

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



FARKLI İP SINIFLARINA AİT KURU TİP TRAFO KABİNLERİNDE
POROZİTE DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI VE AKIŞ
ANALİZLERİ

CANER ADIŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri: **Dr. Öğr. Üyesi Veli Gökhan DEMİR (Tez Danışmanı)**
 Doç. Dr. Gülşen YAMAN
 Doç. Dr. Hasan KÖTEN

BALIKESİR, OCAK - 2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Farklı IP Sınıflarına Ait Kuru Tip Trafo Kabinlerinde Porozite Değerlerinin Hesaplanması ve Akış Analizleri**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Caner ADIŞEN

ÖZET

FARKLI IP SINIFLARINA AİT KURU TİP TRAFİO KABİNLERİNDE POROZİTE DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI VE AKIŞ ANALİZLERİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANER ADIŞEN

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ VELİ GÖKHAN DEMİR)

BALIKESİR, OCAK - 2025

Kabinli kuru tip transformatörlerde kayıplarının neden olduğu ısı, transformatörde yaşanmaya neden olduğundan oluşan bu ısının etkin bir şekilde kabin içinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Dolayısıyla, kabin havalandırma sistemlerinin tasarımı ve verimi transformatör ömrünün uzatılması için büyük önem arz etmektedir. Tasarlanan transformatörlerin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programlarıyla gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde, oldukça uzun süren hesaplama sürecinin kısaltılması için havalandırma menfezlerinin porozite değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Çalışmamızda, kuru tip transformatör kabini havalandırma menfezlerinde kullanılan farklı tip IP (Ingress Protection) koruma sınıflarının akış üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiş ve bu menfezlere ait porozite değerleri ($1/\alpha$, viskoz iç direnç faktörü ve C_2 , atalet direnci faktörü) hesaplanmıştır. Bunun için, kuru tip transformatör kabinlerinin IP21, IP31, IPX3 ve IP54 koruma sınıfı menfezlerinden geçen hava akış hızının ölçülebildiği bir deney seti tasarlanmış ve üretilmiştir. Sayısal sonuçlar için ise deney setinin sayısal modeli oluşturularak Ansys Fluent yazılımı ile HAD (CFD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde $k-\omega$ SST türbülans modeli ve Pressure-Velocity Coupling Simple çözüm algoritması kullanılarak hava çıkış hızları ve basınç düşüşleri bulunmuştur. Elde edilen çıkış hızları, deneysel ölçümler ile mukayese edilerek sayısal modellerin doğrulaması yapılmıştır. Sayısal sonuçlara göre fanın tam kapasite ile çalışması durumunda en fazla basınç düşüşünün IP21, en az basınç düşüşünün IPX3'te olduğu; çıkış hızlarında en yüksek değer IPX3'e, en düşük değer de IP31'e ait olduğu görülmüştür. Basınç düşüşü değerleri kullanarak ise menfezlerin porozite değerleri IP21 için $C_2=1753,88$, $1/\alpha=1,03 \times 10^7$; IP31 için $C_2=2958,94$, $1/\alpha=1,03 \times 10^7$ ve IPX3 için $C_2=12602,45$, $1/\alpha=9,00 \times 10^5$ olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonunda elde edilen porozite değerlerinin, gelecek transformatör ısı transferi analizlerinde kullanılması umulmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Transformatör, kabin koruma, HAD, porozite

Bilim Kodları : 91402, 91408, 91411

Sayfa Sayısı : 86

ABSTRACT

CALCULATION OF POROSITY VALUES AND FLOW ANALYSES IN TRANSFORMER CABINETS OF DIFFERENT IP CLASSES

MSC THESIS

CANER ADIŞEN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: DR. ÖĞR. ÜYESİ VELİ GÖKHAN DEMİR)

BALIKESİR, JANUARY - 2025

Since the heat caused by the losses in dry-type transformers with enclosures causes aging in the transformer, this heat must be effectively removed from the enclosure. Therefore, the design and efficiency of the cabin ventilation systems are crucial for extending the life of the transformer. In the heat transfer analyses of the designed transformers carried out with computational fluid dynamics (CFD) programs, porosity values of the ventilation grilles are needed to shorten the calculation process, which is quite long.

In our study, the effect of different types of IP (Ingress Protection) protection classes used in dry-type transformer cabinet ventilation grilles on the flow was investigated experimentally and numerically and porosity values ($1/\alpha$, viscous internal resistance factor and C_2 , inertial resistance factor) of these grilles were calculated. For this purpose, an experimental set was designed and manufactured to measure the air flow velocity passing through IP21, IP31, IPX3 and IP54 protection class grilles of dry-type transformer cabinets. For numerical results, a numerical model of the experimental set was created and CFD analyses were performed with Ansys Fluent software. In these analyses, k- ω SST turbulence model and Pressure-Velocity Coupling Simple solution algorithm were used to find the air outlet velocities and pressure drops. The obtained outlet velocities were compared with the experimental measurements and the numerical models were verified. According to the numerical results, it is seen that the highest pressure drop occurs in IP21 and the lowest pressure drop occurs in IPX3 when the fan operates at full capacity; the highest value in outlet velocities belongs to IPX3 and the lowest value belongs to IP31. Using the pressure drop values, the porosity values of the culverts were calculated as $C_2=1753,88$, $1/\alpha=1,03 \times 10^7$ for IP21; $C_2=2958,94$, $1/\alpha=1,03 \times 10^7$ for IP31 and $C_2=12602,45$, $1/\alpha=9,00 \times 10^5$ for IPX3. It is hoped that the porosity values obtained at the end of the study will be used in future transformer heat transfer analyses.

KEYWORDS: Transformer, cabinet protection, CFD, porosity

Science Codes : 91402, 91408, 91411

Page Number : 86

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Transformatörler	1
1.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması	2
1.3 Transformatör Kayıpları	3
1.3.1 Demir Kayıpları	4
1.3.2 Bakır Kayıpları.....	6
1.4 Kuru Tip Transformatörler	8
1.4.1 Çevre Sıcaklığı ve Sıcaklık Kontrolü	9
1.4.2 Bobin İletkenleri	11
1.4.3 Koruma Sınıfları - Ingress Protection (IP)	12
1.4.4 Soğutma Sistemi	15
1.4.4.1 Tabii (Doğal) Taşınım ile Soğutma	17
1.4.4.2 Cebri (Zorlanmış) Taşınım ile Soğutma	18
1.4.4.3 İletim ile Soğutma	20
1.4.5 Gözenekli Ortamda Akış	21
1.4.5.1 Porozite (Gözeneklilik).....	21
1.4.5.2 Geçirgenlik	22
1.4.5.3 Akış Yatağı Yapısı	22
1.4.5.4 Darcy Denklemi.....	23
1.4.5.5 Darcy-Forchheimer-Brinkman Denklemi.....	24
1.5 Literatür Özeti.....	25
1.6 Çalışmanın Amacı	26
2. MATERYAL VE YÖNTEM	28
2.1 Havalandırma Akış Testleri.....	28
2.1.1 Deney Setinin Üretimi	28
2.1.1.1 Deney Setinin Tasarımı	28
2.1.1.2 Deney Setinin İmalatı	31
2.1.2 Deney Şartlarının Belirlenmesi	38
2.2 Sayısal Modelin Oluşturulması	39
2.2.1 Ansys Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	39
2.2.1.1 Akışın Tipinin Belirlenmesi	39
2.2.1.2 Akışın Sıkıştırılabilir veya Sıkıştırılamaz Olma Durumu	40
2.2.1.3 Basınç Hız Bağlantısı	42
2.2.1.4 Giriş Hava Sınır Şartlarının Belirlenmesi	43
2.2.1.5 Çıkış Hava Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	44
2.2.1.6 Mesh (Ağ) Yapısı	45
2.2.1.7 Türbülanslı Akışlar için Kullanılan Çözüm Modelleri.....	51
2.2.1.8 Sıkıştırılamaz Akışlarda Korunum Denklemleri	55
2.3 Porozite Değerlerinin (Katsayılarının) Hesaplanması.....	55

3. SONUÇLAR VE ANALİZLER	57
3.1 Deney Sonuçları	57
3.1.1 IP21 Menfezi	57
3.1.2 IP31 Menfezi	58
3.1.3 IPX3 Menfezi	59
3.1.4 IP54 Menfezi	60
3.2 HAD Sonuçları ve Porozite Değerleri	62
3.2.1 IP21 Menfezi	62
3.2.2 IP31 Menfezi	66
3.2.3 IPX3 Menfezi	70
4. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	75
5. KAYNAKLAR.....	76
EKLER	82
EK A: Deney Seti Teknik Resmi.....	83
ÖZGEÇMİŞ	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Demir nüveli iki sargılı tek fazlı transformatör temel yapısı.....	2
Şekil 1.2: Transformatörlerin sınıflandırılması.....	2
Şekil 1.3: 75kVA dağıtım transformatörü için yükte-boşta kayıp ilişkisi.	4
Şekil 1.4: Transformatör gücüne göre bakır kayıpları grafiği.....	7
Şekil 1.5: Kuru tip transformatör yapısı.....	8
Şekil 1.6: PT100 sensör kabloları ve PT100 buat kutusu.	10
Şekil 1.7: YG iletkenleri (a)Strip iletken ile sarılan bir YG sargısı (b)Yuvarlak iletken ile sarılan bir YG sargısı.....	12
Şekil 1.8: IP21 muhafaza kabinli KTT.	14
Şekil 1.9: IP31 muhafaza kabinli KTT.	14
Şekil 1.10: IP41 muhafaza kabinli KTT.	15
Şekil 1.11: IP54 muhafaza kabinli KTT.	15
Şekil 1.12: Havalandırma kesiti ile ilgili veriler.	16
Şekil 1.13: Transformatör odasının tabii havalandırması ile ilgili nomogram.	17
Şekil 1.14: Cebri havalandırma ile ilgili nomogram.	19
Şekil 1.15: Darcy tarafından oluşturulan deney düzeneği.	23
Şekil 2.1: Deney seti tasarımı.....	29
Şekil 2.2: Deney seti hız ölçüm noktaları.	29
Şekil 2.3: a) Fan, b) Kontrol ünitesi, c) Anemometre.	29
Şekil 2.4: PWM sinyali	30
Şekil 2.5: IP21 havalandırma menfezleri.	32
Şekil 2.6: IP31 havalandırma menfezleri.	32
Şekil 2.7: IPX3 havalandırma menfez kesiti.....	33
Şekil 2.8: IPX4 havalandırma menfez kesiti.....	33
Şekil 2.9: G4/EU4 elyaf kaset filtre tipleri..	34
Şekil 2.10: Hava akış tüpü (tüneli).....	35
Şekil 2.11: Tüp orta.....	35
Şekil 2.12: Tabla imalat aşamaları.	36
Şekil 2.13: Fan taşıyıcı ayağı.	37
Şekil 2.14: Hava akış ölçüm tüneli.	37
Şekil 2.15: IPX3 deney seti montajlı hali.....	38
Şekil 2.16: IP54 deney seti montajlı hali.	38
Şekil 2.17: Giriş havası sınır koşulları.	43
Şekil 2.18: Çıkış havası sınır koşulları.....	45
Şekil 2.19: Genel ağ yapısı görünümü.	47
Şekil 2.20: IP21 menfez kesit ağ detayı.	47
Şekil 2.21: IP21 için çarpıklık değer dağılımı.	48
Şekil 2.22: IPX3 menfez kesit ağ detayı.	48
Şekil 2.23: IPX3 için çarpıklık değer dağılımı.	49
Şekil 2.24: IP31 menfez kesit ağ detayı.	49
Şekil 2.25: IP31 için çarpıklık değer dağılımı.	49
Şekil 3.1: IP21 menfezinde fan yüküne bağlı ortalama hava giriş-çıkış hız değişimleri.....	58
Şekil 3.2: IP31 menfezinde fan yüküne bağlı ortalama hava giriş-çıkış hız değişimleri. ...	59
Şekil 3.3: IPX3 menfezinde fan yüküne bağlı ortalama hava giriş-çıkış hız değişimleri. ...	60
Şekil 3.4: IP54 menfezinde fan yüküne bağlı ortalama hava giriş-çıkış hız değişimleri. ...	61
Şekil 3.5: IP21 yakınsama eğrisi.....	62

Şekil 3.6: IP21 hız dağılımı görüntüsü.....	63
Şekil 3.7: IP21 çıkışı hız vektörlerinin görünümü.	63
Şekil 3.8: IP21 basınç dağılımı görüntüsü.	64
Şekil 3.9: IP21 menfez hız-basınç düşümü eğrisi.	65
Şekil 3.10: IP31 yakınsama eğrisi.	66
Şekil 3.11: IP31 hız dağılımı görüntüsü.....	66
Şekil 3.12: IP31 çıkışı hız vektörlerinin görünümü.	67
Şekil 3.13: IP31 ortalama çıkış hızı okunan düzlem.....	68
Şekil 3.14: IP31 basınç dağılımı görüntüsü.	68
Şekil 3.15: IP31 menfez hız-basınç düşümü eğrisi.	69
Şekil 3.16: IPX3 yakınsama eğrisi.	70
Şekil 3.17: IPX3 hız dağılımı görüntüsü.....	71
Şekil 3.18: IPX3 çıkışı hız vektörlerinin görünümü.	71
Şekil 3.19: IPX3 hız ölçüm probu düzlemi hız dağılımı.....	72
Şekil 3.20: IPX3 basınç dağılımı görünümü.	72
Şekil 3.21: IPX3 basınç dağılımı.	73
Şekil 3.22: IPX3 menfez hız-basınç düşümü eğrisi.	74

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Boşta kayıp azaltma yöntemleri ve etkileri.	5
Tablo 1.2: Çevre sıcaklığına bağlı güç değişimi.	10
Tablo 1.3: IP (Ingress Protection) koruma sınıfı.	13
Tablo 2.1: Anemometrenin sıcaklık ve hız ölçüm teknik özellikleri.....	31
Tablo 2.2: Kuru tip transformatörler için en yaygın kullanılan IP koruma sınıfı menfezlerine ait delik ölçü bilgisi veya koruma sac eğim bilgisi.....	31
Tablo 2.3: Filtre özellikleri.	34
Tablo 2.4: Deneysel hız sonuçlarına göre Reynolds (Re) sayıları.	40
Tablo 2.5: Çarpıklık (skewness) değeri kalite karşılıkları.....	46
Tablo 2.6: Sayısal analizlerde kullanılan menfezlerin ağ yapısı özellikleri	50
Tablo 2.7: IP21 menfez yapısı için ağ bağımsızlık kontrolü.....	51
Tablo 2.8: FLUENT programı tarafından desteklenen RANS tabanlı türbülans modellerinin karşılaştırılması.	52
Tablo 3.1: IP21 menfezine ait deneysel hava akış hız değerleri.	57
Tablo 3.2: IP31 menfezine ait deneysel hava akış hız değerleri.....	58
Tablo 3.3: IPX3 menfezine ait deneysel hava akış hız değerleri.....	60
Tablo 3.4: IP54 menfezine ait deneysel hava akış hız değerleri.....	61
Tablo 3.5: IP21 menfezi için hız-basınç düşümü ilişkisi.....	64
Tablo 3.6: IP31 menfezi için hız-basınç düşümü ilişkisi.....	69
Tablo 3.7: IPX3 menfezi için hız-basınç düşümü ilişkisi.....	73

SEMBOL LİSTESİ

A_f	: Akışkanın geçiş yaptığı yüzey alanı (m ²)
A_{1,2}	: Hava giriş-çıkış menfez kesitleri (m ²)
B	: Akı yoğunluğu
AG	: Alçak gerilim bobini
YG	: Yüksek gerilim bobini
c	: Ses hızı (m/s)
C₂	: Atalet direnci faktörü
C_E	: Ergün katsayısı
d_p	: Ortalama gözenek çapı
D	: Çap (m)
g	: Yer çekimi ivmesi (m/s ²)
k	: Isı iletim katsayısı (W/m.K)
k	: Türbülans kinetik enerjisi (m ² /s ²)
N_f	: Toplam Yüzey Alanı
P	: Basınç (Pa)
P₀	: Transformatörün boшта çalışma kayıpları (kW)
P_b	: Kaldırma kuvveti etkisi
P_k	: Türbülans kinetik enerjisi üretimi
P_k	: Transformatörün yükte kayıpları (kW)
P_ω	: Özgül enerji yitimi üretimi
Q_v	: Transformatörden atılacak toplam ısı (kW)
R	: Gaz Sabiti
Re	: Reynolds Sayısı
T	: Sıcaklık (K)
V_L	: Hava debisi (m ³ /s)
Ma	: Mach Sayısı
v	: Hız (m/s)
Y_k	: Türbülans enerji yitimine ait türbülans kaynaklanan yitim
Y_M	: Genleşmeden kaynaklanan kayıp
Y_ω	: Özgül enerji yitimine ait türbülans kaynaklanan yitim
z	: Yükseklik (m)
Σ_f	: Herhangi bir control hacmi
ε	: Türbülans enerjisinin yitimi (m ² /s ³)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
μ	: Dinamik vizkozite (Pa.s) veya (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
ω	: Özgül Enerji Yitimi
ξ	: Akış yatağı yapısı
φ	: Gözenekli ortamın porozite parametresi
1/α	: Viskoz iç direnç faktörü
Γ_k	: Türbülans enerji yitimine ait etkin yayılma gücü
Γ_ω	: Özgül enerji yitimine ait etkin yayılma gücü
Δn	: Malzeme (Sac) kalınlığı
ΔP	: Basınç düşümü (Pa)
ΔS_i	: Kaynak terimi
ΔT_L	: Sıcaklık farkı (K)

ÖNSÖZ

İlk olarak, tez çalışma sürecimde bana destek olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Veli Gökhan DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Deney setini oluşturma sürecimde ve analiz çalışmaları boyunca beni yönlendiren sayın yöneticim Dr. Ramazan ALTAY'a, deney seti panosunun kurulumunda yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşım Mert BENLİER'e teşekkür ederim.

Bu çalışmalar için bana imkân sunan BEST A.Ş firmasına ve destekleyen yöneticilerime teşekkür ederim.

Ayrıca bu zorlu süreçte beni çalışmam için motive eden eşim Sinem ADIŞEN'e, kendisine yeterli zaman ayıramadığım kızım Aylin ADIŞEN'e, bana inanan annem Şerife ADIŞEN'e ve yaşadığı süre boyunca eğitimime destek olan merhum babam İhsan ADIŞEN'e teşekkürü borç bilirim.

Balıkesir, 2025

Caner ADIŞEN

1. GİRİŞ

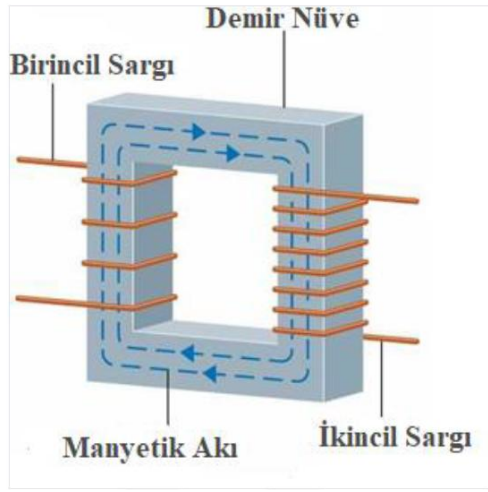
1.1 Transformatörler

Elektrik; endüstride, ticari işletmelerde ve konutlarda en yaygın kullanılan enerji türüdür. Ancak elektrik enerjisi depolanamamaktadır, bu nedenle elektriğin üretimi kadar iletimi ve dağıtımını da önemlidir. Elektrik enerjisinin taşınması ve aktarılması sırasında meydana gelen kayıpların minimize edilebilmesi için elektriğin yüksek voltajda (gerilimli) taşınması tercih edilir. Ancak, yüksek voltajdaki elektrik enerjisi doğrudan kullanılamaz, son kullanımdan önce indirgenerek voltaj değerinin düşürülmesi gerekir. Elektrik üretim tesisleri ile son tüketici arasında konumlanan ve voltaj düşümü sağlayan aygıtlara transformatörler denir. Transformatörler ile düşük akımlı ve yüksek voltaj değerine sahip elektrik enerjisi, yüksek akımlı ve düşük voltajlı hale dönüştürülür (Eren, 2008).

Transformatörler, elektrik enerjisini elektromanyetik indüksiyon yolu ile sabit frekansta değişken akım ve gerilim değerlerini, belirlenen bir orana göre ayarlayan elektrik makineleridir. Hareketli parçası bulunmayan konstrüksiyon yapısı ile kayıpların en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Transformatörlerin iç yapısı temel olarak özel silisyum alaşımını ince saclardan oluşan kapalı manyetik devre ve üzerinde yerleştirilmiş yalıtılmış iletkenlerle sarılmış sargılardan oluşur. Transformatörlerin ana bileşenleri sargılar, nüve ve yalıtım malzemelerinden oluşur. Bu sargılardan ilki gerilimin verildiği birincil (primer) sargı, diğeri ise gerilimin alındığı ikincil (sekonder) sargı olarak adlandırılır. (MEB, 2012; Demirci, 2023). Birincil ve ikincil sargılar arasında elektriksel bir bağlantı olmadığı gibi bu sargılar nüveden de yalıtılmıştır. Yalıtım işlemi için çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları reçine, kâğıt, plastik malzemeler ve yağlardır (Yıldız ve İsmailoğlu, 2013).

Transformatörlerde, birincil sargısına alternatif voltaj uygulandığında, uygulanan gerilimin zamana göre yönü ve şiddeti değiştiğinden, burada zamana göre yönü ve şiddeti değişen bir manyetik alan oluşur. Oluşan manyetik alan, manyetik nüve üzerinden ikincil sargılar ile devreyi tamamlar. Değişken manyetik alanın ikincil sargıları kesmesi ile bu sargılarda alternatif bir gerilim indüklenmesine neden olur. Birincil ve ikincil sargılar arasında elektriksel olarak bir bağlantı olmamasına rağmen elektromanyetik alan ile birincil sargıdan ikincil sargıya güç transferi gerçekleştirilir. Faraday'ın indüksiyon kanuna göre de bu ikincil sargıda indüklenen gerilimin değeri, manyetik akının en yüksek değerine,

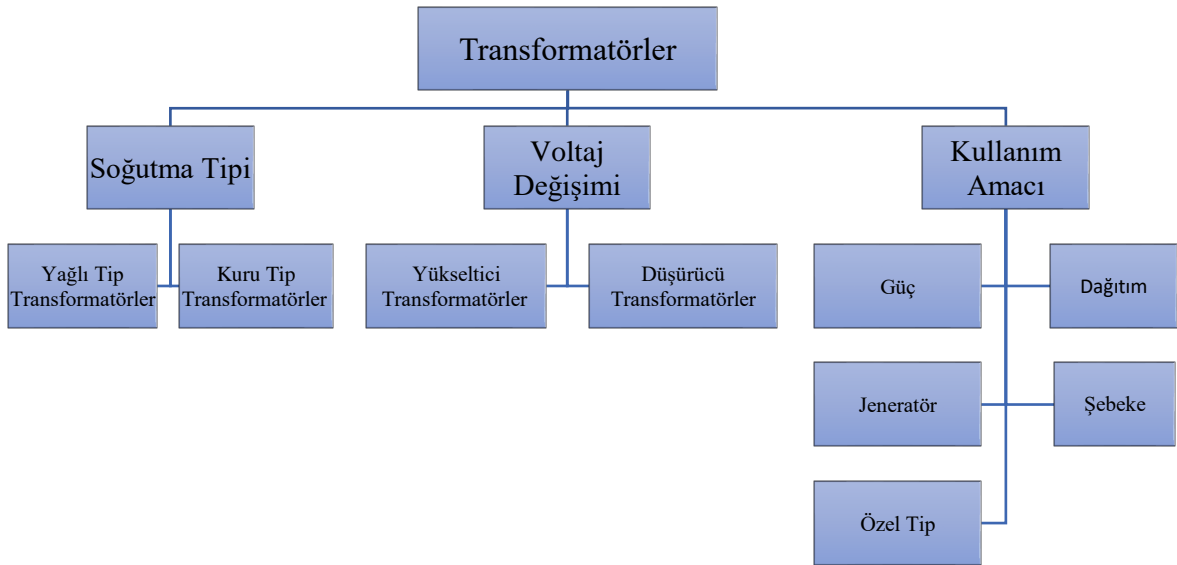
frekansına ve sarım sayılarına bağlıdır. Şekil 1.1’de iki sargıdan oluşan tek fazlı transformatörün temel yapısı verilmiştir (Peşint ve Ürkmez, 2004).



Şekil 1.1: Demir nüveli iki sargılı tek fazlı transformatör temel yapısı (Demirci, 2023).

1.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması

Transformatörlerin sınıflandırmaları farklı şekillerde yapılabilir. Ancak en çok tercih edilen sınıflandırmalar soğutma tiplerine (yağlı dağıtım tip veya yağlı güç tipi ve kuru tip), birincil ve ikincil voltajlara (yükseltme, düşürme) ve kullanım amacına (jeneratör, güç, şebeke, özel) dayanmaktadır. Şekil 1.2 ‘de sınıflandırma özeti verilmiştir.



Şekil 1.2: Transformatörlerin sınıflandırılması.

1.3 Transformatör Kayıpları

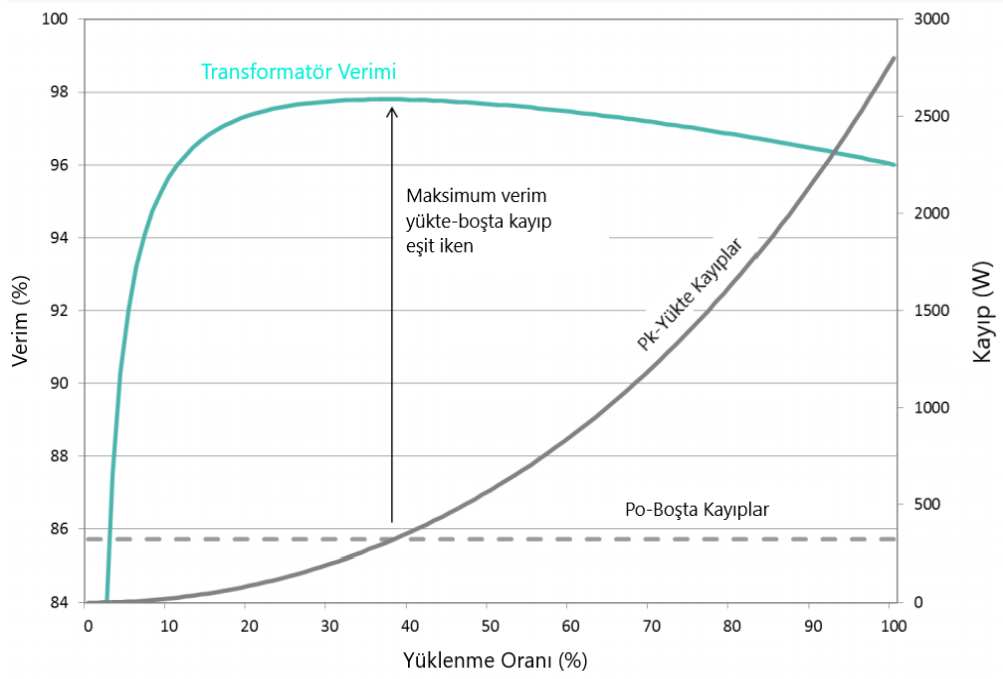
Transformatörleri diğer elektriksel makinelerinden ayıran en önemli farkı, hareketli parça içermemesi ve dolayısıyla rüzgar direnci ile sürtünme kayıplarına maruz kalmamasıdır. Bu nedenle kayıpları düşük, verimleri ise yüksektir (Boduroğlu, 1982; Tören, 2018). Ancak, transformatörlerde elektrik enerjisinin dönüşümü sırasında transformatörün yapısındaki elemanlarda ısınma oluşmaktadır. Bu ısınmalar güçte kayba neden olmaktadır (Tören, 2018). Pratikte kayıplar da devreye girdiği için, sekonder sargıdan ölçülecek akım ve gerilim değerleri her zaman primer ve sekonder sarım sayısı oranından farklı olmaktadır. Bundan dolayı transformatörde toplam kayıpları oluşturacak olan yükte ve boşta kayıplar göz önüne alınır. Literatürde boşta kayıplar, demir kayıpları (P_0); yükte kayıplar da bakır kayıpları (P_k) olarak isimlendirilir (Harlow, 2012; Çelen, 2021).

Transformatörlerdeki kayıplardan kaynaklanan ısınmayı önlemek için onların maksimum çalışma sıcaklığı belirlenmeli ve verimi en üst düzeye çıkaracak şekilde gerekli tasarım değişiklikleri yapılmalıdır. (Kömürgöz, 2002; Tören, 2018).

Transformatör çekirdeği, sargılar arasında en düşük kayıp olacak şekilde iyi bir manyetik bağlantı ortaya koymalıdır. Bunun için tek blok olarak elektrik sacı kullanıp yüksek girdap akımları (EDDY) kayıplarına neden olmak yerine, ince ve çok sayıda lamine elektrik saclarının istiflenmesi ile nüve yapıları oluşturulmaktadır (Çelen, 2021).

Sürekli değişebilen yük profilinden dolayı dağıtım transformatörleri genellikle %50-%60 yüklenme değerlerinde en verimli çalışacak şekilde tasarlanırlar. Ayrıca dağıtım transformatörlerinde en yüksek verimin olduğu noktalarda P_0 (boşta) ve P_k (yükte) kayıpları birbirine yakındır (Karenina vd., 2011). Şekil 1.3'te örnek bir dağıtım transformatörü için verimlilik ve yükte-boşta kayıp ilişkileri verilmiştir.

Transformatörlerde yüklenme yüzdesi ve yükte boşta kayıp ilişkisi arasında sabit bir ilişki mevcut değildir ve transformatörün gücüne ve tipine göre değişiklik göstermektedir. Boşta ve yükte kayıpların toplam sistem kayıpları üzerinde ekonomik etkileri vardır. Bu etkiler sebebiyle elektrik idareleri, transformatör satın alımlarında maliyetler için ortalama 35 yıl olarak öngörülen transformatör ömür süresine, boşta ve yükte kayıp maliyetlerini de eklerler (Çelen, 2021).



Şekil 1.3: 75kVA dağıtım transformatörü için yükte-boşta kayıp ilişkisi (Çelen, 2021).

1.3.1 Demir Kayıpları

Transformatör kayıplarından biri olan demir kayıpları (boşta çalışma kayıpları), alternatif akım sırasında (frekansa bağlı olarak) meydana gelir. Bu alternatif akım, bir periyot içinde iki kez yön değiştirdiğinde, iletkenler üzerinde iki farklı duruma sebep olmaktadır. Bunlardan ilki, 'histerezis kaybı' olarak bilinen manyetik bir etkidir. Akımın anlık değerindeki değişikliklerle birlikte amper sarımının anlık değeri değişir ve bunun sonucunda B manyetik alan yoğunluğu da değişir. Diğeri ise, çekirdeğin elektrik akımına karşı gösterdiği direncin sebep olduğu elektriksel etkidir. Malzeme, iletken maddeye benzer şekilde değişen manyetik akımın etkisi altında kalır ve bu da nüve üzerinde gerilim indüklenmesine yol açar. Bu gerilim sebebiyle malzeme içinde oluşan akımlar "Fuko-girdap akımları" olarak adlandırılır. Bu girdap akımları, demir malzemesi üzerinde özgürce hareket ettiğinde, demir içinde ısı enerjisi açığa çıkar ve bu enerji, "joule kayıpları" şeklinde tanımlanmaktadır (Mun, 2019). Histerezis kaybı, nüve moleküllerinin frekansa bağlı olarak yön değiştirmesi sırasında birbirleriyle sürtünerek ısı enerjisi üretmelerinden kaynaklanır. Fuko kaybı ise, nüve üzerinde oluşan indüklenen akımlardan dolayı meydana gelen bir kayıp olup yine nüvenin ısınması şeklinde ortaya çıkar. Her iki kayıp da frekans ve akı yoğunluğu (B) ile ilişkilidir. Bu nedenle, yük durumu bu kayıpları etkilemez. (Mergen, 2005; Özyalçın, 2007).

Transformatör boşta kayıpları, çekirdek malzemenin türüne ve tanecik yönlendirme yapısına, çekirdek geometrisine, bacak boyunduruk arası joint şekilleri ve joint açlarına, laminasyonlar arası hava boşluğuna ve adım sayısı gibi faktörlere bağıdır (Haidar ve Dabbagh, 2013). Çekirdek malzemenin türünün yanında, uygun çekirdek geometrisinin seçimi, manyetik akının çekirdek ve laminasyonlar arasındaki dağılımını ve endüksiyon değerini etkilediği için kayıpların azaltılması konusunda üzerinde durulması gereken çok önemli bir konudur (Poveda-Lerma vd., 2017).

Tablo 1.1: Boşta kayıp azaltma yöntemleri ve etkileri (Çelen, 2021).

	Yaklaşım Metodu	Boşta Kayıplara Etkisi	Yükte Kayıplara Etkisi
1	Düşük kayıplı manyetik malzeme kullanımı	Azalı	Değişiklik yok
2	Çekirdek geometrisinde iyileştirme	Azalı	Değişiklik yok
3	Çekirdek enine kesitini arttırarak manyetik akı yoğunluğunu azaltma	Azalı	Artar
4	Gerilim/Sarım oranını azaltarak manyetik akı yoğunluğunu düşürme	Azalı	Artar
5	Sargı enine kesit alanını azaltarak akı yolunu kısaltma	Azalı	Artar

Tablo 1.1’de verilen boşta kayıpları azaltma yöntemleri sırasıyla aşağıda açıklanmıştır (Çelen, 2021):

1) Daha düşük kayıplara sahip ve daha yüksek kaliteli manyetik malzemeler kullanmak, boşta kayıpları azaltırken yükteki kayıpları etkilemez. Ancak, bu yöntemle ilgili dezavantaj, çekirdek maliyetinin artmasıdır. Bu nedenle, öncelikli olarak maliyeti etkilemeyecek seçeneklerin değerlendirilmesi gereklidir.

2) Çekirdek boyutu ve ağırlığı değiştirilmeden çekirdek geometrisi iyileştirildiğinde, yükteki kayıplar artmadan daha düşük boşta kayıplar elde edilebilir. Ancak, bu yöntemi kullanarak üretilecek çekirdeğin, maliyeti arttıracak karmaşık prosesler ve farklı üretim ekipmanlarına ihtiyaç duymadan üretilebilmesi gerekmektedir.

3) Çekirdek enine kesiti artırıldığında, üzerine yerleştirilecek sargı iletkenlerinin uzunluğu da artacaktır. Bu durum, sargı iletkenlerinin uzunluğunun artmasıyla birlikte omik dirençlerin ve yükteki kayıpların da artmasına yol açacaktır. Ayrıca, daha uzun sargı iletkenleri kullanılması nedeniyle maliyet de yükselecektir.

4) Primer ve sekonder sargılar arasındaki çevrim oranı sabit tutulduğunda, primer ve sekonder sargılardaki sarım sayıları artırılabilir. Bu sayede manyetik akı yoğunluğu ve boşta kayıplar azaltılabilir. Ancak bu yöntem, daha uzun sargı iletkenleri gerektireceği için yükteki kayıplar ve maliyet artışı söz konusu olacaktır.

5) Sargı iletkenlerinin enine kesit alanı küçültülerek sargı pencere alanları ve gerekli boyunduruk uzunlukları azaltıldığında, akı yolunu kısaltmak ve boşta kayıpları düşürmek mümkün olabilir. Ancak, düşük kesitli sargı iletkenleri kullanılması, sargılarda akım yoğunluğunu ve omik direnci artıracığından, yükteki kayıpların önemli ölçüde artmasına yol açacaktır. Öte yandan, sargı iletken kesitlerinin küçülmesi, gerekli sargı iletkeni ağırlığı ve maliyetin azalmasına neden olacaktır. Fakat bu durum, toplam kayıplarda bir artışa yol açacağından, transformatörün verimliliğini olumsuz yönde etkileyecektir. Bu tür bir yaklaşım, yalnızca maliyetin ön planda olduğu uygulamalarda değerlendirilebilir.

Transformatör nüvesinin çapı, bakır kaybı ile doğru orantılı, demir kaybı ile ise ters orantılıdır. Nüve çapı küçüldüğünde, kullanılan çekirdek malzeme miktarı azaldığı için transformatörün daha düşük nüve kaybı ve daha yüksek bakır kaybı yaşamasına yol açarken nüve çapı büyütüldüğünde ise tam tersi bir durum meydana gelir (Pustu, 2013; Açıkgöz, 2018).

1.3.2 Bakır Kayıpları

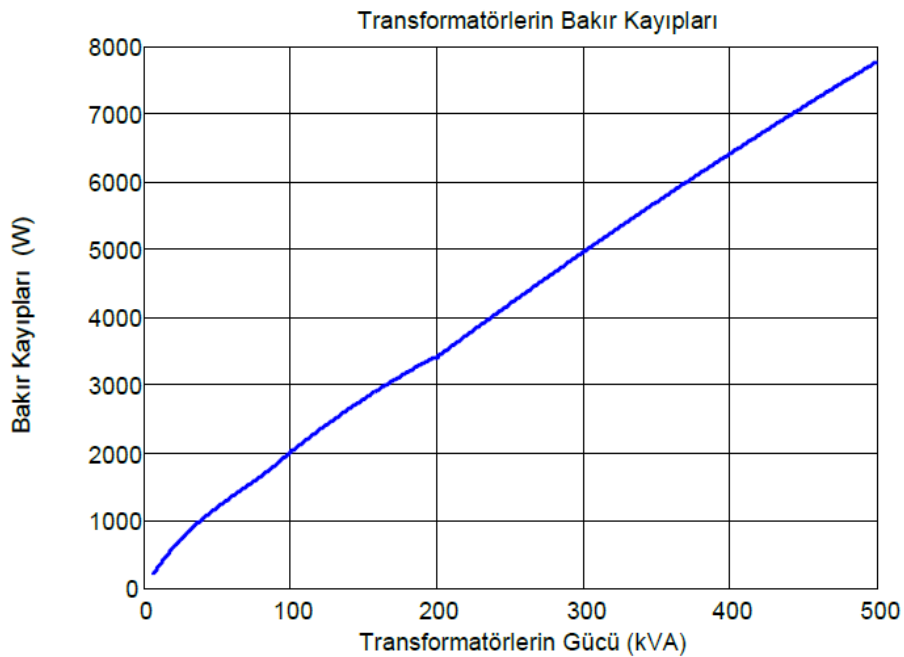
Transformatörün ikincil devresine bir yük bağlandığında hem birincil hem de ikincil devreden akım geçer. Bu akımlar, sargıların dirençleri nedeniyle ısı kaybına yol açar (Aşkın, 2011). Bu kayıplar, I^2R formülüyle hesaplanır. Bakır kayıpları, transformatörün güç oluşumlarına göre değişiklik gösterir. 1000 VA'nın altında güçlerde üretilen transformatörlerde, bakır kayıpları genellikle gücün yaklaşık %4'ü civarında bir değer taşır (Tören, 2018).

Akım değerleri sabit tutulduğunda, bakır kayıplarını dūşürmek için tasarımcı tarafından değiştirilebilecek faktör, sargı direncidir. Dirençleri en aza indirmek için iletkenlerin toplam kesit alanı olabildiğince büyük, toplam uzunlukları ise olabildiğince kısa tutulmalıdır (Çürükova Kale, 2017).

Transformatörün sekonder tarafına bir yük bağlandığında hem primer hem de sekonder sargılardan bir akım geçer. Yük akımı iletilirken transformatörün primer ve sekonder (R_1 , R_2) sargılarının dirençlerinden dolayı ısı kayıpları meydana gelir (Sugawara and Nikaido, 2014). Bu kayıplar sargıda kullanılan bobinlerin direnci ve bobinlerden geçen akımın karesiyle doğru orantılıdır ve yük miktarına bağlı olarak değişir. Toplam bakır kaybı aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$P_{copper} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (1.1)$$

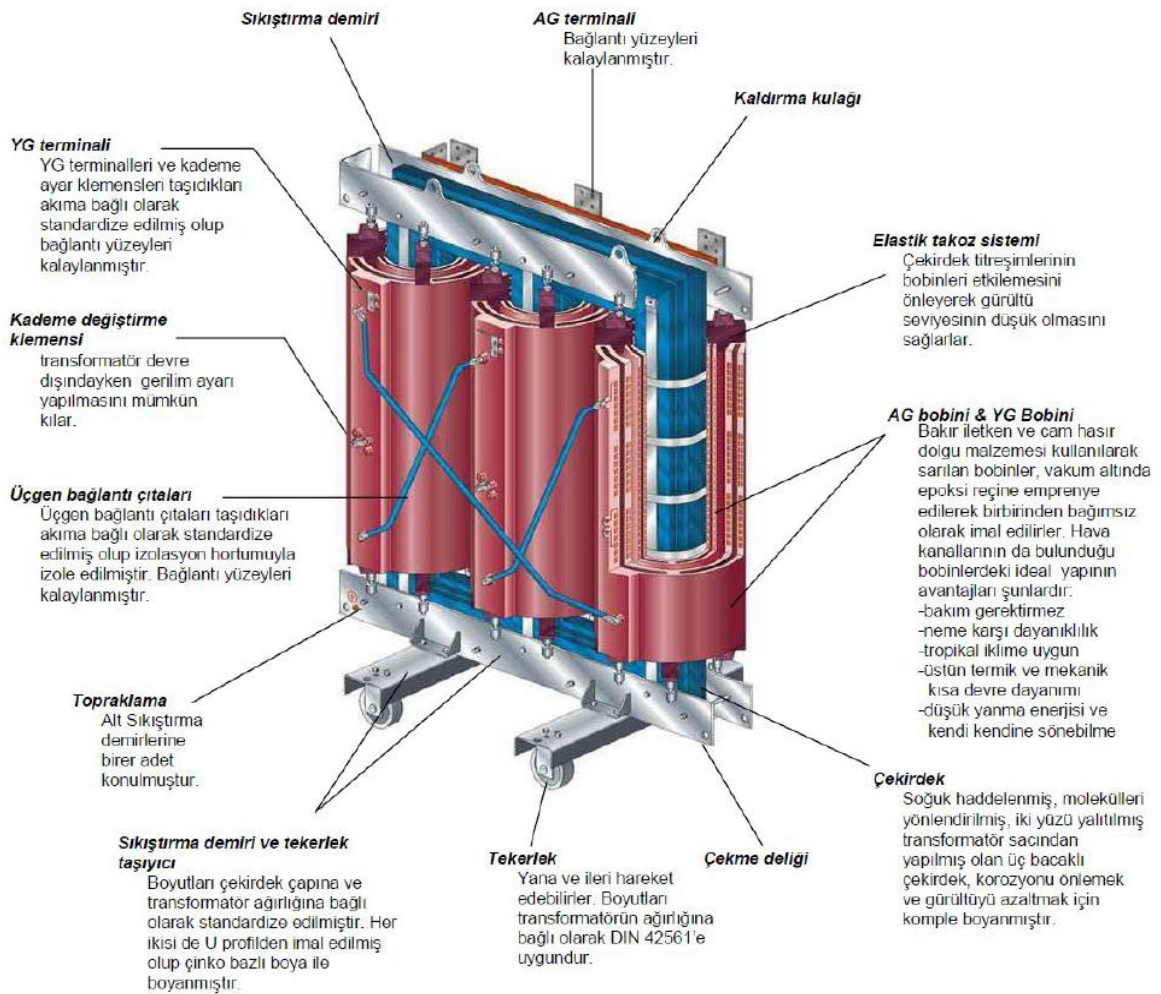
Transformatörlerde iletkenlerden kaynaklı kayıplar, sargılardaki doğru akım ve elektriksel dirençle ilişkili I^2R (sargı direnç) kayıpları olarak ve alternatif akım nedeniyle meydana gelen kaçak manyetik akının iletkenlerde doğurduğu eddy akımlarından kaynaklanan eddy akım kayıpları olarak incelenmektedir (Tören, 2018). Transformatör gücüne göre bakır iletkenlerin sebep olduğu kayıpların değişimi ise Şekil 1.4'te gösterilmektedir.



Şekil 1.4: Transformatör gücüne göre bakır kayıpları grafiği (Çelebi, 2009).

1.4 Kuru Tip Transformatörler

Kuru tip transformatörler, temel olarak nüve, düşük ve yüksek gerilim bobinlerinden ve bu bileşenleri bir arada tutan metal aksamardan oluşurlar. Çekirdeğin bacaklarına, içten dışa doğru sırasıyla önce alçak gerilim bobini, ardından yüksek gerilim bobini monte edilmiştir. Transformatörün ana gerilim değerine bağlı olarak, alçak gerilim bobini ile yüksek gerilim bobini arasında bir izolasyon silindiri monte edilebilir. Bobinlerin bağlantı şekli ve grubu, müşterilerin taleplerine ya da tasarım özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Standart bir tasarımda yüksek gerilimin tarafında delta bağlantısı yüksek gerilim üçgen çitaları ile sağlanırken, alçak gerilim tarafında baralarla yıldız bağlantı yapılmaktadır. Transformatör sargı sıcaklıklarının kontrol edilebilmesi için genelde alçak gerilim bobinlerine yerleştirilen sensörler yardımı ile yapılmaktadır. Kuru tip transformatöre fan ilave edilerek transformatörün nominal gücü %40 oranında artırılabilir (BEST, 2015). Şekil 1.5'te kuru tip transformatör yapısı verilmiştir.



Şekil 1.5: Kuru tip transformatör yapısı (Altay, 2018).

Kuru tip transformatörler, hastaneler, havaalanları, okullar, metro, alışveriş merkezleri, rüzgar santralleri, güneş santralleri, enerji üretim tesisleri, trafo merkezleri ve endüstrinin her alanında, kalabalık yaşam alanlarında, uygun ortam koşulları sağlanarak bina içi veya bina dışı kullanımlar için tercih edilebilmektedirler. Yağ içermedikleri için özel bir bakıma ihtiyaç duymazlar, bobinleri yanıcı olmayan ve kendi kendine sönebilen yapıdadırlar. Çalışma sıcaklığına uygun izolasyon malzemeleri tasarım aşamasında belirlenerek dizayn edilirler. Bu özellikleri barındırması sayesinde yangın riski taşıyan bölgelerde özellikle kuru tip transformatörlerin tercih edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca tüketici merkezlerine yakın konumlanabildikleri için kablo maliyetleri, iletim kayıpları ve kurulum maliyetleri düşüktür (BEST, 2015; Aydoğan, 2023).

Sargıları epoksi reçine ile kaplanmış kuru tip transformatörler kısa devre sırasında meydana gelen kuvvetlere karşı yüksek mukavemet göstermeleri, çevreyi kirletici yağ benzeri yalıtkan malzeme kullanımının olmaması ve bakım gerektirmemeleri, kuru tip transformatörlerin popülerliğini artıran başlıca özellikleridir. Kuru tip transformatörlerin bobinlerinin imalatı sırasında sarım işlemi gerçekleştirildikten sonra metal kalıplara yerleştirilerek vakum altında reçine döküm işlemi yapılır (Erdoğan, 2016).

Kuru tip transformatörlerin en önemli sorunlarından biri aynı gerilim ve kapasitedeki yağlı tip transformatörlere göre daha maliyetli ve ağır olmalarıdır. Çünkü yalıtım ve soğutma sistemlerinin performansları daha düşüktür. Daha iyi bir yalıtım ve soğutma sistemine sahip olabilmeleri için yağlı transformatörlere göre daha büyük boyutlarda üretilmeleri gerekir. Çekirdek boyutları, kuru tip transformatörlerde aynı güçteki yağlı transformatöre göre büyüktür. Ayrıca kuru tip transformatörlerin zayıf ısı iletim performansı, artan sargı sıcaklığına, yalıtım yaşlanmasının hızlanmasına ve büyük ekonomik kayıplara neden olur. Bu iki önemli husus göz önüne alındığında kuru tip transformatörlerin analizi ve optimizasyonları oldukça önemlidir (Kahourzade vd., 2013; Esenboga, 2019; Kül, 2022).

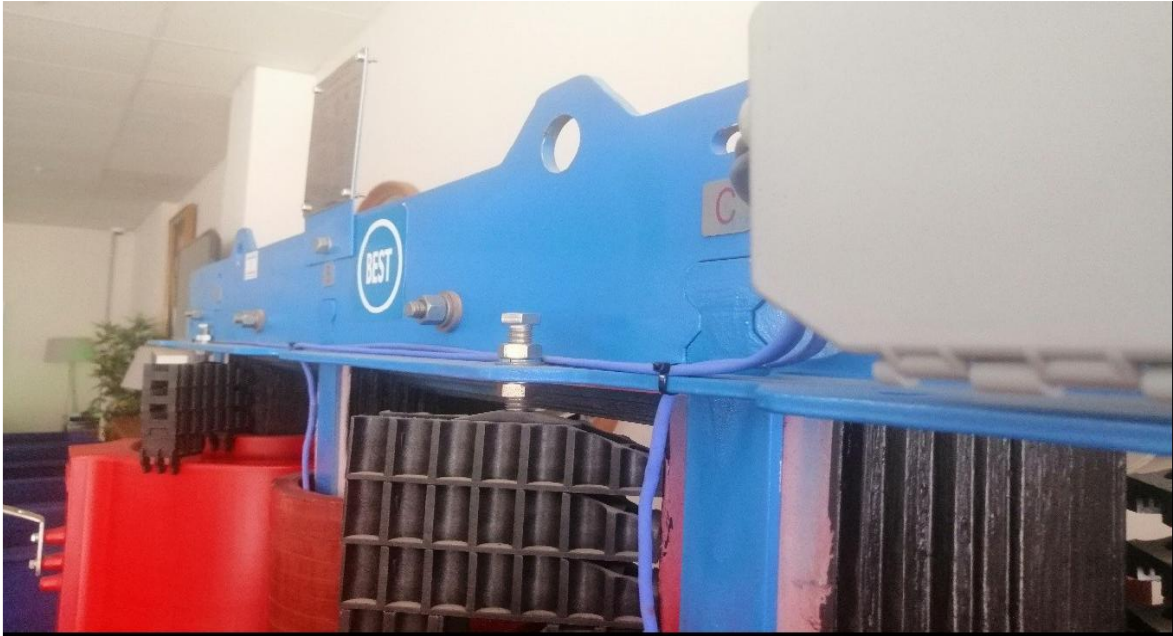
1.4.1 Çevre Sıcaklığı ve Sıcaklık Kontrolü

Transformatörün çalışacağı oda sıcaklığı veya konumlandırıldığı muhit sıcaklığı 40°C'i geçmemesi önemlidir. Transformatörün farklı muhit sıcaklıklarında çalışması durumunda transformatör güç değişimi Tablo 1.2'deki değerler esas alınır (Altay, 2018).

Tablo 1.2: Çevre sıcaklığına bağlı güç değişimi (Altay, 2018).

Çevre Sıcaklığı °C	Sürekli Gücü S_N (%)
-20	124
-10	118
0	112
+10	106
+20	100
+30	93

Çekirdek kayıpları ve kaçak kayıpları transformatörde ısı enerjisine dönüşürler oluşan sıcaklıklar, transformatör alçak gerilim bobinlerine ve gerekirse çekirdeğe yerleştirilen PT100 probaları sayesinde sıcak nokta olması öngörülen yerlerden değerler ölçülür. PT100, direnç tabanlı bir sensördür ve genellikle endüstriyel uygulamalarda sıcaklık ölçümü için tercih edilir. PT100, sıcaklıkla orantılı olarak değişen platinin direncini kullanarak sıcaklık değerlerini ölçer. PT100'den elde edilen sıcaklık değerleri, sinyaller aracılığıyla röleye iletilir. Daha önceden röleye ayarlanmış sıcaklık değeri aşırsa pano ve kesiciler yardımı ile transformatör devre dışı kalır. Şekil 1.6'da PT100 sensör kabloları ve buat kutusunun konumu gösterilmiştir.



Şekil 1.6: PT100 sensör kabloları ve PT100 buat kutusu.

1.4.2 Bobin İletkenleri

Kuru tip transformatörlerin bobin imalatı sırasında öncelikle sarım işlemi yapılır daha sonra sarımı tamamlanan bobin metal kalıba yerleştirilir ve vakum altında reçine ile kalıba döküm işlemi yapılır. Böylece sargılar epoksi reçine ile örtülmüştür ve kısa devre anında sargılara gelen kuvvetlere karşı yüksek mukavemetlidirler (Erdoğan, 2016). Bobinleri yalıtım için kullanılan epoksi reçinenin dökümü ve vakumu sırasında reçine içerisine karışan yabancı maddeler, tozlar ve hava boşlukları bobinlerde elektrik deşarjlarının oluşmasına ve zamanla artması ile bobinlerde hasar olmasına sebep olmaktadır (Attar, 2021).

Kuru tip transformatörlerin yalıtım durumunun değerlendirilmesi için geleneksel ölçüm yöntemiyle, IEC 60076-11 standardında belirtilen 10 pC kısmi deşarj limit değeri kontrol edilmektedir (IEC60076, 2018). Son yıllardaki çalışmalar incelendiğindeyse kuru tip transformatörlerde kısmi deşarjın varlığını tespit edebilmek için Aşırı Yüksek Frekans (UHF) sensörler kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra kuru tip transformatörlerde kısmi deşarj konumunun belirlenebilmesi, piezo akustik sensörler kullanılarak varış zamanı tekniğinden yararlanılmaktadır (Altın, 2022).

Alçak gerilim ve yüksek gerilim sargıları, transformatörün çalışma prensibine göre alüminyum ve/veya bakır malzemelerinden üretilir. Alçak gerilim tarafında akan akım yüksek olduğundan, iletken kesiti büyüktür. Yüksek gerilim bobinlerinde, iletken kesitleri küçüktür ve çok sayıda iletken oluşurlar. Yüksek gerilim bobinleri üç farklı iletken tipiyle üretilir: Yuvarlak, düz ve şerit iletken. Çalışma sırasında, sargılardaki kayıplar nedeniyle yük kayıpları meydana gelir. Şekil 1.7’de yüksek gerilim bobinini oluşturan bazı iletken tipleri gösterilmiştir.

Sargı materyali olarak en sık bakır ve onu takiben alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyum sargılar bakır sargılara göre daha hafif ve daha ucuz olmasına karşın, iletkenlik bakımından daha zayıftır. Bundan dolayı aynı akımı taşıyacak bakır sargıya nazaran daha büyük kesitte alüminyum iletkenler gereklidir. Diğer yandan bakır sargıların mekanik dayanımı alüminyum sargılara göre daha yüksektir. Ayrıca sargılar için ekstrem mekanik dayanım gerektiği işletme koşullarında gümüş giydirilmiş bakır iletkenler de kullanılabilir (Çelen, 2021; Harlow, 2012).










Şekil 1.7: YG iletkenleri (a)Strip iletken ile sarılan bir YG sargısı (b)Yuvarlak iletken ile sarılan bir YG sargısı.










1.4.3 Koruma Sınıfları - Ingress Protection (IP)

Kuru tip transformatörlerde kabinler, işletme içerisinde transformatöre temas sonucu meydana gelebilecek yaralanmaları önlemek veya çevre koşulları gereği dışarıda bulunması gereken transformatörlerde dış etkenlerden korunma amaçlı koruyucu muhafaza görevi yaparlar.

Kabinler, su ve toz gibi dış etkilere karşı sahip oldukları koruyuculuklarına göre Ingress Protection (IP) sınıflandırılmasına göre derecelendirilirler. Bu dereceler, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından yayımlanmıştır. Tanımlanan kodların bir diğer amacı da satılan ürün hakkında son kullanıcıya detaylı bilgi verebilmektir. Tablo 1.3'te verilen koruma sınıflandırılmasında 1.basamak katıya karşı koruma, 2.basamak ise suya karşı koruma anlamına gelmektedir.

Tablo 1.3: IP (Ingress Protection) koruma sınıfı (Karel, 2024).

I. Basamak			
Derece	Sembol	Koruma	Açıklama
0		Korumasız	Kullanıcının tehlikeli bölgelere ulaşmasını ve yabancı katı cisimlerin cihazın içine girişini engeller.
1		Çapı ≥ 50 mm olan katı cisimlere karşı koruma	Çapı 50 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
2		Çapı $\geq 12,5$ mm olan katı cisimlere karşı koruma	Çapı 12,5 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
3		Çapı $\geq 2,5$ mm olan katı cisimlere karşı koruma	Çapı 2,5 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
4		Çapı ≥ 1 mm olan katı cisimlere karşı koruma	Çapı 1 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
5		Toza karşı korumalı	Toz girişi tamamen engellenemez fakat koruma derecesi tozun ürüne zarar vermesini engelleyecek kadardır.
6		Toz geçirmez	Toz girişi kesinlikle yok.

II. Basamak			
Derece	Sembol	Koruma	Açıklama
0		Korumasız	Cihaz muhafazasının suya karşı koruma özelliği yoktur.
1		Düsey olarak düşen su damlalarına karşı korumalı	Cihaza dik düşen su damlaları zarar vermez.
2		Mahfaza 15^0 ye kadar eğik olarak düşen su damlalarına karşı korumalı	Cihaza $0-15^0$ açı ile düşen su damlaları zarar vermez.
3		Su püskürtmesine karşı korumalı	Cihaza 60^0 açığa kadar püskürtülen su zarar vermez.
4		Su sıçramasına karşı korumalı	Cihaza herhangi bir yönden sıçrayan su zarar vermez.
5		Su fişkırtmasına karşı korumalı	Cihaza herhangi bir yönden fişkırtılan su zarar vermez.
6		Güçlü su fişkırtmasına karşı korumalı	Cihaza herhangi bir yönden yüksek akış hızıyla fişkırtılan su zarar vermez.
7		Suya 30 dk'dan kısa süreli daldırmalara karşı dayanıklı	Belirtilen sıcaklık ve basınçtaki suya maksimum. yarım saat daldırmaya dayanıklıdır.
8		Suya sürekli daldırma etkilerine karşı korumalı	Belirtilen sıcaklık ve basınçtaki suya sürekli daldırmaya dayanıklıdır.

Kuru tip transformatör (KTT), dış çalışma ortamında dağıtım amacı ile kullanıldığında, transformatörlerin güneş ışınlarına, neme ve suya teması gibi doğal etkenlerin yanı sıra

Çalışma ortamından kaynaklı toz ve ufak parçacıklar gibi dış etmenli faktörlerden de etkilenmemesi için korunması gerekir. Dış ortamda çalışması planlanan KTT kabinleri tasarlanırken sıcaklık değerlerinin standartlara uygun olması gerekmektedir (Tören, 2018). Şekil 1.8’de IP21, Şekil 1.9’da IP31, Şekil 1.10’da IP41, Şekil 1.11’de ise IP54 koruma sınıflarına ait kabinlere sahip KTT örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 1.8: IP21 muhafaza kabinli KTT.



Şekil 1.9: IP31 muhafaza kabinli KTT.



Şekil 1.10: IP41 muhafaza kabinli KTT.

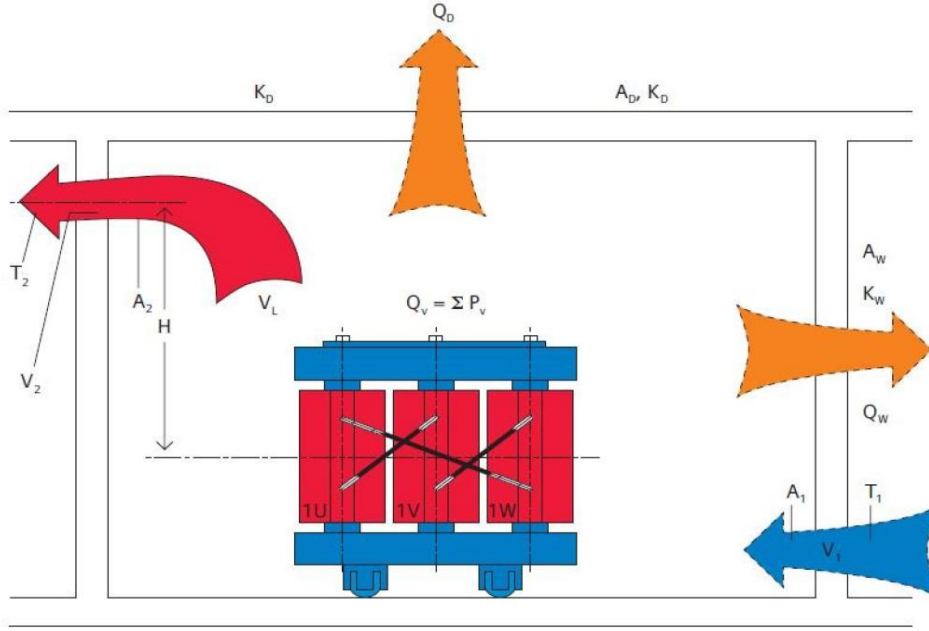


Şekil 1.11: IP54 muhafaza kabinli KTT.

1.4.4 Soğutma Sistemi

İşletmelerde, transformatörden kaynaklı kayıpların sebep olduğu ısının, transformatörün konumlandırıldığı odadan uzaklaştırılması gereklidir. Bu amaçla, öncelikle transformatör odasının havalandırma koşulları gözden geçirilmelidir. Ancak genellikle kayıplardan kaynaklanan ısının bir havalandırma sistemiyle (cebri havalandırma) dışarı atılması gerekir. Aşağıda transformatör odalarının doğal ve cebri havalandırma sistemleri ile ilgili programlamalar, havalandırma sisteminin yerleştirme amacına uygun şekilde tasarlanması

ve buna ilişkin ölçülendirme diyagramları ele alınmaktadır (Altay, 2018). Transformator odasına giren, çıkan hava ve yayılan ısıyı belirten şematik gösterim Şekil 1.12'deki gibidir.



Şekil 1.12: Havalandırma kesiti ile ilgili veriler (Altay, 2018).

Transformator odasına konumlandırılan kuru tip transformatorün oluşturduğu kayıplardan dolayı açığa çıkan ısı odadaki her transformator için ayrı ayrı eşitlik (1.2) ile hesaplanır.

$$P_v = P_0 + 1.2 \times P_k \left(\frac{S_{AF}}{S_{AN}} \right)^2 \quad (1.2)$$

Eşitlik (1.2), belirtilen P_0 , P_k ve P_v ifadeleri sırasıyla transformatorün boşa kaybı, yükte kaybı ve fanlı kayıp değerlerini tanımlamaktadır. Transformatorün toplam ısı kaybı (Q_v) ise eşitlik (1.3) ile hesaplanır.

$$Q_v = \sum P_v = Q_{v1} + Q_{v2} + Q_{v3} \quad (1.3)$$

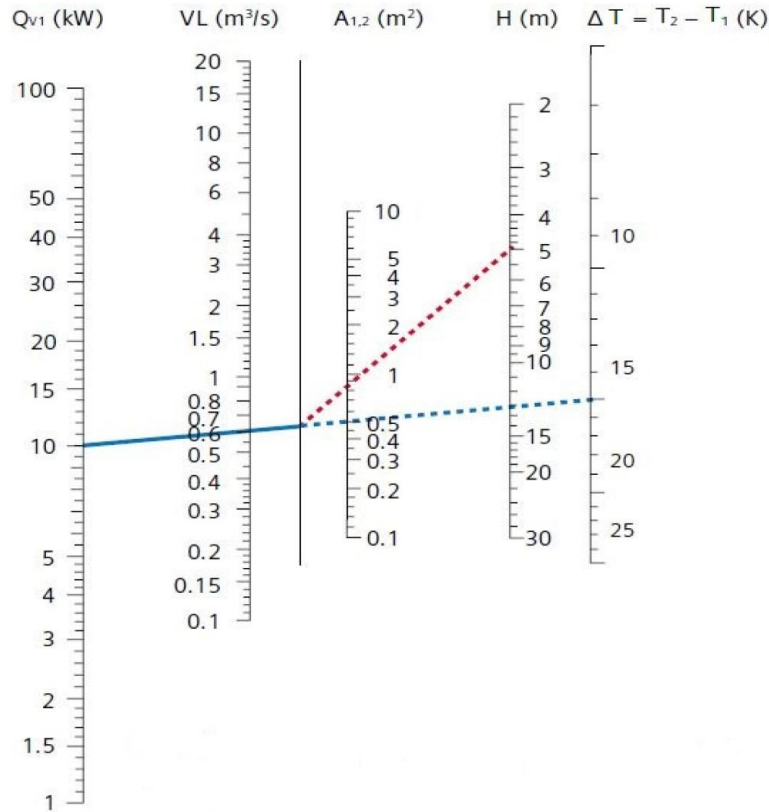
Atılan ısı miktarı değerleri toplamı ($Q_{v1} + Q_{v2} + Q_{v3}$) şeklinde ifade edilir ve alt başlıklar halinde altta değerlendirilmiştir.

1.4.4.1 Tabii (Doğal) Taşınım ile Soğutma

Doğal taşınım ile atılan ısı miktarı,

$$Q_{v,l} = 0.0098 x A_{1,2} x \sqrt{H x \Delta T_L^3} \quad (1.4)$$

Eşitlik (1.4) ile hesaplanmaktadır. Buradaki ifadeler sırasıyla $A_{1,2}$ hava giriş ve çıkış menfez kesitlerini, H kuru tip transformatörün ağırlık merkezi ile hava çıkış menfezi orta noktası arasındaki mesafeyi, ΔT_L ise havanın sıcaklık farkını temsil etmektedir. Eşitlik (1.4)'e ait içerik, Şekil 1.12'de sunulmuştur ve buradaki terimler, Şekil 1.13'teki nomograma eşdeğerdir (Altay, 2018).



Şekil 1.13: Transformatör odasının tabii havalandırması ile ilgili nomogram (Altay, 2018).

Kuru tip transformatör için doğal havalandırma durumu hesap örneği:

Verilenler; $Q_{v,l} = \sum P_v = 10 kW, H = 5m, \Delta T_L = T_2 - T_1 = 15 K$

İstenilenler; v_L : Hava miktarı (m^3/s)

$A_{1,2}$: Hava giriş ve çıkış menfez kesitleri (m^2)

Şekil 1.13'teki nomogramdan $Q_{v1}=10 \text{ kW}$ ve $\Delta T_L = 15 \text{ K}$ değerleriyle, v_L skalada $0,58 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik bir hava debisi bulunur, $H=5\text{m}$ olduğu durumda $A_{1,2}$ skalasından $0,78 \text{ m}^2$ 'lik bir hava menfez kesiti değerini verir. Elde edilen hava menfez kesiti, ihtiyaç duyulan serbest kesiti ifade eder. Kesiti daraltıcı elemanlar ayrıca dikkate alınmalıdır.

Nomogramda hava akım dirençleri, hava giriş menfezinde, $10\text{-}20 \text{ mm}$ aralıklı bir tel kafes kullanılacağı, hava çıkış menfezinde ise panjur tercih edileceği varsayılmıştır. Eğer hava çıkış menfezinde ayrıca yeniden tel kafes kullanılacağı düşünülüyorsa kesit $\%10$ oranında daraltılabilir (Altay, 2018).

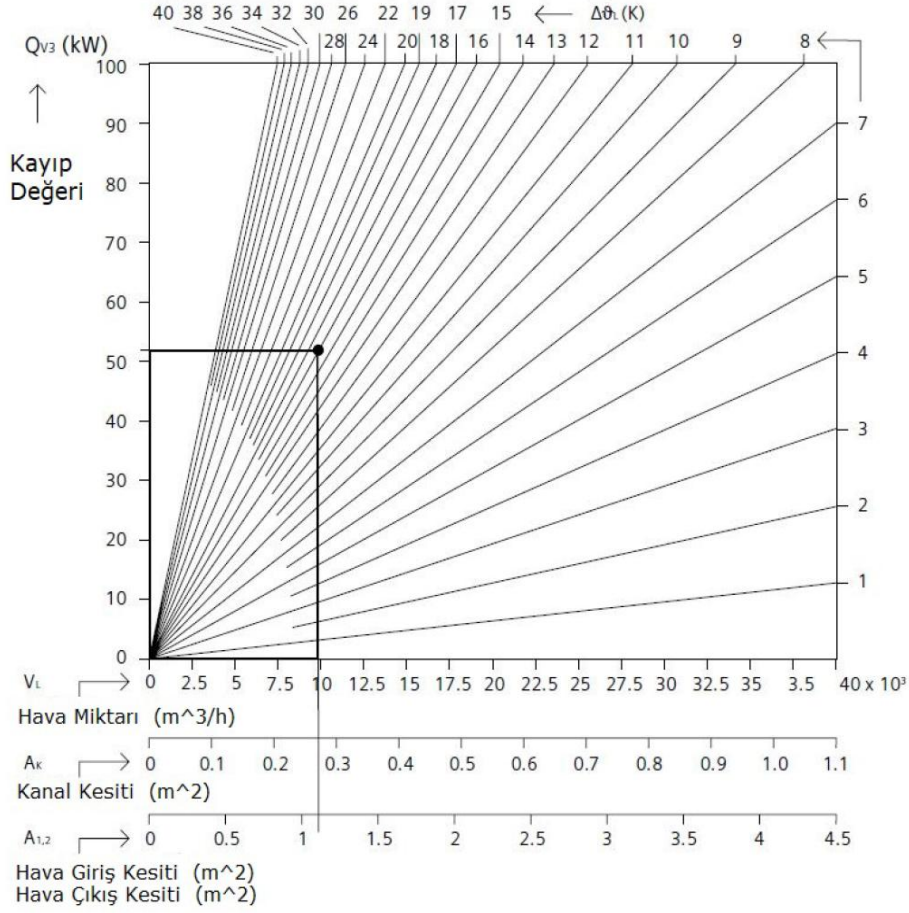
1.4.4.2 Cebri (Zorlanmış) Taşınım ile Soğutma

Zorlanmış taşınım ile atılan ısı miktarı (Q_{v3}), doğal taşınım ile atılan ısı miktarı (Q_{v1}) ve iletim ile atılan ısı miktarı (Q_{v2}) değerlerinden çok daha büyüktür. Bu sebeple, zorlanmış taşınım ile atılan ısı transferi hesaplanmasında, (Q_{v1}) ve (Q_{v2}) emniyet faktörü açısından göz ardı edilerek (1.5) eşitliğinde kullanılmazlar (Altay, 2018).

$$Q_{v3} = V_L \times C_{PL} \times \rho_L \times \Delta T_L \quad (1.5)$$

Şekil 1.14'teki nomogram yukarıdaki formülü ihtiva eder. Havalandırma menfez kanalında hava akış hızının 10 m/s olduğunda ve sıcaklık farkının (ΔT_L) değişimden kaynaklı olarak iletilecek hava debisi, hava kanallarının kesit geometrisi ve ölçüsü, hava kanal kesitine oranla 4 kat daha büyük menfez kesitleri parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir (Altay, 2018). Hava giriş debisi (V_L), hava giriş hızı (v) ve hava giriş-çıkış menfez kesitleri (A) arasındaki ilişki eşitlik (1.6)'da verilmiştir.

$$V_L = v \times A \quad (1.6)$$



Şekil 1.14: Cebri havalandırma ile ilgili nomogram (Altay, 2018).

Transformatör odasının havalandırma sistemlerinde seçilecek fan, radyal veya aksenal tipte olabilir. Havalandırmanın sağlanabilmesi için gerekli basınç farkı (N/mm²) hesaplandıktan sonra uygun bir fan seçimi yapılır. Transformatörün çekirdek sacından yayılan gürültüye ek olarak fan kullanımı da ekstra bir gürültü kaynağı daha oluşturmaktadır. Kullanılan fanların sebep olduğu gürültü de ihtiyaç duyulması halinde gürültü önleyici elemanlarla izole edilerek titreşim ve bu frekandan doğan seslerden yalıtılmış olacaktır. (Altay, 2018).

Fan gücünün hesaplanması

Fanın tahrik edilebilmesi için fanı döndüren motorun ihtiyaç duyduğu güç (P_{fan}), eşitlik (1.7) ile hesaplanır;

$$P_{fan} = \frac{PxV_L}{3,6x10^6 x \eta} \quad (1.7)$$

Burada;

$$P = P_R + P_B \quad (1.8)$$

Eşitliği (1.8) ile elde edilir. Eşitlikteki P_R basınç farkı, doğrusal kanallardaki sürtünmenin sebep olduğu direnç ve diğer basınç düşürücü dirsek, T-parçaların, tel kafes ve kesit süreksizliğinin sebebiyet verdiği dirençlerden oluşur. Bu elemanlar için basınç kaybı değeri Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4: Basınç kaybı değerleri (Altay, 2018).

Elemanın Tanımı	Basınç Kaybı (N/mm ²)
Panjurlu Duvarlar	$\approx 40-70$
Panjurlar	$\approx 10-50$
Tel Kafes	$\approx 10-0$
Gürültü Önleyici Elemanlar	$\approx 50-100$

P_B basınç farkı ise eşitlik (1.9) ile bulunur.

$$P_B = 0.61 \times V_K^2 \quad (1.9)$$

Eşitlikteki V_K , kanal (menfez) kesitindeki hava hızını ifade etmektedir. Bu değer ise eşitlik (1.10) ile hesaplanmaktadır.

$$V_K = \frac{V_L}{3600 \times A_K} \quad (1.10)$$

1.4.4.3 İletim ile Soğutma

Kuru tip transformatörün yerleştirildiği odadaki duvarlardan ve tavandan iletim yoluyla atılan ısı miktarı (Q_{v2}) eşitlik (1.11) ile bulunur.

$$Q_{v2} = 0.7 \times A_w + K_w + \Delta T_w + A_D + K_D + \Delta T_D \quad (1.11)$$

Kuru tip transformatör kabinlerinden taşınım yoluyla atılan ısı (Q_{v1}) genel olarak iletim yoluyla atılan ısı miktarından (Q_{v2}), oldukça fazla büyüktür. Tablo 1.5'te bazı malzemeler için ısı iletim katsayıları verilmiştir.

Tablo 1.5: Bazı malzemelerin ısı iletim katsayıları (Altay, 2018).

Malzeme	Sıcaklık (K)	Isı İletim Katsayısı (k) (W/mK)
Saf alüminyum	300	237
	400	240
	600	231
Saf bakır	300	401
	400	393
	600	379
Karbon çeliği (AISI 304)	300	14.9
	400	16.6
	600	19.8
Quartz (paralel yönde)	300	10.4
Ağaç (meşe, akçaağaç)	300	0.16

1.4.5 Gözenekli Ortamda Akış

Bir yapının farklı kısımlarından alınan örneklerde hem katı faz hem de boşluk bulunuyorsa, bu yapı gözenekli ortam olarak adlandırılabilir (Özdemir, 1996). Gözenekli ortamın en önemli özellikleri gözeneklilik ve geçirgenliktir, her iki özellik de gözenekli ortamdaki akışı etkiler (Ersoy, 2022). Kuru trafoların havalandırma sistemlerindeki akış gözenekli ortamda akışa örnektir ve koruma sınıf derecelerine göre akışın yapısı değişkenlik gösterir.

1.4.5.1 Porozite (Gözeneklilik)

Porozite (gözeneklilik), ε , malzeme içerisindeki toplam boşluk hacminin malzemenin toplam hacmine oranı şeklinde ifade edilir ve bu değer 0 ila 1 arasında değişir. Bu durumda $(1-\varepsilon)$ katı hacmin kapladığı kısmı temsil eder. ε terimi ifadesinde gözeneklerin birbirleriyle ilişkili olduğu kabul edilir (Pilevne, 2007). Porozitenin tanımı denklem (1.12) ile ifade edilebilir (Kulga, 2010).

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V_f + V_s} \quad (1.12)$$

Bu ifade de ε terimi ortamın porozitesini, V_f terimi katı içindeki akışkan veya boşluk hacmini ve V_s terimi ise sadece katı yapı hacmi olarak tanımlanmıştır. Poroz yapıdaki bir

maddenin önemli özelliklerinden biri gözenekliliktir. Zira bileşenin tüm fiziksel nitelikleri porozite ile değişir. (Nield ve Bejan, 2006). Porozite ölçümü, ışığın veya elektromanyetik gama ışınlarının gözenekli malzeme içerisinden geçerken gücünü kaybetmesi ile yapılır (Kaviany, 1995). Nitelikleri her yerinde aynı olan gözenekli bir ortamda, porozite sabit olabilir ama genelde bulunduğu konuma bağlı olarak etkilenir. Poroz (gözenekli) malzemeler, çeşitli uygulama alanlarında kullanılan ve geliştirilen yenilikçi bir çözüm olarak dikkat çekmektedir. Özellikle "köpük" olarak bilinen gözenekli malzemeler, ısı-akışkan sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Metal köpükler olarak bilinen metalik yapılu gözenekli malzemelerin düşük ağırlığı, yüksek ısı iletkenliği, yüksek gaz geçirgenliği ve geniş ısı transfer yüzey alanları gibi özellikleri, bu malzemeleri ön plana çıkarmaktadır. Metal köpükler, güneş enerjisi, atık ısı geri kazanımı, HVAC (Isıtma, Soğutma ve Havalandırma), nükleer enerji, batarya paketlerinin soğutulması ve elektronik soğutma gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda ısı değiştirici teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dağdır vd., 2022).

1.4.5.2 Geçirgenlik

Geçirgenlik, kendi ortamının akışkan iletkenliğini veya malzeme içinden geçişin kolaylığını ölçen bir parametredir. Geçirgenlik, sıvıların değil, kendi içindeki malzemelerin bir özelliği olarak kabul edilir. Bu özellik, yalnızca çok düzgün tane yapısına sahip ve her yerinde aynı özelliği gösteren poroz ortamlarda ölçümler deneyseldir, çoğunlukla poroziteye bağlı olarak çıkarılan birkaç eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır (Kulga, 2010). Gözenekli ortamın geçirgenliğini belirleyen başlıca nitelikler, özgül yüzey alanı, porozite, parça boyutları (boyut, şekil, pürüzlülük, dağılım), paketleme yapısı ve makroskobik tekdüzelik/çokdüzeliğidir (Denys, 2003; Akbal 2007).

1.4.5.3 Akış Yatağı Yapısı

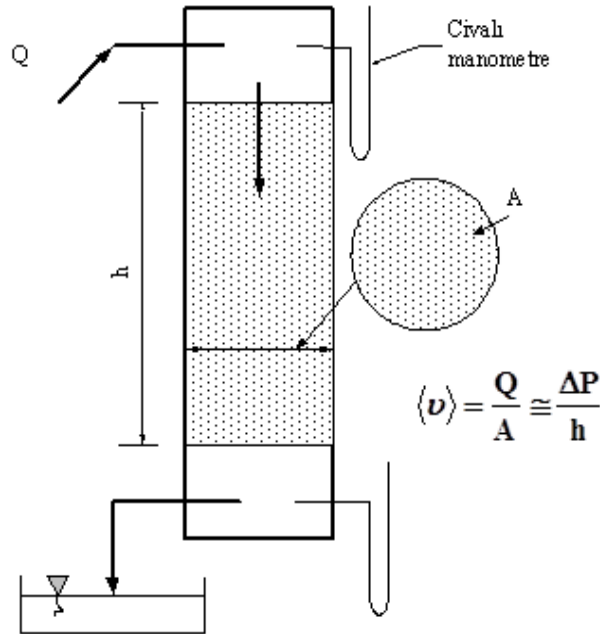
Akış yatağı yapısı (ξ , kıvrımlılık, tortuosity), poroz medyumda iki ölçüm noktası arasındaki düz mesafenin, iki nokta arasındaki gerçek yol uzunluğuna oranı olarak tanımlanır. Bu kavram kaynaklarda sıkça yer alsa da küresel olarak kabul görmüş bir tanımı yapılmamıştır (Ersöz, 2019). Porozite, ağırlık ve yoğunluktan faydalanılarak hesaplanabilirken; akış yatağı yapısı, poroz medyumdaki hacimsel oranına, şekline ve gözenekler arası bağlantıların durumu ile ilişkilidir. Ancak bazı poroz medyumlar için gözeneklilik ile akış yatağı şekli içinde teorik veya fenomenolojik bir bağıntı

bulunmaktadır (Pisani, 2011). Bu ilişkilerden en bilinenini Denklem (1.13) ile Bruggeman denklemi gösterilmektedir. (Ersöz, 2019).

$$\xi = \varepsilon^{-0.5} \quad (1.13)$$

1.4.5.4 Darcy Denklemi

Gözenekli ortamlarda akışla alakalı ilk önemli çalışma, Henry Philibert Gaspard Darcy tarafından 1856 yılında Fransa'nın Dijon kentine temiz su temini için gerçekleştirilen deneysel bir araştırmadır. Bu deneyin sonuçları, ilerleyen yıllarda poroz ortamlarda akışla ilgili sorunlara uygulanabilir modern bir matematiksel modele dönüştürülmüştür ve hala kullanılmaktadır, (Baytaş, 2006). Şekil 1.15'te Darcy'nin deney seti gösterilmektedir.



Şekil 1.15: Darcy tarafından oluşturulan deney düzeneği (Uğur, 2015).

Darcy'nin deney setinde akış oldukça yavaştır ve silindirin üst kısmından giren su, kum tanelerinin aralarından filtrelenerek aşağıya iner. Akış, sabit, ortamının aynı olduğu ve tek yönlü olduğu varsayılmaktadır. Darcy, deney sürecinde, akışkanların kumla dolu bölümünde üst ve alt seviyelerdeki basınç farkı ile akışkanların dağılımı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunduğunu keşfetmiştir. Günümüze uyarlanmış Darcy yasası eşitlik (1.14) ile verilmiştir (Nield ve Bejan, 1999).

$$v = -\frac{K}{\mu}(\Delta P + \rho g) \quad (1.14)$$

Denklemden v , Darcy hızı olarak adlandırılır. ΔP akışkanın içinde meydana gelen basınç gradyanı vektörüdür. K , yöne bağlı olarak sabit özelliklere sahip poroz ortamın geçirgenliğini, ρ akışkanın özkütlesini, μ ise akışkanın dinamik viskozitesini ifade eder. Darcy yasası, sıkıştırılamayan ve Newtonian özellikteki akışkanlar için kullanılabilir. Ayrıca, akış hızı çok düşüktür, Reynolds sayısının değeri birden daha küçüktür ve akış laminer, tek yönlüdür. Darcy denklemi, deneysel bir eşitlik olup yüksek akış hızlarında yani Reynolds sayısının birden büyük olduğu durumlarda akışı modelleyemez. Eğer poroz ortam içinde akış sızıntı şeklindeyse, Darcy denklemi geçerlidir ve eşitlik doğrusal bir ilişki gösterir; yani akış hızı çok düşüktür. Bu durum, Reynolds sayısının çok küçük olacağını ve büyüklük derecesinin bire eşit olacağını ifade eder. Akış hızı arttıkça, Reynolds sayısının değeri 1 ile 10 arasında olduğunda, akış düzgün bir şekilde doğrusal olmayan sürüklenmelerin etkisiyle doğrusal ilişkiden sapar (Uğur, 2015).

1.4.5.5 Darcy-Forchheimer-Brinkman Denklemi

Akışkanların gözenekli yani poroz ortamlardaki hareketini modellemek için kullanılan bir denklemdir. Hem laminer hem de türbülanslı akışlar için geçerlidir. Gözenekli ortamlar için momentum korunumu eşitlik (1.15) ve (1.16)'da verilmiştir (Elibol ve Türkoğlu, 2017).

$$\rho_f \left(\frac{1}{\varphi^2} u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\varphi^2} v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\varphi} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \delta \frac{\mu u}{K} - \delta \frac{C_E}{K^{1/2}} \rho_f |u|u \quad (1.15)$$

$$\rho_f \left(\frac{1}{\varphi^2} u \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\varphi^2} v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\varphi} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \delta \frac{\mu v}{K} - \delta \frac{C_E}{K^{1/2}} \rho_f |v|v \quad (1.16)$$

Eşitlik (1.15) ve (1.16)'daki ilk terim atalet kuvvetlerini, ikinci terim gözenekli ortamda akışkanın basınç değişimlerini, üçüncü terim viskoz kuvvetlerini, dördüncü terim Darcy akışının etkilerini ve viskoz sürüklenme kuvvetini, beşinci terim ise şekil sürüklenme kuvvetini ifade etmektedir. Ayrıca eşitliklerde verilen C_E Ergün katsayısını, K ise gözenekli ortamın geçirgenliği ifade eder. Bu ifadelerde eşitlik (1.17) ve (1.18)'de detaylı olarak verilmektedir. Burada d_p , ortalama gözenek çapını belirtmektedir (Elibol ve Türkoğlu, 2017).

$$K = \frac{d_p^2 \varphi^3}{150 (1 - \varphi)^2} \quad (1.17)$$

$$C_E = \frac{1,75}{(150\varphi^3)^{1/2}} \quad (1.18)$$

Denklemlerdeki ifadeleri sırasıyla ρ , yoğunluk; φ , gözenekli ortamın porozite parametresi, v , akışkanın hızı; P , basınç; μ , akışkanın dinamik vizkozitesi; δ , akışkanın türbülanslı davranışını modelleyen bir parametre olarak tanımlanmaktadır.

1.5 Literatür Özeti

Kuru tip (dökme reçine) transformatörlerde yeterli soğutma için genellikle cebri hava konveksiyonu uygulamalarından faydalanılır. Kuru tip transformatörlerde hava yalıtımı, yağ yalıtımı kadar verimli değildir. Bu nedenle, kuru bir transformatörün sargılarının koruma kalitesine yönelik gereksinimler çok daha yüksek olmalıdır. Konveksiyon yoluyla ısıyı gidermek için özel geometrilere sahip kanallar tasarlanır. Tasarlanan kanalların toplam yüzey alanının optimizasyonu çözülmesi gereken bir sorundur (Çelen, 2021; Dursun ve Ekici, 2024). Transformatörlerin havalandırılması/soğutulması hakkında literatürdeki çalışmalar sınırlı olmakla beraber şu şekilde bahsedilebilir;

Kömürgöz (2002), kendi kendine soğuyan kuru tip transformatörler için bobin sıcaklığı tayini yaparak en sıcak nokta sıcaklıklarını belirlemeye çalışmıştır. Çalışmasında, yüksek gerilim sargı iletkenlerini basamaklandırmış ve sargıda soğutucu havanın hız dağılımını çıkarmıştır.

Altay (2018), yaptıkları çalışmada, 250kVA gücünde 33/0,4kV çevirme gerilimine, Dyn11 bağlantı grubu ve IP31 koruma sınıfı kabinine sahip kuru tip transformatörün üç farklı tip çatı yapısı için ısı transferi performanslarını incelemiştir. Her çatı tipine sahip kabinli kuru tip transformatörler için gerçekleştirilen HAD analizleri ile kabin içindeki sıcaklık dağılımlarını hesaplanmıştır. Ayrıca, incelenen kuru tip transformatöre ait en efektif soğutma için uygun çatı geometrisini belirlemiştir.

Tören ve Çelebi (2019), 1500 VA kuru tip transformatörün termal kamera görüntülerini incelemiş, çekirdek ve sargı sıcaklıklarını ölçmüşlerdir. Fiziksel modelin Ansys

programında simülasyonlarını gerçekleştirmiş, simüle edilen transformatörün dış ortamlarda da çalışabilmesi için muhafaza tasarlamışlardır. Çalışma sonunda, kabinli kuru tip transformatöre cebri soğutma sağlandığında en sıcak nokta sıcaklığının %4,6'lık düştüğünü görmüştür.

Gezegin vd. (2016), 5 kVA 220/380V doğal soğutmalı, tek fazlı kuru tip transformatör için yapılan deneysel çalışmada, kısa devre testi, doğrudan yüklenme testi, IEC normlarına dayalı ısınma formülü ve alçak gerilim sargısının en yüksek sıcaklık noktasının tespiti için yerleştirilen sensörler kullanılarak en yüksek sıcaklık noktasını belirlemiştir. Bu sıcaklık değeri, transformatörün ömrü açısından kritik bir öneme sahiptir.

Esliman vd. (2011), alçak gerilim ve yüksek gerilim sargılarını üç boyutlu modellemiş ve en sıcak nokta sıcaklık tayini yapmıştır. Radyal ve aksenal yönlerdeki sıcaklık gradyanlarını çıkarmıştır. Bobinlerde kullanılan havalandırma kanalları sayıları ve genişlikleri üzerine bir çalışma yapmıştır.

Tören (2018), 1500 VA gücünde bir kuru tip transformatörün tasarımında, öncelikle üç boyutlu bir model oluşturmuş ve Ansys/Maxwell yazılımı kullanılarak transformatörün elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kayıp değerleri, Ansys Fluent yazılımından faydalanılarak sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. İzolasyon malzemesi olarak grafen kullanılarak ısı transferinde iyileşme sağlanmış ve grafen kullanımının sonucunda %13 oranında sıcaklık düşüşü elde etmiştir. Ayrıca, kuru tip transformatörün kabin tasarımında ester bazlı yağ dolaşımının ısı simülasyonu da yapılmıştır.

1.6 Çalışmanın Amacı

Kuru tip transformatörleri için oluşturulan standart HAD modellerinde, kabin havalandırma menfez bölgelerinde oldukça yüksek miktarda ağ (mesh) elemanına ihtiyaç duyulmakta, bu durum akış ve ısı transferi analizlerinde işlem süresinin ve maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Ancak, sayısal modelde menfezler için tanımlanacak porozite değerleri ile analiz süresinin kısaltılması mümkündür.

Bu bağlamda, çalışmamızda, kuru tip transformatör kabini havalandırma sistemlerinde kullanılan farklı IP koruma sınıflarına ait menfezlerin hava akışı üzerindeki etkisinin hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmesi ve ilgili menfezlerin porozite

değerlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında IP21, IP31, IPX3 ve IP54 koruma sınıflarına ait menfezlerden geçen havanın akış hızının ölçülebileceği bir deney seti tasarlanmış ve üretilmiştir. Sayısal sonuçlar için ise deney setinin sayısal modeli oluşturularak Ansys Fluent yazılımı ile HAD analizleri yapılmıştır. Farklı menfez yapıları kullanılarak tekrar edilen bu çalışmalar ile akış tüpü içerisindeki havanın hız değişimleri, basınç düşümleri ve bu değerlere bağlı hesaplanan menfezlere ait porozite değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Türetilen verilerin kuru tip transformatör havalandırma sistemi ısı transferi hesaplarında girdi olarak kullanılabilmesi beklenmekte ve literatürde eksikliği görülen bu konuya ait katkı sunulacağı düşünülmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Havalandırma Akış Testleri

Havalandırma akış testlerinde, kabinli kuru tip transformatör havalandırma sisteminde farklı sınıf IP menfezlerinin akışa etkisinin fiziki olarak simüle edilmesi planlanmıştır. Bunun için giriş ve çıkış hızlarının ölçülebildiği örnek bir transformatör kabini havalandırma sistemi modeli tasarlanmış ve imal edilmiştir. Üretilen deney setinde uygun deney şartları belirlenerek akış testleri gerçekleştirilmiştir.

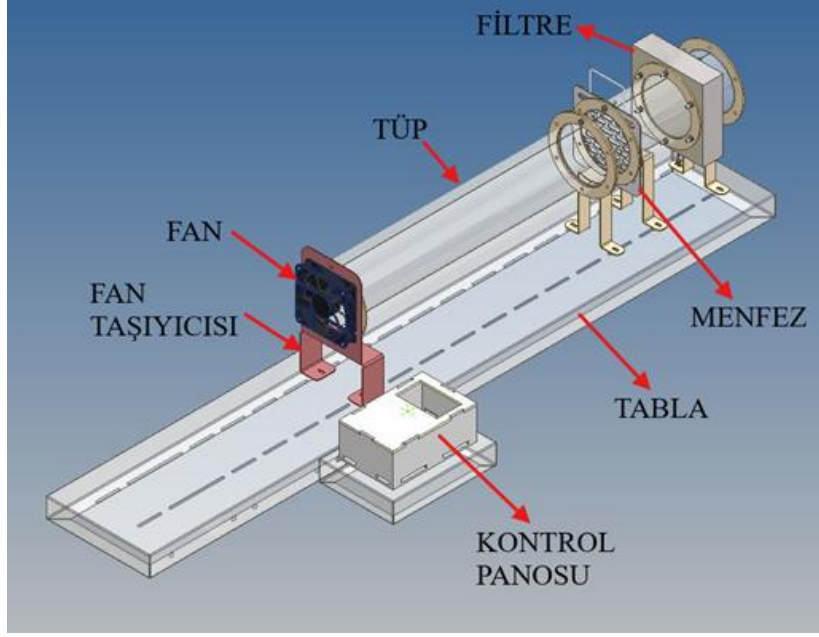
2.1.1 Deney Setinin Üretimi

Deney setinde, kuru tip transformatör kabinlerinden en çok kullanılan modeller için akış tüpünde kaybolan basınç ve çıkış hızları ölçülmek istenmiştir. Burada havaya cebri taşınım yaptırmak için fan, hareketi yönlendirmek için akış tüpü ve ölçüm değerleri alabilmek için anemometre kullanılmıştır. Fanın farklı dönüş hızlarından kaynaklanan hava akış hız değişimleri ve farklı menfezlerdeki hız değişimleri gözlenmek istenmiştir.

2.1.1.1 Deney Setinin Tasarımı

Deney setinde bir adet emiş fanı, fan çapına uygun olacak şekilde 100 cm uzunluğunda ve çapı 11.5 cm bir boru kanalı, kanal önünde montaj demontaja müsaade edebilmesi için flanşlar, bunun devamında poroz ortamını belirleyen gözenekli veya bükümlü olarak imal edilen kabin havalandırma menfezi (IP21, IP31, IPX3 ve IP54), hava çıkış borusunun tasarımı, tüm sistemin bir arada kalması için slot delikli bir tabla, tabla ile boruları bir arada tutan destek ayakları ve fan tutucu ile test düzeneği çizimi ile tasarım aşaması tamamlanmıştır. Şekil 2.1'te deney setinin katı model tasarımı gösterilmiştir. Detaylı teknik resim ekler kısmında verilmiştir.

Deney setinde fan yardımı ile hava akış tüpü içerisinde hareket ettirilmektedir ve havanın hiçbir engele çarpmadan önceki hız değeri, giriş hız ölçüm noktasından ölçülmüştür. Menfez sonrası veya sistemde filtre de mevcutsa filtreyi de geçtikten sonra, çıkış hızı ölçüm noktasından çıkış hız değerleri ölçülmüştür. Şekil 2.2'de hız ölçüm noktaları işaretlenmiştir.



Şekil 2.1: Deney seti tasarımı.



Şekil 2.2: Deney seti hız ölçüm noktaları.

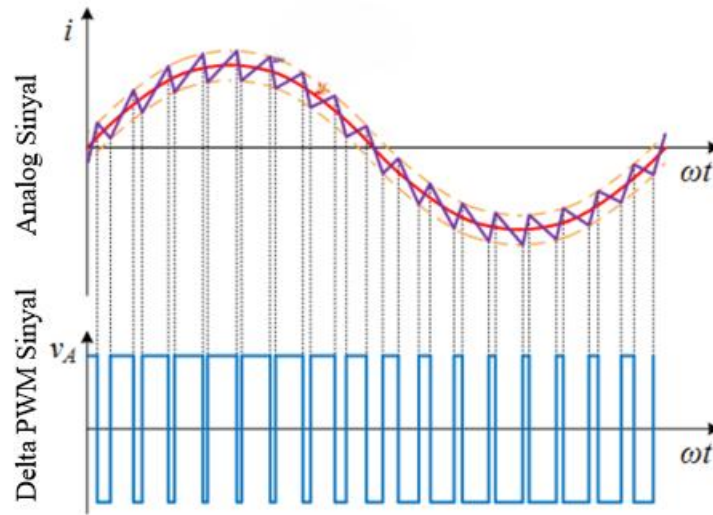
Deney Setinin Bileşenleri ve Kullanılan Teçhizatlar

Deney setinde hava akışını sağlayan ve bu akışa ait ölçümlerin yapılması için kullanılan bileşen ve teçhizatlar bu bölümde tanıtılmıştır. Kullanılan ekipmanlardan (a) fan, (b) kontrol ünitesi ve (c) anemometre Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: a) Fan, b) Kontrol ünitesi, c) Anemometre.

Fan: Deney setinde, Salzer markasına ait 12V DC 0,37A özelliklerine sahip hız ayarlı, eksenel, emiş fanı kullanılmıştır. Fan ile hava dış ortamdan alınıp fan dönüş eksenine paralel olarak tüp içerisindeki hava akışı sağlanır. Fanın hızı, işlemcinin PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) çıkışının L298N'nin en pinine bağlanması sonucu PWM çıkışından gönderilen kare dalgaların frekansı ile fanın hızının birim zaman başına 40-255 darbe aralığına bölünmesiyle kontrol edilebilmektedir. Fan hızının 40 darbe aralığına bölünen değeri (kararlı akışın minimum hızda sağlandığı) fan yükü olarak %16'ya; 100, 150, 200 ve 255 adıma bölünen değerleri ise fan yükü olarak sırasıyla ortalama %40, %60, %80 ve %100'e karşılık gelmektedir. Şekil 2.4'te zamana bağlı değişen analog ve PWM sinyal eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 2.4: PWM sinyali (Kener, 2024).

Fan Kontrol Ünitesi: Fan kontrol ünitesinde sistemin arayüzüne erişim sağlamak için 5V besleme gerilimli, 60x99mm boyutlarında baskı devre kartı, 20x4 LCD ekran- I2C lehimli mavi ekran kullanılmıştır. Motorlara gerekli olan gerilimi işlemci ile kontrol edebilme yeteneğine sahip L298N voltaj regülatörlü çift motor sürücü kartı bulunmaktadır. Bu kart, birbirinden bağımsız olarak iki ayrı motoru kontrol edebilir. Üzerinde dahili regülatörü, yüksek sıcaklık ve kısa devre koruması vardır. Güç devresinin çıkış gerilimini regüle ederek işlemcinin besleme gerilimini sağlayan "LM2596 Mini Ayarlanabilir Voltaj Regülatör Kartı 3A (4-35V ile 1.25-30V)" kullanılmıştır. Sistemdeki tuş takımı, LCD gibi çevre birimler ile 8 bit dijital haberleşme sağlayıcısı olarak "Pcf8574 Arduino Io Genişletme Shield Kartı" kullanılmıştır. Fan kontrol sisteminin işlemcisi olarak ESP-32 modül geliştirme kartı tercih edilmiştir.

Anemometre: Ölçümlerde sıcaklık, akış hızı ve hacimsel debi ölçümü yapabilen Testo 425 Marka Termal Anemometre kullanılmıştır. Anemometrenin sıcaklık ve hız ölçümlerine ait teknik özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Anemometrenin sıcaklık ve hız ölçüm teknik özellikleri (Testo ,2024).

Sıcaklık-NTC	
Ölçüm Aralığı	-20...+70 °C
Doğruluk	±0,5 °C
Çözünürlük	0,1 °C
Hız-Termal Anemometre	
Ölçüm Aralığı	0,01...30 m/s
Doğruluk	±(0,03m/s +4,0 % ölç.değ) (0,01...+20m/s) ±(0,5m/s +5,0 % ölç.değ) (20,01...+30m/s)
Çözünürlük	0,01 m/s

2.1.1.2 Deney Setinin İmalatı

Deney setinin üretimi farklı IP koruma sınıflarına ait menfezlerinin, ana gövde ve tablanın, hava akış tünelinin ve kontrol ünitesinin imalatı ve montajı aşamalarından oluşmuştur.

Farklı IP Sınıflarına Ait Menfez Üretimleri

Kuru tip transformatör havalandırma menfezinde farklı tip IP koruma sınıfları kullanılmaktadır. Transformatörlerde en yaygın kullanan ve çalışmamızda da test edilen IP sınıflarının teknik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2: Kuru tip transformatörler için en yaygın kullanılan IP koruma sınıfı menfezlerine ait delik ölçü bilgisi veya koruma sac eğim bilgisi.

IP Koruma Sınıfı	Gözenek (Delik) Çapı Ölçüsü	IP Koruma Sınıfı Açıklaması
IP21	30 mm x 10 mm	12,5mm’den büyük çapa sahip cisimler giremez.
IP31	20 mm x 2,5 mm	2,5mm’den büyük çapa sahip cisimler giremez.
IP Koruma Sınıfı	Koruma Sacı Eğim Açısı	-
IPX3	124°	60° açığa kadar püskürtülen su zarar vermez.
IPX4	140°	Herhangi bir yönden sıçrayan su zarar vermez.

IP21 Havalandırma Menfezi: Ø12,5mm'den büyük cisimlerin koruma muhafazasından içeri giremeyecek büyüklükte (30x10 mm) havalandırma deliklerine sahip menfez, 2 mm kalınlığa sahip metal sac (ST37-2) levhadan üretilmiştir. Üretilen IP21 sınıfı koruma menfezi, Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



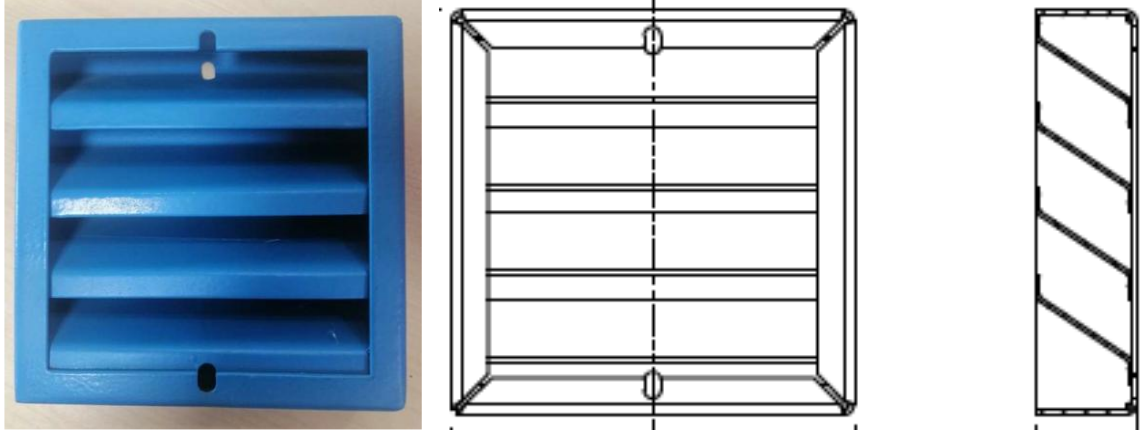
Şekil 2.5: IP21 havalandırma menfezleri.

IP31 Havalandırma Menfezi: Ø2,5mm'den büyük cisimlerin koruma muhafazasından geçememesi için 20x2,5 mm boyutlarında slot delikler ihtiva eden, 2 mm ST37-2 sacdan üretilen IP31 sınıfı koruma menfezine ait üretim sonu görseli Şekil 2.6'da verilmiştir.



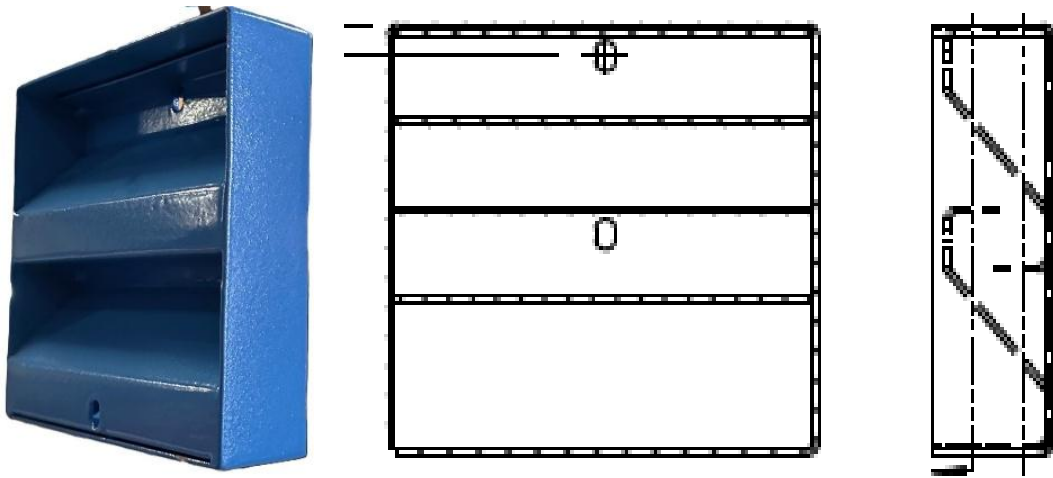
Şekil 2.6: IP31 havalandırma menfezleri.

IPX3 Havalandırma Menfezi: IPX3 ve IPX4 imalatı için ST37-2 sacdan kıvrımlı çerçeveler oluşturulmuştur. IPX3 menfezi, ilgili koruma sınıfında bahsedildiği gibi düşeyle 60°'lik bir açığa sahip sıçrayan veya püskürtülen su partiküllerinin muhafazadan içeri girmesini önleyecek şekilde çerçeve içerisine eğimli kanallar sürekli kaynak metodu ile kaynatılarak imal edilmiştir. IPX3 sınıfı koruma menfezine ait üretim sonu görseli ve kesit teknik resimleri Şekil 2.7'de verilmiştir.



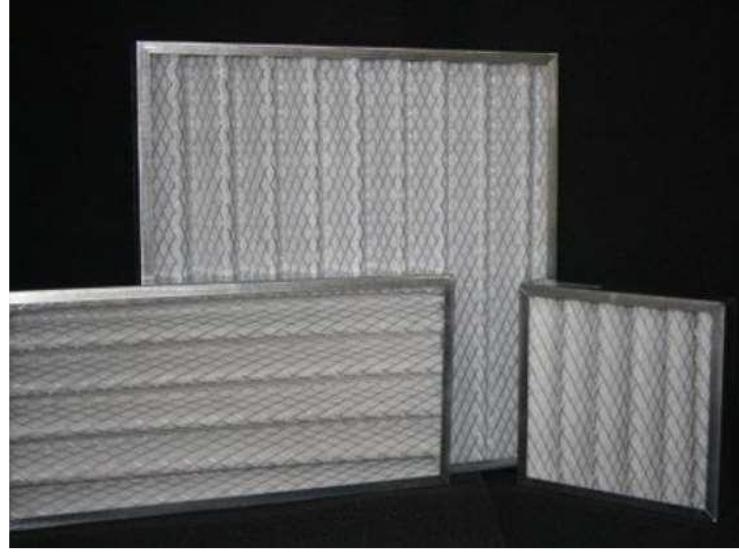
Şekil 2.7: IPX3 havalandırma menfez kesiti.

IPX4 Havalandırma Menfezi: IPX4 koruma sınıfı, herhangi bir yönden sıçrayan suya karşı koruma anlamına gelmektedir. Buradaki sacın kıvrım geometrisi değiştirilerek istenen koruma sağlanmaktadır. IPX4 sınıfı koruma menfezine ait üretim sonu görseli ve kesit teknik resimleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8: IPX4 havalandırma menfez kesiti.

G4 (EU4) Elyaf Kaset Filtre: Bu filtreler düşük basınç kayıplarına sahip oldukları için havalandırma ve klima santrallerinde kaba ve ince toz yakalamak için kullanılırlar. Çalışmamızda IP54 koruma sınıfının sağlanabilmesi için EAF firmasının 287x287x48 mm ölçülerine ait zig zag metal çerçeveli G4(EU4) sınıfındaki kaset filtresi seçilmiştir. Seçilen filtreye ait görsel Şekil 2.9’da teknik özellikleri ise Tablo 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.9: G4/EU4 elyaf kaset filtre tipleri, (Ertektitre,2023).

Tablo 2.3: Filtre özellikleri (Ertektitre, 2023).

Filtre Sınıfı (EN 779)	G4(EU4)
Çerçeve Malzemesi	Elektro galvaniz Sac
Filtre Medyası	Sentetik Polyester
Max. Basınç Düşümü	250Pa
Filtre değişim önerisi	100Pa
Çalışma sıcaklığı	80 °C
Bağıl Nem	% 100

Ana Gövde Üretimi

Deney setinin hava akış tüpü (tüneli), bağlantı elemanları ve tabla bileşenlerinin imalatı aşağıdaki alt bileşen ve üretim aşamalarından oluşmaktadır.

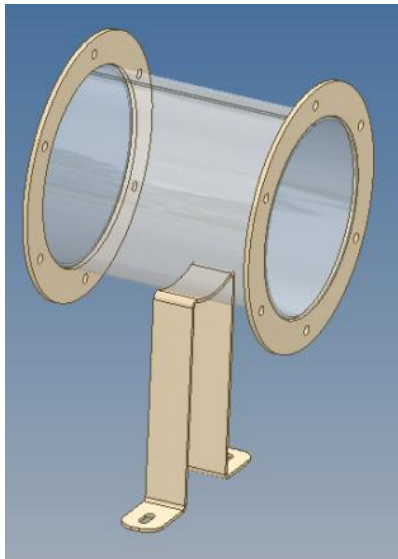
Hava Akış Tüpü (Tüneli): Hava akış tüpü 1000 mm uzunluğunda ve 115 mm çapında olacak şekilde tasarlanmıştır. İmalatında 1,5 mm kalınlığında DKP sac malzeme kullanılmıştır. Sac yuvarlama makinesi yardımı ile istenilen geometrik form

oluşturulduktan sonra kaynakla birleştirilmiştir. Son işlem olarak astar, ardından son kat boya ile boyanmıştır. Hava akış tüpü üretim sonrası görseli Şekil.2.10’da gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Hava akış tüpü (tüneli).

Tüp Orta: Tüp orta olarak adlandırılan, 145 mm uzunluğa sahip olan bir diğer parça da aynı imalat süreçleri ile üretilmiştir. Akış tüpüne, taşıyıcı ayak kaynatılmış ve bu parça test düzeneği tablasına ayakları üzerinde bulunan iki slot delik yardımı ile montajlanmıştır. Eğer tüp orta IP54 menfez ile çalıştırılmak istenirse, bir tarafına menfez, diğer tarafına ise filtre montajı yapılarak test aparatı ilgili IP sınıfına ait ölçüm almak üzere aktif hale getirilmiş olunur. Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Tüp orta.

Tabla: Deney seti tablası, farklı hava akış tüneli bileşenlerinin, farklı IP sınıfına ait menfez tiplerinin ve ilave bileşenlerin montajının yapılabilmesi için birçok montaj slot deliğinden oluşan bir yapıda üretilmiştir. Tablanın ilk kesimden boya sonrası hazır hale geliş aşamaları Şekil 2.12’de verilmiştir.



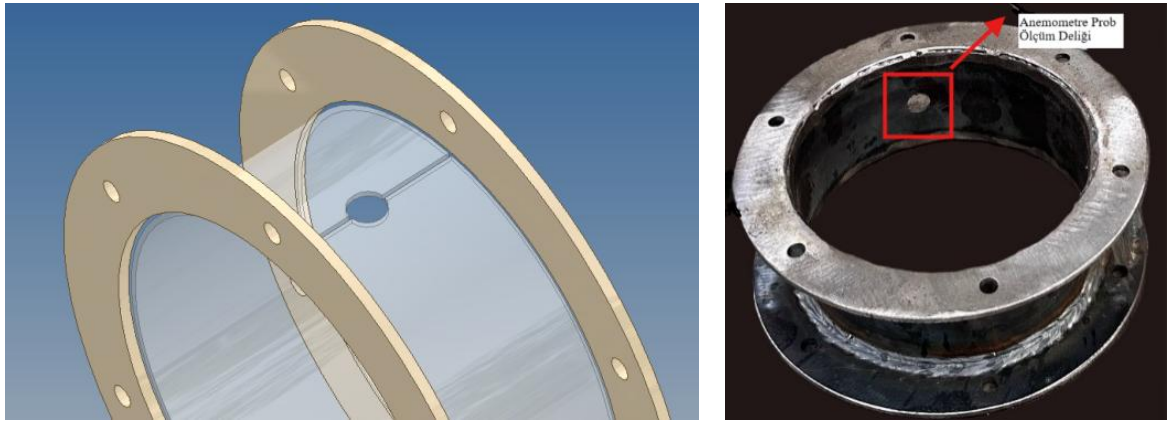
Şekil 2.12: Tabla imalat aşamaları.

Fan Taşıyıcı Ayağı: 2 mm kalınlığa sahip levha sactan lazer kesim ve abkant preste bükülerek imal edilmiştir. Fan çapına uygun olarak 115 mm çapında bir delik delinmiştir ve deliğe eş merkezli fan montaj delikleri çapı belirlenip ilgili montaj delikleri açılmıştır. Fan montajı için dört adet delik açılmıştır. Fan taşıyıcı ayağın bir yüzüne fan montajlanmaktadır, diğer yüzüne ise 1000 mm uzunluğa sahip hava akış tüpü montajlanmaktadır. Hava akış tüpü için onun montajlanacağı yüzeye iki ayrı delik daha açılmıştır. Fan taşıyıcı ayağı, deney seti tablası üzerine açılmış slot deliklerden fan taşıyıcı ayağı altında bulunan iki slot delikten tablaya tespit edilir. Fan ve hava akış borusu da ilgili montaj deliklerden fan taşıyıcı ayağına montajlanmıştır. Fan taşıyıcı ayağı katı modeli, üretim aşamasındaki ve fan montajlı hali Şekil 2.13’te gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Fan taşıyıcı ayağı.

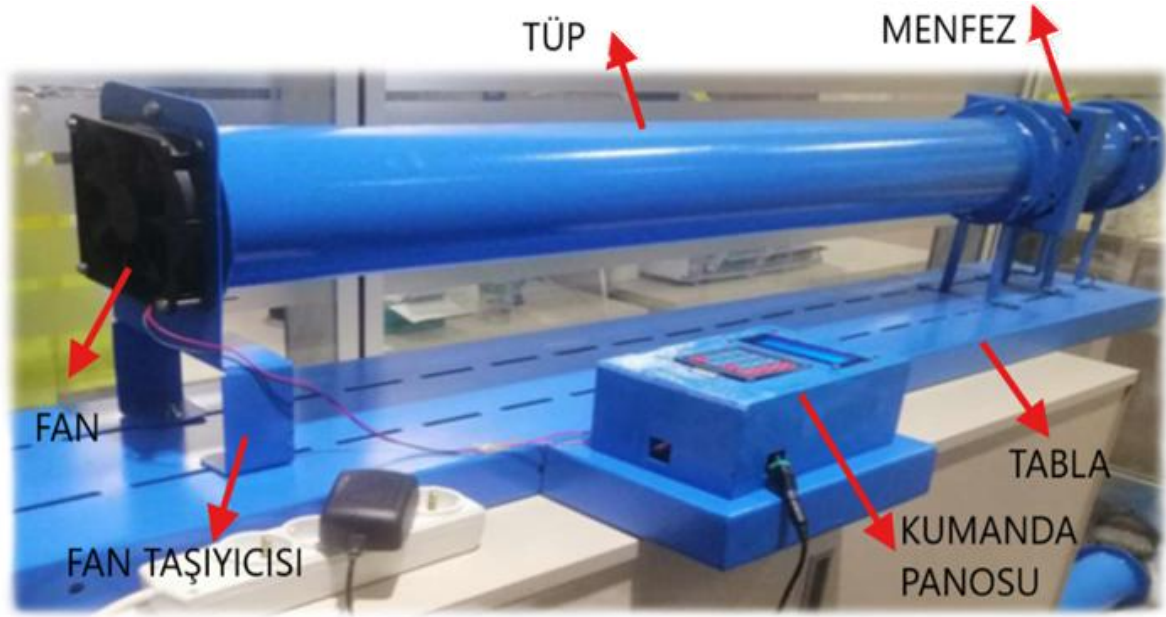
Hava Akış Ölçüm Tüneli: Hava akış tüpünün bitiminde hava (giriş-çıkış) hızının ölçüldüğü ve farklı koruma sınıflarına ait havalandırma menfezlerinin montaj ve demontajının yapılabildiği bileşendir. Prob ölçüm ve flanşlı bağlantı deliklerine sahip hava akış tüneli 50 mm uzunluğundadır. Tasarım ve üretim aşamalarına ait görseller Şekil 2.14'te sunulmuştur. Deney setinde hava akış ölçüm tünelinden iki adet kullanılmıştır. Birincisi koruyucu menfez girişi önünde, ikincisi ise menfez çıkışında bulunmaktadır.



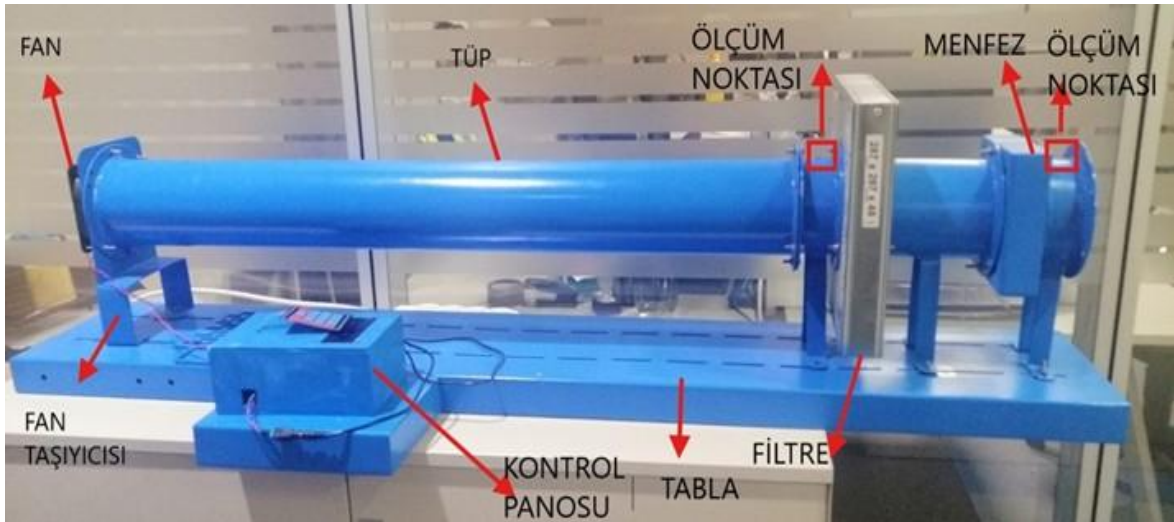
Şekil 2.14: Hava akış ölçüm tüneli.

Bileşenlerin montajlandıktan sonra elde edilen deney setinin nihai hali Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Havalandırma menfezinin demontaj-montajı yapılarak istenilen menfez yapısı için ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Deney seti bileşen yerleşimleri IP21, IP31 ve IPX3 havalandırma menfezleri için Şekil 2.15'teki gibi; önceki sisteme ilave

olarak filtre eklenen IP54 havalandırma menfezleri için ise Şekil 2.16'daki gibi yapılmaktadır.



Şekil 2.15: IPX3 deney seti montajlı hali.



Şekil 2.16: IP54 deney seti montajlı hali.

2.1.2 Deney Şartlarının Belirlenmesi

Deneysel oda sıcaklığında, dışarıdan sisteme bir hava akışının etki etmediği (klima veya oda havalandırma sisteminden kaynaklı hava akışının olmadığı) bir ortamda gerçekleştirilmiştir.

Fan ile hava tüneli içerisindeki akışkana zorlanmış taşınım hareketi yaptırılarak tünel boyunca havanın süpürülmesi sağlanmıştır. Fan hızı, kare dalgaların frekansı ile fan hızının birim zaman başına 40-255 darbe aralığına bölünmesi ile kontrol edilebilmektedir. Fan dönüş hızı 40-100-150-200-255 bölüm değerlerinde ayarlanarak beş farklı ölçüm alınmıştır. Bölüm adımı 40 adımın altında olması durumunda fanın kalkış akımı sağlanamamıştır. Kararlı çalışmanın başladığı bu değerde fan yükü %16 olmuştur. Hızların adım sayısına bölünmesi ile ortalama yük değerleri %16, 20, 40, 60, 80 ve 100 olarak seçilmiştir. Bu beş değer için havalandırma menfez öncesi akışın giriş hızı ölçülmüştür.

Çıkış hız ölçümleri ise havanın menfezi geçtikten (gözenekli ortamdan çıktıktan) sonraki durumları için gerçekleştirilmiştir. Ölçümler tüm koruyucu IP menfez yapıları için fanın beş farklı çalışma kapasitesinde tekrarlanmıştır.

2.2 Sayısal Modelin Oluşturulması

Katı modeli önceden oluşturulmuş deney seti, Space Claim programında analiz için ihtiyaç duyulmayan gereksiz komponentlerden temizlenmiştir. Hava akış tünelleri ve menfezler bırakılmış, bu parçalardaki montaj delikleri temizlenmiş; geri kalan montajı oluşturan elemanların tümü ise silinmiştir. Bu işlemler mesh (ağ) eleman sayısını mümkün mertebede azaltarak çözüm süresini kısaltmak için yapılmıştır.

2.2.1 Ansys Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Hesaplama akışkanlar mekaniği (HAD/CFD) analiz aşamasında hava şartları (ideal gaz) 25 °C'deki havanın sıcaklık değerleri Ansys Granta malzeme kütüphanesinden çekilmiştir. Buna göre havanın yoğunluğu $1,225 \frac{kg}{m^3}$, dinamik viskozitesi ise $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ olarak kabul edilmiştir.

2.2.1.1 Akışın Tipinin Belirlenmesi

Akışın rejiminin türbülanslı veya laminer olmasına karar vermek için Re (Reynolds) sayısından faydalanılır. Re sayısının hesabı için eşitlik (2.1) kullanılmaktadır.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.1)$$

Burada; ρ (yoğunluk) v (akışkanın giriş hızı), μ (dinamik vizkozite), D ise hidrolik çap veya ıslak çevredir. HAD analiz kısmında incelediğimiz menfez koruma sınıfları için hesaplanan Re sayıları Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4: Deneysel hız sonuçlarına göre reynolds (Re) sayıları.

IP Menfez Koruma Sınıfı	Re Sayısı Formülasyon	Re Sayısı
IP21	$= \frac{1,225 \times 2,1 \times 0,115}{1,7894 \times 10^{-5}}$	≈ 16532.7
IP31	$= \frac{1,225 \times 1,467 \times 0,115}{1,7894 \times 10^{-5}}$	≈ 11549.3
IPX3	$= \frac{1,225 \times 0,593 \times 0,115}{1,7894 \times 10^{-5}}$	≈ 4668.5

Kanal içi akışlarda Re sayısı 2300'ten küçük ise akış laminar, 2300 ile 4000 arasında ise geçiş bölgesinde, 4000'ten büyük ise türbülanslı olarak kabul edilir. Çalışmalarımızda hesaplanan Re sayılarının tümü 4000 değerinin üzerinde olduğu için akışlar türbülanslı bölgededir ve akış analizleri bu bölgede geçerli olan çözüm metotları uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

2.2.1.2 Akışın Sıkıştırılabilir veya Sıkıştırılmaz Olma Durumu

Çözüm tipi olarak HAD'da iki çözüm tipi vardır. Bunlar akışın sıkıştırılabilir veya sıkıştırılmaz olmasına göre Pressure-Based (basınca bağlı) veya Density-Based (yoğunluğa bağlı) olarak seçilebilmektedir. Basınca dayalı çözücü geleneksel olarak sıkıştırılmaz veya düşük sıkıştırılabilir akışlar içindir ancak basınca dayalı eşleştirilmiş çözücü orta düzeyde sıkıştırılabilir akışları da işleyebilir. Yoğunluğa dayalı çözücü ise esas olarak yüksek hızlı sıkıştırılabilir akışlar için önerilmektedir. Bernoulli eşitliğinin kullanımı sıkıştırılmaz akışlar içindir ancak izentropik koşul eşitliğinde sıkıştırılabilir akış için denklem (2.2)'deki gibi düzenlenilerek kullanılabilir.

$$\left(\frac{k}{k-1} \right) \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{sabit} \quad (2.2)$$

Burada;

k: adyabatik katsayıdır ve hava için genellikle 1.4 olarak kabul edilir. Bu değer gazın ısı değişimi sırasında basınç ve hacim arasındaki ilişkisini ifade eder.

ρ : gazın yoğunluğu,

v : hız,

g : yer çekimi,

z : yüksekliktir.

İki nokta arasında Bernoulli denkleminde faydalanılarak işletilirse eşitlik (2.3) kullanılır;

$$\left(\frac{k}{k-1}\right) \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \left(\frac{k}{k-1}\right) \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte akışkan (gaz), durma halinden göz ardı edilebilecek kadar küçük bir yükseklik farkında ivmelenmesi, uygulamada sıkça karşılaşılan bir durumdur. $z_1 = z_2$ ve $v_1 = 0$ 'dır. İzoentropik akış için $P/\rho^k = \text{sabit}$ olduğu kabul edilir. İdeal gazlarda $\rho = P/RT$ gazın yoğunluğu basınç ve sıcaklık ile ilişkilidir ve ideal gazlar için yerel ses hızı $c = \sqrt{kRT}$ eşitliği ile hesaplanır. Burada R ideal gaz sabiti, T sıcaklık ve c ses hızını ifade eder. Mach sayısı (Ma) ise, $Ma = v/c$ eşitliği ile hesaplanır. Bu bağlamda, eşitlik (2.3) indirgenerek:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma_2^2 \right]^{k/(k-1)} \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4) elde edilir. Mach sayısının 0.3'ten küçük olduğu durumlarda, sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlarda, Bernoulli eşitliğinden elde edilen sonuçlar neticesinde aradaki fark yüzde ikiden az olduğu gözlemlenmektedir. Bu nedenle, Mach sayısı 0.3 veya daha küçük olduğunda, ideal gazların akışı sıkıştırılamaz olarak kabul edilebilir. Başka bir deyişle, havanın hızı 102 m/s'ye kadar olan değerlerde hava sıkıştırılamaz olarak kabul edilebilir (Çengel ve Çimbala, 2020).

Çalışmamızdaki giriş ve çıkış hızlarının tümü 0.3 Ma değerinden küçük olduğu için akış sıkıştırılamaz olarak seçilmiş ve sonlu elemanlar programı çözümünde Pressure Based olarak tanımlanmıştır. Sınır şartı olarak fanın bulunduğu boru tarafı alanı *velocity-inlet*,

havalandırma menfezi kesitini geçtikten sonraki boru alanı ise *pressure-outlet* olarak tanımlanmıştır.

2.2.1.3 Basınç Hız Bağlantısı

Süreklilik ve momentum eşitlikleri sırasıyla çözdürülür ve süreklilik denklem çözümü, basınç çözümü için temel alınır. Fakat süreklilik denkleminin integral formunun ayrılaşmış hali:

$$\sum_f^{N_f} (\rho v)_f x A_f = 0 \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.5)'te basınç terimi doğrudan yer almadığından, basınç ile hız denklemleri arasında bir ilişki kurulması gerekmektedir. Bu ilişkiyi sağlamak için süreklilik denkleminde bazı düzenlemeler yapılır, böylece basınç teriminin çözümü elde edilir. Basınç düzeltmesinin yapıldığı bu tür algoritmalara örnek olarak "SIMPLE, PISO, COUPLED" gibi yöntemler gösterilebilir (Güngör, 2013; Ferziger ve Perić, 2010).

ρ : akışkanın yoğunluğu

v : hız

A_f : Akışkanın geçiş yaptığı yüzey alanı

N_f : Toplam yüzey sayısı veya eleman sayısı

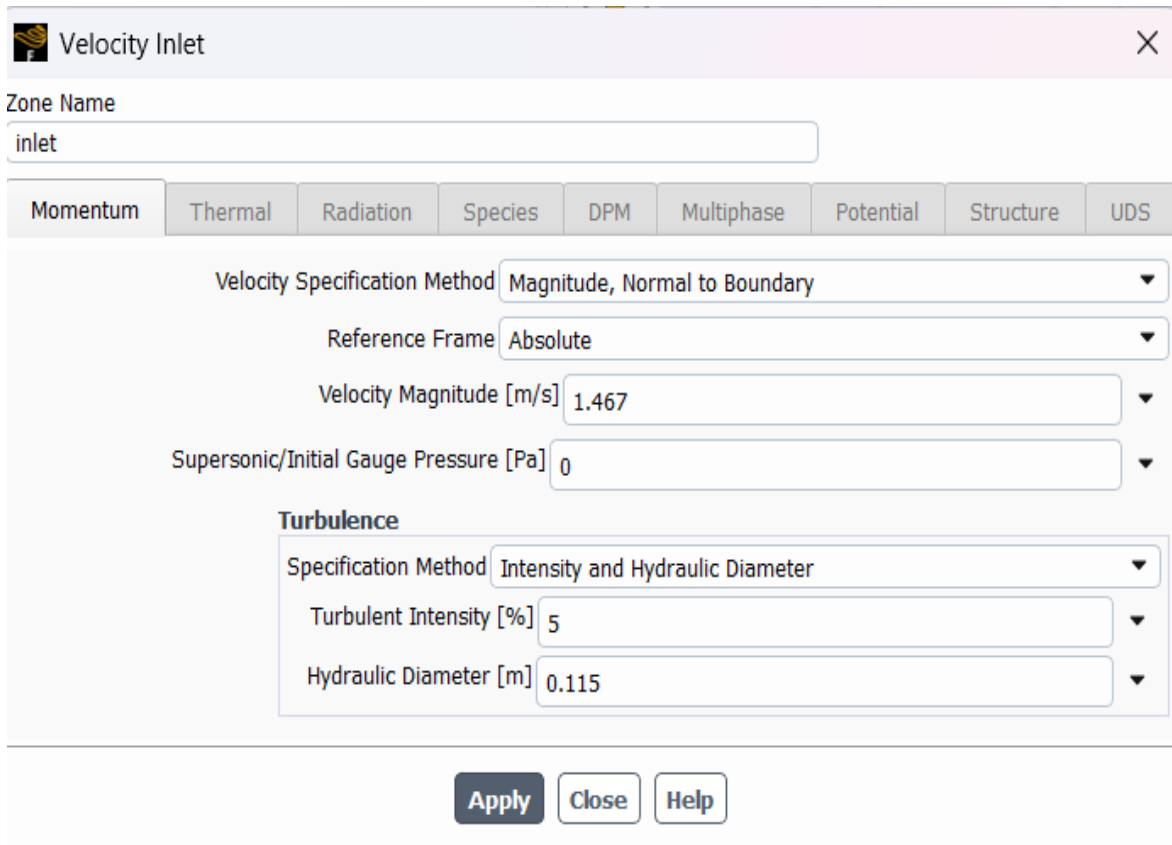
\sum_f : Herhangi bir kontrol hacmi veya sınır üzerindeki tüm yüzeylerin toplamını ifade eder.

SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması çözücüde basınç bağlantılı yarı kapalı yöntem olarak ifade edilir. Bu algoritmada basınç ve momentum korunum denklemlerini ayrı ayrı çözen "ayrık" çözücüdür. Bu algoritma hem zamana bağlı hem de zamandan bağımsız, sıkıştırılmaz akış problemleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. SIMPLE, oldukça stabil bir algoritma olup "under-relaxation" kullanımı ile çalışır. Birleşik çözücülerde yakınsama için daha fazla iterasyon yapılması gerekmekte ve çözüm süreleri uzamaktadır. COUPLED (bağlantılı) çözücü, basınç ve hız alanlarını birlikte çözmeye yönelik daha modern bir yaklaşımdır. Bu yöntem, hız ve basınç denklemleri arasındaki bağımsızlıkları ortadan kaldırarak çözümde daha hızlı ve daha doğru sonuçlar elde etmeyi amaçlar. Yüksek hızlar, karmaşık geometriler, türbülanslı akışlarda hız-basınç denklemlerini birden fazla iterasyon gerektirmeden çözerek aynı anda hem hızlı hem de doğru sonuçlar elde edilebilir. Fluent çalışmalarında hız basınç bağlantısı

için akış rejimi kararlı ise SIMPLE algoritması, zamana bağlı ise PISO algoritması kullanılması uygun olacağı belirtilmiştir (Özzaban, 2020). Susam (2019) ise yaptığı çalışmada zamana bağlı SIMPLE ve PISO çözüm algoritmaları arasında anlamlı bir fark saptayamamıştır. Çalışmamızda basınç hız bağlantısı “SIMPLE” olarak seçilmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir.

2.2.1.4 Giriş Hava Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Deney setinde elde edilen hız ölçümleri, tünel hidrolik çapı ve türbülans yoğunluğu değerleri programa sınır koşulları olarak girilmiştir. Şekil 2.17’de giriş hava sınır koşulları verilmiştir.



Şekil 2.17: Giriş hava sınır koşulları.

Hız girdisi olan türbülans yoğunluğu, bir zaman dilimi içindeki rüzgar hızının standart sapmasının, o zaman dilimindeki ortalama rüzgar hızına bölünmesiyle hesaplanan boyutsuz bir büyüklük olarak tanımlanır. Her zaman dilimindeki türbülans yoğunluğu, belirli bir denklem kullanılarak hesaplanabilir (Tucker ve Liu Y. 2005). Türbülans yoğunluğu I ile sembolize edilir ve u'/U oranına eşittir. Burada;

u' belirli bir zaman periyodu boyunca belirli bir konumdaki türbülanslı hız dalgalanmalarının kök-ortalama-kare (RMS) veya standart sapması; U ise aynı zaman periyodu boyunca aynı konumdaki hızın ortalamasıdır.

Dönen makinelerdeki akışlar türbin kompresör vb. ve eşanjörler gibi karmaşık iç geometriye sahip makinelerde akış türbülans yoğunluğu %5-%20 arasındadır ve yüksek türbülans durumu olarak ifade edilir. Boru ve havalandırma akışları vb. gibi karmaşık geometri içermeyen durumlarda türbülans yoğunluğu %1 ile %5 arasında alınır ve bu durum orta türbülans durumu olarak ifade edilir. Yüksek kaliteli rüzgar türbinleri, uçak, denizaltı, arabalar üzerindeki hareketsiz duran dış akış gibi hareketsiz duran bir akışkandan kaynaklanan akışlarda türbülans çok düşük seviyelerdedir. Burada türbülans yoğunluğu %1'in altındadır ve düşük türbülans durumu olarak ifade edilir (Cfd-online, 2024). Düz (2013), giriş ve tam gelişmiş akış bölgesinde laminar-türbülans geçiş özelliklerinin deneysel ve sayısal olarak incelediği çalışmada giriş türbülans yoğunluğu orta yoğunluklu türbülans olarak %5 almıştır. Bununla birlikte Ansys programında önerilen türbülans yoğunluk değeri de %5'tir. Geçekleştirilen analizlerde türbülans yoğunluğu değeri %5 olarak kabul edilmiştir.

2.2.1.5 Çıkış Havası Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Çıkış sınır şartları için gösterge basınç değeri, boru iç çapı ve türbülans yoğunluğu değerleri programa sınır koşulları olarak girilmiştir.

Çıkış bölgesi sınır şartları tanımlanırken Gauge Pressure (basınç), atmosfer basıncı üzerindeki basınç (gösterge basıncı) değeri olarak "0" Pascal girilmiştir. Gauge basınç atmosfer basıncı ile ölçülen basınç arasındaki fark olarak da bilinir. Benzer analiz çalışmalarında da gösterge basıncı sıfır olarak kabul edilmiştir (Altay vd., 2020; Söylemez, 2005). Şekil 2.18'de menfez çıkışı havanın sınır koşulları verilmiştir.

Pressure Outlet ×

Zone Name
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure [Pa] 0

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

Prevent Reverse Flow

Radial Equilibrium Pressure Distribution

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method Intensity and Hydraulic Diameter

Backflow Turbulent Intensity [%] 5

Backflow Hydraulic Diameter [m] 0.115

Apply Close Help

Şekil 2.18: Çıkış havası sınır koşulları.

2.2.1.6 Mesh (Ağ) Yapısı

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinde ağ, çözümlenecek fiziksel alanı küçük, sonlu kontrol hacimlerine bölen bir ağ yapısıdır ve bu yapının kalitesi, akışın doğru bir şekilde modellenmesi ve simülasyon sonuçlarının doğruluğu üzerinde direkt rol alır. Fluent, hem yapılandırılmış (hexahedral) hem de yapılandırılmamış (tetrahedral, polyhedral) elemanlar ile ağ oluşturma yeteneğine sahiptir. Ağ yapısı olarak tüm yüzey durumlarına uyum sağlaması, kolayca oluşturulabilmesi ve çözümlenebilmesi gibi avantajları nedeniyle yapısal olmayan tetrahedral (dört yüzlü) ağ elemanları çokça tercih edilmektedir. Bu elemanlar, dört adet üçgen yüzeyden oluşan piramidal şekillerdir. Bu elemanların her birinin dört köşesi ve üçgen şeklinde yüzeyleri vardır (Akbulut, 2010).

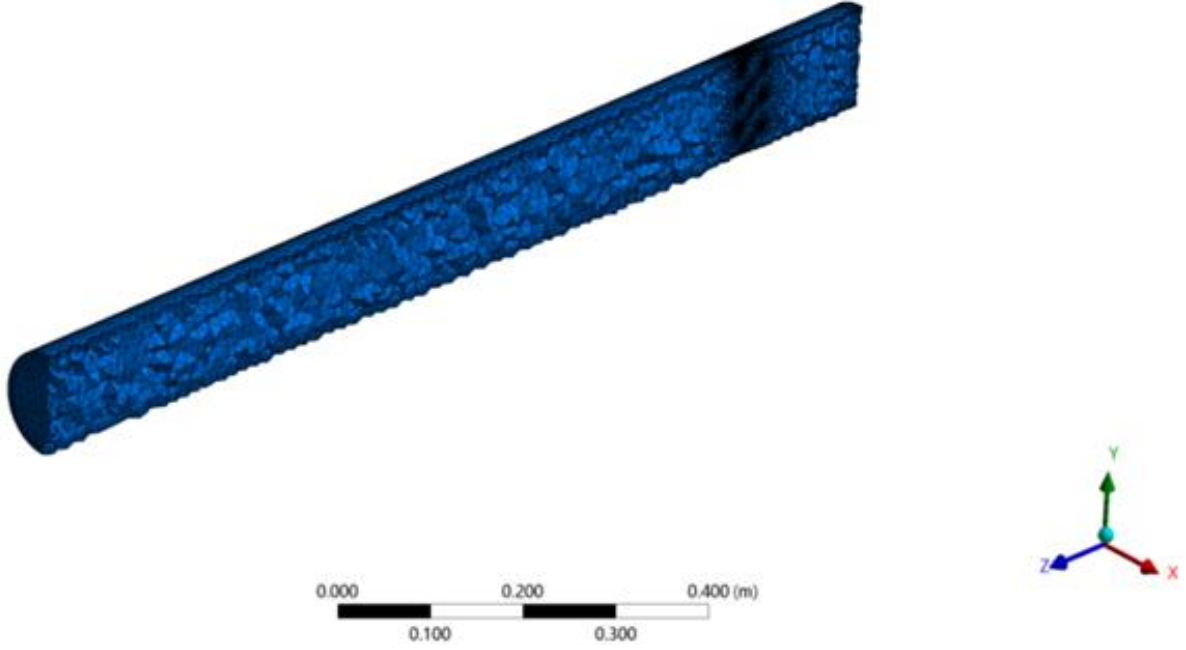
HAD analizlerinde eleman kalitesini belirleyen iki önemli parametre çarpıklık ve ortogonal kalitedir (Haldar vd., 2022; Yaşar, 2023). Çarpıklık, kısaca üçgen veya kare elemanlardan

sapma olarak tanımlanabilir. Ortogonal kalite ise çarpıklıktan farklı olarak, bir elemanın yüzeyi ile merkezi arasındaki mesafenin komşu elemanlar arasındaki mesafenin oranı şeklinde tanımlanır (Korkmaz ve Kaçar, 2021; Yaşar, 2023). Bu iki parametrenin belirli aralıklar içinde olması, eleman kalitesini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Literatürde yapılan çalışmalarda, çarpıklık değerinin 0.94'ün altında olmaması ve ortogonal kalitenin de 0.15'in altına düşmemesi gerektiği önerilmektedir (Fatchurrohman ve Chia, 2017; Yaşar, 2023). Çarpıklık değeri ne kadar küçükse mükemmel geometriye o kadar yakın olduğu düşünülmelidir. Çarpıklık değeri 0 ile 1 aralığındadır ve bu değerlerin hücre kalitesi karşılıkları Tablo 2.5'te verilmiştir (Ateş, 2020).

Tablo 2.5: Çarpıklık (Skewness) değeri kalite karşılıkları (Ateş, 2020).

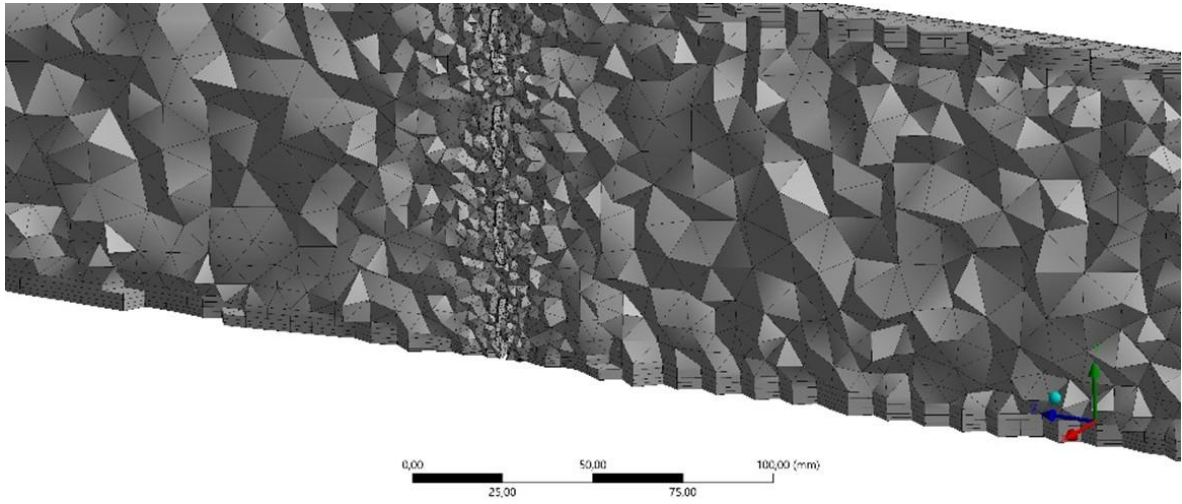
Çarpıklık (Skewness)	Hücre Kalitesi
1	Çok kötü
$0.9 < \text{çarpıklık} < 1$	Kötü
$0.75 < \text{çarpıklık} < 0.9$	Zayıf
$0.5 < \text{çarpıklık} < 0.75$	Orta
$0.25 < \text{çarpıklık} < 0.5$	İyi
$0 < \text{çarpıklık} < 0.25$	Çok iyi
0	Eşkenar

Bu çalışmada da ağırlıklı olarak ağ eleman yapısını tetrahedral elemanlardan oluşturulmuştur. Gerçekleştirdiğimiz analiz çalışmalarında kullanılan ağ yoğunluğu ve çarpıklık değer dağılımı her ağ yapısının altında verilmiştir. Şekil 2.19'da genel ağ yapısı görünümü verilmiştir.



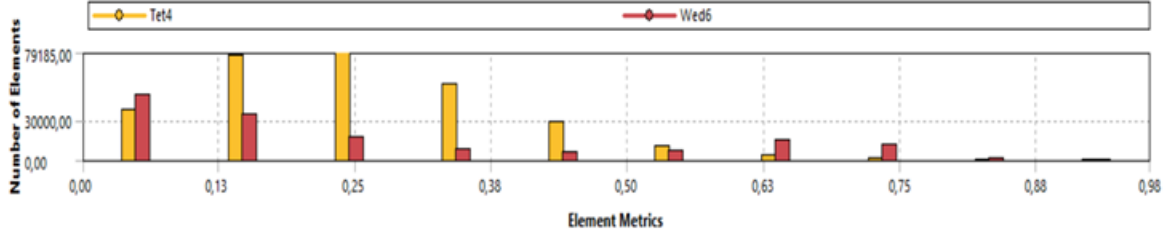
Şekil 2.19: Genel ağ yapısı görünümü.

Şekil 2.20’de IP21 Menfez yapısına ait ağ detayı görünümü verilmiştir. Menfezin olduğu bölgelerde daha küçük ağ yapıları oluşturulmuştur.



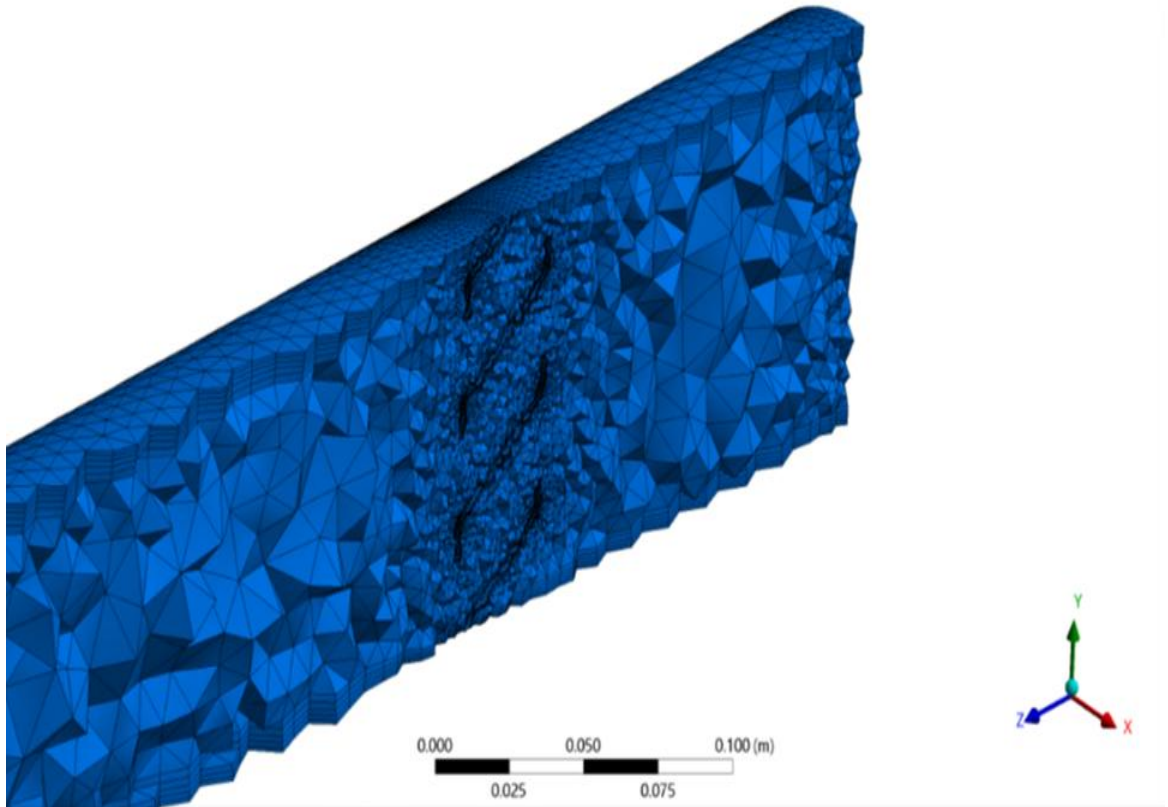
Şekil 2 20: IP21 menfez kesit ağ detayı.

IP21 menfez kesiti için gerçekleştirilen analizler 481114 elemandan oluşmuştur ve çarpıklık değer dağılımı Şekil 2.21’de verilmiştir.



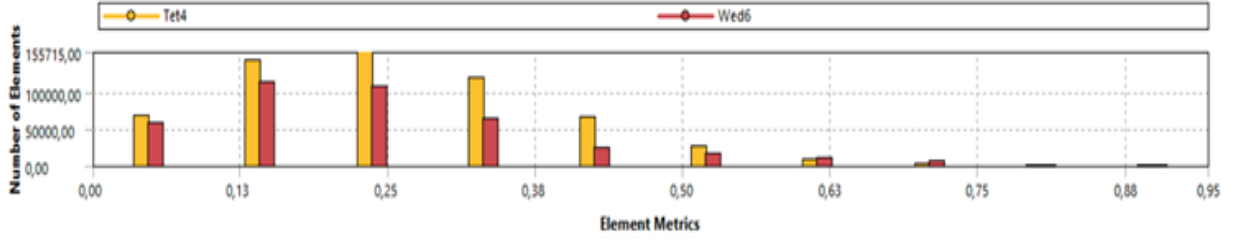
Şekil 2.21: IP21 için çarpıklık değer dağılımı.

Analizlerde daha hassas ve doğru sonuç elde etmek için IPX3 menfezinin bükümlü bölgelerinde ağ eleman hacmi küçültülüp tane sayısı artırılarak daha yoğun bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Böylece tüm geometriye özel iyileştirilmiş ağ atmaktan kaçınılmış ve çözüm süresinde iyileşme sağlanmıştır. Şekil 2.22’de IPX3 menfez ağ detayı verilmiştir.



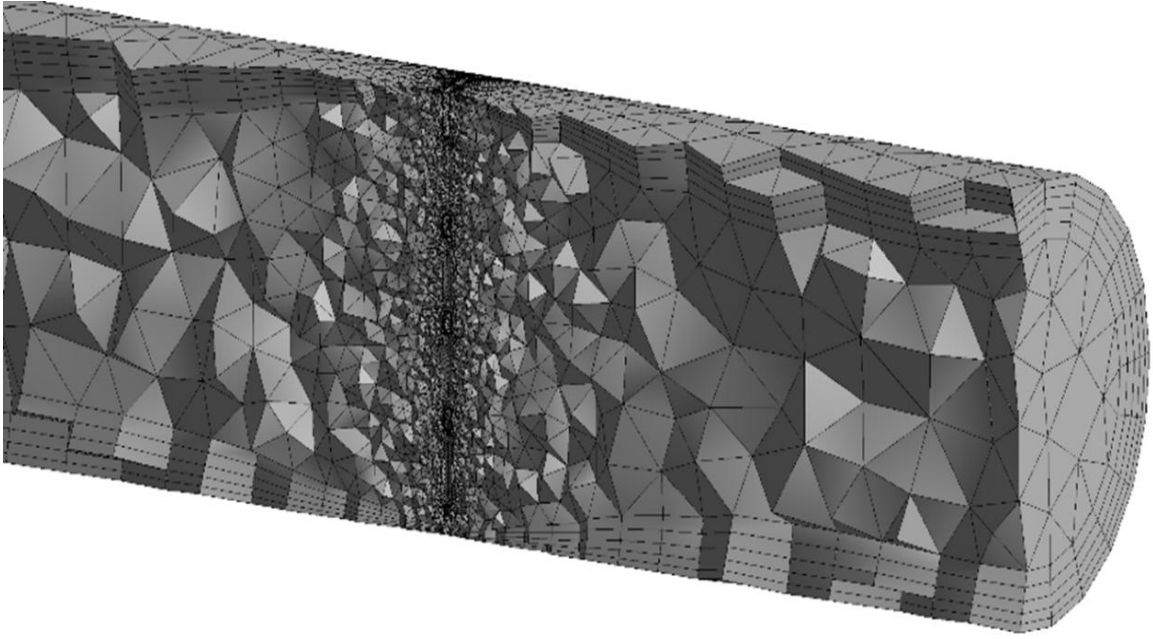
Şekil 2.22: IPX3 menfez kesit ağ detayı.

IPX3 menfez kesiti için gerçekleştirilen analizler 991864 elemandan oluşmuştur. IPX3 için çarpıklık değer dağılımı Şekil 2.23’te verilmiştir.



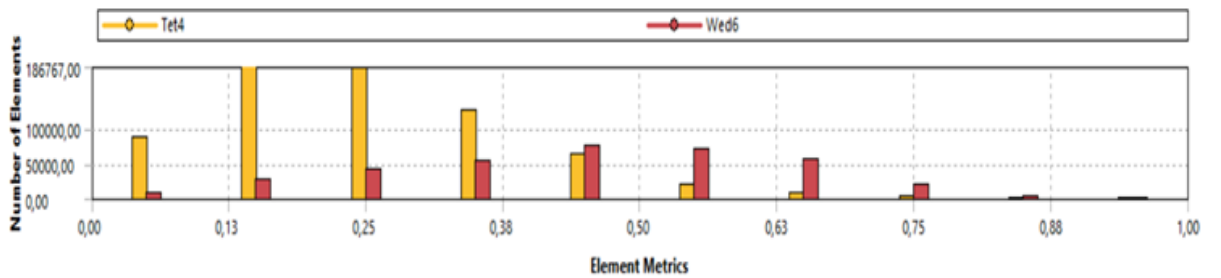
Şekil 2.23: IPX3 için çarpıklık değer dağılımı.

IP31 kesit menfezinde bulunan slot deliklerin ölçüsü 2,5mm'ye kadar küçüldüğünden ağ yapısı bu bölgede çok yoğunlaşmıştır. Şekil 2.24'te IP31 menfez ağ detayı verilmiştir.



Şekil 2.24: IP31 menfez kesit ağ detayı.

IP31 menfez kesiti için gerçekleştirilen analizler 1300899 elemandan oluşmuştur ve çarpıklık değer dağılımı Şekil 2.25'te verilmiştir.



Şekil 2.25: IP31 için çarpıklık değer dağılımı.

Tablo 2.6’da analizlerde kullanılan eleman sayıları, düğüm noktası sayıları, maksimum çarpıklık değerleri ve ortalama çarpıklık değerleri verilmiştir.

Tablo 2.6: Sayısal analizlerde kullanılan menfezlerin ağ yapısı özellikleri.

Menfez Yapıları	IP21 Menfez	IP31 Menfez	IPX3 Menfez
Eleman sayısı	484114	1300899	991864
Düğüm Noktası Sayısı	128705	239210	320793
Maksimum Çarpıklık Değeri	0,93028	0,79836	0,9452
Ortalama Çarpıklık Değeri	0,21171	0,22922	0,24639

Sonlu hacimler hesaplarında geometrinin duvara yakın olan kısımlarında ağ örgüsüne özellikle dikkat edip o bölgelerde akış çizgisine paralel “inflation” (şişirme) verilmesi ayrıca önem arz etmektedir. Boru yüzeyi üzerindeki sınır tabakası büyümesini çözümlenebilen yüksek kaliteli, geometriye göre hizalanmış ağ elemanlarının oluşturulmasıdır, bunun için yüzey ağından "şişirilmiş" prizma katmanları kullanılır. Merkezden yüzeye yaklaştıkça akışkan hızının doğrusal olmayan bir şekilde azalacağı ve yüzeyde sıfır olacağını biliriz bu duruma HAD analizlerde “kaymama” (no slip) denmektedir. Şişirme ağı, duvar yüzeyine yakın yerlerde hızı ve basınç düşüşlerini doğru ölçmek için kullanılır ve önemlidir. Şişirilmiş katman sayısı problemin karmaşıklığına göre sayısı artırılıp azaltılabilir. Ayrıca duvara en yakın katmanın kalınlığı en azdır sonraki katmanlar arasında da belirli bir katman büyüme oranında genişlemektedir.

Ağ eleman sayısının optimum seçimi için dört farklı eleman sayısı ile giriş hız değerleri verilerek HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Giriş hız değerlerine göre çıkış hız değeri, maksimum hız değeri ve basınç düşümleri kıyaslanarak ideal ağ eleman sayısı tespiti edilmeye çalışılmıştır. Tablo 2.7’de IP21 menfez yapısı için ağ bağımsızlık kontrol değerleri verilmiştir. Maksimum hız, 5,06 m/s ve 5,081 m/s değerleri arasında değişirken basınç düşümü ise 9,736 Pa ile 9,322 Pa değer aralığında değişmiştir. 738 bin eleman olan sistem ile (*) 484 bin eleman kullanılan yapıda değerler yakın çıkmıştır. Çözüm süresinin kısalması adına (*) 484 bin elemanın yeterli ve sonuçların güvenilirliği sağladığı düşüncesi ile bu eleman yapısına göre HAD analizleri raporlanmıştır.

Tablo 2.7: IP21 menfez yapısı için ağ bağımsızlık kontrolü.

Eleman sayısı	$V_{giriş}$ (m/s)	$V_{çıkış}$ (m/s)	V_{max} (m/s)	Basınç Düşümü (Pa)
361000	2,1	2,066	5,065	9,736
484114(*)	2,1	1,950	5,080	9,650
604231	2,1	2,034	4,956	9,322
738290	2,1	1,979	5,081	9,624

2.2.1.7 Türbülanslı Akışlar için Kullanılan Çözüm Modelleri

HAD uygulamalarında Doğrudan Sayısal Simülasyon (DSS) metodu ya da Büyük Girdap Simülasyonu (BGS) metodu gibi yöntemler kullanılabilse de, günümüzde artık genellikle daha az hesaplama maliyeti gerektiren Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RONS) modelleri tercih edilmektedir. Akışkanlar mekaniğinin en önemli konularından biri olan girdaplı akışlar, endüstride birçok uygulamada karşılaşılan akış tipidir; laminar akışa neredeyse hiç rastlanılmaz. Ancak RONS çözüm yönteminde hiçbir girdap doğrudan çözülmez, bunun yerine tüm girdapları modellenir. Ancak, tek bir türbülans modelinin kullanımının karşılaşılan bütün problemde diğer tüm modellere göre üstünlüğünden bahsedilemez. Karşılaşılan problemin türü, istenilen doğruluk hassasiyeti, akışın fiziği ve işlem süresi gibi parametrelere bağlı olarak seçilmelidir çünkü her bir türbülans modelinin yetenek ve limitleri diğer modellerden farklılık gösterir (Yüce, 2019). Literatürde tercih edilen türbülanslı akış modelleri ve özellikleri Tablo 2.7’de verilmiştir (Kıray,2014).

Tablo 2.8: FLUENT programı tarafından desteklenen RANS tabanlı türbülans modellerinin karşılaştırılması (Kıray,2014).

Model	Türbülans Modelinin Gücü	Kısıtlamalar	Hesaplama Zamanı	Yakınsama
Standart k-ε	-Güçlü, ekonomik ve kabul edilebilir doğruluk -Endüstriyel akış ve ısı transferi simülasyonlarında kullanılan asıl model	Şiddetli basınç gradyeni, ayrılma ve dönmeye sahip akışları tahmin eder	Referans	Referans
RNG k-ε	-Aniden gelen akış -Dönen akış -Düşük Reynold sayısına sahip akış	-	% 10-15 daha fazla	Yüksek dönme sayısına sahip akışlarda yakınsama elde etmek zordur.
Gerçeklenir k-ε	-Ayrılma, tekrar birleşme ve güçlü ters basınç gradyenine sahip akışlar	Etki alanı hem dönen hem de hareketsiz bölgeler içerir.	Nispeten fazla	Duvar fonksiyonları ile iyi yakınsar
Standart k-ω	-Düşük Reynolds sayısı etkileri -Sıkıştırılabilirlik	Ters basınç gradyenine sahip akışlar	Aynı	Aynı
SST k-ω	-Havacılık alanındaki uygulamalar -Ters basınç gradyenine sahip akışlar -Kanat profili ve transonik şok dalgaları	Standart k-ε modeline benzer	Aynı	Aynı
RSM	-Dönme, akış çizgisi kıvrımları ve gerilme oranında hızlı değişim olan akışlar	-	% 50-60 daha fazla	Ağ yapısına karşı çok hassastır.

Türbülansın yapısı, Reynolds sayısı büyüklüğü ve akış modelinin kurgulandığı sisteme göre değişiklikler göstermektedir, bunun yanında Ansys Fluent doğru modeli seçebilmemiz için önerilerde bulunur. Çalışmalarda kullandığımız türbülans modeli SST k- ω modelidir.

Standart k- ε (Epsilon) Modeli:

Türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans enerji yitim oranı (ε) için taşınım denklemleri çözülmekte olup türbülans momentum difüzyon katsayısı (veya viskozite) olan k ve ε değerleri, bu taşınım denklemlerinin çözümüyle bir fonksiyon olarak hesaplanmaktadır (Geçim vd., 2008).

$$\mu_t = C_u \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t} \quad (2.7)$$

Burada μ_t : Türbülanslı girdap (eddy) viskozitesidir. Bu türbülans modelinin dayandığı varsayımları incelediğimizde, türbülanslı akış viskozitesinin izotropik olduğu, yani Reynolds gerilmesinin ortalama deformasyon miktarına oranının tüm yönlerde eşit olduğu görülür (Kıray, 2014).

Türbülans kinetik enerji (k) denklemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.8)$$

Türbülans enerji yitimi (ε) için taşınım denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.9)$$

SST (Shear Stress Transport) k- ω (Ω -Omega) Modeli:

SST k- ω türbülans modeli, F.R. Menter aracılığıyla 1994 tarihinde iyileştirilmiştir. Diğer bir deyişle kayma gerilme taşınımı k- ω modeli olarak ifade edilebilir. RONS denkleminde dayanan bir modeldir. Türbülanslı akışların daha doğru simüle edilmesine olanak sağlar.

SST k- ω modeli, türbülans enerjisi (k) ve türbülans frekansı (ω) ile ilgili denklemleri çözerek türbülanslı akışı modellemeye çalışır.

$$\omega = \frac{\varepsilon}{c_{\mu}k} \quad (2.10)$$

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.11)$$

k denklemleri: Bu denklemler, türbülans enerjisinin zaman içindeki değişimini ve türbülansın üretimi ile disipasyonu arasındaki dengeyi modellemeyi amaçlar yani k değeri kinetik enerjidir denebilir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + P_k - \beta \cdot k\omega \quad (2.12)$$

Burada, P_k türbülans üretimi, μ_t türbülans viskozitesi ve σ_k ise k -denkleminin Prandtl sayısıdır.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - Y_k + S_k \quad (2.13)$$

Özgül enerji (ω) yitimi denklemleri:

Bu denklemler türbülans frekansını, yani türbülansın zamanla nasıl yayıldığını ve çözülmeye başladığını belirler.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U \nabla \omega = \nabla \cdot \left(\frac{\omega k}{\sigma_\omega} \nabla \omega \right) + \gamma \omega^2 - \beta \omega k \quad (2.14)$$

Burada, γ (gamma) ve β (beta) katsayıları, türbülansın çözünürlüğü ve büyüklüğü ile ilişkilidir.

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + P_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.15)$$

Burada, P_k , ortalama hız gradyanlarının oluşturduğu türbülans kinetik enerji (k) üretimi, P_ω özgül enerji yitimi (ω) üretimi, Γ_k , türbülans enerji yitimi (k) ve Γ_ω özgül enerji yitimi (ω)'ne ait etkin yayılma gücünü ifade eder. Y_k terimi türbülans enerji yitimi (k) ve Y_ω terimi ise özgül enerji yitimi (ω)'ne ait çalkantıdan kaynaklanan kayıplardır. D_ω , çapraz yayılma terimini tanımlar (Kıray, 2014).

Y_k ve Y_ω , genellikle türbülans enerjisinin içsel friksiyonlar (dairese hareketler) ve mikroskobik etkileşimler ile kaybolması sonucu çıkar. S_k ve S_ω , genellikle türbülans dış kaynaklarından gelen etkileri tanımlar, örneğin sürüklenme kuvvetleri.

Bu model hem k- ω modelini kullanır hem de k- ϵ modelini kullanarak daha avantajlı çözümler sunar. Cidara yakın bölgelerde k- ω modeli ile çözüm yaparken cidardan uzakta k- ϵ modeli ile çözüm sunar (Aksu, 2023). SST k- ω modeli, özellikle düşük Reynolds sayısına sahip olan ve genellikle duvarlara yakın bölgelerdeki akışlar için etkili sonuçlar verir. Bu tür akışlar, genellikle sınır tabakası akışları olarak bilinir. SST modelinin özelliği ise SST k- ω modeli, k- ω modelini k- ϵ modeline geçiş yapacak şekilde uyarlayarak daha esnek bir türbülans modeli sunar. Bu yaklaşımda, akışın türbülanslı bölgelerinde k- ω modeli, serbest akış bölgelerinde ise k- ϵ modeli kullanılır. Böylece her iki modelin avantajları bir araya getirilmiş olur.

2.2.1.8 Sıkıştırılmaz Akışlarda Korunum Denklemleri

Sıkıştırılmaz akışlarda basınç ile yoğunluk değişmeyecektir ve burada ısının da değişmediği kabul edilirse sistem;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.17)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.18)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.19)$$

Bu eşitliklerdeki ifadeler, ρ akışkanın yoğunluğu, μ ise dinamik viskozitesi ve P ise basıncı göstermektedir (Akbulut, 2010).

2.3 Porozite Değerlerinin (Katsayılarının) Hesaplanması

Gözenekli ortamların ısı transferlerinde analizlerinde sayısal modeli basitleştirerek işlem süresinin kısaltılması için porozite değerlerinin (katsayılarının) bilinmesi gerekmektedir. Porozite değerleri; $1/\alpha$ ile ifade edilen viskoz iç direnç faktörü ve C_2 ile gösterilen atalet

direnci faktörüdür. Bu değerlerin hesabı için kullanılan basınç gradyanı, homojen gözenekli ortam için eşitlik (2.20)'deki gibidir (Ansys Tutorials 7.2.3, 2024);

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (2.20)$$

Burada;

S_i , momentum denklemleri için kaynak terimi; v_i , hız değerlerini; ρ ise yoğunluğunu ifade etmektedir. Yüksek akış hızlarında C_2 , gözenekli ortamdaki atalet kayıpları için bir düzeltme sağlar.

Delikli bir plaka içinde basınç düşümü aynı zamanda eşitlik (2.21)'e de denktir. Burada Δn , porozlu ortamın veya delikli sacın kalınlığıdır.

$$\Delta P = -S_i \Delta n \quad (2.21)$$

Basınç ve hız verilerinden porozite katsayılarının türetilmesi için hız ve basınç değerlerine ihtiyaç vardır. Bu değerler deneysel olarak ölçülen giriş hızları ve bu hızlara bağlı olarak Ansys Fluent ile hesaplanan basınç düşümleridir. Hız ve basınç düşüm arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, trend eğrisi 2. dereceden bir polinom olarak çizdirilir. Bu polinom ve S_i 'den türetilen eşitlik (2.20)'nin özdeş terimleri kullanılarak istenen poroz katsayıları elde edilir.

3. SONUÇLAR VE ANALİZLER

3.1 Deney Sonuçları

Hava akış tünellerinden anemometre yardımı ile üç defa hız değerleri okunmuş ve bunların ortalaması alınmıştır. Bu ölçümler beş kademedeki fan yükleri (%16, %40, %60, %80 ve %100) için yinelenmiştir. Böylece fan yükü ve hızı ile menfezlerin geçirgenlikleri arasındaki bağlantı incelenmek istenmiştir. Her bir menfez kesiti için bu işlemler ardışık olarak sürdürülmüştür. Hız ölçümlerinin verildiği tablolardaki V_1 değerleri menfez öncesi hava giriş hızlarını, V_2 değerleri ise menfez sonrası hava çıkış hızlarını için ifade etmektedir.

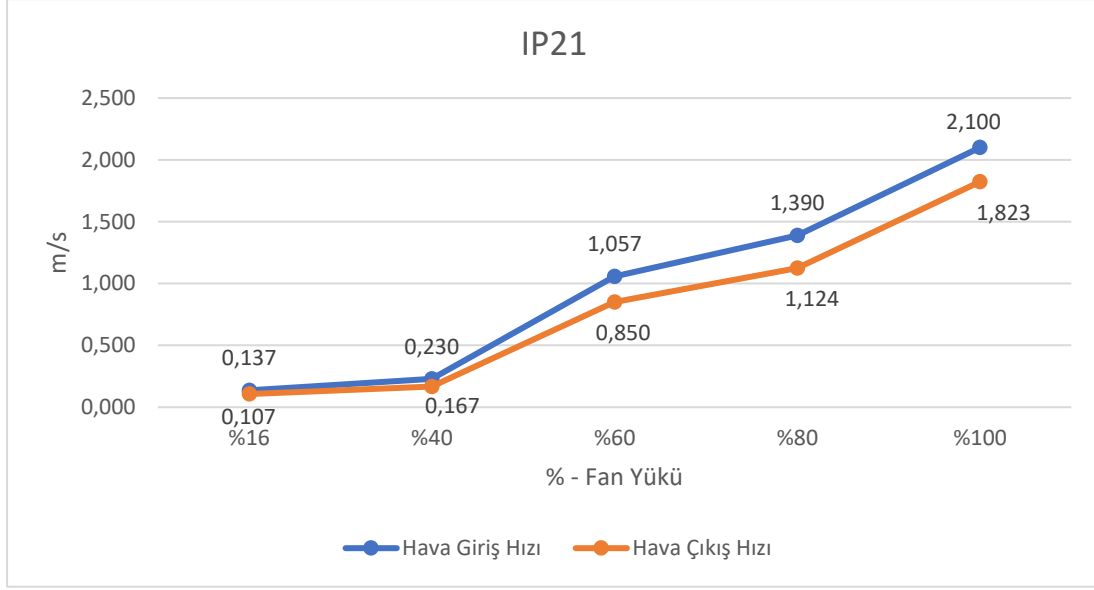
3.1.1 IP21 Menfezi

IP21 koruma sınıfına ait menfez için beş farklı fan yüküne bağlı giriş ve çıkış hava hızları, ortalama değerleri ile birlikte Tablo 3.1’de; fan yüküne bağlı ortalama giriş ve çıkış hava hızlarının değişim grafiği ise Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 verilerine göre, fanın yükü dolayısıyla fan dönüş hızı arttıkça menfezin hem giriş hem de çıkışında ölçülen hız değerleri artmıştır. Deney setinde tünel içi hava akışına engel olan IP21 menfezi ise beklenildiği üzere tüm çıkış hızlarını giriş hızlarına göre düşürmüştür. Tüm fan yükleri kıyaslandığında, fan yükü arttıkça (%40 fan yükü hariç) giriş-çıkış hızındaki yüzdesel düşüşün azaldığı söylenebilir. Örneğin fan yükü %16 iken girişe göre çıkış hızındaki düşüş %21 iken, fan yükü %100’e çıktığında hız çıkış değerindeki düşüş %13,2’ye inmiştir.

Tablo 3.1: IP21 menfezine ait deneysel hava akış hız değerleri.

IP21 Menfezi								
Fan Yükü (%)	V_1 (m/s)				V_2 (m/s)			
	1.Ölçüm Değeri	2.Ölçüm Değeri	3.Ölçüm Değeri	Ortalama Giriş Hızı	1.Ölçüm Değeri	2.Ölçüm Değeri	3.Ölçüm Değeri	Ortalama Çıkış Hızı
16	0,11	0,17	0,13	0,137	0,11	0,09	0,12	0,107
40	0,3	0,23	0,16	0,230	0,09	0,25	0,16	0,167
60	1,25	0,9	1,02	1,057	0,7	0,96	0,89	0,850
80	1,11	1,68	1,38	1,390	0,81	0,83	0,89	1,124
100	2,22	1,78	2,3	2,100	1,78	1,97	1,72	1,823



Şekil 3.1: IP21 menfezinde fan yüküne bağlı ortalama hava giriş-çıkış hız değişimleri.

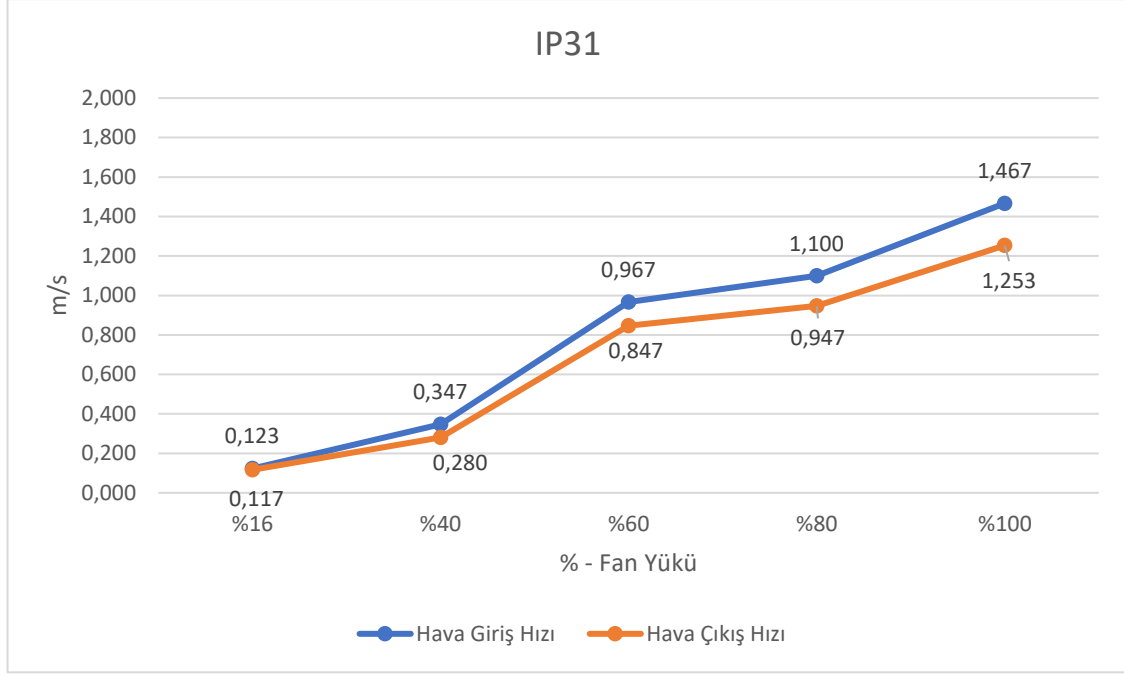
3.1.2 IP31 Menfezi

IP31 koruma sınıfına ait menfez için beş farklı fan yüküne bağlı giriş ve çıkış hava hızları, ortalama değerleri ile birlikte Tablo 3.2’de; fan yüküne bağlı ortalama giriş ve çıkış hava hızlarının değişim grafiği ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Ortalama hızlar beklendiği gibi kesitten geçtikten sonra düşmektedir. Fan dönüş hızının artması ile kütesel debi artarak fan giriş hızını arttırmaktadır. Ölçüm aldığımız her farklı fan çalışma kapasitesi giriş ortalama hızları ile çıkış ortalama hızları birbirine yakın değerler sergilemektedir.

Tablo 3.2: IP31 menfezine ait deneysel hava akış hız değerleri.

IP31 Menfezi								
Fan Yükü (%)	V_1 (m/s)				V_2 (m/s)			
	1.Ölçüm Değeri	2.Ölçüm Değeri	3.Ölçüm Değeri	Ortalama Giriş Hızı	1.Ölçüm Değeri	2.Ölçüm Değeri	3.Ölçüm Değeri	Ortalama Çıkış Hızı
16	0,1	0,15	0,12	0,123	0,13	0,1	0,12	0,117
40	0,46	0,35	0,23	0,347	0,16	0,23	0,45	0,280
60	0,5	1,3	1,1	0,967	0,74	0,97	0,83	0,847
80	1,05	0,98	1,27	1,100	0,92	0,94	0,98	0,947
100	1,62	1,46	1,32	1,467	1,28	1,32	1,16	1,253



Şekil 3.2: IP31 menfezinde fan yüküne bağlı ortalama hava giriş-çıkış hız değişimleri.

%100 fan yüküne göre çalışması durumunda giriş hız değeri ortalama 1,467 m/s iken menfez çıkış hız değeri ortalama 1,253 m/s olarak ölçülmüştür.

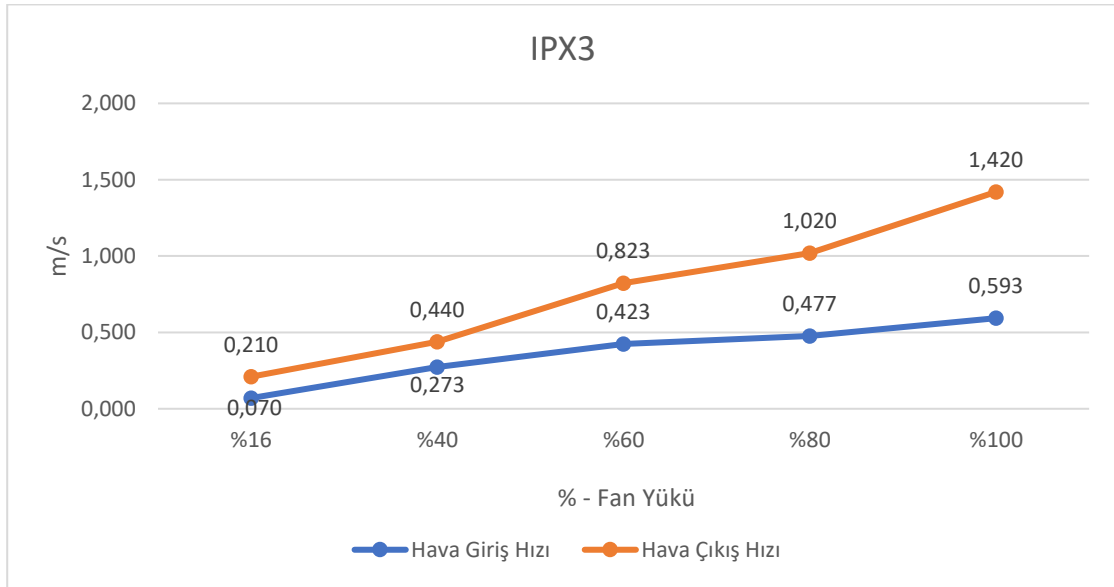
3.1.3 IPX3 Menfezi

IPX3 koruma sınıfına ait menfez için beş farklı fan yüküne bağlı giriş ve çıkış hava hızları, ortalama değerleri ile birlikte Tablo 3.3'te; fan yüküne bağlı ortalama giriş ve çıkış hava hızlarının değişim grafiği ise Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

IPX3 menfez kesit geometrisi deneysel sonuçlarında giriş hızları çıkış hızlarından daha küçük olduğu görülmüştür. Bu durum, çıkış noktasından aldığımız ölçümde kesit daraldığı için hız artmasıyla açıklanabilir. HAD sonuçlarında bu durumu daha detaylı açıklanmıştır.

Tablo 3.3: IPX3 menfezine ait deneysel hava akış hız değerleri.

IPX3 Menfezi								
Fan Yüğü (%)	V_1 (m/s)				V_2 (m/s)			
	1.Ölçüm Değeri	2.Ölçüm Değeri	3.Ölçüm Değeri	Ortalama Giriş Hızı	1.Ölçüm Değeri	2.Ölçüm Değeri	3.Ölçüm Değeri	Ortalama Çıkış Hızı
16	0,03	0,07	0,11	0,070	0,17	0,22	0,24	0,210
40	0,19	0,28	0,35	0,273	0,27	0,45	0,6	0,440
60	0,24	0,48	0,55	0,423	0,57	0,8	1,1	0,823
80	0,23	0,45	0,75	0,477	0,5	1,01	1,55	1,020
100	0,42	0,64	0,72	0,593	0,78	1,34	2,14	1,420



Şekil 3.3: IPX3 menfezinde fan yüküne bağılı ortalama hava giriş-çıkış hız değışimleri.

%100 fan yüküne göre çalışması durumunda ortalama giriş hız değeri 0,593 m/s iken ortalama çıkış hızı 1,420 m/s olarak ölçülmüştür.

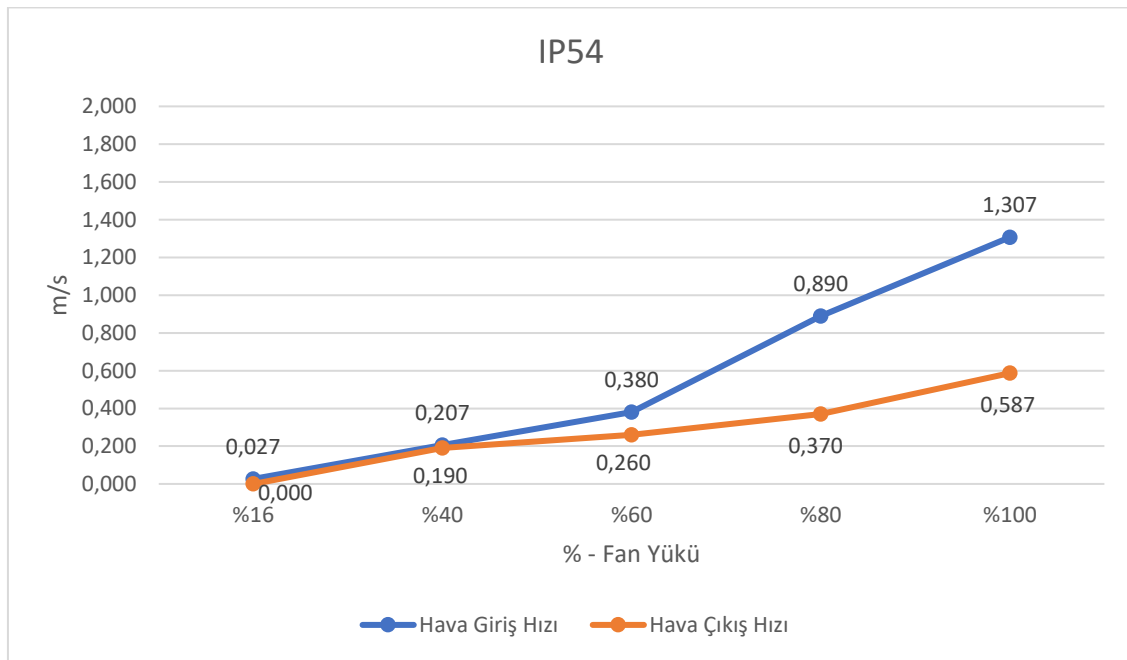
3.1.4 IP54 Menfezi

IP54 koruma sınıfına ait menfez için beş farklı fan yüküne bağılı giriş ve çıkış hava hızları, ortalama değeri ile birlikte Tablo 3.4'te; fan yüküne bağılı ortalama giriş ve çıkış hava hızlarının değışim grafiğı ise Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4: IP54 menfezine ait deneysel hava akış hız değerleri.

IP54 Menfezi								
Fan Yüğü (%)	V_1 (m/s)				V_2 (m/s)			
	1.Ölçüm Değeri	2.Ölçüm Değeri	3.Ölçüm Değeri	Ortalama Giriş Hızı	1.Ölçüm Değeri	2.Ölçüm Değeri	3.Ölçüm Değeri	Ortalama Çıkış Hızı
16	0,01	0,03	0,04	0,027	0	0	0	0,000
40	0,18	0,18	0,26	0,207	0,16	0,23	0,18	0,190
60	0,33	0,47	0,34	0,380	0,22	0,25	0,31	0,260
80	0,9	0,85	0,92	0,890	0,48	0,29	0,34	0,370
100	1,54	1,17	1,21	1,307	0,49	0,57	0,7	0,587

IP54 yapısında önce menfez kesiti ardından da G4 filtre yapısından geçen akışkan hava diğer menfez tiplerine göre daha fazla basınç düşümü yaşayarak enerjisini kaybetmiştir ve buradaki çıkış hızları fark edilir derecede düşüş göstermiştir. Fan yükü %100 olduğunda, giriş hız değeri ortalama 1,307 m/s iken ortalama çıkış hızı 0,587 m/s olarak ölçülmüştür



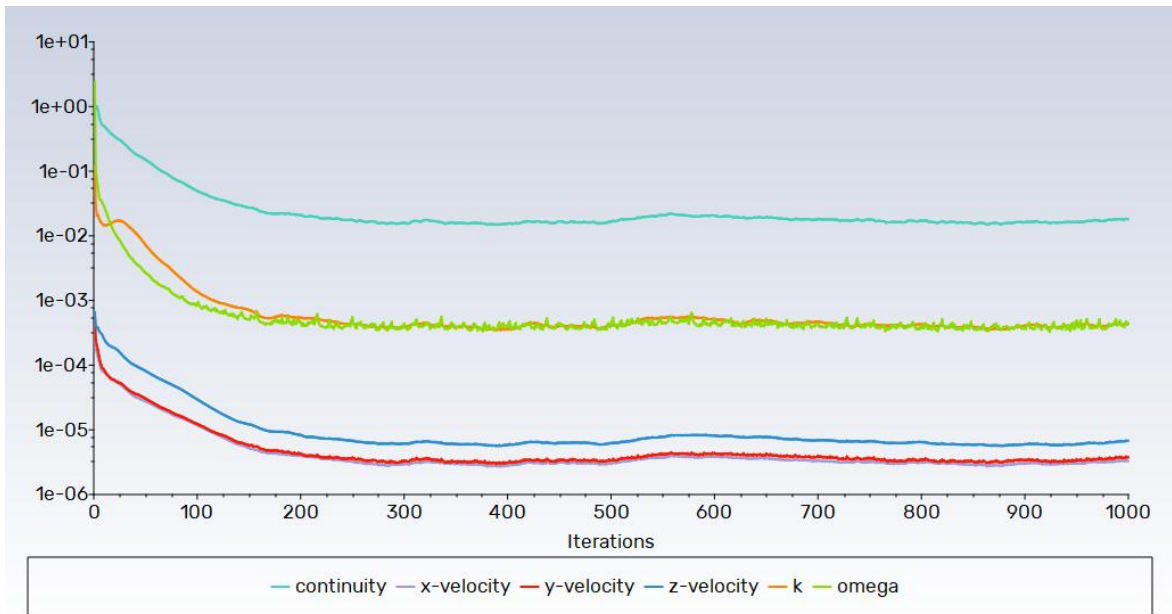
Şekil 3.4: IP54 menfezinde fan yüküne bağılı ortalama hava giriş-çıkış hız değışimleri.

3.2 HAD Sonuçları ve Porozite Değerleri

IP21, IP31 ve IPX3 koruma sınıflarına ait menfezler için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Ancak, toz filtreleme sistemlerine sahip IP54 menfezinde karşılaşılan modellemedeki zorluklar ve çok yüksek hesap maliyetleri nedeniyle bu menfeze ait HAD analizleri yapılamamıştır.

3.2.1 IP21 Menfezi

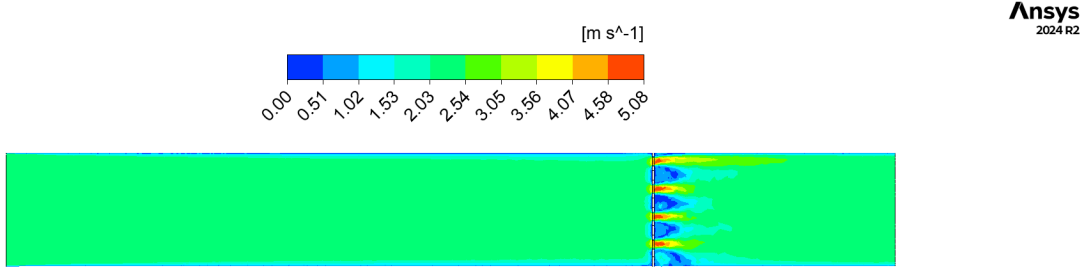
IP21 havalandırma kesit menfez için hız ve basınç düşüm değerleri “Ansys 2024 Fluid Flow Results” bölümünden alınmıştır. Basınç-hız bağlantısı çözüm metotlarından “SIMPLE” ile 1000 iterasyonda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5’te IP21 menfezi için iterasyon yakınsama eğrileri gösterilmiştir.



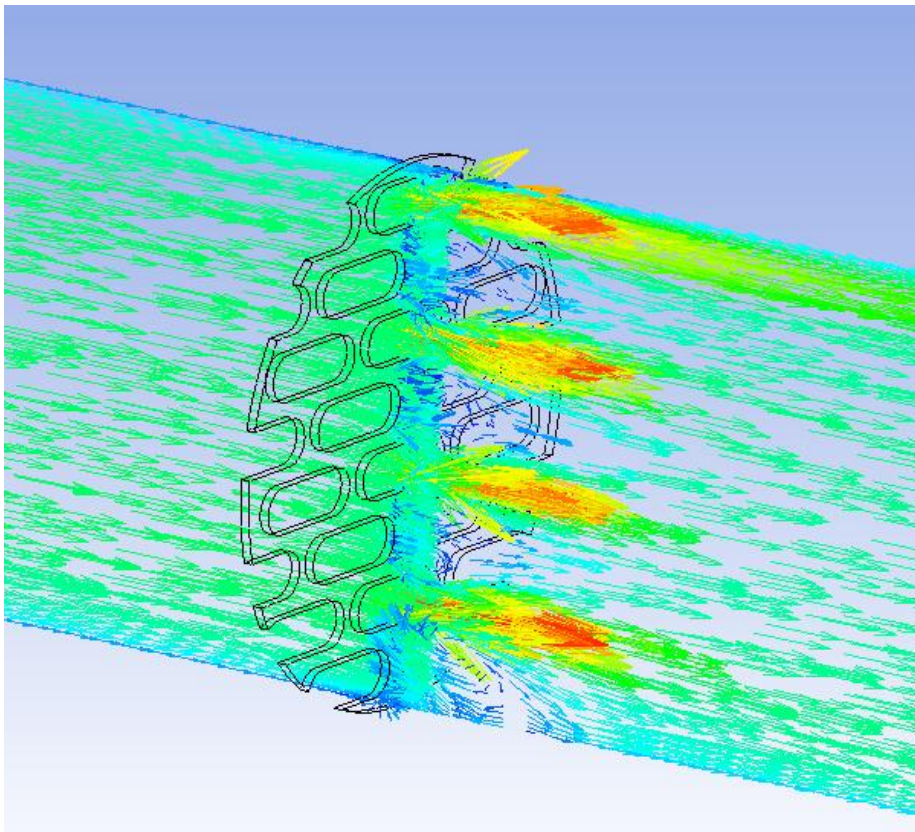
Şekil 3.5: IP21 yakınsama eğrisi.

HAD analizlerinde doğrulama (validasyon) için %100 fan yükündeki çıkış hızı referans alınmıştır. Deney verilerinde %100 fan yükü için ortalama çıkış hızı 1,823 m/s iken HAD sonuçlarında aynı nokta için çıkış hızı 1,95 m/s olarak okunmuştur. Elde edilen sonuçlardan analizlerin 0,127m/s’lik bir hata ile gerçekleştirildiği, böylece hata payının yaklaşık olarak %6,5 olduğu hesaplanmıştır. Model doğruluğu yeterli görülüp diğer fan yükleri için de HAD analizleri yapılmıştır.

IP21 menfezi için %100 fan yükünde, akış tüpü boyunca değişen hız dağılımı Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekil 3.7'de ise %100 fan yükü için IP21 menfez çıkışı hız vektörleri gösterilmiştir. Buna göre, ortalama çıkış hızı 1,95 m/s olarak okunmuş; 5,08 m/s değerindeki maksimum hızın ise kesit küçüldüğü için menfez çıkışında oluştuğu görülmüştür.

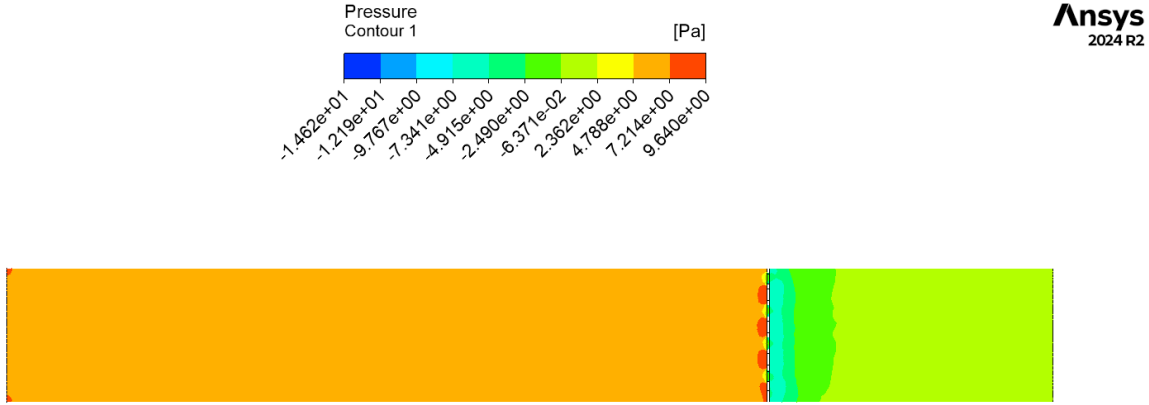


Şekil 3.6: IP21 hız dağılımı görüntüsü.



Şekil 3.7: IP21 çıkışı hız vektörlerinin görünümü.

IP21 menfezi için %100 fan yükünde, akış tüpü boyunca değişen basınç dağılımı Şekil 3.8'te verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre IP21 menfezinde giriş ve çıkış noktaları arası basınç farkının 9,65 Pa olduğu tespit edilmiştir.

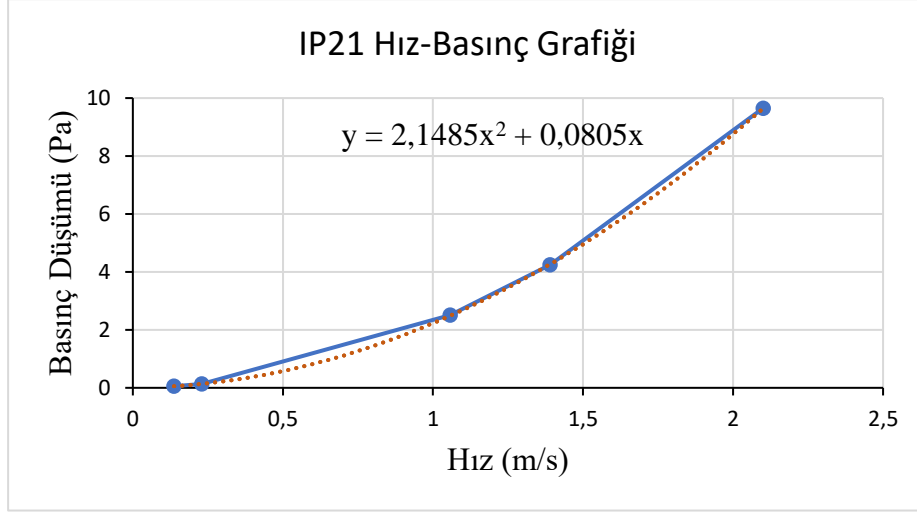


Şekil 3.8: IP21 basınç dağılımı görüntüsü.

Deney giriş hızları ve HAD basınç düşüş verileri kullanılarak Tablo 3.5 oluşturulmuştur. Bu değerlerden ise hız ve basınç düşümü arasındaki ilintiyi gösteren 2. dereceden trend eğrisine sahip polinomun grafiği Şekil 3.9'da çizdirilmiştir (Çetin vd., 2017).

Tablo 3.5: IP21 menfezi için hız-basınç düşümü ilişkisi.

IP21	
Hız (m/s)	Basınç Düşümü (Pa)
0,137	0,056
0,23	0,1369
1,057	2,505
1,39	4,238
2,1	9,65



Şekil 3.9: IP21 menfez hız-basınç düşümü eğrisi.

Basınç düşüşü ve hız arasındaki bağıntı eşitlik (3.1)'deki gibidir.

$$\Delta P = 2,1485 v^2 + 0,0805 v \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1) ile S_i (kaynak terimi) denkliğinde, 2. dereceli terimlerin özdeşliğini veren ifade eşitlik (3.2)'deki gibidir.

$$2,1485 = C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de sac kalınlığı $\Delta n = 2mm$, $\rho = 1.225 kg/m^3$ alındığında C_2 değeri "1753,88" olarak hesaplanmıştır.

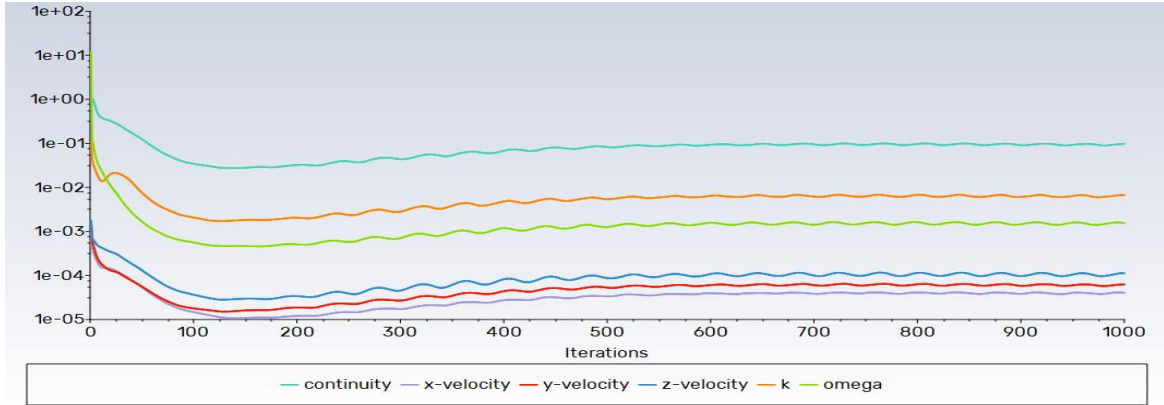
Eşitlik (3.1) ile S_i denkliğinde, 1. dereceli terimlerin özdeşliğini veren ifade eşitlik (3.3)'teki gibidir.

$$0,0805 = \frac{\mu}{\alpha} \Delta n \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.3)'te $\mu = 1.7894 \times 10^{-5}$ ve $\Delta n = 2mm$ için $1 / \alpha$ değeri " $2,25 \times 10^6$ " olarak bulunmuştur. Böylece, IP21'in porozite direnç katsayılarından atalet direnç faktörü (C_2) ve viskoz atalet direnç ($1 / \alpha$) değerlerinin ikisi de elde edilmiştir.

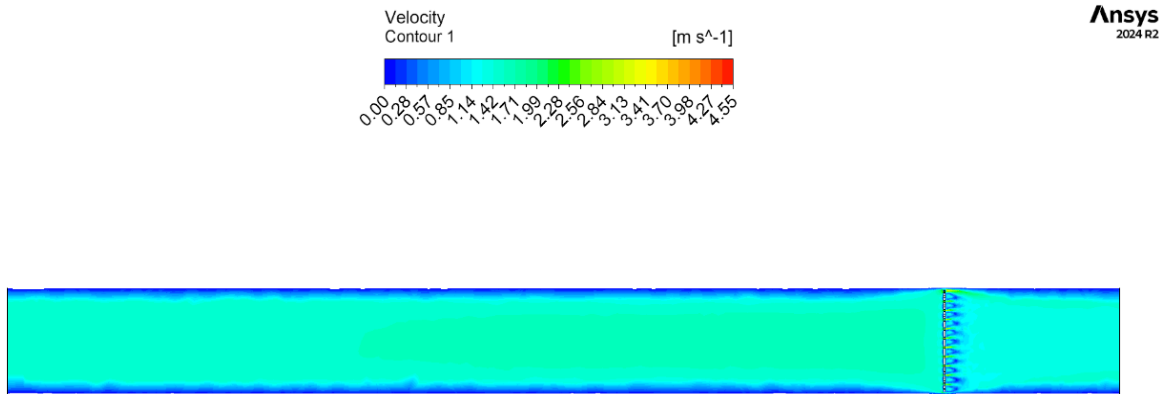
3.2.2 IP31 Menfezi

IP31 havalandırma kesit menfez için hız ve basınç düşüm değerleri “Ansys 2024 Fluid Flow Results” bölümünden alınmıştır. Basınç-hız bağlantısı çözüm metotlarından “SIMPLE” ile 1000 iterasyonda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.10’da iterasyonun yakınsama eğrileri verilmiştir.

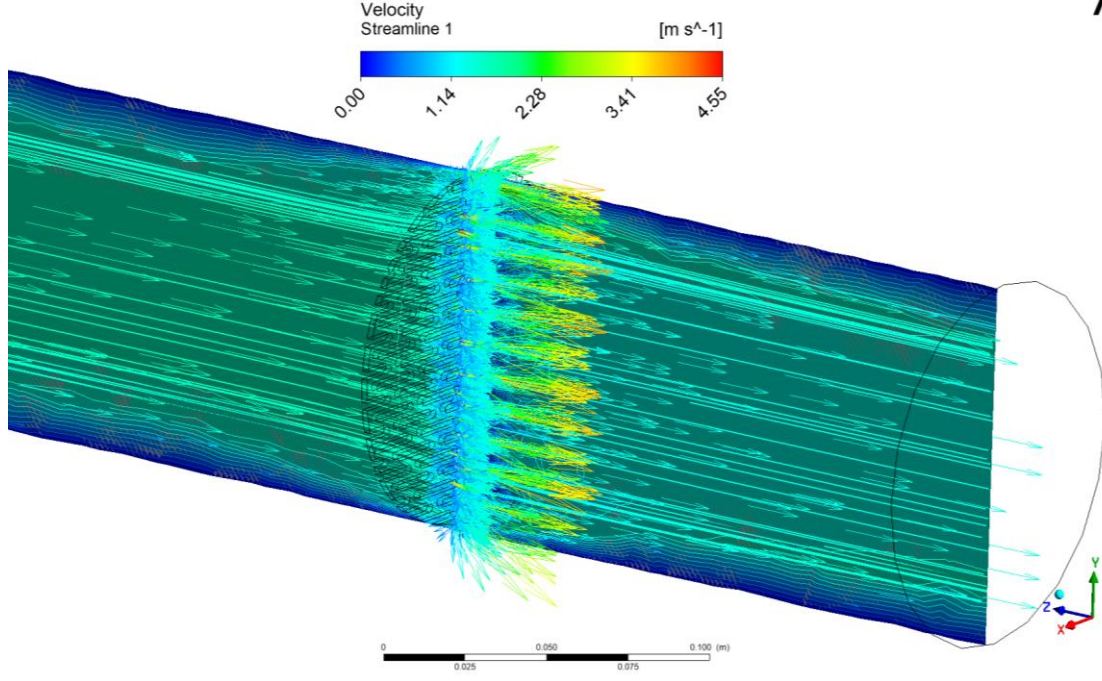


Şekil 3.10: IP31 yakınsama eğrisi.

Şekil 3.11’de IP31 menfezi hız dağılımı, Şekil 3.12’de ise IP31 menfez çıkışı hız vektörleri görüntüsü verilmiştir. Analiz sonuçlarından maksimum akış hızının 4,55 m/s olduğu görülmektedir.



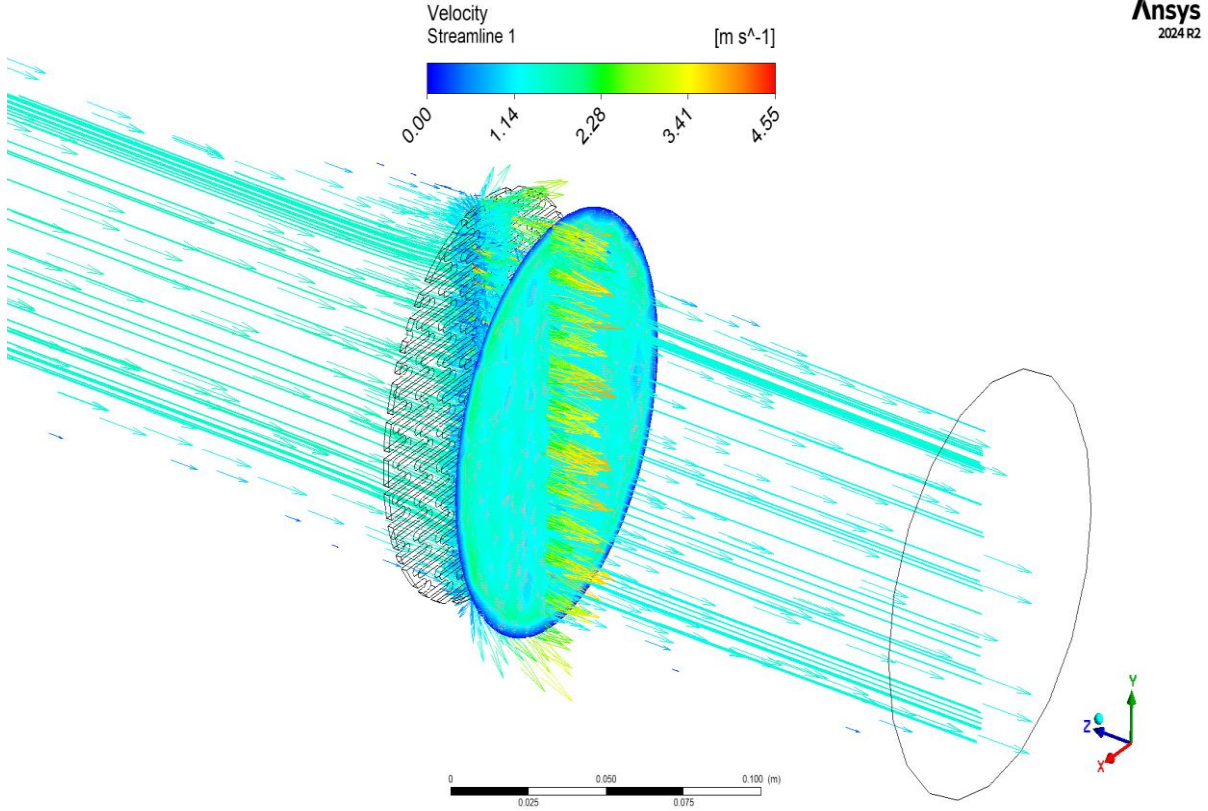
Şekil 3.11: IP31 hız dağılımı görüntüsü.



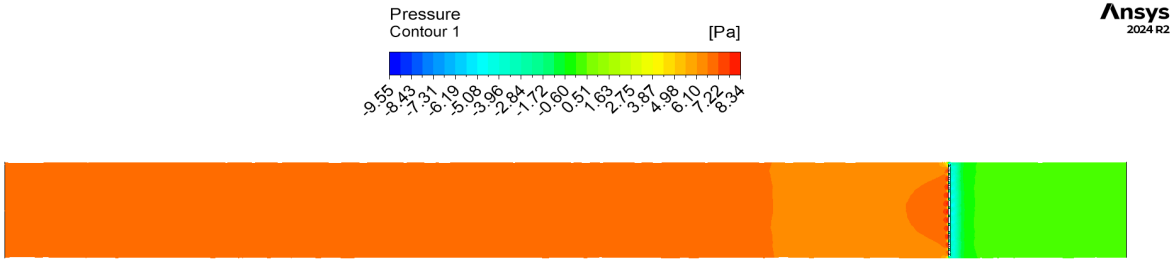
Şekil 3.12: IP31 çıkışı hız vektörlerinin görünümü.

Deneysel ölçümlerde IP31 için hız değeri 1,253 m/s olarak ölçülmüştü. Çıkış değerinin okunduğu düzlem Şekil 3.13 gösterilmiştir. Çıkış değerini okuduğumuz probun bulunduğu düzlemde ortalama çıkış hız değeri 1,368 m/s olarak okunmuştur. Deneysel veri ile oluşan 0,115 m/s'lik fark, yaklaşık olarak %9,2'lik makul bir hata payına denk gelmektedir.

Şekil 3.14'te IP31 basınç dağılımı görüntüsü verilmiştir. Analiz verilerinden 8,34 Pa değerinde bir basınç düşümü okunmuştur.



Şekil 3.13: IP31 ortalama çıkış hızı okunan düzlem.

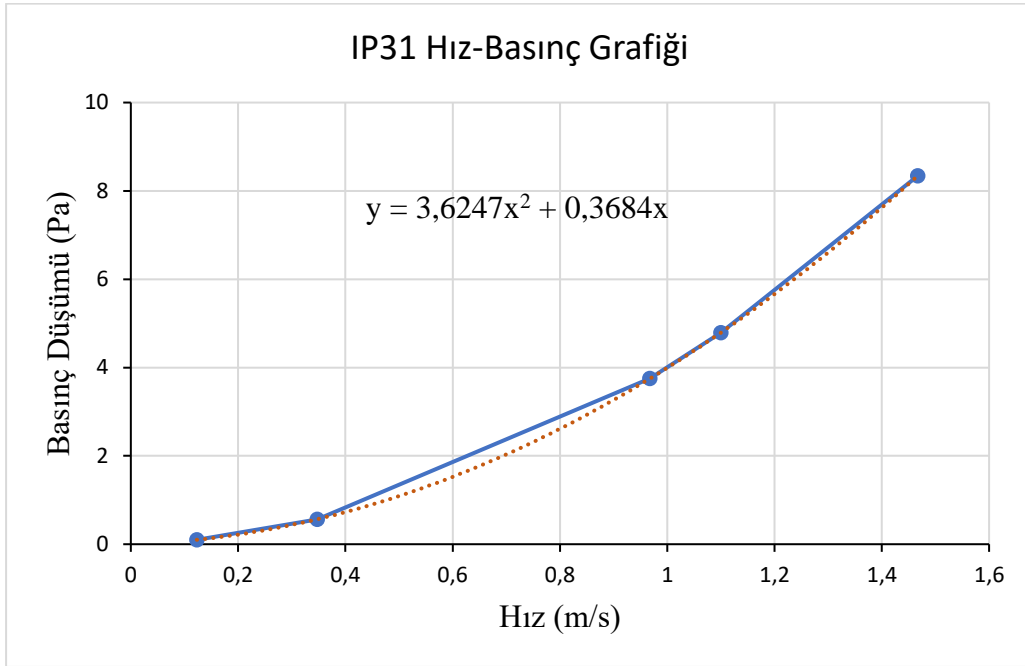


Şekil 3.14: IP31 basınç dağılımı görüntüsü.

Deney giriş hızları ve HAD basınç düşüş verileri kullanılarak elde edilen grafiğin trend eğrisi 2. dereceden bir polinom olarak çizdirilir. Bu eğri hız ile basınç düşümü arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Tablo 3.6’da IP31 için hız ve basınç düşüm değerleri; Şekil 3.15’te ise bu değerle bağlı elde edilen trend eğrisi ve denklemi verilmiştir (Çetin vd., 2017).

Tablo 3.6: IP31 menfezi için hız-basınç düşümü ilişkisi.

IP31	
Hız (m/s)	Basınç Düşümü (Pa)
0,123	0,10
0,347	0,56
0,967	3,75
1,100	4,79
1,467	8,34



Şekil 3.15: IP31 menfez hız-basınç düşümü eğrisi.

IP21 için işletilen eşitlikler bu menfez yapısı için de sırası ile tekrarlanmıştır. Elde edilen değerler ile porozite direnç değerlerinden atalet direnç faktörü (C_2) ve viskoz atalet direnci ($1 / \alpha$) bulunmuştur;

Basınç düşüşü ve hız arasındaki bağıntı eşitlik (3.4)'teki gibidir.

$$\Delta P = 3,6247 v^2 + 0,3684 v \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.4) ile S_i (kaynak terimi) denkliğinde, 2. dereceli terimlerin özdeşliğini veren ifade eşitlik (3.5)'teki gibidir.

$$3,6247 = C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n \quad (3.5)$$

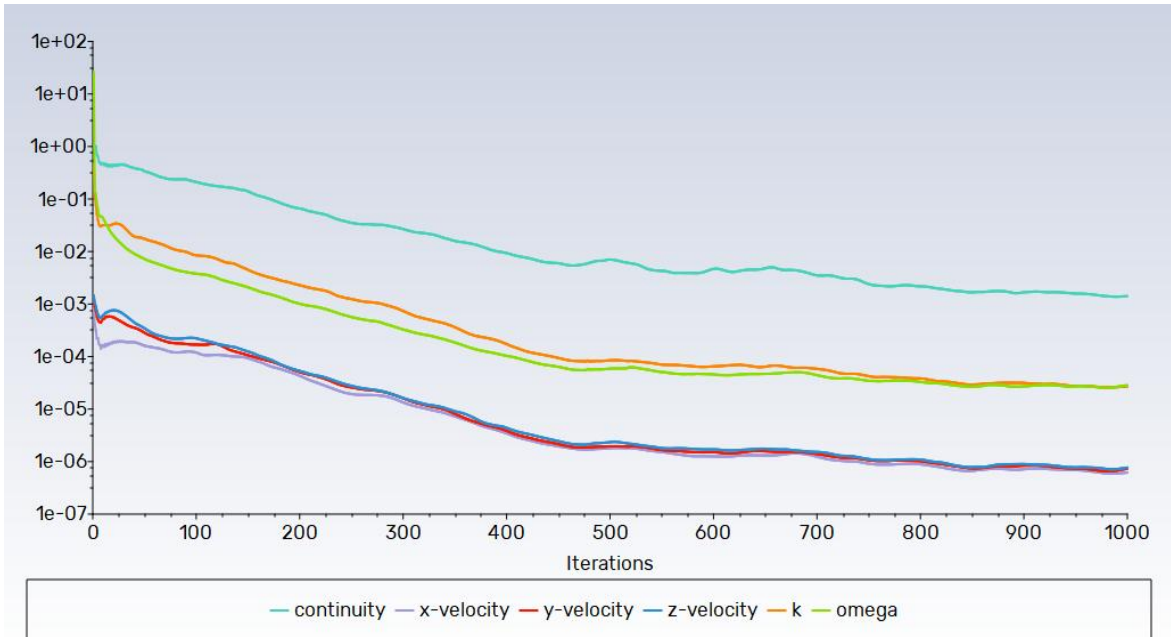
Eşitlik (3.5)'te sac kalınlığı $\Delta n = 2mm$, $\rho = 1.225 kg/m^3$ alındığında C_2 değeri "2958,94" olarak hesaplanmış olur.

$$0,3684 = \frac{\mu}{\alpha} \Delta n \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6)'dan $\mu = 1.7894 \times 10^{-5}$, ve $\Delta n = 2mm$ olduğu için ise $1/\alpha$ değeri " $1,03 \times 10^7$ " olarak bulunmuştur.

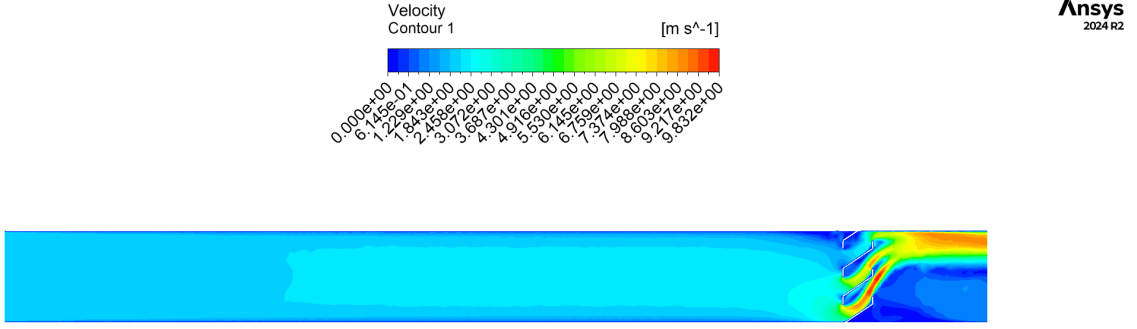
3.2.3 IPX3 Menfezi

Diğer menfez kesit uygulamaları ile aynı yaklaşımlar sergilenmiş ve çıkış hızı ve basınç düşümü değerleri hesaplanmıştır. Simple çözüm algoritması ile devam edilmiştir. 1000 iterasyon sonucu yakınsama sağlandığı düşüncesi ile devam ettirilmemiştir. Şekil 3.16'da yakınsama eğrisi verilmiştir.



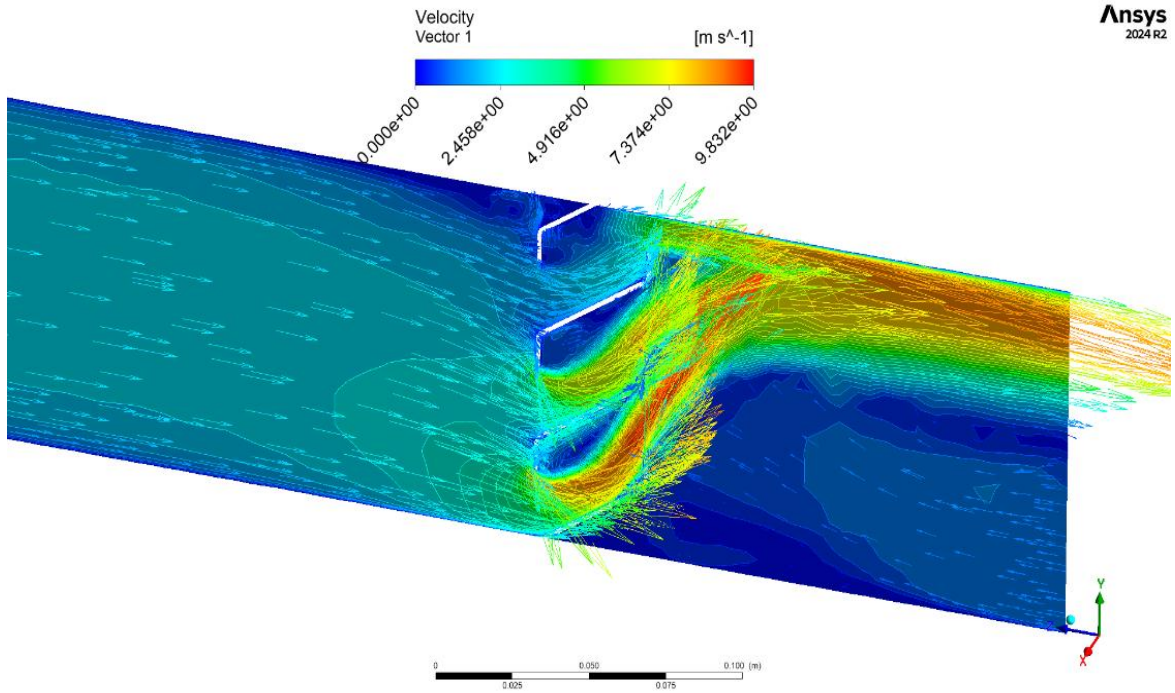
Şekil 3.16: IPX3 yakınsama eğrisi.

Şekil 3.17'de akış tüpü boyunca hız dağılımının görüntüsüne yer verilmiştir. Maksimum hız 9,83m/s olarak okunmuştur.



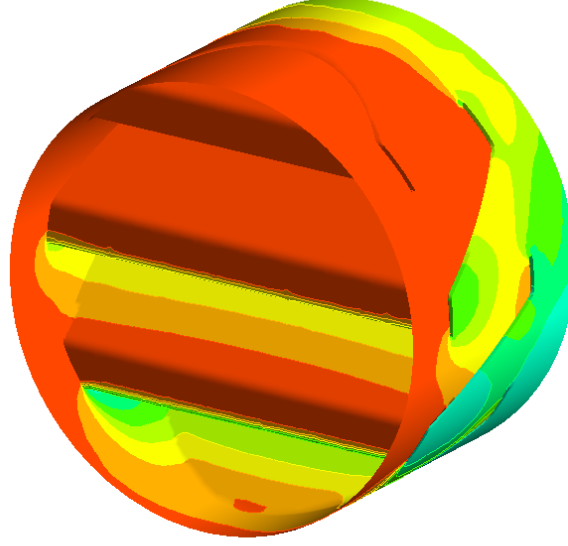
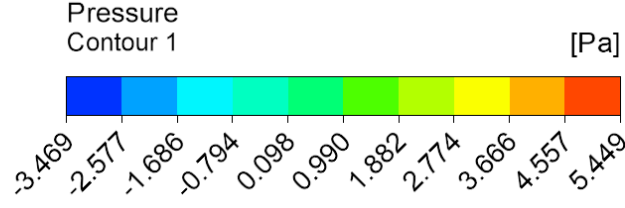
Şekil 3.17: IPX3 hız dağılımı görüntüsü.

IPX3 diğer menfezlerden farklı olarak poroz ortam gibi davranmamıştır. Diğer menfezlerin çıkışı veya filtre sonrası hız düşümü net bir şekilde gözlemlenirken IPX3'te menfez kanatları havayı akış tüpü üst bölgesine yönlendirmiştir. Çıkışta daralan kesit, hava ortalama çıkış hızının, hava ortalama giriş hızından fazla olmasına sebep olmuştur. Hava akış tüpünün çıkışında da ters girdap akıntıları oluşmuştur. Şekil 3.18'de ters akış ve IPX3 menfez kanatlarının akışı nasıl yönlendirdiği hız vektörleri ile ifade edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.18: IPX3 çıkışı hız vektörlerinin görünümü.

DeneySEL hız ölçümümüzde IPX3 için menfez sonrası ortalama çıkış hızı 1,42 m/s ölçülmüştür. IPX3 sayısal analiz modeli çıkış hız ortalaması ise 2,309 m/s'dir. Yaklaşık

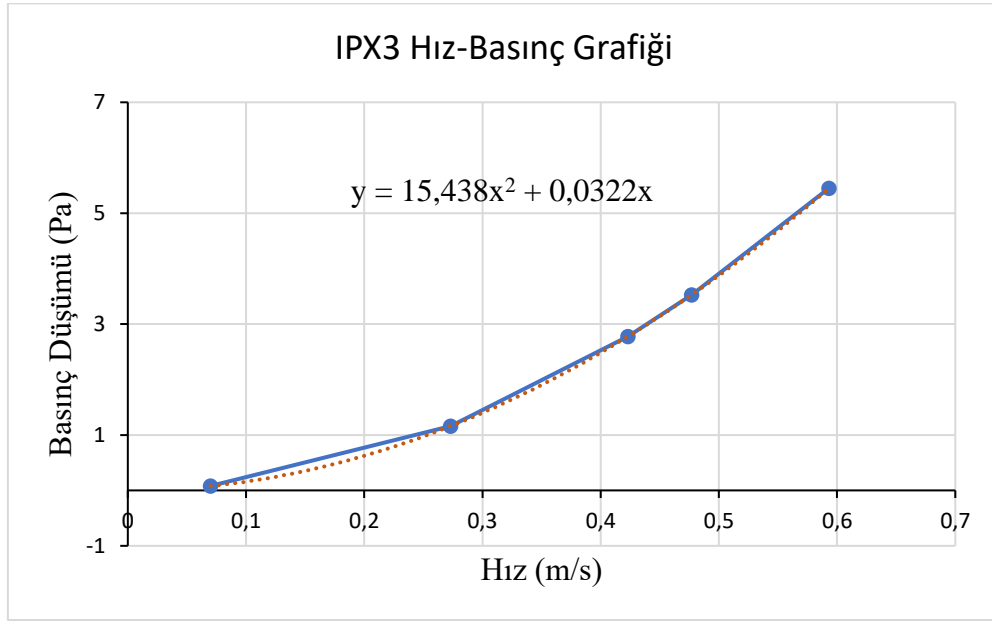


Şekil 3.21: IPX3 basınç dağılımı.

Deney giriş hızları ve HAD basınç düşüş verileri kullanılarak elde edilen grafiğin trend eğrisi 2. dereceden bir polinom olarak çizdirilir. Bu eğri hız ile basınç düşümü arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Tablo 3.7’de IPX3 için hız ve basınç düşüm değerleri; Şekil 3.22’de ise bu değerle bağlı elde edilen trend eğrisi ve denklemi verilmiştir (Çetin vd., 2017).

Tablo 3.7: IPX3 menfezi için hız-basınç düşümü ilişkisi.

IPX3	
Hız (m/s)	Basınç Düşümü (Pa)
0,070	0,080
0,273	1,160
0,423	2,775
0,477	3,527
0,593	5,449



Şekil 3.22: IPX3 menfez hız-basınç düşümü eğrisi.

IP21 için işletilen eşitlikler bu menfez yapısı için de sırası ile tekrarlanmıştır. Elde edilen değerler ile porozite direnç değerlerinden atalet direnç faktörü (C_2) ve viskoz atalet direnci ($1 / \alpha$) bulunmuştur;

Basınç düşüşü ve hız arasındaki bağıntı eşitlik (3.9)'daki gibidir.

$$\Delta P = 15,438 v^2 + 0,0322 v \quad (3.9)$$

Eşitlik (3.9) ile S_i (kaynak terimi) denkliğinde, 2. dereceli terimlerin özdeşliğini veren ifade eşitlik (3.10)'daki gibidir.

$$15,438 = C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n \quad (3.10)$$

Eşitlik (3.10)'da sac kalınlığı $\Delta n = 2mm$, $\rho = 1.225 kg/m^3$ alındığında C_2 , değeri "12602,45" olarak hesaplanmış olur.

$$0,0322 = \frac{\mu}{\alpha} \Delta n \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.11)'de $\mu = 1.7894 \times 10^{-5}$ ve $\Delta n = 2mm$ için ise $1 / \alpha$ değeri " $9,00 \times 10^5$ " olarak bulunmuştur.

4. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Kuru tip transformatörlerde kabin içinde oluşan ısının etkili bir biçimde uzaklaştırılması, transformatör yaşlanmasının engellenip kullanım ömrünün uzatılması için oldukça önemlidir. Bu yüzden, transformatör havalandırma sistemlerinde kullanılan menfez yapısına bağlı olarak yüksek hassasiyetli akış ve ısı transferi analizleri yapılmalıdır. Böylece trafo kabinine uygun ideal havalandırma sistem tasarım ve çalışma parametreleri belirlenebilir. Ancak, bu analizler için oluşturulan HAD simülasyonları, mevcut uygulamada standart ağ (mesh) yapısı ile çalışılmakta, bu durumda ise menfez bölgesine çok sayıda ağ eleman atılması gerekliliğinden dolayı çözüm süresi ve maliyeti çok uzamaktadır. Analiz süresini kısaltmak amacı ile standart model ve ağ eleman yapısı yerine menfez bölgesinde porozite değerleri tanımlanabilir.

Bu bağlamda, yapılan mevcut çalışma ile kuru tip transformatör kabin havalandırma sistemlerde yaygın kullanılan IP21, IP31 ve IPX3 koruyuculuk değerlerine sahip transformatör kabin havalandırma menfezlerinin hava akışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı poroziteye sahip menfezlerin hava akışını nasıl etkilediği deneysel ve sayısal yöntemlerle ortaya konmuştur. Hız verileri ile yapılan doğrulamalar sonrasında oluşturulan modeller ile farklı menfez yapılarına ait basınç düşümleri elde edilmiş; bu verilerden ise iki önemli porozite değeri olan atalet direnç faktörü (C_2) ve viskoz atalet direnci ($1 / \alpha$) hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda IP21 menfez yapısı için $C_2 = 1753,88$, $1 / \alpha = 1,03 \times 10^7$; IP31 menfez yapısı için $C_2 = 2958,94$, $1 / \alpha = 1,03 \times 10^7$; IPX3 menfez yapısı için ise $C_2 = 12602,45$, $1 / \alpha = 9,00 \times 10^5$ olarak bulunmuştur.

Çalışma sonucu elde edilen farklı koruyuculuk derecesine sahip menfezlerin porozite değerleri ve neden olduğu basınç düşüşleri, ileriki çalışmalarda kuru tip transformatörler için oluşturulacak ısı transferi simülasyon modellerinde girdi verisi olarak kullanılabilir, böylece menfez bölgelerindeki ağ eleman sayısı azaltılıp çözüm süresi ve maliyeti kısaltılabilir. Bunun yanında, tezde yapılan çalışma teknikleri kullanılarak yağlı tip dağıtım transformatörlerinin kanatçık (dalga duvar, fin) yapıları ve güç transformatörlerinin radyatör yapıları da modellenilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Açıkgöz, H. (2018). *Endüstriyel uygulamalar için yeni bir elektronik güç transformatörünün tasarımı ve optimal denetimi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 513650).
- Akbal, S. (2007). Tektürel olmayan gözenekli bir ortamda doğal taşınım ile ısı ve kütle geçişinin sonlu hacim yöntemi ile sayısal olarak incelenmesi (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 223094).
- Akbulut, C. (2010). *Düşük hızlı düşey milli mekanik yüzey havalandırıcının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 271554).
- Aksu, E. (2023). Farklı ağ elemanı boyutlarının ve türbülans modellerinin düz levha sürtünme direnci üzerindeki etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 223, 29-46. <https://doi.org/10.54926/gdt.1248594>.
- Altay, R. (2018). *Kabinli kuru tip transformatörlerde soğuma sürecinin CFD analizi ve deneysel çalışmalar ile incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 541981).
- Altay, R., Santisteban, A., Olmo, C., Renedo, C.J., Fernandez, A.O., Ortiz, F., and Delgado, F. (2020). Use of alternative fluids in very high-power transformers: experimental and numerical thermal studies. *IEEE Access*, 8, 207054-207062
- Altın, B. (2022). *Kuru tip transformatörler için kısmi deşarj ölçümü ve değerlendirme yöntemleri* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 790464).
- Ansys-Tutorials 7.2.3, (20.05.2024). Porous media conditions. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node233.htm>
- Aşkın, D. (2011). *Kuru tip transformatörlerin sargı sıcaklık davranışının yapay sinir ağları kullanarak modellenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 309469).
- Ateş, Ö. K. (2020). Bir endüstriyel fan tasarımı ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analizi. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 13(1), 348-363. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.615015>.
- Attar, M. (2021). *Aynı kayıp, performans ve özelliklere sahip, iki adet 400 kVA kuru ve yağlı tip transformatörün üretim maliyeti açısından karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 727945).
- Aydoğan, B. (2023). *Kuru tip transformatörlerde yalıtım malzemeleri mesafelerinin sonlu elemanlar yöntemiyle ve deneysel olarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi).

Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 837382).

Baytaş, A.C. (2006). Gözenekli ortamlarda taşınım olayı. *İTÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 4, 3-13.

BEST (2015). *Kuru tip transformatörler genel yapısı, devreye alma öncesi kontroller ve röle ayarları*. Balıkesir.

Boduroğlu, T. (1982). *Transformatörler*. İstanbul: İTÜ Elektrik Fakültesi Ders Notları.

Cfd-online, (22.04.2024). *Turbulence intensity*. https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity

Çelebi, M. (2009). Genetik algoritma ile kuru bir trafonun ağırlık optimizasyonu ve sonlu elemanlar metodu ile analizi. *KSÜ Journal of Engineering Sciences*, 12 (2), 30-36.

Çelen, D. (2021). Üç fazlı transformatörler için yeni bir geçmeli tip çekirdek tasarımı (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 668905).

Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M. (2020). *Akışkan mekaniği temelleri ve uygulamaları kitabı*. 3. Baskı. Ankara: Palme Yayıncılık.

Çetin, B., Güler, K. G., And Aksel, M. K. (2017). Computational Modeling of Vehicle Radiators Using Porous Medium Approach. *Heat Exchangers- Design, Experiment and Simulation*. <http://dx.doi.org/10.5772/66281>.

Çürükova Kale, S. (2017). *Transformatörlerin kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların azaltılması için en uygun şönt eleman boyutlarının belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 474077).

Dağıdır, K., Sarper, B. and Erdinç, M. T. (2022). Sıralı tip boru demetinde gözenekli malzeme gözenek yoğunluğu ve kalınlığının ısı transferi ve basınç düşümüne etkilerinin sayısal olarak incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(71), 447-461. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247111>.

Demirci, M. (2023). *Güç transformatörlerinde makine öğrenmesi ve sensör füzyonu yöntemleri ile arıza analizi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 842241).

Denys, K. (2003). Flow of polymer solutions through porous media. *Materials Science, Engineering, Environmental Science*. https://www.researchgate.net/publication/27351505_Flow_of_Polymer_Solutions_Through_Porous_Media

Dursun, B.N. ve Ekici, B. (2024). Thermal and structural analysis of oil-based type transformer. *NÖHÜ Müh. Bilim. Dergisi*, 13(1), 084-093.

- Düz, H. (2013). *Giriş ve tam gelişmiş akış bölgesinde laminar-türbülans geçiş özelliklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 334588).
- Elibol, E. A. ve Türkoğlu, H. (2017). Gözenekli düz bir yüzeye çarpan jetin sayısal olarak incelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 9-28.
- Erdoğan, M. (2016). *Kuru tip transformatörlerde darbe gerilimi dağılımının üç farklı sargı tipi için incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 428408).
- Eren, U. (2008). *SF6 gazlı transformatörler ile yağlı transformatörlerin karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 213270).
- Ersoy, C. (2022). Paketlenmiş gözenekli bir kolonda gaz akışının sayısal olarak incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 779474)
- Ersöz, C. (2019). *Gözenekli ortamda monoetilen glikol için zorlanmış salınlı akışın ve ısı geçişinin deneysel incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 554358).
- Ertektek, (09.06.2023). *G4 / EU4 Elyaf kaset filtre*. <https://www.ertekfiltre.com/urun/g4-eu4-elyaf-kaset-filtre.html>
- Esenboga, B. (2019). *Modeling and realization of dry type transformer with optimum weight and efficiency characteristics* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 579646).
- Eslimian, M., Vahidi, B., and Eslimian, A. (2011). Thermal analysis of cast-resin dry type transformer. *Energy Conversion and Management*, 52, 2479-2488.
- Fatchurrohman, N., and Chia, S. T. (2017). Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: simulation approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257(1), 012060.
- Ferziger, J. H., and Peric, M. (2010). *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin.
- Geçim, S., Pulat, E., İşman, M.K. ve Etemoğlu, A.B. (2008). Çarpan dikdörtgen bir hava jetinde türbülans modellerinin karşılaştırılması ve ilgili parametrelerin ısı transferine etkileri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13(2), 69-84.
- Gezegin, C., Dirik, H., Ergül, E. U. ve Özdemir, M. (2016). Kuru tip trafoların ortalama ve en yüksek sargı sıcaklık artışlarının incelenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(1), 107-119.

- Güngör, E. (2013). *Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak su altı araçları için pervane tasarımı ve analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 332984).
- Haidar, A. M. A., and Al-Dabbagh, M. (2013). The influences of T-joint core design on no-load losses in transformers. *IEEE Potentials*, 32(3), 40-48.
- Haldar, A., Varshney, L., and Verma, P. (2022). Effect of roughness parameters on performance of solar air heater having artificial wavy roughness using CFD. *Renewable Energy*, 184, 266-279.
- Harlow, J.H. (2012). *The electric power transformer engineering*. Third Edition, Boca Raton: CRC Press.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2018). *Power transformers- Part 11: Dry-type transformers (60076-11:2018)*.
- Issa, R.I. (1996). Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator splitting, *Journal of Computational Physics*, 62, 40-65.
- Kahourzade, S., Mahmoudi, A., Hew, W.P., and Uddin, M.N. (2013). *Design and performance improvement of a line-start PMSM*. Colorado: .IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 5042-5047.
- Karel, (25.11.2024). *IP koruma sınıfı*. <https://www.karel.com.tr/bilgi/ip-koruma-sinifi-nedir-seviyeleri-nelerdir-ip67-ve-ip68-ne-anlama-gelir>
- Karenina, L.S., Korzunin, G.S., and Puzhevich, R.B. (2011). Effect of the phosphate component of electrical insulating coating on the magnetic losses in grain-oriented electrical steel. *Electrical and Magnetic Properties*, 111, 21–24.
- Kaviany M. (1995). *Principles of Heat transfer in Porous media*. Springer – Verlag, NY.
- Kıray, U. (2014). *Gemilerde baca formunun gaz akışına etkileri* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 363510).
- Kener, (25.12.2024). *Frequency-controlled induction motor drive systems*. <http://kener.elektr.polsl.pl/epedlab/lect.php?no=a2&l=en>
- Korkmaz, C. ve Kacar, İ. (2021). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları için optimum eleman ağ yapısının belirlenmesi. *Tarımsal mekanizasyon ve enerji üzerine güncel araştırmalar* (ss.109-125). İstanbul: Akademisyen Kitabevi A.Ş
- Kömürgöz, G. (2002). *Kendi kendine soğuyan kuru tip güç transformatörlerinde sargı ısınma hesabına katkılar* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 126699).

- Kulga, İ.B. (2010). *Gözenekli ortam ve komşu akışkan tabakadan oluşan bileşik sistemde akışın analitik olarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 268037)
- Kül, S. (2022). *Kuru tip transformatörün tasarım değişkenlerine bağlı olarak verim optimizasyonu* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 751596).
- MEB. (2012). *Elektrik elektronik teknolojisi, güç transformatörleri*. Ankara.
- Mergen, A.F. (2009). *Elektrik makineleri I, transformatörler*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Mun, M. (2019). *Raylı sistemlerde kullanılan örnek bir cer trafosunun analizi ve tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 614029).
- Nield, A., and Bejan, A. (1999). *Convection in porous media*. (2nd ed.) Springer, Berlin.
- Nield, D. A., and Bejan, A. (2006). *Convection in porous media* (3rd Ed.). Springer, New York.
- Özdemir, M. (1996). *Tel örgü katmanlardan oluşan gözenekli ortamda zorlanmış ısı geçişi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 55913).
- Öztürk, İ. (2023) *İş sağlığı ve güvenliği açısından transformatörlerin risk analizi değerlendirmesi: Borçka hes örneği* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 812074).
- Özyalçın, B. (2007). *Enerji sistemlerinde 400 kVA'ya kadar kuru tip trafolar, verimi etkileyen faktörler ve tipik örnek* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 212878).
- Peşint, M.A. ve Ürkmez, A. (2004). *Elektrik makinaları II*. Ankara: Ilıcak Matbaası.
- Pilevne, E. (2007). *gözenekli ortamın zorlanmış taşınım ve akışa etkisinin sayısal incelenmesi örnek* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 223427).
- Pisani, L. (2011). Simple expression for the tortuosity of porous media. *Transport in Porous Media*, 88 (2), 193-203.
- Poveda-Lerma, A., Serrano-Callergues, G., Riera-Guasp, M., Pineda-Sanchez, M., Puche-Panadero, R., and Perez-Cruz, J. (2017) Lamination effects on a 3D model of the magnetic core of power transformers. *Open Physics*, 15(1), 997-1003.
- Pustu, M. (2013). *Güç transformatörleri ve saha testleri*. İstanbul: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası.

- Söylemez, İ. (2015). *Araçlarda aerodinamik tasarımın önemi ve ansys fluent ile analizi*. Bitirme Tezi. İnönü Üniversitesi.
- Sugawara, E., and Nikaido, H. (2014). Properties of AdeABC and AdeIJK efflux systems of *Acinetobacter baumannii* compared with those of the Acr AB-TolC system of *Escherichia coli*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 58 (12), 7250-7257.
- Susam, O. (2019). *Düşey eksenli hidrokinetik türbin için asimetrik kanal tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 559961).
- Testo, (08.06.2024). *Testo 425 - Termal anemometre*. <https://www.testo.com/tr-TR/testo-425/p/0560-4251>
- Tören, M. ve Celebi, M. (2019). Experimental and simulating of dry-type transformer thermal analysis with a new approach for outdoor applications. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 103-114. <https://doi.org/10.17482/uumfd.459339>.
- Tören, M. (2018). Dış ortamlarda kullanılabilir kuru tip transformatörün grafen temelli ısı analizi (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 498362).
- Tucker, P.G., and Liu, Y. (2005). Application of zonal LES/ILES approaches to an unsteady complex geometry flow. *Proceedings of the ERCOFTAC International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements; ETMM6, Sardinia, Italy, 23–25 May, 2005*.
- Uğur, C. (2015). *Gözenekli bir kanalda tam gelişmiş zorlamalı taşınımında akışkan ağırdalılığının ısı transferi üzerine etkisi örnek* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 392616).
- Yaşar, O. (2023). *Lityum-polimer bataryalarda soğutma uygulamalarının optimizasyonu* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 827345).
- Yıldız, H.A. ve İsmailoğlu, H. (2013). Güç transformatörlerinde kullanılan selüloz bazlı katı ile sıvı yalıtım malzemelerinin özellikleri ve etkileşimleri. *III. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi- Güç ve Enerji Sistemleri Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 21-24 Kasım 2013, 205-213.
- Yüce, B.E. (2019). *Ofis ortamında türbülanslı akış modellerinin karşılaştırılması ve çeşitli ısıtma sistemlerinin ısı konfor indisleri ve GAGGE modeli kullanılarak sayısal simülasyonu* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 594796).
- Yükselen, E. (2023). *Güneş enerji sistemlerinde kullanılan yağlı tip güç transformatörünün tasarımı ve uygulaması* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 812566).

EKLER

