı oluşturarak H (mmSS) bir yerden başka bir yere nakletmektir. Bu süreçlerde fandaki hava akımı ve akışkanlar dinamiğinin temel ilkeleri ile açıklanabilir. Bu süreçlerde kullanılan temel ilkeler ise aşağıdaki gibi özetlenebilir. (Bulgurcu, 2015)

2.3.1 Süreklilik Eşitliği

Fan sistemi içerisinde havanın takip edeceği yol boyunca herhangi bir kaçak olmadığı takdirde giriş noktasındaki havanın debi değeri ile çıkış noktasındaki havanın debi değeri eşit olacaktır. Hava debisi aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$Q = V \times A \tag{2.7}$$

Burada Q debi (m^3/s) , V hız (m/s) ve A kesit alanını (m^2) ifade etmektedir.

2.3.2 Bernoulli Eşitliği

Sürtünme kayıplarının olmadığı varsayılır ise, bu denklem basınç, kinetik ve potansiyel enerji toplamının ideal bir akışta sabit olduğunu ifade etmektedir. Bu eşitlik aşağıda verilen denklem ile ifade edilmektedir.

$$P_1 + \frac{\rho {V_1}^2}{2} + \rho g z_1 = P_2 + \frac{\rho {V_2}^2}{2} + \rho g z_2 \tag{2.8}$$

Burada; P basınç (Pa), ρ özgül ağırlık (kg/m^3), V hız (m/s), z referans noktasına göre olan yükseklik farkı (m) ve g yer çekimi ivmesi (m/s^2) olarak tanımlanmaktadır.

Verilen eşitlikten görüleceği üzere basıncın yüksek, hızın düşük olabileceği gibi basınç değeri düşük, hız değeri yüksek olabilir ancak tüm durumlarda toplam enerji sabit kalacaktır. Bernoulli eşitliği ile enerjinin korunumu ifade edilmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji toplamı sabit kalmaktadır. Gerçek akış esnasında sürtünme kaybı meydana geleceğinden eşitliğin sol tarafına enerji kaybı terimi eklenmelidir. Fan sistemlerinde kullanılan bir diğer ilke ise impuls - momentum ilkesidir. Bu ilke ile dönme enerjisinin basınca dönüşümü ifade edilmektedir. (Bulgurcu, 2015)

Bu bölüme kadar fanlar hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Fan tasarımında aerodinamik kanat kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile analiz yapılacağı için öncelikle aerodinamik kanat yapıları hakkında bilgilendirme yapılmış ardından analiz aşamasında kullanılan denklemler verilmiştir.

2.4 Aerodinamik Kanat Yapısı

Kanat profilleri genellikle dairesel bir hücum kenarından oluşmaktadır. Bu noktadan itibaren firar kenarı olarak belirtilen noktaya doğru kesit giderek azalır. Kanat kalınlık oranı, maksimum kalınlık değerinin kanat boyuna oranıdır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\Delta=\frac{t_{max}}{c} \tag{2.9}$$

Burada Δ kanadın kalınlık oranı, t_{max} kanat için maksimum kalınlık (mm) ve c kanat uzunluğu (mm) olarak ifade edilmektedir.

Aerodinamik kanatların performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri maksimum kalınlık noktasının kanat boyunca bulunduğu konumdur. Maksimum kalınlık noktası kanadın %30 ila %60'ı arasındadır (Yükselen, 2011). Kamburluk oranı, maksimum kalınlığın kanat boyuna oranıdır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\gamma=\frac{e_{max}}{c} \tag{2.10}$$

Burada γ kamburluk oranı, e_{max} maksimum kamburluk yüksekliği (mm) ve c kanat uzunluğu (mm) olarak ifade edilmektedir.

2.4.1 Aerodinamik Kuvvetler

Uçağın havalanabilmesi için gerekli olan kuvvet değeri taşıma kuvvetidir. Uçakların havalanabilmesi motorlardan oluşan itki kuvvetine uçağın hız kazanmasıyla kanatlarda oluşan hava akımına bağlıdır. Kanatlar üzerinde dağılan hava basınç farkı oluşturur ve uçağın hava içerisinde hareket ederken havaya tutunmasını sağlar. Havanın yerel hızı da buna göre değişkenlik gösterir. Dinamik basınç değerinin sıfır ve toplam basıncın statik basınca eşit olmasının sebebi durma noktasında hava hızının sıfır olmasıdır. Kanat profili etrafındaki basınç dağılımı Eşitlik 2.21'de belirtildiği şekilde boyutsuzlaştırılır ve bu boyutsuz sayıya basınç katsayısı denir (Genç ve diğerleri, 2008).

$$C_p = \frac{P-P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho v^2{}_{ref}} \tag{2.11}$$

Denklemde belirtilen C_p basınç katsayısını, P statik basınç değerini (N/m^2), P_{ref} referans basıncını (N/m^2), ρ akışkan yoğunluğunu (kg/m^3) ve V_{ref} referans hızını (m/s) ifade etmektedir.

Aerodinamik kuvvetin hava hızına paralel bileşenine sürükleme kuvveti denir. Sürükleme kuvveti akışa maruz kalan cismin akışkan ile teması sonucu oluşan akış yönündeki kuvvettir. Sürükleme katsayısı aşağıda verilen denklem ile ifade edilmektedir.

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho V^2 A} \tag{2.12}$$

Aerodinamik kuvvetin hava hızına dik bileşenine kaldırma kuvveti denir ve kaldırma katsayısı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho V^2 A} \tag{2.13}$$

Bu denklemlerde C_D sürükleme kuvveti katsayısı, F_D sürükleme kuvveti (N), C_L kaldırma kuvveti katsayısı, F_L kaldırma kuvveti (N), ρ akışkan yoğunluğu (kg/m^3), V hava hızı (m/s), A kanat yüzey alanı (m^2) olarak tanımlanmaktadır.

2.4.2 Kanat Profili Etrafındaki Akımın Fiziksel Yapısı

Kanat profili etrafındaki akım alanı, profilin üst ve alt yüzeyi boyunca laminer olarak firar kenarına doğru ise türbülanslı olarak gelişerek küçük ve orta hücum açıları için sınır tabakalar oluşmaktadır. Aerodinamik kanadın ön ucundan giren hava, kanadın dışbükey üst kısmında hızlanarak hareket eder ve artan hava hızı basıncı azaltacağından kanat üzerinde düşük basınçlı bir emiş alanı meydana getirir. Aerodinamik kanadın, içbükey alt kısmında göreceli olarak daha yavaş hareket eden hava, kanat alt yüzeyinde yüksek basınç oluşturur. 15°'den büyük hava giriş açısı için kanat profilinin üst kısmında hareket eden hava, kanat yüzeyini takip edemeyerek kanat yüzeyinden uzaklaşır ve kanat arka ucuna doğru türbülans oluşturmaya başlar. Bu durum, kaldırma kuvvetinde azalma, verimde düşme ve kanat üzerinde titreşime sebebiyet verir (Genç ve diğerleri, 2008).

2.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yönteminde Kullanılan Denklemler

2.5.1 Korunum Denklemleri

Sayısal modellemede tanımlanan korunum denklemleri aşağıdaki gibidir:

Kütlenin korunumu

$$\frac{\partial(qu_{k)}}{\partial x_k} = 0 \tag{2.14}$$

Burada ρ akışkanın yoğunluğudur (kg/m^3), u_k (m/s) x_k yönünde hız bileşenidir.

Momentumun korunumu

$$\frac{\partial(qu_i u_k)}{\partial x_k} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2{}_k} + \text{Si} \tag{2.15}$$

Burada p (Pa) statik basınç, μ dinamik viskozite, μ_t türbülans ya da diğer bir deyişle eddy viskozitesini, Si birim hacim başına cisim kuvvetlerini temsil eden kaynak terimidir. Eddy viskozitesi eşitliği denklem 2.16'da verilmiştir:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2.16}$$

Burada ρ yoğunluk (kg/m^3), C_μ katsayı ve değeri 0,09'dir.

Enerjinin korunumu

$$\frac{\partial(qu_k c_p T)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} + (\lambda \frac{\partial T}{\partial x_k}) + S_k \tag{2.17}$$

Burada c_p (J/kgK) havanın sabit basınçta özgül ısısı, λ (W/mK) havanın ısı iletim katsayısı, T (K) sıcaklık ve S_k hacimsel kaynak terimidir.

2.5.2 Standart k-ε Türbülans Modeli

İki denklemli türbülans modelleri arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermesi açısından yaygın olarak kullanılan yarı ampirik bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve dissipasyon oranı (ε) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir.

$$\rho\frac{D_k}{D_t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + G_k - \rho\varepsilon \tag{2.18}$$

$$\rho\frac{D_\varepsilon}{D_t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} - R \tag{2.19}$$

şeklinde yazılabilir. Bu modelde difüzivite terimleri

$$\Gamma_k = \mu + \mu_t / \sigma_k \quad \text{ve} \quad \Gamma_\varepsilon = \mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon \tag{2.20}$$

hız gradiyentinden kaynaklanan türbülans kinetik enerjisi üretimini ifade eden terim

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{2.21}$$

Burada, G_k ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu temsil etmektedir. μ dinamik viskozite, μ_t türbülans viskozitesi, k türbülansın kinetik enerjisi ve ε türbülans sönümlemesi olarak ifade edilmektedir. Bu modelde R= 0 olup diğer ampirik sabitleri: $C_{1\varepsilon}$ = 1.44, $C_{2\varepsilon}$ = 1.92, C_μ = 0.09, k ve ε için tanımlanan türbülans Prandtl sayıları σ_ε = 1.3 olarak alınmıştır (Karagöz, 2007).

2.6 Fan Tasarımı Kapsamında Yapılan Önemli Çalışmalar

Stodola (1945) çark dönüşü ile kanatlar arasında oluşan kayma etkisini tanımlayan ilk yöntemini geliştirmiştir. Bu çalışmasıyla kanat sayısı ile kayma etkisi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Deneyler aracılığı ile yapmış olduğu çalışmaları doğrulamıştır. Kayma etkisi ile çalışmalar yapan araştırmacılara göre kayma etkisinin sebebi kaynaklar arasındaki girdaplardır. Yapılan araştırmalar sonucu da göstermiştir ki kayma etkisi sadece kanat geometrisine bağlıdır ve belirli fan çeşitlerinde sabittir.

Austin H. Church (1947) körük ve tasarım modellenmesi hakkında ilk çalışma yapan kişilerden sayılabilir. Pompa veya fanlarda elde edilen Reynolds sayısının belirlenmiş olan kritik değerin üzerinde çıktığını yani akışın türbülanslı olduğunu söylemiştir. Akışın bu sebepten dolayı ciddi bir basınç kaybına uğradığını belirterek yapmış olduğu tasarımlara basınç oranını, sıkıştırılabilirlik oranını eklemiştir.

Alexey Joakim Stepanoff (1957) yapmış olduğu araştırmalar neticesinde en fazla hidrolik kayıpların meydana geldiğini açıklamıştır. Yüzey sürtünmeleri ve girdaplardan kaynaklanan ve akış esnasında akışkandaki hız vektörü değişimlerinden dolayı da yüzey ayrılmaları ile hidrolik kayıpların oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca çalışmalarına ek olarak şok kayıplarının ve difüzör kayıplarının da etkili olduğunu belirtmiştir.

Kovatz ve Desmur (1958) Reynolds sayısı le doğru orantılı olarak kanallardaki sürtünme kayıplarının viskozite ile ilgili olduğunu incelemişlerdir. Duvar pürüzlülüğünün de akışkanın türbülanslı bir yapıya ulaşmasında kayıplar arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir. Çark ve salyangoz yapısı arasında dönen akışkanın disk sürtünmesinden ve türbülanstan dolayı normaldeki kanal sürtünme kayıplarına göre yaklaşık %50 daha fazla sürtünme kaybına uğradığını açıklamışlardır. Yüzey pürüzlülüğü ile akışkan duvarlarının salyangozun verimini belirlediğini ortaya koymuşlardır.

Myles (1969) akışkanın çıkış basınçlarındaki kayıpların kanat ve difüzördeki kayıplar ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Oluşan bu kayıpları bir genişleme faktörüne bağlamıştır. Ayrıca düşük debili sistemleri de incelemiştir.

Eck Bruno (1972) çarkta oluşan sürtünme kayıplarını ilk inceleyen araştırmacı olup bu kayıpları, çark giriş kayıpları ve çark içinde oluşan sürtünme kayıpları olarak ikiye ayırmıştır. Çark içerisinde oluşan sürtünmeler akışta yavaşlamaya ve basınç kayıplarına neden olmaktadır. Kanat sayısı ile enerji transferi arasındaki ilişkiyi açıklayan Bruno çalışmalar neticesinde optimum kanat sayısının elde edilebileceği bir formül geliştirmeyi başarmıştır.

Balje (1981) geriye eğik kanatlı santrifüj fanlarda optimum verimin daha iyi elde edilebildiğini araştırmıştır. Ayrıca yine diğer araştırmacılar gibi kayma etkisi üzerinde de önemli çalışmalar da bulunmuştur.

Denton (1993) fan kayıplarını verimi azaltan tüm akış olayları olarak belirtmişlerdir. Ayrıca kayıpları profil kaybı, ikincil kayıp ve sızıntı kayıpları gibi bölümlere ayırmışlardır.

Roache (1997) çalışmalarını hesaplamalı akışkanlar mekaniği üzerine yoğunlaştırmıştır. Bununla birlikte doğrulama, onaylama, hata tespiti, tahmin ve yakınsama oranlarını elde etmiştir.

Frank Bleier (1998) fanların gerçek performans eğrilerine ulaşmak için tasarım yöntemi fark etmeksizin standart testlerin uygulanmasını belirtmiştir. Tasarımı yapılan fanların prototipleri üzerinde gerekli testler yapıldıktan sonra fan yasalarına göre ürün çeşitliliğinin oluşturulması gerektiğini açıklamıştır.

Klemm ve Gabi (2003) verim ve performans değerlerine, diğer vantilatör tiplerine oranla daha fazla etki eden salyangoz gövdeli bir fanın gövde tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışma kapsamında CFD kullanılarak analizler yapılmıştır ve nümerik sonuçların doğruluğunu denetlemek amacıyla gövde içerisinde PIV- Particle Image Velocimetry (Parçacık Görüntü Hızı) ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda CFD analizleri yapılarak fanın performans verilerine ulaşılmıştır. Yapılan PIV ölçümlerinin neticesinde de deneysel ve analiz yöntemleri kullanılarak elde edilen performans eğrilerinin orta ve yüksek debi değerlerinde kabul edilebilir bir uyumluluk içinde olduğu belirlenmiştir.

Meakhail ve Park (2005) tek kademe radyal fan çarkı ve çıkışında yer alan kanatlı difüzör içindeki hız dağılımının ölçülebildiği deneysel bir çalışma yapmışlar ve fan sistemi için sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak daimi olmayan akış modeli kullanılarak yapılan bu deneysel çalışmalar ile yapılacak olan sayısal çalışmaların yaklaşık olarak hesaplanabileceği görülmüştür.

Behzadmehr ve diğ. (2006) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise geriye eğik kanatlı bir vantilatör üzerinde çarka giriş kesitinin verim üzerindeki etkileri HAD ve deney metotları kullanılarak parametrik olarak incelenmiştir. Bu çalışmada çark çapı, kanat profili, kanat giriş açısı gibi değerler sabit tutulup, çark üzerine monte edilen motorun çapı, çark girişinin yarıçapı, çark girişi ile kanat girişi arasındaki daralma faktörü gibi değerler değiştirilerek, bunların vantilatör verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Li (2009) elektrik süpürgelerinde kullanılan tek kademeli radyal fanın performansını tespit etmek için sayısal yöntem geliştirmiş ve deneysel çalışmalar ile test etmiştir. Böylece fan ve çıkışında yer alan kanatlı difüzör içindeki akışı ayrıntılı incelemiş ve bu tip fanlar için tasarım önerilerinde bulunmuştur.

Vibhakar (2012) ise geçmişte kullanılmış olan fan tasarım metotlarını kullanarak araştırmacıların tasarım adımlarını diğer veriler ile mukayese etmiş ve hazırlanmış olan prototipleri deneyler aracılığıyla test ederek araştırmacıların tasarım yöntemleri ile de kıyaslamıştır. Ayrıca çalışmalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak deneyler ile elde edilemeyen sonuçlar elde etmiştir.

Cherdieu ve diğ. (2013) radyal fan ve kanatlı difüzörlerle ilgili deneysel ve sayısal çalışmalarda bulunmuştur. Çalışmalarını beş farklı debi değerinde gerçekleştirmiş ve fan performansının tasarım dışı çalışma koşullarında da kabul edilebilir bir sayısal yöntem ile hesaplanabileceği gösterilmiştir.

Madwesh ve diğ. (2015) bir radyal fan ve kanatlı difüzör arasındaki etkileşimi ve akışı araştırmışlardır. Bu çalışma ile akışın daimi olmayan yapısını daha iyi anlayabilmek amaçlı hareketli çözüm ağı tercih edilmiştir. Sonuçta aynı kanat sayısına sahip fanlarla yapılan çalışmalarda daha yüksek basınç oranı kanat sayısı en az olan difüzör ile elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışma ile daha yüksek basınç oranı için kanat sayısının artırılması gerektiği öğrenilmiştir.

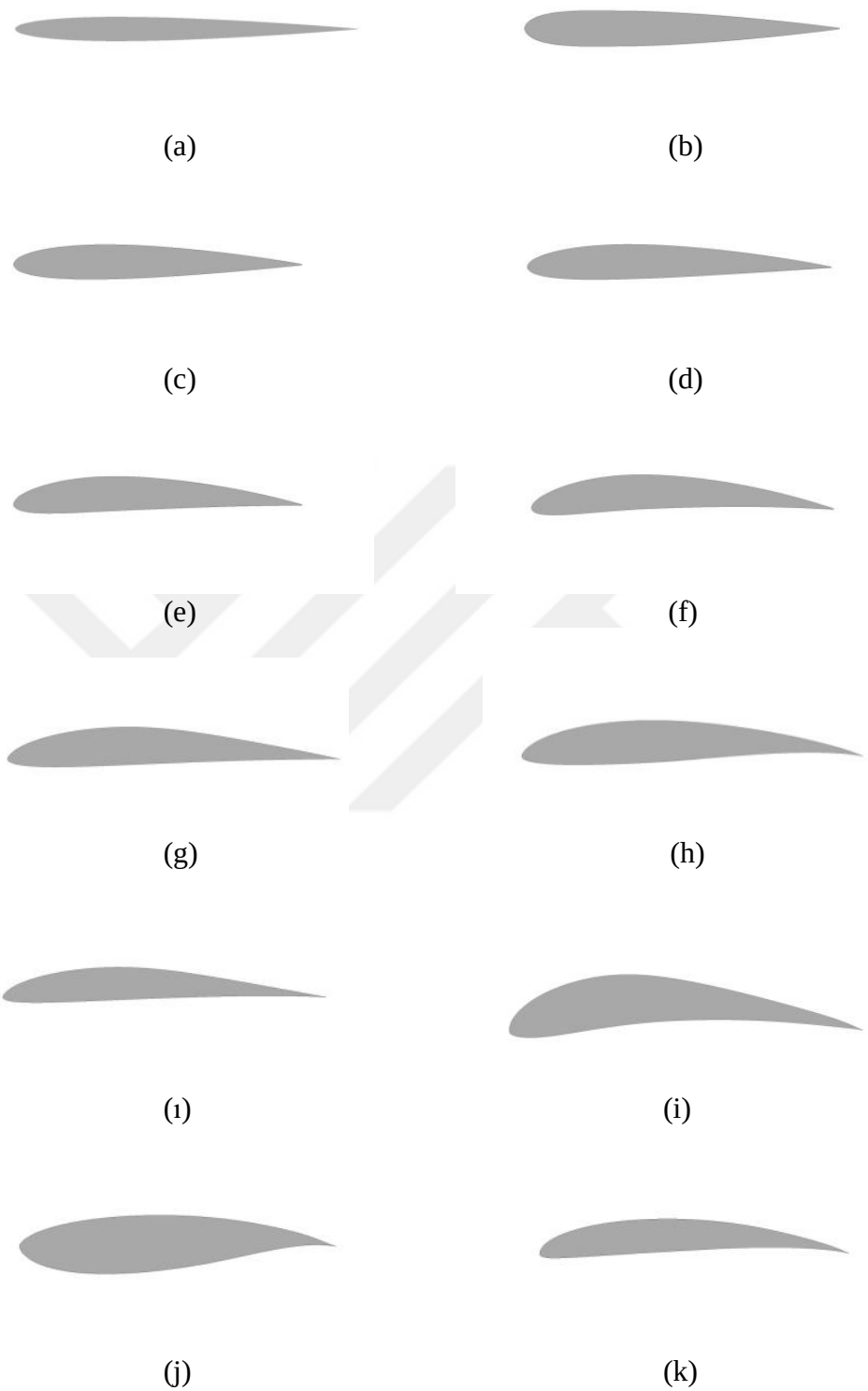
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bölüm 3.1 ve 3.2'de aerodinamik kanatlı radyal fan tasarımı için öncelikle aerodinamik kanat yapıları sayısal olarak çözümlenmiş ardından kaldırma katsayısına göre iki farklı kanat yapısı seçilmiştir. Bölüm 3.3 ve 3.4'de seçilen kanat yapıları ve sabit kesitli kanat yapısı kullanılarak toplamda 6 adet fan tasarımı oluşturulmuştur.

Oluşturulan fan modeli içerisinde çark, flanş ve motor kullanılmıştır. Her bir fan yapısı birebir aynı olup tek değiştirilen çark içerisinde kullanılan kanat yapıları olmuştur. Yapılan analizler ile kanat profilinin ve pozisyonunun sonuca olan etkisi araştırılmıştır. Analiz öncesi fan tasarımından istenen debi değeri Q=1200 m^3/h olarak belirlenmiştir. Bu değer Q=0,333 m^3/s değerine eşittir. Bilindiği üzere debi, giriş kesit alanına ve hava giriş hızına bağlıdır (Denklem 2.7). Havanın fana giriş yapacağı çap değeri 150 mm olarak belirlenmiş ve böylece giriş kesit alanı 0,0176 m^2 ((π/4)*($0{,}15^2$)) olarak elde edilmiştir (Şekil 3.8g). Analizde kullanılan hava giriş hızı 25 m/s olduğundan elde edilen debi değeri Q=0,44 m^3/s'dir. Tasarımda istenen debi değeri sağlanmaktadır. Tasarım öncesi belirlenen bir diğer değer ise çark çapıdır. 250-300 mm arasında olması tercih edilen fan için kullanılan çark çapı değeri 250 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.11a). Fan tasarımı yapıldıktan sonra ise sayısal olarak çözülmesi için sınır şartları, modelin ağ yapısı ve çözüm ayarları hakkında bilgi verilmiştir.

3.1 Analizde Kullanılan Kanat Yapıları ve Sayısal Modelleme

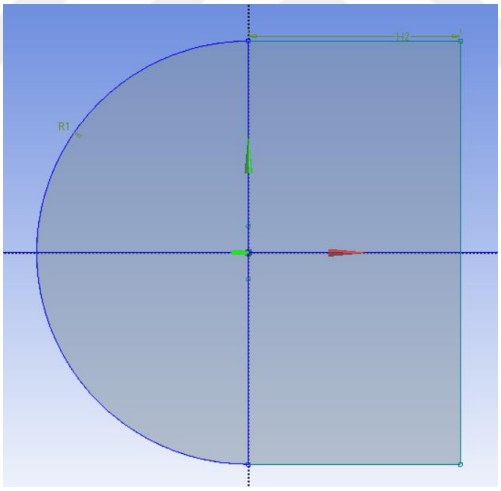
Aerodinamik kanatlı radyal fan tasarımında kullanılmak üzere aerodinamik kanat profilinin belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla farklı kamburluk yapılarına sahip 12 aerodinamik kanat yapısı aynı ağ ayarları, sınır ve başlangıç şartları, çözüm ayarları altında sayısal olarak çözümlenmiştir. Analiz edilmiş olan kanatlar NACA 0006, NACA 0012, NACA 1412, NACA 2412, NACA 4412, NACA 6412, E 193, E 214, E 387, EPPLER 421, S 833 ve SG 6043 kanat yapılarıdır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Analiz edilen kanat yapıları; (a) NACA 0006, (b) NACA 0012, (c) NACA 1412, (d) NACA 2412, (e) NACA 4412, (f) NACA 6412, (g) E 193, (h) E 214, (ı) E 387, (i) EPPLER 421, (j) S 833, (k) SG 6043

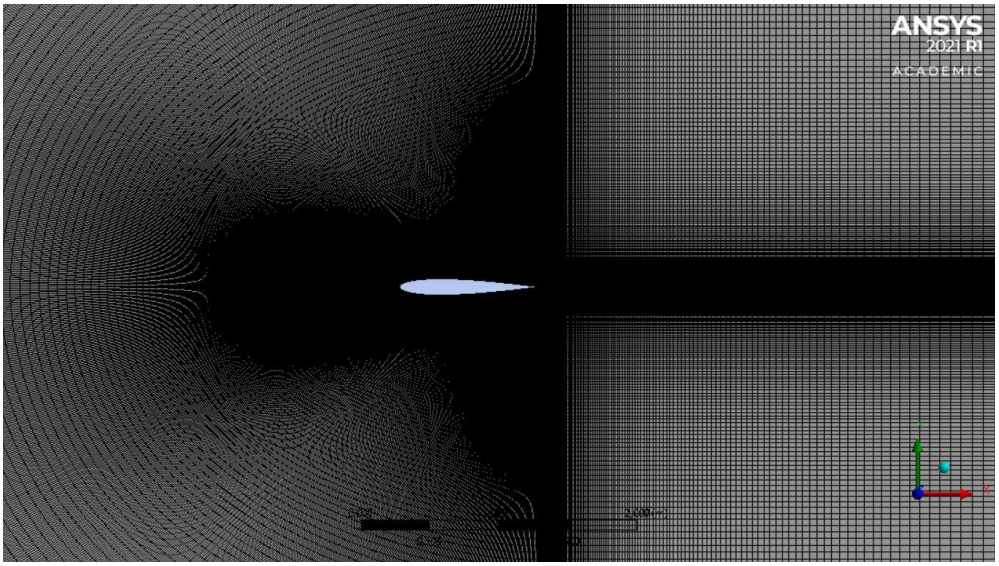
Seçilen tüm kanat yapıları Cornell Üniversitesi'nin yapmış olduğu çalışma referans alınarak analiz edilmiştir. Cornell Üniversitesi, NACA 0012 kanat yapısını kullanarak yapmış olduğu çalışma sonucunda kaldırma katsayısı değerini sayısal ortamda 0.667, deneysel çalışmalarında ise 0.663 olarak elde etmiştir (Mullen, 2015). Yapılan bu çalışmada ise NACA 0012 kanat profili için kaldırma katsayısının 0.661 olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Çizelge 3.1). Değerlerin birbirine çok yakın olması sebebiyle kanatlar için yapılan analizin doğruya yakın sonuç verdiği ve diğer kanatlar için de yine aynı adımları tekrarlayarak her biri için kaldırma katsayısı değerlerinin tespit edilebileceğine karar verilerek her bir kanat için aynı ağ, sınır ve başlangıç şartları ve çözüm ayarları yapılmıştır.

Şekil 3.2'de her bir kanat profili etrafında oluşturulan akış geometrisi gösterilmiştir. Akış geometrisi için R1 ve H2 değerleri 12,5 m olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.2. Analiz için oluşturulan akış geometrisi.

Eleman ağı oluşturulurken dörtgen elemanlar kullanılmıştır (Şekil 3.3). Oluşturulan yapılandırılmış ağ yapısı ile yaklaşık olarak her bir analizde oluşan eleman sayısı 240 000, düğüm sayısı ise 241 000'dir.



Şekil 3.3. Kanat analizlerinde kullanılan ağ yapısı.

Ağ ayarları tamamlandıktan sonra akışkan modeli olarak viskoz olmayan akış (ınviscid) belirlenmiştir. Viskoz olmayan akış, akışkanın viskozitesinin sıfıra eşit olduğu viskoz olmayan bir akışkanın akışıdır. Analizlerde akış malzemesi olarak hava kullanılmış ve yoğunluk değeri 1 kg/m^3 olarak alınmıştır. Akışkanı viskoz olmayan akış olarak belirlediğimiz için akışkanın özellikleri belirtilirken sadece yoğunluğunun tanımlanması yeterli olacaktır. Her bir kanat için kaldırma katsayının değeri kıyaslanarak kanat seçimi yapılacağı için kanatların hücum açısı 6° olarak belirlenmiştir. Kanadın 6° yukarı baktığı kabul edilmektedir. Bunun için kanadı 6° eğimli çizmeye gerek yoktur. Hız bileşenleri 6°'ye göre girildiğinde çözüm de ona göre olacaktır. Havanın başlangıç hızı 1 m/s olarak alınmıştır. Havanın yoğunluğu ve hızı için sayısal verilerin 1 birim olarak alınması ile her bir kanat profili için kaldırma katsayısı değerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu durumda sınır koşulları olarak V_x=0.9945 m/s , V_y=0.1045 m/s olarak girilmiştir. Çözüm metodu olarak Coupled algoritması tercih edilmiştir. Çözüm ayarlarında 1000 iterasyon belirlenmiştir ancak yaklaşık olarak 500 iterasyon sonrası yakınsama meydana geldiği için her bir analiz iterasyon sayısından önce sonuçlanmıştır.

Yapılan analizler Bölüm 3.2'de verilmiştir.

3.2 Aerodinamik Kanatlar için Yapılan Analizler

Her bir kanat yapısı için hız, basınç dağılımları ve akış çizgileri incelenmiş olup her bir kanat profili için kaldırma katsayıları elde edilmiştir. Bu sayede kanat yapıları üzerinde oluşan hız ve basınç dağılımlarının ve kanat etrafında oluşan akış dağılımı için akış çizgilerinin yorumlanabilmesi amaçlanmıştır. Kanat yapıları üzerinde oluşan hız değerleri paylaşılmıştır.

NACA 0006 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0.018 m/s, V_{max} = 1.35 m/s elde edildiği Şekil 3.4a'da görülmektedir. Elde edilen sonuç incelendiğinde ise hız değerinin kanat profilinin üst yüzeyinde alt yüzeyine göre daha fazla değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Hız, kanadın üst yüzeyinin ön kısmından arka kısmına doğru giderek azalan bir değişim sergilemektedir. Kanat profili simetrik olmasına rağmen kanadın alt ve üst yüzeyi arasında bu şekilde bir farklılık yaşanmasının sebebi ise kanat profillerinin 6° hücum açısı altında analiz edilmesidir.

NACA 0012 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0.039 m/s, V_{max} = 1.728 m/s elde edildiği Şekil 3.4b'de görülmektedir. Hız değerleri NACA 0006 kanat yapısına göre daha yüksektir. Her iki kanat yapıları kıyaslandığında ise kanat profilleri simetrik bir yapıya sahip olsa da NACA 0012 kanat yapısının maksimum kalınlık değeri NACA 0006'ya göre daha yüksektir. Hız değerinin kanat profili üzerindeki değişimi incelendiğinde ise en yüksek değerin kanadın üst yüzeyinde ve ön kısmında oluştuğu görülmektedir ancak alt ve üst yüzeyler arasında NACA 0006'da oluştuğu gibi belirgin bir farklılık oluşmamıştır. Hız sadece ön kısımda belirgin bir farklılık göstermiştir.

NACA 1412 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0.095 m/s, V_{max} = 1.559 m/s elde edildiği Şekil 3.4c'de görülmektedir. En yüksek ve en düşük hız değerleri ön kısımda farklı yüzeylerde oluşmuştur. Hız değerinin yüksek değer aldığı alan artış göstermiştir.

NACA 2412 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0.042 m/s, V_{max} = 1.54 m/s elde edildiği Şekil 3.4d'de görülmektedir. NACA 1412 ile yaklaşık olarak benzer bir sonuç görüntüsü elde edilmiştir.

NACA 4412 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0 m/s, V_{max} = 1.513 m/s elde edildiği Şekil 3.4e'de görülmektedir. NACA 1412 ve NACA 2412'ye göre kamburluk ve hücum açısının 6° olmasının etkisi burada daha çok görülmektedir. Kanadın üst yüzeyinde kamburluğun arttığı bölgeye kadar hız en yüksek değerlerini almaktadır. Kanadın alt yüzeyinde ise hız çok fazla değişkenlik göstermemektedir. Simetrik profile sahip kanatlar için hız ön kısımda farklılık oluştururken, kamburluk olan kanat profillerinde ise daha fazla yüzeye yayılım gösteren bir değişim sergilemektedir.

NACA 6412 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0 m/s, V_{max} = 1.533 m/s elde edildiği Şekil 3.4f'de görülmektedir. NACA 4412'ye göre daha fazla kamburluk değerine sahip olan NACA 6412 kanat profili, hız olarak NACA 4412 ile benzer bir şekil vermiş olsa da hız değerinin ve kanadın üst yüzeyinde yayılım gösterdiği yüksek hız alanın artış gösterdiği görülmektedir.

E 193 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0 m/s, V_{max} = 1.46 m/s elde edildiği Şekil 3.4g'de görülmektedir. Kanadın alt yüzeyinde hızın fazla değişkenlik göstermediği ancak üst yüzeyinde kamburluğun artış gösterdiği bölgeye kadar hızın arttığı, firar kenarına doğru da azalış gösterdiği görülmektedir.

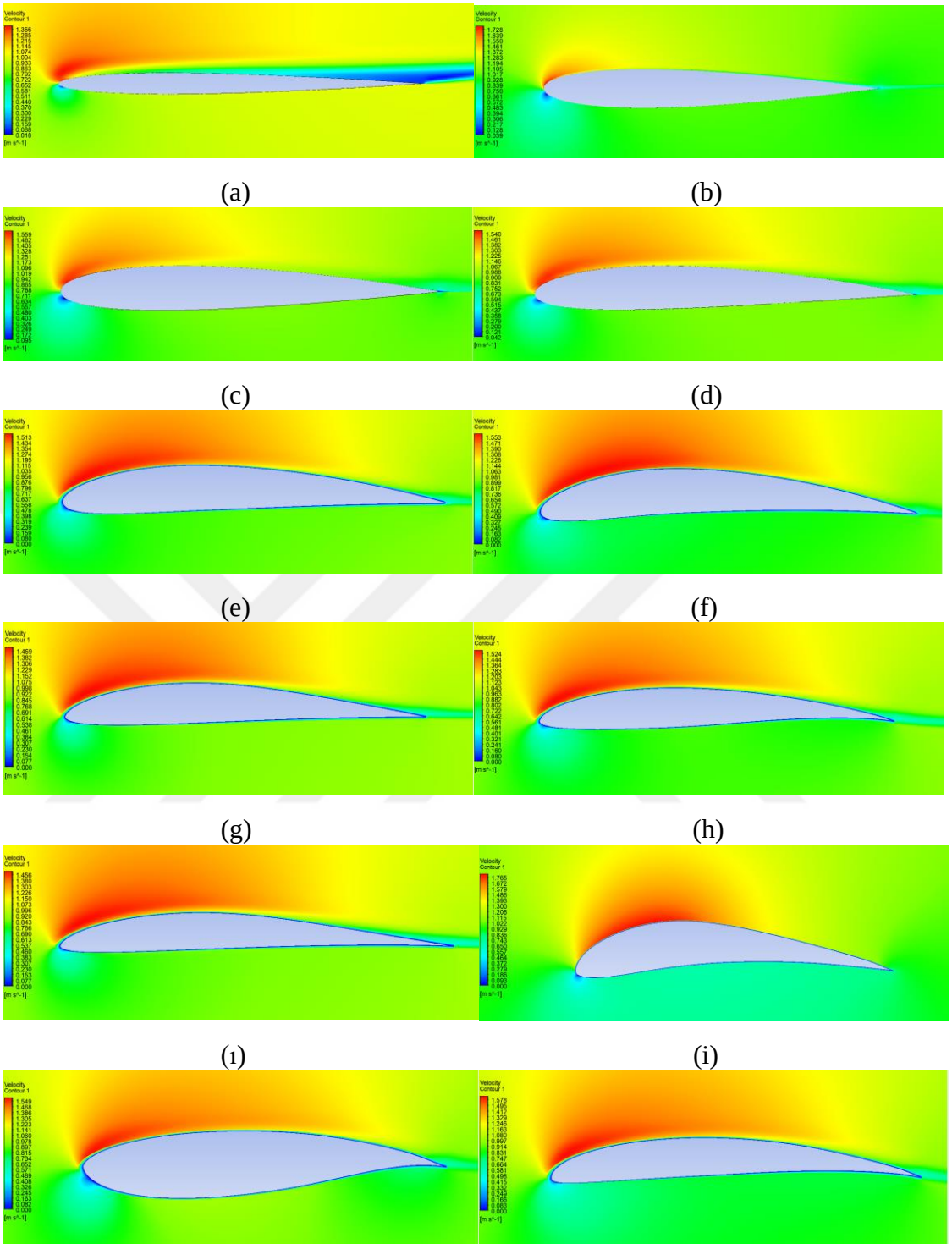
E 214 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0 m/s, V_{max} = 1.524 m/s elde edildiği Şekil 3.4h'de görülmektedir. E 193 kanat profiline göre daha yüksek hız değeri elde edilmiştir.

E 387 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0 m/s, V_{max} = 1.456 m/s elde edildiği Şekil 3.4ı'da görülmektedir. E tipi kanat profilleri arasında en düşük hız değeri bu kanat profilinde elde edilmiştir. Ayrıca tüm E tipi kanat profilleri için NACA tip kanat profillerine göre firar kenarında hızın daha yüksek değerler aldığı görülmektedir.

EPPLER 421 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0 m/s, V_{max} = 1.765 m/s elde edildiği Şekil 3.4i'de görülmektedir. Tüm kanat profilleri içerisinde en yüksek kamburluk değerine sahip olan bu kanat profilinde en yüksek hız değeri elde edilmiştir. Yüksek hız değeri elde edilen bölge ise kamburluğun sivrildiği bölgededir.

S 833 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0 m/s, V_{max} = 1.55 m/s elde edildiği Şekil 3.4j'de görülmektedir. Firar kenarına doğru kalınlığın azaldığı S 833 kanat profilinin alt yüzeyinde diğer kanatlarda olduğu gibi genellikle aynı hız değeri elde edilmiştir.

SG 6043 için hız değerleri incelendiğinde V_{min} = 0 m/s, V_{max} = 1.578 m/s elde edildiği Şekil 3.4k'da görülmektedir. Hız, kanadın üst yüzeyinin ön kısmında en yüksek değerini alıp firar kenarına doğru azalmaktadır.



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

(g) (h)

(ı) (i)

(j) (k)

Şekil 3.4. Hız analizi; (a) NACA 0006, (b) NACA 0012, (c) NACA 1412, (d) NACA 2412, (e) NACA 4412, (f) NACA 6412, (g) E 193, (h) E 214, (ı) E 387, (i) EPPLER 421, (j) S 833, (k) SG 6043

Hız değerleri sonrasında kanat üzerinde oluşan basınç dağılımları ve değerleri incelenmiştir.

NACA 0006 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.477 Pa, P_{max} = 0.55 Pa elde edildiği Şekil 3.5a'da görülmektedir. En yüksek basınç değeri alt yüzeyin ön kısmında oluşmuştur. Kanat profili için üst yüzeyinin ön kısmında negatif basınç alanı oluşmuş olup firar kenarına doğru basınç değerinin artmış olduğu görülmektedir.

NACA 0012 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.25 Pa, P_{max} = 0.447 Pa elde edildiği Şekil 3.5b'de görülmektedir. En yüksek basınç değerinin alt yüzeyin ön kısmında, en düşük basınç değerinin üst yüzeyin ön kısmında oluştuğu görülmektedir. Genel olarak üst yüzeyde negatif basınç alanı oluşurken alt yüzeyde pozitif basınç oluştuğu söylenebilir. Ayrıca oluşan negatif basınç alanı NACA 0006'ya göre daha fazla yayılım göstermiştir.

NACA 1412 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.213 Pa, P_{max} = 0.466 Pa elde edildiği Şekil 3.5c'de, NACA 2412 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.323 Pa, P_{max} =0.461 Pa elde edildiği Şekil 3.5d'de NACA 4412 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} =-1.287 Pa, P_{max} =0.46 Pa elde edildiği Şekil 3.5e'de görülmektedir. Basınç, hem dağılım olarak hem de sayısal değer olarak NACA 0012 profili ile benzer bir sonuç vermiştir. Kanat profilleri arasında bulunan farklılıklar sonucu fazla etkilememiştir.

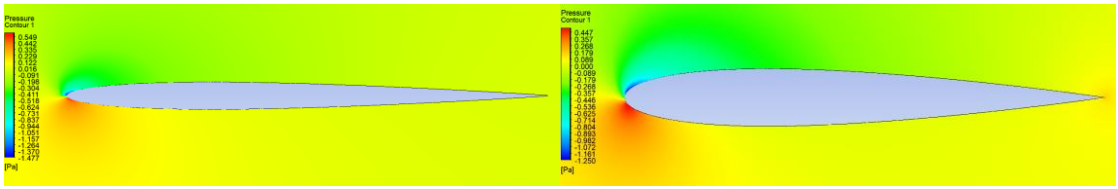
NACA 6412 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -0.97 Pa, P_{max} = 0.482 Pa elde edildiği Şekil 3.5f'de görülmektedir. NACA 4412 kanat yapısına kıyasla negatif basınç alanı artış göstermektedir. Basıncın en düşük değeri üst yüzeyde oluşmuş, kamburluk bölgesinin orta bölgesine kadar yayılım göstermiştir ve firar kenarına doğru basınç artmıştır. Alt yüzey incelendiğinde ise en yüksek basınç kanadın ön kısmında oluşsa da fazla bir yayılım göstermemiş ve firar kenarına doğru azalmış olsa da pozitif değer almıştır.

E 193 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.057 Pa, P_{max} = 0.575 Pa elde edildiği Şekil 3.5g'de, E 214 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.08 Pa, P_{max} = 0.587 Pa elde edildiği Şekil 3.5h'de, E 387 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.074 Pa, P_{max} = 0.61 Pa elde edildiği Şekil 3.5ı'da görülmektedir. E 214 kanat profili, E 193 kanat profiline kıyasla kanadın üst ve alt yüzeyleri arasında oluşan basınç farkı artmıştır. E 384 kanat profilinde genel olarak basıncın kanat üzerindeki dağılımı ve sayısal değerleri E 214 kanat profili ile benzerlik göstermiştir.

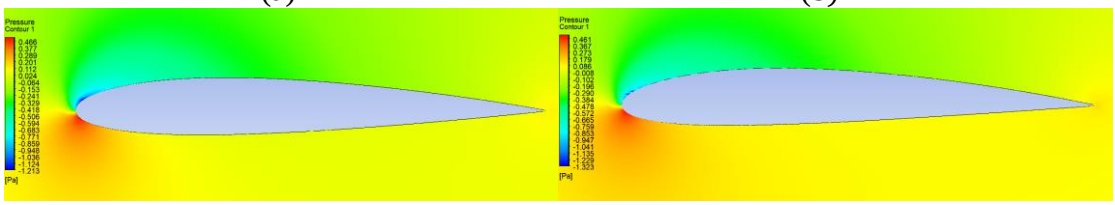
EPPLER 421 basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.171 Pa, P_{max} = 0.45 Pa elde edildiği Şekil 3.5i'de görülmektedir. Kanadın üst yüzeyinde negatif basınç alanı oluşmuştur. Basınç, en düşük değerini ise kamburluğun olduğu bölgede almıştır ve o bölgede yayılım göstermiştir. Alt yüzeyde ise pozitif basınç oluşmuştur ve firar kenarına kadar fazla değişiklik göstermeden devam etmiştir.

S 833 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.4 Pa, P_{max} = 0.448 Pa elde edildiği Şekil 3.5j'de görülmektedir. Kanadın üst bölgesinde basınç değerlerinin genellikle aynı negatif basınç değerini aldığı söylenebilir. Kanadın alt yüzeyinde ise basınç en yüksek değerlerini ön kısımda ve firar kenarında almıştır.

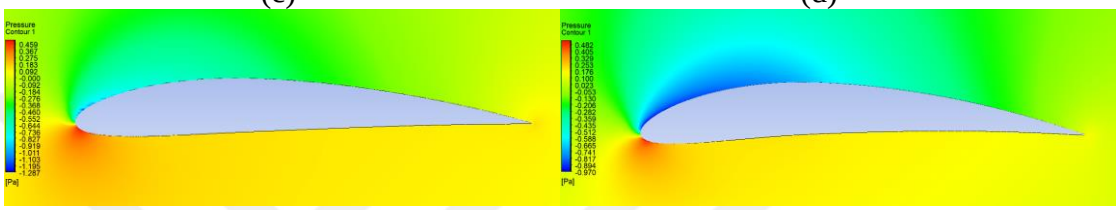
SG 6043 için basınç değerleri incelendiğinde P_{min} = -1.136 Pa, P_{max} = 0.623 Pa elde edildiği Şekil 3.5k'da görülmektedir. Üst yüzeyin ön kısmında oluşan negatif basınç alanı firar kenarına doğru giderek artış göstermiştir. Alt yüzeyde ise ön kısımda oluşan pozitif basınç alanı firar kenarına doğru azalmıştır. Genel olarak incelendiğinde ise üst yüzeyde negatif, alt yüzeyde pozitif basınç alanı oluştuğu söylenebilir.



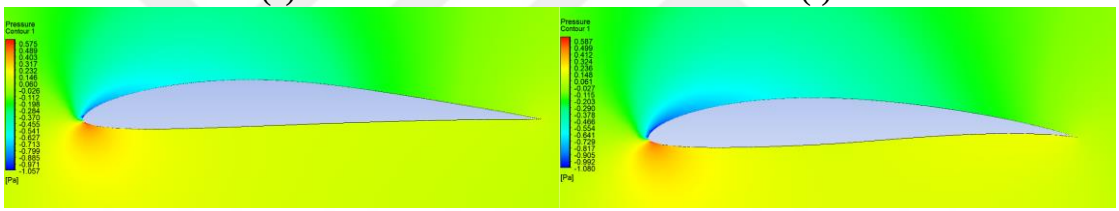
(a) (b)



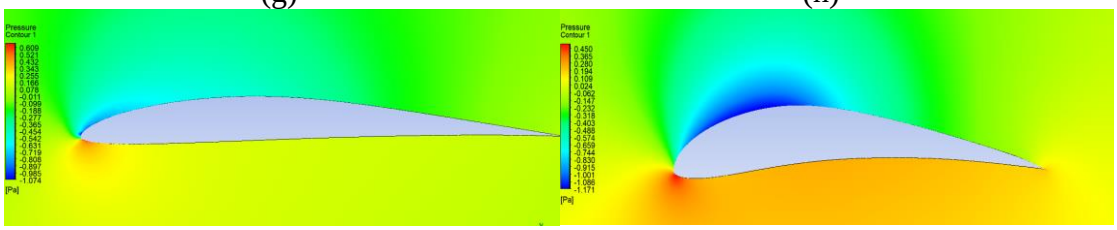
(c) (d)



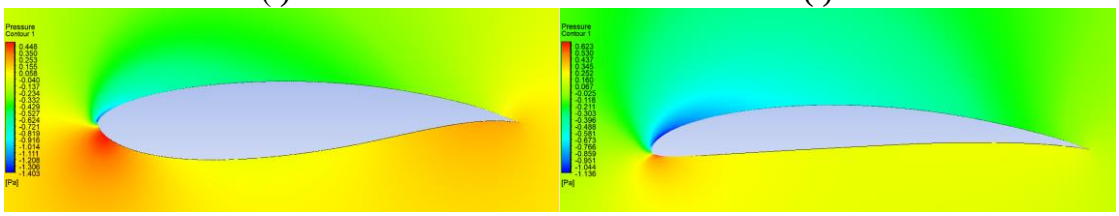
(e) (f)



(g) (h)



(ı) (i)

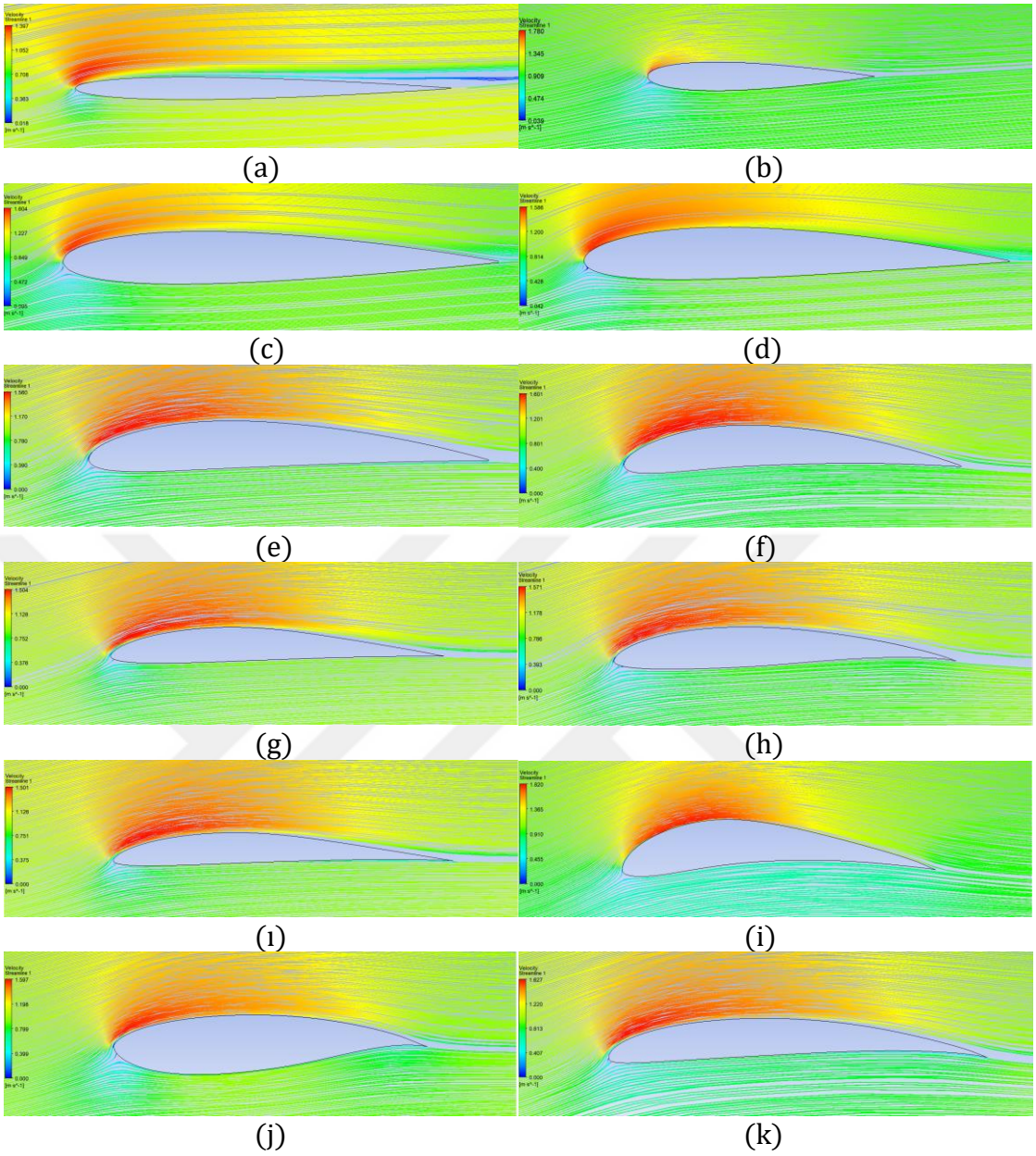


(j) (k)

Şekil 3.5. Basınç analizi; (a) NACA 0006, (b) NACA 0012, (c) NACA 1412, (d) NACA 2412, (e) NACA 4412, (f) NACA 6412, (g) E 193, (h) E 214, (ı) E 387, (i) EPPLER 421, (j) S 833, (k) SG 6043

Kanat profilleri için incelenen bir diğer parametre ise akış çizgileridir.

NACA 0006 kanat profili üzerinde oluşan akış çizgileri incelendiğinde kanadın üst yüzeyi için firar kenarında akışta ayrılmaların meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3.6a). NACA 0012 kanat profilinde akış çizgilerinin genel olarak kanadı firar kenarına kadar takip ettiği söylenebilir (Şekil 3.6b). NACA 1412 için akış çizgilerine göre hız değerinin üst yüzeyin ön kısmında yüksek değer aldığı söylenebilir. Akış çizgileri kanat profilini genel olarak takip etmiş, akışta ayrılmalar yaşanmamıştır (Şekil 3.6c). NACA 1412 kanat profiline ait analizler ile oldukça benzerlik gösteren NACA 2412 profilinde de akışta ayrılma yaşanmamıştır ve hız aynı bölgede yüksek değer almıştır (Şekil 3.6d). NACA 4412 kanat profili üzerinde kanadın alt yüzeyinde akışta ayrılma meydana gelmemiş ve aynı değeri almıştır. Üst yüzeyde ise ön kısımda yüksek değer alan hız, firar kenarına doğru hem azalma hem de ayrılma göstermiştir (Şekil 3.6e). NACA 6412 kanat profili NACA 4412 kanat profili ile kıyaslandığında ayrılmaların daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca hız çizgileri üst yüzeyde daha fazla yayılım göstermiştir (Şekil 3.6f). E 193 kanat profili üzerinde oluşan akış, kanat üzerinde üst yüzeyin firar kenarına doğru ayrılmaya başlamıştır ve en son kanat ucunda ise teması kalmamıştır (Şekil 3.6g). E 214 kanat profili E 193 ile kıyaslandığında kanat ucunda aşağıya doğru sivrilen bir formu olması sebebiyle daha fazla ayrılma meydana gelmiştir (Şekil 3.6h). E 387 kanat profili üzerinde de yine E 193 ve E 214'de olduğu gibi kanat ucunda ayrılma meydana geldiği, hızın en yüksek değerini üst yüzeyin ön kısmında aldığı ve alt yüzeyde daha sabit bir değer elde edildiği söylenebilir (Şekil 3.6ı). EPPLER 421 kanat profili üzerinde oluşan akış çizgileri genel olarak tüm kanat profilini takip etmiş ve diğer kanat profillerinde olduğu gibi bir ayrılma meydana gelmemiştir (Şekil 3.6i). S 833 kanat profili üzerinde oluşan akış çizgileri kanat profilinin tam orta noktasında değil, biraz daha alt yüzeye yakın bir bölgeden ayrılmaya başlamıştır. Profilin firar kenarının E 214'de olduğu gibi aşağıya doğru sivrilen bir formu olması sebebiyle de o bölgede akış çizgileri için bir ayrılma oluşmuştur (Şekil 3.6j). SG 6043 kanat profili için de üst yüzeyin firar kenarında akış çizgilerinin profilden ayrılmaya başladığı görülmektedir (Şekil 3.6k).



Şekil 3.6. Akış çizgileri; (a) NACA 0006, (b) NACA 0012, (c) NACA 1412, (d) NACA 2412, (e) NACA 4412, (f) NACA 6412, (g) E 193, (h) E 214, (ı) E 387, (i) EPPLER 421, (j) S 833, (k) SG 6043

Kanat profilleri için hız, basınç dağılımları ve akış çizgileri değerlendirildikten sonra kaldırma katsayısının değeri bilinmelidir. Bu değer fan tasarımında kullanılmak üzere seçilecek kanat yapısı için önemli bir veri oluşturacaktır. Kaldırma katsayısının sayısal değeri için çözüm modülü içerisinden kuvvetler bölümü seçilerek X yön vektörüne V_y değeri olan 0.1045 ve Y yön vektörüne V_x değeri olan 0.9945 değeri yazılır.

Bu sayede tüm kanat yapıları için kaldırma katsayısı öğrenilmiş olur. Buraya kadar aerodinamik kanat yapıları için elde edilen kaldırma katsayısı, hız ve basıncın en yüksek ve en düşük değerlerini bir çizelge halinde gösterelim. Tüm bu elde edilen veriler Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Kanat profillerine ait elde edilen veriler.

Kanat Profili	C_L	C_D	V_{min} (m/s)	V_{max} (m/s)	P_{min} (Pa)	P_{max} (Pa)	ΔP (Pa)
NACA 006	0.467	0.021	0.018	1.356	-1.477	0.549	2.026
NACA 0012	0.661	0.004	0.039	1.728	-1.25	0.447	1.7
NACA 1412	0.78	0.007	0.095	1.56	-1.213	0.466	1.68
NACA 2412	0.887	0.008	0.042	1.54	-1.323	0.461	1.784
NACA 4412	1.134	0.0085	0	1.513	-1.287	0.46	1.747
NACA 6412	1.398	0.0087	0	1.553	-0.97	0.482	1.452
E 193	1.007	0.01	0	1.46	-1.057	0.575	1.632
E 214	1.26	0.012	0	1.524	-1.08	0.587	1.667
E 387	1.012	0.011	0	1.456	-1.074	0.61	1.684
EPPLER 421	1.737	0.006	0	1.765	-1.171	0.45	1.621
S 833	1.15	0.008	0	1.55	-1.403	0.448	1.851
SG 6043	1.445	0.011	0	1.578	-1.136	0.623	1.76

Çizelge 3.1'den de görülebileceği üzere kaldırma katsayısı en yüksek değerini 1,737 ile EPPLER 421 kanat profilinde, en düşük değerini ise 0,467 ile NACA 0006 kanat profilinde almıştır. Kanat üzerinde oluşan hız değerine bakıldığında ise en düşük V_{max} değeri 1,356 m/s ile NACA 0006 profilinde, en yüksek V_{max} değeri ise 1,765 m/s ile EPPLER 421 kanat profilinde oluştuğu görülmektedir. Son olarak kanatlar üzerinde oluşan basınç değeri üzerinden tüm kanat yapılarını kıyaslarsak en düşük P_{min} değerinin -1,477 Pa ile NACA 0006 kanat profilinde, en yüksek P_{min} değerinin -0,97 Pa ile NACA 6412 kanat profilinde oluştuğu görülmektedir.

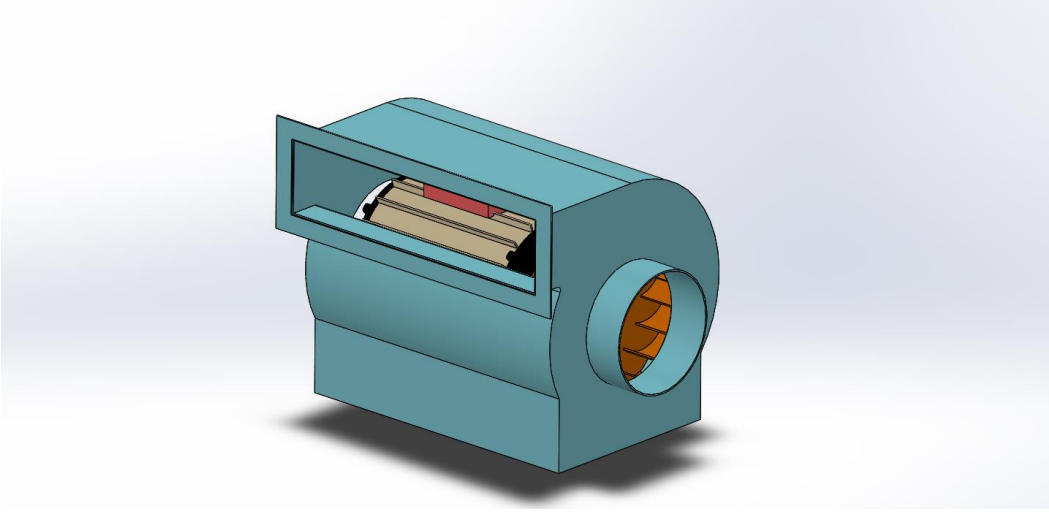
Analizler sonrası fan tasarımında kullanılmak üzere birbirinden oldukça farklı sonuçlar vermiş olan NACA 0006 ile EPPLER 421 kanat yapılarının çark tasarımında kullanılmasına karar verilmiştir.

3.3 Radyal Fan Tasarımı

Bu bölümde NACA 0006, EPPLER 421 ve sabit kesitli kanat yapıları kullanılarak fan tasarımı yapılmıştır. Bölüm 3.3.1'de tasarımlarda kullanılan ortak parçalar, Bölüm 3.3.2'de seçilen kanat yapıları ve sabit kesitli kanat yapısı kullanılarak tasarımı yapılan çark için geometrik bilgiler paylaşılmıştır.

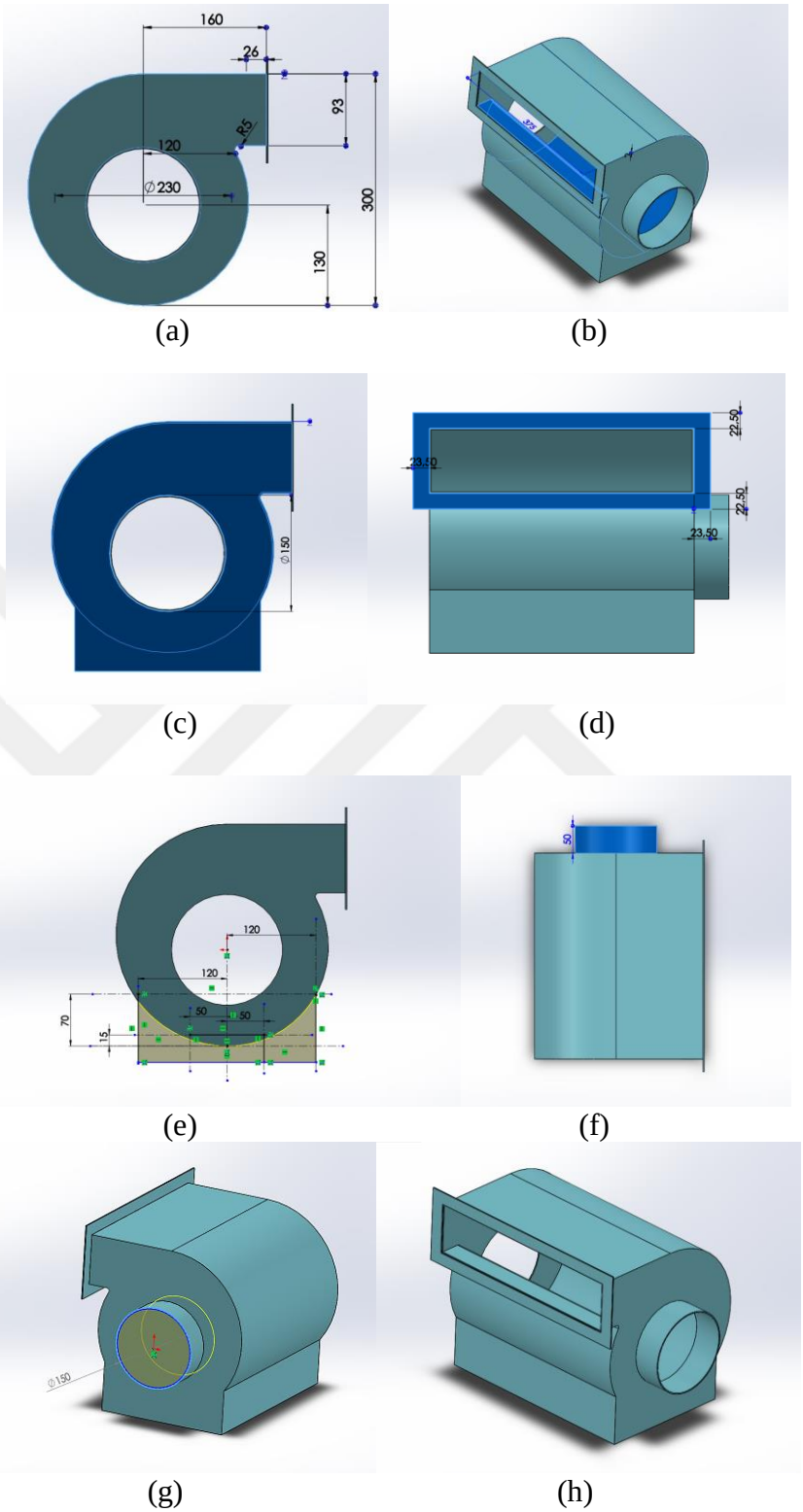
3.3.1 Radyal Fanlarda Kullanılan Ortak Parçalar

Analiz edilen tüm radyal fanların dış ölçüleri, çark çapları, yükseklikleri ve en değerleri aynıdır, tek değiştirilen çark içerisindeki kanat yapılarıdır. Bu şekilde altı radyal fan tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan fanların genel görüntüsü Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



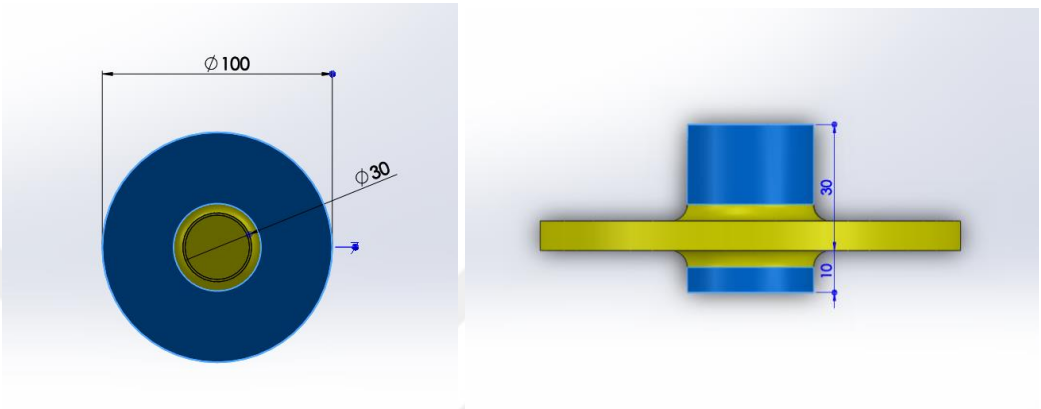
Şekil 3.7. Radyal fanın genel görüntüsü.

Tüm tasarımlarda ortak olarak kullanılan montaj parçaları için geometrik bilgiler Şekil 3.8 ile Şekil 3.11 arasında verilmiştir. Akışkanın içerisinde hareket edeceği hacmin yüksekliği 300 mm, çarkın yerden yüksekliği 130 mm, çark orta noktasının ilk çıkışa uzaklığı 160 mm, ilk çıkış noktasının yüksekliği 93 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.8a). Tasarım ve motorun rahatça montajlanabilmesi amacıyla salyangoz gövde yapısının en değeri 375 mm olarak belirlenmiştir. (Şekil 3.8b) Salyangoz gövde yapısının arka yüzeyinde de hava tahliye açıklığı oluşturulmuştur. Yerden yüksekliği çark montaj noktasının yüksekliği ile aynı noktada konumlandırılan diğer çıkış noktasının çap değeri Şekil 3.8c'de görüldüğü üzere 150 mm'dir. İlk çıkış noktasının etrafında oluşturulan çerçeve yapısının ölçüleri Şekil 3.8d'de verilmiştir. Radyal fanların yapıları dairesel şekilde oldukları için kullanılacakları yerlere sabitlenebilmeleri için genellike farklı iskelet yapıları oluşturulmaktadır. Bu tez çalışmasında ise fanın altına oluşturulan yapı sayesinde herhangi bir iskelet yapısına sahip olmaksızın konumlandırıldığı her alanda kolayca sabitlenmesi amaçlanmış ve salyangoz gövde yapısının alt yüzeyindeki dairesel form, eklenen yeni düzlemsel yapı ile desteklenmiştir. (Şekil 3.8e) Şekil 3.8f ve Şekil 3.8g'de akışkanın giriş yapacağı geometrinin yükseklik ve çap değerleri gösterilmiştir. Yükseklik değeri 50 mm, çap değeri 150 mm'dir. Tüm bunlar doğrultusunda oluşturulan ve tüm yapılarda ortak olarak kullanılacak olan salyangoz gövde yapısının son hali Şekil 3.8h'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Salyangoz gövde tasarımı; (a) Geometrik ölçüler (b) En ölçüsü (c) İkinci çıkış noktasının ölçüsü (d) İlk çıkış noktası etrafında oluşturulan çerçeve yapısının ölçüsü (e) Sabitleme amaçlı tasarıma eklenen alt parçanın ölçüleri (f) Giriş yapısının yükseklik ölçüsü (g) Girişin çap ölçüsü, (h) Salyangoz gövde yapısının son hali

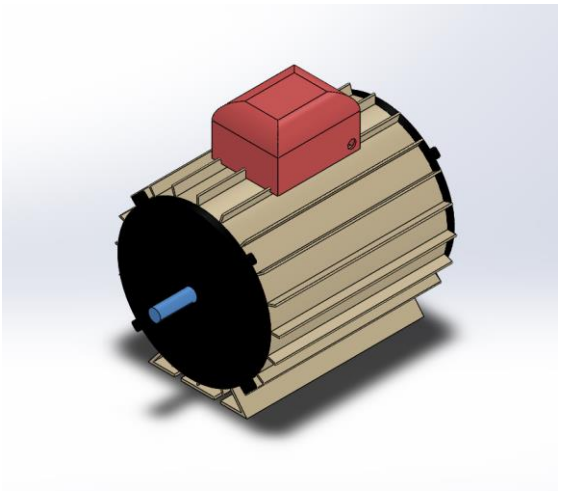
Çark ile motor arasında bağlantı parçası olarak kullanılan flanşın geometrik ölçüleri ise Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Flanş çapı 100 mm, motor ve çark bağlantı çapı ise 30 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.9b'de çark yapısına ve motora bağlantı kısmının yükseklik değerleri gösterilmiştir. Motor tarafı bağlantısı için 30 mm, çark bağlantı tarafı için se 10 mm yükseklik belirlenmiştir.



(a) (b)

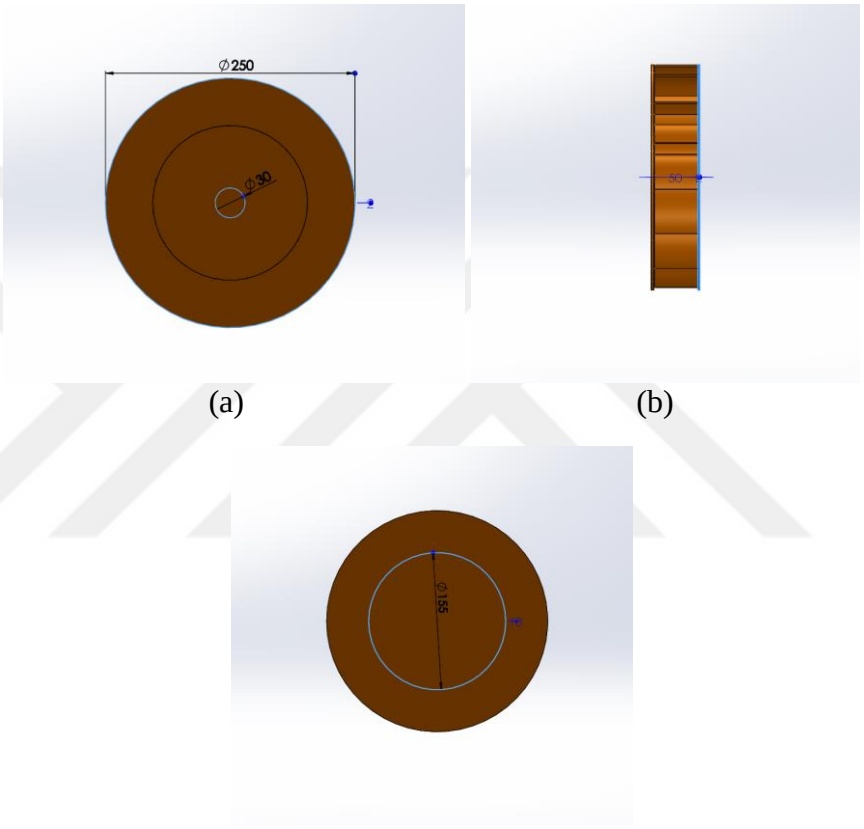
Şekil 3.9. Flanş tasarımı; (a) Çap ölçüleri (b) Flanş bağlantı yükseklikleri

Tüm montaj yapılarında ortak kullanılan bir diğer parçamız ise motordur. AC tip motor temin edilmiştir (Şekil 3.10). 230 V, 50 Hz motor kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Tasarımda kullanılan motor .

Her bir fan tasarımında değiştirilen tek parametre çark içerisinde bulunan kanat yapıları ve pozisyonlarıdır. Çark için paylaşılan geometrik bilgiler aynıdır. Tasarımda kullanılan çark geometrisinin ölçüleri Şekil 3.11'de verilmiştir. Şekil 3.11a'da çark çapının 250 mm, flanş bağlantı çapının ise 30 mm olduğu görülmektedir. Şekil 3.11b'den de görüldüğü üzere kanat yükseklikleri 50 mm'dir. Çark yapısı içerisinde ön düzlemde oluşturulan geometrinin çap bilgisi ise 155 mm'dir (Şekil 3.11c).



(a) (b)

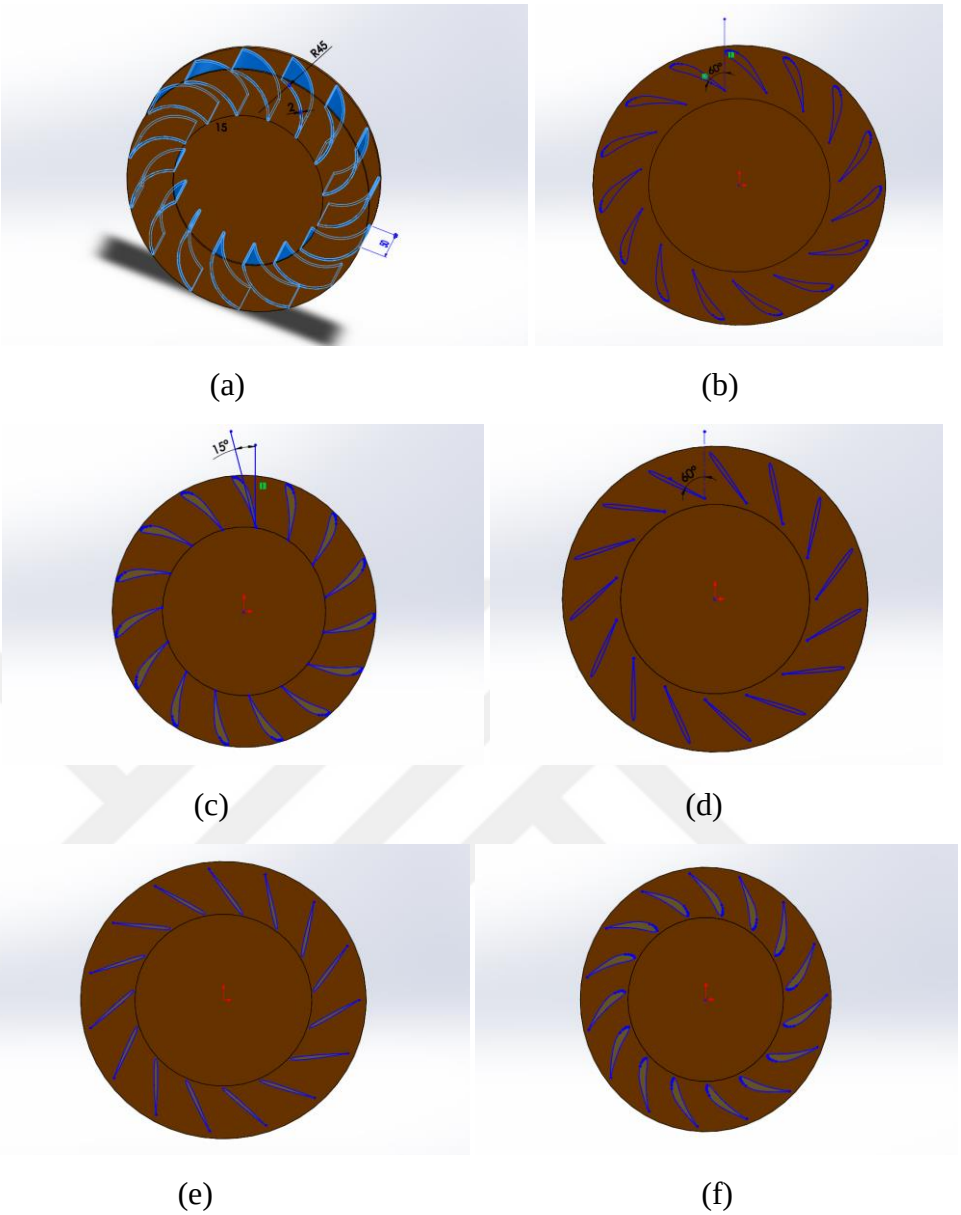
(c)

Şekil 3.11. Çark tasarımı; (a) Çark tasarımında kullanılan ölçüler (b) Kanatların yükseklik ölçüsü (c) Çarkta oluşturulan çap ölçüsü

Bu bölüme kadar tüm fan tasarımlarında ortak kullanılan parçaların bilgisi verilmiştir. Bölüm 3.3.2'de seçilen NACA 0006, EPPLER 421 ve sabit kesitli kanat yapıları kullanılarak çark tasarımları oluşturulmuştur.

3.3.2 Farklı Kanat Yapıları Kullanılan Çark Tasarımları

Şekil 12a'da sabit kesitli kanat yapısı için geometrik ölçüler gösterilmektedir. R145, kalınlık değeri 2 mm olan sabit kesitli kanat yapısı dairesel çoğaltma ile 15 adet oluşturulmuştur. Şekil 3.12b'de EPPLER 421 kanat yapısının çark içerisindeki montaj görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.12b'den de görülebileceği üzere kanatlar 60°'lik bir açı ile çark içerisine yerleştirilmiştir. Analizler doğrultusunda fan tasarımında kullanılan kanat yapısının etkisi ve konumlandırılmasının sonuçlara olan etkisi inceleneceği için EPPLER 421 kanat yapısı 15°'lik bir açı ile yerleştirilmiştir (Şekil 3.12c). Şekil 3.12d'de NACA 0006 kanat yapısının çark içerisindeki montaj görüntüsü verilmiştir. Bu çark tasarımında da NACA 0006 kanatlar 60°'lik bir açı ile yerleştirilmiştir. Buraya kadar çark tasarımında kullanılan aerodinamik kanatların firar kenarları çark yönüne doğru olarak konumlandırılmıştır ancak bu çalışmada sadece kanat yapısı değil aynı zamanda konumlandırma da incelendiği için diğer analizlerde NACA 0006 ve EPPLER 421 aerodinamik kanatların firar kenarları çark dışına doğru montajlanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 3.12e'de ters olarak kullanılan (firar kenarı çark dışına doğru) NACA 0006 kanat yapısının çark içerisindeki montaj görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.12f'de ise ters olarak kullanılan EPPLER 421 kanat yapısının çark içerisindeki görüntüsü paylaşılmıştır.



(a) (b)

(c) (d)

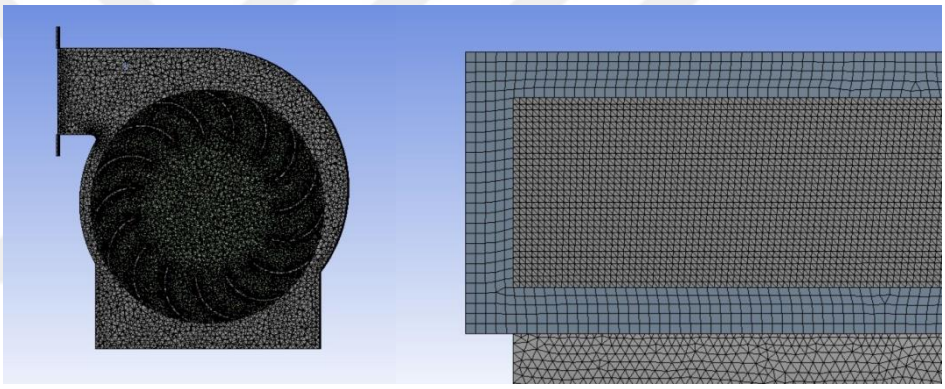
(e) (f)

Şekil 3.12. Farklı kanat yapıları kullanılan çark tasarımları; (a) Sabit kesitli kanat yapısı kullanılan çark (b) EPPLER 421 kanat yapısı kullanılan çark (c) EPPLER 421 aerodinamik kanat yapısı daha dik konumlandırılan çark (d) NACA 0006 kanat yapısı kullanılan çark (e) NACA 0006 kanat yapısı ters kullanılan çark (f) EPPLER 421 kanat yapısı ters kullanılan çark

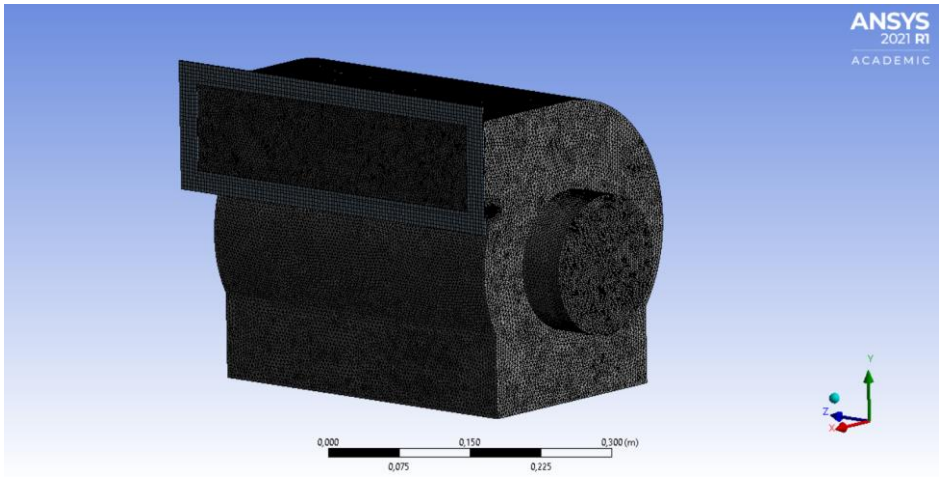
3.4 Fan Tasarımları için Sayısal Modelleme

Analiz için yapılan sayısal modelleme her bir tasarımda aynıdır. Tasarım kısmından çözüm kısmına kadar aynı sayısal modelleme yapılmış olup her birinden elde edilen

analizler karşılaştırılmıştır. Analiz kısmında sorun yaşamamak ve akış ortamını yaratabilmek için tasarımı yapılan fanlarda gövde ve giriş bölümü katı model olarak oluşturulmuştur. Kanat yapıları, tasarım aşamasındayken katı model haline getirilen çark içerisinden çıkartılmıştır. Eleman ağı oluşturulurken tetrahedron ve hexahedron elemanlar kullanılmıştır. Fan üzerinde bulunan radyal kısımlardan dolayı bu bölgelerde tetrahedron elemanlar oluşturulmuştur. Analizin doğruluğu için fan üzerinde minimum eleman boyutu 0,005 m, kanatlar üzerinde minimum eleman boyutu 0,002 m, giriş ve çıkış üzerinde minimum eleman boyutu 0,003 m sıklaştırılmış ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısının görünümü Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Bu işlemlerden sonra toplam eleman sayısı 14 952 808 ve düğüm sayısı 2 610 000 olarak elde edilmiştir. Toplam eleman kalitesi 0,89 tespit edilmiştir.



(a) (b)



(c)

Şekil 3.13. Ağ yapısı; (a) Kanatlar üzerindeki ağ (b) Çıkış bölgesi (c) Genel görüntü

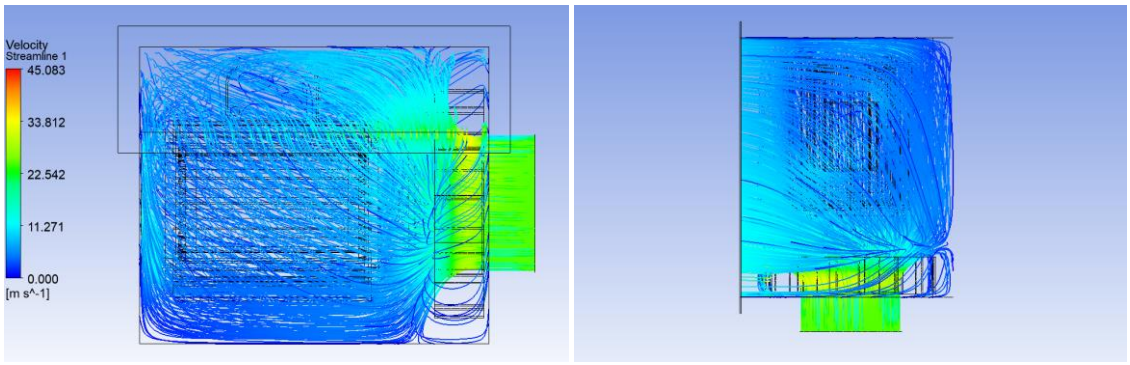
Çözüm ayarları yapılırken zamana bağlı analiz yapıldığı için zaman: geçici (transient) olarak seçilmelidir. Ayrıca çark için tanımlanacak olan birim rpm seçilmelidir. Türbülans modeli olarak Std k-epsilon (2 eqn) seçilmiştir (Denklem 2.18 ve Denklem 2.19). Analizde kullanılmış olan akışkan 15°'de bulunan havadır. Belirlenen akışkan için özellikler: yoğunluk 1.225 kg/m^3 ve viskozite 1.78x10^{-5} Ns/m^2 'dir ve otomatik olarak tanımlı olarak gelir. Sınır koşulları girilmeden önce çark üzerine hareket tanımlaması yapılabilmesi için ağ hareketi (mesh motion) komutu ile çarkın konum bilgisi girilmiş ve saat yönünün tersinde 2500 rpm'lik dönme hızı belirlenmiştir. Sınır şartları için havanın giriş hızı 25 m/s belirlenmiştir. Referans değerleri ise giriş yüzeyinden itibaren hesaplanmak üzere belirlenmiştir. Çözüm ayarları için SIMPLE algoritması seçilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde, SIMPLE algoritması Navier-Stokes denklemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan sayısal bir prosedürdür. SIMPLE, basınç bağlantılı denklemler için yarı kapalı yöntemin (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) kısaltmasıdır. Hesaplamayı başlatmadan önce zaman adımı: 0.05 s, zaman adım sayısı: 100, en yüksek iterasyon/zaman adımı: 10 olarak belirlenerek analizler başlatılmıştır. Zaman adımı, yönetim denklemlerinin çözüldüğü zamandaki artan değişimdir. Tüm akış dalgalanmalarını yakalamak için küçük zaman adımı boyutunun seçilmesi tavsiye edilir. Zaman adımı, verdiğiniz maksimum yinelemenin gerçekleştirileceği zamanın minimum bölümüdür. Zaman adımlarının sayısı, analizin yapılması gereken zamana bağlıdır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde tasarımı yapılan fanların analizleri incelenmiştir. Aerodinamik kanat yapısı kullanılan fanlar içerisinde enerji kaybı, gürültü seviyesi, kanatlar üzerinde oluşan basınç farklılığı, elde edilen statik basınç değeri ve oluşan akış çizgileri göz önüne alınarak fan seçimi yapılmış ve sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fan ile kıyaslanmıştır. Her iki fan tasarımı farklı debiler altında yeniden çözümlenmiş ve fan performans eğrileri elde edilerek yorumlanmıştır.

4.1 Sabit Kesitli Kanat Yapısı Kullanılan Fan Analizi

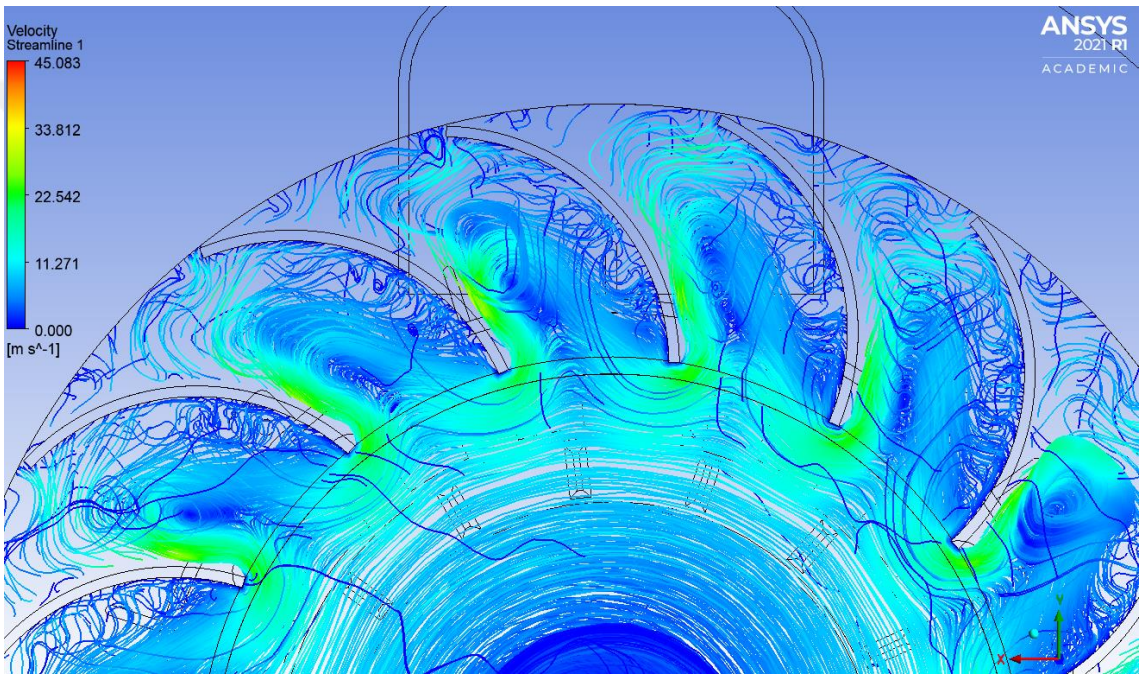
Akış çizgilerinin başlangıç noktası giriş olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1'den de görülebileceği üzere 25 m/s hız değeri ile giren hava, çarktaki dönme sebebiyle tasarım içerisinde dağılım göstermiştir. Hız, en yüksek değerini giriş bölgesinde almıştır. Çarka girdikten sonra havanın hızı yavaşlamış ve sonrasında ise hava çıkışa doğru hareket ederek çarktaki hızına kıyasla azalmaya devam etmiştir. Akış çizgileri fanın üst görünümünden incelendiğinde çıkış noktalarına yakınlaştıkça havanın hız değerinin giriş değerine kıyasla azalmakta olduğu görülmektedir ancak fan içerisindeki genel hızına kıyasla da daha yüksektir (Şekil 4.1b). Ayrıca çarka yakın olan bölgede akış çizgilerinin yoğunluk gösterdiği görülmektedir.



(a) (b)

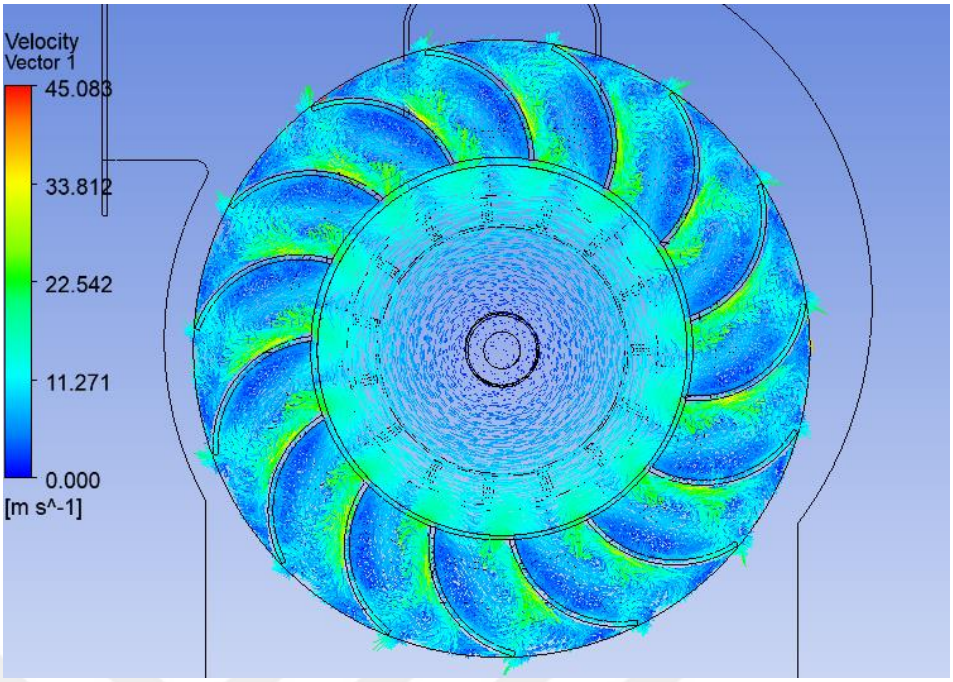
Şekil 4.1. Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı; (a) Yan görünüm (b) Üst görünüm

Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri Şekil 4.2'de görülmektedir. Havanın kanatlar etrafında oluşturduğu akış çizgileri incelendiğinde kanadın üst ve alt bölgesinde farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Kanatların üst bölgesi için akış, kanat ucuna doğru azalma gösterirken kanadın alt bölgesinde daha fazla akış çizgileri oluşmuştur. Oluşan akışın hızı incelendiğinde ise kanadın üst bölgesinde çark merkezine yakın olan kısmında daha yüksek hızlı akış çizgilerinin oluştuğu görülmektedir. Bu bölgede yaklaşık olarak hava hızı 25 m/s değerindedir. Ayrıca hava, kanadın merkez bölgesine gelmeden kanat yüzeyinden ayrılmış ve türbülanslı akış haline gelmiştir.

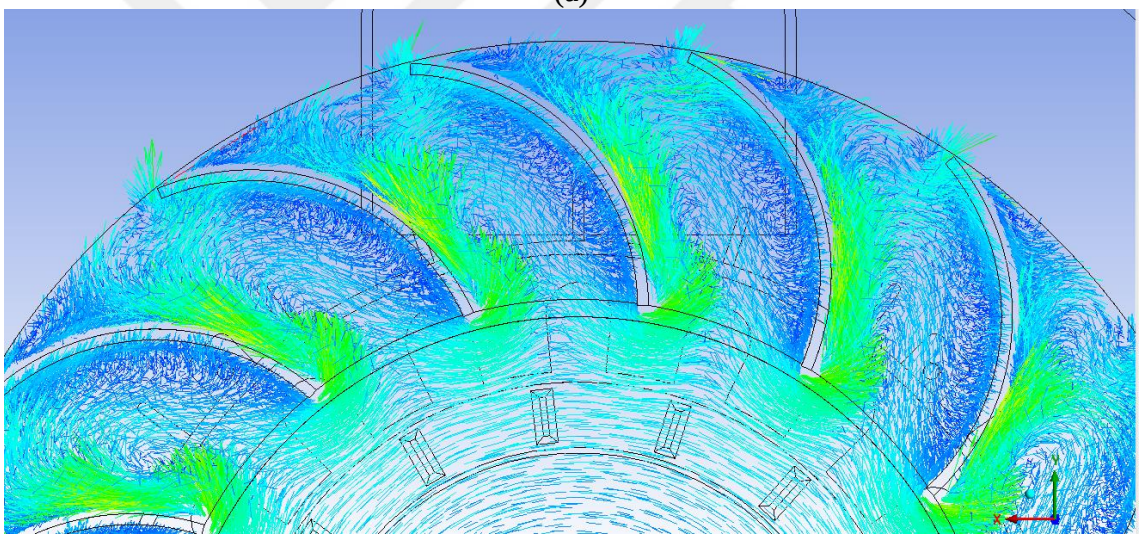


Şekil 4.2. Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri.

Çark üzerinde oluşan hız vektörleri Şekil 4.3'de gösterilmektedir. Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri incelendiğinde kanadın üst tarafında dip bölgesi için hız değerinin yaklaşık 25 m/s olduğu sonucuna ulaşılmıştı, burada da aynı sonuç görülmekle beraber kanat uçlarına doğru hız değerinin azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. Şekil 4.3b'de havanın çark üzerindeki dağılımı yakından gösterilmektedir. Kanatların alt bölgesinde özellikle dip bölgesinde hızın en düşük değerini aldığı görülmektedir. Alt bölge için ise kanat ucuna doğru hızın artış gösterdiği sonucuna da ulaşılmaktadır.



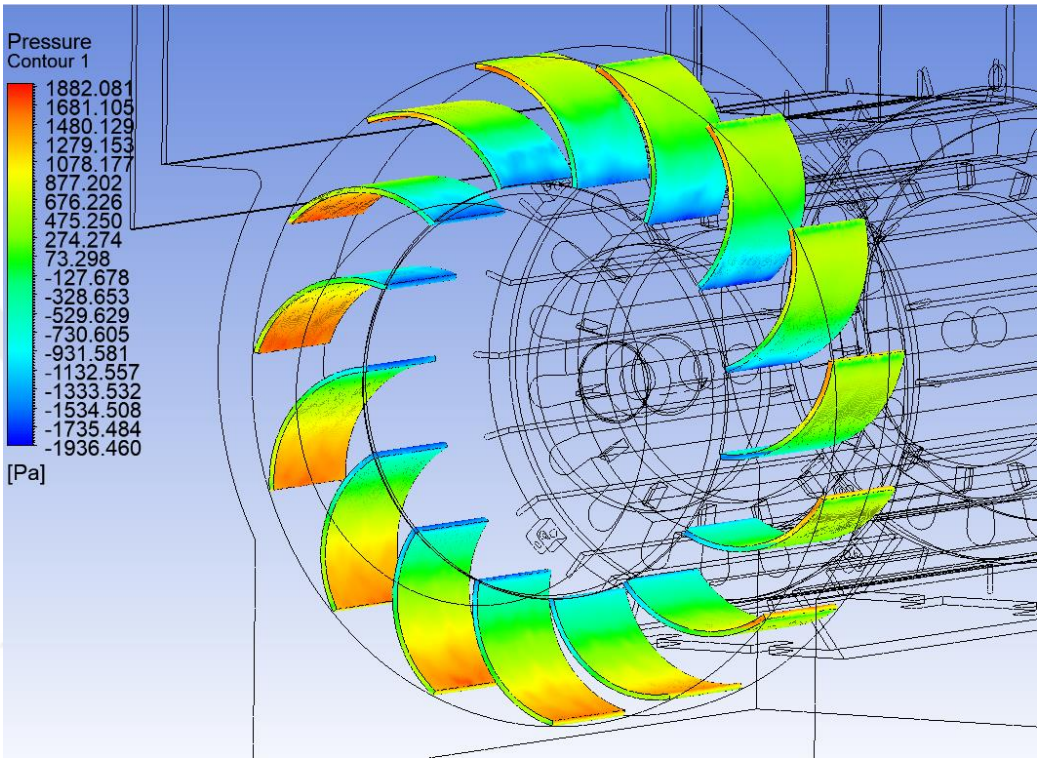
(a)



(b)

Şekil 4.3. Vektör çizgileri. (a) Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri (b) Çark üzerinde oluşan vektör çizgilerinin yakın görüntüsü

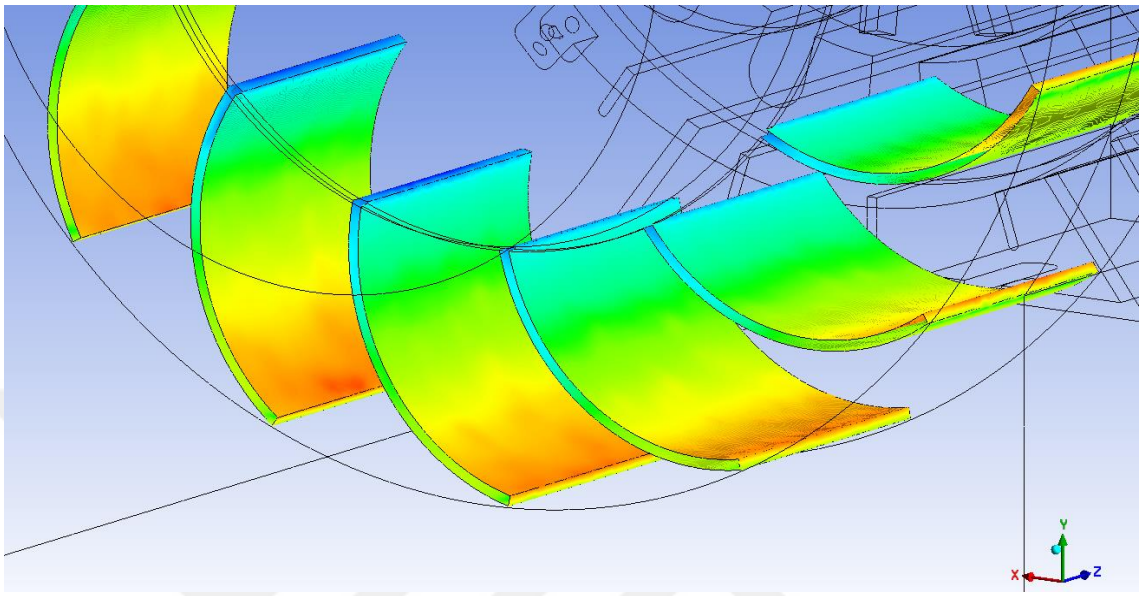
Kanatlar üzerindeki basınç değeri Şekil 4.4'den de görüldüğü üzere -1936 Pa ile 1882 Pa arasında değişkenlik göstermektedir. Kanatların iç ve dış yüzeyi arasında basınç farklılığı oluşmaktadır. Genel olarak kanadın iç yüzeyinde oluşan basınç değeri daha yüksektir.



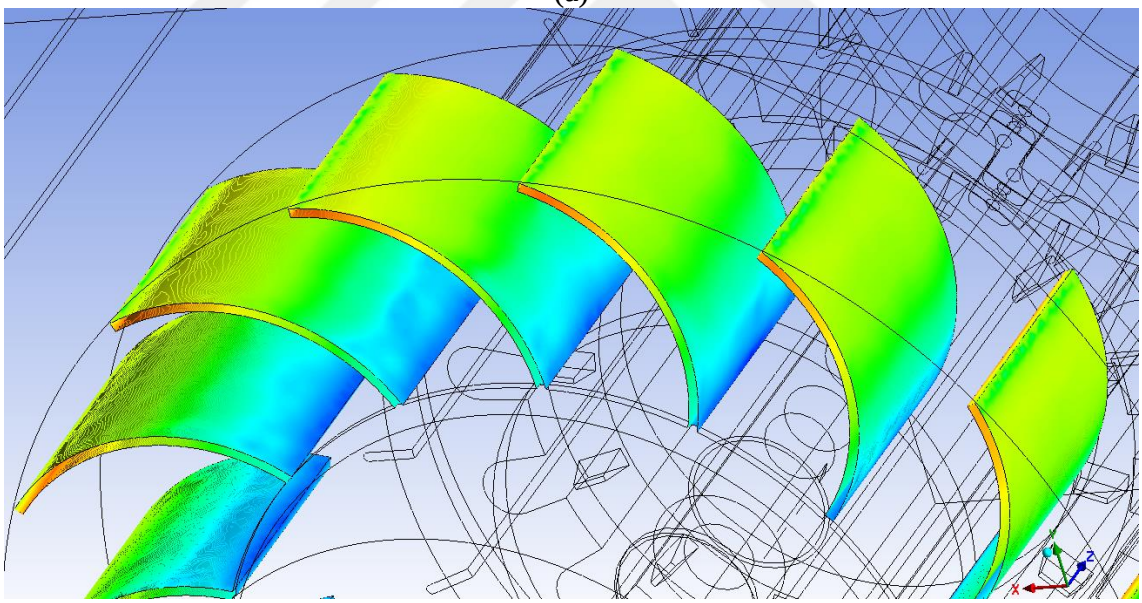
Şekil 4.4. Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değeri.

Kanatların iç ve dış yüzeyleri arasında oluşan basınç farklılığı yakından incelendiğinde kanadın iç yüzeyinde oluşan basınç dağılımında kanat uçlarına doğru basıncın arttığı görülmektedir (Şekil 4.5). Basınç en yüksek değerini kanatların iç yüzeyinde ve kanat ucunda almıştır. Kanadın iç yüzeyi için basıncın kanat diplerinde -931 Pa değerinden kanat ucuna doğru 1882 Pa değerine kadar artış gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.5a). Kanatların dış yüzeyi incelendiğinde ise basıncın yine kanat dibinden ucuna doğru artış gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.5b) Ancak, burada basınç her ne kadar giderek artış gösterse de kanadın iç yüzeyinde oluşan basınç değeri kadar artış göstermemektedir.

Kanadın üst yüzeyi için kanat diplerinde basınç değeri yaklaşık olarak -1735 Pa değerini alırken kanat uçlarında bu değer 475 Pa değerine ulaşmaktadır.



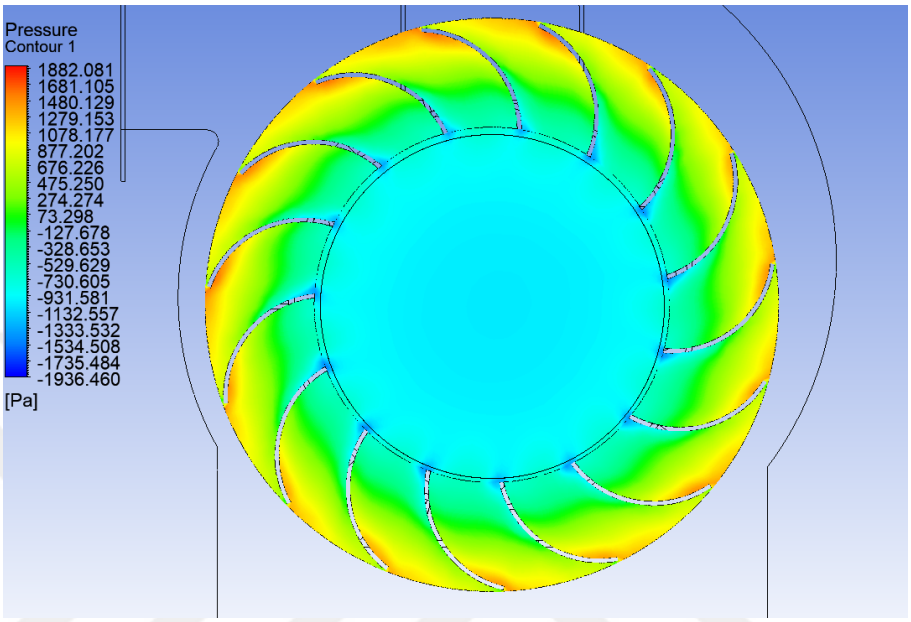
(a)



(b)

Şekil 4.5. Basınç dağılımı (a) Kanadın iç yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi (b) Kanadın dış yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi

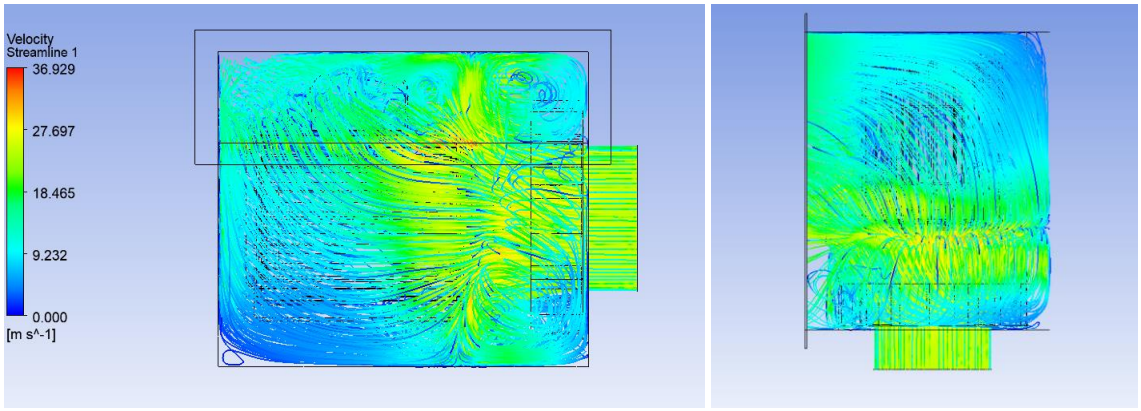
Şekil 4.6'da basıncın çark üzerinde oluşturduğu dağılım gösterilmektedir. Buradan da yine basıncın çark içerisinde eşit dağılım göstermediği, kanat üzerinde negatif ve pozitif basınç değerlerinin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Çark üzerinde oluşan basınç değişimi.

4.2 EPPLER 421 Aerodinamik Kanat Yapısı Kullanılan Fan Analizi

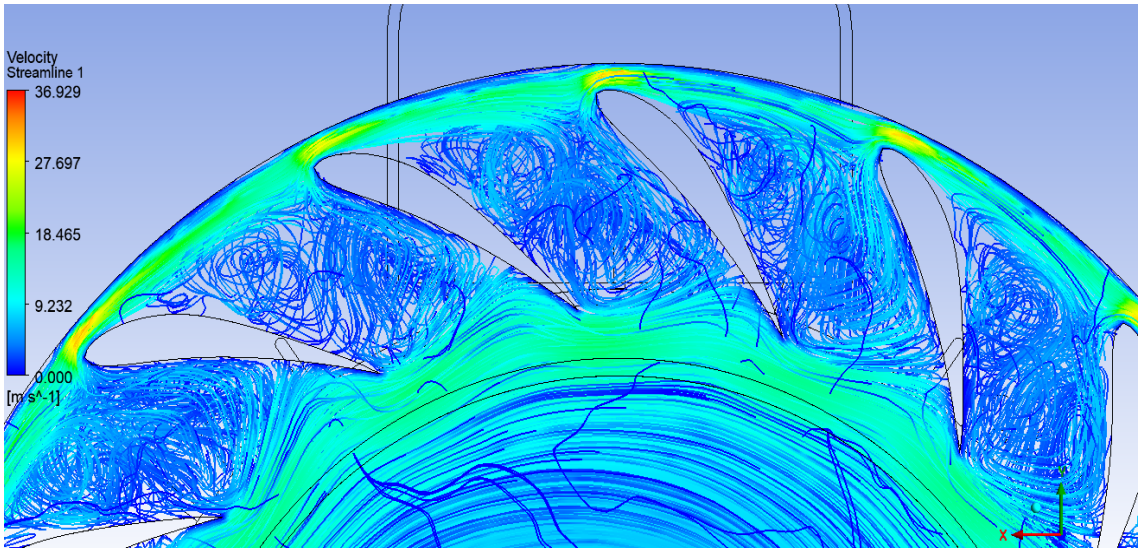
Analizde akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı incelenmiştir (Şekil 4.7). Sabit kesitli kanat kullanılan fan tasarımından elde edilen analiz ile kıyaslandığında çarkta EPPLER 421 aerodinamik kanat kullanılmasının fan içerisinde daha yüksek hızlı akışa neden olduğu görülmektedir. Fan içerisine giren hava çarkta çok fazla hız kaybına uğramadan motor kısmına kadar nispeten daha yüksek hızda ilerleyebilmiştir (Şekil 4.7a). Sabit kesitli kanat kullanılan fan tasarımında hava, çark bölgesinden sonra yavaşlama gösterirken EPPLER 421 kanat yapısı kullanılan fanda çark sonrası havanın hızında daha az yavaşlama gözlenmiştir. Akış çizgilerini fanın üst görünümünden incelersek sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fan tasarımına göre havanın çıkış hızının daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmaktadır (Şekil 4.7b).



(a) (b)

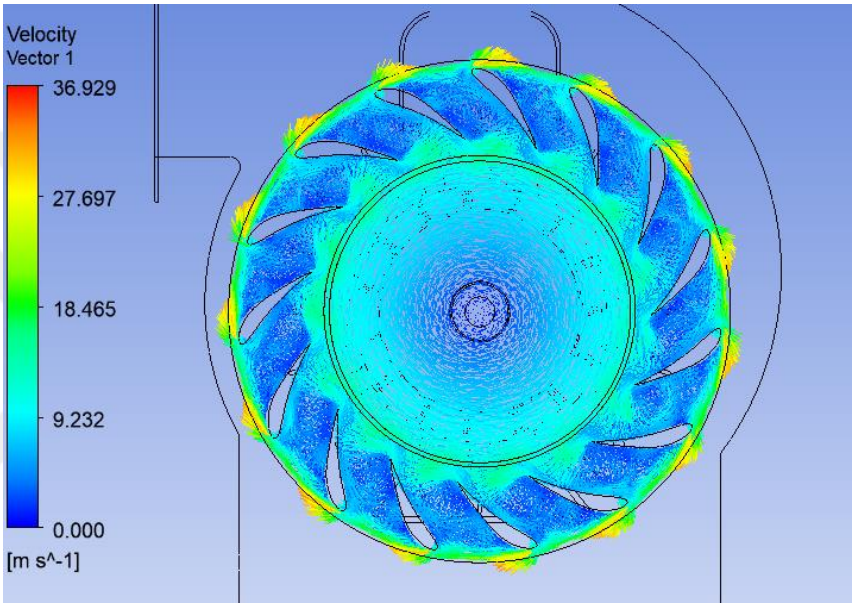
Şekil 4.7. Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı; (a) Yan görünüm (b) Üst görünüm

Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fan ile kıyaslandığında kanatların arasında daha az akış ayrılmaları yaşandığı görülmektedir. Sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fan tasarımında hava, kanatların orta noktasına gelmeden ayrılmalara uğrarken EPPLER 421 kanat yapısı kullanılan fanda hava, kanat yüzeylerinden çok daha az ayrılmalara uğramıştır. Kanatlar arasında türbülanslı akış oluşmaktadır. Kanat uçlarında hava hızı artış göstermektedir.

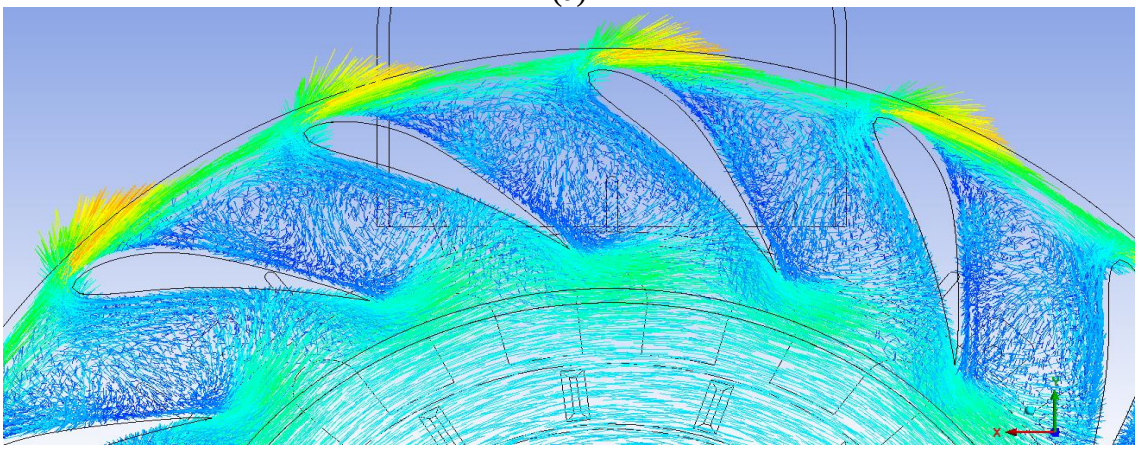


Şekil 4.8. Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri.

Şekil 4.9'da çark üzerinde oluşan hız vektörleri incelendiğinde hız vektörünün en yüksek değerini kanatların uç kısımlarında aldığı görülmektedir. Hava, fana 25 m/s ile girmiş olsa da çark içerisinde kullanılan kanat yapıları sebebiyle kanat uçlarında havanın hızı 30 – 36 m/s değerlerine ulaşabilmektedir (Şekil 4.9a). EPPLER 421 kanat yapısının alt ve üst yüzeyi incelendiğinde hız değişiminin kanadın dip ve uç kısmında daha fazla değişkenlik gösterdiği, alt ve üst yüzeyi arasında hızın yaklaşık olarak aynı değerleri aldığı görülmektedir (Şekil 4.9b).



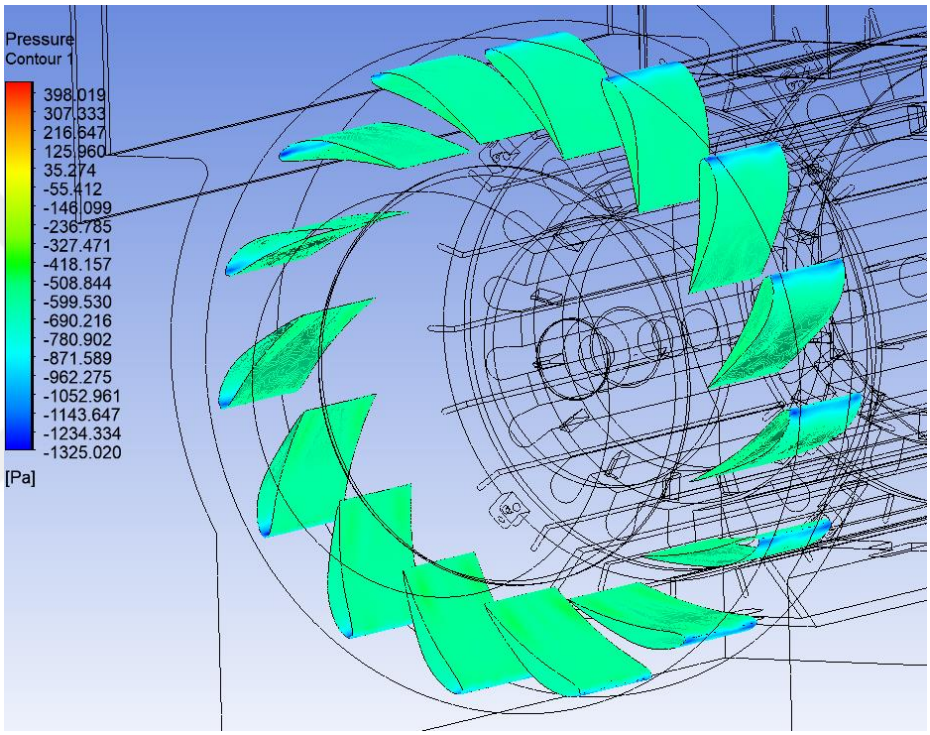
(a)



(b)

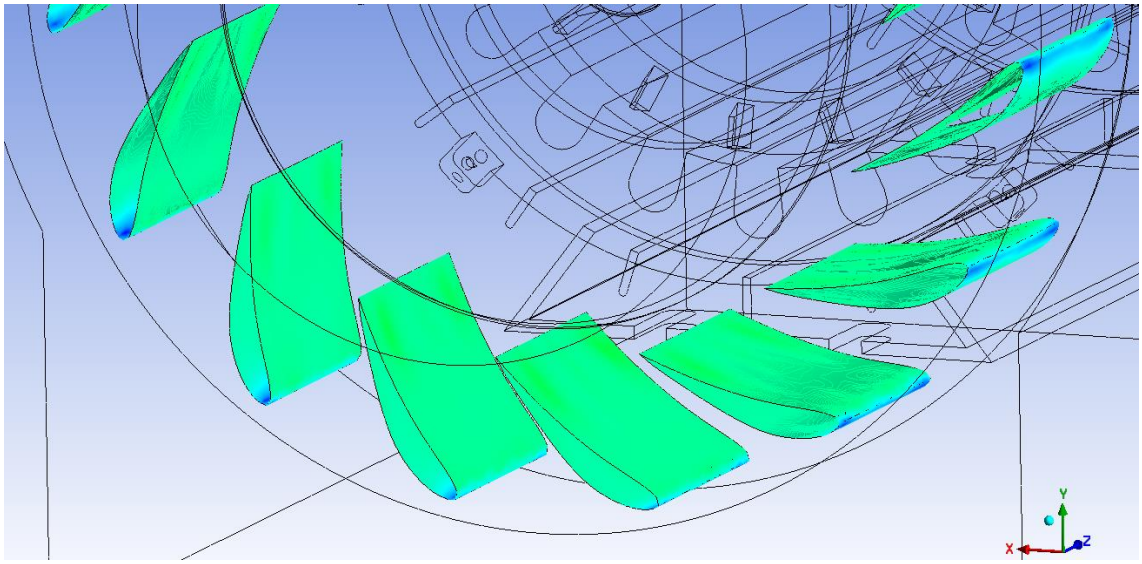
Şekil 4.9. Vektör çizgileri (a) Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri (b) Çark üzerinde oluşan vektör çizgilerinin yakın görüntüsü

Şekil 4.10'dan görüldüğü üzere basınç, kanadın alt ve üst yüzeyi arasında benzerlik göstermiştir. Sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fanın kanatlar üzerinde oluşan basınç değerleri incelendiğinde kanadın alt ve üst bölgesinde farklı basınçlar oluştuğu, ayrıca alt ve üst yüzeyde yüzey boyunca dipten uca doğru basıncın artış gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. EPPLER 421 kanat yapısı kullanılan fan analizi incelendiğinde ise kanat yüzeyleri arasında daha az basınç farklılığı oluştuğu görülmektedir. Kanatlar üzerinde negatif basınç oluştuğu görülmektedir.

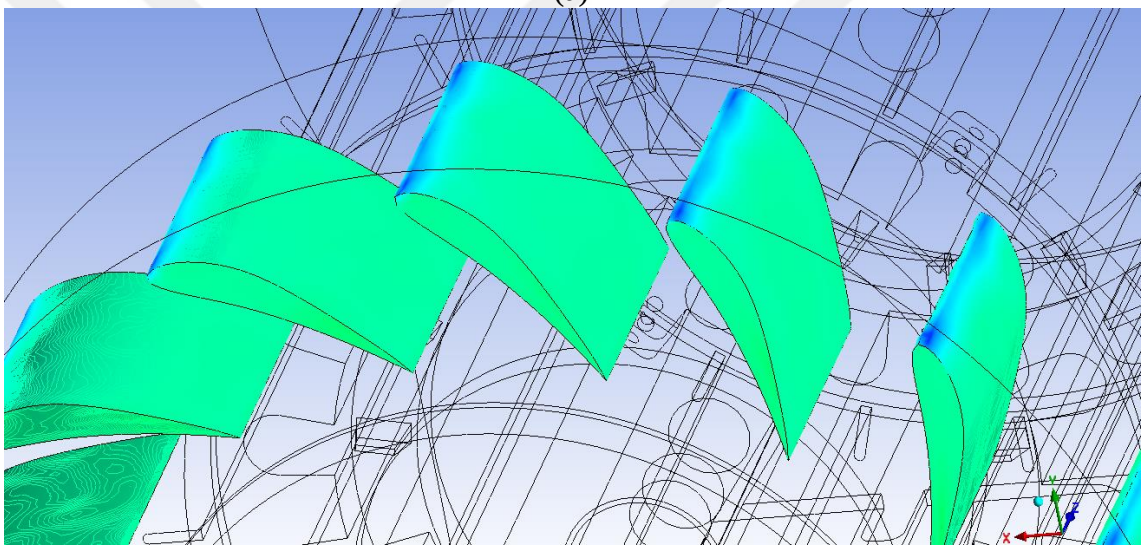


Şekil 4.10. Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi.

Şekil 4.11a'da kanadın iç yüzeyinde oluşan basınç değerleri gösterilmektedir. Basınç, kanat yüzeyi boyunca - 418 Pa değerini almaktadır. Kanatların dış yüzeyi incelendiğinde ise basıncın kanat ucunda yüzeye göre daha düşük değer aldığı görülmektedir (Şekil 4.11b). Dış yüzeydeki basınç değeri iç yüzeydeki basınç değerine eşdeğer olarak – 418 Pa değerlerinde iken kanat uçlarında - 1300 Pa değerine kadar düşmektedir.



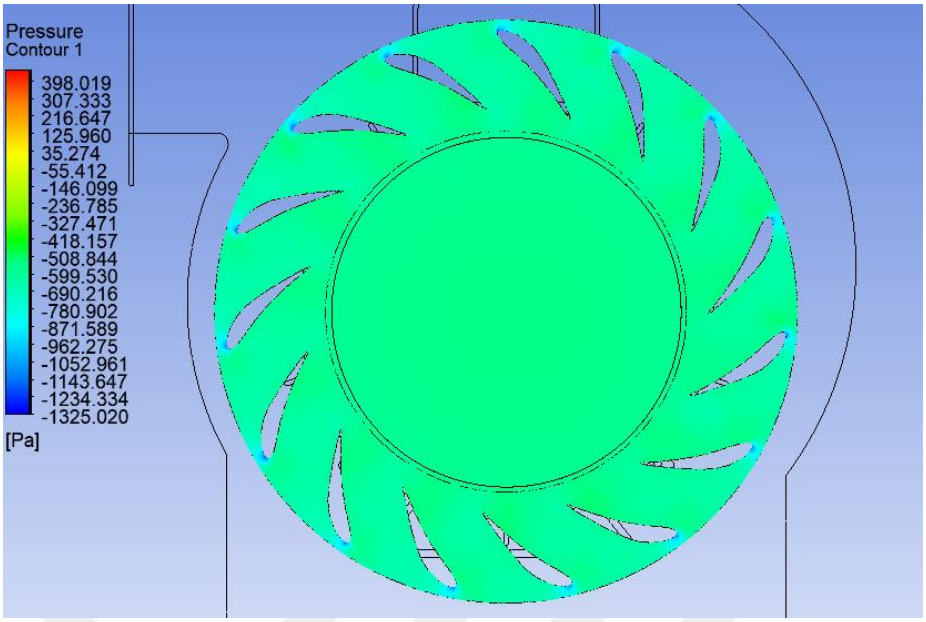
(a)



(b)

Şekil 4.11. Basınç dağılımı (a) Kanadın iç yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi (b) Kanadın dış yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi

Şekil 4.12'de basıncın çark üzerinde oluşturduğu dağılım görülmektedir. Buradan da basıncın çark üzerinde aynı değerlere sahip olduğu, kanat uçlarında basıncın azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. Kanat yüzeyleri arasında sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fanda olduğu gibi basınç farklılığı oluşmamıştır.

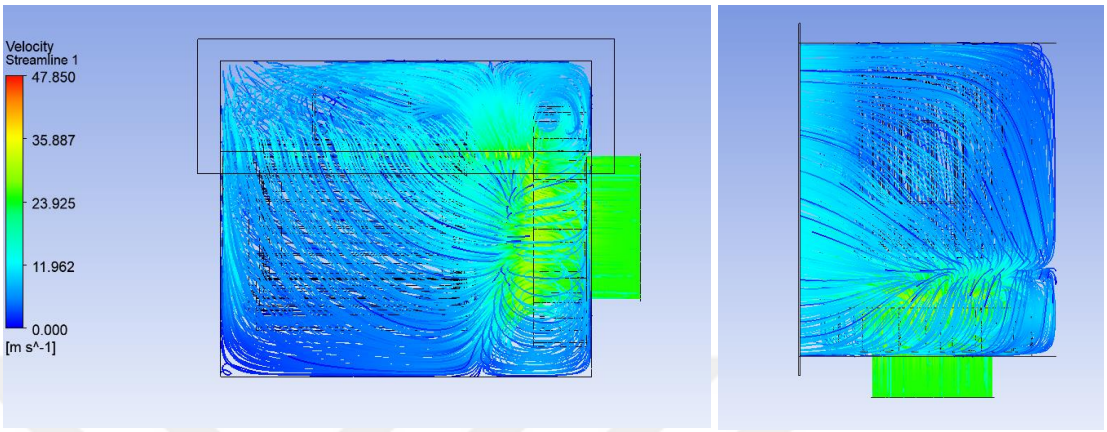


Şekil 4.12. Çark üzerinde oluşan basınç değişimi.

4.3 EPPLER 421 Aerodinamik Kanat Yapısı Daha Dik Konumlandırılan Fan Analizi

Bu analizde fan tasarımında kullanılan kanat yapısı yeniden EPPLER 421 aerodinamik kanat yapısıdır. Asıl amaç tasarımlar için tek önemli parametrenin kullanılan kanat yapısı olmadığını göstermektir. Kanatların yerleştirilme pozisyonları da sonucu değiştiren bir etmendir. Bu sebepten EPPLER 421 kanatlar bu fan tasarımında çark içerisine daha dik olarak yerleştirilmiştir. Analizden alınan ilk sonuç fan içerisinde oluşan akış çizgileri olmuştur. Başlangıç noktası giriş olarak belirlenen fan içerisindeki akış çizgileri Şekil 4.13'de gösterilmektedir. Sonuçları incelenen EPPLER 421 kanat yapılı fan tasarımı ile kıyaslayalım. EPPLER 421 kanat yapılarının daha yatay konumlandırıldığı analizde çark sonrası hava, motor bölümüne kadar hızı azalmadan ilerlemekte olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kanatların daha dikey konumlandırıldığı bu analizde ise hava, çarka daha yakın bir bölgede hız kaybetmekte ve EPPLER 421 kanat profillerinin 60° açı ile konumlandırıldığı analiz ile daha benzer bir sonuç vermektedir (Şekil 4.13a).

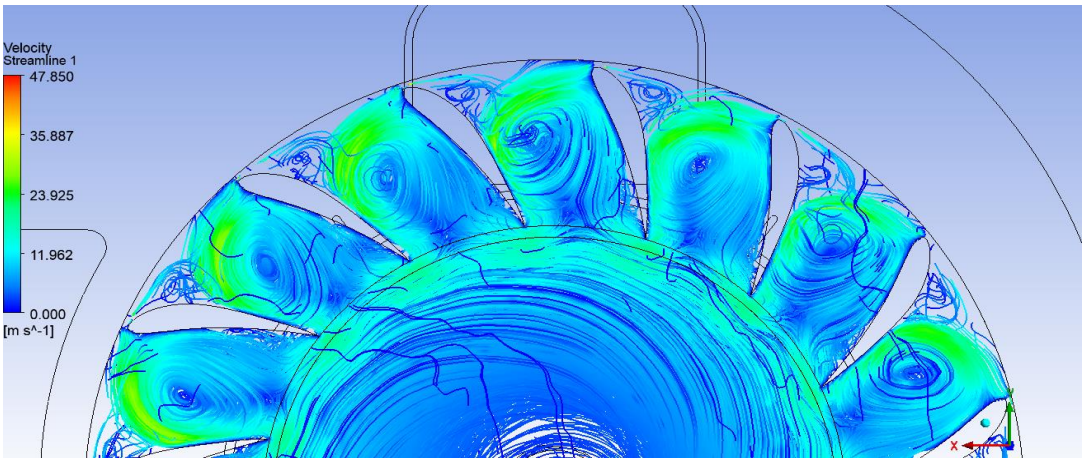
Akış çizgilerini fanın üst görünümünden incelersek çıkış noktalarına yakınlaştıkça havanın hız değerinin giriş hızına kıyasla azaldığı, fan içerisindeki genel hızına kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 4.13b).



(a) (b)

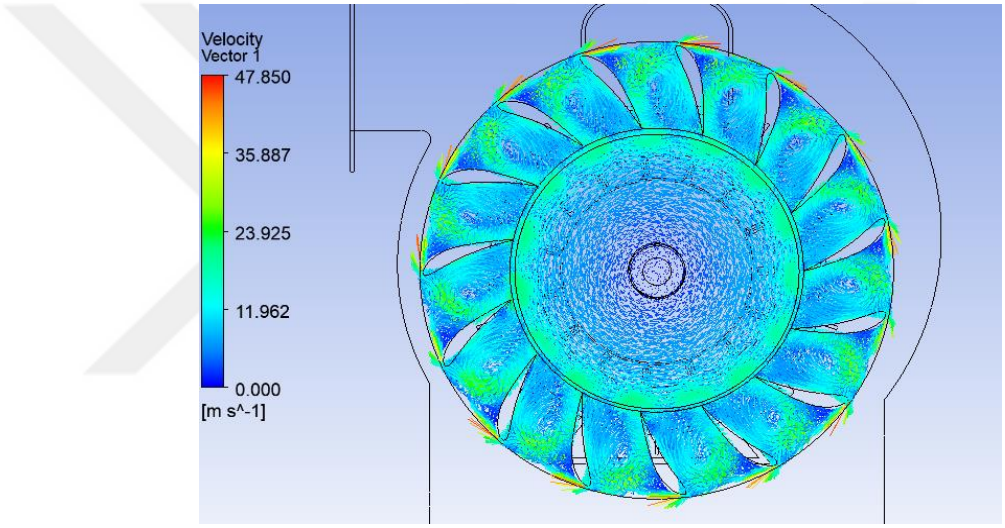
Şekil 4.13. Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı; (a)Yan görünüm (b) Üst görünüm

Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Havanın kanatlar etrafında oluşturduğu akış çizgileri incelendiğinde akışta ayrılmaların meydana geldiği görülmektedir. EPPLER 421 kanat profillerinin 60° açı ile konumlandırıldığı analizde hava, kanatları yüzeyleri boyunca takip ederken daha dikey konumlandırıldığında yaklaşık olarak kamburluk kısmında ayrılmalar başlamıştır.

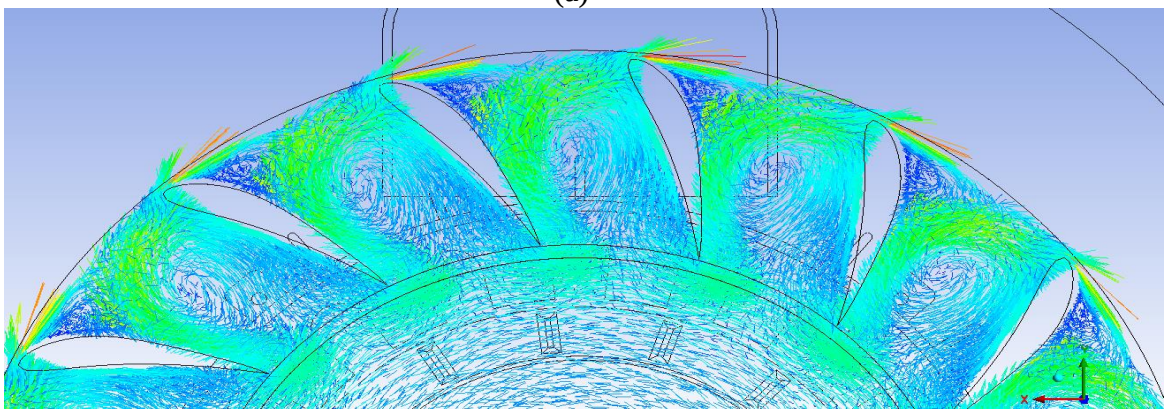


Şekil 4.14. Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri.

Hız vektörünün en yüksek değerini kanatların uç kısmında aldığı görülmektedir (Şekil 4.15a). EPPLER 421 kanat profillerinin 60° açı ile konumlandırıldığı analizde kanatlar arasında hız vektörlerinin değerleri birbiri ile yakın sonuçlar verirken EPPLER 421 kanat profillerinin 15° açı ile konumlandırıldığı analizde kanatlar arasındaki bölgelerde kanatların kamburluk noktasından geriye doğru hızın yaklaşık 25 m/s değerini aldığı görülmektedir. Şekil 4.15b incelendiğinde kanatların uç kısmında hızın 47 m/s değerine kadar artış gösterdiği görülmektedir. EPPLER 421 kanat profillerinin kullanıldığı bu iki analiz kıyaslandığında çıkarılacak sonuç için kanatların daha dikey olarak konumlandırılması çark üzerindeki hava hızının artmasına sebep olduğu görülmektedir.



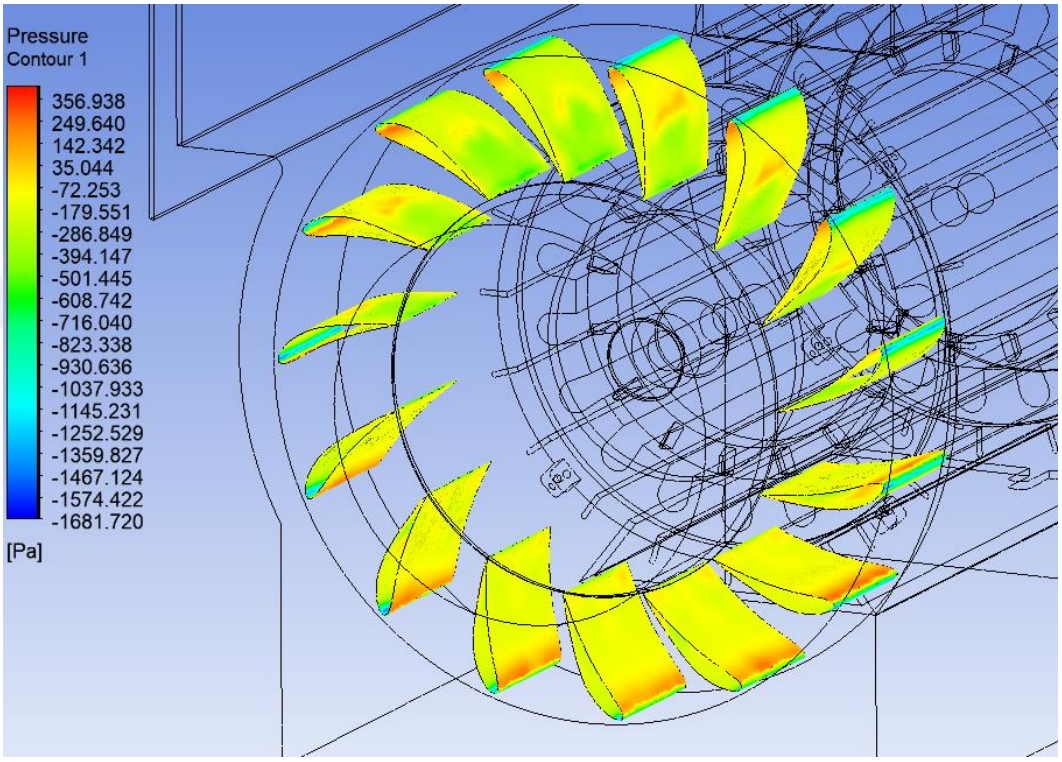
(a)



(b)

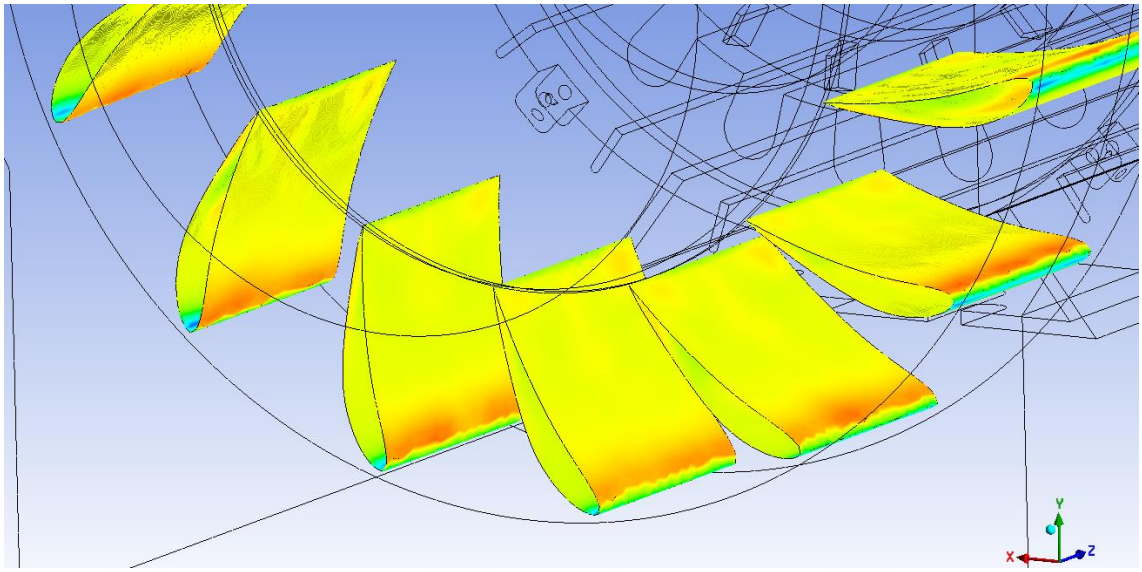
Şekil 4.15. Vektör çizgileri (a) Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri (b) Çark üzerinde oluşan vektör çizgilerinin yakın görüntüsü

Şekil 4.16'da kanatlar üzerindeki basınç değişimi gösterilmektedir. Kanatların daha yatay konumlandırıldığı analiz sonucuna kıyasla kanatlar daha dik olarak konumlandırıldığında kanatlar üzerinde oluşan basınç daha fazla değişim göstermektedir.

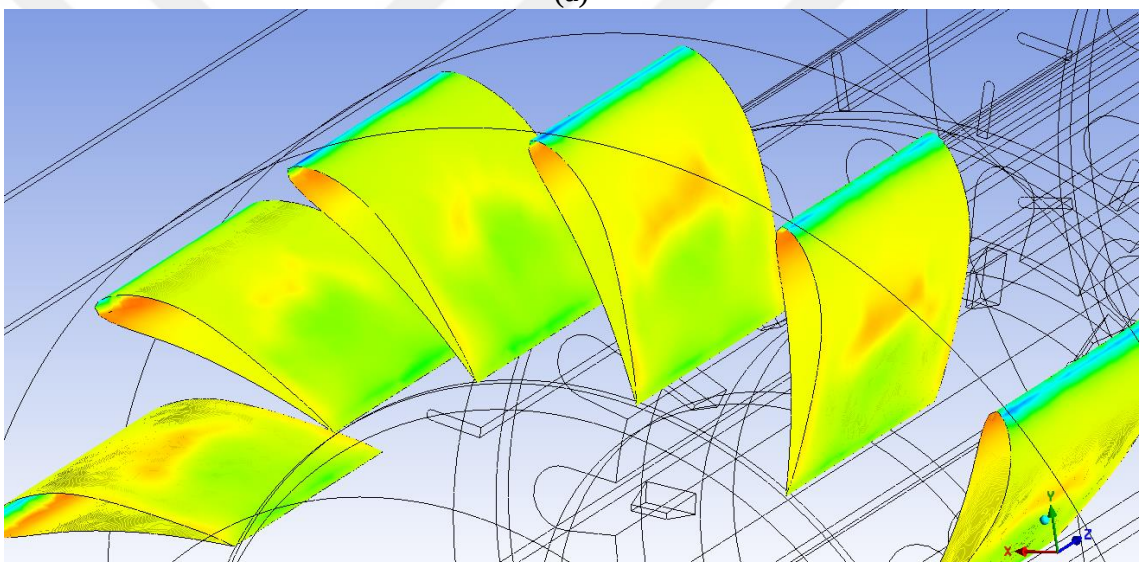


Şekil 4.16. Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi.

Kanatların iç yüzeyi incelendiğinde dipten uca doğru basıncın artış gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.17a). Kanadın iç yüzeyi için diplerde – 179 Pa değerinde olan basınç, kanat ucunda 250 Pa değerine ulaşmaktadır. EPPLER 421 kanat profillerinin 60° açı ile konumlandırıldığı analize kıyasla kanadın iç yüzeyinde daha yüksek basınç değerlerinin elde edildiği sonucuna ulaşılmaktadır. Kanadın dış yüzeyinde oluşan basınç incelendiğinde ise kanatların orta bölgesinde basıncın tüm yüzeyine kıyasla daha yüksek basınç oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.17b) Ayrıca kanadın dip kısmında basınç yaklaşık olarak - 397 Pa iken kanat ucunda – 72 Pa değerine kadar artış göstermiştir.



(a)

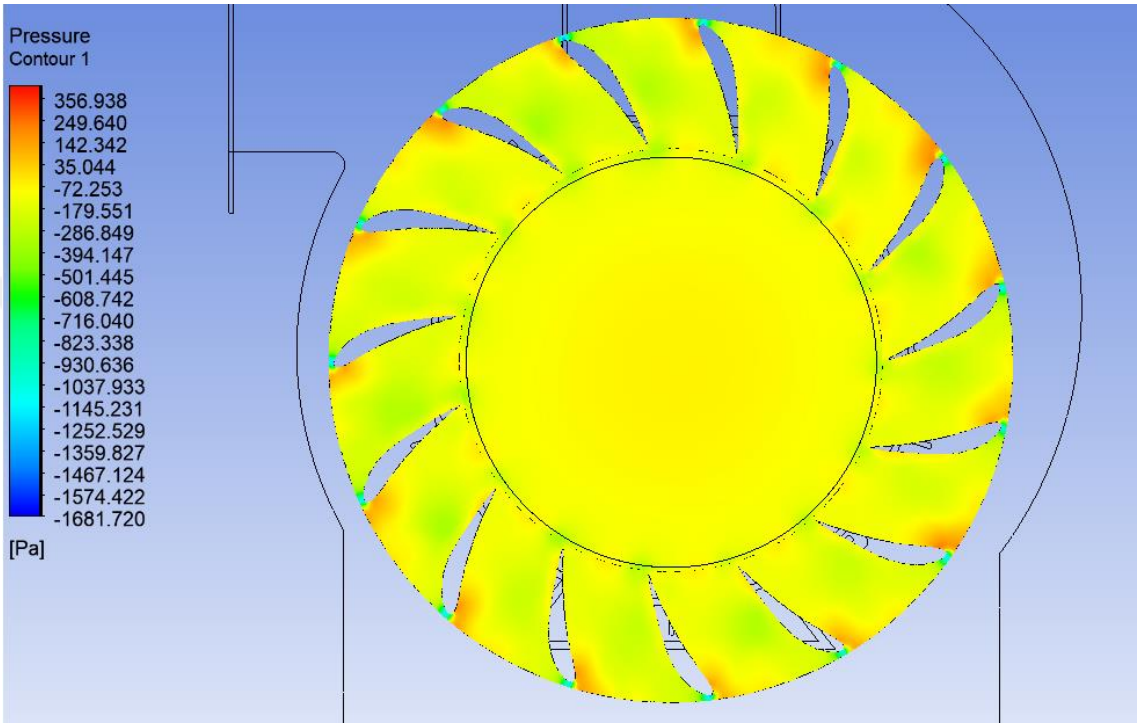


(b)

Şekil 4.17. Basınç dağılımı (a) Kanadın iç yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi (b) Kanadın dış yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi

Şekil 4.18'de basıncın çark üzerinde oluşturduğu dağılım gösterilmektedir. EPPLER 421 kanat profillerinin 60° açı ile konumlandırıldığı analizde olduğu gibi çark üzerinde eş bir basınç dağılımının oluşmadığı buradan da görülmektedir.

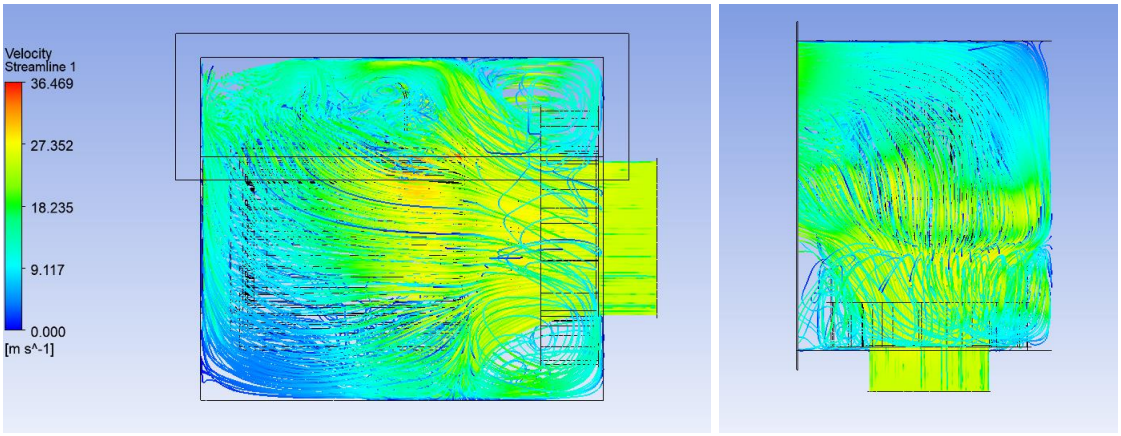
Sabit kesitli kanatların kullanıldığı analizde çark üzerindeki basınç dağılımı incelendiğinde basıncın en yüksek değerini kanadın alt yüzeyinin uç kısmında aldığı sonucuna ulaşılmıştı. EPPLER 421 kanatların daha dik konumlandırıldığı analizde de yine basınç en yüksek değerini alt yüzeyde ve uç kısımda almıştır.



Şekil 4.18. Çark üzerinde oluşan basınç değişimi.

4.4 NACA 0006 Aerodinamik Kanat Yapısı Kullanılan Fan Analizi

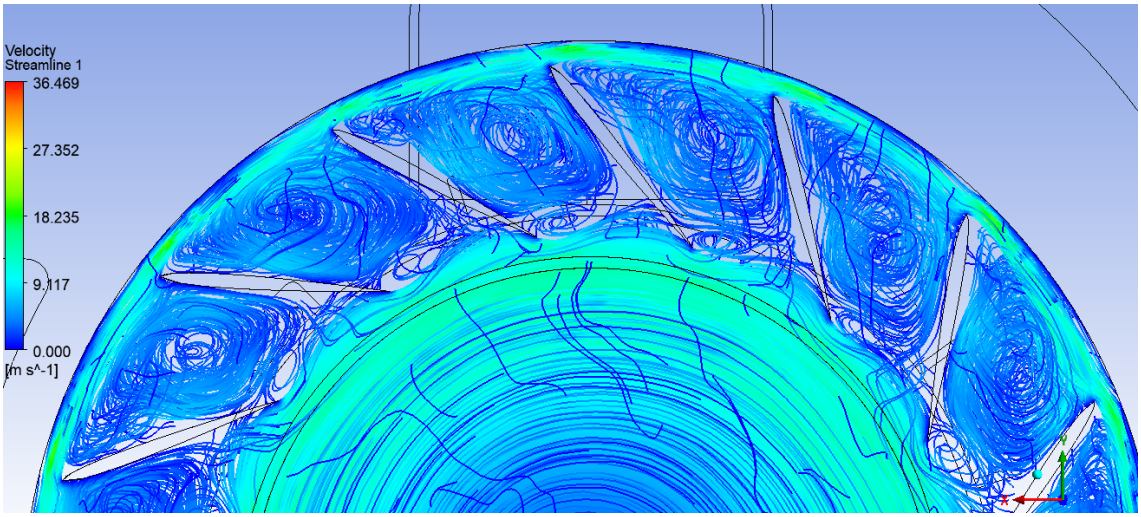
Sonuçları incelenen bir diğer fan tasarımı NACA 0006 aerodinamik kanat yapısı kullanılan fandır. Analizde ilk olarak akış çizgileri incelenmiştir (Şekil 4.19). Akış çizgilerinin başlangıç noktası giriş olarak belirlenmiştir. Giriş kısmında 25 m/s hız değeri ile giren havanın çarka girdikten sonra çok fazla hız kaybetmediği görülmektedir (Şekil 4.19a). Akış çizgileri fanın üst görünümünden incelendiğinde sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fan tasarımına göre hava çıkış hızının daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmaktadır (Şekil 4.19b).



(a) (b)

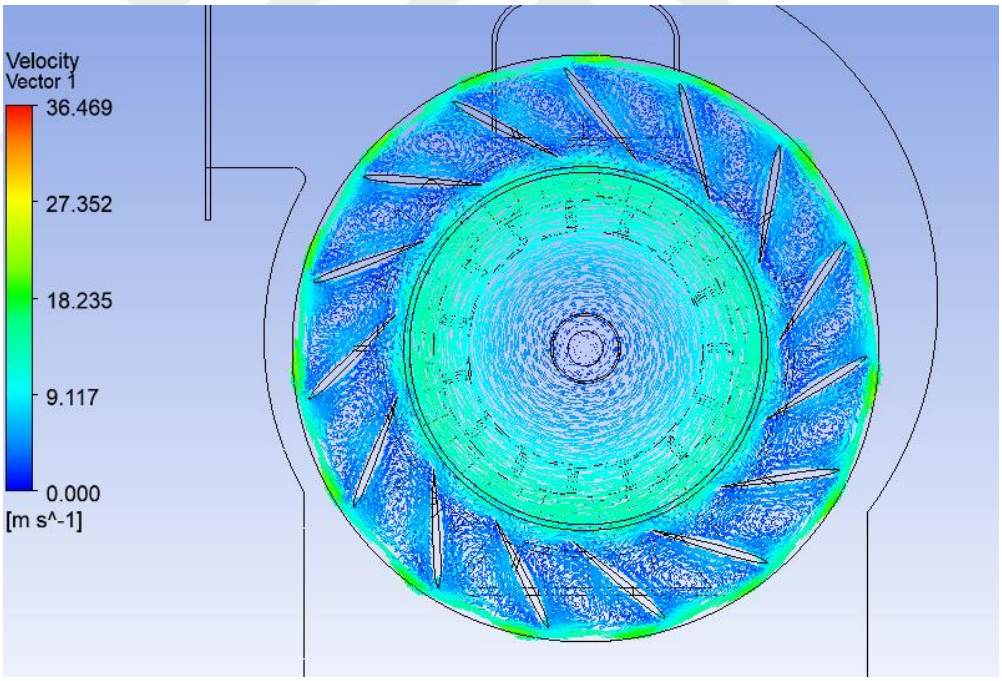
Şekil 4.19. Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı; (a)Yan görünüm (b) Üst görünüm

Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri Şekil 4.20'de gösterilmektedir. Sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fan ile kıyaslandığında kanatlar arasında daha az akış ayrılmaları olduğu görülmektedir. Aynı yorum EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analiz için de yapılmıştır. Genel olarak kanatlar arasında, kanat diplerinde ve uçlarında oluşan hız değeri EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analiz ile benzerlik göstermektedir.



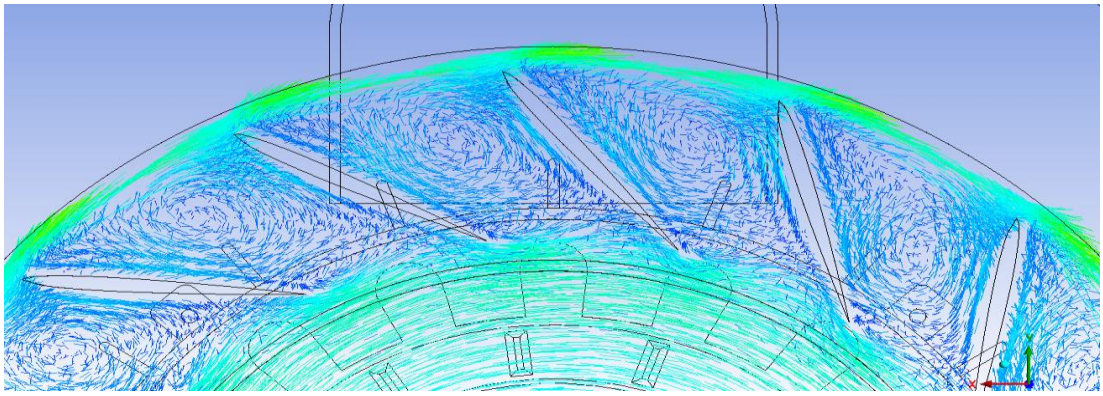
Şekil 4.20. Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri.

Havanın çark üzerinde oluşturduğu hız değeri incelendiğinde ise kanatlar arasında birbirine yakın değerlerin elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.21a). Sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fan tasarımında kanat yüzeyleri üzerinde daha fazla hız değişikliği oluştuğu, EPPLER 421 kanat yapısı kullanılan fan tasarımında ise kanatlar arasında aynı hız değerlerine ulaşıldığı belirtilmiş olsa da kanat uçlarında hızın 36 m/s değerine kadar ulaştığı sonucuna varılmıştır. NACA 0006 kanat yapısının kullanıldığı bu fan tasarımında ise EPPLER 421 kanat yapısında olduğu gibi kanatlar arasında yakın hız değeri oluşmaktayken farklı olarak bu analizde kanat uçlarında oluşan hız değeri çok daha düşüktür. Şekil 4.21b'de kanat etrafında oluşan hız vektörü görüntüsü yakından verilerek havanın kanatlar üzerindeki dağılımı gösterilmiştir. NACA 0006 kanat yapısının kullanıldığı fan tasarımının analizine göre kanatların alt ve üst yüzeyleri arasında aynı hız değerinin oluştuğu, kanat ucunda hızının yaklaşık 20 m/s olduğu görülmektedir.



(a)

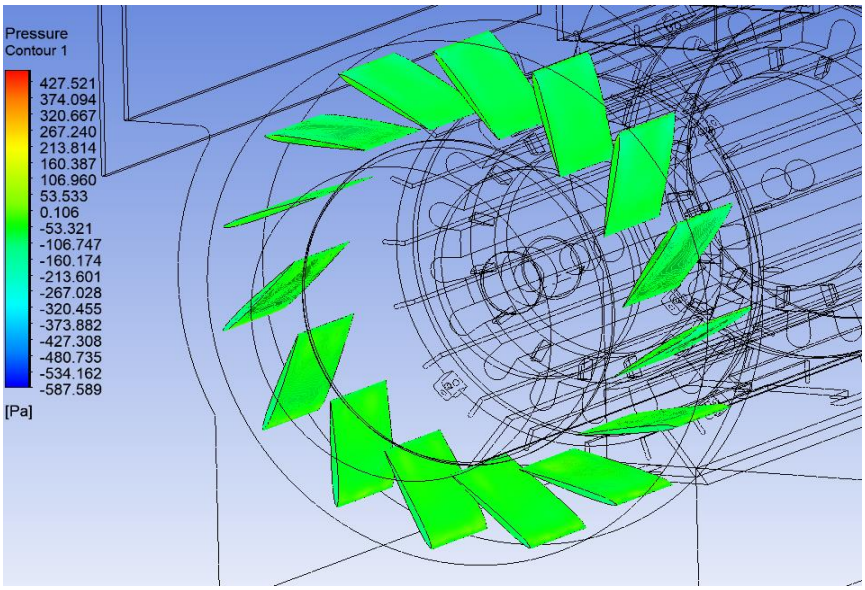
Şekil 4.21. Vektör çizgileri (a) Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri (b) Çark üzerinde oluşan vektör çizgilerinin yakın görüntüsü



(b)

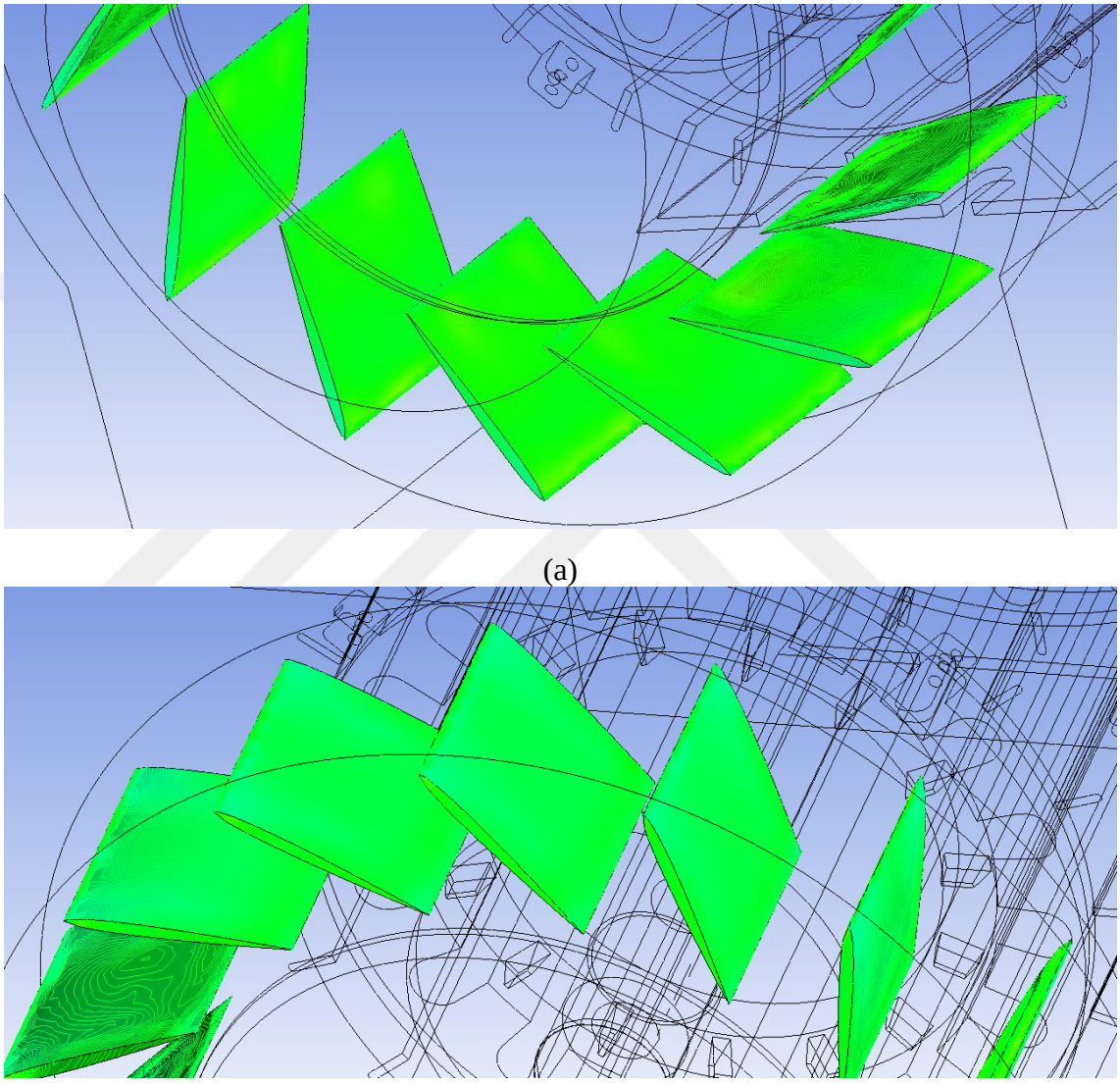
Şekil 4.21. Vektör çizgileri (a) Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri (b) Çark üzerinde oluşan vektör çizgilerinin yakın görüntüsü (devamı)

Şekil 4.22'de kanatlar üzerinde oluşan basınç değeri gösterilmektedir. Sabit kesitli kanat yapısının kullanıldığı fan tasarımında kanatların iç ve dış yüzeyinde farklı değerlerde basıncın elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. EPPLER 421 kanat yapısının kullanıldığı fan tasarımında ise genel olarak iç ve dış yüzeylerde aynı basınç değeri elde edilmiş olsa da kanadın uç kısmında daha düşük basınç oluştuğu sonucuna ulaşılmıştır. NACA 0006 kanat yapısının kullanıldığı fan tasarımını bahsi geçen iki analiz ile kıyaslandığında ise kanatların iç ve dış yüzeylerinde aynı basınç değerinin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.22. Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi.

Şekil 4.23a'da kanadın iç yüzeyinde oluşan basınç değeri gösterilmektedir. Basınç, kanat yüzeyi boyunca - 53 Pa değerini almaktadır. Kanatların dış yüzeyi incelendiğinde ise yine iç yüzeyi gibi aynı değeri aldığı ve yüzey boyunca – 53 Pa değerinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.23b).

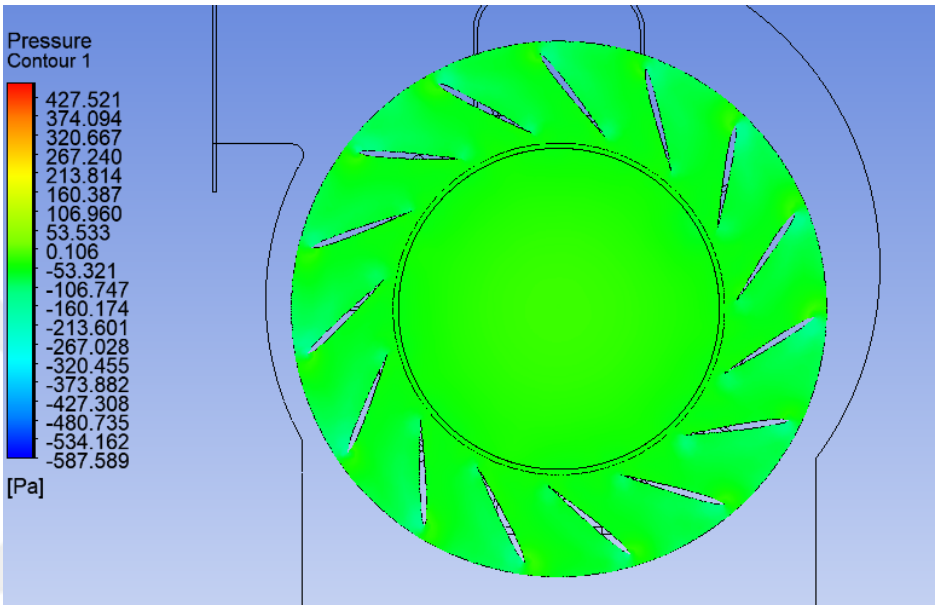


(a)

(b)

Şekil 4.23. Basınç dağılımı. (a) Kanadın iç yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi (b) Kanadın dış yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi

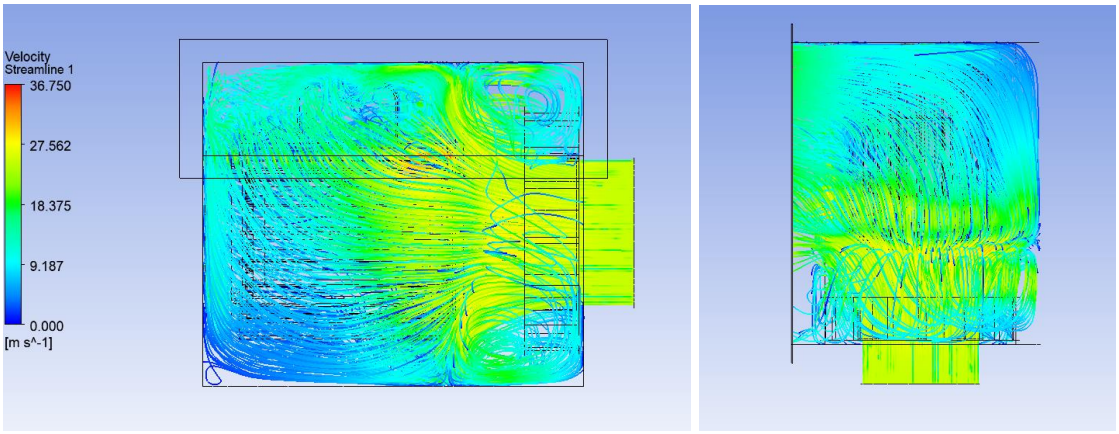
Şekil 4.24'de basıncın çark üzerinde oluşturduğu dağılım görülmektedir. Buradan da basıncın çark üzerinde aynı değere sahip olduğu görülmektedir. Kanat yüzeyleri arasında sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fanda olduğu gibi basınç farklılığı oluşmamıştır. EPPLER 421 kanat yapısına kıyasla hem daha yüksek basınç değeri elde edilmiş hem de kanatlar üzerinde basınç değişimi yaşanmamıştır.



Şekil 4.24. Çark üzerinde oluşan basınç değişimi.

4.5 NACA 0006 Aerodinamik Kanat Yapısı Ters Kullanılan Fan Analizi

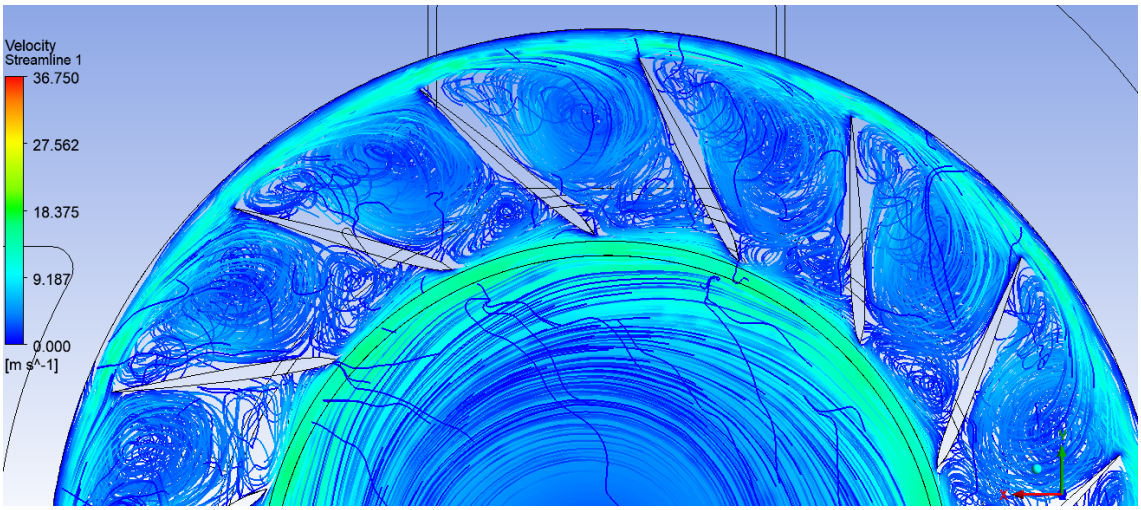
Analizi incelenen bir diğer fan NACA 0006 aerodinamik kanat yapısının ters olarak (firar kenarı çark dışına doğru) konumlandırıldığı fandır. Analizde ilk olarak akış çizgileri incelenmiştir (Şekil 4.25). Kanat yapısının ters olarak konumlandırılması, firar kenarı çarka doğru olan analizlere kıyasla akış çizgileri üzerinde net bir değişim oluşturmamıştır. 25 m/s ile giriş yapan hava, firar kenarı çarka doğru olan analizde olduğu gibi çarka girdikten sonra çok fazla hız kaybetmeden ilerlemektedir. Akış çizgileri fanın üst görünümünden incelendiğinde yine benzer sonuçların elde edildiği sonucuna ulaşılmaktadır (Şekil 4.25b).



(a) (b)

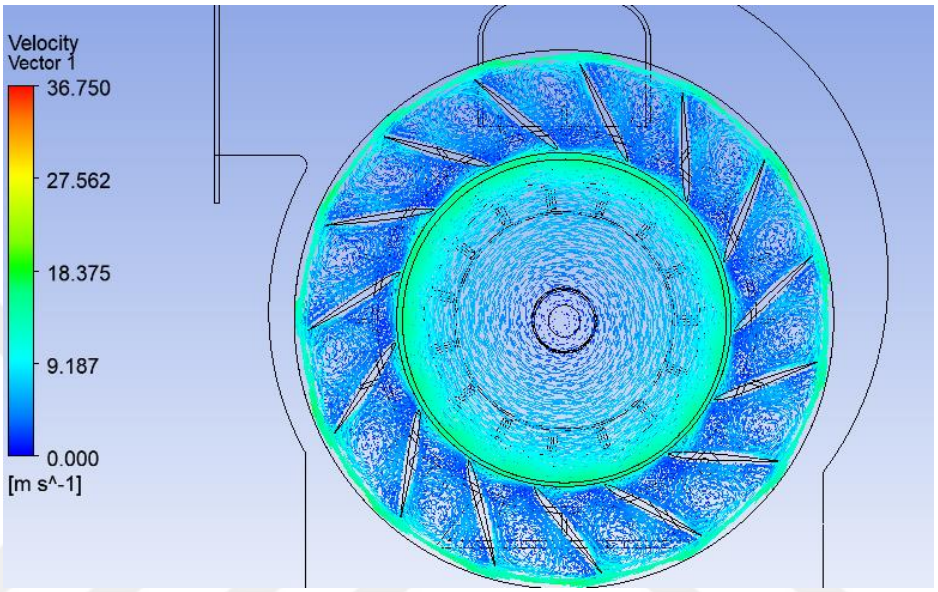
Şekil 4.25. Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı; (a)Yan görünüm (b) Üst görünüm

Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri Şekil 4.26'da gösterilmektedir. NACA 0006 kanat yapıları için firar kenarlarının çarka doğru konumlandırıldığı analiz ile kıyaslandığında elde edilen sayısal değerlerin birbiri ile yakınlık gösterdiği görülmektedir. Ancak, firar kenarının çark dışına doğru konumlandırıldığı analiz için kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri incelendiğinde kanatların firar kenarında türbülans oluştuğu görülmektedir.

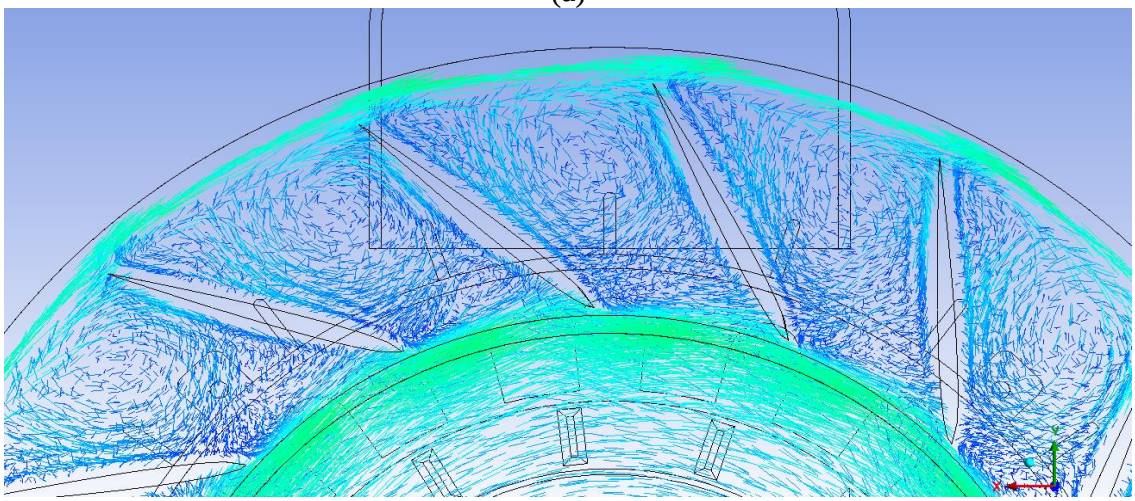


Şekil 4.26. Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri

Havanın çark üzerinde oluşturduğu hız değeri incelendiğinde ise kanatlar arasında benzer değerlerin elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.27a). Firar kenarı çarka doğru olan analiz ile kıyaslandığında sayısal değerler birbiri ile yakınlık göstermektedir. Şekil 4.27b'de kanatlar etrafında oluşan hız vektörü görüntüsü yakından verilerek havanın kanatlar üzerindeki dağılımı gösterilmiştir.



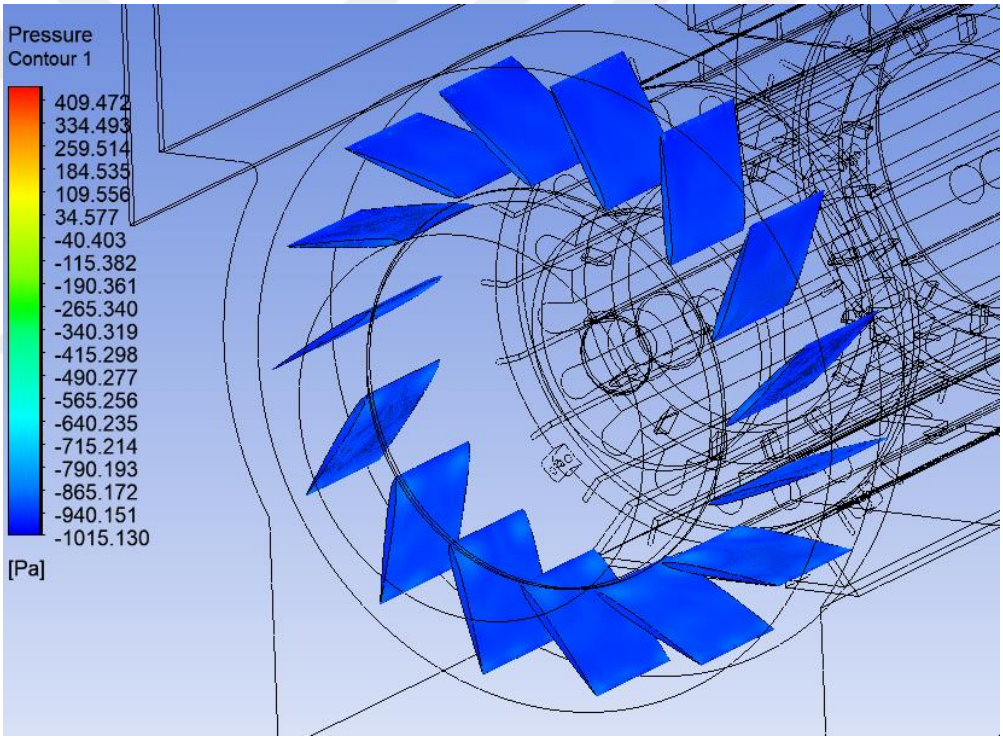
(a)



(b)

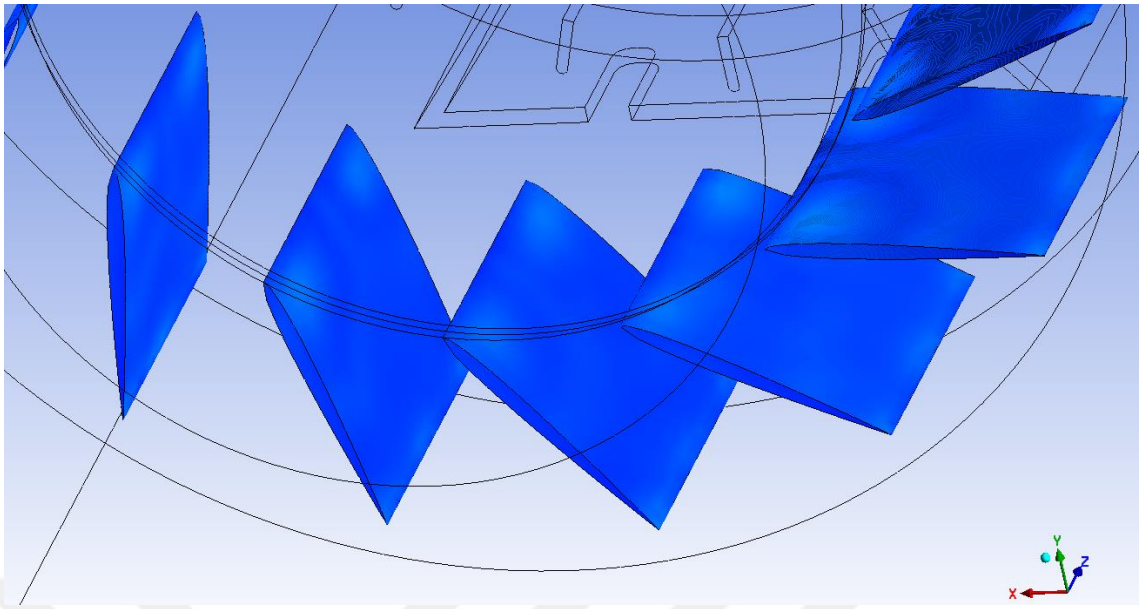
Şekil 4.27. Vektör çizgileri (a) Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri (b) Çark üzerinde oluşan vektör çizgilerinin yakın görüntüsü

Şekil 4.28'de kanatlar üzerinde oluşan basınç değeri görülmektedir. Sabit kesitli kanat yapısının kullanıldığı fanda kanat yüzeyleri arasında farklı, EPPLER 421 kanat yapısının kullanıldığı fanda kanat yüzeylerinin genel olarak aynı basınçta ancak uç kısımda basıncın azaldığı ve NACA 0006 kanat yapısı kullanılan fanda kanadın tüm yüzeylerinde aynı basınç değerinin elde edildiği sonucu elde edilmiştir. NACA 0006 kanat yapısının ters olarak konumlandırıldığı bu fan tasarımının sonucunda da yine firar kenarı çarka doğru olan analizde olduğu gibi kanat yüzeyleri arasında aynı basınç değerinin elde edildiği görülmektedir. Ancak, kanat yapısı ters olarak konumlandırıldığında elde edilen basınç değeri burada - 940 Pa olarak görülmektedir.

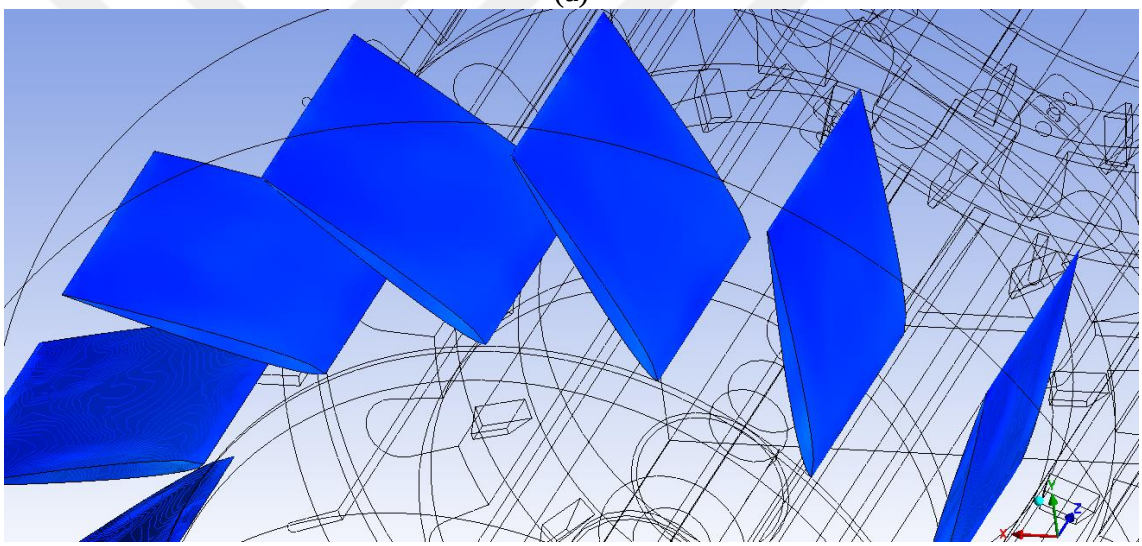


Şekil 4.28. Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi

Şekil 4.29a'da kanadın iç yüzeyinde oluşan basınç değeri gösterilmektedir. Basınç, kanat yüzeyi boyunca – 940 Pa değerini almaktadır. Kanadın dış yüzeyi incelendiğinde ise iç yüzeyinde olduğu gibi tüm yüzeyinde aynı değeri aldığı görülmektedir (Şekil 4.29b).



(a)

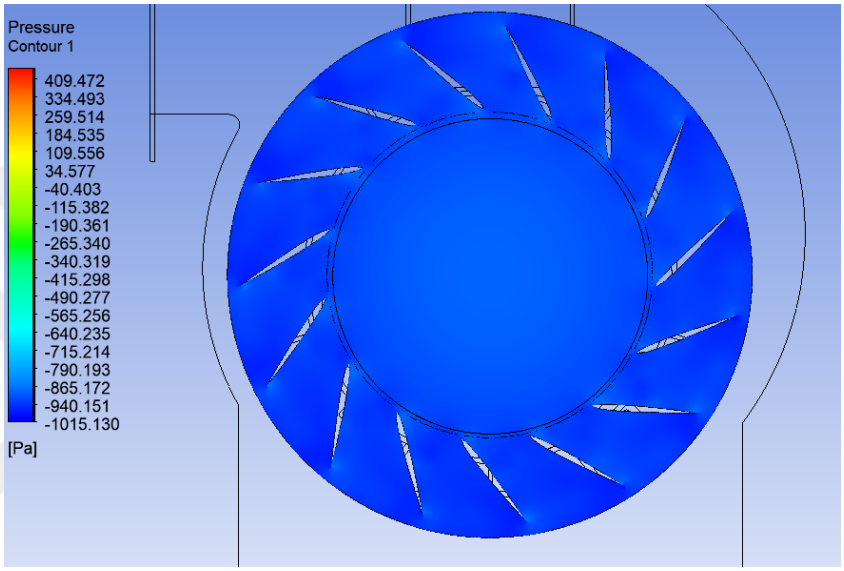


(b)

Şekil 4.29. Basınç dağılımı (a) Kanadın iç yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi (b) Kanadın dış yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi

Şekil 4.30'da basıncın çark üzerinde oluşturduğu dağılım görülmektedir. Buradan basıncın çark üzerinde aynı değere sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Kanat yüzeyleri arasında sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fanda olduğu gibi basınç farklılığı oluşmamıştır.

EPPLER 421 kanat yapısı 60° açı ile konumlandırılan fan tasarımının analizi ile kıyaslandığında NACA 0006 kanat yapılarının ters olarak konumlandırılması ile daha düşük ve farklılık göstermeyen basınç değeri elde edilmiştir. NACA 0006 kanat yapısının firar kenarının çark tarafına doğru konumlandırıldığı analiz ile kıyaslandığında ise basıncın – 53 Pa değerinden – 940 Pa değerine düştüğü sonucuna ulaşılmaktadır.

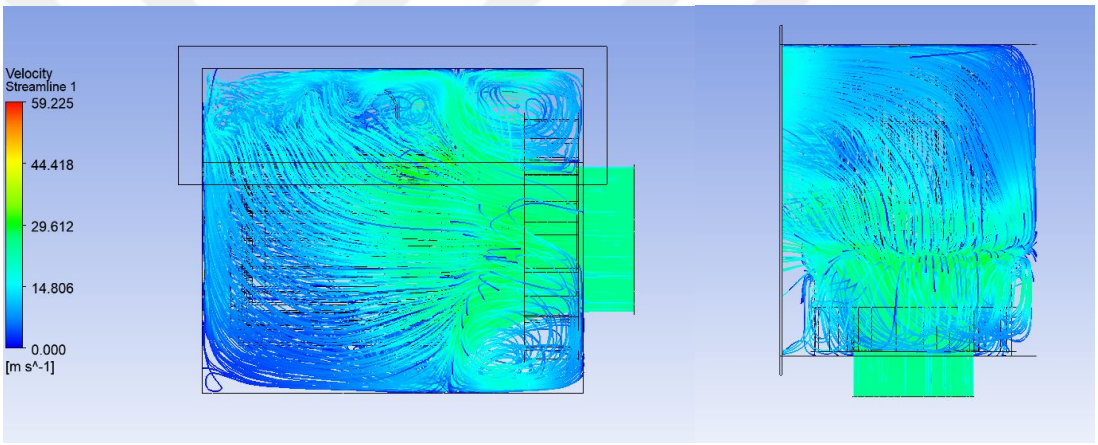


Şekil 4.30. Çark üzerinde oluşan basınç değişimi.

4.6 EPPLER 421 Aerodinamik Kanat Yapısı Ters Kullanılan Fan Analizi

Sonuçları incelenen bir diğer fan tasarımı ise EPPLER 421 aerodinamik kanat yapısının ters olarak (firar kenarı çark dışına doğru) kullanıldığı fandır. Kanadın firar kenarı çark dışına doğru konumlandırarak daha önce analizleri paylaşılmış olan EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analiz ile kıyaslanmıştır. Burada kıyaslama için EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analizin seçilme sebebi kanatların konumlandırıldığı pozisyonun aynı olmasıdır. Her iki analizde de kanatlar aynı açı değeri kadar yatay olarak konumlandırılmıştır. Sadece çark içerisinde kanatların firar kenarı yönü değiştirilmiştir.

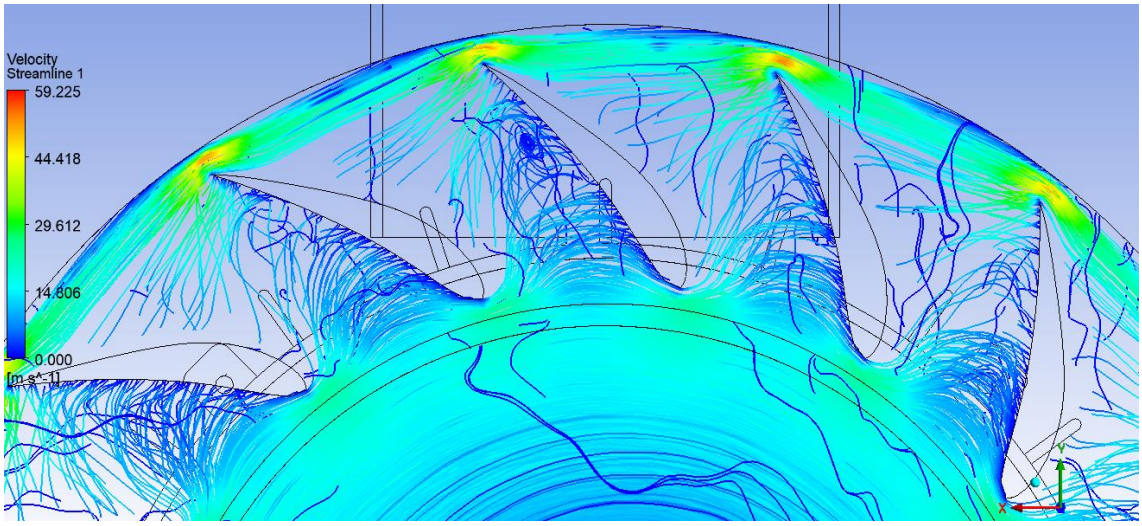
Akış çizgilerini Şekil 4.31'de görmüş olduğumuz analize göre hava, girişteki hızını çark sonrası da devam ettirmiştir. EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analiz ile kıyaslandığında kanatların ters olarak kullanılması ile yaklaşık olarak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Akış çizgileri fanın üst görünümünden incelendiğinde EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analize kıyasla fana giriş yapan havanın çıkış bölgesinde daha fazla hız kaybına uğradığı görülmektedir. EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analize göre fana giriş yapan hava, çıkış bölgesinde de nispeten giriş hızına yakın bir değer almıştır. EPPLER 421 kanat yapısının ters olarak konumlandırıldığı bu fan analizine göre havanın giriş ve çıkış değerleri arasında daha fazla bir farklılık değeri oluşmuştur (Şekil 4.31b).



(a) (b)

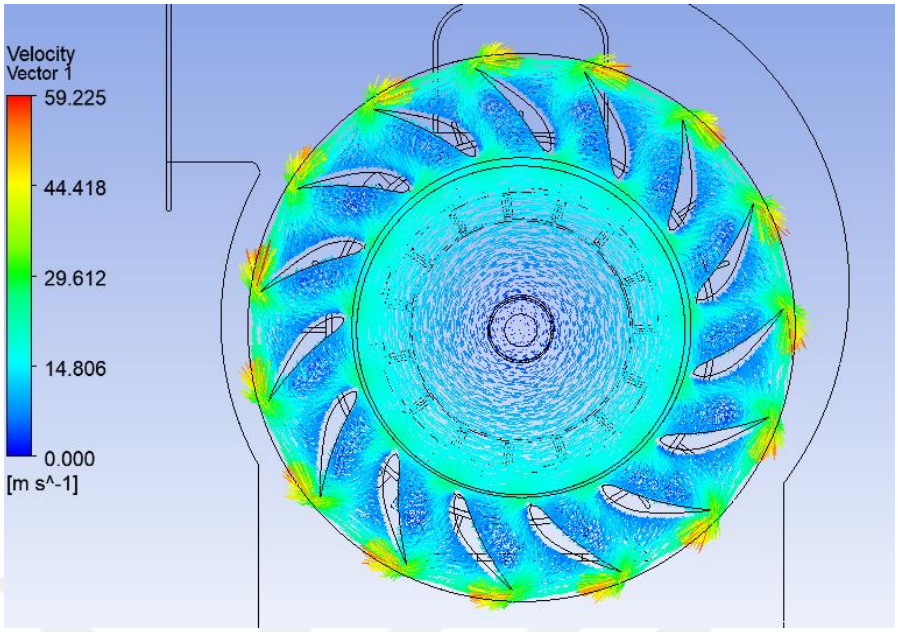
Şekil 4.31. Akış çizgilerinin fan içerisindeki dağılımı; (a)Yan görünüm (b) Üst görünüm

Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri Şekil 4.32'de gösterilmektedir. EPPLER 421 kanat yapılarının kullanıldığı analiz ile kıyaslandığında sonuçlar farklılık göstermektedir. Elde edilen sonuca göre hava, çark içerisinde kanatlar arasında varlık gösterememiş ve kanat yüzeyinde ayrılmalara uğramıştır.

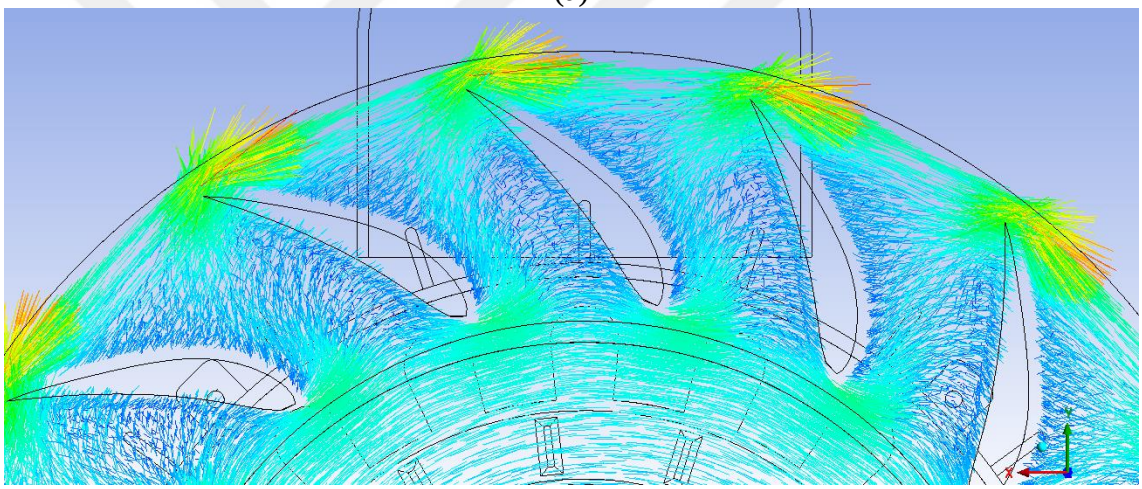


Şekil 4.32. Kanatlar etrafında oluşan akış çizgileri.

Şekil 4.33a ve Şekil 4.33b'de çark üzerinde oluşan hız incelendiğinde en yüksek değerin yine kanatların uç kısmında oluştuğu görülmektedir. Ancak, EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analize kıyasla kanatların uç kısmında oluşan hız değeri 36 m/s değerinden 59 m/s değerine kadar artış göstermiştir. Şekil 4.33b'de kanat etrafında oluşan hız vektörü görüntüsü yakından verilerek havanın kanatlar üzerindeki dağılımı gösterilmiştir. EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analiz de kanatlar arasında benzer hız değerlerinin oluştuğu sonucuna ulaşılmıştır. EPPLER 421 kanat yapılarının ters konumlandırıldığı bu analize göre ise kanatlar arasında aynı hız değerleri elde edilmemiştir. Kanatlar arasında hız değişmeleri meydana gelmiştir.



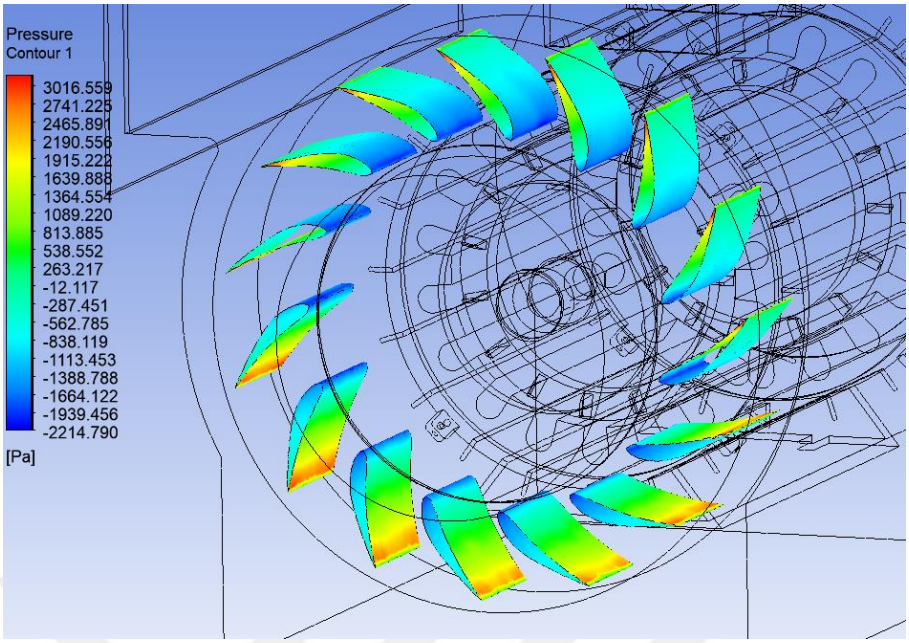
(a)



(b)

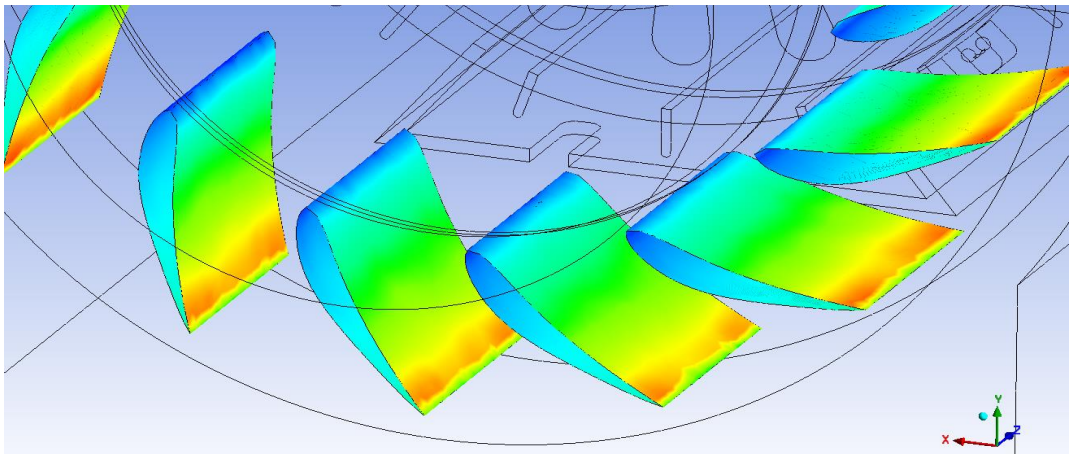
Şekil 4.33. Vektör çizgileri (a) Çark üzerinde oluşan vektör çizgileri (b) Çark üzerinde oluşan vektör çizgilerinin yakın görüntüsü

Şekil 4.34'den de görüldüğü üzere kanatların alt ve üst yüzeyleri arasında farklı basınçlar oluşmuştur. EPPLER 421 kanat yapısının 60° açı ile konumlandırıldığı analizde kanatların alt ve üst yüzeyleri arasında daha benzer basınçların oluştuğu sonucuna ulaşılmıştır. EPPLER 421 kanat yapılarının ters olarak kullanılması yüzeyler arasında basınç farklılığına neden olmuştur.



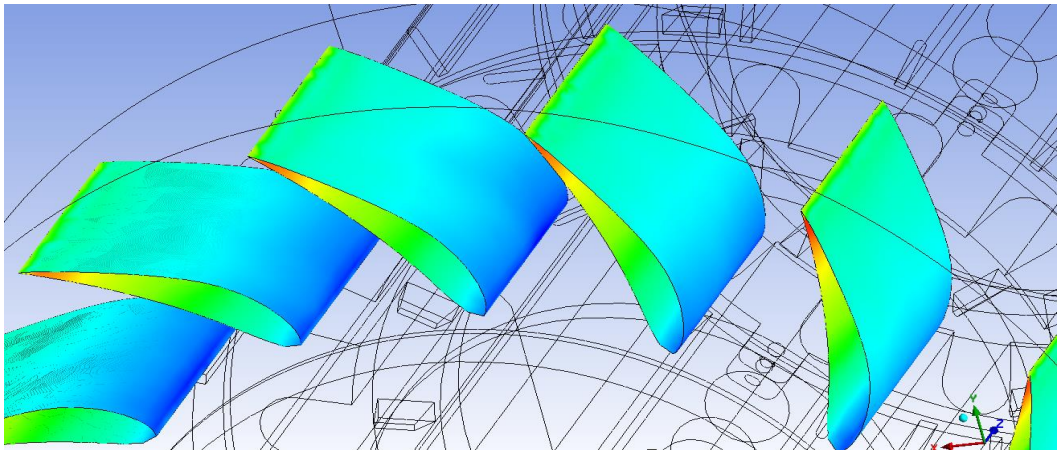
Şekil 4.34. Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerinin değişimi.

Şekil 4.35a'da kanadın iç yüzeyinde oluşan basınç farklılıkları gösterilmektedir. Kanadın iç yüzeyi incelendiğinde ise diplerde negatif olan basınç kanat ucuna doğru artış göstererek pozitif basınç değeri almıştır. Şekil 4.35b'de kanatların dış yüzeyinde oluşan basınç değerleri gösterilmektedir. Kanadın dış yüzeyinde iç yüzeyine göre daha az basınç farklılığı meydana gelmiştir.



(a)

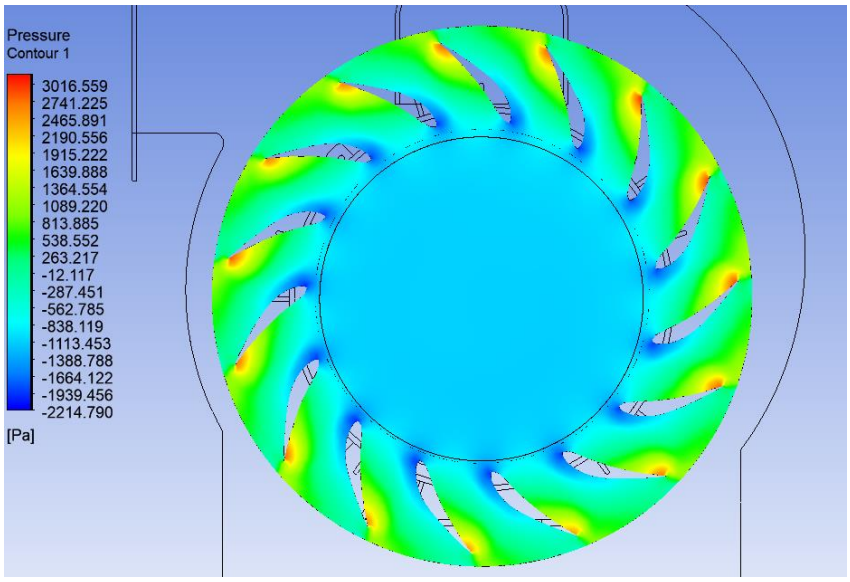
Şekil 4.35. Basınç dağılımı (a) Kanadın iç yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi (b) Kanadın dış yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi



(b)

Şekil 4.35. Basınç dağılımı (a) Kanadın iç yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi (b) Kanadın dış yüzeyi üzerinde oluşan basınç değişimi (devamı)

Şekil 4.36'de basıncın çark üzerinde oluşturduğu dağılım verilmektedir. Buradan da kanat yüzeyleri arasında oluşan basınç farklılıkları görülmektedir. Kanadın alt yüzeyi ve uç kısmında basınç en yüksek değerini alırken üst yüzeyin dip kısmında en düşük değerini almaktadır. Kanatlar üzerinde basınç -1939 Pa ile 2741 Pa arasında değişim göstermektedir. Bu basınç farkı ise tüm analizler arasında elde edilen en yüksek basınç farkıdır.



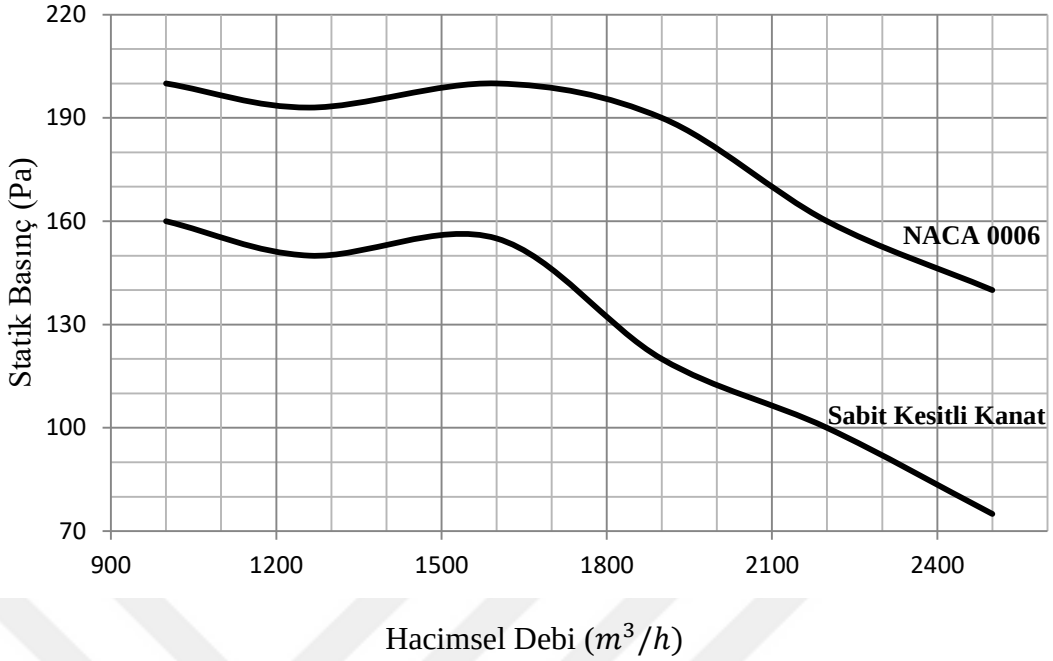
Şekil 4.36. Çark üzerinde oluşan basınç değişimi.

Çark içerisinde kullanılan kanat yapıları arasında oluşan akış çizgileri, kanatlar üzerinde oluşan hız ve basınç dağılımları incelendikten sonra analiz edilen debi değerinden elde edilen statik basınç değerleri de göz önüne alınarak sabit kesitli kanat kullanılan fan ile kıyaslanmak üzere fan seçimi yapılmıştır. Aerodinamik kanat yapısı kullanılan fan tasarımlarından elde edilen statik basınç değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Aerodinamik kanat yapısı kullanılan fanlarda elde edilen statik basınç değerleri.

Aerodinamik Kanat Yapısı Kullanılan Fanlar	Statik Basınç (Pa)
NACA 0006 / firar kenarı çark yönüne doğru	185
NACA 0006 / firar kenarı çark dışına doğru	193
EPPLER 421 / firar kenarı çark yönüne doğru / 60° açı	200
EPPLER 421 / firar kenarı çark yönüne doğru / 15° açı	130
EPPLER 421 / firar kenarı çark dışına doğru	188

Sonuçlar doğrultusunda kanatlar üzerinde basınç farklılığı oluşmaması, türbülanslı akışın diğerlerine kıyasla az oluşması, kanat uçlarında yine diğerlerine kıyasla daha düşük hız değeri elde edildiği ve aynı debi değerinde diğer fanlara kıyasla daha yüksek statik basınç değeri elde edilebildiği için NACA 0006 kanadın firar kenarının çark dışına doğru kullanıldığı fan tasarımı tercih edilmiş ve sabit kesitli kanat yapısı kullanılan fan ile performans eğrileri kıyaslanmıştır. Fanların karakteristik eğrilerini elde edebilmek için sabit kesitli kanat ve NACA 0006 kanat yapısı kullanılan fanların farklı debi değerleri altındaki sonuçları incelendiğinde Şekil 4.37'den görülebileceği üzere fan sisteminde NACA 0006 aerodinamik kanat kullanılması ile aynı debi değerleri için daha yüksek statik basınç değerlerinin elde edilebildiği görülmektedir.



Şekil 4.37. Fanlara ait karakteristik eğriler.

5. SONUÇ

Bu çalışmada altı farklı radyal fan tasarımı oluşturularak çark içerisinde kullanılan kanat yapılarının ve pozisyonlarının sonuca olan etkisi incelenmiştir. Teorik hesaplamalarda çark çıkışındaki akışkan hızının yüksek olmasının iyi olduğu ancak akışkanın bu yüksek hız sebebiyle sahip olduğu kinetik enerji kanatlar arasında tekrar potansiyel enerjiye dönüştürüleceği zaman yani statik basınç elde edilirken bu hızın önemli kayıplara sebep olduğu açıklanmıştır. Bu da fan veriminin düşmesine sebep olacaktır. Mevcut çark çıkışındaki hız değerinin küçültülmesi kayıpların azalmasını sağlayacağından seçilecek olan fanın kanat çıkışlarındaki hızının düşük olması verim üzerinde olumlu bir etki yaratacaktır. Ayrıca kanat uçlarında yüksek hız değerinin oluşması fanda meydana gelen gürültü seviyesini artıracak bir durumdur. Bu sebepten giriş hava hız değerinin fan içerisinde artış göstermesi istenmez. Bu bilgiler doğrultusunda fan analizlerinden elde edilen sonuçları yorumlanmış ve uygun fan seçimi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

- NACA 0006 kanat yapısı için firar kenarının çark dışına doğru yerleştirilmesi ile elde edilen statik basınç değeri yaklaşık olarak %5 artış gösterdiği,
- NACA 0006 kanat profili için firar kenarının çark dışına doğru yerleştirilmesi statik basınç değerinde artışa sebep olmuşken EPPLER 421 kanat profilinde firar kenarının çark dışına doğru yerleştirilmesi statik basıncın %6 azalmasına neden olduğu,
- Aerodinamik kanat profillerinin firar kenarı yönlerine göre farklı şekillerde yerleştirilmesinin sonuca olan etkisi incelendikten sonra ayrıca görülmüştür ki çark içerisinde NACA 0006 aerodinamik kanat profilinin kullanılması ile fan sisteminden elde edilebilecek statik basınç değerinde yaklaşık %29 artış sağlanabildiği

görülmektedir.

Tüm bu işlemler sonrası tasarımda NACA 0006 aerodinamik kanat profilinin firar kenarı çark dışına doğru yerleştirilerek kullanılması tavsiye edilmektedir.

Bundan sonraki çalışmalar için tavsiyeler:

- İncelenen kanat profilleri arasından en uygun bulunan kanat profili ile 3D prototip hazırlanarak deneysel çalışma yapılarak sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Fan sisteminden elde edilen statik basınç değeri, gürültü seviyesi ve enerji tüketimi deneysel ölçüm ile ölçülebilir.

KAYNAKLAR

Aironn Havalandırma. (2018). *Ürün Katalogları*. No:1 İstanbul: Aıronn Teknik Yayınlar.

Akköse, K.Ş. (2010). *Biomimetrik Fan Tasarımı*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ateş, Ö.K. Selver, R. (2020). Bir endüstriyel fan tasarımı ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analizi. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 348-363.

DOI:10.18185/erzifbed.615015

Balje, O. E. (1981). *Turbomachines*. New York: John Wiley & Sons.

Behzadmehr, A. Mercadier, Y. Galanis, N. (2006). Sensitivity analysis ofentrance design parameters of a backward inclined centrifugal fanusing doe method and CFD calculations. *American Society of Mechanical Engineers*, Vol.128, 446-454.

https://doi.org/10.1115/1.2173293

Bilge, M. (2010). Klima santralleri. *ISKAV Teknik Kitaplar Dizisi*. pp. 146. ISBN: 978-605-61333-0-5.

Bilgili, M. Şimşek, E. Polat, Y. Yaşar, A. (2005). *Havalandırma sistemleri*. Adana: Adana Meslek Yüksekokulu Yayınları No:1

Bleier, F.P. (1985). *Fan handbook of energy system enginerring*. New York: Wiley.

Bleier, F.P. (1998). *Fan handbook selection, application and design.* New York: Wiley.

Bruno, E. (1972). *Fans, design and operation of centrifugal, axial flow and cross flow fans*. Oxford: Pergamon Press.

Bulgurcu, H. (2015). *Havalandırma tekniği*, Bölüm 4: Fanlar, Bölüm 4 sy: 94-141.

Canbazoğlu, S. (2020). Fan Mühendisliği I, İstanbul: Aıronn Teknik Yayınlar, No:1

ISBN:978-975-6263-41-9

Cherdıeu, P. ve ark. (2013). *Analysis of unsteaadinesses in a vaned diffuser of centrifugal machinery*. 21emme Congres Français de Mecanique.

Church, A.H. (1947). *Centrifugal pumps and blowers*. New York: John Wiley & Sons, 308 page.

Cory, W.T. (2005). *Fans and ventilation*. Elsevier Science; 1st edition.

Çakmanus, İ. (2009). *Endüstriyel fanlar tasarım, imalat ve enerji verimliliği, türk tesisat mühendisleri derneği* (TTMD), Teknik Yayın No:23, Doğa Yayıncılık, 1. Baskı.

Çengel, Y. Cimbala, J.M. (2015). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, III: Baskı, Çeviri Editörü: Engin T. Editör Yardımcıları: Güneş, H. Canbazoğlu, S. Özalp, A. Çeşmeci, Ş. Ankara: Palme Yayıncılık.

Denton, J. D. (1993). *Loss Mechanisms in Turbo Machines*. England: Journal of Turbomachinery. Transactions of the ASME. Volume 115, 40.

Develi, S.D. Sönmez, O. (2019). Eksenel Çıkışlı Radyal Fan Tasarımı, 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan, İzmir.

Eck, B. (1973). *Fans design and operation of centrifugal, axial flow and cross flow fans*. New York: Pergamon Press. 1st English.

Gammack, P.D. ve ark. (2012). *Bladeless Fans*, United States Patent, Dyson Technology Limited, Malmesbury, Wiltshire (GB), Patent Application Publication, Patent No: US 8308445 B2. Date of Patent: Nov.13.

Genç, M.S. (2004). Düz flaplı NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik performansının incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*. 28, 1, 1-8, 2008. ISSN 1300-3615.

Gökelim, A. (1983). *Endüstriyel fan ve kompresör tesisleri-vantilatör ve kompresörler*. İstanbul: Birsen Yayınları. Genişletilmiş 2. Baskı.

Jafari, M. ve ark. (2015). Numerical aerodynamic evaluation and noise ınvestigation of a bladeless fan. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. Vol:8, No:1, Pages:133-142.

Jafari, M. ve ark. (2016). Numerical ınvestigation of geometric parameter effects on the aerodynamic performance of a bladeless fan. *Alexandria Engineering Journal*. Open Access. Volume:55. Issue:1. Pages: 223-233. March.

Jafari, M. ve ark. (2016). Experimental and numerical ınvestigation of a 60 cm diameter bladeless fan. *Journal of a Applied Fluid Mechanics*. Vol:9. No:2. Pages: 935-944.

Jung, U.H. ve ark. (2015). Optimum design of diffuser in a small high speed centrifugal fan using cfd and doe. *Journal of Mechanical Science and Technology*.30(3) 1171-1184

Karagöz, İ. Kaya, F. (2007). Girdaplı akışlarda türbülans modellerinin uygunluğunun incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakülte Dergisi*. Cilt: 12, Sayı:1.

Klemm, T. Gabi, M. (2003). Using PIV and CFD to investigate the effect ofcasing design on cross flow fan performance, *The 4th Symposium on Flow Visualization and Image Processing*. Chamonix. France, 3-5 June.

Kovatz, A. Desmur, G. (1958). *Pumps, fans and compressors*. New York: Blackie & Son Ltd. 327p.

Kuru, F. Kumlutaş, D. Özer, Ö. Karadeniz, Z. (2013). Bir santrifüj fanın çıkış ağzı üfleme karakteristiğinin sayısal olarak incelenmesi. *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*. sy: 495-503.

Li, H. (2009). Fluid Flow analysis of a single stage centrifugal fan with a ported diffuser. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 3:2, 147-163.

Madhwes, N. ve ark. (2015). Influence of number of ımpeller and diffuser blades on the pressure recovery of centrifugal fan. *Ijret: International Journal of Research in Engineering and Technology.* eISSN: 2319-1163. Volume: 04 Issue: 09. 246 – 250.

Mansson, L.C. Larsen, S.H. (2014). *Flow characteristics of dyson air multipler*. University of Southern Denmark. Technical Faculty. December 7.

Matkap, Ü. (2006). *Eş eksenli kanal tipi radyal vantilatör tasarımı ve geliştirilmesi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Meakhaıl, T. Park, S.O. (2005). A *study of ımpeller diffuser volute ınteraction in a centrifugal fan*. Advanced Institute of Science and Technology. 305-701. Korea.

DOI: 10.1115/1.1812318

Mullen, B. Bhaskaran, R. (2015). Flow over an airfoil. Erişim adresi: https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/Flow+over+an+Airfoil+-+Geometry

Myles, D. J. (1969). An analysis of ımpeller and volute losses in centrifugal fans. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.*

https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1969_184_022_02

Özer, M. (2020). *Fan kanunları ve güç uygulamaları*, Teknik Bülten Yayınları, Sayı: 17

Polat, A. (2017). *Havalandırma ve iklimlendirme tesisatı*, Mekanik Tesisat Mühendisliği Temel Bilgilendirme Seminerleri. İzmir: TMMOB Makine Mühendisleri Odası. 29 Nisan 2017.

Railio, J. Makinen, P. (2007). Specific fan power, a tool for better performance of air handling systems. Wllbeing Indoors (10-14 June Helsinki). pp 6.

Roache, P. J. (1997). Quantification of uncertainty in computational fluid Dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*. Volume 29, pp. 123-160, 36p. New Mexico.

Sharma, N.Y. Karanth, K.V. (2009). Numerical analysis of a centrifugal fan for ımproved performance using splitter vanes. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering.* Volume:13. 63 -71. Print ISSN: 1790-5087.

Stepanoff, A. J. Haltmeier, A. (1957). *Radial und Axialpumpen*. Berlin: Springer. 401p.

Stodola, A. (1945). Steam and gas turbines. New York: Peter Smith Publications. 1356p

Şentürk, U. Aktokka, S. Toksoy, M. (2016). Havalandırmada enerji geri kazanımı: araştırma ve geliştirme. *Tesisat Mühendisliği*, Sayı: 53, sy: 61-85.

Teknik Bülten (2007). Fanlar: Özellikleri ve analiz. Sayı:24. Aralık.

Türkoğlu, H. (2010). Fan verimi, Makine Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi.

Uralcan, İ. Y. Bilge, M. (2003). Klima tesisatı. TMMOB, Yayın No:MMO/2003/296-3, İstanbul.

Valentine, J. Decker, R. (1995). Tracking of raindrops flow over an airfoil, *Journal of Aircraft*, Vol:32, N:1.

Vibhakar, N. N. (2012). *Studies on radial tıpped centrifugal fan*. (Yayınlanmamış doktora tezi). Veer Narmad South Gujarat Universiy. Faculty of Engineering Including Technology. Hindistan.

Yükselen, M.A. (2011). Kanat profillerinin aerodinamiği. UCK 351 Aerodinamik Ders Notları