



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**FARKLI PARAMETRELERE SAHİP GERİYE EĞİK KANATLI RADYAL
FANIN DENEY TASARIMI YÖNTEMİ İLE VERİMLİLİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EDA DEMİRBAĞ

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ FUAT KOSANOĞLU

**YALOVA
HAZİRAN 2023**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

FARKLI PARAMETRELERE SAHİP GERİYE EĞİK KANATLI RADYAL
FANIN DENEY TASARIMI YÖNTEMİ İLE VERİMLİLİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EDA DEMİRBAĞ
205109014

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ FUAT KOSANOĞLU

YALOVA
HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “FARKLI PARAMETRELERE SAHİP GERİYE EĞİK KANATLI RADYAL FANIN DENEY TASARIMI YÖNTEMİ İLE VERİMLİLİK ANALİZİ” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Eda DEMİRBAĞ



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Fuat KOSANOĞLU'na teşekkür ederim. Her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için aileme ve bu stresli günlerimde bana hep moral desteği veren eşim Özgün'e teşekkür ederim.

Haziran – 2023

Eda DEMİRBAĞ





İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Kanat Sayısının Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar	3
2.2. Kanat Eğimlerinin Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	4
2.3. Kanat Şeklinin Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar	5
2.4. Malzeme Değişkenliğinin Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	8
2.5. Kanat ve Pervane En-Boy Oranının Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar	9
2.6. Güç Değişimine Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar	11
2.7. Salyangoz Gövdenin Tasarım Parametrelerinin Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar	11
2.8. Fan Verimliliğini Etkileyen Diğer Parametrelerin Bulunması Üzerine Yapılan Çalışmalar	11
2.9. Deney Tasarımı Yöntemi Kullanılarak Fan Verimliliği Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	12
3. FAN ÇEŞİTLERİ.....	16
3.1. Eksenel Fanlar	16
3.1.1. Pervane tipi kanatlı eksenel fanlar	16
3.1.2. Tüp kanatlı eksenel fanlar	17
3.1.3. Yönlendirici kanatlı eksenel fanlar	17
3.2. Dik Akımlı Fanlar	17
3.3. Radyal Fanlar	18
3.3.1. Düz kanatlı radyal fanlar.....	19
3.3.2. Öne eğik kanatlı radyal fanlar.....	20
3.3.3. Geriye eğik kanatlı radyal fanlar	21

3.4. Temel Kavramlar	22
3.5. Fan Verimliliğine Etki Eden Parametreler	23
3.5.1. Fan kanunları	23
3.5.2. Radyal fan parametreleri	25
3.5.3. Salyangoz gövde parametreleri	30
3.6. Geriye Eğik Kanatlı Pervaneli Fanların Performans Karakteristikleri	31
4. METODOLOJİ	32
4.1. Deney Tasarımı	32
4.2. Taguchi Metodu	33
4.2.1. Ortogonal dizi	34
4.2.2. S/N oranı	35
4.2.3. ANOVA (Varyans) analizi	36
5. UYGULAMA	37
5.1 Deney Tasarım Adımlarının Uygulanması	37
5.1.1. Problem tanımı	37
5.1.2. Deney amacının ve hipotezlerin belirlenmesi	37
5.1.3. Parametrelerin belirlenmesi	38
5.1.4. Deney sırasında verimliliği etkileyen parametrelerin belirlenmesi	38
5.1.5. Faktör ve seviyelerin belirlenmesi	38
5.1.6. Ortogonal dizi ile deney sayısının saptanması	43
5.1.7. Deney düzeneğinin hazırlanması ve yapılması	43
5.1.8. Deney verilerinin toplanması ve analiz edilmesi	48
5.1.9. Deney sonuçlanması	53
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	61



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

A	: Kesit alan (m^2)
Adj SS	: Kareler toplamı
Adj MS	: Ortalama karelerin toplamı
B	: Salyangoz fan gövde kalınlığı (mm)
b	: Kanat kalınlığı (mm)
b_1	: Kanat giriş kalınlığı (mm)
b_2	: Kanat çıkış kalınlığı (mm)
β_1	: Kanat giriş açısı ($^\circ$)
β_2	: Kanat çıkış açısı ($^\circ$)
c	: Mutlak hız (m/s)
c_m	: Mutlak hızın meridyenel bileşeni (m/s)
c_u	: Mutlak hızın teğetsel bileşeni (m/s)
c_2	: Kanat çıkışındaki teorik mutlak hız (m/s)
c_{2u}	: Kanat çıkışındaki teorik mutlak hızın teğetsel bileşeni (m/s)
c_{1m}	: Kanat girişindeki mutlak hızın meridyenel bileşeni (m/s)
c_{2m}	: Kanat çıkışındaki mutlak hızın meridyenel bileşeni (m/s)
C_s	: Havanın giriş(emme) hızı (m/s)
C_{om}	: Ortalama meridyenel hız (m/s)
D	: Pervane çapı (mm)
DF	: Toplam serbestlik derecesi
D_s	: Fan giriş çap (mm)
D_1	: Pervanenin iç çapı (mm)
D_2	: Pervanenin dış çapı (mm)
F_{value}	: İstatistik Test
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
H	: Basma yüksekliği (Pa)
HP_1	: Fanın gücü (kW)
k	: Kanat sayısı hesabında kullanılan Pfeleiderer sabiti
k_1	: Pervane girişinde daralma etkisini düzeltme faktörü,
k_2	: Pervane çıkışında daralma etkisini düzeltme faktörü,
L	: Kanat uzunluğu (mm)
N	: Fanın devir sayısı (dev/dak)
Q	: Fanın hava debisi (m^3/s)
Q'	: Pervanenin içindeki debi (m^3/s)
P	: Güç (kW)
Pa	: Basınç
P_{value}	: İstatistiksel test
P_{st}	: Fanın statik basıncı (Pa)
P_{st1}	: Fanın girişindeki statik basınç (Pa)
P_{st2}	: Fanın çıkışındaki statik basınç (Pa)
P_{t1}	: Fanın girişindeki toplam basınç (Pa)
P_{t2}	: Fanın çıkışındaki toplam basınç (Pa)
r_{dil}	: Salyangoz fan dil yarıçapı (mm)
S_e	: Pervane mili ve salyangoz gövde arasındaki boşluk (mm)
T	: Pervane kanat genişliği (mm)

u	: Döner pervanedeki çevresel hız (m/s)
u_1	: Pervane girişinde çevresel hız (m/s)
u_2	: Pervane çıkışında çevresel hız (m/s)
w	: Döner pervanedeki bağıl hızı (m/s)
w_1	: Pervane girişindeki bağıl hızı (m/s)
w_2	: Pervane çıkışındaki bağıl hızı (m/s)
w_m	: Bağıl hızın meridyenel birleşeni (m/s)
w_u	: Bağıl hızın teğetsel birleşeni (m/s)
v	: Akışkanın hızı (m/s)
v_u	: Çevresel hızın teğetsel bileşeni (m/s)
Z	: Pervanenin kanat sayısı
ΔP_d	: İki nokta arasındaki dinamik basınç değişimi (Pa)
ΔP_{st}	: İki nokta arasındaki statik basınç değişimi (Pa)
ΔP_t	: Fanın giriş ve çıkışı arasındaki toplam basınç değişimi (Pa)
ΔP_z	: İki nokta arasında yükseklik nedeniyle oluşan basınç değişimi (Pa)
ΔQ	: Kaçak debi (m^3/s)
α	: Salyangoz fan dil açısı ($^\circ$)
ε	: Pleiderer akış sayısı
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
μ	: Verim
η_v	: Volümetrik verim
π	: Pi sabiti

ALT İNDİSLER

1,2	: Kanat girişi, kanat çıkışı
st	: Statik
d	: Dinamik
t	: Toplam
m	: Meridyenel
u	: Teğetsel

KISALTMALAR

AMCA	: Air Movement and Control Association
ANSI	: American National Standards Institute
ANSYS	: Swanson Analysis Systems
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CNC	: Computer Numerical Control
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
RPM	: Revolutions Per Minute
HAVAGH	: Hava Giriş Hızı



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Örnek Taguchi $L_4(2)^2$ ortogonal dizisi.....	35
Tablo 4.2. Örnek anova analizi tablo içeriği.....	36
Tablo 5.1. İmalatı yapılan pervaneler	39
Tablo 5.2. Taguchi $L_{16}(4)^3$ ortogonal dizisi.....	43
Tablo 5.3. Deneylerde kullanılan salyangoz fana ait teknik resim ölçüleri	46
Tablo 5.4. Taguchi ortogonal dizayn $L_{16}(4)^3$ deney sonuçlarının Minitab programına girilmesi.....	47
Tablo 5.5. Taguchi ortogonal dizayn $L_{16}(4)^3$ modelinde S/N ve ortalamaların Minitab programı ile elde edilmesi	48
Tablo 5.6. S/N oranları sonuç tablosu.....	49
Tablo 5.7. Ortalama değerler için sonuç tablosu.....	49
Tablo 5.8. Varyans analizi sonuçları.....	51
Tablo 5.9. Model özet tablosu.....	52
Tablo 5.10. Modelin tahmin sonuçları	52



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Farklı kanat giriş açısına sahip pervaneler: a:0°; b:16,5° ve c:26,5°	5
Şekil 2.2. Oluşturulan profillerin karşılaştırılması	6
Şekil 2.3. Kanat profilinin optimizasyonlardan önceki ve sonraki karşılaştırması	6
Şekil 2.4. Eğimli kanatlara sahip tasarlanan pervaneler	7
Şekil 2.5. Tasarlanan farklı kanat şekilleri	8
Şekil 2.6. Test edilen pervaneler	9
Şekil 2.7. 4000 rpm'de 0.38, 0.5 ve 0.69 çap oranları için performans eğrisi.....	10
Şekil 3.1. Eksenel fan ana elemanları	16
Şekil 3.2. İki kademeli eksenel akışlı fanlar	17
Şekil 3.3. Çapraz akışlı fan içindeki hava akışı	18
Şekil 3.4. Radyal fan parçaları	19
Şekil 3.5. Radyal kanatlı fan grubunda çıkış hız üçgen açıları	20
Şekil 3.6. Düz kanatlı radyal pervane çıkış açısı(β_2)	20
Şekil 3.7. Öne eğik kanatlı fan grubunda çıkış hız üçgen açıları	21
Şekil 3.8. Öne eğik kanatlı radyal pervane çıkış açısı(β_2)	21
Şekil 3.9. Geriye eğik kanatlı fan grubunda çıkış hız üçgen açıları.....	22
Şekil 3.10. Geriye eğik kanatlı radyal pervane çıkış açısı(β_2)	22
Şekil 3.11. Santrifüj vantilatörde kanattaki giriş ve çıkış hız üçgenleri.....	26
Şekil 3.12. Kanat açısı üçgeni.....	27
Şekil 3.13. Örnek geriye eğik pervane kanatları genişliği	29
Şekil 3.14. Salyangoz fan gövdesi teknik resim	30
Şekil 3.15. Geriye eğik kanatlı pervaneli fanların performans karakteristikleri	31
Şekil 5.1. Pervane gövde ve kanat çizimi	40
Şekil 5.2. Lazer kesim yapılan pervane plakaları	40
Şekil 5.3. Kanat genişliklerinin çizimi	41
Şekil 5.4. Lazer kesim yapılan kanat plakası	41
Şekil 5.5. Nokta-nokta kanat çizim metodu örneği.....	41
Şekil 5.6. Pervane kanatlarının istenilen eğimde büküm kalıbında bükülmesi ve yerleştirilmesi işlemi	42
Şekil 5.7. İmalatı biten pervanelerden örnekler	42
Şekil 5.8. Pervane tipi anemometre AS806	44
Şekil 5.9. Varyak.....	44

Şekil 5.10. Gamak marka 1.1 kW, 3000 devir elektrik motora ait teknik resim.....	45
Şekil 5.11. Salyangoz fan gövdesine ait teknik resim.....	45
Şekil 5.12. Deneylerde kullanılan salyangoz fana ait teknik resim.....	46
Şekil 5.13. Deney düzeneğinin görüntüleri.....	46
Şekil 5.14. S/N oranı için etkiler grafiği	50
Şekil 5.15. Ortalama değerler için etkiler grafiği.....	50
Şekil 5.16. Verilerin dağılım grafiği	52





FARKLI PARAMETRELERE SAHİP GERİYE EĞİK KANATLI RADYAL FANIN DENEY TASARIMI YÖNTEMİ İLE VERİMLİLİK ANALİZİ

ÖZET

Günümüzde fan kullanım alanları oldukça artmaktadır. Kapalı ortamlarda çalışma süresinin ve harcanan sürenin artması ile birlikte fanların çalışma performansı önem kazanmaktadır. Fanlardaki verimsizlikler giderildikçe, kapalı ortamlarda oluşan yaşam kalitesi artmış ve maliyetler düşmüş olacaktır. Fanların yüksek oranda elektrik tükettiği bir gerçektir. Fan sistemlerinde enerjinin verimli kullanımı, fan sistemlerini oluşturan ana bileşenlerin değiştirilmesi veya revize edilmesi ile sağlanabilir. Bu ana bileşenler pervane, salyangoz gövde ve elektrik motorundan oluşmaktadır.

Bu tez çalışmasında kapalı alanlarda kullanılan ve kirli havanın emilmesini sağlayan geriye eğik kanatlı, salyangoz gövdeli ve 1.1 kW- 3000 rpm elektrik motorlu bir sistem üzerinde tasarım ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmaların güvenilirliği için Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır.

Geriye eğik kanatlı radyal fanların uygulama alanı oldukça geniştir. Yüksek basınç ve debilerde çalışmasından dolayı tercih edilir. Fakat aşırı yüklenmelerde basınç ve verimin düşmeye başladığı performans karakteristiklerinde görülmektedir. Tez çalışmasında elektrik motoru ve salyangoz gövde sabit kalmakta, pervanenin geometrik özellikleri üzerinde istenilen değişiklikler yapılmıştır. Verimlilik analizi için 3 faktör ve 4 seviye belirlenmiştir. Faktörler sırası ile kanat sayısı(6 adet- 8 adet- 9 adet- 10 adet), kanat genişliği(35 mm-50 mm-65 mm-85 mm) ve voltaj değeri(%20-%40-%60-%80) olmaktadır. Bütün faktörler 4 seviyeden oluşmaktadır. Minitab programı üzerinde Taguchi deney tasarımı yöntemi ile deney kombinasyonları oluşturulmuştur. Ortogonal dizi $L_{16}(4)^3$ olarak elde edilmiş, 16 adet farklı deney kombinasyonlarının test edilmesi için pervaneler ve deney düzeneği hazırlanmıştır.

Fanların genel olarak verimlilik ölçütü olarak debi değerleri bizlere bilgi vermektedir. Bu yüzden debi değerleri salyangoz fana giren veya çıkan hava akış hızından elde edilmektedir. Bu çalışmamızda verimlilik optimizasyonu için kullanılan değer hava giriş hızı olarak belirlenmiştir. Bütün deney kombinasyonlarında anemometre cihazı ile ölçümler gerçekleştirilmiş ve Minitab programı üzerine kayıt edilmiştir. S/N analizi için ‘en büyük en iyidir’ yaklaşımı kullanılarak analizler elde edilmiştir.

Analiz sonuçlarından elde edilen, seçilen faktörlerin verimlilik üzerindeki önem sırası voltaj değeri(%), kanat genişliği(mm) ve kanat sayısı olarak sıralanmaktadır. En optimum seçeneğin elektrik motor gücünün %80 voltaj değerinde çalıştırılması, kanat genişliğinin 65 mm olması ve kanat sayısının 9 adet olması durumu olduğu görülmektedir. Radyal fanlı sistemlerde optimum sonucun verim tasarrufu sağlayacağı belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde geriye eğik kanatlı radyal fanlarda fan kanat sayısı, en önemlisi kanat genişliği ve güç değişiminin fan verimine etkisini inceleyen bir araştırmaya rastlanmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmanın konusunun daha önce araştırılmadığı ve çalışma sonuçlarının katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Deney Tasarımı, Verimlilik, Kanat Genişliği, Hava Giriş Hızı, Optimizasyon



EFFICIENCY ANALYSIS OF RADIAL FAN WITH BACK CURVED BLADE WITH DIFFERENT PARAMETERS BY EXPERIMENT DESIGN METHOD

ABSTRACT

Today, the usage areas of fans are increasing considerably. With the increase in working and time spent in closed environments, the working performance of the fans is important. As the performance of the fans improves, the quality of life in indoor environments will increase and costs will decrease by eliminating inefficiencies. It is a fact that fans consume a lot of electricity. The efficient use of energy in fan systems can be achieved by changing or revising the main components that make up the fan systems. These main components consist of propeller, volute body and electric motor.

In this thesis, design and optimization studies were carried out on a system with backward curved blades, volute body and 1.1 kW- 3000 rpm electric motor, which is used in closed areas and provides vacuuming of polluted air. Taguchi experimental design method is used for the reliability of these studies.

Radial fans with backward curved blades have a wide range of applications. It is preferred because it works at high pressure and flow rates. However, it is seen in the performance characteristics that the pressure and efficiency start to decrease in overloads. In the thesis study, the electric motor and the volute body remain constant and the desired changes have been made on the geometric properties of the propeller. 3 factors and 4 levels were determined for efficiency analysis. The factors are the number of blades (6 pieces - 8 pieces - 9 pieces - 10 pieces), blade width (35 mm - 50 mm - 65 mm - 85 mm) and voltage value (20%-40%-60%-80%) is happening. All factors consist of 4 levels. Experiment combinations were created with the Taguchi experimental design method on the Minitab program. The orthogonal array was obtained as L16(4)3, and the propellers and experimental setup were prepared to test 16 different experimental combinations.

Flow rates give us information as a general efficiency measure of fans. Therefore, the flow rate values are obtained from the air flow rate entering or leaving the volute fan. In this study, the value used for efficiency optimization was determined as the air inlet velocity. Measurements were made with anemometer device in all experimental combinations and recorded on the Minitab program. For S/N analysis, analyzes were obtained using the 'biggest is best' approach.

The order of importance of the selected factors on efficiency, obtained from the analysis results, is listed as voltage value (%), blade width (mm) and number of blades. It is seen that the most optimal option is to operate the electric motor power at 80% voltage, the blade width is 65 mm and the number of blades is 9 pieces. It has been determined that the optimum result will save efficiency in radial fan systems. When the studies in the literature are examined, it has been determined that there is no research that examines the effect of fan blade number, most importantly blade width and power change on fan efficiency in backward curved blade radial fans. It is foreseen that the subject of this study has not been researched before, and the results of the study will contribute

Keywords: Experiment Design, Efficiency, Wing Width, Air Inlet Speed, Optimization



1. GİRİŞ

Günümüzün son derece rekabetçi ve küreselleşen pazarında, işletmelerin pazar koşullarına uyum sağlamak için hizmetlerini ve operasyonlarını geliştirmeleri, müşteri ihtiyaçlarını karşılamaları ve gerekli kalite standartları dahilinde sistem güvenilirliğini sağlamaları gerekmektedir. Sistemin yapısını korumak ve sistemin kararlılığını sağlamak için sistem bileşenleri dikkate alınmalı ve bu bileşenlerin kullanım ömürleri en önemli faktörlerden biri olmalıdır. Bir düzeyde sistem güvenilirliği sağlamak, uygun bileşenlere gerekli bakım, onarım ve değiştirme ilkelerinin uygulanmasına bağlıdır. Bir ürünün yaşam döngüsü göz önüne alındığında zamanla, başarısızlık ve verimsizlik olasılığı artar. Bu durum sistem kesintileri ile birlikte bir maliyet yükünü de beraberinde getirmektedir.

Ekonomik sürdürülebilirlik amacıyla, makine/teçhizatın mümkün olduğu kadar çalışır durumda tutulması ve gereğinden fazla veya beklenenden fazla yıpranmaması sağlanmalıdır. Mühendislik ve araştırma-geliştirme çalışmalarında ulaşılması gereken temel hedef, tasarlanan sistemin ve geliştirilecek ürünün maksimum verime sahip olmasıdır. En iyi sonuçların alınacağı koşulları ortaya çıkarmak için verimliliği belirleyen özellik belirlenir ve bu özelliği etkileyen faktörler incelenir. Daha sonra bu faktörlerin verimlilik üzerindeki etkileri belirlenir ve uygun kombinasyonu bulmak için deneyler yapılır. Deneyler sonucunda doğru soruların sorularak, doğru cevapların alınmasıyla optimum seviye belirlenir.

Sorulan sorular ile her belirleyici faktörün ele alınması ve ayrı ayrı bu faktörlerin tespit edilmesi gerekmektedir. Ancak bu şekilde faktörler arasındaki etkileşim belirlenecektir. Bu etkileşimin belirlenmesindeki hata paylarını azaltmak için istatistiksel yöntemler ile analiz edilmesi gerekmektedir.

Tüm bu durumlar göz önünde bulundurularak deneylerin daha ekonomik hale getirilmesi ve zaman kısıtı dikkate alınarak deneysel tasarım yöntemlerinin uygulanması çok doğru bir yaklaşım olacaktır. Taguchi Deneysel Tasarım yöntemi, optimizasyon problemlerinin çözümünde bu yaklaşım için başarılı bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Taguchi yöntemi, minimum deney sayısı ile çözüme ulaşılmasını sağlarken, süreç ve ürünün geliştirilmesini destekler.

Bu yüksek lisans çalışmasında fan sistemlerinin optimizasyonu deney tasarımı yöntemi ile ele alınacaktır. Fan sistemlerinin optimizasyonunu sağlamak, şirketlerin operasyonel iyileştirme ve sistem güvenilirlik düzeyini sağlama amaçları içerisindedir. Basınç farkı oluşturarak hava akışını sağlayan bir cihazlara fan denilmektedir. Sözcük anlamı temizleyicidir. Soğuk ve sıcak havayı dengeli bir biçimde savururlar. Havalandırma, pervane, pervane kanadı veya vantilatör kelimeleri fanların diğer tamamlayıcı kelimelerindendir. Fanların tahrik sistemlerinde elektrik motorları kullanılmaktadır. Bu birleşenler sistemi oluşturmaktadır. Fan üzerindeki pervane hareketlidir ve hava üzerinde çalışır. Pervane statik ve kinetik enerji kazandırır ve böylece fan görevini yerine getirir. Genellikle işyeri veya sanayilerde kullanılan fanlar, düşük verimlikte olup fazla enerji tüketmektedir. Fan sisteminde sağlanacak performans artışları yani parametrelerinin optimizasyonunun sağlanması maliyetlere, kaliteye ve verimliliğe kayda değer katkıda bulunacaktır.

Çalışmada parametreleri birbirinden farklı geriye eğik kanatlı radyal pervanelerinin deneysel çalışmasından oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde çalışmanın giriş bölümü yer almaktadır. İkinci bölüm de fan verimliliği ile ilgili çalışmalara ve deney tasarımı yöntemi ile yapılan çalışmaların literatür taraması mevcuttur. Üçüncü bölümde fan çeşitlerinden, fan sistemlerini oluşturan parametrelerden ve verimlilik ölçütlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde deney tasarımı yönteminden ve farklı parametrelere sahip geriye eğik kanatlı pervanelerin ölçütlerinden bahsedilmektedir. Beşinci bölümde pervanelerin deneysel olarak salyangoz gövdenin hava girişinden anemometre ile ölçülerek hava giriş hız değerleri kaydedilmiş ve MİNİTAB programı üzerinde veriler analiz edilmiştir. Bu pervanelerin test edileceği düzenekte salyangoz gövde ve elektrik motoru aynı olmaktadır. Problem tanımı ve hipotezler de bu bölümde yer almaktadır. Son olarak altıncı bölümde ise çalışma sonuçları yer almaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Fanların performansını etkileyen parametreler konusunda çalışmalar bulunmaktadır. Bu bölümde fanlar üzerindeki performansı etkileyen parametreler üzerinde yapılan çalışmalardan bahsedilecek olup daha sonrasında literatürde daha sınırlı sayıda yer alan Deney Tasarımı yöntemi ile yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Kanat Sayısının Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Ch ve diğ. (2023), kanat sayısının santrifüj fan performansına etkisini incelemişlerdir. Bir fan için endüstriyel gereksinimlerinin 1500 rpm’de, fanın 2000 Pa değerinde olması gerektiğini belirtmişlerdir. Kullandıkları fan 11 kanatlı geriye eğik pervanede 1323,07 Pa olarak %50,82 verimle çalıştığını belirtmişlerdir. Tüm diğer parametreleri kanat sayıları farklı olan pervaneler ile bir tutmuşlar, kanat sayısı Z:8, 10, 12, 14 olan kanatların 1500 rpm’de çalışmasındaki Pa değerlerini ölçmüşler ve CFD analizlerini yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda kanat sayısı Z:14 olduğunda toplam basınçta %21,77, verimlilikte %5,74 artış olduğunu ve kanat sayısının fan performansında etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Aureliano ve Guedes (2019), endüstriyel fan boyutlandırılmasında standartın olmamasından dolayı oluşacak gereksiz maliyetlerin oluşabileceğini öngörmüşler ve CFD analizi ile 12-30 kanat sayılarına sahip radyal fanların karakteristik verilerini toplamışlardır. Bu veriler, ANSYS Fluent yazılımı ile çözümlenmiştir. Deney aşamasında, motor dönüşü bir frekans invertörü kullanılarak 189.5 rad/s’de kontrol edilmiş, salyangoz çıkışında akışkan hızı ölçümü anemometre ve basınç ölçümü manometre ile elde edilmiştir. Çalışma sonucunda radyal fanın performansına ilişkin deneysel ve sayısal analizle sunulmuş, fan performanslarında önemli gelişmelerin elde edilmesi için kanatların sayısındaki modifikasyon ile mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırıldığında, çıkış kütle debisi için %0,834 ve çıkış basıncı için %1,539’luk bir fark meydana gelmiş ve hata değerleri küçük olduğunu belirtmişlerdir. Sayısal uygulamalar sonucunda orijinal tasarımın değiştirilmesine gerek kalmadan yeterli akış elde edilmiştir.

Amjadimanesh ve diğ. (2015), kanat sayısının 3D ileri eğimli santrifüj fan performansı üzerindeki etkisinin sayısal çalışması üzerine çalışma yapmışlardır. Fanın türbülans akışını ve basınç alanını tahmin etmek için sayısal olarak simüle edilmiş ve performans

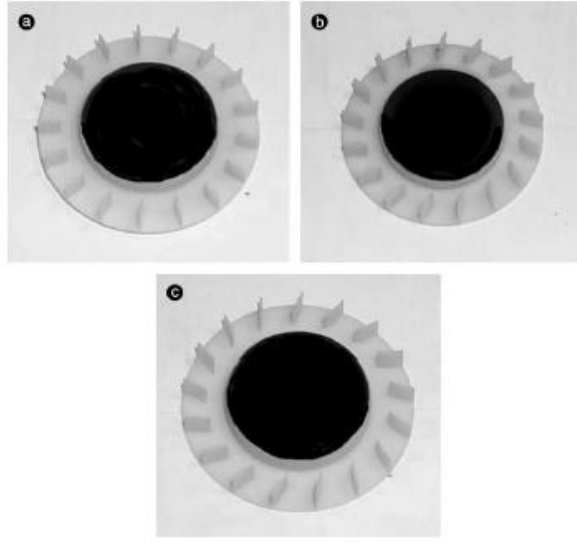
eğrisi deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Simülasyon çalışmasıyla 15, 17, 20, 23 ve 25 kanat sayılarına sahip fan kanatlarının performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Simülasyon sonucunda 20 kanat sayısı en verimli kanat sayısı olarak elde edilmiştir. Daha sonra kanat sayısını optimize edebilmek için kullanılan en küçük kareler yöntemi en verimli kanat sayısının 21 olduğu tahmin edilmiştir.

2.2. Kanat Eğimlerinin Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Li ve diğ. (2019), büyük kanat eğim açısına sahip jet tipi fanın aerodinamik özelliklerini incelemişlerdir. Kanat eğimi farklı fanlarda k-omega türbülans modeli kullanarak sayısal deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda fanın itme gücünün kanat eğim açısındaki artışla birlikte büyüdüğü ve kanat eğim açısının değiştirilmesi verimliliği etkilediği gözlemlenmiştir

Altun (2022) eksenel ve radyal fanların farklı kanat açılarının fan performansına etkisinin incelenmesi için AXI800 model eksenel fanın bilinen 30° ve 35° kanat açılarındaki katalog performans değerleri ile deneysel sonuçları kıyaslamıştır. Katalog değerleri ile uygun olduğunu gözlemlediğinde fanın bilinmeyen 25°, 40°, 45° ve 50° kanat açılarındaki performans eğrileri için deneyler tekrarlamıştır. Çalışma sonucunda kanat açısı arttıkça basınç aralığındaki artış oranının elektriksel güç artış oranına göre daha az olduğundan yüksek kanat açılarında kullanılan fanın verimli olmadığı görülmüştür.

Lin ve Huang (2002), öne eğik radyal fan tasarımı, model üretimi, deneysel doğrulama ve sayısal simülasyonu üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Kanat şekli, kanat giriş açısı ve mahfazanın çıkış geometrisi üzerinde durularak 45x45x7 mm³ dizüstü bilgisayar için yüksek performanslı soğutma fanı tasarlamışlardır. İlk olarak NACA4412 kanat profili benimsenmiş daha sonra 3 farklı kanat giriş açısı dikkate alınmıştır. Mahfaza çıkışının yeniden tasarlanması ile, daha az gürültü ve hava debisinin artırılması amaçlanmaktadır. Çalışma sonucunun güvenilirliği için fanın performans ve gürültü testleri, AMCA odasında test edilmiş ve CFD analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, kanat giriş açısı arttıkça maksimum statik basınç azaldığını, kanat giriş açısı 16.5° olan fanın en yüksek verimliliği sağladığını görülmüştür.

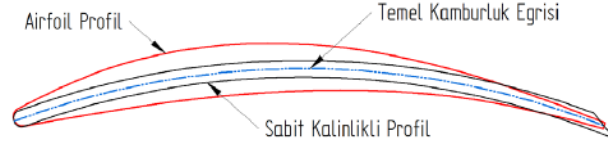


Şekil 2.1. Farklı kanat giriş açısına sahip pervaneler: a:0°; b:16,5° ve c:26,5° (Lin ve Huang, 2002)

2.3. Kanat Şeklinin Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

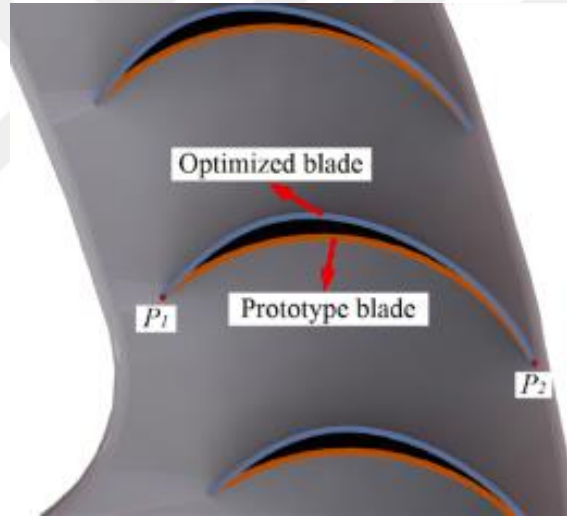
Lee ve Lim (2016), çeşitli fan kanatlarının santrifüj fanda optimize edilmesini ve tasarımının geliştirilmesini amaçlamışlardır. Değerlendirmeleri, santrifüj fanın giriş ve çıkış basınçları, debisi, torku ve gücü gibi performans parametrelerine dayalıdır. Fan kanat şekillerine bağlı olarak performansın değiştiğini, yüzey basıncının fanın merkezinde daha düşük uçlarda daha yüksek olduğu ve yapılan karşılaştırmalardan S tipi fan kanatlarının en verimli olduğu sonucunu çıkarmışlardır.

Develi ve Ayder (2019), radyal fan pervanesinin kanat profili biçiminin performans üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sabit kalınlığa sahip radyal fan pervanesi ve airfoil şekile sahip kanatlı radyal fan pervanesi CFD tekniği ile çözümlenmiş, performansları karşılaştırılmıştır. Pervane kanatlarının tümsek(kamburluk) eğrileri, giriş-çıkış kanat açıları, çapları ve diğer geometrik şekilleri aynı tutulmuştur. Çalışma sonucunda, Aerodinamik bir profil olan airfoil kanat profiline sahip radyal fan hem statik basınç artışı hem de verim bakımından sabit kalınlıklı profile sahip fandan daha iyi sonuçlar vermiştir. Fan içerisindeki akış incelendiğinde airfoil profilde akışın kanat üzerinde ayrılmadığı, sabit kalınlıklı profilde ise akış ayrılmaları görüldüğü bunun da fanın performansını düşürdüğü görülmüş ve aynı boyutsal özelliklere sahip radyal fanlarda sabit kalınlıklı profil yerine airfoil profilli kanatlar kullanmak, fan verimlerinde %4-5 puanlık artış sağlamakta ve enerji tüketimini azaltıcı bir çözüm olduğu sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 2.2. Oluşturulan profillerin karşılaştırılması (Develi ve Ayder, 2019)

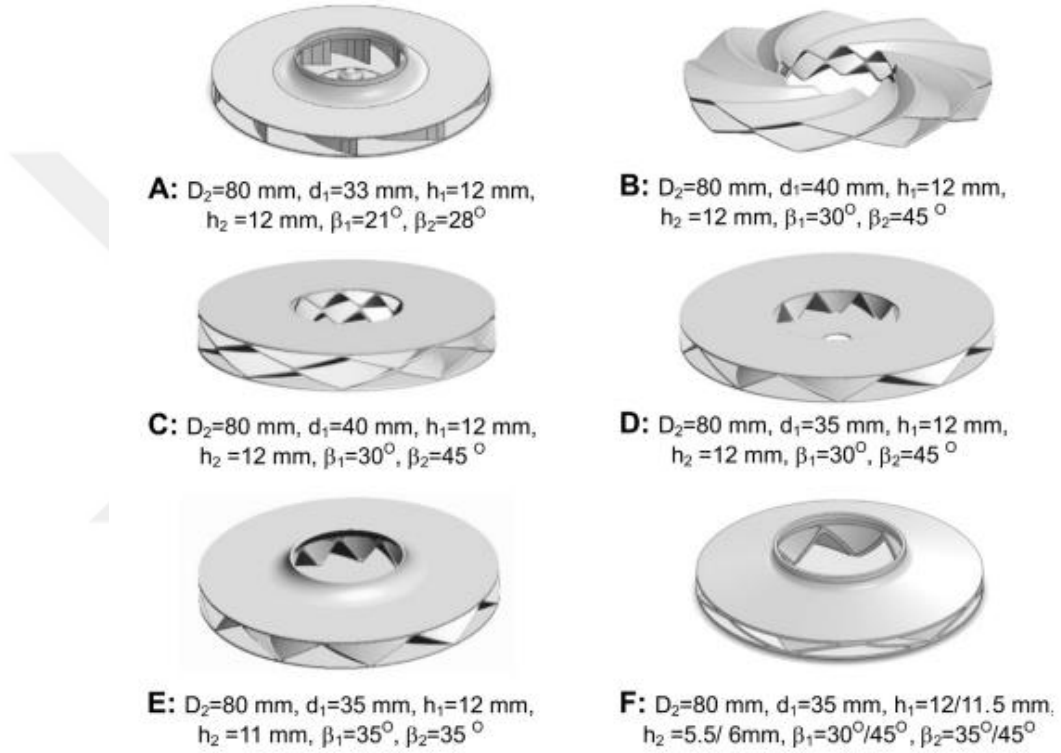
Zhou ve diğ. (2021), havalandırmanın verimliliği için Hicks-Henne(çok arklı ve karmaşık eğri kanatlara sahip kanat tasarımı için uygun) fonksiyonuna dayalı çok kanatlı radyal fan pervanesinin kanat tasarımı üzerine çalışma yapmışlardır. Fanın sayısal simülasyonu ile optimizasyondan önce ve sonra dahili akış alanı analiz edilmiş ve CFD sonuçları deneylerle doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda, maksimum verim noktasında fanın debisi $1,18 \text{ m}^3/\text{dk}$ artmış, toplam basınç verimi %4,21 iyileşmiştir. Verimlilik ve akış hızının iyileştirilmesi, bina havalandırmasının enerji tüketimini etkili bir şekilde azaltabileceği öngörüsünde bulunmuşlardır.



Şekil 2.3. Kanat profilinin optimizasyonlardan önceki ve sonraki karşılaştırması (Zhou ve diğ., 2021)

Prezelj ve Novakovic (2018), elektrik süpürgeleri motoru için eğimli kanatlı pervaneler ile, çeşitli çalışma koşullarında santrifüj fanların gürültü kontrolünü iyileştirecek fan pervanesi geometrisi bulmayı hedeflemişlerdir. Ancak pervanenin gürültü seviyesinin düşürülmesi genellikle verimini de azaltmaktadır. Pervanenin psikoakustik parametrelerle uyumlu yüksek verimli ve tatmin edici akustik özelliklerini elde etmek için, alternatif bir düşünme biçimi ve alternatif bir pervane tasarımı gerekmektedir. Çalışmada 6 farklı pervane için geometrik tasarım üzerine gidilmiştir. (A) standart tasarım(orijinal), (B) açık eşkenar dörtgen tip pervane, (C)

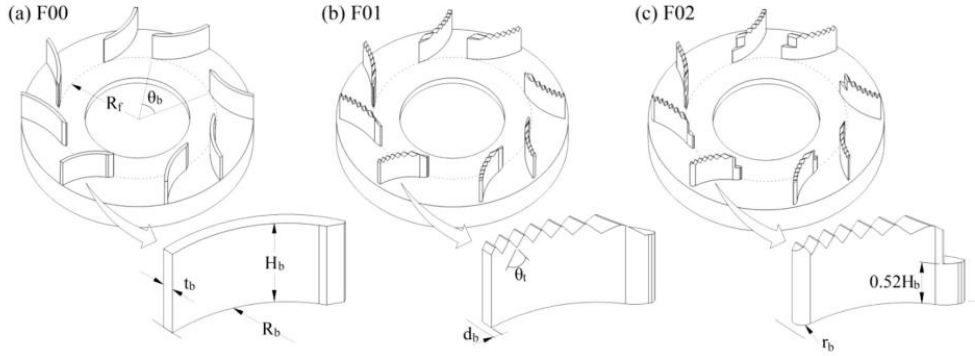
kapalı eşkenar dörtgen tip pervane, (D) eğimli kanatlara sahip pervane, (E) eğimli kanatlara ve geliştirilmiş emişe sahip pervane ve (F) ayarlanmış geometriye sahip pervane şeklinde olmaktadır. Çalışma sonucunda akış kanalı kesitinin üçgen şeklini oluşturan eğimli kanatların standart pervanelerle karşılaştırılabilir bir aerodinamik performans elde ettiğini göstermektedir. Eğimli kanatlara sahip pervanelerin, dik kanatlara sahip pervanelere kıyasla psikoakustik ölçümlerde üstün sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 2.4. Eğimli kanatlara sahip tasarlanan pervaneler (Prezelj ve Novakovic, 2018)

Kim ve diğ. (2019), Lighthill analojisi ve Ffowcs Williams ve Hawkings' yöntemi kullanılarak kayış tahrikli marş jeneratörünün radyal fanında üretilen akış kaynaklı gürültüyü tahmin etmek için açık cebirsel alt ızgara ölçekli stres modeline dayanan büyük girdap simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Kanat dizisi açıları, modülasyon yöntemi kullanılarak 3 farklı(F00, F01, F02) kanat şekli tasarlanmış ve geniş bir kanat eğriliği benimsenmiş, fanın dönme hızının 6000 rpm olduğu kabul edilmiştir. Çalışma sonucunda, akış gürültüsünün F01 için %22,7 ve F02 ile F00 için %39,0 oranında azaldığı görülmüştür. Kanadın bu özellikleri, fan performans kaybında %5,2 (F01) ve %10,6 (F02) olmasına neden olurken, gürültü azaltmada çok daha fazla fayda

sağlamıştır. Değiştirilmiş geometri ile gürültünün azaltılması, fan performansında azalma olsa dahi önemli bir sonuç olduğu çıkarılmıştır.



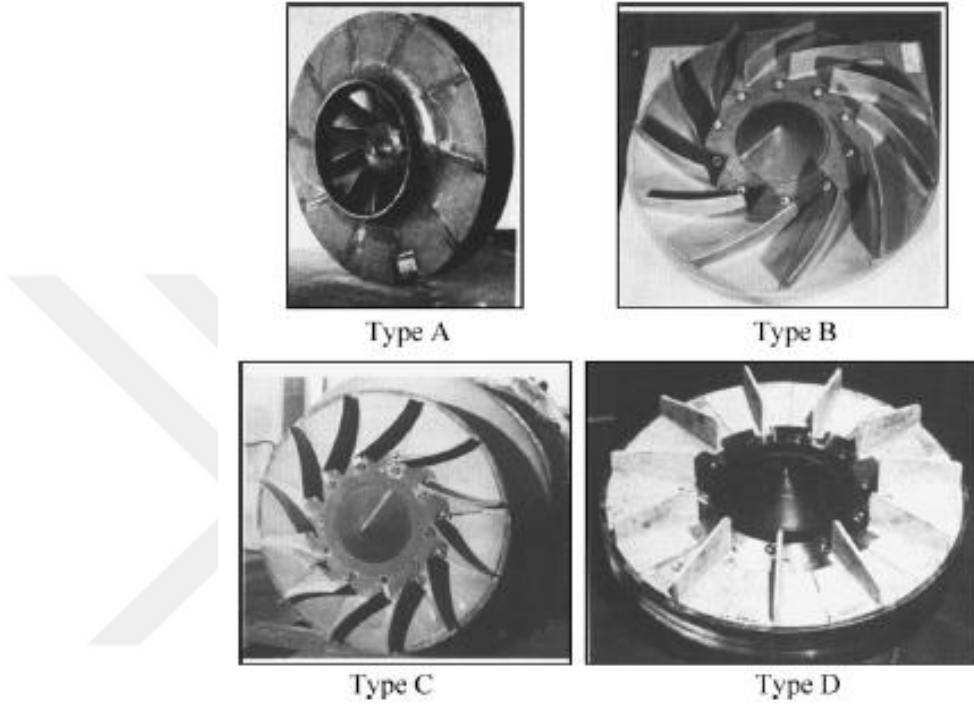
Şekil 2.5. Tasarlanan farklı kanat şekilleri (Kim ve diğ., 2019)

2.4. Malzeme Değişkenliğinin Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Mohaideen (2012), sonlu elemanlar modellemesi kullanarak, geriye eğimli aerofoil radyal fan pervanesinin optimizasyonu üzerine çalışma yapmıştır. Fanın kütlesi, pervane parçalarının kalınlığı ile doğrudan ilişkili olduğundan, bu projedeki amacı, çalışma kısıtlamaları ve tasarım parametrelerini dikkate alarak kalınlığı en aza indirmektir. Bu çalışma, matematiksel olarak yapı modeli gibi davranan ve ANSYS yazılımını kullanarak gerilim analizi gerçekleştiren geriye eğik kanat profili radyal fan pervanesinin sonlu elemanlar modelini oluşturmaya odaklanmaktadır. Bu çalışmada, fan pervanesindeki çeşitli bileşenlerin kalınlığı optimize edilerek ve bunlardaki gerilim dağılımları analiz edilerek, fan verimi artırılmaya çalışılmıştır. Çalışma sonucunda pervane parçalarının kalınlığının optimizasyonu, fan pervanesinin ağırlığını azaltmış ve buna bağlı olarak fanı çalıştırmak için gereken güç azalmıştır. Bu modele ön gerilme koşulları uygulanmış, bu nedenle pervanenin güçlenmesi ve zayıflaması tahmin edilmiştir.

Engin ve diğ. (2006), bu çalışmalarında endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan radyal fanların 800 C'yi aşan sıcaklık gibi yüksek sıcaklıklara karşı yüksek direnç sağlaması için seramik malzemeler kullanarak tasarlamış oldukları 3 adet yarı açık santrifüj fan pervanesinin performans deneylerini sunmaktadır. Aşağıdaki şekilde A pervanesi geleneksel çelik pervane olmaktadır. B,C ve D pervane türleri farklı konfigürasyonlara sahip seramik kanatlara sahiptir. Test için değişken parametreler

seçilmiş ve deneysel olarak 1050 C'ye kadar sıcaklığa sahip gazlara izin veren özel tasarlanmış bir test tesisinde test edilmiştir. Çalışma sonucunda, seramik malzemelerin basit pervane geometrilerinin değişen uç boşluğuna karşı duyarlılığının daha az olduğunu ve gaz sıcaklığının, uç kaçak akışı nedeniyle performans düşüşü üzerinde neredeyse hiçbir etkisinin olmadığı bulunmuştur.

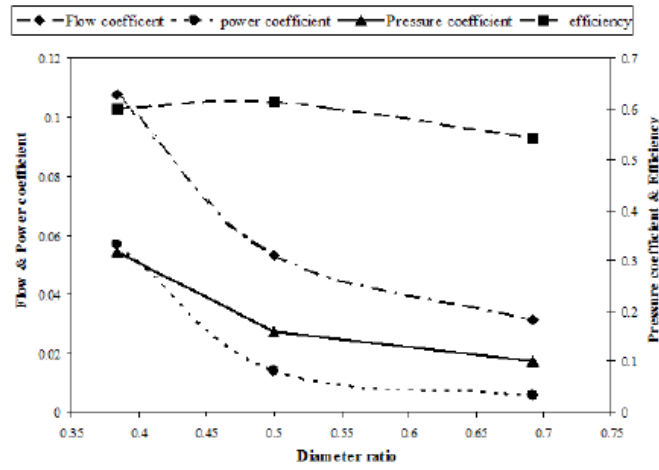
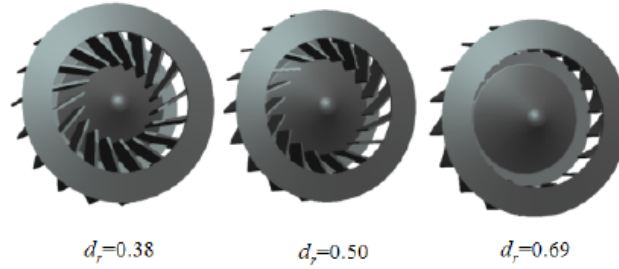


Şekil 2.6. Test edilen pervaneler (Engin ve diğ., 2006)

2.5. Kanat ve Pervane En-Boy Oranının Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Singh ve diğ. (2011), bu çalışmada geriye ve öne eğik kanatlara sahip radyal fanın geometrik parametrelerinin verimliliğe etkisi incelenmiştir. Çalışmada dikkate alınan parametreler kanat sayısı, çıkış açısı ve çap oranı olmaktadır. Bu parametreler için CFD modeli geliştirilmiş ve sonuçlar deneysel ölçümle ölçülmüştür. Çalışma sonucunda farklı kanatlara sahip fanın yüksek basınç katsayısı altında aynı performansı göstereceğini göstermektedir. Daha yüksek kütleli debilere sahip öne eğik fanın, daha düşük debilere sahip geriye dönük fana kıyasla aracın kilometre performansı (yakıt tüketimi) üzerinde ihmal edilebilir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Kanat sayısındaki artış, daha iyi akış yönlendirmesi ve azalan kayıplar nedeniyle akış katsayısını ve verimliliği artırmaktadır. Ele alınan parametreler

aralığında, öne eğik kanatlı pervanelerin geriye eğik kanatlı pervanelere kıyasla %21 daha yüksek kütsel debi ve %42 daha yüksek güç tüketimi ile %4,5 daha düşük verime sahip olduğu, fanın veriminin çap oranı ile önce artacağı sonra azalacağı ve fanın en iyi veriminin 0,5 çap oranında olduğu görülmüştür.



Şekil 2.7. 4000 rpm'de 0.38, 0.5 ve 0.69 çap oranları için performans eğrisi (Singh ve diğ., 2011)

Galloni ve diğ. (2018), elektrik motorunu soğutmak için kullanılan bir radyal fanın, elektrik motorunun güvenli çalışma sıcaklığı için fan boyutunun CFD analizi ile değerlendirmesini içermektedir. Belirli bir radyal fan için sayısal bir model geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Kanat tekerlek en boy oranının(yani tekerleğin yüksekliği ve çapı arasındaki oranın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir) ve kanat sayısının değiştirilerek fanların performansını değerlendirmek için sayısal analizler yapılmıştır. Çalışma sonucunda belirli bir kanat sayısında fan performansının en-boy oranına bağlı ve belirli bir geometrideki fan için, akış hızını maksimize eden optimum kanat sayısı olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen ilişki, elektrikli motor soğutması için kullanılan bir fanın doğru boyutlandırılması için fayda sağlamaktadır.

2.6. Güç Değişimine Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Tsai ve Wu (2006), çalışmada minyatür bir radyal fanın sayısal ve deneysel olarak incelenmesini sunmuşlardır. Fanın aerodinamik analizi ve tasarımı için model olarak P-60 turbo jet motoru kompresör kanadı tasarımı benimsenmiş ve 5 eksenli Cnc makinasında fan üretilmiştir. Farklı rpm değerlerinde fan test edilmiş ve çalışma sonucunda bir radyal fanın yüksek dönüş hızındaki statik basıncının eksenel akışlı bir faninkinden daha yüksek olduğu çıkarılmıştır. Bu nedenle yüksek statik basınçlı soğutma veya üfleme gerekiyorsa radyal fan seçilmesini önermişlerdir.

2.7. Salyangoz Gövdenin Tasarım Parametrelerinin Fan Verimliliğine Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Burgman ve diğ. (2017), yakıt hücresinin hava besleme sisteminin geniş bir kütle akışı aralığında yüksek verimlilik sağlaması hedefine ulaşmak için, CFD, lazer optik akış ölçümlerine (PIV) ve radyal fanın performans ölçümlerine dayalı olarak, bir difüzör ve değişken kesit alanına sahip salyangozla donatılmış radyal fan geliştirilmiştir. Araştırma sonucunda, radyal fanın verimliliğini, difüzör genişliği uygun şekilde ayarlanarak kısmi yükte %7,1 puana kadar arttırabileceği ve difüzör genişliğinin azalması akış açısının azalmasına neden olacağı sonucu çıkmıştır.

2.8. Fan Verimliliğini Etkileyen Diğer Parametrelerin Bulunması Üzerine Yapılan Çalışmalar

Zhang ve diğ. (2016), geriye eğik kanatlı santrifüj fanın kararsız aerodinamiği ve aero-akustik özelliklerinin sayısal ve deneysel araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Salyangoz üzerindeki farklı stratejik noktalardaki CFD değerleri karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda gürültü yayılımının esas olarak fanın çıkış kanalından olduğu sonucunu çıkarmışlardır.

Jeon (2003), radyal fanlarda akış kaynaklı gürültünün kaynağını ve özelliklerini tahmin etmek için çalışmalarda bulunmuştur. Bu çalışmada pervanenin sabit açısız hızla döndüğünü varsaymış; dönme hızının, akış hızının, kesme mesafesinin ve kanat sayısının bir santrifüj fanın gürültüsü üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Araştırma sonucunda santrifüj fan gürültüsü için en önemli faktörün kesme mesafesi olduğu tespit edilmiştir. Kesme mesafesi arttıkça, daha yüksek harmonik frekanslardaki

genliklerin dik bir şekilde azaldığını ve kanat sayısının gürültü seviyesini önemli ölçüde etkilemediği de gözlemlenmiştir.

Lin ve Tsai (2012), geriye eğimli bir santrifüj fan performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için çalışma yapmışlardır. Çalışmada 80 mm çapında geriye eğimli santrifüj fan tercih etmişlerdir. Bu çalışması sonucunda fan performansını başarılı bir şekilde artırmak için, çeşitli modifikasyon alternatifleri önermişlerdir. Bu çalışma fan tasarımlarında önemli bir tasarım aracı olarak kullanılabilecek entegre bir aerodinamik, akustik ve elektro-mekanik değerlendirme yaklaşımı oluşturmaktadır.

Karaokur ve Akay (2022), radyal fanın verimli çalışabilmesi için performansının incelenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada ANSI/AMCA-210 standardına uygun performans verileri bilinmeyen radyal fan test edilmiş ve veriler kayıt edilmiştir. Çalışmada CFD yönteminden yararlanılarak performans verilerine ulaşılmıştır. Elde edilen veriler ile radyal fanın optimum çalışma aralığı belirlenmiş ve radyal fanda yapılacak gövde, rotor ve kanatlarda yapılacak geliştirmelerle zaman ve maliyet kayıpları en aza indirilmesi planlanmıştır.

Lee ve diğ. (2011), geriye doğru santrifüj fan profilini, giriş kanalını ve pervane örtüsünü yeniden tasarlamak için CFD tabanlı hesaplama yaklaşımı benimsemişlerdir. Optimizasyonun amacı, salyangoz çıkış basıncını karşılarken, güç tüketimini azaltmaktır. Çalışma sonucunda tasarım değişikliği ile istenilen optimizasyon amacına ulaşılmıştır.

Younsi ve diğ. (2007), pervane geometrisinin radyal fandaki kararsız akış üzerindeki etkisini CFD analizi ile incelemişlerdir. Pervane geometrisinin fan performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için üç tip pervane (düzensiz kanat aralığı, farklı kanat sayısı, pervanenin daha küçük giriş çapı) referans alınan bir pervane ile karşılaştırılmıştır.

2.9. Deney Tasarımı Yöntemi Kullanılarak Fan Verimliliği Üzerine Yapılan Çalışmalar

Jayapragasan ve Reddy (2017), tüy toplama sisteminde üfleyicide kullanılan santrifüj fanın performansını etkileyen parametrelerin araştırılmasını üzerine çalışma yapmışlardır. Optimizasyon için pervane dış çapı, kanat sayısı ve kanat açısı parametrelerini seçmişler, Minitab programında Taguchi yöntemi, modelleme de

Solidworks ve Fluent kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada analitik sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda optimum değerler dış çap:190 mm, kanat açısı:80° ve kanat sayısı:8 adet olarak çıkmıştır.

Baloni ve diğ. (2013), radyal fan üzerinde Taguchi ve ANOVA yaklaşımlarını kullanarak performansı üzerindeki etkisini aydınlatmak için optimizasyon yapılmıştır. Çalışmada faktörler A-B-C ile seviyeler 1-2-3 olarak belirlenmiştir. Pervane çıkışıındaki statik basınç değişiminin yüzdesindeki azalma, salyangoz içindeki kayıpların en aza indirilmesi ve salyangoz çıkışıındaki durgunluk basıncının en üst düzeye çıkarılması, santrifüj fan performansının artırılmasını sağlamak için salyangoz üzerinde geometrik parametrelerin değiştirilmesi yönünde çalışmaya yön verilmiştir. Çalışma sonucunda, radyal fan sarmal genişliğinin fan pervane genişliğinin 1.5 katı olası gerektiği ve pervane çıkışıındaki Ps'deki yüzde değişimini en aza indirmek için 26'lık dil açısı ve salyangoz içindeki Po kaybını en aza indirmek için 24'lük dil açısı optimum seviye olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Faktörlerin optimum sıralaması A3–B2–C3 şeklinde olduğu ve deneysel performans analizi, orijinal salyangozla karşılaştırıldığında optimize edilmiş santrifüj üfleyicinin %7,4 daha yüksek verimlilik gözlemlenmiştir.

Tablo 2.1. Literatür özeti

	Yazar/ Yazarlar	Yayın Yılı	Fan Tipi	Çalışma Yöntemi	Çalışma Konusu
1	Ch ve ark.	2023	Geriye Eğik Kanatlı Radyal Fan	Deneysel, CFD,	Kanat sayısının fan verimliliğine etkisi
2	Aureliano ve Guedes	2019	Radyal Fan	CFD, ANSYS - Fluent Yazılımı,	
3	Amjadimanesh ve ark	2015	Öne Eğik Kanatlı Radyal Fan	CFD, Deneysel,	
4	Li ve Ark.	2019	Jet Tipi Fan	Deneysel, CFD,	Kanat eğimlerinin fan verimliliğine etkisi
5	Altun	2022	Eksenel Fan, Radyal Fan	Deneysel,	
6	Lin ve Huang	2002	Öne Eğik Kanatlı Radyal Fan	CFD,	

7	Lee ve Lim	2016	Radyal Fan	Deneysel	Kanat şeklinin fan verimliliğine etkisi
8	Develi ve Ayder	2019	Radyal Fan	CFD,	
9	Zhou ve Ark	2021	Radyal Fan	CFD,	
10	Frezelj ve Novakovic	2018	Radyal Fan	CFD, Deneysel	
11	Kim ve Ark.	2019	Radyal Fan	CFD,	
12	Mohaideen	2012	Geriye Eğik Kanatlı Radyal Fan	Sonlu Elemanlar Modeli,	Malzeme değişkenliğinin fan verimliliğine etkisi
13	Engin ve Ark.	2006	Radyal Fan	Deneysel,	
14	Singh ve Ark	2011	Geriye/Öne Eğik Kanatlı Radyal Fan	CFD, Deneysel,	Kanat ve pervane en-boy oranının fan verimliliğine etkisi
15	Galloni ve Ark	2018	Radyal Fan	CFD, Deneysel,	
16	Tsai ve Wu	2006	Radyal Fan	Deneysel,	Güç değişimine fan verimliliğine etkisi
17	Burgman ve ark.	2017	Radyal Fan	CFD, Deneysel	Salyangoz gövdenin tasarım parametrelerinin fan verimliliğine etkisi
18	Zhang ve ark.	2016	Geriye Eğik Kanatlı Radyal Fan	CFD, Deneysel,	Fan verimliliğini etkileyen diğer parametrelerin bulunması üzerine
19	Wan-Ho Jeon	2003	Radyal Fan	Deneysel,	
20	Lin ve Tsai	2012	Geriye Eğik Kanatlı Radyal Fan	CFD,	
21	Karaokur ve Akay	2022	Radyal Fan	CFD,	
22	Lee ve Ark	2011	Geriye Eğik Kanatlı Radyal Fan	CFD, Deneysel,	
23	Younsi ve Ark.	2007	Radyal Fan	CFD, Deneysel,	

24	Jayapragasan ve Reddy	2017	Radyal Fan	Taguchi Yöntemi,	Deney tasarımı yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar
25	Baloni ve Ark.	2013	Radyal Fan	Taguchi ve ANOVA Yaklaşımları,	

Yukarıda literatür çalışmaları incelendiğinde, fan performansını etkileyen parametreler üzerine ayrıntılı çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Pervanedeki kanat sayısındaki değişimin, kanat eğim açısı farklılıklarının, kanat şekillerinin geometrik yapısının, kullanılan malzemenin kalınlığı veya kalitesinin, pervane ve kanat boyutlarından kaynaklanan oran farklılıklarının, fanların çalıştırılmasındaki kullanılan güç etkeninin ve salyangoz gövde tasarım parametrelerinin verimlilik üzerindeki etkilerinin irdelendiği görülmüştür. Ayrıca literatüre katkı sağlayacak akademik çalışmalara da yer verildiği görülmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde geriye eğik kanatlı radyal fanlarda, pervanenin kanat sayısı, en önemlisi kanat genişliği ve güç değişiminin fan verimine etkisini incelenmesini içeren bir araştırma olmadığı belirlenmiştir. Belirlenen parametrelere sahip geriye eğik fanlar üretilip, deney tasarımı yöntemi ile verimlilik analizi yapılması ve analiz sonuçları kıyaslanarak en verimli fan tasarımının belirlenmesi gerektiği planlanmıştır. Bu çalışma konusunun daha önce araştırılmamış olması, çalışma sonuçlarının literatüre önemli ölçüde katkı sağlayacağı ön görülmektedir.

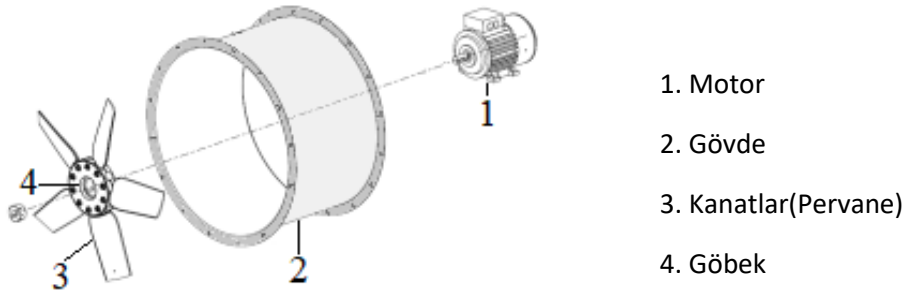
3. FAN ÇEŞİTLERİ

Sanayide, işyerlerinde ve konutlarda bulunan fanlar; Ortamdan kirli havanın tahliyesi, iklimlendirme, soğutma, ısı tasarrufu ve ısı geri kazanımı gibi çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Fanlar hava akış tiplerine göre 3 gruba ayrılır (Gökeli, 1983).

- 1- Eksenel Fanlar
- 2- Dik/Çapraz Akımlı Fanlar
- 3- Radyal/Santrifüj/Merkezkaç Fanlar

3.1. Eksenel Fanlar

Eksenel fanlar gövde, çark(pervane, kanat) ve motor olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Eksenel fanlarda hava akışı pervane eksenine paraleldir. Kanat hareketlerinden basınç artışı sağlanmaktadır. Eksenel fanlarda verimliliği arttırmak için, kanatların ucu ile fan gövdesi arasındaki boşluğun an az düzeyde tutulması gerekmektedir. Araştırmalara göre bu açıklık kanat çapının %0,25 - %0,30'undan daha büyük olmaması yönündedir. Eksenel fanlar radyal fanlara göre hafif, maliyeti ve gürültü seviyesi düşük olmaktadır. Kanat tiplerine göre 3 farklı eksenel fan türü bulunmaktadır (Bulgurcu, 2015).



Şekil 3.1. Eksenel fan ana elemanları (Güven, 2022)

3.1.1. Pervane tipi kanatlı eksenel fanlar

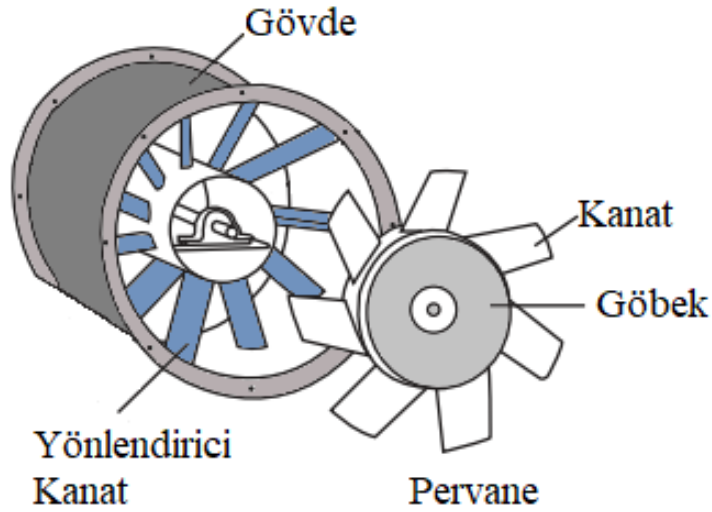
Yaygın olarak kullanılan kanat tipidir. Genellikle havalandırma ve soğutmalarda kullanılmaktadır. Diğer eksenel fan tiplerine göre yüksek debi ve düşük basınç(< 250 Pa) sistemlerinde kullanılmaktadır (Matkap, 2006).

3.1.2. Tüp kanatlı aksenel fanlar

Tüp veya diğer bilinen tanımı silindir kanatlı aksenel fanlar, genellikle ısıtma, gazların tahliyesi, havalandırma, boyama ve kurutma sistemlerinde kullanılmaktadır(Uğural ve Parmaksızoğlu, 1992). Basınç olarak orta basınç(< 1000 Pa) ve yüksek hava debisi aralıklarında çalışmaktadır. Aynı basınç altında daha düşük veya yüksek hızlarda çalışması istendiğinde göbek çapı ile uç çap oranlarını değiştirilmesi ile karşılanabilmektedir.

3.1.3. Yönlendirici kanatlı aksenel fanlar

Yönlendirici veya kılavuz kanatlı aksenel fanın en belirgin özelliği yönlendirici kanatlara sahip olmasıdır. Bu yönlendirici kanatlar sayesinde hava akışı daha aksenel iletilmekte ve diğer aksenel fan tiplerine göre fan verimi daha yüksek olmaktadır. Yönlendirici kanatlı aksenel fan havalandırma, ısıtma, soğutma, duman tahliyesin de ve kurutma sistemlerinde kullanılmaktadır. Orta(500 Pa) - Yüksek(2500 Pa) basınçta ve çok yüksek hava debisi aralığında çalışmaktadır.

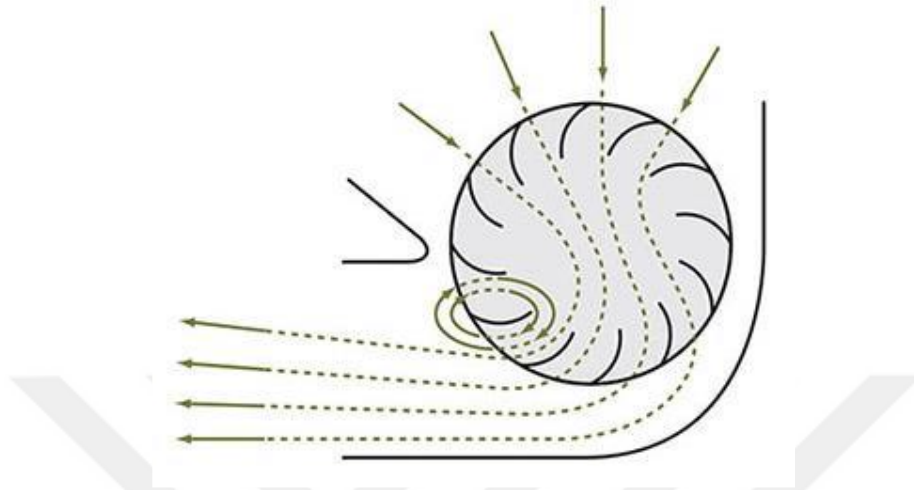


Şekil 3.2. İki kademeli aksenel akışlı fanlar (Güven, 2022)

3.2. Dik Akımlı Fanlar

Dik akımlı fanlar sık kullanılmayan fan türüdür. Çalışma şekli radyal fanlara benzemektedir. Mil eksenine dik bir hava akımı gelir. Düşük hava debilerinde ve yüksek basınçta çalışabilmektedir (Gökelim, 1983). Kanat sayıları çok sık olduğu için bakım masrafları fazladır. Uzun ve dar akış gerektiren sistemlerde kullanılır. Örneğin; Fırınlr, mutfak davlumbazları, el kurutma makinaları, elektrikli ısıtıcı, otomotiv

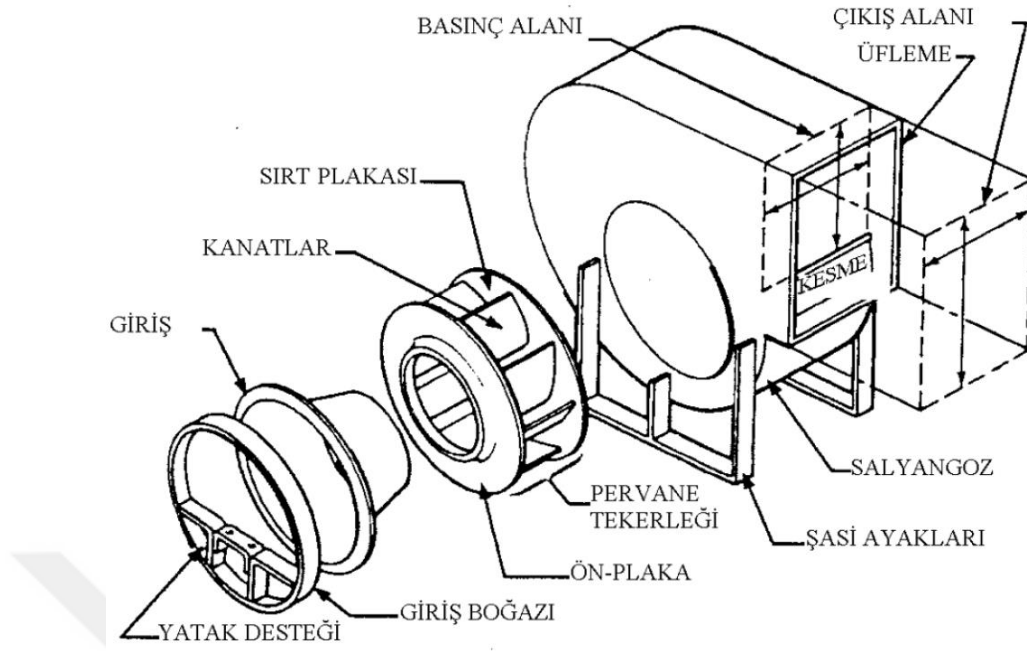
klimaları gibi yerlerde kullanılır. Bu fanların diğer fanlara göre verimi ve yapısal mukavemeti düşüktür (Canbazoglu, 2020). Dik veya çapraz akımlı fanlar olarak bilinmektedir.



Şekil 3.3. Çapraz akışlı fan içindeki hava akışı (Turna, 2020)

3.3. Radyal Fanlar

Radyal fanlar santrifüj veya merkezkaç fanlar olarak da bilinmektedir. Radyal fanlar ayrıca üç ana bileşenden oluşur: dış kasa (salyangoz), motor ve dönen pervane (kanatlar, pervane). Radyal fanlarda hava, salyangoz fanın merkezinden fanın dönme eksenine paralel olarak girerek dikey olarak dönen kanatlardan geçerek kinetik enerjisini artırır ve basınç enerjisi elde eder (Öztürk, 2012). Kanatlar sayesinde fan, havayı bir ortamdan istenilen ortama gerekli debi ve basınçta yönlendirir (Güney, 2016). Hava kanatlardan çıkarken kinetik enerjinin büyük bölümü kanat ile dış gövde(salyangoz) arasındaki genişleme nedeniyle basınca dönüşür (Öztürk, 2012). Bu nedenle en önemli amaçlarımızdan biri hava akış hızını arttırmaktan çok basıncı arttırmaya yönelik olacaktır.



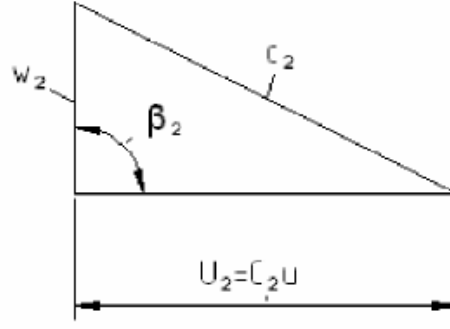
Şekil 3.4. Radyal fan parçaları (Şentürk ve diğ, 2016)

Radyal fanlar en yaygın kullanılan fan türleridir. Bu fanların güçlü yönleri; düşük işletme maliyetleri, düşük gürültü seviyesine bağlanabilir. Zayıflıkları statik verimlerinin düşük olmasıdır (Güney, 2016). Radyal fanların kanat eğimleri 3 farklı şekilde olmaktadır (Öztürk, 2012).

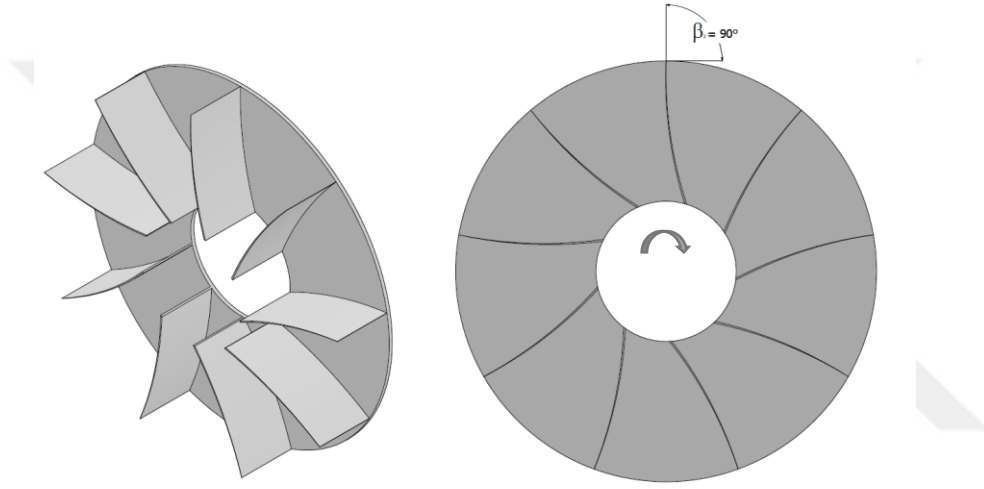
- 1- Düz / Radyal Kanatlı Radyal Fanlar
- 2- Öne / İleri Eğik Kanatlı Radyal Fanlar
- 3- Geriye Eğik Kanatlı Radyal Fanlar

3.3.1. Düz kanatlı radyal fanlar

Düz kanatlı radyal fanların kanat β_2 açıları 90° eşittir. Verimleri radyal fan tiplerine göre en düşük olan grup olmaktadır (Mutlu, 2018). Gürültü seviyesi yüksektir bu durumda verimini düşürmektedir (Bulgurcu, 2015); (Uğural ve Parmaksızoğlu, 1992). Güç yapısı olarak öne eğik kanatlı radyal fanlar ile benzerlik göstermektedir. Tamiri kolay olduğu için tozlu ve pis ortamda daha çok kullanılmaktadır (Uğural ve Parmaksızoğlu, 1992).



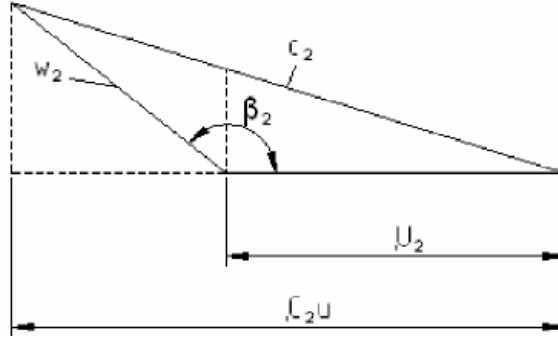
Şekil 3.5. Radyal kanatlı fan grubunda çıkış hız üçgen açıları (Matkap, 2006)



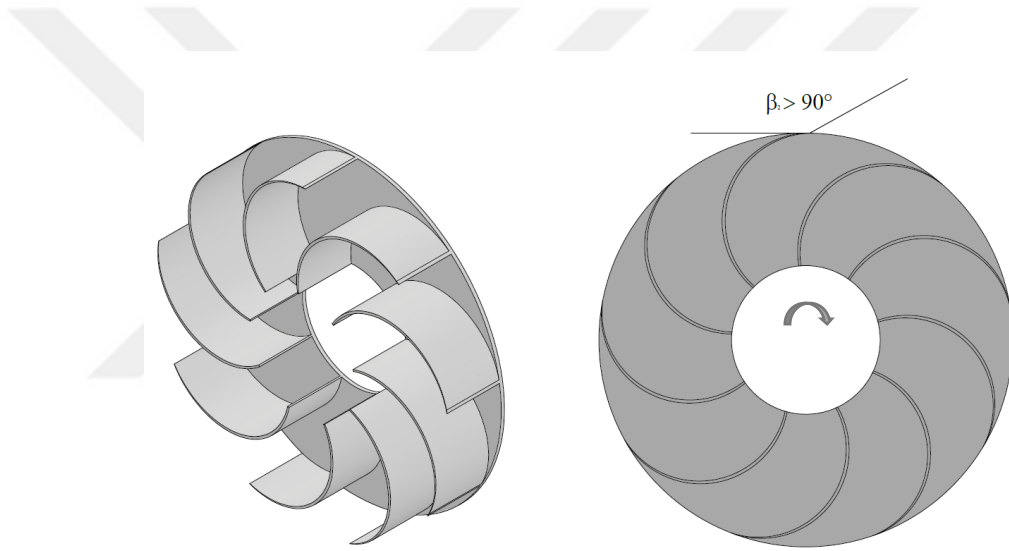
Şekil 3.6. Düz kanatlı radyal pervane çıkış açısı(β_2)

3.3.2. Öne eğik kanatlı radyal fanlar

Öne eğik kanatlı pervane, sistemin dönüş yönüne doğru eğim verilmesiyle oluşmuştur. Öne eğik kanatlı radyal fanların kanat β_2 açıları 90° büyük olmaktadır. Verim olarak düz kanatlı pervaneden daha verimli fakat geriye eğik kanatlı pervanelerden daha düşük verimde olmaktadır. Bu fan grubu maksimum debinin %45'inden yüksek olduğu durumlarda çalıştırılmalıdır (Matkap, 2006). Debi arttıkça güç artmakta ve statik basınçları düşük olmaktadır. Genellikle yüksek debi, düşük statik basınç gerektiği durumlarda kullanılması verimli olacaktır.



Şekil 3.7. Öne eğik kanatlı fan grubunda çıkış hız üçgen açıları (Matkap, 2006)

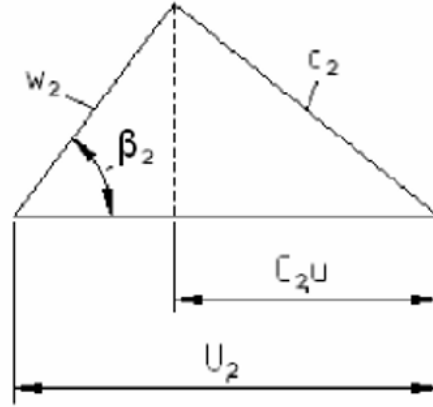


Şekil 3.8. Öne eğik kanatlı radyal pervane çıkış açısı(β_2)

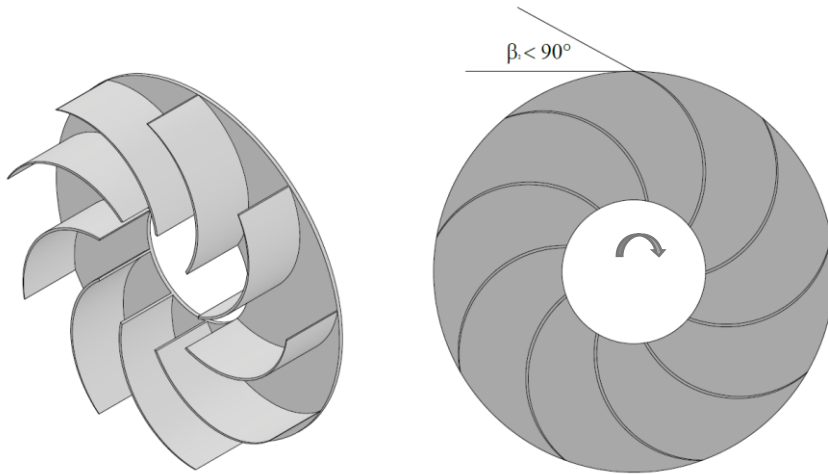
3.3.3. Geriye eğik kanatlı radyal fanlar

Geriye eğik kanatlar çarkın dönüş yönünün tersinde eğim verilmesiyle oluşmuştur. Öne eğik kanatlı radyal fanların kanat β_2 açıları 90° küçük olmaktadır. Bu kanatlara sahip olan fanlarda verim geniş bir aralığa yayılır. Literatürlerde, bu kanatlara sahip olan radyal fanların verimli çalışma aralığının maksimum debinin %40-%80 aralığı ile çalıştırılması gerekmektedir. Geriye eğik radyal fanların, büyük hacimli olmaları, ağırlıklarının fazla olması ve balans problemleri ise dezavantajlarıdır. Radyal fan kanat tipleri arasında en verimli çalışan kanat tipidir. Geriye eğik kanatlı pervanelerin güç

karakteristikleri, artan debi ile birlikte artar, ancak maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaya başlar.



Şekil 3.9. Geriye eğik kanatlı fan grubunda çıkış hız üçgen açıları (Matkap, 2006)



Şekil 3.10. Geriye eğik kanatlı radyal pervane çıkış açısı(β_2)

3.4. Temel Kavramlar

Debi (Q)

Fandan geçen havanın birim zamanda oluşturduğu durumdur. Hacimsel ve kütleli debi olarak ifade edilmektedir. Birimi m^3/s veya m^3/h olarak ifade edilmektedir (Çakmanus, 2009). Aşağıdaki hesaplama ile bulunabilir. Kesit alan (A) ile birimi m^2 , akışkanın hızı (v) ile gösterilmekte ve birimi m/s olmaktadır.

$$Q = v * A \quad (3.1)$$

Fan statik basıncı (P_{st})

Statik basınç, açık hava basıncına göre + veya – değer alabilen ve bir kanalın her yerinde hissedilen basınç türüdür. Fandaki statik basıncı bulmak için, fanın çıkışındaki (P_{st2}) ve girişindeki statik basıncın (P_{st1}) farkından fanın girişindeki dinamik basıncın çıkartılmasıyla elde edilir. Girişteki hava akış hızı genellikle düşük olmaktadır. Bu yüzden dinamik basınç ihmal edildiğinde aşağıdaki formül ile fan statik basınç elde edilir. Dinamik basınç (ΔP_d), akışkanın hareket halindeki kinetik basıncıdır (Karaokur, 2019).

$$P_{st} = P_{st2} - P_{st1} \quad (3.2)$$

Fanın toplam basıncı (ΔP_t)

Basınç, bir akışkanın birim alana uyguladığı dik kuvvet olarak tanımlanır. Fanın toplam basıncı, çıkışındaki toplam basınç (P_{t2}) ile girişindeki toplam basıncın (P_{t1}) farkından bulunur (Karaokur, 2019).

$$\Delta P_t = P_{t2} - P_{t1} \quad (3.3)$$

Basma yüksekliği (H)

Sistemdeki iki nokta arası basınç farkını temsil etmektedir. Birimi Pascal (Pa)'dır. Hava akışının dik girdiği kabul edildiğinde aşağıdaki formül ile hesaplanabilmektedir (Çakmanus, 2009).

$$H = \Delta P_t + \Delta P_{st} + \Delta P_z \quad (3.4)$$

3.5. Fan Verimliliğine Etki Eden Parametreler

3.5.1. Fan kanunları

Bir fan grubunun değişken çalışma koşullarında fanların hepsinin ayrı ayrı test edilmesinin sıkıntılı durumundan dolayı, fandaki devir sayısının, hava debisinin, basıncın, yoğunluğun ve pervane çapının arasındaki bağıntıları matematiksel denklemlerle belirlenmesi sağlanmaktadır. Bu matematiksel denklemlere fan kanunları (benzerlik kanunları) denilmek ve fan grubundaki fanların performansları tahmin edilebilmektedir.

Q : Fanın Hava Debisi (m^3/h)

N : Fanın Devir Sayısı,

D : Pervanenin Çapı (mm),

ρ : Yoğunluk (sistemde hava yoğunluğunun eşit olduğu durumlarda sabit kabul edilir)

HP_1 : Fanın Gücü (kW)

1- Fanın debisi, fanın devri ve pervane çapı ile orantılı olarak değişmektedir.

$$\frac{Q^1}{Q^2} = \frac{N^1}{N^2} \times \left(\frac{D^1}{D^2}\right)^3 \quad (3.5)$$

2- Sistemdeki toplam statik basınç, fan devri, pervane çapı ve yoğunluk ile orantılı olarak değişmektedir.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \times \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (3.6)$$

3- Fanın gücü, fan devri, pervane çapı ve yoğunluk ile orantılı olarak değişmektedir.

$$\frac{HP_1}{HP_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \times \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (3.7)$$

Fan kanunları kullanılarak, fanların farklı devirde çalıştıklarındaki, farklı büyüklükteki pervaneler ile çalıştıklarında, farklı yoğunlukta olan ortamlarda çalıştıklarında fanın göstereceği performans tahmin edilebilmektedir.

Bir fan sistemine ait fan verim hesabı(μ) denklemleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\mu_{\text{elektrik motor verimi}} (\%) = P_{\text{fanın mil gücü(kW)}} / P_{\text{şebekeden çekilen güç(kW)}} \quad (3.8)$$

$$\mu_{\text{tahrik sistem verimi}} (\%) = P_{\text{fanın mil gücü(kW)}} / P_{\text{elektrik motor gücü(kW)}} \quad (3.9)$$

$$\mu_{\text{fan verimi}} (\%) = P_{\text{akışkan güç(kW)}} / P_{\text{Fan mil gücü(kW)}} \quad (3.10)$$

$$\mu_{\text{sistem verimi}} (\%) = P_{\text{akışkan güç(kW)}} / P_{\text{elektrik motor gücü(kW)}} \quad (3.11)$$

$$\mu_{\text{toplam verim}} (\%) = \mu_{\text{tahrik sistem verimi}} (\%) * \mu_{\text{tahrik sistem verimi}} (\%) * \mu_{\text{tahrik sistem verimi}} (\%) \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklemlere bakıldığında fan sistemlerinde verimi olumlu yönde etkileyen etmenleri söylemek mümkündür.

a) Elektrik motorlarının yüksek verimli olanlarını kullanmak:

Kayıpların en aza indirgenmesi için yüksek verimli kullanmak önemlidir. Elektrik motor gücünün, mil gücü ile bağlantılı olması gerekmektedir. Mil gücü fazla ise elektrik motorun verimsizleşmesine hatta yanması sebep olabilir. Bu yüzden 4 kW mil gücüne %20, 15 kW mil gücüne %10 ve 15 kW güçten fazla mil gücüne %10 fazlalık eklenerek ihtiyaç olunan elektrik motor gücü bulunabilir. Çıkan sonuca eşit veya daha yüksek kW elektrik motor gücü seçilmelidir (Çallı, 2005).

b) Fan sisteminde pervane ve motoru bağlayan tahrik sistemini en verimli halde kullanmak:

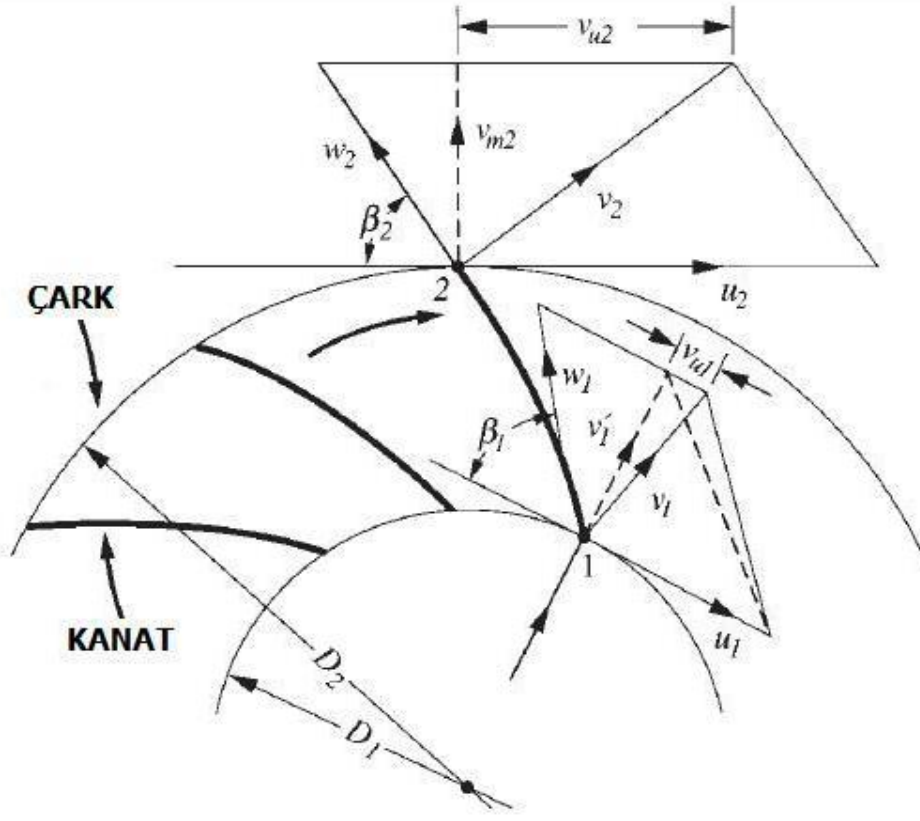
Doğrudan ve kayış-kasnak bağlantılı olarak iki tür tahrik sistemi vardır. Bir sistemde tahrik sisteminin, fan pervane sistemine bağlandığı bağlantı parçaları ne kadar az ise o kadar avantajlıdır. Doğrudan tahrik sistemi kullanmak avantajlı olmaktadır. Kayış-kasnak tahrik sisteminde sürtünmeden kaynaklı fazladan %10-15 oranında verim kayıpları meydana gelmektedir. Ayrıca Kayış-kasnak sistemi bir zamandan sonra esnemeye başlar ve ayarlama yapılması gerekir (Bleier, 1998). Mil gücü de önemlidir. Mil çapının standart boyutlara uygun olması maliyet olarak da verimlidir.

c) Fan sistemlerindeki (kanat, çap, salyangoz gövde vb.) parametreleri verimli kullanmak:

Bir fan sisteminde verimi en çok etkileyen önemli etkenler kanat yapısı, malzeme, fan gövdesi, gövde ve kanat arası boşluklar, gövde ve kanat çapları gibi birçok etken sıralanabilir.

3.5.2. Radyal fan parametreleri

Fan sisteminde parametre değerlerini belirlerken bazı kabuller yapılması gerekmektedir. Sonsuz sayıda kanat adeti, sonsuz küçüklükte kanat kalınlığı ve hava akışının kanatlara dik girdiği kabul edilmektedir (Eck, 1973).



Şekil 3.11. Santrifüj vantilatörde kanattaki giriş ve çıkış hız üçgenleri.

– **Kanat iç çapı (D_1) ve dış çapı (D_2):**

Fan verimliliğini etkileyen parametrelerden biri “ D_1 / D_2 ” oranıdır. Bu oranın belirli sınırlar arasında kalması gerekmektedir. Tasarımın ne kadar dikkatli de yapılsa da imalat aşamasındaki durumlar verimin düşmesine biraz da olsun sebep olacaktır. Literatürde genellikle D_1 / D_2 oranı 0,5 olarak alınması tavsiye edilmektedir.

Fandaki Q debisi, dönmekten olan pervaneye girerken burada bir kaçak debi oluşmaktadır. Bu kaçak debi ΔQ olarak belirtilmektedir.

Pervanenin içinden geçen debi $Q' = Q + \Delta Q$ olarak ifade edilir. Q' debisinden pervane ve salyangoz gövdenin arasındaki bağlantı açıklığından düşük basınca doğru akmaktadır.

$$Q' = Q + \Delta Q = Q / \eta_v \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (3.13)$$

C_s : emme hızı (m/s)

Q' : fan debisi (m³/s)

D_s : emme çap (m)

D_1 : giriş çap (m)

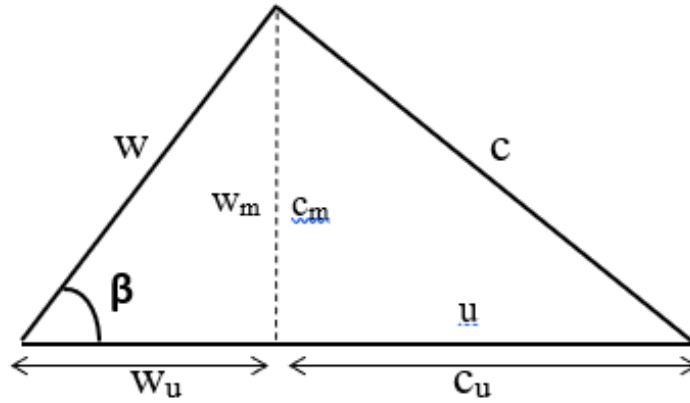
$$Q' = \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \cdot C_s \quad (3.14)$$

C_s hesaplamasında Pfeleiderer bağıntısı kullanılır.

$$C_s = \varepsilon \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (3.15)$$

– **Kanat giriş açısı (β_1) ve çıkış açısı (β_2)**

Kanat giriş ve çıkış açılarının verimlikte etkisi olduğu literatürde belirtilmiştir. Pervane radyal ise hız üçgeni ile hesaplanmaktadır.



Şekil 3.12. Kanat açılı üçgeni

$$\tan \beta_1 = W_m / W_u \quad (3.16)$$

$$\tan \beta_2 = C_m / W_u \quad (3.17)$$

– **Kanat eni (b):**

İmalat ve mekanik gerekliliklerinden dolayı kanat eninin belirli aralıklarda olması gerekmektedir. Kanat eninin artması veya azalmasıyla sistemdeki çıkış hava akışı değişmektedir.

– **Kanat giriş eni (b₁)**

Pervane içerisine giren havanın ortalama hızı kanat önünde ortalama meridyenel hız(C_{om}) ile belirttiğimizde, pervanenin miline paralel olarak giren havanın giriş hızı(C_s) kanat girişinde değişecektir.

Bu yüzden toplam debi:

$$Q' = \pi * D_1 * B_1 * C_{om} \quad (3.18)$$

$$b_1 = Q' / (\pi * D_1 * C_{om}) \quad (3.19)$$

C_{om} ve C_s arasında oransal bir bağlantı olmaktadır.

$$m = C_{om} / C_s \quad (3.20)$$

– **Kanat değişim oranı: (b₁ / b₂)**

Pervanedeki kanatların giriş kanat kalınlığı ile çıkış kanat kalınlığı arasındaki oranı vermektedir.

k₁; Çark girişinde kanat kalınlığından dolayı meydana gelen daralma etkisini düzeltme faktörü,

k₂; Çark çıkışında kanat kalınlığından dolayı meydana gelen daralma etkisini düzeltme faktörü,

$$B_1 = 1,1 * Q / C_{1m} * \pi * D_1 * k_1 \quad (3.21)$$

Süreklilik denklemi pervanenin çıkışı için uygulandığında;

$$B_2 = 1,1 * Q / C_{2m} * \pi * D_2 * k_2 \quad (3.22)$$

Kanat kalınlığı genellikle 2 ila 5 mm arasında değişmektedir. Kanatların giriş eni ve çıkış eni tasarıma göre farklılık gösterebilir.

Girişte kanat kalınlığı:

$$\sin \beta_1 = \frac{b}{b_1} \quad (3.23)$$

Çıkıştaki kanat kalınlığı:

$$\sin \beta_2 = \frac{b}{b_2} \quad (3.24)$$

– **Kanat sayısı (Z)**

Pervanelerde kanat sayısı Z, Faust eşitliğinden elde edilmektedir. Denklemdaki k değeri radyal fanlarda 4,5/5 arasında bir değerde alınmaktadır.

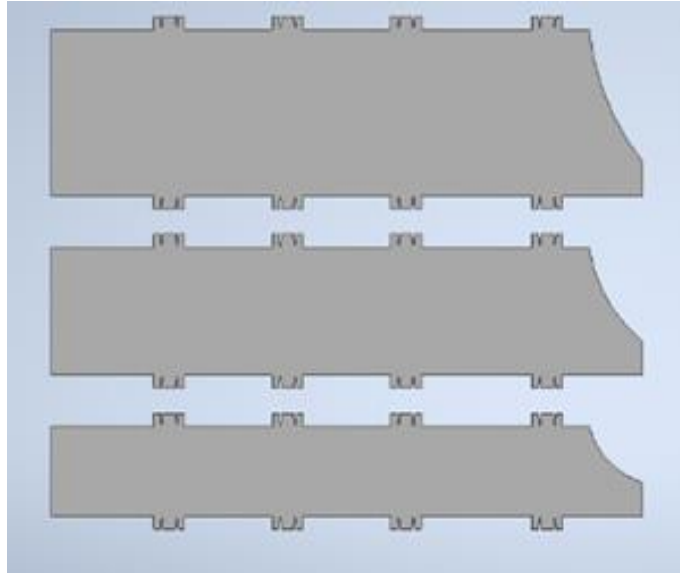
$$Z = k \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \cdot \sin\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right) \quad (3.25)$$

– **Kanat uzunluğu (L):**

Kanatın giriş ucuyla çıkış ucunun arasında doğru çizilmektedir. Bu doğru kanat uzunluğunu vermektedir.

– **Kanat genişliği (T):**

Kanatın üst ve alt sac bağlantısı arasındaki mesafeyi temsil eder.



Şekil 3.13. Örnek geriye eğik pervane kanatları genişliği

3.5.3. Salyangoz gövde parametreleri

Pervane ile çekilen basınçlı havanın istenilen bölgeye iletilmesi salyangoz gövde ile mümkün olmaktadır. Fan verimliliğinde salyangoz parametreleri de önem arz etmektedir. Salyangoz gövdesi aşağıdaki parametrelerden oluşmaktadır.

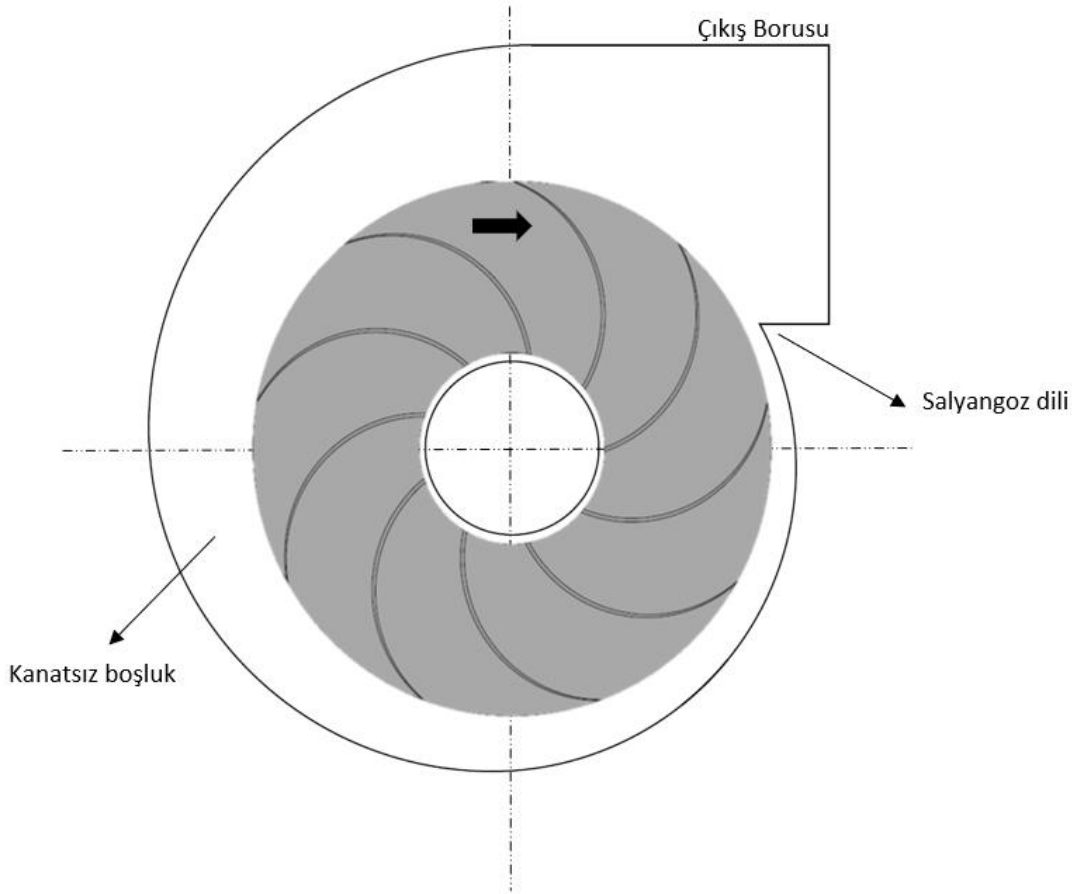
α : Dil açısı ($^{\circ}$)

r_{dil} : Dil yarıçapı (mm)

B: Salyangoz gövde kalınlığı (mm)

S_e : Pervane mili ve salyangoz gövde arasındaki boşluk (mm)

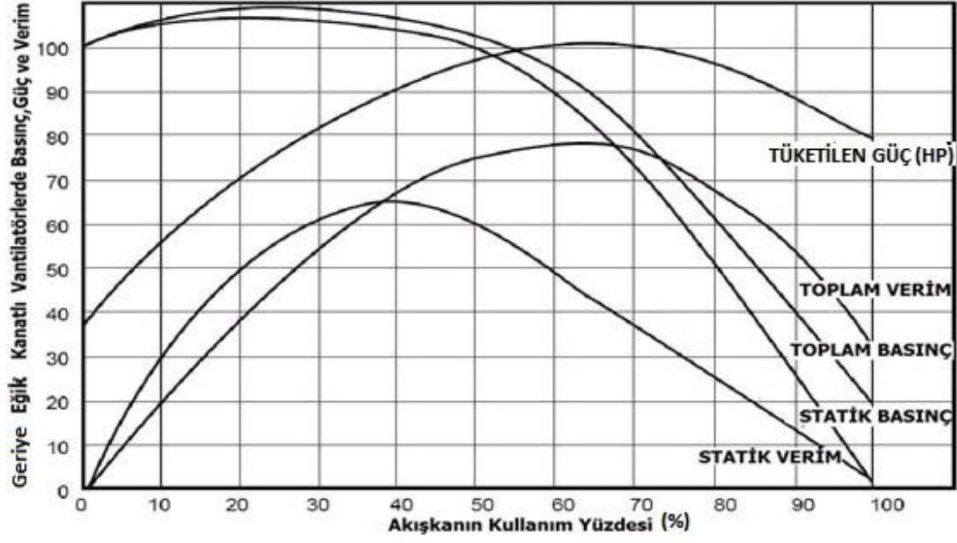
Genellikle literatürde en önemli salyangoz gövde parametresinin dil olduğu görülmüştür. Salyangoz dilinin yerinden ve geometrisinden dolayı hava çıkış hızını etkilediği, şok kayıplara ve akış yönünün bozulmasına sebebiyet verdiği sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 3.14. Salyangoz fan gövdesi teknik resim

3.6. Geriye Eğik Kanatlı Pervaneli Fanların Performans Karakteristikleri

Geriye eğik kanatlı fanların verimleri yüksektir fakat elektrik motoruna aşırı yüklenildiğinde balans problemleri yaşanabilir bu gibi durumlarda basınç ve verim düşmeye başlar. Bu düşüşten kaynaklı debileri güç artarken bile sabit kalabilir.



Şekil 3.15. Geriye eğik kanatlı pervaneli fanların performans karakteristikleri

4. METODOLOJİ

4.1. Deney Tasarımı

Deney tasarımı, girdiler ve çıktılar arasındaki nedensel ilişkilerin verimli ve etkili bir şekilde incelenmesini sağlayan yaklaşım türüdür. Değişkenliğin temel nedeni için uygun bir sistematik araştırma yapar ve bunlara ilişkin belgelenmiş kanıtlar sunar (Kavaz, 2019). Bu metotta hata ortaya çıkmadan, hatayı ortaya çıkaracak koşullar veya durumlar belirlendiğinden dolayı proaktif bir metot olarak bilinmektedir.

Yaygın olarak kullanılan bir deneysel tasarım, bir sistemin veya olayın önemli parametrelerini göz önünde bulundurarak ayrıntıları içeren matematiksel bir yaklaşımdır. Deney tasarımı, bir süreçteki önemli faktörleri belirlemek, bir süreçteki bir sorunu belirleyip düzeltmek ve etkileşimleri tahmin etme olasılığını belirlemek için kullanılan bir tekniktir.

Deneysel tasarımın avantajları; verimliliği ve kaliteyi artırmak, kaynakları verimli kullanmak, araştırma ve geliştirmeyi hızlandırmak ve kontrol edilemeyen performans faktörlerine duyarlılığı azaltmak olarak sıralanabilir (Savaşkan vd., 2010).

Deneysel tasarımın amacı, yeni ürün(-ler) ve proses(-ler) geliştirmek ve ürün performansını ve kaliteyi optimize etmektir (Taguchi ve diğ., 1999). Deney tasarımı İngiliz İstatikçi Sir Ronald Fisher tarafından 1920 yılında, tarımdaki verimi arttırmak amacıyla ortaya çıkmış ve daha da geliştirilmiştir (Şirvancı, 1997). Taguchi deney tasarımı ilk olarak 1980 yılının başlarında Amerika Birleşik Devleti'ne sunulmuştur. Amerika'nın tarım sektöründe lider konumuna gelmesinde büyük etkisi vardır. İlk zamanlarda performans iyileştirme ve tasarımı güçlendirme çalışmalarına odaklanılmıştır (Bahramı, 2022). Daha sonra kimya ve ilaç endüstrilerinde deney tasarımı yöntemi uygulanmıştır (Şirvancı, 1997).

Deney tasarımında, ürünün veya sürecin performansındaki durumların verimlilik analizinde yapılması gereken adımlar maddeler şeklinde aşağıda sıralanmaktadır.

1. Problemin tanımlanması,
2. Deney yapılış amacı belirlenmesi,
3. Ölçülecek olan parametrenin ve deneyi kimin, ne zaman ve nasıl yapacağını belirlenmesi,

4. Deney sırasında kontrol edilecek faktörlerin yani ölçülecek parametrelerin belirlenmesi,
5. Her faktör için seviyesinin belirlenmesi,
6. Deneylerin deneme sayısının saptanması,
7. Deneyin yapılması,
8. Verilerin analiz edilmesi,
9. Sonuçların yorumlanıp, istenmeyen etkilerin ortadan kaldırılması ve optimum çözümün saptanması (Straker, 1995).

4.2.Taguchi Metodu

Taguchi yöntemi, tasarım yoluyla kaliteyi sağlamaya çalışan yaklaşımlar kategorisine girer, bu nedenle süreç / ürün kalite sapmalarına neden olan kritik değişkenleri (veya gürültüleri) teşhis eder ve kontrol eder.

Taguchi yöntemi, kesirli faktöriyel tasarımın bir varyasyonudur. Bu tasarım ile ifade edilen deney sonucu elde edilen tüm parametrelerin kombinasyonlarının denenmesi yerine, sadece bir kısmı ortogonal diziler yapılır ve en iyi performans karakterizasyonunu veren faktörlerin seviyelerini bulmak mümkündür (Şirvancı, 1997).

Taguchi, kendi adını taşıyan bir yaklaşımla, testlerin veya deneylerin yürütülmesinde ve değerlendirilmesinde verimliliği artıracak bir çözüm geliştirmiştir (Ross, 1989). Taguchi yaklaşımı ile test veya deneyler yapılırken detaylı analiz ve değerlendirme miktarını önemli ölçüde azaltmak mümkün hale gelmiştir. Taguchi metodu yüksek kalitede sistem tasarımı için de faydalı bir tekniktir.

Taguchi'nin kalite felsefesi, genelde yedi adımda açıklanır.

1. Bir ürün için üretim kalitesinin arttırmanın amacı, ürünün kullanımında çevrede meydana gelecek kayıpları en aza indirmektir.
2. Sektörlerdeki rekabet, işletmelerin yerini koruyabilmesi için kalitesini sürekli geliştirmek ve atik davranması gerekmektedir.
3. Kaliteyi sürekli geliştirmenin gerektiğini, ürün performansındaki sapmaları en aza indirmek gereklidir.

4. Ürünün performansındaki tutarsızlık veya ani değişimlerden kaynaklı müşteri kaydı, performansı belirleyen karakteristiklerin hedef değerden sapmalarının karesi ile orantılıdır.
5. Ürünün nihai kalite değeri ve üretim maliyeti, ürünün tasarım yelpazesine ve üretim sürecine bağlıdır.
6. Bir ürün veya sistemin(prosesin) performansındaki değişimi aza indirmek için, ürün veya sistemin(prosesin) performansını dolaylı olarak etkileyen faktörlerin belirlenmesi gereklidir.
7. Ürün veya sistemin(prosesin) parametrelerinin değişim performanslarının azaltılması için istatistiksel deney tasarımı kullanılır (Dehnad, 1989).

Taguchi' nin ürün ve süreç tasarımındaki farklı seviyelerdeki her bir deneysel değişkeni içeren standart bir ortogonal dizi kullanılarak, karşılık gelen sinyal-gürültü oranı (S/N), optimum ayarları ve tasarım geçerliliğini belirlemek için varyans analizine dayalı olarak hesaplanır ve analiz edilir (Madan ve Wasewar, 2017); (Santra ve diğ., 2014).

4.2.1. Ortogonal dizi

Ortogonal dizi, belirli miktardaki deneme için mümkün olduğu kadar çok faktörü değerlendirmek üzerine tasarlanmış matris formunda dizilerdir. Matrisin sütun değerleri deneylerimizde çalışacak faktörleri temsil eder iken, satır değerleri bu faktörlerin seviyelerini temsil etmektedir (Zhang ve Dear, 2017).

Faktör: Deneylerde kalite üzerinde etkisi bulunan kontrol edilebilir veya kontrol edilemeyen değişkenler olarak tanımlanmaktadır.

Seviye: Kalite üzerinde etkili olan eşit aralıklı şekilde denenen değerler olarak tanımlanmaktadır (Taylan, 2009).

Ortogonal dizi, $L_a(b)^c$ şeklinde ifade edilmektedir (Huang ve diğ., 2016).

a: faktör kombinasyon sayısı,

b: faktörlerin seviye sayısı,

c: deneydeki faktör sayısı,

Tablo 4.1. Örnek Taguchi $L_4(2)^2$ ortogonal dizisi

Deneyler	Faktör ve Seviyeleri	
	A	B
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

4.2.2. S/N oranı

S/N yani sinyal/gürültü oranı Taguchi tarafından geliştirilmiş ve bu oran istatistiksel performans ölçüsünü temsil etmektedir. Deneylerden çıkan sonuç verileri S/N oranına çevrilerek değerlendirilmesi yapılır. Sinyal faktörü sistemdeki gerçek değeri, gürültü faktörü ise deney tasarımına katılamayan fakat deney sonucuna etki eden faktörleri temsil etmektedir.

S/N yöntemi ile hedef değere ulaşmak ve minimum sapmayı sağlamak hedeflenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda bazı yaklaşım fonksiyonları bulunmaktadır.

S/N oranının 3 farklı form yaklaşımı bulunmaktadır.

Yaklaşım 1: En küçük değer en iyidir.

$$S/N = -10\log(1/n * \sum_{i=1}^n x_i^2) \quad (4.1)$$

Yaklaşım 2: En büyük değer en iyidir.

$$S/N = -10\log(1/n * \sum_{i=1}^n 1/x_i^2) \quad (4.2)$$

Yaklaşım 2: Nominal değer en iyidir.

$$S/N = -10\log(\sum_{i=1}^n x_i^2 / S^2) \quad (4.3)$$

n =deney sayısı

x_i =deneylerde ölçülen veri değeri (Ross, 1989; Yang ve Tarng, 1998).

4.2.3. ANOVA (Varyans) analizi

Varyans analizi, ANOVA analizi olarak da bilinmektedir. Belirlenen ve kontrol edilen parametrelerin ne derecede önemli olduğunu tahmin eden ve anlamlı bir etkisi olup olmadığı sonucunun çıkarılmasını sağlayan analiz türüdür (Gaaz ve diğ., 2017). ANOVA bir hipotez testidir.

Anova testini uygulamak için; bağımlı değişken verileri nicel olmalı, veriler normal dağılım göstermeli ve grup varyansları homojen olmalıdır.

Aşağıdaki tablo örnek anova analiz sonucu tablosudur. Bu tabloda değerlerin açılımı şöyledir:

Adj SS: Kareler toplamı,

Adj MS: Ortalama karelerin toplamı,

F: İstatistik testi,

P: İstatistiksel testi (Nandagopal ve Kailasanathan, 2016).

DF: Toplam serbestlik derecesi

Tablo 4.2. Örnek anova analizi tablo içeriği

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
1-Faktör						
2-Faktör						

ANOVA test sonuçlarında Adj SS ve Adj MS değerleri bize deney sonuçlarını etkileyen faktörlerin oranlarını belirtmektedir. Bu değerler ile modele hangi faktörün eklenmesinde bir iyileştirme olup olmadığını anlayabiliriz. P değeri faktörlerin anlamlı etki oluşturup oluşturmadığını göstermektedir. P değeri 0,05'ten küçük olması araştırmada o değer anlamlı olduğunu ifade etmektedir. ANOVA analizinin temeli F oranına bağlıdır. Bütün faktörlerin aynı anda karşılaştırılmasını sağlayan değerdir. Tablodaki DF değeri serbestlik derecesini göstermektedir. DF değeri grup sayısından 1 çıkarılması ile elde edilir.

5. UYGULAMA

5.1 Deney Tasarım Adımlarının Uygulanması

5.1.1. Problem tanımı

Ekonomik sürdürülebilirlik amacıyla, makine/teçhizatın olabildiğince çalışır durumda tutulması ve gereğinden fazla veya beklenenden fazla yıpranmaması sağlanmalıdır. Mühendislik, araştırma ve geliştirme çalışmalarında ulaşılması gereken temel hedef, tasarlanan sistemin ve geliştirilecek ürünün maksimum verime sahip olmasıdır. En iyi sonuçların alınacağı koşulları ortaya çıkarmak için verimliliği tanımlayıcı özellik belirlenir ve bu özelliği etkileyen faktörler araştırılır. Daha sonra bu faktörlerin verimlilik üzerindeki etkileri belirlenir ve uygun kombinasyonu bulmak için deneyler yapılır. Yapılan deneyler sonucunda doğru sorular sorulup doğru cevaplar alınarak optimal seviye belirlenir.

Bu çalışmada fan sistemlerinin optimizasyonu deney tasarımı ile ele alınmıştır. Fan sistemlerinin optimizasyonunu sağlamakta şirketlerin operasyonel iyileştirme ve sistem güvenilirlik düzeyini sağlama amaçları içerisindedir. Farklı ölçülerde pervane tasarlanmıştır. Daha sonra, bu tasarlanan pervanelerin verimliliği etkileyen parametrelerindeki deneysel ölçümler kaydedilmiştir. Belirlenen parametreler kullanılarak geriye eğik kanatlı radyal fan için optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model test edilmiş ve üzerinde geriye eğik kanatlı bir kanatlı radyal fanın ana geometrik parametreleri belirlenmiştir. Kabul edilmiş geometrik parametreleriyle pervanenin dış çapı, pervanenin kalınlığı, kanat sayısı, kanat yüksekliği ve kanat şekil geometrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan optimum geometrik yapı maliyetlerin azalmasında, verimliliği ve kalitenin artmasında kayda değer etki sağlayacaktır.

5.1.2. Deney amacının ve hipotezlerin belirlenmesi

Bu çalışmada aynı koşullarda çalışan, birden fazla farklı özelliklere sahip pervanelerin maksimum verimi vereceği noktayı bulabilmek ve hipotezlerimizi doğrulamak deneylerin yapılmasındaki amaçtır.

Tez çalışmasında hipotezler;

H1: Kanat sayısının artması fan verimliliğini arttırırken, optimum kanat sayısına geldiğinde verimlilik azalacaktır.

H2: Pervanenin kanat genişliği, kanat sayısından daha etkili bir faktördür.

H3: Pervanelerin verimliliğini en büyük oranda etkileyen faktör voltaj değeri yüzdesidir.

H4: Voltaj değeri(%) faktörünün etkisi anlamlıdır.

H5: Kanat genişliği(mm) faktörünün etkisi anlamlıdır.

H6: Kanat sayısı faktörünün etkisi anlamlıdır.

5.1.3. Parametrelerin belirlenmesi

Çalışma sırasında verimliliği etkileyen parametreler salyangoz fan, pervane ve elektrik motor özellikleridir. Çalışmamızda salyangoz fan ve elektrik motorumuz bütün deney düzenekleri için sabit olması planlanmıştır. Verimliliği etkileyen en önemli faktörlerden diğeri ise pervanenin yapısal özellikleridir. Parametreler pervane boyutlarından ve elektrik motorunun farklı yüzdesel voltaj değerlerinde gösterdiği deney sonuçlarından oluşmaktadır.

5.1.4. Deney sırasında verimliliği etkileyen parametrelerin belirlenmesi

Faktörlerin hangi seviyelerinin en verimli proses koşullarını sağlayacağını öğrenmek ve faktörlerin her birinin etkisini tespit etmekte, bu faktörler kadar performansında değerlendirilmesi için hangi ölçünün kullanılacağı da önemlidir. Radyal fan sistemleri için genel olarak verimlilik ölçüsü olarak salyangoz fan girişindeki hava akış hızı göz önüne alınmıştır. Verimliliğimizi havanın giriş hızının en büyük değerde olması istenmektedir.

5.1.5. Faktör ve seviyelerin belirlenmesi

Her faktörün seviyeleri deneyden önce belirlenmelidir. Faktörlerin seviyelerini belirlerken, faktörün elde etmeye çalıştığımız değer üzerinde kaç tür etkisinin olabileceğini hesaba katmak gerekir. Bir faktörün test edilebilmesi için en az iki aşamalı olması gerekir. Alternatifi olmayan bir faktörün serbestlik derecesi sıfırdır ve bu tür faktörler gürültü faktörleridir.

Kontrol edilecek faktörler belirlendikten sonra bu faktörlerin alacağı en yüksek ve en düşük değerlerin belirlenmesi ve hangi seviye aralıklarında test edilmesi gerektiğine karar verilmesi gerekmektedir. Salyangoz fandaki hava giriş hızının, elektrikli

motorun varyak makinası sayesinde %20-%40-%60 ve %80 değerlerinde çalıştırıldığı an ki ölçüm değerleri analiz değerlerimizi oluşturmaktadır. Diğer iki faktör ise pervanenin kanat sayısının 6-8-9 ve 10 adet olması, kanat genişliğinin ise 35-50-65 ve 85 mm değerlerinde göstereceği değerleri içerecektir. Analiz esnasında diğer bütün faktörler sabit olmaktadır. Aşağıdaki tablodaki değerlere sahip geriye eğik kanatlı radyal fan pervaneleri üretilmiştir.

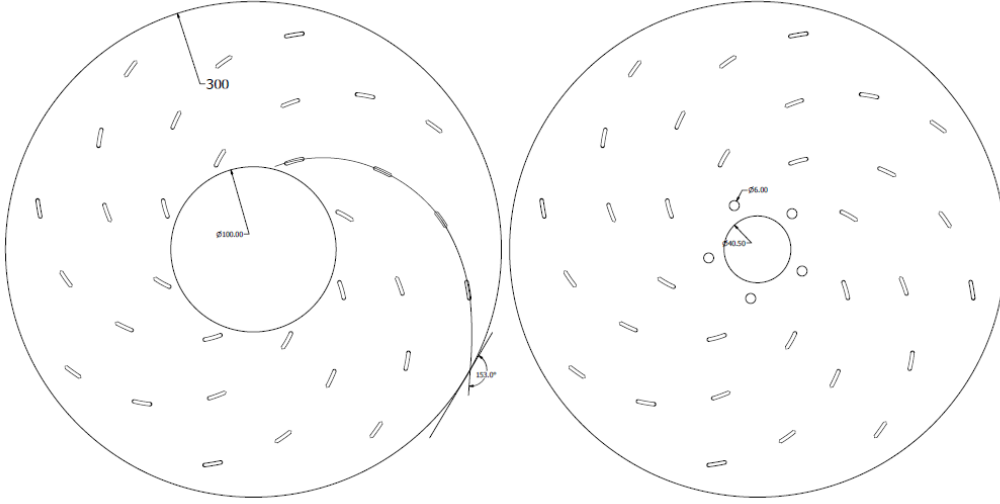
Faktör: Voltaj Değeri (%), Kanat Genişliği(mm), Kanat Sayısı(adet),

Seviye: (20-40-60-80), (35-50-65-85), (6-8-9-10),

Tablo 5.1. İmalatı yapılan pervaneler

	Kanat Sayısı (adet)	Kanat Genişlikleri (mm)
1. Pervane	6	35
2. Pervane	6	50
3. Pervane	6	65
4. Pervane	6	85
5. Pervane	8	35
6. Pervane	8	50
7. Pervane	8	65
8. Pervane	8	85
9. Pervane	9	35
10. Pervane	9	50
11. Pervane	9	65
12. Pervane	9	85
13. Pervane	10	35
14. Pervane	10	50
15. Pervane	10	65
16. Pervane	10	85

Kanat eğrilerinin çiziminde nokta-nokta kanat çizim metodu kullanılmıştır. Bu metot ile giriş ve çıkış çapları arasında belirli aralıklarla kanat çapı dilimlere ayrılır. Bu dilimler ile eğrilik oluşturulmasıyla oluşan şekil ile kanat şekli oluşmaktadır. Pervane çapı 300 mm olarak giriş çapı ise 100 mm ile çizilmiştir. Pervanenin mil giriş çapı ise 40.5 mm olmaktadır. Pervane üst ve alt sacları 3 mm ST37 kalitesinde sacdan, kanatlar ise 2 mm ST37 kalitesindeki sacdan imal edilmiştir. Kanat çıkış açısı 27° olmaktadır.

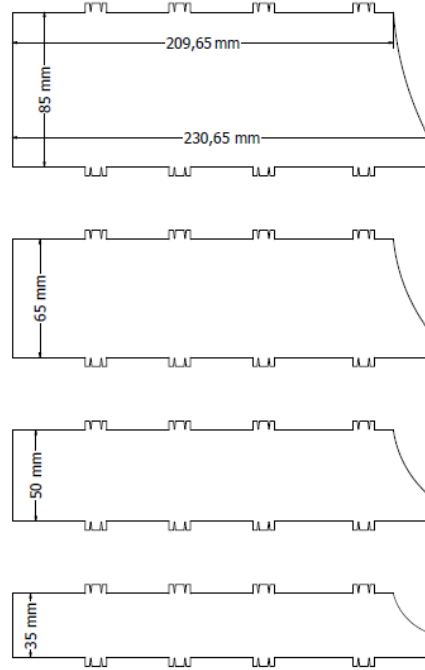


Şekil 5.1. Pervane gövde ve kanat çizimi



Şekil 5.2. Lazer kesim yapılan pervane plakaları

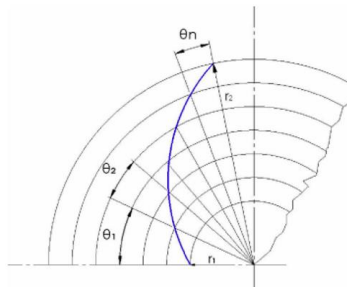
Pervanelerin kanat genişlikleri aşağıdaki Şekil 5.3 de görüldüğü gibi 85 mm, 65 mm, 50 mm ve 35 mm'den oluşmaktadır. Alt kanat uzunluğu 230,65 mm, üst kanat uzunluğu ise 209,65 mm'dir.



Şekil 5.3. Kanat genişliklerinin çizimi



Şekil 5.4. Lazer kesim yapılan kanat plakası



Şekil 5.5. Nokta-nokta kanat çizim metodu örneği (Matkap, 2006)

Kanat eğrilikleri bütün kanatlarda sabit olarak tutulmuştur. Kanat eğriliklerine göre kalıp hazırlanmış ve kalıp ile kanatların hidrolik pistonlu sistem ile bükümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6. Pervane kanatlarının istenilen eğimde büküm kalıbında bükülmesi ve yerleştirilmesi işlemi



Şekil 5.7. İmalatı biten pervanelerden örnekler

5.1.6. Ortogonal dizi ile deney sayısının saptanması

Faktör ve seviyeleri belirlenen çalışma Minitab programında $L_{16}(4)^3$ ortogonal dizi ile deney kombinasyonları oluşturulmuştur. Aşağıdaki Tablo 5.2. deney kombinasyon aralıklarını göstermektedir.

Tablo 5.2. Taguchi $L_{16}(4)^3$ ortogonal dizisi

Deneyler	Faktör ve Seviyeleri		
	Kanat Sayısı	Kanat Genişlikleri(mm)	Voltaj Değeri(%)
1	6	35	80
2	6	50	60
3	6	65	40
4	6	85	20
5	8	35	20
6	8	50	40
7	8	65	60
8	8	85	80
9	9	35	40
10	9	50	20
11	9	65	80
12	9	85	60
13	10	35	60
14	10	50	80
15	10	65	20
16	10	85	40

5.1.7. Deney düzeneğinin hazırlanması ve yapılması

Deneylerin yapılması sırasında işleme alınan malzemeler ağırlıklı olarak ST37 kalitesinde sacdan oluşmaktadır. Deneylerde salyangoz fan üzerinde gerçekleştirilecek hava akış hızı ölçümü için anemometre ve elektrik motorunun sabit voltaj ayarlarının yapılması için varyak kullanılacaktır. Deney sonuçları bilgisayar yardımıyla analiz yapılması üzerine Excel üzerine kayıt edilecektir. Her deneyde elektrik motorunun voltaj değerini istenilen yüzde değerler olan 20-40-60 ve 80 oranlarında sabitlenmiş ve 16 adet farklı kanat sayısı ve genişliğine sahip pervaneler için 9 adet ölçüm değerleri kaydedilmiştir. Bu deneyler yapılırken deneyi etkileyecek diğer parametrelerin hepsi sabit olmaktadır. Yapılan deneylerin ortalaması alınarak deney sonuçları belirlenmiş ve “HavaGH” satırı altında m/s olarak programa kayıt edilmiştir.

- Deneyde kullanılacak ekipman ve makinaların hazırlanması:

Anemometre: Rüzgar veya hava akış hızını ölçen cihazlara denilmektedir. Anemometrenin ölçüm şekline göre fazlaca çeşitleri vardır. Genel olarak en sık kullanılan çeşidi pervaneli anemometrelerdir. Anemometre ölçüm birimi m/s olmaktadır. Salyangoz fana hava girişi ve hava çıkış akışını ölçmek için kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Pervane tipi anemometre AS806

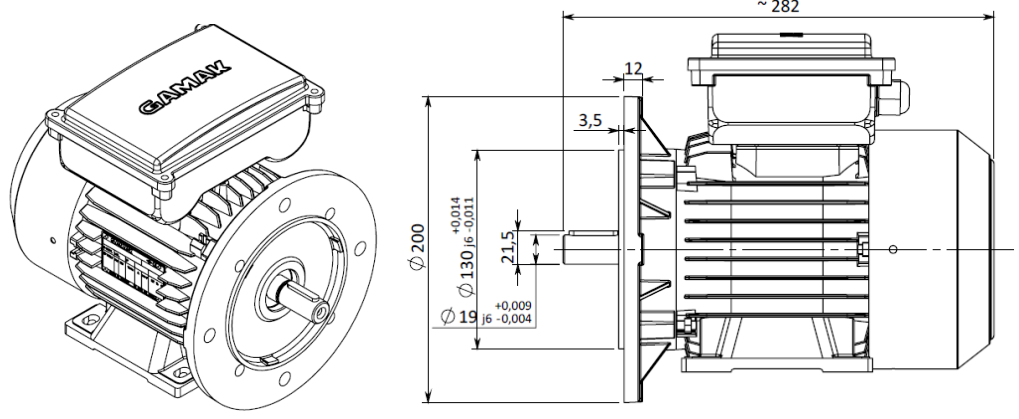
Varyak: Makinalardaki mevcut şebeke voltajını istenilen voltaj değerine çeviren elektrikli cihazlara denilmektedir. Ayarlanabilir oto transformatör olarak da bilinmektedir. Tense marka varyak deney aşamasında voltaj ayarı için kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Varyak

- Deneydeki güç düzeneğinin hazırlanması:

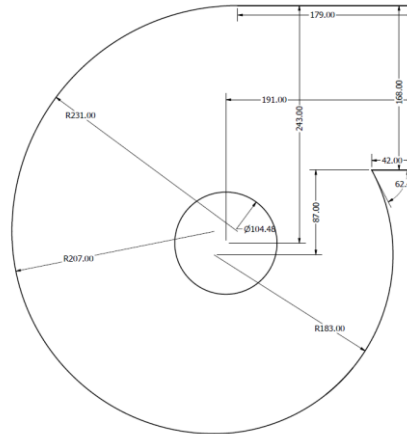
Gamak marka, 1.1 kW, 3000 devir ve yüksek verimli grupta yer alan elektrik motoru kullanılmıştır.



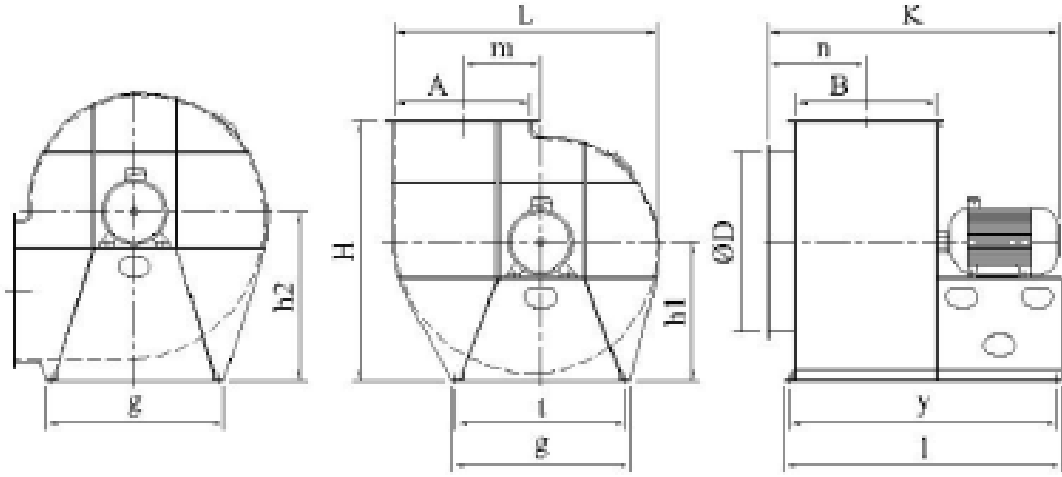
Şekil 5.10. Gamak marka, 1.1 kW ve 3000 devir elektrik motora ait teknik resim

- Deneydeki salyangoz fan düzeneğinin hazırlanması:

Bu çalışmada analizler Şekil 5.11. ve Şekil 5.12. de belirtilmiş ölçüdeki salyangoz fan ile yapılmıştır. Salyangoz dil açısı $\alpha: 62.4^\circ$, dil yarıçapı $r_d: 0,05$ mm, salyangoz gövde kalınlığı $B: 2$ mm ST37 kalitesinde sacdan imal edilmiştir. Salyangoz gövdenin eni 140 mm olmaktadır. Pervanenin mil bağlantısı ile ve salyangoz gövde arasındaki boşluk $S_c: 35$ mm olmaktadır. Pervanenin en düşük dil açısı kısmında gövdeden 10 mm, en uzak mesafe ise 50 mm mesafe bulunmaktadır.



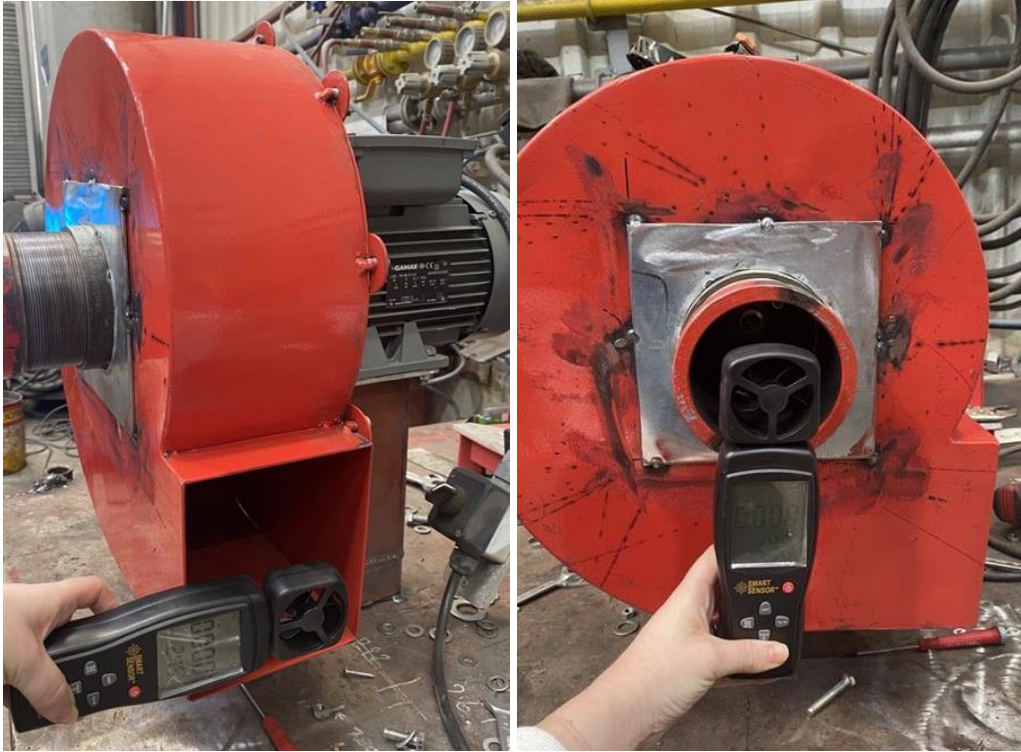
Şekil 5.11. Salyangoz fan gövdesine ait teknik resim



Şekil 5.12. Deneylerde kullanılan salyangoz fana ait teknik resim

Tablo 5.3. Deneylerde kullanılan salyangoz fana ait teknik resim ölçüleri

A	B	ØD	m	n	l	y	g	t	h1	h2	K	L	H
168	140	95	159	90	382	382	100	120	219	243	412	438	410



Şekil 5.13. Deney düzeneğinin görüntüleri

Deney sonuçlarından anemometre ile ölçümlerinden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak, Minitab programı üzerinde HavaGH sütunu altında programa kaydedilmiştir.

Tablo 5.4. Taguchi ortogonal dizayn $L_{16}(4)^3$ deney sonuçlarının Minitab programına girilmesi

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L16(4^3)

Factors: 3

Runs: 16

Columns of L16(4^5) array: 1 2 3

↓	C1	C2	C3	C4	C5
	Kanat Sayısı	Kanat Genişliği	Voltaj Değeri	HavaGH	
1	8	35	20	19,31	
2	8	50	40	38,39	
3	8	65	60	46,47	
4	8	85	80	51,05	
5	9	35	40	35,30	
6	9	50	20	22,94	
7	9	65	80	48,40	
8	9	85	60	49,06	
9	10	35	60	34,04	
10	10	50	80	41,86	
11	10	65	20	23,59	
12	10	85	40	32,53	
13	6	35	80	34,20	
14	6	50	60	42,78	
15	6	65	40	42,46	
16	6	85	20	18,23	

5.1.8. Deney verilerinin toplanması ve analiz edilmesi

Gürültü faktörü (N), tasarımın hedef değerden sapmasına sebebiyet veren tüm değişkenlerdir. Bu yüzden S/N oranındaki N faktörü ne kadar küçük olursa istenilen hedefe o kadar yaklaşmış olunmaktadır. Bu çalışmada da amaç S/N oranını maksimize etmekle birlikte, belirlenmiş olan parametrelerin fan verimliliği için deney tasarımı yöntemi ile optimize edilmesini içermektedir. S/N oranında en büyük en iyidir yaklaşımı kullanılacaktır. Minitab programında analiz edilmiştir. Analizden elde edilen ortalama ve S/N oranı grafik çizdirilmesinde kullanılacak sayısal veriler, aşağıdaki tabloda C5 ve C6 sütunlarında verilmiştir.

Tablo 5.5. Taguchi ortogonal dizayn $L_{16}(4)^3$ modelinde S/N ve ortalamaların Minitab programı ile elde edilmesi

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C
	Kanat Sayısı	Kanat Genişliği	Voltaj Değeri	HavaGH	SNRA1	MEAN1	
1	8	35	20	19,31	25,7156	19,31	
2	8	50	40	38,39	31,6844	38,39	
3	8	65	60	46,47	33,3435	46,47	
4	8	85	80	51,05	34,1599	51,05	
5	9	35	40	35,30	30,9555	35,30	
6	9	50	20	22,94	27,2119	22,94	
7	9	65	80	48,40	33,6969	48,40	
8	9	85	60	49,06	33,8146	49,06	
9	10	35	60	34,04	30,6398	34,04	
10	10	50	80	41,86	32,4360	41,86	
11	10	65	20	23,59	27,4546	23,59	
12	10	85	40	32,53	30,2457	32,53	
13	6	35	80	34,20	30,6805	34,20	
14	6	50	60	42,78	32,6248	42,78	
15	6	65	40	42,46	32,5596	42,46	
16	6	85	20	18,23	25,2157	18,23	

Taguchi analizin sonuçlarından ‘Rank’ değeri parametre değişkenlerinin önem sırasını vermektedir. S/N tablosuna göre seçimlerimize etki eden değişkenleri belirlememizde önemli rol oynamaktadır. Bu durumda en etkili parametremizin voltaj değeri(%) daha sonrasında kanat genişliği (mm) ve son parametre olarak kanat sayısının olduğu

‘Rank’ değerinden görülmektedir. Aynı etkisinin ortalama değerler içinde değişmediği görülmektedir.

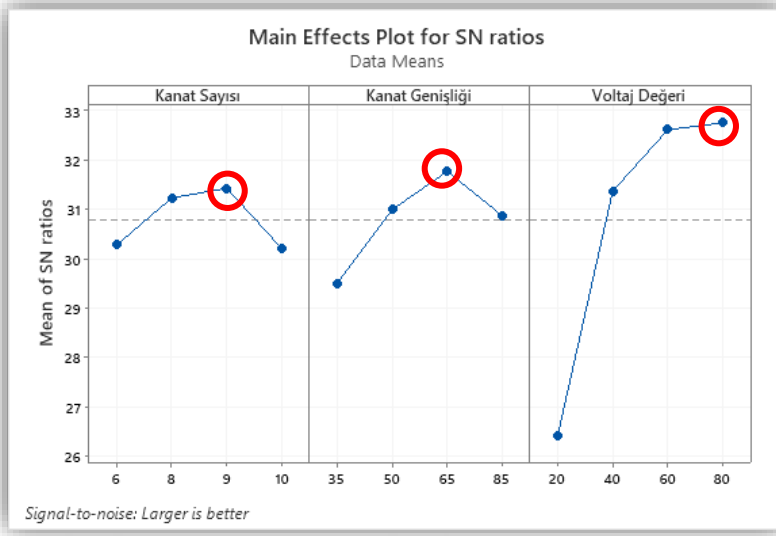
Tablo 5.6. S/N oranları sonuç tablosu

Level	Kanat Sayısı	Kanat Genişliği (mm)	Voltaj Değeri (%)
1	30,27	29,50	26,40
2	31,23	30,99	31,36
3	31,42	31,76	32,61
4	30,19	30,86	32,74
Delta	1,23	2,27	6,34
Rank	3	2	1

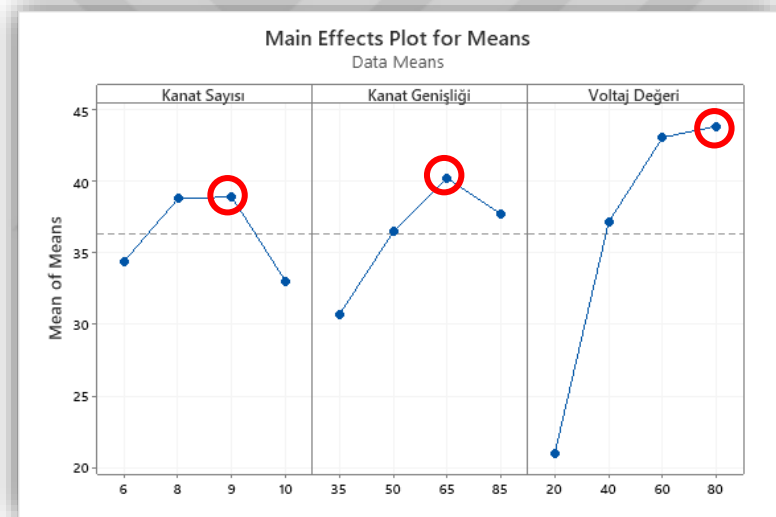
Tablo 5.7. Ortalama değerler için sonuç tablosu

Level	Kanat Sayısı	Kanat Genişliği (mm)	Voltaj Değeri (%)
1	34,42	30,71	21,02
2	38,80	36,49	37,17
3	38,92	40,23	43,09
4	33,01	37,72	43,88
Delta	5,92	9,52	22,86
Rank	3	2	1

Verilerin analizinde faktörlerin ortalama üzerindeki etkilerini görebilmek amacıyla grafiksel yöntem kullanılmıştır. Grafiksel yöntem metodu ile 1. – 2. – 3. ve 4. seviyedeki değerlerin ortalamaları bulunup, bu değerlerin en büyük ve en küçük değerleri belirlenip, bütün ortalama değerleri kapsayan düşey yönde bir çizgi çizilir. Belirlenen faktörlerin hepsi seviyelerdeki ortalamaları grafikte işaretlenip, işaretli noktalar birleştirilerek grafik oluşturulur. Noktaların bazıları ortalama çizgisinin altında ve üzerinde yer almaktadır. Şekil 5.14. ve Şekil 5.15. grafikler incelendiğinde voltaj değeri(%) faktörünün kuvvetli bir etkisi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.14. S/N oranı için etkiler grafiği



Şekil 5.15. Ortalama değerler için etkiler grafiği

ANOVA analizinde faktör kodlaması olarak (-1; 0; +1) kullanılmıştır. Analiz %95 güvenirlilik oranında sonuç vermesi istenmektedir. Tablo 5.8. analiz edilen 3 faktörün fanlardan alınan hava giriş hızına etki oranlarını göstermektedir.

DF değeri, modeldeki grup sayısından 1 çıkarılması ile bulunmaktadır. Grup sayısı k ile gösterildiğinde, gruplar arası değişime ilişkin serbestlik derecesi k-1 olacaktır. Örneğin: 4 seviyeli modelden 1 sayısı çıkarılarak 3 elde edilmiştir.

Adj SS(kareler toplamı) değerinden yola çıkarak, voltaj değeri faktörünün %78,31 oranında, kanat genişliğinin %11,29 oranında ve kanat sayısının verimlilik üzerinde %6,39 oranında etkisi olduğu görülmektedir.

Adj MS(ortalama kareler toplamı) değeri, Adj SS(kareler toplamı) değerinin DF(serbestlik derecesi) değerine bölünmesi ile elde edilir (Stat-Ease, 2023).

F değeri ise; her faktör için bulunan Adj MS değerinin, hata(error) Adj MS değerine bölünmesi ile bulunur (Stat-Ease, 2023). Örneğin: Tablo 5.8. de kanat sayısı faktörünün 36,75 değerinin 11,51 değerine bölünmesi ile 3,19 değeri elde edilmektedir. Karelerin hata toplamı, artıkların karelerinin toplamıdır. Tahmin edicilerin açıklamadığı verilerdeki varyasyonu nicelleştirir.

P-Value değerinin 0,05 değerinden küçük olması o faktörün anlamlı düzeyde etkisi olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Voltaj değeri ve kanat genişliği anlamlı düzeyde etkisi olmaktadır (Stat-Ease, 2023).

Tablo 5.8. Varyans analizi sonuçları

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kanat Sayısı	3	6,39%	110,26	36,75	3,19	0,1053
Kanat Genişliği	3	11,29%	194,84	64,95	5,64	0,0351
Voltaj Değeri	3	78,31%	1351,20	450,40	39,12	0,0002
Error	6	4,00%	69,08	11,51		
Total	15	100,00%	1725,38			

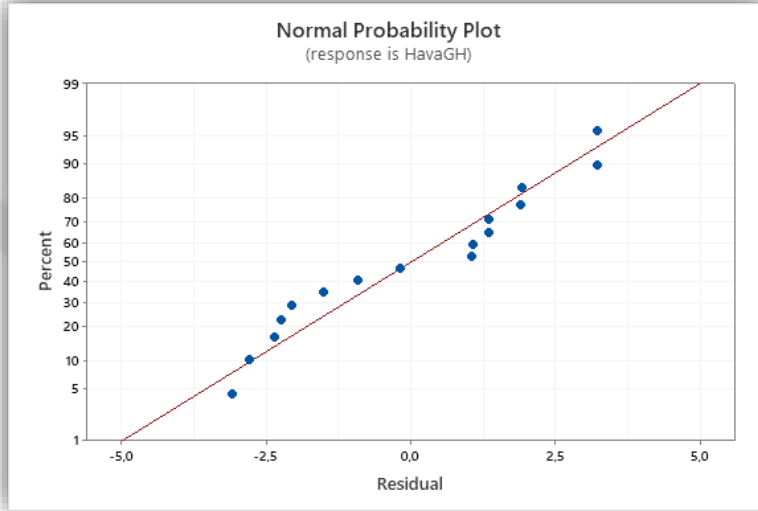
Tablo 5.9. de modelin özet tablosu yer almaktadır. S değeri standart sapmayı ifade etmektedir. Eğer her faktörün standart sapması 3,39306 değerinden düşük değerler olması daha iyi uyumu ifade ederken, yüksek değerler kötü uyumu ifade etmektedir.

R-sq değeri %96 model güvenilirliğini ifade etmektedir. R-sq(adj) modelin örneklem ile değil evrenden üretilmiş olmasıyla %89.99 değerinde modeli açıklayacağını göstermektedir. R-sd(pred) değeri veri setinden her bir gözlem çıkarıldığında modelin tahmin edilme yüzdesini göstermektedir (Stat-Ease, 2023).

Tablo 5.9. Model özet tablosu

S	R-sq	R-sq(adj)	Press	R-sq(pred)
3,39306	96,00%	89,99%	491,217	71,53%

Aşağıdaki grafikte elde edilen anemometre ölçüm değerlerinin dağılımı gösterilmektedir. Çizgi çevresinde dağılım göstermeleri verilerin dağılımının normal dağılım olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. Verilerin dağılım grafiği

Model çıktılarından yararlanarak modelin hava giriş hızını Tablo 5.10. da verilen şekilde tahmin etmiştir.

Tablo 5.10. Modelin tahmin sonuçları

Kanat Sayısı	Kanat Genişliği	Voltaj Değeri	Deney İle Ölçülen Sonuçlar	Tahmin Sonuçları
8	35	20	19,31	17,9588
8	50	40	38,39	39,8912
8	65	60	46,47	49,5463
8	85	80	51,05	47,8237
9	35	40	35,30	34,2313
9	50	20	22,94	23,8588
9	65	80	48,40	50,4562
9	85	60	49,06	47,1537
10	35	60	34,04	34,2288
10	50	80	41,86	40,7987

10	65	20	23,59	21,6763
10	85	40	32,53	35,3162
6	35	80	34,2	36,4313
6	50	60	42,78	41,4213
6	65	40	42,46	39,2413
6	85	20	18,23	20,5763

5.1.9. Deney sonuçlanması

Gerçekleştirilen deney tasarımı yöntemi ile analizlerde 4 seviyeli 3 parametre üzerinde çalışma incelenmiştir. Minitab programı üzerinden Taguchi metodu kullanılarak L16(4)3 ortogonal dizi tablosu oluşturulmuş ve 16 deney kombinasyonu belirlenmiştir. Bu deney kombinasyonlarına göre deney düzeneği hazırlanmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında ki amaç, geriye eğik kanatlı salyangoz fanlardaki hava giriş hızını yani debilerini maksimize etmektedir. Analiz çalışmasında S/N oranı değerleri için “en büyük en iyidir” yaklaşımı kullanılmıştır. Analiz sonuçlarında ki “S/N oranı etkiler grafiğindeki” maksimum noktalar seçilmiş ve “Rank” değerlerindeki önem sırasına göre; birinci sırada voltaj değeri(%), ikinci sırada kanat genişliği(mm), son olarak üçüncü sırada kanat sayısı faktörü belirlenmiştir.

S/N grafiğinden yararlanılarak ölçüleri belirlenmiş salyangoz fan ve belirli elektrik motorunun kullanıldığı en optimum sonucun, elektrik motorunun %80 oranında voltaj değeri, 65 mm kanat genişliği ve 9 kanatlı bir pervanenin ile çalıştırılması gerektiği sonucu çıkmıştır. Bu durumların sonucunda ise fandaki hava giriş hız değerinin 50,45 m/s olacağını model tahmin etmiştir.

Deneyin amaç kısmında kurulan hipotez sonuçları aşağıdaki gibi olmaktadır.

H1: Desteklenmiştir. Kanat sayısı 10 değerine çıktığında verimlilik azalmıştır.

H2: Desteklenmiştir. Varyans analiz sonucunda kanat genişliğinin etki yüzdesi daha fazladır.

H3: Desteklenmiştir. Voltaj değerinin yüzdesel artışı en önemli faktör olmaktadır.

H4: Desteklenmiştir. Voltaj değerinin(%) faktör etkisi 0,0002 ile en anlamlıdır.

H5: Desteklenmiştir. Kanat genişliği(mm) faktör etkisi 0,0351 ile anlamlıdır.

H6: Desteklenmemiştir. Kanat sayısının faktör etkisi 0,1053 ile anlamlı değildir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bugüne kadar yapılan birçok çalışmalarda radyal ve geriye eğik kanatlı fanların performans etkileri incelenmiştir fakat deney tasarımı yöntemi ile çok fazla çalışma yapılmamıştır. Daha önceki çalışmalarda özellikle kanat genişliğinin fan verimliliğe etkisine yer verilmemiş olması, bu tez çalışmasının literatüre önemli katkı sağlayacağını göstermektedir.

Çalışma için belirlenen 3 faktörün radyal fan verimini etkileme durumları gösterilmiştir. Verilerin değerlendirilmesinde Minitab programı kullanılmıştır. Faktörler ile yapılan deney tasarımı yöntemi bütün kombinasyonlar üzerinden deneme yapmış ve en optimum sonucu bulmakta bize yardımcı olmuştur. Taguchi deney tasarımı ile hesaplanan bu değerlendirmenin yapılması ile sonuca ulaşılması ve optimizasyonun gerçekleştirilebilmesi için gerekli olacak süre ve maliyetler ciddi anlamda azaltılmıştır.

Her faktörün fan giriş hızı(m/s) üzerindeki etkilerinin, yüzdesel hesaplamaları yapılmış ve etkileri daha net ortaya koyulmuştur. Yapılan deney tasarımı yöntemi ile radyal fanların performansını etkileyen faktörler test edilebilmektedir. Daha çok sayıda fan verimini etkileyen faktörlerle ve daha çok deney sayısı ile fan performansı için en optimum koşul bu çalışma yardımıyla sağlanabilmektedir.

Çalışma sonucunda elde edilen optimum çözümün, elektrik motorunun voltaj değerinin %80 oranında çalıştırılması, 65 mm kanat genişliği ve 9 kanat sayısına sahip pervane tercih edilmesi gerektiğidir. S/N değerlerine bakıldığında kanat genişliğinin verimliliğe katkısının kanat sayısından daha yüksek oranda olduğu görülmektedir. Bu durumda sistemdeki fanda debi artışı sağlanmak istendiğinde, kanat genişliği faktöründeki değişimle sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Deney tasarımı uygulama çalışmalarının bu tip optimizasyon gerektiren çalışma alanlarında sıklaştırılması verimsizliği ve maliyeti ortadan kaldıracaktır. Bu tez çalışması, özellikle fan sistemleri grubunun verimlilik çalışmalarına katkı sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Altun, A. H. (2022). Fanların performans analizi ve farklı kanat açılarının fan performansına etkisinin incelenmesi için AMCA 210-16 standardına göre test kurulumunun tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(4), 2165-2177.
- Amjadimanesh, A., Ajam, H. & Nezhad, A. H. (2015). Numerical study of blade number effect on the performance of a 3D FC Centrifugal fan, *International Journal of Mechatronics; Elevtirical and Computer Technology (IJMEC)*, 5(15), 2109-2119.
- Aureliano, F. & Guedes, L. C. V. (2019). Computational fluid dynamics (CFD): Behavioral study and optimization of the blades number of a radial fan. *Procedia Manufacturing*, 38, 1324–1329.
- Bahrami, T. (2022). *Ürün tasarımı geliştirmesinde Taguchi deney tasarımının uygulanması*. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi. Ankara.
- Baloni, B. D., Pathak, Y. & Channiwala, S. A. (2015). Centrifugal blower volute optimization based on Taguchi method. *Computers & Fluids*, 112, 72-78.
- Bleier, F. P. (1998). *Fan handbook: Selection, application, and design*. McGraw-Hill, New York.
- Bulgurcu, H. (2015). *Havalandırma tekniği*. 94-141.
- Burgmann, S., Fischer, T., Rudersdorf, M., Roos, A., Heinzl, A. & Seume, J. (2018). Development of a centrifugal fan with increased part-load efficiency for fuel cell applications. *Renewable Energy*, 116, 815-826.
- Canbazoğlu, S. (2020). *Fan mühendisliği I*. Aironn Teknik Yayınlar, No:1. ISBN:978-975-6263-41-9, İstanbul.
- Ch, S. V., Anantharaman, K. & Rajasekaran, G. (2023). Effect of blade number on the performance of centrifugal fan. *Materials Today: Proceedings*, 72(3), 1143-1152.
- Çakmanus, İ. (2009). *Endüstriyel fanlar: Tasarım, imalat ve enerji verimliliği*. Türk tesisat mühendisleri derneği, İstanbul.
- Çallı, İ. (2005), *Hidrolik Makineleri Ders Notları*. Sakarya.
- DEHNAD, K. (1989). *Quality control, robust desing and the Taguchi method*, Springer New York, New York.
- Develi, S. D. & Ayder, E. (2021). Radyal fanlarda kanat profili biçiminin performansa etkisi. *Tesisat Mühendisliği*, 2021(185), 21-26.
- Eck B. (1973). *Fans: design and operation centrifugal, axial flow and cross flow fans*, Pergamon Press, Oxford.

- Engin, T., Gur M. & Scholz, R. (2006). Effects of tip clearance and impeller geometry on the performance of semi-open ceramic centrifugal fan impellers at elevated temperatures. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 565-577.
- Gaaz, T.S., Sulong, A.B., Kadhum, A.A.H. & Nassir, M.H. (2017). Absolute variation of the mechanical characteristics of halloysite reinforced polyurethane nanocomposites complemented by Taguchi and ANOVA approaches. *Results in Physics*, 7: 3287-3300.
- Galloni, E., Parisi, P., Marignetti, F. & Volpe, G. (2018). CFD Analyses of a radial fan for electric motor cooling. *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 470-476.
- Gökelim, A. T. (1983). *Endüstriyel fan ve kompresör tesisleri*. İstanbul: Birsen Yayınları.
- Güney, M. (2016). *Radyal fan salyangozunun fan performansına etkilerinin had yardımı ile incelenmesi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Güven, T. B. (2022). *Eksenel fanlarda kanat ucu açıklığının fan performansına etkisinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Huang, M., Hung, Y. & Yang, Z., (2016). Validation of a method using Taguchi, response surface, neural network, and genetic algorithm. *Measurement*, 94:284-294.
- Jayapragasan, C. N. & Reddy, K. J. (2017). Design optimization and experimental study on the blower for fluffs collection system. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(5), 1318–1336.
- Jeon, W. H. (2003). A numerical study on the effects of design parameters on the performance and noise of a centrifugal fan. *Journal of Sound and Vibration*, 265, 221-230.
- Karaokur, H. & Akay, O. E. (2022). Yüksek basınçlı santrifüj fan performansının deneysel ve sayısal incelenmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 215-228.
- Karaokur, H. İ. (2019). *Salyangoz gövdeli radyal fan performansının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- KAVAZ, B. (2019). *Benzetim ve deney tasarımı ile yenilme modeli optimizasyonu*. Yüksek lisans tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.
- Kim, S. J., Sung, H. J., Wallin, S. & Johansson, A. V. (2019). Design of the centrifugal fan of a belt-driven starter generator with reduced flow noise. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 76, 72-84.

- Lee, Y. T. & Lim, H. C. (2016). Performance assessment of various fan ribs inside a centrifugal blower. *Energy*, 94, 609-622.
- Lee, Y. T., Ahuja, V., Hosangadi, A., Slipper, M. E., Mulvihill, L. P., Birkbeck, R. & Coleman, R. M. (2011). Impeller design of a centrifugal fan with blade optimization. *International Journal of Rotating Machinery*, 2011, 16.
- Li, L., Huang, G. & Chen, J. (2019). Aerodynamic characteristics of a tip-jet fan with a large blade pitch angle. *Aerospace Science and Technology*, 91, 49-58.
- Lin, S. C. & Huang, C. L. (2002). An integrated experimental and numerical study of forward-curved centrifugal fan. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(5), 421-434.
- Lin, S. C. & Tsai, M. L. (2012). An integrated performance analysis for a backward-inclined centrifugal fan. *Computers & Fluids*, 56, 24-38.
- Madan, S. S. & Wasewar K. L. (2017). Optimization for Benzeneacetic Acid Removal from Aqueous Solution Using CaO₂ Nanoparticles Based on Taguchi Method, *Journal of Applied Research and Technology*, 15, 332-339.
- Matkap, Ü. (2006). *Eş eksenli kanal tipi radyal vantilatör tasarımı ve geliştirmesi*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Mohaideen, M. M. (2012). Optimization of backward curved aerofoil radial fan impeller using finite element modelling. *Procedia Engineering*, 38, 1592-1598.
- Mutlu, Ö. (2018). *İleriye dönük kanatlı radyal fan tasarım yöntemlerinin had ile incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Nandagopal, K. & Kailasanathan, C., 2016. Analysis of mechanical properties and optimization of gas tungsten arc welding (GTAW) parameters on dissimilar metal titanium (6Al-4V) and aluminium 7075 by Taguchi and ANOVA techniques. *Journal of Alloys and Compounds*, 682: 503-516
- Öztürk, S. G. (2012). *Bir fanın tanım eğrilerinin deneysel ve nümerik yöntem ile belirlenmesi*, Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Prezelj, J. & Novaković, T. (2018). Centrifugal fan with inclined blades for vacuum cleaner motor. *Applied Acoustics*, 140, 13-23.
- Ross, P. J. (1989). *Taguchi techniques for quality engineering, loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*, McGraw-Hill International Book Company, ISBN 0-07-053866-2, 1-66, 167-202.
- Santra, D., Joarder, R. & Sarkar, M. (2014). Taguchi design and equilibrium modeling for fluoride adsorption on cerium loaded cellulose nanocomposite bead, *Carbohydrate Polymers*, 111, 813-821.
- Savaşkan, M., Taptık, Y. & Ürgen, M. (2010). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu, *İTÜ Dergisi*, 3(6), 117-128.

- Singh, O. P., Khilwani, R., Sreenivasulu, T. & Kannan, M. (2011). Parametric study of centrifugal fan performance: Experiments and numerical simulation. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 33(2), 33-50.
- Stat-Ease (2023 Mayıs 31). *Design-Expert*. <https://www.statease.com/docs/v11/contents/analysis/general-sequence-of-analysis/>
- Straker, D. (1995). *A Toolbook for Quality Improvement and Problem Solving "Design of Experiments"*, Prentice Hall, 173-174, New York.
- Şentürk, U., Aktokka, S. & Toksoy, M. (2016). *Havalandırmada enerji geri kazanımı: Araştırma ve geliştirme*, Tesisat Mühendisliği, 53, 61-85.
- Şirvancı, M. (1997). *Kalite için deney tasarımı 'Taguchi yaklaşımı'*, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Taguchi, G., Chowdhury S. & Taguchi S. (1999). *Robust Engineering: Case Studies*, McGraw-Hill
- Taylan, D. (2009). *Taguchi deney tasarımı uygulaması*. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Tsai, B. J. & Wu, C. L. (2007). Investigation of a miniature centrifugal fan. *Applied Thermal Engineering*, 27, 229-239.
- Turna, B. (2020). *Eksenel fanlarda enerji verimliliği: tekstil sanayi örneği*, Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Uğural, G. & Parmaksızoğlu, C. (1992). *Vantilatör ve Sistemleri*, Termas Yayınları.
- Yang, W. H. & Tarng, Y. S. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, 84, 122-129.
- Younsi, M., Bakir, F., Kouidri, S. & Rey, R. (2007). Influence of impeller geometry on the unsteady flow in a centrifugal fan: Numerical and experimental analyses. *International Journal of Rotating Machinery*, 2007, 10.
- Zhang, F. & Dear, R., 2017. Application of Taguchi method in optimising thermal comfort and cognitive performance during direct load control events. *Building and Environment*, 111: 160-168
- Zhang, J., Chu, W., Zhang, H., Wua Y. & Dong, X. (2016). Numerical and experimental investigations of the unsteady aerodynamics and aero-acoustics characteristics of a backward curved blade centrifugal fan. *Applied Acoustics*, 110, 256-267.
- Zhou, S., Zhou, H., Yang, K., Dong, H. & Gao, Z. (2021). Research on blade design method of multi-blade centrifugal fan for building efficient ventilation based on Hicks-Henne function. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 1000971.



ÖZGEÇMİŞ

Eda (BAYAR) DEMİRBAĞ ilk ve orta öğrenimini Niğde’de tamamladıktan sonra, 2009 yılında Niğde Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi’ni kazandı. Liseyi 2013 yılında tamamladı. 2013 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünden 1 yıl hazırlık okuyarak, 2018 yılında mezun oldu. 2020 yılında Yalova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği (Tezli) programında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2021 yılında evlendi.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Bayar, E. & Kosanoğlu, F. (2023). Farklı parametrelere sahip geriye eğik kanatlı radyal fanın deney tasarımı yöntemi ile verimlilik analizi, *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, Asos Yayınları, Mart (1), 54.