

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TRANSFORMATÖRLERDE KULLANILAN
RADYATÖRLERİN SOĞUTMA PERFORMANSININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

SONNUR ERDEM

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TRANSFORMATÖRLERDE KULLANILAN
RADYATÖRLERİN SOĞUTMA PERFORMANSININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

SONNUR ERDEM

Prof. Dr. Elif Ögüt

Danışman Kocaeli Üni.

Doç. Dr. Öğr. Üyesi Erman Aslan

Jüri Üyesi, Kocaeli Üni.

Doç. Dr. Öğr. Üyesi Zekeriya Parlak

Jüri Üyesi, Sakarya Üni.

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 31.01.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgilerGE VERNOVA....tarafındanPRD019..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Sonnur ERDEM

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır. Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☒ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☐ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

Sonnur ERDEM

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada transformatörlerde kullanılan farklı tip radyatörlerin kesitleri ve soğutma performansı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş ve uygulama ile doğrulanmıştır.

Bu tez çalışmalarımda karşılaştığım sorunların çözümünde tecrübelerinden yararlandığım ve benden yardımını esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Elif Ögüt'e, Arş. Gör. Murat Can Önen'e, GE VERNova ailesinden Dr. Oğuzkan Şentürk'e en içten teşekkürlerimi sunarken, çalışmalarım sırasında benden desteklerini ve varlığını esirgemeyen değerli aileme de teşekkürü borç bilirim.

Şubat, 2025

Sonnur ERDEM



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	2
3. TRANSFORMATÖR ÇALIŞMA PRENSİBİ VE SOĞUTMA SİSTEMLERİ	11
3.1. Transformatör Kayıpları	13
3.2. Demir ve Bakır Kayıpları	14
3.3. Soğutma Türleri ve Ekipmanları.....	14
3.4. Doğal Taşınım ile Soğutma	15
3.5. Zorlanmış Taşınım ile Soğutma.....	16
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
4.1. Radyatör Kullanımı.....	17
4.2. Radyatör Geometrisi	19
4.3. Malzeme.....	20
4.4. Deneysel Yöntem.....	22
4.4.1. Test Düzeneği Tasarımı	23
4.4.2. Sensör Seçimi.....	24
4.4.3. Yağ Sirkülasyon Sistemi	24
4.4.4. Kontrol Dolabı	24
4.5. Analitik Yöntem	24
4.6. Sayısal Yöntem	28
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
5.1. Deneysel Bulgular.....	35
5.2. Analitik Bulgular	36
5.3. Sayısal Bulgular	37
5.3.1. Sıcaklık Dağılımı	37
5.3.2. Hız Vektörleri.....	39
5.3.3. Yörünge Çizgileri.....	40
5.3.4. Isı Akısı	41
5.3.5. Basınç Farkı	43
5.4. Tartışma	44
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	54
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Optimum uzunluk ve panel sayısı kombinasyonuna karşı soğutma kapasitesinin tepki yüzeyi grafiği.....	3
Şekil 2.2.	a) 4 Radyatör ve 3 fanlı oluşturulan model b) Sıcaklık dağılımları.....	4
Şekil 2.3.	4 Radyatör ve 2 fanlı oluşturulan model ve sıcaklık dağılımları.....	5
Şekil 2.4.	Deney Tesisatı	6
Şekil 2.5.	Panel tip radyatördeki yağ akış hızları.....	7
Şekil 2.6.	Radyatördeki yağ akış hızları ve sıcaklık dağılımı.....	7
Şekil 2.7.	Sıcaklık dağılımı.....	9
Şekil 2.8.	Akım çizgilerinin çapraz gözlü stereo gramı	9
Şekil 2.9.	Hız ve Sıcaklık Profili	10
Şekil 3.1.	Aktif kısım.....	12
Şekil 3.2.	Çekirdek, bobin, komütatör ve bağlantılar.....	13
Şekil 3.3.	Güç Transformatörü.....	15
Şekil 3.4.	Zorlanmış soğutma sistemi.....	16
Şekil 4.1.	ONAF tipinde güç transformatörü, (b) termal kamera ile alınmış ısınma testi sonucu sıcaklık değerleri.....	17
Şekil 4.2.	Radyatör geometrisi.....	20
Şekil 4.3.	Test düzeneği.....	22
Şekil 4.4.	Sensörler ve yağ sirkülasyon sistemi.....	23
Şekil 4.5.	Sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi.....	29
Şekil 4.6.	Sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.....	29
Şekil 4.7.	Sıcaklığa bağlı dinamik viskozite değişimi.....	29
Şekil 4.8.	Sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi.....	30
Şekil 4.9.	Koordinat ve sayısal model 3D gösterimi.....	31
Şekil 4.10.	Çoklu-altıgen çekirdek bileşenlerinin görünümü.....	32
Şekil 4.11.	Ağ(eleman) yoğunluğu bağımsızlığı sonuçları.....	32
Şekil 4.12.	Küresel ağ(elaman) görünümleri.....	33
Şekil 5.1.	Sıcaklık dağılımı mineral yağ ile (panel tipi ve boru tipi tek radyatörün çalışma durumunda anlık termal görüntüleri).....	35
Şekil 5.2.	Sıcaklık dağılımı mineral yağ ile (panel tipi ve boru tipi 6 grup radyatörün çalışma durumunda anlık termal görüntüleri).....	36
Şekil 5.3.	Boru tipi radyatör mineral yağı için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b) çıkış bölgesindeki sıcaklık dağılımı.....	37
Şekil 5.4.	Panel tipi radyatör mineral yağı için 0,05 m/s giriş hızında giriş(a)-çıkış (b) bölgesindeki sıcaklık dağılımı.....	38
Şekil 5.5.	Boru tipi radyatör ester yağı için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b) çıkış bölgesindeki sıcaklık dağılımı.....	38
Şekil 5.6.	Panel tipi radyatör ester yağı için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b) çıkış bölgesindeki sıcaklık dağılımı.....	39
Şekil 5.7.	Boru tipi radyatör için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b) çıkış bölgesindeki hız vektörleri.....	39

Şekil 5.8.	Panel tipi radyatör için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b) çıkış bölgesindeki hız vektörleri.....	40
Şekil 5.9.	Panel tipi radyatör için 0,05 m/s giriş hızında giriş bölgesindeki yörünge çizgileri.....	40
Şekil 5.10.	Boru tipi radyatör için 0,05 m/s giriş hızında giriş bölgesindeki yörünge çizgileri.....	41
Şekil 5.11.	Panel tipi mineral yağlı panel tip radyatör için 0,05 m/s hızında a) giriş, b) çıkış bölgelerindeki yüzeydeki toplam ısı akısı.....	41
Şekil 5.12.	Panel tipi ester yağlı panel tip radyatör için 0,05 m/s hızında a) giriş, b) çıkış bölgelerindeki yüzeydeki toplam ısı akısı.	42
Şekil 5.13.	Boru tipi mineral yağlı panel tip radyatör için 0,05 m/s hızında a) giriş, b) çıkış bölgelerindeki yüzeydeki toplam ısı akısı.....	42
Şekil 5.14.	Boru tipi radyatör ester yağı için 0,05 m/s giriş hızında giriş(a)-çıkış (b) bölgesindeki basınç farkı.....	43
Şekil 5.15.	Boru tipi radyatör mineral yağı için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b) çıkış bölgesindeki basınç farkı.....	43
Şekil 5.16.	Panel tipi radyatör a) yatay, b) dikey 'de alınan grafiklerin konumları ve isimleri.....	43
Şekil 5.17.	Panel tipi radyatör yatay(x) belirlenen pozisyonlar için şeklin sıcaklık dağılım grafiği.....	44
Şekil 5.18.	Panel tipi radyatör dikey(y) belirlenen pozisyonlar için şeklin hız dağılım grafiği.....	45
Şekil 5.19.	Boru tipi radyatör yatay(a) ve dikey (b)'de alınan grafiklerin konumları ve isimleri.....	45
Şekil 5.20.	Boru tipi radyatör yatay(x) belirlenen pozisyonlar için şeklin sıcaklık dağılım grafiği.....	46
Şekil 5.21.	Boru tipi radyatör dikey(y) belirlenen pozisyonlar için şeklin hız dağılım grafiği.....	47
Şekil 5.22.	Boru tipi mineral yağlı radyatör dikey(y) belirlenen pozisyonlar için şeklin basınç düşüş grafiği.....	47
Şekil 5.23.	Boru tipi ester yağlı radyatör dikey(y) belirlenen pozisyonlar için şeklin basınç düşüş grafiği.....	48
Şekil 5.24.	Boru tipi ester yağlı radyatör dikey(y) belirlenen pozisyonlar için şeklin basınç düşüş grafiği.....	48

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Geometrik ölçü ve parametreler.....	19
Tablo 4.2. Malzeme özellikleri.....	21
Tablo 4.3. Sınır Koşulları.....	34
Tablo 5.1. Panelin çeşitli konumlardaki yüzey sıcaklığı dağılımını.....	50



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_c	: Radyatörün bir akış kanalının kesit alanı, $[m^2]$
A_{cp}	: Panel tipi radyatörün bir akış kanalının kesit alanı, $[m^2]$
A_{cb}	: Boru tipi radyatörün bir akış kanalının kesit alanı, $[m^2]$
A_s	: Bir akış kanalının yüzey alanı, $[m^2]$
A_{sp}	: Bir akış kanalının panel tipi yüzey alanı, $[m^2]$
A_{sb}	: Boru tipi radyatörün bir akış kanalının yüzey alanı, $[m^2]$
β_y	: Yağın termal genleşme katsayısı, $[1/K]$
β_h	: Havanın hacimsel termal genleşme katsayısı, $[1/K]$
C_p	: Özgül ısı kapasitesi, $[J/(kg \cdot K)]$
C_{py}	: Yağın özgül ısı kapasitesi, $[J/(kg \cdot K)]$
C_{ph}	: Havanın özgül ısı kapasitesi, $[J/(kg \cdot K)]$
C_{pm}	: Metalin özgül ısı kapasitesi, $[J/(kg \cdot K)]$
C_{pe}	: Ester yağın özgül ısı kapasitesi, $[J/(kg \cdot K)]$
C_{pm}	: Mineral yağın özgül ısı kapasitesi, $[J/(kg \cdot K)]$
D	: Panel aralığı $[mm]$
D_h	: Bir kanalın hidrolik çapı, $[m]$
F	: Düzeltme faktörü
g	: Yer çekimi ivmesi, $[m/s^2]$
Gr_y	: Yağın Grashof sayısı
Gr_h	: Havanın Grashof sayısı
h_h	: Hava tarafı taşınım ısı transfer katsayısı, $[W/(m^2 \cdot K)]$
h_y	: Yağ tarafı taşınım ısı transfer katsayısı, $[W/(m^2 \cdot K)]$
h_m	: Metal ısı transfer katsayısı, $[W/(m^2 \cdot K)]$
k	: Isıl iletkenlik katsayısı, $[W/(m \cdot K)]$
k_h	: Havanın ısı iletkenliği, $[W/(m \cdot K)]$
k_e	: Ester yağın ısı iletkenliği, $[W/(m \cdot K)]$
k_m	: Mineral yağın ısı iletkenliği, $[W/(m \cdot K)]$
k_y	: Yağın ısı iletkenliği, $[W/(m \cdot K)]$
k_m	: Metalin ısı iletkenliği, $[W/(m \cdot K)]$
L	: Panel uzunluğu $[mm]$
N_k	: Yağ geçiş kanalı sayısı
N_{kp}	: Yağ geçiş kanalı sayısı
N_{kb}	: Yağ geçiş kanalı sayısı
Nu_h	: Havanın Nusselt sayısı
Nu_y	: Yağın Nusselt sayısı
P	: Basınç, $[Pa]$
ρ_y	: Yoğunluk, $[kg/m^3]$
ρ_m	: Mineral yağın yoğunluğu, $[kg/m^3]$
ρ_e	: Ester yağın yoğunluğu, $[kg/m^3]$
ρ_h	: Havanın yoğunluğu, $[kg/m^3]$
ρ_m	: Metalin yoğunluğu, $[kg/m^3]$
Pr_y	: Yağın Prandtl sayısı
Pr_h	: Havanın Prandtl sayısı

p	: Bir akış kanalının ıslatılmış çevresi, [m]
p_p	: Panel tip radyatörün bir akış kanalının ıslatılmış çevresi [m]
p_b	: Boru tip radyatörün bir akış kanalının ıslatılmış çevresi, [m]
Q	: Isıl güç [Watt]
Ra_h	: Havanın Rayleigh sayısı (radyatör uzunluğu kullanılarak geometrik karakteristik)
Ra_p	: Rayleigh sayısı (radyatör panel aralığı kullanılarak geometrik karakteristik)
R_{ky}	: Kanal akışında zorlanmış konveksiyon direnci
R_{kh}	: Dış havada serbest konveksiyon direnci
R_t	: Yağın Reynolds sayısı
Re_y	: Yağın Reynolds sayısı
s	: Radyatördeki kanallar arası en yakın mesafe [m]
s_p	: Panel tipi radyatörün kanalları arasındaki en yakın mesafe, [m]
s_b	: Boru tipi radyatörün kanalları arasındaki en yakın mesafe [m]
t	: Radyatör yüzey kalınlığı, [m]
t_p	: Radyatör yüzey kalınlığı, panel tipi [m]
t_b	: Radyatör yüzey kalınlığı, boru tipi [m]
T	: Sıcaklık, [K]
T_g	: Yağ giriş sıcaklığı, [K]
T_c	: Yağ çıkış sıcaklığı, [K]
T_o	: Ortam sıcaklığı, [K]
U_y	: Yağın akış hızı, [m/s]
W	: Radyatör paneli genişliği, [m]
μ	: Dinamik viskozite [Pa. s]
μ_e	: Ester yağın dinamik viskozitesi [Pa. s]
μ_m	: Mineral yağın dinamik viskozitesi [Pa. s]
μ_y	: Yağın dinamik viskozitesi [Pa. s]
μ_h	: Havanın dinamik viskozitesi [Pa. s]
$\dot{V}_m$	: Bir panel için hacimsel debi[m ³ /s]
$\dot{V}_e$	: Bir panel için hacimsel debi[m ³ /s]
$\dot{V}_y$	: Bir panel için hacimsel debi[m ³ /s]
ΔT_A	: Giriş sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artışı, [K]
ΔT_B	: Çıkış sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artışı, [K]
ΔT_{LMDT}	: Ortalama (log-ortalama) sıcaklık artışı, [K]
ΔT_y	: Radyatörün girişi ve çıkışı arasındaki yağ sıcaklık farkı [K]
ΔT_{oai}	: Radyatör girişindeki yağ-ortam hava sıcaklığı farkı[K]
$\Delta \rho$	: Yoğunluk değişimi, [kg/m ³]
ΔP_y	: Yağ için basınç Farkı, [Pa]

Kısaltmalar

CFD	: Computational Fluid Dynamics
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

ODAF : Oil Directed Air Forced (Yağ Yönlendirilmiş Hava Yönlendirilmiş)
OFAF : Oil Forced Air Forced (Yağ Zorlamalı Hava Zorlamalı)
ONAF : Oil Natural Air Forced (Yağ Doğal Hava Zorlamalı)
ONAN : Oil Natural Air Natural (Yağ Doğal Hava Doğal)



TRANSFORMATÖRLERDE KULLANILAN RADYATÖRLERİN SOĞUTMA PERFORMANSININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Güç transformatörleri tarafından dönüştürülen elektrik enerjisinin bir kısmı ısı olarak yayılır ve bu ısı soğutma için kullanılan ekipman tarafından etkili bir şekilde dağıtılmalıdır. Radyatörler, malzeme, üretim ve bakım açısından maliyet etkinliği nedeniyle transformatörlerde kullanılan temel soğutma ekipmanıdır. Mineral yağ genellikle transformatörler için yaygın bir seçim olsa da, daha yüksek parlama noktası ve daha iyi ekolojik ayak izi nedeniyle ester yağının (hem doğal hem de sentetik) kullanımında önemli bir artış olmuştur. Boru tipi radyatör ve ester yağının kombinasyonu, güç transformatörleri için hem çevre dostu hem de verimli soğutma elde etmek için büyük bir potansiyel göstermektedir. Bu çalışmada hem mineral yağ hem de ester yağı için dilim boru tipi radyatörün soğutma verimliliği araştırılmıştır. Ayrıca, sonuçlar mineral ve ester yağı için karşılaştırmalı bir şekilde analiz edilmiştir. Karşılaştırma çalışmaları amacıyla, katı bir model üretmek için Convett®'ten bir radyatör dilimi alınmıştır. Simülasyon çalışmaları Ansys Fluent® kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk, termal kapasite, termal iletkenlik ve viskozite dahil olmak üzere mineral ve ester yağının sıcaklığa bağlı özellikleri belirlenmiştir. Çözümlerde enerji yöntemi kullanıldı ve aynı hızda giren yağların çıkış sıcaklıkları, ısı akısı ve sıcaklık farkları karşılaştırıldı. Dilimli boru tipi radyatörle yapılan simülasyon sonuçlarına göre, mineral yağ ile panel tipinden daha düşük çıkış sıcaklıkları elde edildi. Düşük giriş yağ akışı nedeniyle ısı akılarının hem ester hem de mineral yağ için neredeyse aynı olduğu hesaplandı. Mineral yağın ester yağından daha yüksek termal performansa sahip olduğu bulunmuş olsa da ester yağının boru tipi radyatörlerle birlikte kullanıldığında mineral yağ için uygulanabilir bir alternatif olabileceği sonucuna varılabilir.

Anahtar Kelimeler: Ester Yağı, Güç Transformatörü, HAD, Mineral Yağı, Radyatör.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF COOLING PERFORMANCE OF RADIATORS USED IN TRANSFORMERS

ABSTRACT

Some of the electrical energy converted by power transformers is emitted as heat, which must be effectively dissipated by the equipment used for cooling. Radiators are the basic cooling equipment employed in transformers due to their cost-effectiveness in terms of materials, manufacturing, and maintenance. While mineral oil is usually a common choice for transformers, there has been a significant increase in the use of ester oil (both natural and synthetic) because of its higher flash point and better ecological footprint. The combination of a tube type radiator and ester oil shows great potential for achieving both environmentally friendly and efficient cooling for power transformers. This study, therefore, investigated the cooling efficiency of a slice tube type radiator for both mineral oil and ester oil. In addition, the results were analyzed in a comparative manner for mineral and ester oil. For the purpose of benchmark studies, a radiator slice was acquired from Convett® in order to produce a solid model. The geometric details that hinder the establishment of a high-quality solution network, but do not impact the thermal and hydrodynamic performance, have been resolved. After simplifying the geometries, the flow volume for the fluid (oil) was generated. Simulation studies were carried out using Ansys Fluent®. The temperature-dependent properties of mineral and ester oil, including density, thermal capacity, thermal conductivity, and viscosity, have been determined. The energy method was used in the solutions, and the outlet temperatures, heat flux, and temperature differences of the oils entering at the same speed were compared. According to the simulation results made with a slice tube type radiator, lower than fin type outlet temperatures were obtained with mineral oil. The heat fluxes were calculated to be nearly identical for both ester and mineral oil due to the low inlet oil flow. While mineral oil has been found to have greater thermal performance than ester oil, it can be concluded that ester oil can serve as a viable alternative for mineral oil when utilized in conjunction with tube type radiators.

Keywords: Ester Oil, Power Transformer, CFD, Mineral Oil, Radiator.

1. GİRİŞ

Güç transformatörleri, elektrik enerjisinin etkin bir şekilde iletimini sağlarken, aynı zamanda bir miktar ısıнын açığa çıkmasına da neden olur. Bu ısı, transformatörlerin verimli çalışabilmesi için etkili bir şekilde dağıtılmalıdır ve bu noktada soğutma ekipmanları devreye girer.

Transformatörlerde yaygın olarak kullanılan temel soğutma ekipmanı olan radyatörler, maliyet etkinliği ve performans açısından büyük önem taşır. Özellikle, yenilenebilir enerji yatırımlarının artışıyla birlikte, açık deniz uygulamalarında kullanılan transformatörlerin hem yüksek performanslı hem de korozyona dayanıklı radyatörlerle donatılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, boru tipi radyatörlerin soğutma verimliliği, mineral ve ester yağı kullanımı açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Büyük soğutma sorunlarını önlemek için, güç transformatörlerindeki soğutma sistemleri, soğutma hesaplamalarındaki zorluklar nedeniyle gerekenden daha fazla radyatör içerebilir (Paramane ve diğ.,2014). Son yıllarda, radyatörler üzerindeki sıcaklık ve hava akışı dağılımını gerçekçi bir şekilde görselleştirmeyi mümkün kılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği gibi gelişmiş teknolojilerin geliştirildiği görülmüştür. Doğrulanmış sayısal model, pahalı deneylere olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır. Dahası, hava akışı dağılımının incelenmesi, sistemin termal verimliliğini iyileştirmek için daha fazla içgörü ve olası yollar sunar (Yang ve diğ.,2023).

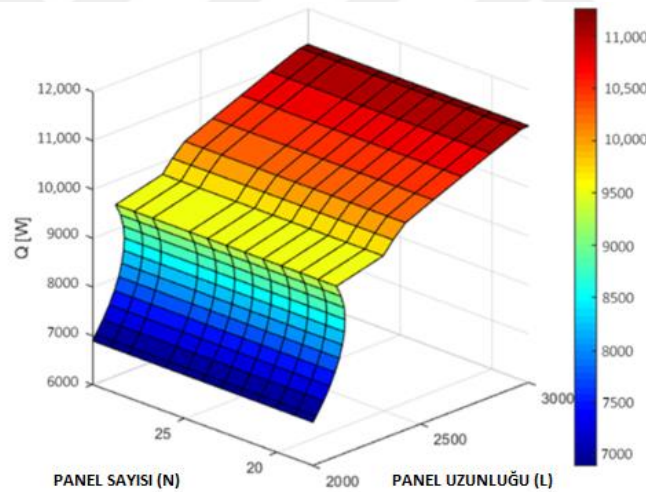
Sayısal yöntemler kullanarak güç transformatörlerindeki ve soğutma sistemlerindeki ısı kayıplarını ve sıcaklık değişimini hesaplamak mümkündür (Kim ve diğ.,2017). Bu nedenle, bu çalışmada hem mineral yağ hem de ester yağı için boru tipi ve panel tipi radyatörlerin bir diliminin soğutma verimliliği incelenmiştir. Ayrıca, bulgular mineral ve ester yağları açısından karşılaştırmalı bir şekilde incelenerek termal performans ve mineral yağ yerine biyolojik olarak parçalanabilir yağ kullanımı vurgulanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Güç transformatörünün termal yönetimine etki eden parametreleri değerlendirmek ve soğutma sistemlerini optimize etmek amacıyla yapılan bu çalışma da sayısal bir yaklaşım Koca ve ekibi tarafından geliştirilmiştir (Koca ve diğ.,2024). Araştırma, radyatörün termal performansını farklı konfigürasyonlar altında analiz ederek, teknolojik bir perspektiften çeşitli soğutma yükleri için boyut ve yapılandırmaları optimize etmeyi hedeflemektedir. Optimizasyon kriterleri, radyatörün panel yüksekliği (L), panel aralığı (D) ve panel sayısı (N) olarak belirlenmiştir. Modellerin karmaşıklığı nedeniyle, birleşik termo hidrolik simülasyonlar şirket içinde yüksek başarılı hesaplama merkezinde yapılmıştır. Sayısal modelin doğrulanması amacıyla, şirket içinde bir radyatör test tesisi inşa edilmiş ve simülasyon sonuçları Koca ve ekibi tarafından ampirik verilerle uyumlu bulunmuştur (Koca ve diğ.,2024). Toplamda 76 radyatör konfigürasyonu incelenmiş ve bu veriler ışığında bir optimizasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, en iyi soğutma performansının paneller arasındaki mesafenin 50 mm olduğu durumlarda elde edildiğini ve radyatör boyutu küçüldükçe birim maliyet başına soğutma kapasitesinin arttığını göstermişlerdir (Koca ve diğ.,2024). Araştırmada, ONAN modunda en düşük maliyetle istenen soğutma kapasitesine ulaşan radyatör tasarımları incelenmiştir. Radyatör içindeki yağın ve dışındaki havanın hız, basınç ve sıcaklık dağılımları sonlu hacimler tekniği ile sayısal çözüm yapan ANSYS FLUENT yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Optimum uzunluk ve panel sayısı kombinasyonuna karşı soğutma kapasitesinin tepki yüzeyi grafiği Şekil 2.1 de gösterilmiştir (Koca ve diğ.,2024). Simülasyon sonuçları deneysel verilerle doğrulanmış ve maliyetleri optimize etmek için MINITAB v19 yazılımı kullanılmıştır (Koca ve diğ.,2024). Tekno-ekonomik analizin bulguları hem L hem de N parametrelerinin optimize edilmesinin, maliyet etkinliğinden ödün vermeden soğutma kapasitesinde önemli iyileştirmelere yol açabileceği gösterilmektedir (Koca ve diğ.,2024).

25MVA güç transformatör radyatörlerinin ONAF soğutma radyatörlerinde, farklı fan konfigürasyonlarının performansa etkisi Paramane ve ekibi tarafından incelenmiştir (Paramane ve diğ.,2014). Ayrıca sayısal çalışmalarını, deneylerle desteklemişlerdir.

Sayısal çalışmalar 2 aşamada yürütülmüştür: 1) 2 farklı fan debisi için, fanın yatay veya dikey konumlandırılması, 2) Yataydaki fanların farklı ofset mesafesinde konumlandırılması. Sayısal çalışmalarda fiziksel model olarak; 14 dilim radyatörden (radyatörler arası 5 cm) oluşan, 2,6 m yüksekliğinde, 0,52 m genişliğinde 4 grup radyatör modülü Paramane ve ekibi tarafından kullanılmıştır (Paramane ve diğ.,2014). Çalışmalarda radyatör dilimlerinin et kalınlığı modellenmemiştir. Radyatör fanlar yüzey olarak modellenmiştir. Toplamda 2,08 milyon eleman kullanılmıştır. Sınır şartı olarak dış hava sıcaklığı 50 °C olarak kabul edilmiştir.

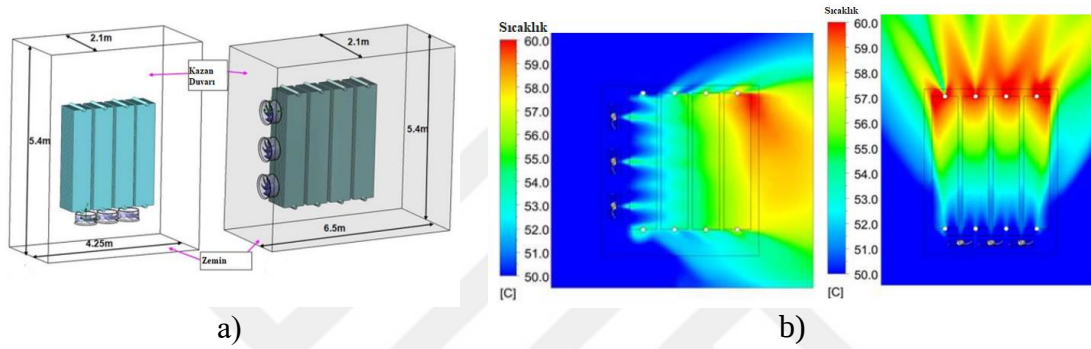


Şekil 2.1. Optimum uzunluk ve panel sayısı kombinasyonuna karşı soğutma kapasitesinin tepki yüzeyi grafiği (Koca ve diğ.,2024)

Yan duvarlar ‘açık sınır koşulları’ olarak modellenirken taban ve üst kısım ‘kaymama koşulu’ aktif olarak Paramane ve ekibi tarafından modellenmiştir (Paramane ve diğ.,2014). Benzer şekilde radyatör ve fan yüzeylerine ‘kaymama koşulu’ uygulanmıştır. Dönen fan ve akışkan domaini dönen bir referans çerçeve yöntemiyle modellenmiştir. Radyatör içerisindeki yağ akışı modellenmemiştir. Duvarlarda kaymama koşulu aktif olarak tanımlanan yüzeyler izantropik kabul edilmiştir (Paramane, ve diğ.,2014). Deneysel çalışmalarda ultrasonik debimetre ve K-tipi

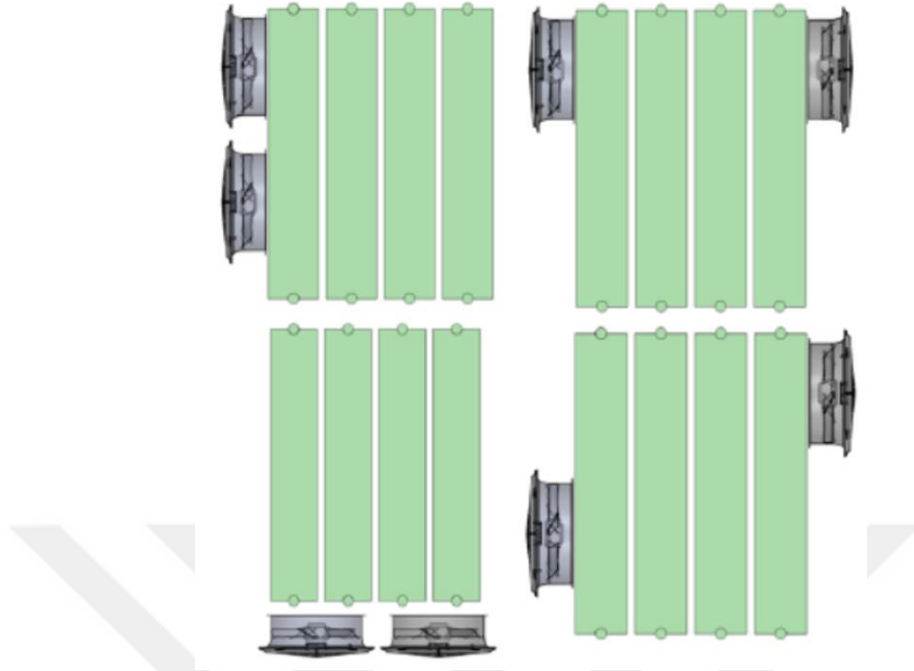
termokupl kullanılmıştır. Sayısal çalışmalardan hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen; fan debileri, yağ sıcaklıkları ve kapasiteler Paramane ve ekibi tarafından kıyaslanmıştır (Paramane, ve diğ.,2014).

Elde ettikleri sonuçlara göre fanların yatay yerleştirilmesi durumunda, toplam ısı transferi dikeye göre ortalama %7 arttığı görülmüştür. Ayrıca yatay yerleştirilmiş fanların bir kısmının eksenden 50 mm ofset edilmesi soğutma performansını %3 arttırdığı da Paramane ve ekibi tarafından görülmüştür (Paramane, ve diğ.,2014).



Şekil 2.2. a) 4 Radyatör ve 3 fanlı oluşturulan model b) Sıcaklık dağılımları (Paramane ve diğ.,2014)

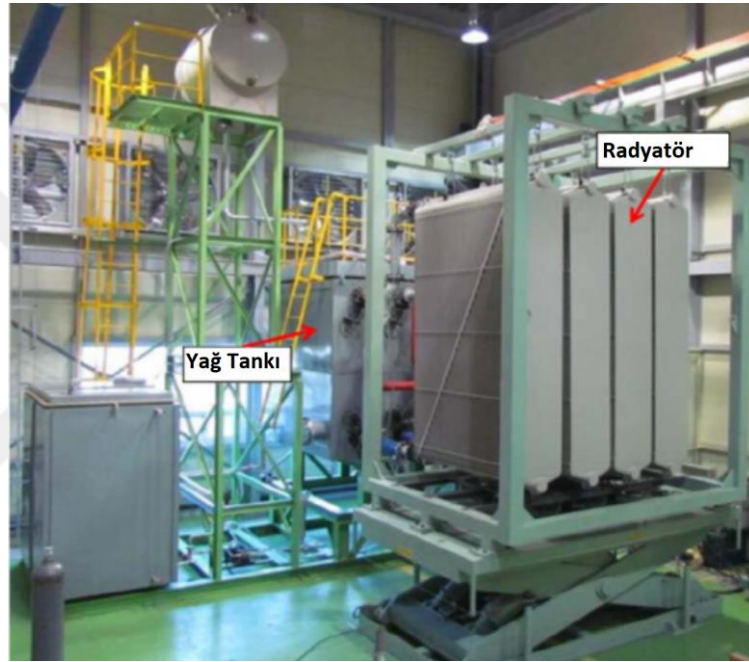
Bu çalışmada Paramane ve ekibi, transformatör soğutma sistemindeki fanların üfleme yönleri ve konumlarının toplam soğutma performansına etkisi CFD yöntemiyle incelemiştir (Paramane ve diğ.,2017). Sayısal çalışmalarda fiziksel model olarak; 30 dilim radyatörden oluşan, 3m yüksekliğinde, 0,52 m genişliğinde ve 8,5 mm kalınlığında 5 grup radyatör modülü ve 1m çapında, 860 rpm hızına sahip 2 adet fan kullanılmıştır (Paramane ve diğ.,2017). Simülasyonlarda Ansys CFX yazılımı kullanılmışlardır. Sınır şartları olarak; dış hava sıcaklığı 39,8 °C kabul edilmiş, yan yüzeyler ‘sınırları açık ve ‘kaymama koşulu’ aktif olarak modellemiştir. Benzer şekilde radyatör ve fan yüzeylerine ‘kaymama koşulu’ uygulamışlardır (Paramane ve diğ.,2017). Radyatör içerisindeki yağ akışı Paramane ve ekibi tarafından modellenmemiştir. Sayısal çalışmalarda 4 durum incelenmiştir: 2 fanın yatay, 2 fanın yatayda karşılıklı (ikisi de üstte), 2 fanın yatayda çapraz (birisi üstte, diğeri altta), 2 fanın dikey konumlandırılmaları durumları. Sonuçlara göre; konfigürasyon a), d)’ye göre %1,4, b)’ye göre %3,4, c)’ye göre %8,5 daha iyi performans göstermiştir (Paramane ve diğ.,2017).



Şekil 2.3. 4 Radyatör ve 2 fanlı oluşturulan model ve sıcaklık dağılımları (Paramane ve diğ.,2017)

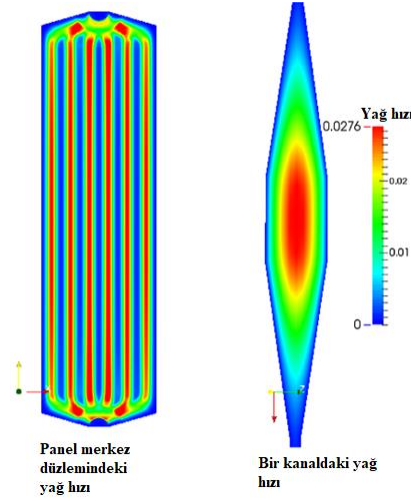
Çalışma sıcaklığı, aşırı ısınmış yalıtım malzemelerinin ve diğer kritik bileşenlerin bozulmasını hızlandırabileceğinden, transformatörlerin ömrünü doğrudan etkiler. Transformatör sıcaklıklarını izlemek için kullanılan mevcut yöntemlerin sınırlamaları vardır: doğrudan ölçüm yöntemleri yerleştirilmiş sensörlerden veriler sağlar ancak transformatör içindeki tam sıcaklık dağılımını yakalayamaz. Bu çalışma Yang ve ekibi tarafından seyrek ölçüm verilerine ve azaltılmış sıralı modellere dayalı olarak transformatör sargılarının gerçek zamanlı sıcaklık dağılımının nasıl belirleneceğini teorik olarak türetilmiş, sensörlerin sayısı ve yerleşim pozisyonu dahil olmak üzere sensör yerleşim sorunlarını çözülmüştür (Yang ve diğ.,2023). Çalışmada, sıcaklık dağılımının maksimum hesaplama hatası 1,8 K ve hesaplama süresi 0,38 saniye görülmüştür. Araştırma bulguları, birden fazla modun bir transformatörün sıcaklık dağılımına katkıda bulunabileceğini Yang ve ekibi tarafından gösterilmiştir (Yang ve diğ.,2023). Çalışma hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin transformatör üzerindeki benzer problemler ve çözüm yöntemini yansıtmaktadır (Yang ve diğ.,2023).AN, AF-dikey ve AF-yatay radyatörlerinin soğutma performansları hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle Kim ve ekibi tarafından detaylı olarak incelenmiştir (Kim ve diğ.,2017).

Sayısal analizlerde, radyatör kanallarındaki ve yüzeylerindeki sıcaklık dağılımları ile hava akışının hız ve sıcaklık profilleri Kim ve ekibi tarafından analiz edilmiştir (Kim ve Ha ,2017). Nümerik çözümde hız-basınç ayrıklaştırma yöntemi olarak SIMPLE algoritması tercih edilmiş ve türbülans modeli olarak k-omega modeli kullanmışlardır (Kim ve Ha,2017). Sayısal analiz sonuçlarına göre, hesaplanan soğutma kapasitesi deneysel ölçümlere kıyasla %6,1 daha yüksek Kim ve Ha tarafından bulunmuştur (Kim ve Ha,2017). Soğutucu akışkan (yağ) debisinin artışıyla bu farkın daha da büyüdüğü Kim ve Ha tarafından gözlemlenmiştir (Kim Ha, 2017).

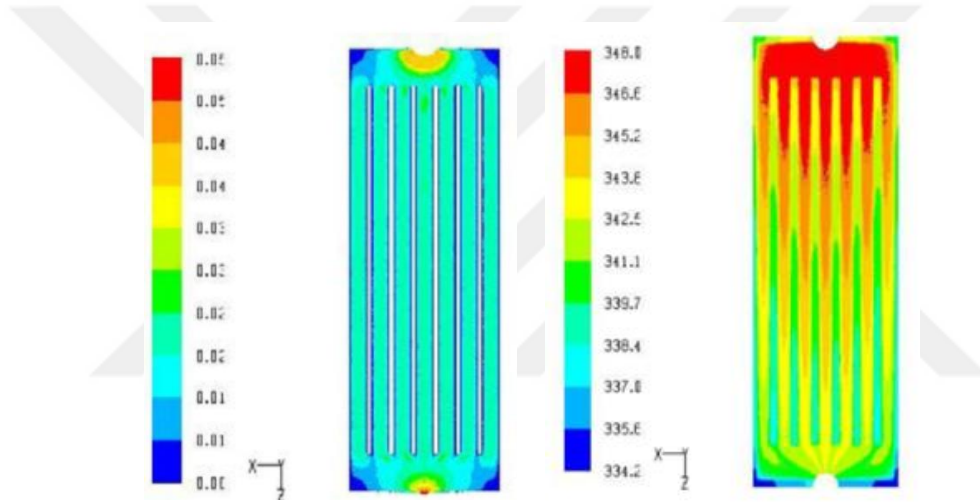


Şekil 2.4. Deney Tesisatı (Kim ve Ha,2017)

Rodriguez ve ekibi tarafından 30MVA güç transformatör radyatörlerinin performansı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. 3 boyutlu HAD modelinde doğal taşınım için Boussinesq ve zorlanmış taşınım için Large Eddy Simulation (LES) yaklaşımı kullanılmıştır (Rodriguez ve diğ.,2017). Analiz modeli olarak 26 dilimlik bir birim radyatör kullanılmışlardır. Radyatör et kalınlığını ihmal etmişlerdir. Sayısal olarak hesaplanan radyatör modülünün soğutma kapasitesi, deneysel ölçümlerden %30 fazla çıktığı Rodriguez ve ekibi tarafından görülmüştür (Rodriguez ve diğ.,2017). Yağ akış hızları Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Rodriguez ve diğ.,2017).



Şekil 2.5. Panel tip radyatördeki yağ akış hızları (Rodriguez ve diğ.,2017)



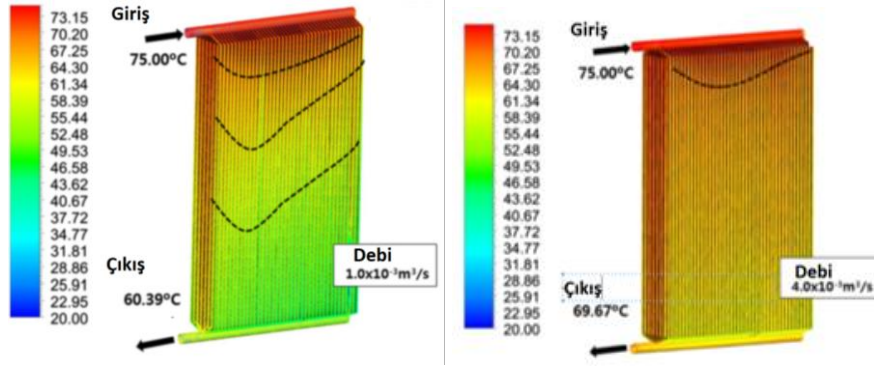
Şekil 2.6. Radyatördeki yağ akış hızları ve sıcaklık dağılımı (Anishek ve diğ.,2016)

Anishek ve takımı HAD yöntemini kullanarak, radyatör dilimleri arasındaki mesafe ve radyatör boyunu optimize etmişlerdir (Anishek ve diğ.,2016). Sayısal çalışmalarda mevcut ürünün fiziksel ölçüleri; 20 dilim radyatörden (radyatör arası mesafe 4,5 cm) oluşan, 1,5 m yüksekliğinde, 0,52 m genişliğindedir. İki boyutlu sayısal analizler yürütmüşlerdir. 1,5 m uzunluğunda radyatörler için; 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm radyatörler arasındaki mesafeler için sayısal analizler yürütmüşlerdir. Sınır şartları olarak; soğutucu yağ giriş sıcaklığı 348 K, dış hava sıcaklığı 300 K olarak seçilmiştir. Konvensiyonel tasarım için sabit taşınım katsayısı $7.37 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken kendi tasarımlarında bu değer $8.06 \text{ W/m}^2\text{K}$ Anishek ve takımı tarafından bulunmuştur (Anishek ve diğ.,2016). Tasarladıkları yeni radyatör modeline göre aynı malzeme maliyeti için soğutma performansı %14 arttığını görmüşlerdir (Anishek ve diğ.,2016).

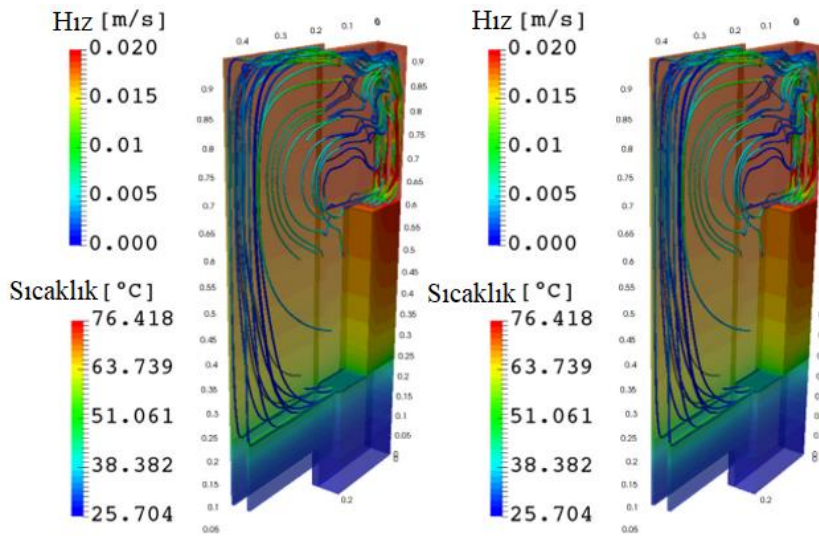
Optimizasyon sonuçlarına göre; ideal radyatör yüksekliği 0,75 m, radyatör arası mesafe 2,5 cm ve radyatör et kalınlığı 1,2 mm olarak Anishek ve takımı tarafından hesaplanmıştır (Anishek ve diğ.,2016).

Kim ve ekibi tarafından yürütülen bu çalışmada, transformator soğutma görevindeki radyatörlerin soğutma performansları ve radyatör üzerindeki sıcaklık dağılımları sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir (Kim ve diğ.,2012). Sayısal çalışmalarda fiziksel model olarak; 40 dilim radyatörden (radyatörler arası mesafe 4,5 cm) oluşan, 3,3m yüksekliğinde, 0,52 m genişliğinde 4 radyatör modülü kullanmışlardır (Kim ve diğ.,2012). HAD çalışmalarında FLUENT v.13 kullanılmıştır. Radyatörler içerisinde yağ hacmi ve hava hacmi modellenmiş toplam 7,3 milyon mesh görülmüştür (Kim ve diğ.,2012). Analizler sürekli hal ile çözülmüş, türbülans modeli olarak k-omega yöntemini kullanmışlardır (Kim ve diğ.,2012). Radyatör girişlerinde mass flow çıkışlarında outflow sınır şartları tanımlanmıştır. Yağ radyatör giriş sıcaklığı 75 °C olarak tanımlanmıştır. Analizler sonucunda radyatör ısıl kapasiteleri ve ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalarda 300 kW'lık bir yağ tankı kullanılmıştır. Radyatör giriş sıcaklığı 55 °C olarak tanımlanmıştır. Radyatör giriş çıkış sıcaklıkları T tipi termokupl, yağ debisi ise ultrasonik debimetre ile ölçülmüştür. Çalışma sonuçlarına göre; (ODAN) soğutma yönteminde (ONAN) %20,1 daha yüksek soğutma performansı elde edilmiştir. Yağ debisi 1 x 10⁻³ m³/s'den 4 x 10⁻³ m³/s çıktığında toplam soğutma kapasitesi %17 oranında arttığı Kim ve ekibi tarafından görülmüştür (Kim ve diğ.,2012).

Córdoba ve ekibi tarafından yürütülen bu çalışmada, doğal taşınımın modellenmesi amacıyla 3 boyutlu simülasyon modeli geliştirilmiştir (Córdoba ve diğ., 2019). Çalışmalarda Córdoba ve ekibi ONAN tipi transformatorü modellemiş, soğutucu akışkan yağın sıcaklık ve hız dağılımları elde etmişlerdir (Córdoba ve diğ., 2019). Simülasyonlarda dilim model kullanmışlardır. Paralel ısıtıcı kanalları içeren ısıtıcı elamanlar geçirgen ortam olarak modellemişlerdir. Sayısal çalışmalarını daha önce yürütülen deneysel çalışma sonuçlarıyla Córdoba ve ekibi tarafından doğrulanmıştır (Córdoba ve diğ., 2019). Akım çizgileri Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar ile nümerik sonuçların arasında sapma kabul edilebilir ölçüde olmuştur (Córdoba ve diğ., 2019).



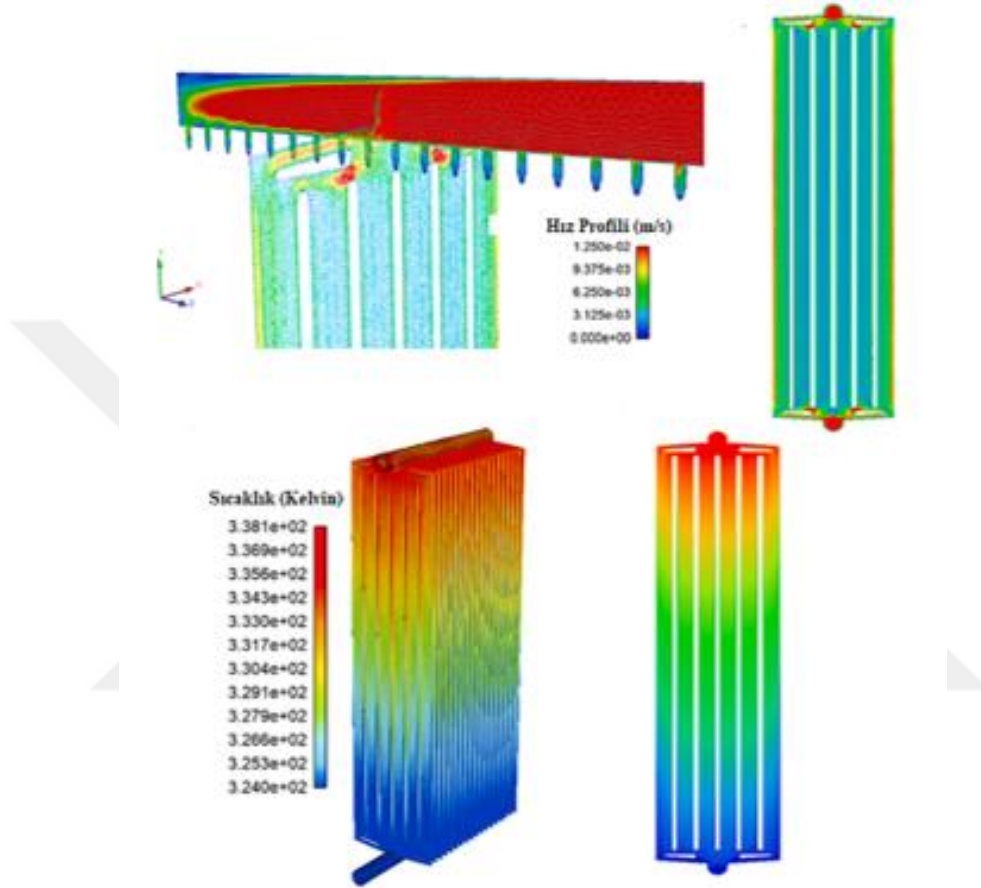
Şekil 2.7.Sıcaklık dağılımı (Kim ve diğ.,2012)



Şekil 2.8.Akım çizgilerinin çapraz gözlü stereo gramı (Córdoba ve diğ.,2019)

Yağlı tip transformatörleri, elektrik güç şebekelerinde çok önemli elemanlardır ve evrensel olarak kabul edilir. Yüksekten düşük voltaja dönüşümde yer alan elektrik enerjisinin bir kısmı, transformatörün sargıları ve çekirdeği içinde üretilen termal enerji olarak kaybolur. Isının etkili bir şekilde dağıtılması son derece önemlidir ve transformatör kazanına radyatörlerin stratejik olarak yerleştirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Koca ve ekibi tarafından yürütülen bu çalışma da, yağ, doğal hava ve doğal modda çalışan bir güç transformatörünü soğutmak için kullanılan bir radyatörün toplam soğutma kapasitesini incelemeyi amaçlamaktadır (Koca ve diğ.,2024). Araştırmayı, tasarım parametrelerini, özellikle radyatör başına panel sayısını ve radyatör uzunluğunu değiştirerek yürütülmüşlerdir. Çalışmada ayrıca deneysel bulgularla önemli bir yakınsama elde etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarını kullanmışlardır. Sıcaklık ve hız profili Şekil 2.9’da verilmiştir.

Belirli bir çalışma noktası için yürütülen doğrulama çalışması bağlamında, 0,15 kg/s kütle akış hızındaki simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçların yaklaşık %7,4'üne karşılık geldiği Koca ve ekibi tarafından bulunmuştur(Koca ve diğ.,2024). Ek olarak, elde edilen soğutma kapasitesi değeri %7,2 görülmüştür (Koca ve diğ.,2024).



Şekil 2.9. Hız ve Sıcaklık Profili (Koca ve diğ.,2024)

Bu çalışmada, literatürdeki araştırmalardan farklı olarak, yalnızca panel tipi değil, aynı zamanda boru tipi radyatörlerin de soğutma verimliliği incelenmiştir. Analitik hesaplar MATLAB 2023b ortamında, sayısal hesaplamalar ise ANSYS 2023 R1 ortamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu çalışmalar %90 seviyesinde geri dönüştürülme oranına sahip olduğu belirtilen biyobozunur ester yağı için de gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, belirlenen koşullar dikkate alınarak her iki yağın borulu ve panel tip radyatörlerdeki performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3. TRANSFORMATÖR ÇALIŞMA PRENSİBİ VE SOĞUTMA SİSTEMLERİ

Transformatörlerin çekirdek ve sargılarında kullanılan yalıtım malzemeleri (örneğin, kağıt, epoksi ve yağ), transformatörün güvenli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlamak için önemli bir role sahiptir. Ancak bu malzemeler, zamanla fiziksel ve kimyasal süreçlerin etkisiyle bozulmaya uğrar ve ömürlerini yavaşça tamamlar. Bu bozulma sürecini hızlandıran başlıca faktörlerden biri, transformatörün çalışma sırasında ortaya çıkan kayıplar nedeniyle oluşan sıcaklık artışıdır. Sıcaklık, yalıtım malzemelerinin kimyasal yapısını değiştirerek yaşlanma sürecini hızlandırır ve performanslarını olumsuz etkiler. Transformatörlerin ömrünü uzatmak ve yalıtım malzemelerinin dayanıklılığını artırmak için uygun bir soğutma sistemi seçimi kritik bir önem taşır. Bu seçim, transformatörün kayıpları, çalışma koşulları ve çevre faktörleri gibi değişkenlere göre yapılmalıdır. Düşük maliyetli ancak etkili bir soğutma sistemi, sıcaklık kontrolünü sağlayarak transformatörün güvenilirliğini artırır ve uzun vadeli maliyetleri düşürür.

Transformatörün termal tasarımında en önemli kriterlerden biri, sistemdeki en yüksek sıcaklığa sahip bölgenin doğru bir şekilde tespit edilmesidir. Bu sıcaklık, literatürde "hot spot sıcaklığı" olarak adlandırılır ve genellikle kayıpların en yoğun olduğu transformatör sargılarında meydana gelir. Hot spot sıcaklığı, yalıtım malzemelerinin yaşlanma hızını belirleyen en kritik faktörlerden biridir. Bu nedenle, tasarım sürecinde bu sıcaklığın dikkatle hesaplanması ve optimize edilmesi gereklidir.

Yalıtım kâğıdı, transformatörlerde yaygın olarak kullanılan ve selüloz bazlı uzun zincirlerden oluşan bir malzemedir. Bu uzun selüloz zincirleri, yüklü parçacıkların serbest hareketini sınırlayarak etkili bir yalıtım bariyeri oluşturur. Ancak, sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörler bu zincirlerin kırılmasına neden olabilir. Zincirlerin kısalması, kâğıdın yalıtkanlık özelliğini azaltarak elektriksel arızalara ve hatta transformatörün ömrünün sonlanmasına yol açabilir. Kullanımı Şekil 3.1’de aktif kısım üzerinde gösterilmiştir. Bu nedenle, yalıtım kâğıdının korunması ve ömrünün uzatılması için termal yönetim büyük önem taşır. Transformatörlerde kullanılan yalıtım malzemelerinin ömrü ve performansı, sıcaklık yönetimiyle doğrudan ilişkilidir. Uygun bir termal tasarım ve soğutma sistemi, yalnızca transformatörün güvenliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda uzun ömürlü ve maliyet etkin bir kullanım sağlar.



Şekil 3.1. Aktif kısım (GE Vernova Broşür)

Transformatör yağının temel işlevi, transformatörün güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla hem yalıtkan hem de soğutucu olarak hizmet etmektir. Transformatörler, genellikle yüksek gerilim seviyelerinde çalıştıklarından, elektrik akımının sargılar arasında kontrolsüz bir şekilde geçmesini engellemek için özel yalıtım malzemelerine ihtiyaç duyarlar. Bu bağlamda, transformatör yağı, sargılar ve diğer dahili bileşenler arasında bir yalıtım bariyeri oluşturur ve bu sayede kısa devrelerin ve diğer elektriksel arızaların önlenmesine yardımcı olur.

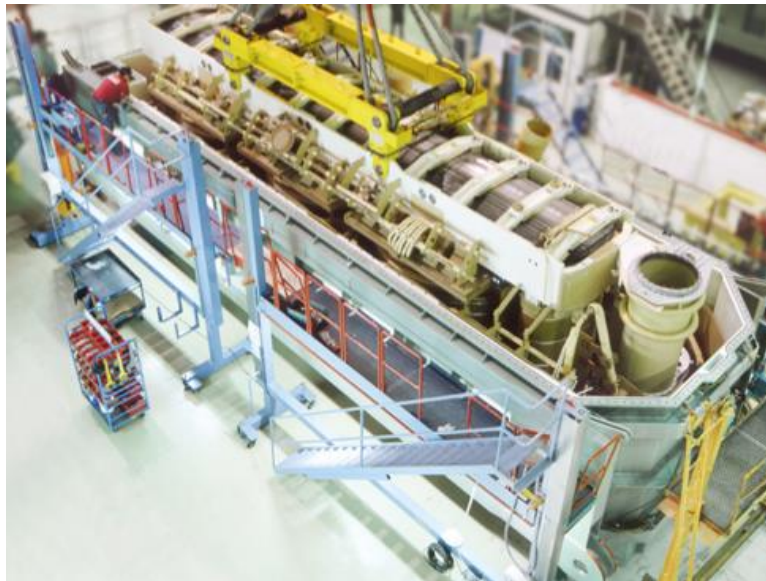
Bir transformatörün çalışması sırasında, elektrik enerjisinin bir kısmı elektrik direnci nedeniyle ısı enerjisine dönüşür. Bu durum, transformatör içerisinde sıcaklık artışına yol açar. Eğer bu ısının yeterince uzaklaştırılmadığı bir durum söz konusu olursa, aşırı ısınma meydana gelir ve bu da transformatörün performansını olumsuz etkileyebilir, hatta ciddi hasarlara neden olabilir. Transformatör yağı, ısıyı etkili bir şekilde dağıtarak transformatörün güvenli bir sıcaklık aralığında çalışmasını sağlar. Böylece hem transformatörün ömrü uzatılır hem de operasyonel güvenilirlik artırılır.

Transformatör yağı olmadan, yetersiz yalıtım veya yetersiz soğutma nedeniyle aşırı ısınma riski önemli ölçüde artar. Bu tür bir durum, kısa devrelerin oluşumunu tetikleyebilir ve ciddi güvenlik sorunlarına neden olabilir. Bu nedenle transformatör yağı, yalnızca yalıtkan bir malzeme olarak değil, aynı zamanda termal yönetim açısından da kritik bir öneme sahiptir. Bu ikili işlevi sayesinde transformatör yağları, transformatörlerin sürekli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için vazgeçilmez bir bileşen olarak değerlendirilir.

3.1. Transformatör Kayıpları

Transformatörler, tüm elektrik makinelerinde olduğu gibi, enerji dönüşüm süreçlerinde kaçınılmaz olarak kayıplara uğrarlar. Ancak transformatörlerin verimliliği, diğer birçok elektrik makinesine kıyasla oldukça yüksektir. Bunun temel nedeni, transformatörlerin döner parçalarının bulunmamasıdır. Bu yapı sayesinde mekanik kayıplar, yani sürtünme ve rüzgâr direnci gibi etkenlerden kaynaklanan enerji kayıpları, transformatörlerde görülmez. Bu özellik, transformatörlerin enerji dönüşümünde yüksek verimlilik sunmasının başlıca nedenlerinden biridir.

Transformatörlerin verimliliğini artırmak için demir ve bakır kayıplarını en aza indirmek büyük önem taşır. Demir kayıplarını azaltmak için yüksek kaliteli manyetik malzemeler ve ince, yalıtılmış saclardan oluşan çekirdek tasarımları kullanılır. Çekirdek, bobin, komütatör ve bağlantılar Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bakır kayıplarını en aza indirmek için ise düşük dirençli iletken malzemeler ve uygun sargı tasarımları tercih edilir. Transformatörlerde mekanik kayıpların olmaması, onları yüksek verimli enerji dönüştürme cihazları haline getirir. Ancak demir ve bakır kayıpları gibi elektriksel kayıpların dikkatli bir şekilde analiz edilmesi ve minimize edilmesi, transformatörlerin verimliliğini daha da artırmak için kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle boş çalışma ve kısa devre deneyleri, transformatör tasarımında ve performans analizinde temel bir rol oynar.



Şekil 3.2.Çekirdek, bobin, komütatör ve bağlantılar (GE VERNOVA Broşür)

3.2. Demir ve Bakır Kayıpları

Transformatörlerde boş çalışmada oluşan kayıplara, demir kayıpları adı verilir. Çok küçük olan boştaki akımın oluşturduğu bakır kayıpları dikkate alınmazsa, boş çalışmada yalnız demir kayıpları söz konusu olur. Demir kayıplarına nüve veya çekirdek kayıpları da denir. Demir kayıpları Histerezis ve Fuko kayıpları olarak ikiye ayrılır. Histerisiz kaybı nüve moleküllerinin frekansa bağlı olarak yön değiştirmesi sırasında birbirleri ile sürtünmeleri sonucu ısı şeklinde ortaya çıkar. Fuko kaybı ise nüve üzerinde indüklenen akımların neden olduğu kayıplar olup gene nüvenin ısınması şeklinde görülür. Her iki kayıp frekans ve akı yoğunluğuna bağlı olarak değişir.

Bakır kayıpları; transformatörün ikinci devresine bir yük bağlandığı zaman hem primer hem de sekonder sargıdan bir akım geçer. Bu akımlar sargıların dirençlerinden dolayı ($I^2 * R$) şeklinde bir ısı kaybı oluştururlar. Bu kayıplara bakır kaybı da denir. Bakır kayıpları ısı şeklinde görülür ve yüke göre değişen kayıplardır. Herhangi bir yükteki bakır kayıplarını, anma yükündeki bakır kayıplarından faydalanılarak bulunabilir.

3.3. Soğutma Türleri ve Ekipmanları

Transformatör soğutma sistemleri, optimum çalışma sıcaklığını korumak ve güvenilirlik ve dayanıklılığı sağlamak için önemlidir. Transformatörün boyutuna, uygulamasına ve çevresel koşullarına bağlı olarak çeşitli soğutma yöntemleri kullanılır.

Yağa daldırılmış transformatörler için önemli soğutma tiplerinden biri ONAN, ONAF ve OFAF 'tır. ONAN tipi transformatörler, açık deniz rüzgâr enerjisi santralleri için tercih edilen çözümdür. ONAN soğutma sistemleri, zorlanmış taşınımlı soğutma sistemlerinden daha az karmaşıktır. Bu basitlik, bakımın zor ve pahalı olabileceği açık deniz uygulamaları için çok önemli olan artan güvenilirliğe ve azaltılmış bakıma katkıda bulunur.

Fanlar veya pompalar gibi mekanik bileşenlerin arızalanması, rutin bakım gerektiren elemanların sayısını azaltır. ONAN transformatörleri, ıyıyı dağıtmak için doğal konveksiyondan yararlanır.

3.4. Doğal Taşınım ile Soğutma

Orta ve büyük güçlü transformatörler, özellikle yüksek gerilim için yapılanların hemen hemen hepsi birer yağ kazanı içine yerleştirilirler. Transformatör yağının kendisi çok iyi bir yalıtkandır. Yağ transformatörde kullanılan pamuklu iplik, kâğıt vb. gibi bu yağı emen yalıtkan malzemenin yalıtkanlıklarını daha da artırır. Kullanılan yağlar çok temiz ve madeni yağlar olup içinde asit, kükürt, bazlar ve su zerrecikleri bulunmamalıdır. Transformatörlerde kullanılan yağ soğutma görevini de yapar. Transformatör içinde kayıpların oluşturduğu ısı, ısınan yüzeylerden kolaylıkla yağa geçer. Böylece sargılar ve nüvenin yakınındaki yağın sıcaklığı artar. Isınan yağ genişler, yoğunluğu azaldığı için hafifler ve yukarıya doğru çıkmaya başlar. Yağ kazanın dış duvarlarına veya varsa radyatörün iç yüzeyine temas edince soğur, yoğunluğu artar ve aşağıya doğru iner. Şekil 3.3 ‘de doğal taşınım ile soğuma sağlayan trafo gösterilmiştir. Bu şekilde doğal yağ dolaşımı veya sirkülasyonu sağlanır. Soğumanın artırılabilmesi için yağın temas ettiği yüzeyinin büyütülmesi gerekir. Bu çalışmada radyatördeki yüzey alanı ve radyatör geometrisinin soğumaya etkisini görebiliriz.



Şekil 3.3.Güç Transformatörü (GE Vernova Broşür)

3.5. Zorlanmış Taşınım ile Soğutma

Zorlanmış soğutma fan ve pompa yardımı ile yapılmak üzere 2'ye ayrılır. Hava, fan kullanılarak transformatör yağ kazanı ve radyatör cidarlarına üflenir. Radyatörler transformatör kazanına doğrudan takılabildikleri gibi ayrı bir grup olarak da yerleştirilebilir. Bu tür soğutma da transformatör anma gücünün altında bir güçle çalıştığında doğal olarak soğuyabiliyorsa fan çalışmaz. Bu sınır anma gücünün yaklaşık %60'ıdır. Yani transformatör anma gücünün %60'ına kadar doğal olarak soğumaktadır. Anma gücünün %60 ila %100 arasında fan devreye girer.

Diğer yöntem ise radyatörler ile kazan arasına pompa konularak yağ dolaşım hızını arttırmaktır. Transformatör kazanının üst kısmından emilen sıcak yağ fanlar ile soğutulan radyatörlerden geçirilir. Şekil 3.4 de zorlanmış taşınımaya örnektir. Soğuyan yağ dolaşım yolunda bulunan pompa ile kazanın alt kısmına yeniden basılır.



Şekil 3.4.Zorlanmış soğutma sistemi (GE Vernova Broşür)

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

4.1. Radyatör Kullanımı

Radyatör, soğutma sağlamak için iki ortam arasında termal enerjinin transferini kolaylaştıran transformatörlerin önemli bir bileşenidir. Radyatörler, Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi, transformatörün hem üst hem de alt taraflarında bulunan boru hattı aracılığıyla transformatöre bağlanır. Transformatörün radyatörü, transformatörün soğutma derecesini artırmada çok önemlidir. Boru ve panel tipi radyatörler, belirgin avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. İki seçenek arasındaki seçim, alan mevcudiyeti, ortam koşulları, bakım yetenekleri ve transformatörün soğutma ihtiyaçlarına göre belirlenir.

Ester yağı, mineral yağa kıyasla çevre ve yangın güvenliği açısından önemli avantajlar sağlar. Bu özellikler yangın güvenliği ve çevre korumanın son derece önemli olduğu alanlarda elektrikli ekipmanlarda giderek artan kullanımlarına katkıda bulunur. Sektör bu avantajların giderek daha fazla farkına vardıkça, transformatörlerde ester kullanımının daha da genişlemesi beklenmektedir.



a)



b)

Şekil 4.1.(a) ONAF tipinde güç transformatörü, (b) termal kamera ile alınmış ısınma testi sonucu sıcaklık değerleri (Koca ve diğ.,2024)

Transformatörlerde kullanılan yağ, termal yönetimin sağlanmasında kritik bir role sahiptir. Transformatör yağı, doğal konveksiyonla transformatör boyunca hareket ederek, iç kısımlarda üretilen ısıyı dış yüzeylere taşınmasını sağlar. Bu ısı daha sonra radyatör yüzeyleri aracılığıyla çevredeki atmosfere yayılır. Yağın bu şekilde dolaşımı, transformatörün normal çalışma koşulları sırasında üretilen termal enerjiyi etkili bir şekilde kontrol eder. Bu süreç, hem transformatörün güvenli bir sıcaklık aralığında çalışmasını hem de bileşenlerin ömrünün uzatılmasını mümkün kılar.

Transformatör yağının sıcaklığı, esas olarak sarım ve çekirdek kayıplarından kaynaklanan enerji dönüşümü sonucu artar. Bu sıcaklık artışının kontrolü, yalnızca transformatörün verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda yalıtım malzemelerinin yaşlanmasını yavaşlatarak cihazın genel ömrünü de uzatır. Üst yağ sıcaklık artışı, genellikle "üst yağ yükselmesi" olarak adlandırılır ve bu parametre, transformatörlerin termal performansını analiz ederken dikkate alınması gereken önemli bir göstergedir. Üst yağ sıcaklığının hesaplanması ve kontrolü, literatürde detaylı bir şekilde ele alınmıştır (Koca ve diğ.2024)

Termal yönetimde özellikle dikkat çeken bir diğer husus, transformatör radyatörlerinde yağ sıcaklığının dikey yönde nasıl dağıldığıdır. ONAN soğutma modunda çalışan transformatörlerde, bu sıcaklık dağılımı, sistemin genel soğutma etkinliğini belirleyen önemli bir faktördür. Radyatörün dikey ekseninde meydana gelen sıcaklık farkı, yağın doğal akış hızını ve radyatör panelleri aracılığıyla yapılan ısı transferini doğrudan etkiler. Yağın bu şekilde dolaşımı, hem transformatörün iç ısını dışarıya aktarır hem de soğutma sisteminin etkinliğini artırır. Radyatörlerde yağdan havaya ısı transferini etkileyen faktörler arasında hava sıcaklığı, ortalama hava akış hızı, yağ akış hızı ve radyatör giriş-çıkış sıcaklıkları gibi parametreler yer alır. Bu parametreler, yağın radyatör borularında ve panellerde dolaşımı sırasında ortaya çıkan momentum ve enerji dengesini belirler. Metal radyatör panelleri, yağdan havaya ısı transferinde temel bir rol oynar ve bu süreç, transformatörlerin güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlayan önemli bir unsurdur [(Rodriguez ve diğ., 2017). Transformatör yağının termal yönetimdeki rolü, yalnızca sistemin sıcaklığını kontrol etmekle sınırlı kalmaz. Aynı zamanda, transformatörlerin enerji verimliliğini artırır, bileşenlerin ömrünü uzatır ve potansiyel arıza risklerini en aza indirir.

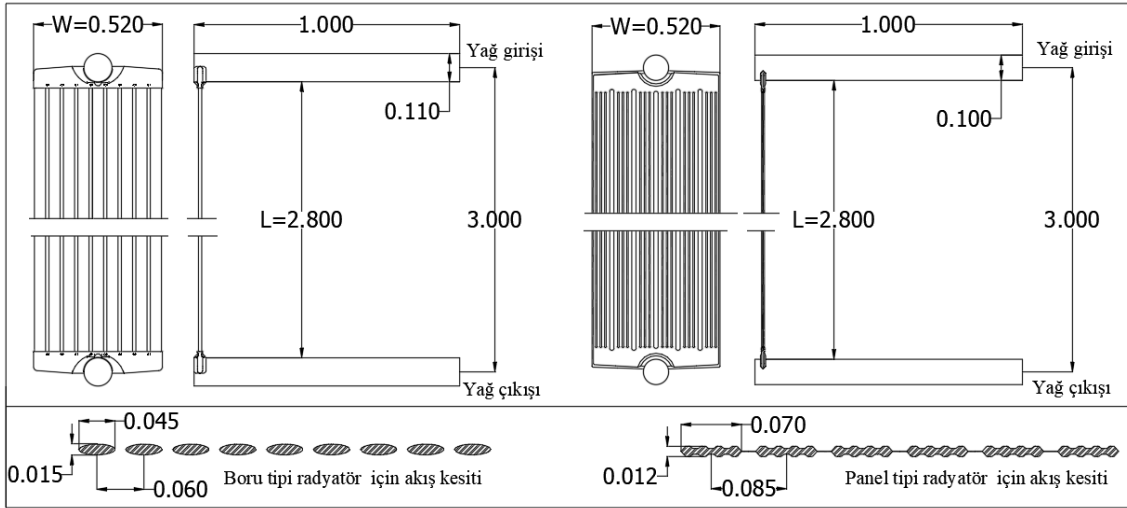
Bu nedenle, transformatör tasarımı sırasında yağ dolaşımı, radyatör geometrisi ve çevresel faktörlerin etkilerinin dikkatle değerlendirilmesi büyük önem taşır.

4.2. Radyatör Geometrisi

Koca ve diğerleri, panel tipi radyatörün tam bir modelini kullanmıştır (Koca ve diğ.2024). Radyatörün ısı dağılımının tüm panellerinde lineer olduğunu bildirdiler. Bu projede, modelin boyutunu basitleştirmek ve küçültmek için tüm radyatör yerine tek bir dilim kullanılmıştır. Bu tez, Koca ve ekibinin yürütmüş olduğu çalışmanın devamıdır (Koca ve diğ.,2024). Bu strateji, verimliliği artırır ve hesaplamalı simülasyonları yürütmek için kaynak gereksinimlerini azaltır. Bu radyatörlerin bağlı olduğu kolektörler, transformatör tankına borular vasıtasıyla sabitlenmiştir. Soğuma prosesi incelendiğinde yağ, plakalarda aşağı doğru ilerledikçe sahip olduğu ısıyı plaka yüzeyi vasıtasıyla havaya vererek sıcaklığını düşürecektir

Tablo 4.1. Geometrik ölçü ve parametreler

Geometrik parametreler	Parametre değerleri
Panel tip radyatörün bir akış kanalının ısılatılmış çevresi	: $p_p = 0.158 \text{ m}$
Boru tip radyatörün bir akış kanalının ısılatılmış çevresi	: $p_b = 0.094 \text{ m}$
Panel tipi radyatörün kanalları arasındaki en yakın mesafe	: $s_p = 0.038 \text{ m}$
Boru tipi radyatörün kanalları arasındaki en yakın mesafe	: $s_b = 0.044 \text{ m}$
Radyatör yüzey kalınlığı, panel tipi	: $t_p = 0.001 \text{ m}$
Radyatör yüzey kalınlığı, boru tipi	: $t_b = 0.001 \text{ mm}$
Panel tipi radyatörün bir akış kanalının kesit alanı	: $A_{cp} = 0.0014 \text{ m}^2$
Panel uzunluğu	: $L = 2.800 \text{ m}$
Boru tipi radyatörün bir akış kanalının kesit alanı	: $A_{cb} = 0.00058 \text{ m}^2$
Düzeltilme faktörü	: $F=1$
Bir panel için hacimsel debi (mineral yağ için)	: $\dot{V}_m = 0,00794 \text{ [m}^3/\text{s]}$
Bir panel için hacimsel debi (ester yağ için)	: $\dot{V}_e = 0,00871 \text{ [m}^3/\text{s]}$
Yağın hacimsel termal genleşme katsayısı	: $\beta_y = 0.0079 \frac{1}{K}$
Yer çekimi ivmesi	: $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$
Yağ giriş sıcaklığı	: $T_g = 338 \text{ K}$
Ortam sıcaklığı	: $T_o = 295 \text{ K}$
Yağ geçiş kanalı sayısı (panel tipi)	: $N_{kp} = 6$
Yağ geçiş kanalı sayısı (boru tipi)	: $N_{kb} = 9$



Şekil 4.2. Radyatör geometrisi

4.3. Malzeme

Transformatör yağı, yağa daldırılmış transformatörlerde soğutma ve yalıtım ortamı amacıyla kullanılır. Genellikle üç tip transformatör yağı kullanılır; mineral yağ, ester yağı ve silikon bazlı yağ.

Transformatör yağının çevre üzerindeki kirlетici etkilerine ilişkin endişeler her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda araştırmacılar son yıllarda mineral yağın yerini alacak alternatif akışkana odaklanmaktadır. (Fernández ve diğ.,2012), güç transformatörleri için alternatif akışkanların temel özelliklerini karşılaştırmıştır. Mineral yağlar, çevre dostu olmasalar ve yüksek yangın riski taşırsalar da yağa daldırılmış transformatörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yalıtım akışkanlarını dört gruba ayırmışlardır; mineral yağlar, yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlar (HMWH), silikonlar ve ester bazlı akışkanlar. Viskozite, transformatör soğutma sistemleri için en önemli parametre olarak bilinmektedir. Fernández ve ekibi (Fernández ve diğ.,2012) tarafından sunulan tüm alternatif akışkanlar, mineral yağlardan daha viskozdur. Bu, soğutma sistemlerinin özelliklerini belirlemek için kritik noktadır. Ek olarak, nem, alternatif akışkanlar tarafından mineral yağdan daha fazla emilir. Geleneksel transformatör yağları kullanılırken nem molekülleri, sargı yalıtım malzemelerine kolayca bağlanır. Ek olarak, bitkisel bazlı transformatör yağları, yalıtım malzemesinin içinde bulunan nem moleküllerini emme eğilimindedir.

Yalıtım malzemesindeki nem azalır ve yalıtım malzemesinin yaşlanmaya karşı dayanıklılığını güçlendirir. Bu nedenle, bitkisel bazlı transformatör yağlarının kullanılması, transformatörlerin daha yüksek aşırı yükleme kapasitesine sahip olmasını sağlar.

Rozga ve ekibi güç transformatörleri için yeni çevre dostu transformatör yağlarının özellikleri üzerine bir çalışma sunmuştur(Rozga ve diğ., 2013). Doğal ester ve mineral yağın temel özellikleri Tablo 4.2’de gösterildiği gibi özetlenmiştir. Doğal ester mineral yağdan daha viskoz olduğu açıkça gösterilmiştir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda esterinin viskozitesi mineral yağdan 3 kat daha yüksektir. Transformatör yağlarının yangına dayanıklılığı güvenlik düzenlemelerinde önemli bir role sahiptir.

Doğal esterler, aşağıdaki tabloda gösterildiği gibi çok yüksek yangın ve parlama noktalarına sahiptir. Ayrıca, doğal esterlerin çevresel etkisi %97’lik biyolojik olarak parçalanabilir değerle dikkat çekerken, mineral yağ’ın ise %10 görülmüştür(Rozga,ve diğ., 2013). Çevresel endişeler nedeniyle, transformatör üretiminde gelecekteki eğilim, biyolojik olarak parçalanabilir ve yangına dayanıklı transformatör yağları üzerindeki araştırmaları artırmaktır. Şu anda, doğal ester bazlı transformatör yağları sektörün sahip olduğu en iyi seçenek gibi görünmektedir.

Tablo 4.2.Malzeme özellikleri

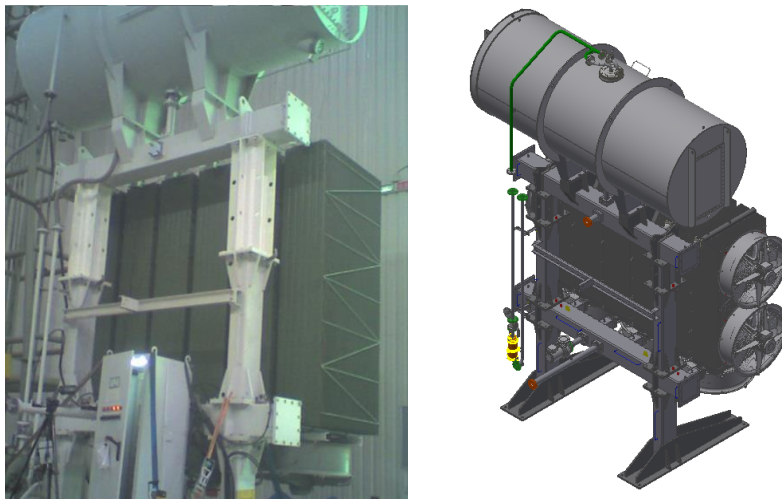
Termo-fiziksel özellikler	Mineral yağ	Ester (Biyobozunur) Yağ	Hava	Metal (S235J0-R)
Yoğunluk, ρ [kg/m ³]	858	941	1.092523	8030
Özgül ısı, C_p [J/(kg. K)]	1990	1990	1006.43	502.48
Dinamik viskozite, μ [Pa. s]	0.00463	0.0123	0.000189	-
Termal iletkenlik katsayısı, k [W/(m. K)]	0.127	0.141	0.0242	16.27

Bu çalışmada, mineral yağ ve doğal ester yağı ile doldurulmuş bir transformatör radyatörünün akışı ve ısı transferi incelenmiştir. Simülasyonlarda kullanılan en yaygın transformatör yağı tiplerinin yoğunluk, özgül ısı, ısıl iletkenlik ve viskozite özellikleri bu bölümde sunulmuştur. Ayrıca, malzeme özelliklerini tanımlarken Fluent'te kullanmak üzere yağ tiplerinin her özelliği için sıcaklığa bağlı olarak değerleri girilmiştir.

4.4. Deneysel Yöntem

Deney tesisatında her radyatörün alt kolektöründe, o radyatörün yağ devresini kapatan bir valf bulunmaktadır. Bu valfler, radyatörlerin aralarındaki yakınlık etkisinin araştırılması istenmiyorsa sadece bir radyatörden yağ akışı ile testlerin yapılmasını sağlamaktadır. Yağ sıcaklığı, üst ve alt kolektörlerin merkezi ve radyatör ile yağ deposunun ortasına yerleştirilmiş k-tipi sıcaklık sensörleri ile ölçülür. Yağ akış hızı, alt kolektörde yağ soğuduktan sonra ölçülür. Anemometre kullanılarak radyatör panelleri arasındaki hava hızı ve sıcaklığı ölçülmüştür. Ölçümler iki panel arasındaki boşluğun ortasından alınır.

Deney tesisatı ölçüm hassasiyetini değiştirebilecek hava akımlarını önlemek için koruma duvarları ile çevrilmiştir. Ayrıca, ısı kayıplarını en aza indirmek için yağ tankı tamamen ısı yalıtımı ile kaplanmıştır. Deney tesisatının şematik görseli Şekil 4.3'de verilmiştir.

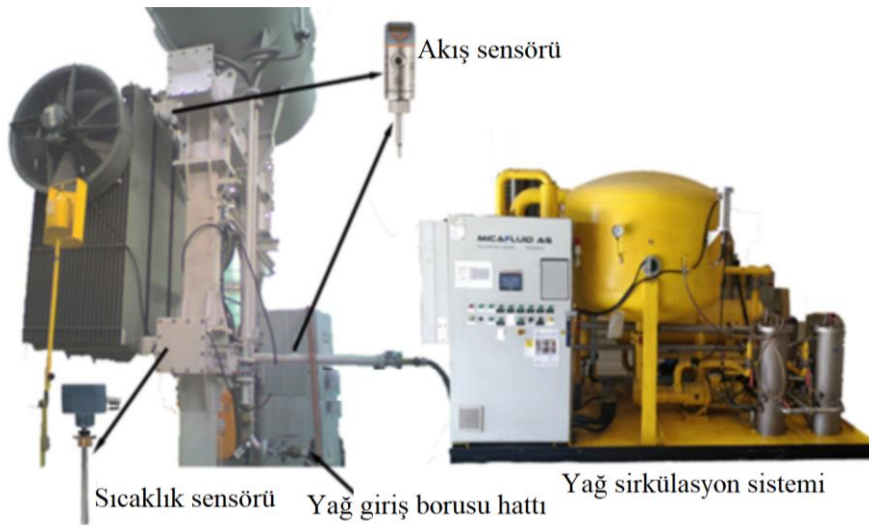


Şekil 4.3 Test düzeneği (Koca ve diğ.,2024)

4.4.1. Test Düzeneği Tasarımı

Projenin başlangıcından bu yana sayısal olarak incelenen çeşitli parametrelerin (dilim sayısı, radyatör boyu vb.) ve optimizasyon çalışmalarının deneysel olarak doğrulanıp çalışmayı bir üst seviyeye taşımak adına parametre kontrollü bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Tasarımı şekillendiren en önemli giriş parametresi transformatör içinde zorlanmamış akışın (ONAN) simüle edilmesidir. Ayrıca proje kapsamında incelenmek istenen ONAF soğutma düzeneğinin test edilmesine imkan tanınmıştır. Bu doğrultuda şirketin Koca ve takımı ile yürüttüğü akademik çalışmalar referans alınarak, 6 radyatörün aynı anda testine imkan tanıyan bir test düzeninin radyatör performansını ölçmek için yeterli olduğu saptanmıştır (Koca ve diğ.,2024). Test düzeneği Şekil 4.4’de gösterilmiştir.Yapılan çalışmalarda, debinin soğutma performansı üzerine önemli etkisinin olduğu görülmüştür. Bu nedenle, tasarlanan sistemde yağ debisi her radyatörün girişine ve depo dönüş hattına yerleştirelen 7 adet akış sensörüyle takip edilmektedir. Yağ sirkülasyonu, yine debisi kontrol edilebilen sistem ile takip edilmiş ve ölçülebilen en küçük ve en büyük debi değeri alınmıştır.

Sınır şartlarındaki ikinci önemli parametre yağ giriş sıcaklığıdır. Yine kullanılan akış sensörlerinin sıcaklık ölçebilme özelliğinden yararlanılmıştır. Radyatör çıkış yağ sıcaklığı ölçülerek ve giriş çıkış sıcaklık farkı üzerinden radyatörün ısıl performansı saptanmış ve sayısal hesaplamalarla kıyaslanmıştır.



Şekil 4.4.Sensörler ve yağ sirkülasyon sistemi (Koca ve diğ.,2024)

4.4.2. Sensör Seçimi

Transformatör endüstrisinde kullanılan radyatörlerde standart olarak DN80 boru çapı kullanılmaktadır. Analizin sonucunda elde edilen debi değeri incelendiğinde aslında çok düşük bir değer olduğu görülmüş ve piyasada transformatör radyatöründen ölçüm alabilecek konfigürasyonda sektörde öncü firmalardan IFM'e ait SA5000 modeli en donanımlı ve hassas sensör olarak seçilmiştir. Burada en önemli seçim kriteri 0.04 m/s..3m/s hız ölçüm aralığı ve aynı zamanda sıcaklık parametresini de ölçmeye imkan sağlaması etkili olmuştur. Sıcaklık ölçümü için PT100 montajında gerekli termometre cepleri, akış sensörünün zaten kısıtlı olan alanını etkileyeceği ve laminar akış çizgilerini bozacağı için sıcaklık ölçebilme özelliği tercih edilmiştir. SA5000'in bize sağladığı bu avantajla birlikte ölçüm alabildiğimiz en düşük değer 0.04m/s'ye karşılık gelen kütleli debi 8.6×10^{-4} kg/s'dir. Tersine mühendislikle hesaplanan ONAN debi değerinde ölçüm alabileceğimiz bir sensör olarak seçim doğrulanmıştır.

4.4.3. Yağ Sirkülasyon Sistemi

Sıcaklık ve debi kontrolü imkânı sağlayan bu cihazlar, kendi depoları olması nedeniyle ısı kütlesi miktarına pozitif yönde katkı sağlayacaklardır. Transformatör yağı için özel olarak tasarlanan bu sistemler sınır değerlerini kontrol etmemize olanak sağlayacaktır.

4.4.4. Kontrol Dolabı

Şekil 4.4 'de verilen kontrol dolabına ait şemada görüleceği üzere, her bir sensör ve PT100 ayrı ayrı görüntülenebilecek; fanlarda yine bağımsız olarak kontrol edilebilecektir. Kumanda dolabı test düzeninden ayrı olarak 3 m ileriye yerleştirilebilir. Bu sayede test alanına yaklaşımdan parametre izlemesi yapılabilecektir.

4.5. Analitik Yöntem

Bilimsel çalışmalarda, sayısal simülasyonların ve analitik çalışmaların doğruluğundan emin olunması için, sonuçların çözüm açısından bağımsız hale getirilmesi ve sonuçların referans bir deneysel çalışmayla doğrulanması gerekmektedir. Doğrulama çalışmaları ONAN (Yağ doğal hava doğal) tipinde panel tipi ve boru tipi radyatör modülünün tek bir dilimi için yürütülmüştür. Kullanılan referans deneysel çalışma şirket bünyesinde

daha önce yapılan bir çalışma olup yeni araştırmalar için tekrar kullanılmıştır. Deney tesisatı önceki bölümde açıklanmıştır.

Akışkanlar mekaniğinde Reynolds sayısı (4.1), bir akışkanın, atalet kuvvetlerinin viskozite kuvvetlerine olan oranıdır ve sonuç olarak bu değer bu iki tip kuvvetin belli bir akış şartı altında birbirine olan göreceli önemini verir. Bundan dolayı, Reynolds sayısı, düzgün akış ve türbülanslı akış gibi değişik akış rejimlerini nitelemek için kullanılır. Laminer akış bir akım özelliğidir. Düzgün akım olarak tanımlanır. Reynolds sayısı ile belirlenir. Düşük Reynolds sayıları için sınır tabaka laminerdir.

$$Re_y = (\rho_y \times U_y \times D_h) / \mu_y \quad (4.1)$$

$$D_h = (4 \times A_c) / p \quad (4.2)$$

$$h_m = k_m / t \quad (4.3)$$

$$A_s = N_k \times p \times L \quad (4.4)$$

$$U_y = \dot{V}_y / (\rho_y \times A_c) \quad (4.5)$$

D_h , hidrolik çap (4.2) hesaplanır. Giriş kesit alanına göre belirlenir. A_c , boru veya kanalın akışa dik kesitini ve p ise akışın ıslattığı çevreyi göstermektedir. Metaldeki ısı transferi iletim yoluyla gerçekleştiğinden, buna karşılık gelen katsayı h_m ; Metal ısı transfer katsayısıdır (4.3), k_m ; Metalin ısıl iletkenliği, t ; Radyatör yüzey kalınlığını ifade etmektedir. Gerekli değerler Tablo 4.1.'de her tip için ayrı ayrı verilmiştir. U_y , ise yağın akış hızını (4.5) ifade etmektedir. Burada L radyatör yüksekliğidir.

Denklem (4.5) ile verilen basınç farkından kaynaklanan yağ akış hızı, yağ devresinin hidrolik direncine ters orantılıdır. Sistemdeki basınç kaybı, esas olarak bir radyatör panelinin kanalları içindeki akış direnci tarafından verilir. Bu çalışmada, tam gelişmiş paralel bir yağ akışı varsayılır Fay'ın çalışmasından da faydalanılmıştır (Fay,1994). Bu, akış deseninin kanal boyunca tüm bölümler için aynı olduğu ve sadece eksenel bir bileşeni vardır (Poiseuille akışı).

Dilim başına N_{kanal} kanalına sahip bir radyatör için, toplam yüzey alanı $A_g = N_k * p * L$ olarak hesaplanır. Hesaplama çevre p için yapılabilir. Son olarak, (4.1) ve (4.3) denklemleri birleştirildiğinde, 4.6 numaralı ısı transfer denklemi yağ için elde edilir. denklem elde edilir. Yağ kanalındaki ısı transfer katsayısı, (Fay,1994) 'da önerilen konvektif model ve laminar akış dikkate alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$h_y = (Nu_y \times k_y) / D_h \quad (4.6)$$

$$Pr_y = (\mu_y \times Cp_y) / k_y \quad (4.7)$$

$$Gr_y = (g \times \beta_y \times (T_g - T_c) \times D_h^3) / \left(\frac{\mu_y}{\rho_y} \right)^2 \quad (4.8)$$

$$Nu_y = 0.85 \times \left(0.74 \times (Re_y)^{0.2} \times (Pr_y \times Gr_y)^{0.1} \right) \times (Pr_y)^{0.2} \quad (4.9)$$

$T_g - T_c$ Yağdan soğutucu duvara doğru yüzey sıcaklığı düşüşü, k_y yağın ısıl iletkenliği, Pr_y , Gr_y , Re_y ve Nu_y kanaldaki petrol akışına ait Prandtl (4.7), Grashof(4.8), Reynolds(4.1) ve Nusselt (4.9) sayılarıdır.

$$h_h = \frac{Nu_h \times k_h}{s} \quad (4.10)$$

$$Pr_h = \frac{\mu_h \times Cp_h}{k_h} \quad (4.11)$$

$$Gr_h = \frac{g \times \beta_h \times \Delta T_{LMDT} \times (L)^3}{\left(\frac{\mu_h}{\rho_h} \right)^2} \quad (4.12)$$

$$Ra_h = Gr_h \times Pr_h \quad (4.13)$$

$$Ra_p = \left(\frac{g \times \beta_h \times \Delta T_{LMDT} \times (s)^3}{\left(\frac{\mu_h}{\rho_h} \right)^2} \right) \times Pr_h \quad (4.14)$$

$$Nu_h = \left(\left(\frac{576}{\left(\frac{Ra_p \times s}{L} \right)^2} \right) + \left(\frac{2.873}{\left(\frac{Ra_p \times s}{L} \right)^{0.5}} \right) \right)^{-0.5} \quad (4.15)$$

Burada Pr_h , Gr_h , Ra_h ve Nu_h sırasıyla hava için Prandtl (4.11), Grashof (4.12), Rayleigh (4.13 - 4.14) ve Nusselt (4.15) sayılarıdır. ΔT_{LMDT} Yağın ve havanın ortalama sıcaklıklarıdır (4.16), k_h havanın termal iletkenliğidir ve Cp_h havanın sabit basınç özgül ısıdır. Son olarak, paneldeki enerji dengesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\Delta T_{LMDT} = F \times ((\Delta T_A - \Delta T_B) / \ln \left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B} \right)) \quad (4.16)$$

$$\Delta T_A = (T_g - T_o) \quad (4.17)$$

$$\Delta T_B = (T_f - T_o) \quad (4.18)$$

$$R_{ky} = 1 / (h_y \times A_g) \quad (4.19)$$

$$R_{kh} = 1 / (h_h \times A_g) \quad (4.20)$$

$$R_t = R_{ky} + R_{kh} \quad (4.21)$$

$\Delta T_A = T_g - T_o$ Radyatör girişindeki yağ-ortam hava sıcaklığı farkı (4.17), T_o radyatörden yeteri kadar uzaktaki hava sıcaklığı ve ΔT_{LMDT} radyatördeki yağ ile hava arasındaki logaritmik ortalama sıcaklık farkıdır. Denklem 4.18 ise Radyatör çıkışındaki yağ-ortam hava sıcaklığı farkını hesaplamaktadır. Yağ tarafında ki toplam ısı transferi denklem 4.19 ile, hava tarafındaki toplam ısı transferi ise denklem 4.20 hesaplanır.

Herhangi bir anda akışın tutarlı hızı nedeniyle sabit durum kabul edilmiştir. Yüksek viskoziteye sahip transformatör yağının akışı, radyatör giriş hızına göre laminar olarak sınıflandırılır. Radyatördeki yağ ve hava arasındaki sıcaklık farkının hesaplanması için logaritmik ortalama sıcaklık farkı (ΔT_{LMTD}) yaklaşımı kullanılır. Giriş ve çıkış yağ sıcaklıkları, genel ısı transfer alanı ve genel ısı transfer katsayısı, LMTD tekniği kullanılarak toplam ısı transfer oranı(4.21) ile birbirine bağlanır. Ortam sıcaklığı, transformatör ısı çalışması testlerinden türetilmiştir.

4.6. Sayısal Yöntem

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), mühendislik ve bilim alanlarında geniş bir kullanım alanına sahip olan, akışkanların hareketini ve ısı transferini incelemek için kullanılan sayısal bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, akışkan davranışlarını tanımlayan kısmi diferansiyel denklemleri sayısal teknikler kullanarak çözümler. HAD, özellikle Navier-Stokes denklemleri gibi lineer ve lineer olmayan diferansiyel denklemler içeren problemlerin çözülmesini sağlar. Bu denklemler, akışkanların hareketini tanımlarken kütle korunumu (devamlılık denklemi), momentum korunumu (Newton'un ikinci yasası) ve enerji korunumu (termodinamik prensipler) gibi temel fiziksel kanunlara dayanır.

Akışkanlar mekaniğinde önemli bir yeri olan doğal ısı taşınımı (doğal konveksiyon), sıcaklık değişimine bağlı olarak akışkanın yoğunluğunda meydana gelen farklar nedeniyle oluşan hareketi ifade eder. Bu süreçte, sıcaklığı artan akışkan yükselirken, soğuyan akışkan aşağıya doğru hareket eder ve böylece akışkan içinde sürekli bir döngü oluşur. Bu hareket, yerçekimi kuvvetinin etkisiyle meydana gelir ve ek bir dış kuvvet uygulanmadan gerçekleşir. Yoğunluk değişiminin göreceli olarak küçük olmasına rağmen, momentum denklemlerindeki dış kuvvetlerin oluşumunda kritik bir rol oynar.

Bu çalışmada, doğal konveksiyon akışlarını modellemek için malzemenin yoğunluğu, özgül ısısı, ısı iletim katsayısı ve viskozitesi gibi termodinamik özellikler piecewise-lineer yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Piecewise-lineer yöntemi, fiziksel özellikleri belirli sıcaklık aralıklarında doğrusal olarak ifade eden ve tablo halinde giriş yapılmasına olanak tanıyan bir yaklaşımdır. Bu sayede, değişen sıcaklık koşullarında

Şekil 4.5. Sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi

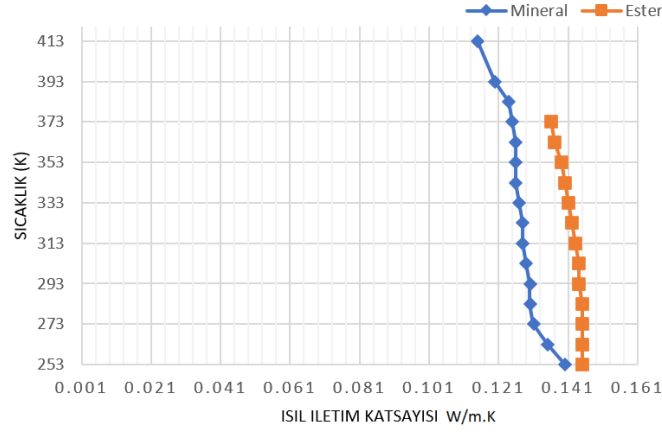
The graph plots Sıcaklık (K) on the y-axis (ranging from 253 to 413) against Özgü Isı J/kg.K on the x-axis (ranging from 1700 to 2300). Two data series are shown: Mineral (blue line with diamond markers) and Ester (orange line with square markers). The Mineral curve is a straight line. The Ester curve follows the Mineral curve until approximately 1900 J/kg.K, where it deviates upwards, indicating a phase transition (melting) at that specific heat capacity value.

Özgü Isı J/kg.K	Mineral Sıcaklık (K)	Ester Sıcaklık (K)
1750	260	-
1800	270	250
1820	280	260
1850	290	270
1880	300	280
1900	310	290
1920	315	300
1950	320	310
1980	325	320
2000	330	330
2020	335	340
2050	340	350
2080	345	360
2100	350	370
2150	360	-
2200	370	-
2250	380	-

The graph illustrates the relationship between temperature and dynamic viscosity for two types of lubricants: Mineral and Ester. The y-axis represents temperature in Kelvin (Sıcaklık (K)), ranging from 253 to 413. The x-axis represents dynamic viscosity in Pa.s (Dinamik Viskozite Pa.s), ranging from 0.0001 to 1.4001. The Mineral lubricant is shown with blue diamonds, and the Ester lubricant is shown with orange squares. Both lubricants exhibit a significant decrease in viscosity as temperature increases, with the Ester lubricant generally maintaining a higher viscosity at lower temperatures compared to the Mineral lubricant.

Sıcaklık (K)	Dinamik Viskozite Pa.s (Mineral)	Dinamik Viskozite Pa.s (Ester)
385	0.0001	0.0001
373	0.0001	0.0001
361	0.0001	0.0001
349	0.0001	0.0001
337	0.0001	0.0001
325	0.0001	0.0001
313	0.0001	0.0001
301	0.0001	0.0001
289	0.0001	0.0001
277	0.0001	0.0001
265	0.0001	0.0001
253	0.0001	0.0001
385	0.0001	0.0001
373	0.0001	0.0001
361	0.0001	0.0001
349	0.0001	0.0001
337	0.0001	0.0001
325	0.0001	0.0001
313	0.0001	0.0001
301	0.0001	0.0001
289	0.0001	0.0001
277	0.0001	0.0001
265	0.0001	0.0001
253	0.0001	0.0001

29



Şekil 4.8. Sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi

Ayrıca, bu analizde "coupled" (eşlenik) çözüm metodu kullanılarak basınç ve hız denklemleri aynı anda çözülmüştür. Bu yöntem, "segregated" (ayrık) yöntemlere kıyasla daha hızlı ve kararlı bir yakınsama sağlamaktadır.

Coupled(eşlenik) çözüm metodu, tüm denklemleri aynı anda çözerek her iterasyonda daha doğru sonuçlar üretmekte ve böylece hesaplama süresini optimize etmektedir. Sonuç olarak, hızlı ve doğru bir yakınsama elde edilerek doğal konveksiyon akışları başarılı bir şekilde analiz edilmiştir.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.22)$$

X- momentum denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x [1 - \beta(T - T_\infty)] \quad (4.23)$$

Y- momentum denklemi:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y [1 - \beta(T - T_\infty)] \quad (4.24)$$

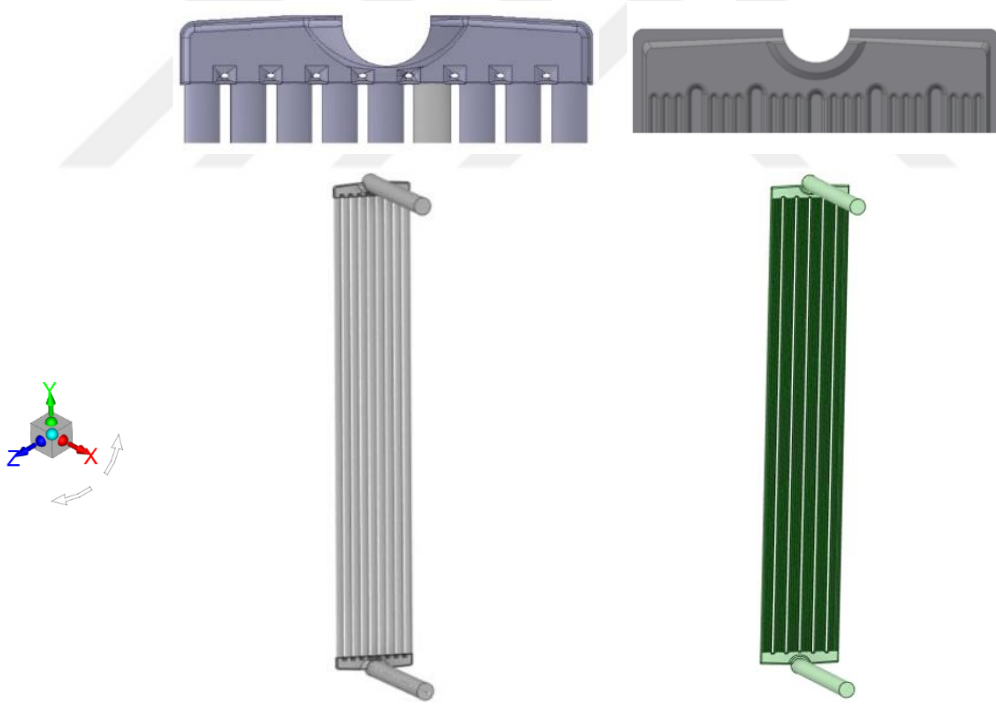
Z- momentum denklemi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z [1 - \beta(T - T_\infty)] \end{aligned} \quad (4.25)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.26)$$

Bu denklemde g_x , g_y ve g_z sırasıyla x, y ve z yönlerindeki yerçekimi ivmelerini göstermektedir. Bu çalışmada $g_x = g_z = 0$ ve $g_y = -9.81 \text{ m/s}^2$ olarak alınmıştır. u, v, w ise sırasıyla x, y ve z yönlerindeki hız büyüklüklerini göstermektedir.

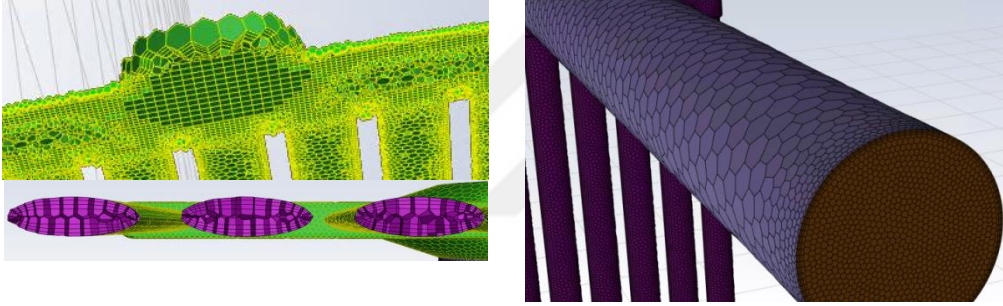


Şekil 4.9.Koordinat ve sayısal model 3D gösterimi

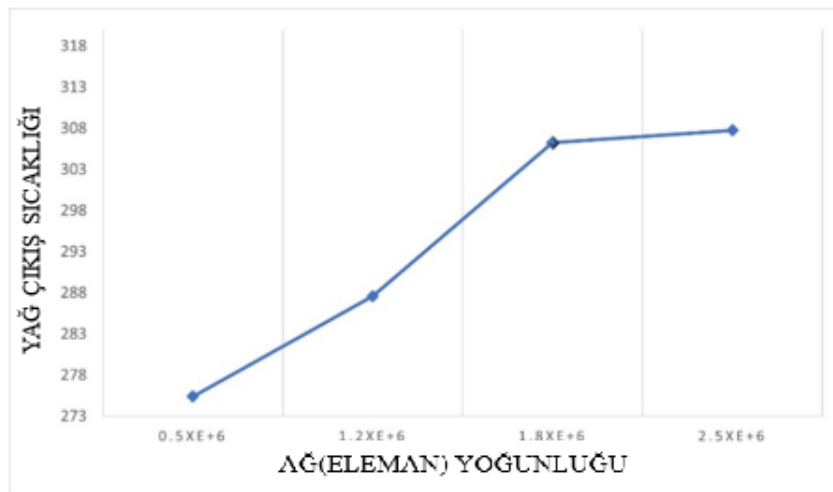
Bu çalışmada, konveksiyon ve iletim değerlendirildi. Konveksiyon hem dış soğutma havasında hem de iç yalıtım yağında gerçekleşir. Yağın özellikleri, tablo biçiminde Ansys Fluent®'e dahil edilirken, havanın özellikleri Ansys Granta® malzeme

kütüphanesi kullanılarak tanımlandı. Laminer akışları sağlamak için, modele giriş ve çıkış boruları eklendi. Boru tipinin geometrisi 9 eliptik borudan oluşurken, panel tipi bir paneldeki dikdörtgen kesite benzer 6 yağ kanalı vardır. Detaylar geometri kısmında belirtilmiştir. Şekil 4.2, sayısal modelin geometrik temsilini gösterilmiştir, görsel ve koordinatlar ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Her iki model de Autodesk Inventor® kullanılarak oluşturulmuş ve ardından Space Claim® kullanılarak basitleştirilmiştir. Keskin kenarların kaldırılması, yağ giriş-çıkış yüzeyleri için adlandırılmış seçimlerin oluşturulması ve yağ hacminin oluşturulması gerçekleştirilmiştir.

HAD analizinde, eğrisel ve ortogonal olmayan örgü elemanları kullanılmış, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Çalışma, doğal taşınımın ve kütle geçişinin bir arada olduğu durumları değerlendirerek, bu süreçlerin etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir.



Şekil 4.10.Çoklu-altıgen çekirdek bileşenlerinin görünümü



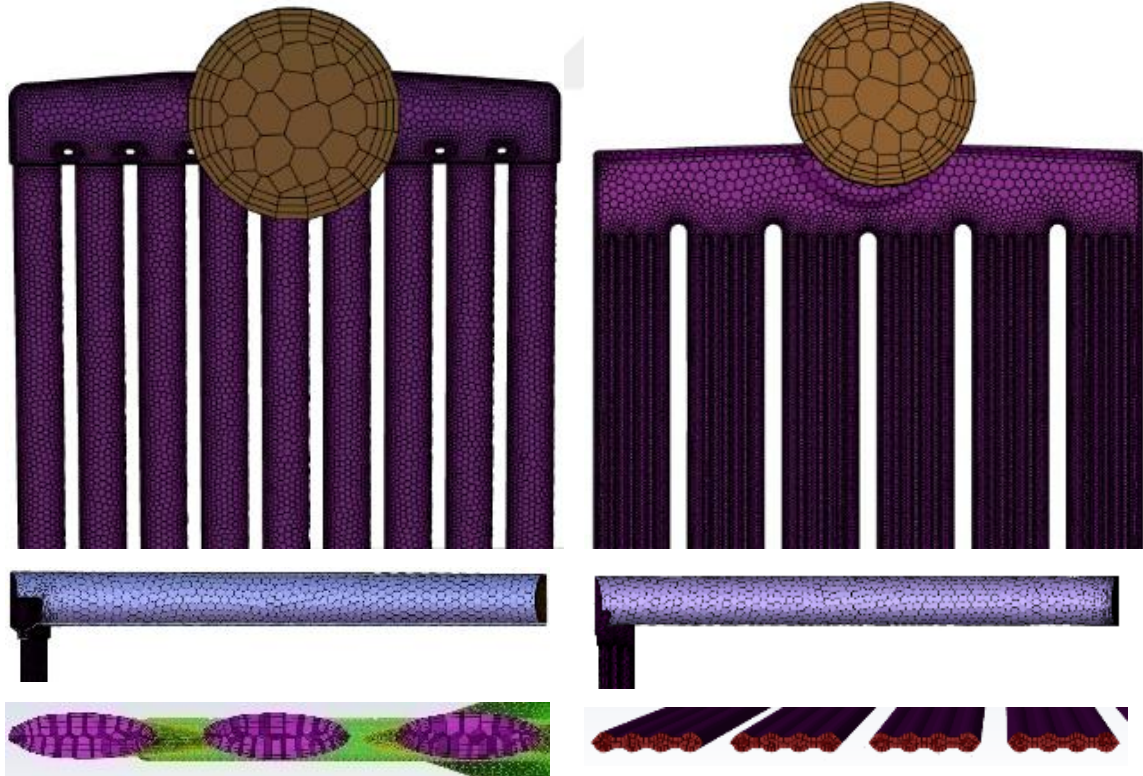
Şekil 4.11.Ağ(eleman) yoğunluğu bağımsızlığı sonuçları

Çoklu-altıgen çekirdek bileşenlerinin ağ yapısında tercih edilmesi, düşük eğiklik oranı ve yüksek eleman kalitesi gibi avantajlar sağlamıştır. Sayısal modelin bağımsızlık derecesini değerlendirmek amacıyla bir ağ bağımsızlığı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, aynı sınır koşulları altında dört farklı ağ yapısı test edilmiştir. Ağ bağımsızlığını belirleyen temel kriter, yağ çıkış sıcaklığındaki dalgalanmalar olarak belirlenmiştir.

Ağ-3 ve Ağ-4 arasında yağ çıkış sıcaklığı farkının %2'den az olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, yaklaşık 1,8 milyon elemandan oluşan bir ağ yapısının, kritik yüzeylere yakın termal ve hidrodinamik sınır katmanlarını doğru bir şekilde yakalamak için yeterli olduğunu ortaya koymaktadır.

Düğüm noktaları: 2205103
Kenarlar: 1935
Yüzeyler: 3561678
Hücreler: 827311

Düğüm noktaları: 5322487
Kenarlar: 24167
Yüzeyler: 8349478
Hücreler: 1861768



Şekil 4.12.Küresel ağ(elaman) görünümleri

Doğru sonuçların elde edilmesi ve çözümlerin yakınsamasını kolaylaştırmak için eleman eğikliğinin 0,8'in altında tutulması gerektiği belirlenmiştir. Şekil 4.12'te, nihai küresel modellerin boru tipi radyatör için 827.311 elemandan, panel tipi radyatör için ise 1.861.868 elemandan oluştuğu gösterilmektedir. Bu yapılandırma hem çözüm doğruluğunu hem de sayısal modelin stabilitesini optimize etmektedir.

HAD 'de kütle, momentum ve enerji denklemleri kullanıldı ve bunlar Denklem (4.1) – (4.12)'te verildi. Laminer bir akış modeli kullanıldı. Ağırlık merkezi, malzeme özellikleri, akış hızı, sıcaklık, yüzey kalınlığı ve hava iletkenliği parametre olarak tanımlandı. Yağ akış borularının yalıtılmış olarak tanımlandı. Yüzey kabuk iletim teorisi, radyatör diliminin yüzeyini analiz etmek için uygulanmış ve kabuk kalınlığı her iki model için de belirtilmiştir.

Tablo 4.3. Sınır Koşulları

Değerlendirme Durumları	Boru Tipi - mineral yağ	Panel Tipi- mineral yağ	Boru Tipi- ester yağ	Panel tipi- ester yağı
$T_{\text{ortam sıcaklığı}} (K)$	295	295	295	295
$h_{\text{hava}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	5.87	5.64	5.91	5.80
$T_{\text{giriş sıcaklığı}} (K)$	338	338	338	338

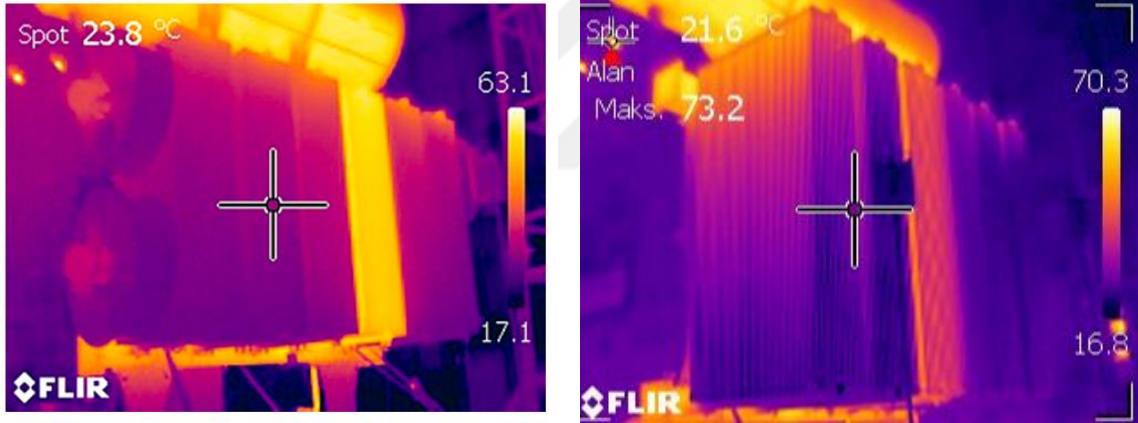
Sonlu hacim yöntemi, sınır koşullarını ve üç boyutlu yönetici denklemleri bir hesaplamalı ağ üzerinde ayrıştırmak ve analiz etmek için kullanıldı. Bu yaklaşım, her kontrol hacmi üzerindeki koruma denklemlerini entegre etmeyi ve kritik değerleri korumak için ayırık formülasyonlar uygulamayı gerektirir. Navier-Stokes denklemlerini çözmek için çift hassasiyetli doğrulukta bir çözücü oluşturuldu ve hesaplama sonuçlarında mükemmel hassasiyet garanti edildi.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sonuçlar deneysel, analitik ve nümerik olarak ayrı ayrı incelenmiş ve kıyaslanmıştır. Kıyaslama 5.4 de belirtilmiştir.

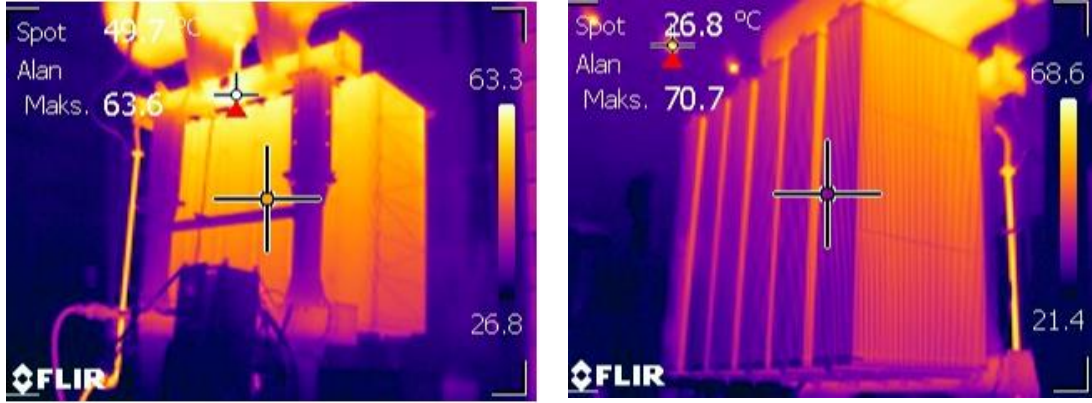
5.1. Deneysel Bulgular

Borulu radyatörler ONAN modunda plakalı radyatörlerden yaklaşık %15 daha iyi soğutma verimliliği sağlar. AN modundan AF moduna geçildiğinde, verimlilik artışı plakalı radyatörler için daha belirgindir ve 2,15 kat artarken, borulu radyatörler yalnızca 1,52 kat artış göstermiştir. Ağırlık açısından, borulu radyatörler aynı yüksekliğe sahip karşılaştırılabilir bir plakalı radyatörün yalnızca %93'ü ağırlığında oldukları için hafif bir avantaja sahiptir. Borulu radyatörler ONAF modunda plakalı radyatörlerden daha iyi performans göstermese de, ONAN performansının kritik olduğu tasarımlarda faydalı olabilirler. Fanlar bu aşamada çalıştırılmamıştır.



Şekil 5.1. Sıcaklık dağılımı mineral yağ ile (panel tipi ve boru tipi tek radyatörün çalışma durumunda anlık termal görüntüleri)

Daha ileri analizler, her iki radyatör tipinin paralel olarak monte edildiğinde, borulu radyatörlerin plakalı radyatörlerden %36 daha fazla yağ akışı alacağını göstermektedir. Tek radyatör çalışma durumu Şekil 5.1 ve 6 grup radyatörün çalışma durumu Şekil 5.2’da gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Sıcaklık dağılımı mineral yağ ile (panel tipi ve boru tipi 6 grup radyatörün çalışma durumunda anlık termal görüntüleri)

Testler boyunca, en üst yağ sıcaklığı $T_{giriş} = 294.45 \pm 3,8$ K ortam hava sıcaklığı T_{ortam} aralığı ile $336,75 \pm 1,2$ K ortalamasında görülmüştür. Panel tip radyatörler için ortalama yağ artışı $\Delta T = 27,7$ K ve borulu radyatörler için $\Delta T = 30,1$ K idi. En üstten en alta yağ sıcaklığı artışı panel tip radyatörler için 27,7 K ve borulu radyatörler için 30,4 K görüldü. AN modu, daha yüksek yağ sıcaklığı artışından kaynaklanan artan hava kaldırma kuvveti nedeniyle artan etkili termal iletkenlik gösterebilmektedir.

5.2. Analitik Bulgular

Çalışmada elde edilen çıkış sıcaklıkları: boru tipi mineral yağlı radyatör: 307.15 K; panel tipi mineral yağlı radyatör: 313.84 K; boru tipi ester yağlı radyatör: 305.63 K; Panel tipi ester yağlı radyatör: 309.0 K olarak bulunmuştur. Bu değerler, mineral yağın ester yağa göre daha yüksek bir çıkış sıcaklığına sahip olduğunu ve panel tipi radyatörlerin boru tipi radyatörlere göre daha yüksek bir sıcaklık çıktısı sağladığını göstermektedir.

Isı Transfer Katsayısı: Panel tipi radyatörler, geniş yüzey alanı nedeniyle daha yüksek bir ısı transfer katsayısına sahiptir. Bu, radyatör yüzeyinde sıcaklığın daha etkili bir şekilde havaya iletilmesini sağlar.

Toplam enerji dengesi (R_{toplam}) Denklem 4.21’ de belirtildiği gibi $R_{konveksiyon-yag}$ ve $R_{konveksiyon-hava}$ yağ ve hava arasındaki konvektif dirençleri temsil eder. Hesaplanan sonuçlar, yağ ve hava arasında etkin bir enerji transferi sağlandığını doğrulamaktadır.

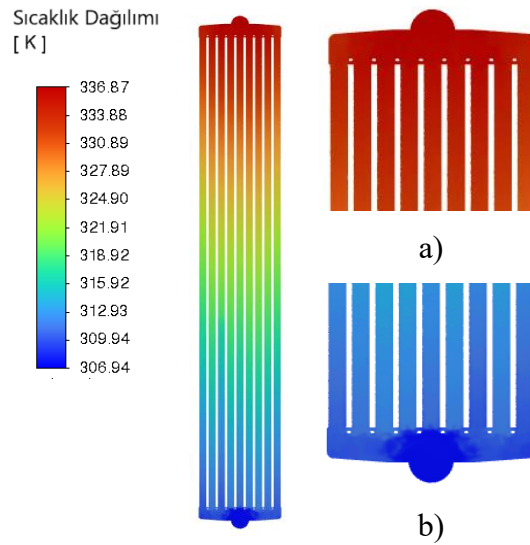
Bu çalışmada, analitik yöntemlerin güvenilirliği ve doğruluğu deneysel verilerle doğrulanmıştır.

5.3. Sayısal Bulgular

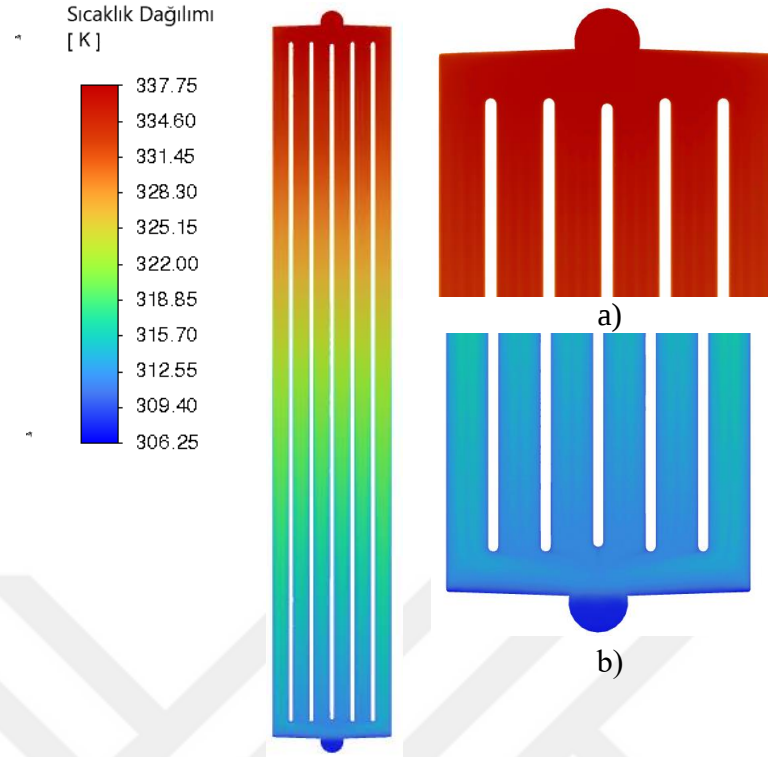
Sonuçlar modülü, simülasyon modelindeki akışı ve ısı transferini görselleştirmek için ANSYS yazılımındaki HAD son işlem modülüdür. Bu bölümde, doğal ester transformatör yağı, transformatör radyatör bölümünün dörtte birinin sıcaklık dağılımı, hız vektörleri, ısı akışı ve hız akım çizgileri görselleştirilerek incelenmiştir. Sonuçlara göre, transformatör radyatörlerinin geometrisi iyileştirilebilir. Özellikle, köşelerde ısı transfer hızı en düşüktür. Keskin köşeler yuvarlatılabilir. Ayrıca, Reynolds sayısı, Nusselt sayısı ve Prandtl sayısı teorik olarak hesaplanmıştır.

5.3.1. Sıcaklık Dağılımı

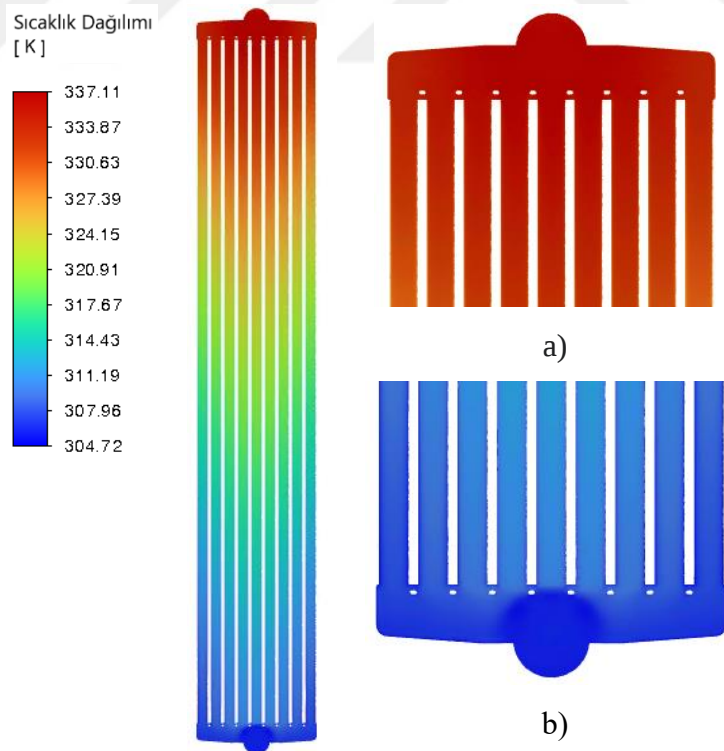
Tüm sayısal analizler için giriş sınırında giriş sıcaklığı 338 K olarak ayarlanmıştır. Mineral yağ için giriş ve çıkış bölgeleri etrafındaki ayrıntılı sıcaklık dağılımları Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 'de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre mineral yağ için, yağ çıkış sıcaklıkları boru tip radyatör için mineral yağda 306.94 K civarında, panel tip için ise 306.25 K bulunmuştur. Ester yağ için, yağ çıkış sıcaklıkları boru tip radyatör için Şekil 5.5 de 304.72 K civarında, panel tip için ise Şekil 5.6'de 305.63 K bulunmuştur.



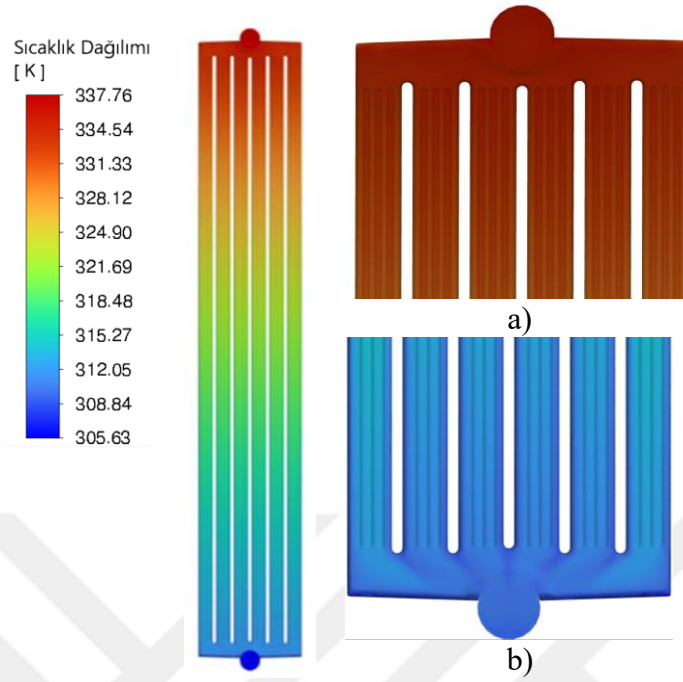
Şekil 5.3. Boru tipi radyatör mineral yağı için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b) çıkış bölgesindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.4. Panel tipi radyatör mineral yağı için 0,05 m/s giriş hızında giriş(a)-çıkış (b) bölgesindeki sıcaklık dağılımı



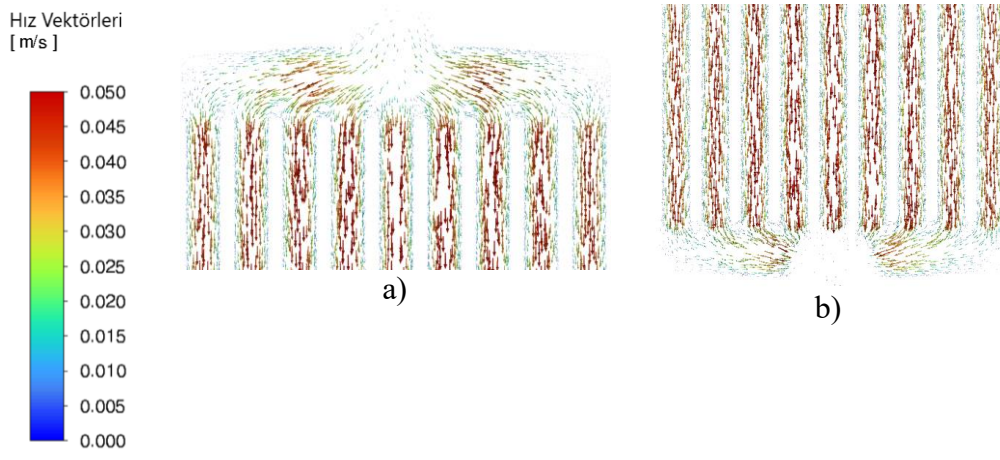
Şekil 5.5. Boru tipi radyatör ester yağı için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b)çıkış bölgesindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.6. Panel tipi radyatör ester yağı için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b)çıkış bölgesindeki sıcaklık dağılımı

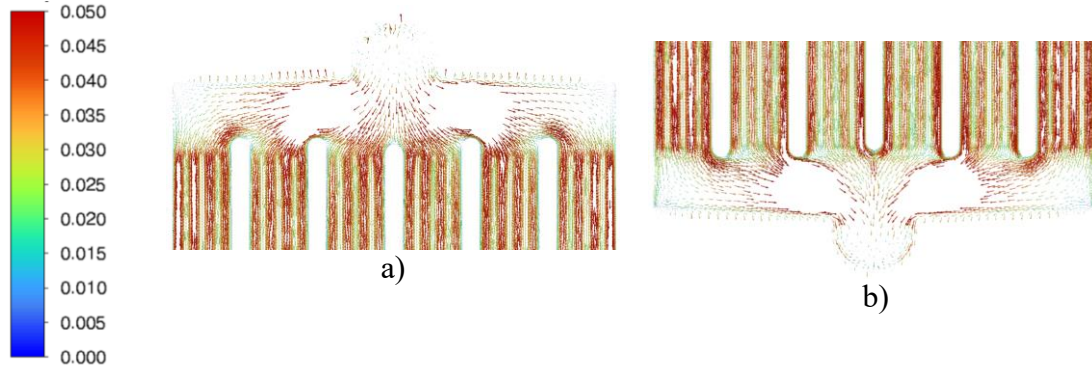
5.3.2. Hız Vektörleri

Ek olarak, girişte 0,05 m/s olan mineral ve doğal ester transformatör yağının hız profili incelendi. Hız vektörleri, Şekil 5.7.ve Şekil 5.8’de görüldüğü gibi çıkış sınırında ters akışlardan kaçınmak için sınıra dik olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.7. Boru tipi radyatör için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b)çıkış bölgesindeki hız vektörleri

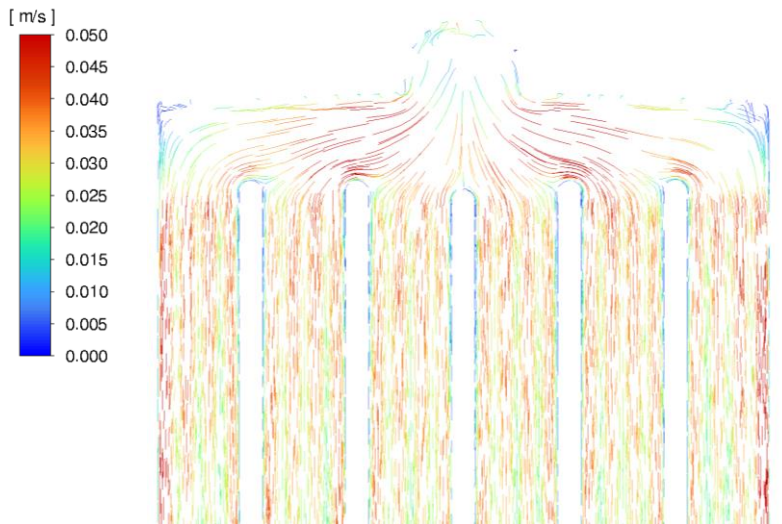
Hız Vektörleri
[m/s]



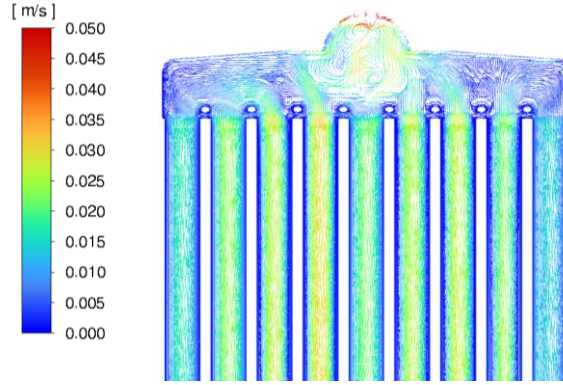
Şekil 5.8. Panel tipi radyatör için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b) çıkış bölgesindeki hız vektörleri

5.3.3. Yörünge Çizgileri

Bu akış için hız profili oluşturmak amacıyla akım çizgileri çizildi. Giriş hızı 0,05 m/s olmasına rağmen, Şekil 5.9. ve Şekil 5.10'te gösterildiği gibi yağ kanallarının içinde hızın neredeyse sıfıra düştüğü görülmektedir. Bu hız, yağ kanallarının sahip olduğu küçük kalınlık nedeniyle azalmaktadır. Özellikle düşük sıcaklıklarda doğal transformator yağı bu geleneksel yöntemle radyatörün içinde akamaz.



Şekil 5.9. Panel tipi radyatör için 0,05 m/s giriş hızında giriş bölgesindeki yörünge çizgileri

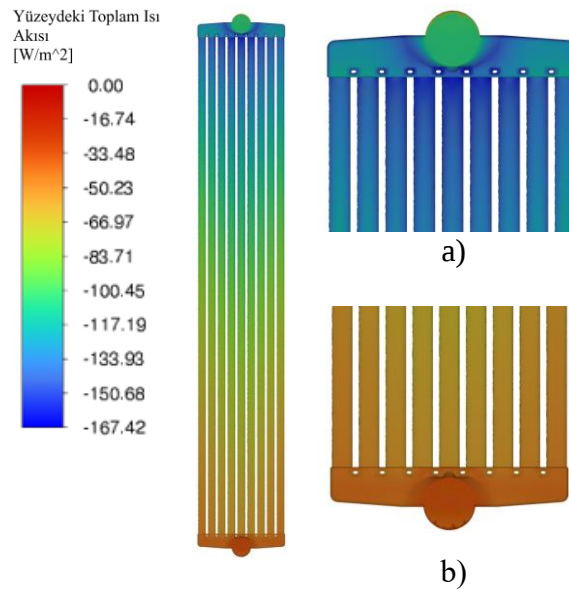


Şekil 5.10. Boru tipi radyatör için 0,05 m/s giriş hızında giriş bölgesindeki yörünge çizgileri

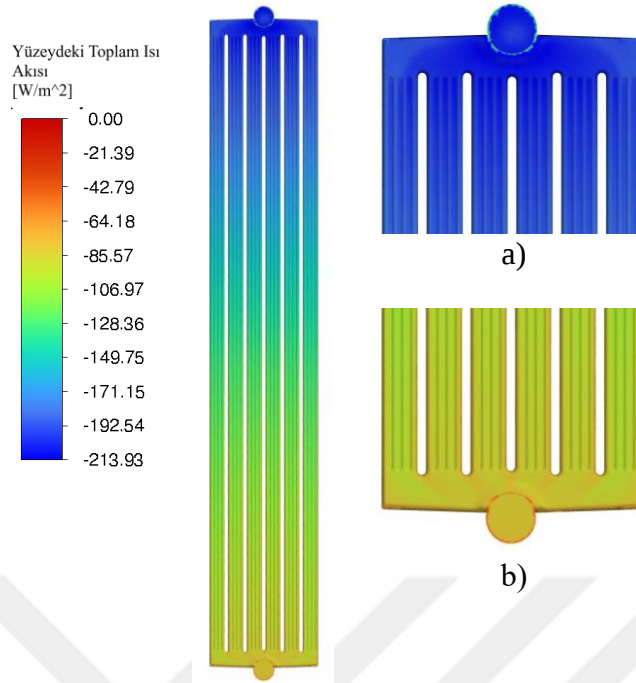
Şekilde görüldüğü üzere boru tipi radyatörün yörünge çizgileri, panel tipine göre daha lineer şekilde giriş yapmaktadır fakat köşe noktalarında görülen akımın devam etmediği noktalar geometrinin iyileştirmeye açık olduğunu göstermektedir (Şekil 5.9.). Boru tipinde ise üst ve alt kısımda bulunan yağı yönlendirmek için eklenen boşaltmalar ile değişen yörünge çizgilerinin performansı görülmektedir (Şekil 5.10.).

5.3.4. Isı Akısı

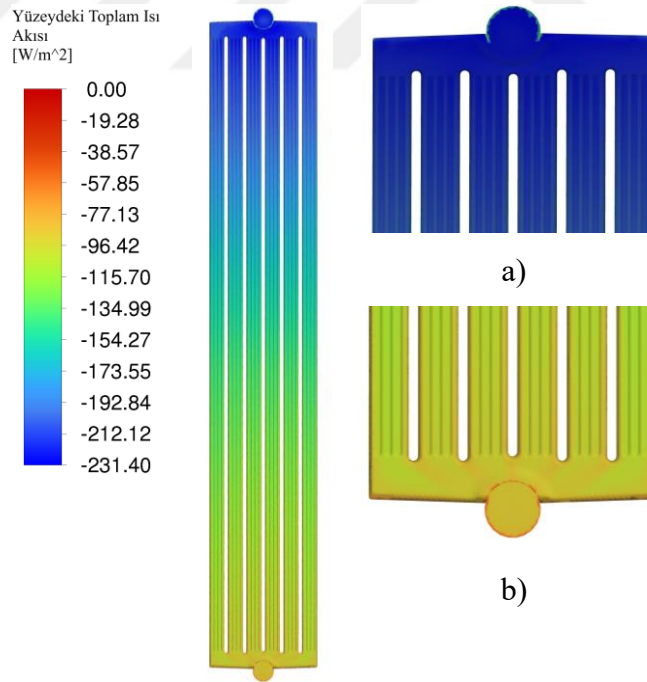
Giriş bölgesi ve çıkış bölgesindeki ısı akısı, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’da gösterildiği gibi doğal ester transformatör yağı için 0,05 m/s hız kullanılarak görselleştirildi. Mineral yağ için ise Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te gösterilmiştir. Ortalama ısı akışı 213,3 W/m²'dir.



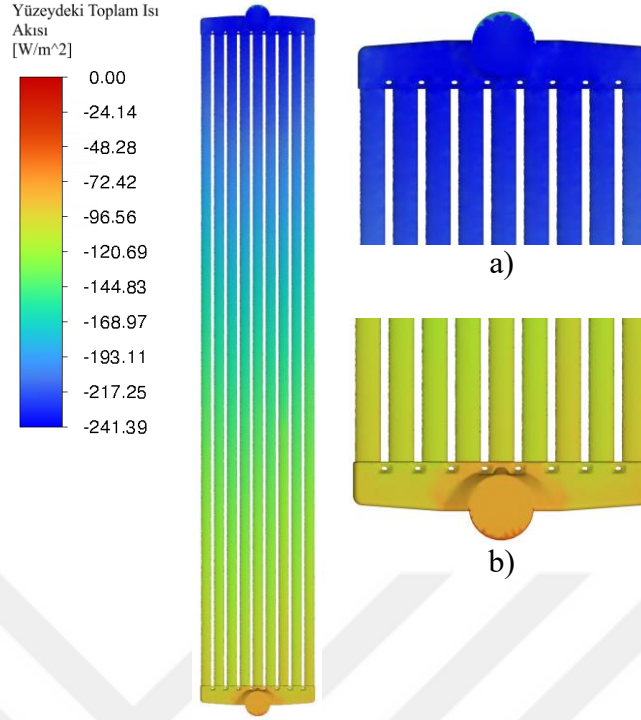
Şekil 5.11. Boru tipi ester yağlı tip radyatör için 0,05 m/s hızında a) giriş, b) çıkış bölgelerindeki yüzeydeki toplam ısı akısı



Şekil 5.12. Panel tipi mineral yağlı panel tip radyatör için 0,05 m/s hızında a) giriş, b)çıkış bölgelerindeki yüzeydeki toplam ısı akısı

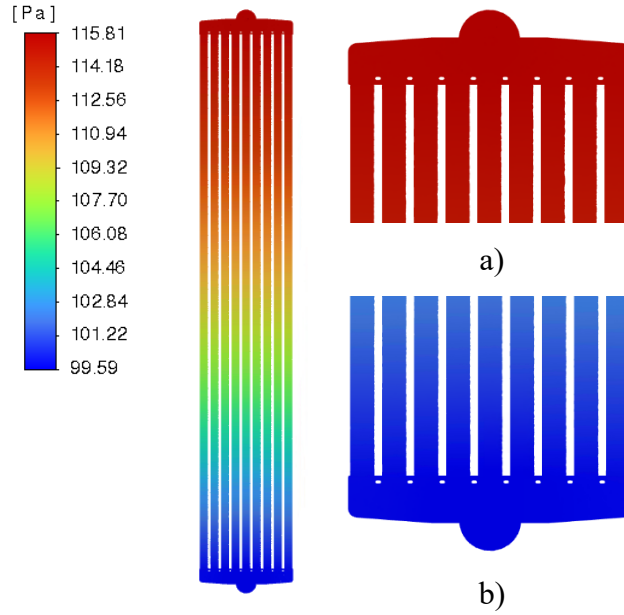


Şekil 5.13. Panel tipi ester yağlı panel tip radyatör için 0,05 m/s hızında a) giriş, b)çıkış bölgelerindeki yüzeydeki toplam ısı akısı.

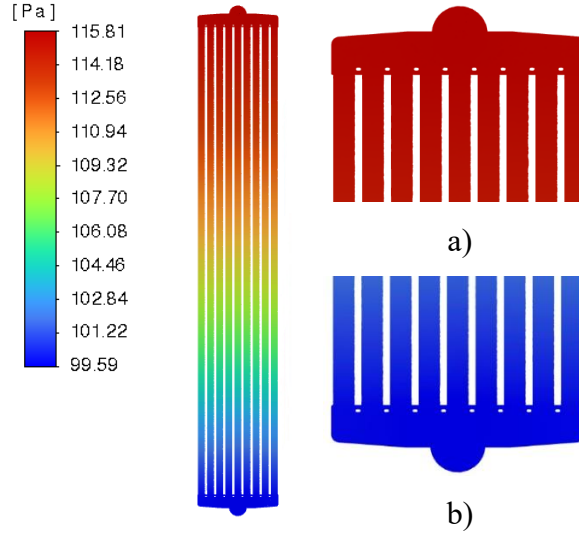


Şekil 5.14. Boru tipi mineral yağlı panel tip radyatör için 0,05 m/s hızında a) giriş, b)çıkış bölgelerindeki yüzeydeki toplam ısı akısı

5.3.5. Basınç Farkı



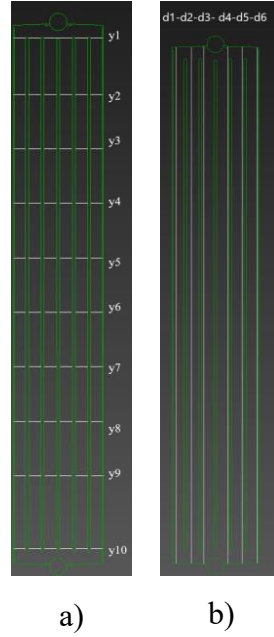
Şekil 5.15. Boru tipi radyatör ester yağı için 0,05 m/s giriş hızında giriş(a)-çıkış (b) bölgesindeki basınç farkı



Şekil 5.16. Boru tipi radyatör mineral yağı için 0,05 m/s giriş hızında a) giriş, b)çıkış bölgesindeki basınç farkı

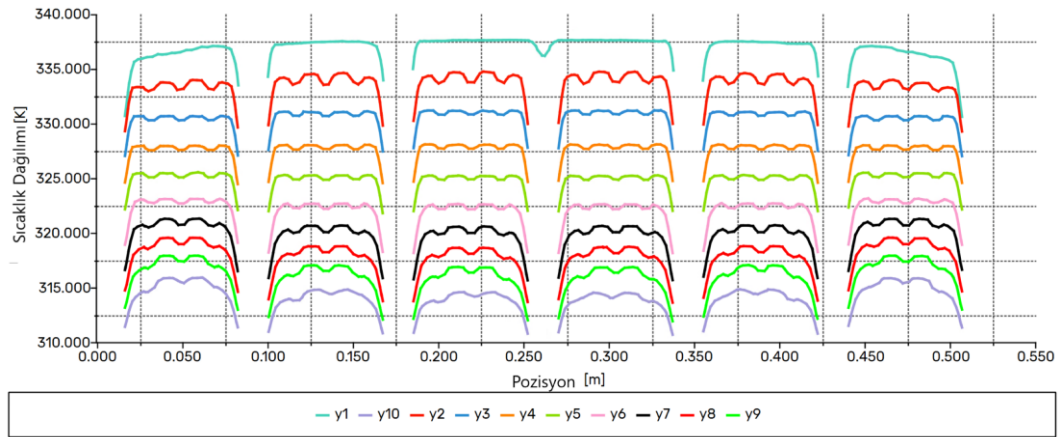
5.4. Tartışma

Panel ve boru tipi üzerinde farklı alanlardan alınan sıcaklık dağılımı ve hız değişim grafikleri ile geometrinin soğutma performansı açıkça görülmüştür. Panel tipi için yatay ve dikeyde alınan koordinatlar Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Konumları yatayda y1..y10’a kadar, dikeyde ise d1..d6’a kadar gösterilmiştir.

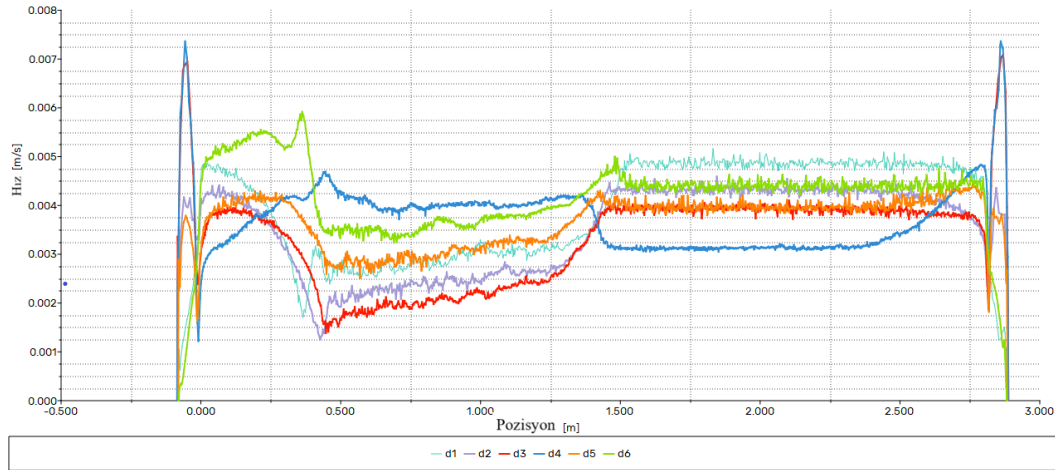


Şekil 5.17. Panel tipi radyatör a)yatay, b)dikey ’de alınan grafiklerin konumları ve isimleri

Sıcaklık dağılımındaki grafik her bir kanal için sıcaklığın en yüksek ve en düşük olduğu noktaları göstermektedir (Şekil 5.18). Grafikten hareketle sıcaklık dağılımının en dış kanallarda en düşük değerde olduğu görülmektedir. Akışın ilk anından itibaren kanal ortasındaki sıcaklıklar en yüksek değerlerindedir. Bu dağılımdaki farklılığın akış hızı ve geometri sebebiyle olduğu anlaşılmaktadır.



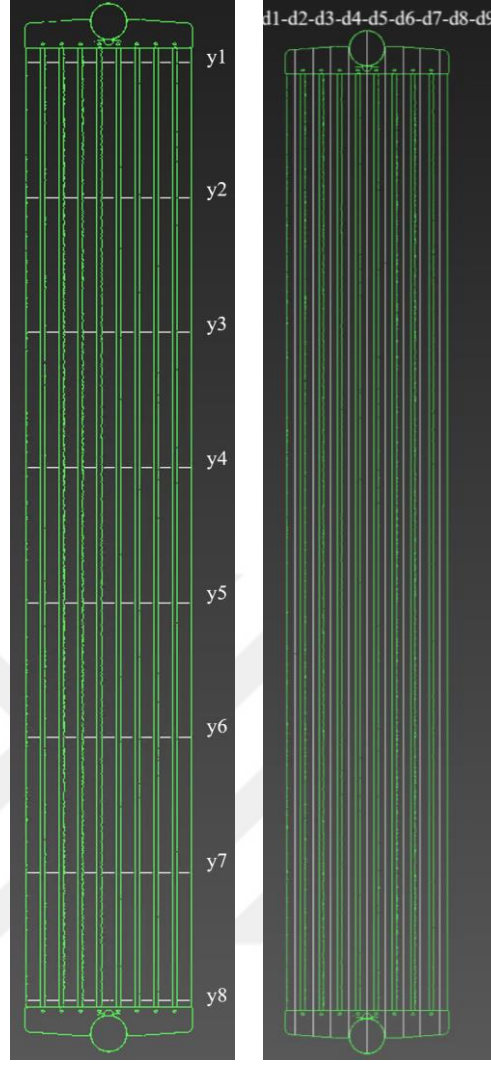
Şekil 5.18. Panel tipi radyatör yatay(x) belirlenen pozisyonlar için şeklin sıcaklık dağılım grafiği



Şekil 5.19. Panel tipi radyatör dikey(y) belirlenen pozisyonlar için şeklin hız dağılım grafiği

Farklı noktalardan alınan bu hız değerleri lineer olma eğilimindedir (Şekil 5.19). Geometrinin bulunan delikler, köşeler, baskılar, hız çizgilerinin sabit değerde kalmasını etkilemektedir. Hız 3 ayrı metotta da çok düşük görülmüş ve hesaplanmıştır.

Boru tipi için ise belirtilen pozisyonlar Şekil 5.20’de verilmiştir.

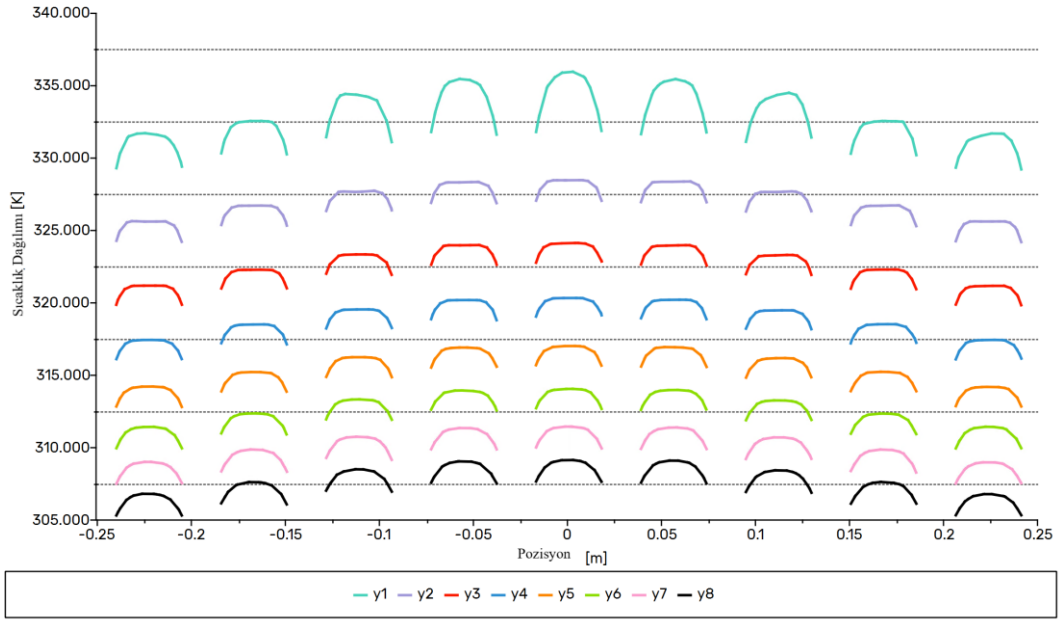


a)

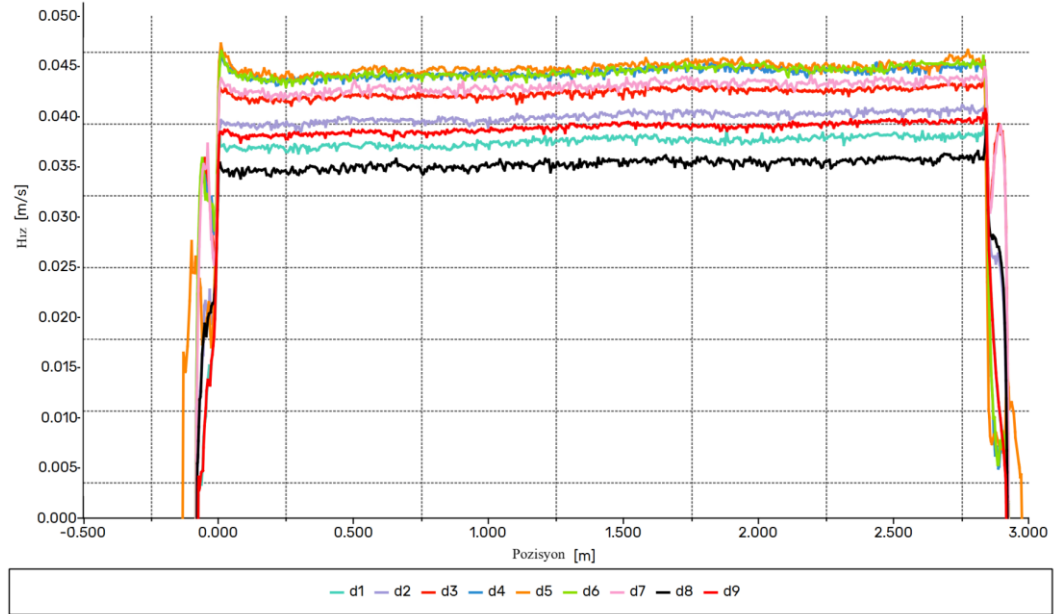
b)

Şekil 5.20. Boru tipi radyatör yatay(a) ve dikey (b)'de alınan grafiklerin konumları ve isimleri

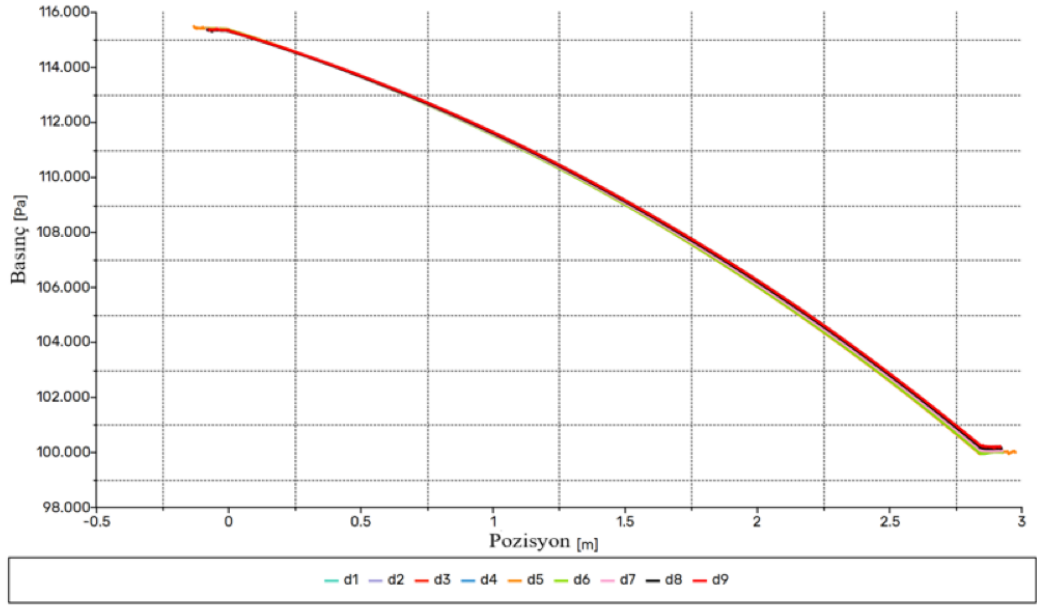
Sıcaklık farklılıkları her bir boru için lineer değiştiği görülmektedir (Şekil 5.21). Boru tipinde kanallar arası panel tipine göre daha fazla olduğu için kanallar birbirlerini daha az etkilemektedir. En yüksek sıcaklıklar panel tipi ile benzer olarak kanalların Merkez noktalarında görülmektedir. Boru tipinde akış hızı panel tipine göre daha hızlı lineer bir eğriye ulaşmaktadır. Panel tipindeki geometrik değişikliklerin boru tipinde bulunmaması akış hızının sabitlenmesini de etkilemektedir.



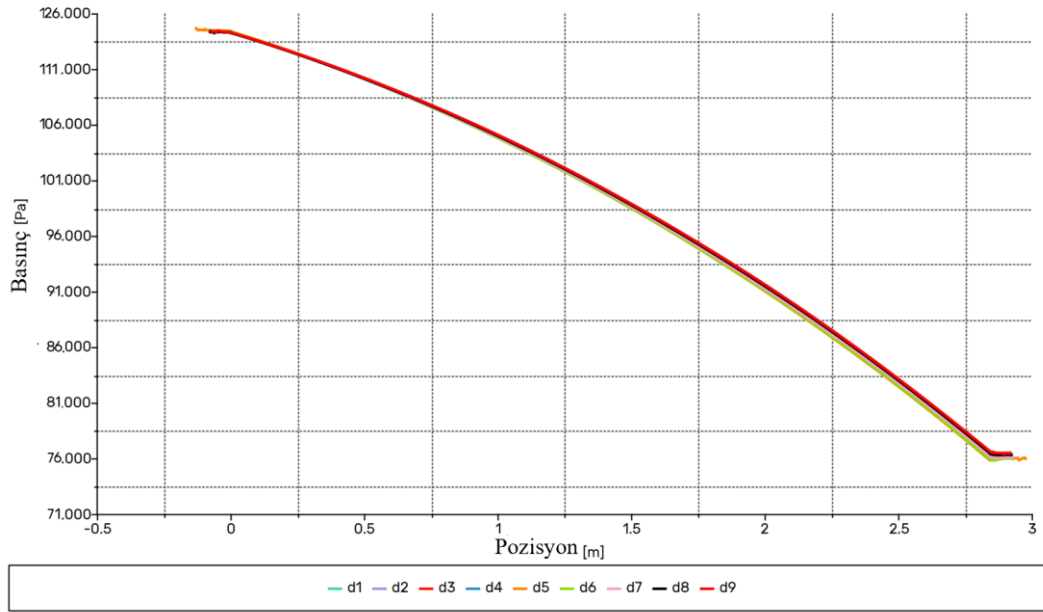
Şekil 5.21. Boru tipi radyatör yatay(x) belirlenen pozisyonlar için şeklin sıcaklık dağılım grafiği



Şekil 5.22. Boru tipi radyatör dikey(y) belirlenen pozisyonlar için şeklin hız dağılım grafiği



Şekil 5.23. Boru tipi mineral yağlı radyatör dikey(y) belirlenen pozisyonlar için şeklin basınç düşüş grafiği



Şekil 5.24. Boru tipi ester yağlı radyatör dikey(y) belirlenen pozisyonlar için şeklin basınç düşüş grafiği

Tablo 5.1’de de görüldüğü gibi, sırasıyla doğal ester ve mineral transformatör yağı ile simüle edilen radyatörlerin giriş sıcaklıkları aynıdır. Bunun dışında, simüle edilen her radyatörün ısı akıları da birbirine benzerdir.

Öte yandan, doğal ester transformatör yağı ile simüle edilen radyatörün giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı, mineral yağdan daha fazladır. Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te görüldüğü gibi ester transformatör yağı en fazla basınç düşüşüne sahiptir. Mineral yağ en düşük basınç düşüşüne ve en yüksek ısı akısına sahip olmasına rağmen, çevresel kaygılara göre doğal ester transformatör yağları ile değiştirilmelidir. Giriş hızı arttıkça basınç farkı artar ve ısı akısı da artar. Ayrıca, hız arttıkça giriş ve çıkış arasındaki sıcaklık farkı azalmaktadır.

Transformatör yağı sıcaklığı çalışma sıcaklığı sınırlarında tutulmalıdır. Bu nedenle, transformatör soğutmasında minimum sıcaklık farkı ve maksimum ısı akısı tercih edilir. Tablo 5.1'de görüldüğü gibi, minimum sıcaklık farkı ile en fazla ısı akısı doğal ester transformatör yağında gözlenmiştir. Ayrıca, Kim ve ekibine göre de (Kim ve diğ.,1987) g, transformatör sargısının giriş ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkı mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Radyatörün kütle akış hızı artırılabilirse, transformatör sargısının giriş ve çıkış sıcaklığı arasındaki fark minimumda tutulabilir. Bu, kapalı sirkülasyon döngüsü boyunca basınç düşüşünün değerini artırarak elde edilebilir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçları, Tablo 5.1.'de belirtildiği gibi, transformatörlerde gerçekleştirilen çıkış sıcaklıkları testlerden elde edilen ölçümlere benzemektedir. Panel tipi mineral yağın çıkış sıcaklıkları analiz edildiğinde, ısınma testlerinden elde edilen sonuçlar ile sayısal analiz arasında 4,1 K'lik bir fark tespit edilmiştir.

Araştırma boyunca yapılan bazı varsayımlar nedeniyle nicel bulgular ile gerçek test sonuçları arasındaki fark ortaya çıkmıştır. En yüksek hata oranı %1,3'tür. Elde edilen hata oranı kabul edilebilir eşikler içindedir. Bu modelleme tekniğinin tatmin edici sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Tablo 5.1. Panelin çeşitli konumlardaki yüzey sıcaklığı dağılımını

Değerlendirme Durumları	Boru Tipi - mineral yağ	Panel Tipi- mineral yağ	Boru Tipi- ester yağ	Panel tipi- ester yağı
$T_{\text{ortam sıcaklığı}}(K)$	295	295	295	295
$T_{\text{giriş sıcaklığı}}(K)$	337	337	337	337
$T_{\text{çıkış sıcaklığı}}(K)$ - analitik	307	313	305	309
$T_{\text{çıkış sıcaklığı}}(K)$ - sayısal	306	306	304	305
$T_{\text{çıkış sıcaklığı}}(K)$ - deney sonuçları	307	312		

Mineral yağlı radyatör geometrileri için HAD sonuçları, boru tipinin 3,12 K daha düşük çıkış sıcaklığıyla daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur. Ester yağı kullanılarak yapılan HAD araştırmaları, yine boru tipi radyatörün farklı geometriler arasında 3,05 K'lık bir sıcaklık farkıyla üstün soğutma verimliliği sergilediğini ortaya koydu. Mineral ve ester yağı arasındaki sonuçlar karşılaştırıldığında, mineral yağın daha düşük bir çıkış sıcaklığına sahip olduğu görülmektedir, ancak ester yağının kullanımı yağın geri dönüştürülebilirliği için çok önemlidir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma, mineral yağın tüm test edilen geometrilerde diğer yağ türlerinden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Bu, geleneksel olarak transformatör soğutma sistemlerinde kullanılan mineral yağın ısıyı dağıtmada ve soğutma ekipmanının düzgün çalışmasını sağlamada etkili olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, farklı koşullar altında güvenilir ısıl iletkenliği ve kararlılığı nedeniyle transformatör soğutmasındaki yerleşik rolüyle uyumludur.

Mineral yağ etkili olmaya devam ederken, çalışma, özellikle boru tipi radyatör geometrisiyle birlikte kullanıldığında ester yağının potansiyelini vurgulamaktadır. Sonuçlar, bu yapılandırmanın yalnızca daha yaygın olarak kullanılan panel tipi radyatör ve mineral yağ kombinasyonunun ısıl performansı ile eşleşmekle kalmayıp bazı durumlarda onu geçtiğini göstermektedir.

Bu, termal verimlilikten ödün vermeden belirli transformatör soğutma uygulamalarında mineral yağın ester yağıyla değiştirilmesi olasılığını açtığı için önemli bir bulgudur. Boru tipi radyatör geometrisi, ısı dağılımını optimize ederek ester yağıyla sinerjik olarak çalışmaktadır.

Çalışmada vurgulanan önemli bir nokta, ester yağının kullanımının çevresel faydasıdır. Mineral yağın aksine, ester yağı biyolojik olarak parçalanabilir, yani zamanla doğal olarak parçalanabilir ve ayrışabilir ve çevresel etkiyi azaltabilir. Bu, ester yağını modern sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu, çevre dostu bir alternatif haline getirir.

Endüstriler ve toplum genel olarak daha çevre dostu uygulamalara doğru ilerledikçe, ester yağı gibi biyolojik olarak parçalanabilir yağların kullanımı giderek daha önemli hale geliyor. Bu, genellikle uzak veya çevresel açıdan hassas alanlarda çalışan transformatörler bağlamında özellikle önemlidir.

Çalışma ayrıca karbon ayak izini azaltmanın daha geniş bağlamını vurgular ve geri dönüşümün önemini vurgular. Çevresel sürdürülebilirliğin giderek artan bir endişe olduğu günümüz dünyasında, kolayca geri dönüştürülebilen veya zamanla güvenli bir şekilde parçalanabilen malzemeleri kullanma yeteneği hayati önem taşımaktadır.

Biyolojik olarak parçalanabilir yapısıyla ester yağı bu eğilimi destekler ve yalnızca termal olarak iyi performans göstermekle kalmayıp aynı zamanda daha düşük çevresel etkiye de katkıda bulunan bir soğutma çözümü sunar. Bu, onu gelecekteki transformatör soğutma tasarımları için güçlü bir aday yapar, özellikle de karbon ayak izini azaltmanın öncelik olduğu senaryolarda önde gelir.

Analitik yöntemden elde edilen sonuçlar, panel ve boru tipi radyatörlerin performansını karşılaştırmada önemli bilgiler sunmaktadır. Radyatör tasarımlarında yüzey alanının artırılması üzerine çalışmalar yapılabileceğini, daha düşük viskoziteye sahip yağ türlerinin performansa etkisi incelenebilir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, transformatör soğutma sistemi tasarımlarında bir değişime yol açabilir. Mühendisler ve üreticiler, özellikle çevre düzenlemelerinin sıkı olduğu veya şirketlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı hedeflediği gelecekteki tasarımlarda boru tipi radyatör ve ester yağı yapılandırmalarına doğru ilerlemeyi düşünebilirler.

Eşdeğer veya üstün termal performans ve çevresel faydaların birleşimi, ester yağını mineral yağa göre umut verici bir alternatif haline getirir. Mineral yağ hala oldukça etkili olsa da, potansiyel dökülmeler ve kirlenme gibi kullanımıyla ilişkili uzun vadeli çevresel riskler, ester yağı gibi daha yeşil alternatifler lehine kademeli olarak kullanımdan kaldırılmasına yol açabilir.

Çalışma yalnızca geleneksel transformatör soğutma düzeneklerinde mineral yağın üstün termal performansını doğrulamakla kalmayıp, aynı zamanda ester yağının boru tipi radyatörlerle birleştirildiğinde verimlilikten ödün vermeden uygulanabilir, daha çevre dostu bir alternatif sunduğunu da öne sürmektedir. Bu, özellikle güç ve enerji sektörlerinde daha sürdürülebilir ve çevreye duyarlı endüstriyel uygulamalara olan artan ihtiyaçla örtüşmektedir.

Bu çalışma, ONAN modu için soğutma ekipmanının termal performansı üzerinde farklı geometrilerin ve yağ türlerinin etkisini incelemiştir. Deneylerimizin ve hesaplamalarımızın bulguları aşağıdaki sonucu desteklemiştir:

Mineral yağın tüm geometriler için daha iyi termal performansa sahip olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, geleneksel olarak kullanılan panel tipi mineral yağ kombinasyonu yerine, boru tipi ester yağ kombinasyonu, panel tipi mineral yağ kombinasyonuna kıyasla eşdeğer termal performans ve hatta daha üstün termal performans sunan uygulanabilir bir alternatif olarak kullanılabilir. Ester yağı, doğal olarak parçalanma ve ayrışma yeteneği nedeniyle çevrede önemli bir rol oynar. şu anda, tüm sektörlerde karbon ayak izini değerlendirirken, ester yağ geri dönüşüm özelliği ile önemli bir öneme sahiptir ve birincil dikkatimizi gereken noktalardandır.



KAYNAKLAR

- Amoiralis, E.I., Georgilakis, P.S., Tsili, M.A., Kladas, A.G. (2009). Global transformer optimization method using evolutionary design and numerical field computation. *IEEE Trans. Magn.*, 45(3), 1720–1723. DOI:10.1109/TMAG.2009.2012795
- Anishek, S., Sony, R., Kumar, J., Kamath, P.M. (2016). Performance Analysis and Optimisation of an Oil Natural Air Natural Power Transformer Radiator. *Procedia Technology*, 24, 428 – 435. DOI:10.1016/j.protcy.2016.05.059
- Cengel, Y.A. (2002). *Heat transfer: A practical approach. 2nd Edition*, McGraw-Hill, New York.
- Chereches, N.C., Chereches, M., Miron, L., Hudisteanu, S.V.(2017). Numerical Study of Cooling Solutions Inside a Power Transformer. *Energy Procedia*, 112, 314–321. DOI:10.1016/j.egypro.2017.03.1103
- Convett Katolog,(2024). <https://www.convett.com/downloads/documents/How-to-decide-wich-Convett-radiator.pdf>, (Ziyaret Tarihi:31 Ocak 2025).
- Córdoba, P.A., Dari,E., Silin, N. (2019). A 3D numerical model of an ONAN distribution transformer.*Applied Thermal Engineering*, 148, 897-906 DOI:10.1016/j.applthermaleng.2018.11.098
- Churchill, S.W. ,Chu, H.H.S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 18.1323-1329. DOI:10.1016/0017-9310(75)90243-4
- Dean, R. (1978). Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow. *J. Fluids Eng.*, 100 (2), 215-223. DOI:10.1115/1.3448633
- Eslamian, M.; Vahidi, B., Eslamian, A.(2006). Thermal analysis of cast-resin dry-type transformers. *Energy Convers. Manag.*, 52, 2479–2488. DOI:10.1016/j.enconman.2011.02.006
- Erdem, S., Senturk, O., Öğüt, E.B. (2024). A numerical study on the cooling performance of a slice of tube type radiator with biodegradable oil. *3rd International Graduate Research Symposium*, 8-10 Mayıs 2024, Istanbul Teknik Üniversitesi.
- Fay, J.A. (1994). *Introduction to fluid mechanics*, MIT Press.

- Fernández, I., Ortiz, A., Delgado, F., Renedo, C., Pérez, S. (2012). Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers. *Electric Power Systems Research*, (98), 58-69. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.01.007
- Garelli L., Rodriguez, G.R., Storti, M., Granata, D., Amadei, M., Rossetti, M. (2017). Reduced model for the thermo-fluid dynamic analysis of a power transformer radiator working in ONAF mode. *Applied Thermal Engineering*, (124), 855-864. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.098
- GE Vernova Broşür, (2024). https://www.gevernova.com/grid-solutions/products/brochures/power_transformers/power_transformer_brochure-en-33273-202405.pdf, (Ziyaret Tarihi: 31 Ocak 2025).
- Jang, D.S., Jetli, R., Acharya, S. (1986). Comparison of the Piso, Simpler, and Simplex Algorithms for the Treatment of the Pressure-Velocity Coupling in Steady Flow Problems. *Numer. Heat transfer*, 10(3), 209-228. DOI: 10.1080/10407788608913517
- Karsai, K., Kerenyi, D., Kiss, L. (1987). *Large power transformers*, Elsevier, New York
- Kim, M., Cho S.M., Kim, J.K. (2012). Prediction and evaluation of the cooling performance of radiators used in oil-filled power transformer applications with non-direct and direct-oil-forced flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 392-397. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.07.011
- Kim, Y.J., ve Ha, M.Y. (2017). A study on the performance of different radiator cooling systems in large-scale electric power transformer. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(7), 3317-3328. DOI: 10.1007/s12206-017-0622-2
- Kim Y.J., Jeong, M., Park, Y.G., Ha, M.Y. (2018). A numerical study of the effect of a hybrid cooling system on the cooling performance of a large power transformer. *Applied Thermal Engineering*, 136, 275-286. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.019
- Kim, J., Moin, P., Moser, R. (1987). Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, *J. Fluid Mech. Volume*, (177), 133-166. DOI: 10.1017/S0022112087000892
- Koca, A., Senturk, O., Akbal, Ö., Özcan, H. (2024). Techno-economic optimization of radiator configurations in power transformer cooling. *Designs*, 8(1), 5-30. DOI: 10.3390/designs8010015
- Koca, A., Senturk, O., Çolak, A.B., Bacak, A., Dalkilic, A.S. (2024). Artificial neural network-based cooling capacity estimation of various radiator configurations for power transformers operated in ONAN mode. *Thermal Science and Engineering Progress*, 50, 3-8. DOI: 10.1016/j.tsep.2024.102515

- Nematzadeh, N., Ghaebi, H., Aghdam, E.A. (2022). Thermo-Economic Analysis of Innovative Integrated Power Cycles for Low- Temperature Heat Sources Based on Heat Transformer. *Sustainability*, 14, 13194. DOI:10.3390/su142013194
- Paramane, S.B., Veken, W.V.D., Sharma, A. (2016). A coupled internal–external flow and conjugate heat transfer simulations and experiments on radiators of a transformer. *Applied Thermal Engineering*, 103, 961–970. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.04.164
- Paramane, S.B., Joshi, K., Veken, W.V.D., Sharma, A. (2014). HAD study on thermal performance of radiators in a power transformer: Effect of blowing direction and offset of fans. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 29, 2596–2604. DOI:10.1109/TPWRD.2014.2347292
- Paramane, S.B., Veken, W. V. D., Sharma, A., Codde, J. (2017). Effect of fan arrangement and air flow direction on thermal performance of radiators in a power transformer. *Journal of Power Technologies*, 97 (2), 127–134. DOI:10.3390/en18051051
- Raeisian, L., Niazmand, H., Ebrahimnia-Bajestan, E., Werle, P. (2019). Thermal management of a distribution transformer: An optimization study of the cooling system using HAD and response surface methodology. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 104, 443–455. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.07.043
- Rodriguez, G.R., Garelli, L., Storti, M., Granata, D., Amadei, M., Rossetti, M. (2017). Numerical and experimental thermo-fluid dynamic analysis of a power transformer working in ONAN mode. *Appl. Therm. Eng.*, 112, 1271–1280. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.171
- Rozga, P. (2013). Properties of new environmentally friendly biodegradable insulating fluids for power transformers. *1st Annual International Interdisciplinary Conference*, Portugal, 24–26 April.
- Sagaut, P., Lee, Yu.-T. (2006). Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An introduction. Scientific Computation Series, *Applied Mechanics Reviews*, 55(6), 115. DOI:10.1115/1.1508154
- Smolka, J. (2013) CFD-based 3-D optimization of the mutual coil configuration for the effective cooling of an electrical transformer. *Appl. Therm. Eng.*, 50, 124–133. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.06.012
- Wakil, N., Chereches, N.-C., Padet, J. (2006). Numerical study of heat transfer and fluid flow in a power transformer. *Int. J. Therm. Sci.*, 45, 615–626. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2005.09.002

- Torriano, F. Chaaban, M., Picher, P. (2010). Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding. *Appl. Therm. Eng.*, 30, 2034–2044. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.05.004
- Wu, T., Yang, F., Farooq, U., Jiang, J., Hu, X. (2023). Real-time calculation method of transformer winding temperature field based on sparse sensor placement. *Case Stud. Therm. Eng.*, 47, 103090. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103090
- Zhao, S., Liu, Q., Wilkinson, M., Wilson, G., Wang, Z. D. (2022). A Reduced Radiator Model for Simplification of ONAN Transformer HAD Simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(5), 4007-4018. DOI:10.1109/TPWRD.2022.3142889



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Erdem, S., Senturk, O., Öğüt, E.B. (2024). A numerical study on the cooling performance of a slice of tube type radiator with biodegradable oil. 3rd International Graduate Research Symposium, Istanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 8-10 Mayıs 2024.



ÖZGEÇMİŞ

Sonnur ERDEM ilkokul ve liseyi Kocaeli’nde tamamladı. 2016 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2016 Kasım ayı itibariyle Transformatör sektöründe çalışmaya başladı. 2021 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans programına kabul edildi. Paralelde enerji sektöründe raylı sistemler, reaktör, açık deniz rüzgar santrali transformatör dizaynı, sismik ve soğutma hesapları gibi çeşitli projelerde rol aldı. Halen sektörde aktif olarak çalışmakta ve ısı transferi, enerji ,termal analiz ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği gibi konularda araştırmalarına devam etmektedir.

