



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **BİR DİLİM TRANSFORMATÖR RADYATÖRÜNDE AKIŞ VE ISI TRANSFERİNİN FARKLI YAĞ TİPLERİ KULLANILARAK İNCELENMESİ**

**ÖZBEN KAYMAZ  
GÖKHAN KALKAN**  
BALIKESİR ELEKTROMEKANİK

**TAHSİN BAŞARAN**  
İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

**AYTUNÇ EREK**  
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ



# BİR DİLİM TRANSFORMATÖR RADYATÖRÜNDE AKIŞ VE ISI TRANSFERİNİN FARKLI YAĞ TIPLERİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

Özben KAYMAZ  
Tahsin BAŞARAN  
Gökhan KALKAN  
Aytunç EREK

## ÖZET

Tüm elektrik makineleri gibi, transformatör ısı kaynağı da sargı iletkeni üzerinden geçen akımdır. Elektriksel gerilimin azaltılması amacıyla iletkenlerin üzeri selüloz bazlı izolasyon malzemeleri ile sarılmaktadır. Selüloz bazlı izolasyon malzemesinin yaşlanması transformatör ömrünü belirleyen ana parametredir. Yükselen sıcaklık izolasyon malzemesinin yaşlanmasını hızlandırmaktadır ve bu yüzden sıcaklık belirli bir limit değerinin altında tutulmaktadır. Transformatörler, sıcaklığı belirli bir değerin altında tutmak için transformatörlere özel bir yağ ile soğutulmaktadır. Büyük güç transformatörlerinde doğal taşınım ile soğutmaya sağlamak için radyatörler kullanılmaktadır. Doğal taşınım ile soğutulan bir transformatörde, yeterli ısı transferinin sağlanabilmesi için kullanılması gereken yağ tipi belirlenmelidir. Bu çalışmada, bir transformatör radyatöründe kullanılan, mineral yağ, silikon yağ ve ester yağların radyatör içindeki akışı ve ısı transferi incelenerek uygun yağ seçimi gerçekleştirilmiştir. Transformatör radyatörü içindeki yağ üç boyutlu modellenerek yağ akış hacmi oluşturulmuş, farklı yağ tiplerinin radyatör ısı transfer kapasitesi ve akışkan davranışına etkisi incelenmiştir. Sıcaklığa bağlı yoğunluk, ısı kapasite, ısı iletkenlik ve viskozite değerlerinin değişimleri, ANSYS Fluent HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizlerine girilmek üzere, MathCAD yazılımı kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Transformatör, Transformatör yağı, Transformatör radyatörü, HAD.

## ABSTRACT

Transformers heat up because of the current passing through resistance on the winding conductors as all electrical machines. Transformer life depends on the aging of cellulose-based insulation material in winding. Winding temperature must be kept below a certain temperature limit, because the excess heat in the windings directly accelerates the aging of insulation material. Transformers are cooled by using transformer oil. Appropriate oil type must be determined for obtaining adequate heat transfer in natural convection cooling type transformer. In this study, flow and heat transfer of radiator filled with mineral oil, silicone oil and ester oil were investigated. Oil in radiator was modeled in 3D, thereby oil flow volume was created, heat transfer calculations were made with using different type transformer oils and investigation of flow behavior is studied. Temperature dependent density, thermal conductivity and viscosity values are obtained from oil suppliers. Transformer oil database is composed by using curve fitting methods in MathCAD Software to use in CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis in ANSYS Fluent Simulation Software.

**Key Words:** Transformer, Transformer oil, Transformer radiator, CFD.

## 1. GİRİŞ

Bir alternatif akım devresinde, elektrik enerjisini frekansı değiştirmeden, elektromanyetik indüksiyon yolu ile gerilim ve akım değerlerini istenilen değerlere dönüştüren elektrik makinelerine transformatör denir. Bir transformatörü çekirdek, sargı, kazan ve ekipmanlar olmak üzere dört kısımda incelemek mümkündür. Çekirdek, 0.23 mm – 0.3 mm kalınlığındaki silisli lamine saclardan oluşan, manyetik devre olarak da adlandırılan kısımdır. Sargı ise iletkenlerin çekirdek üzerine sarılması ile oluşan, manyetik alanı oluşturan kısımdır. Transformatörlerde hareketli parça bulunmamasına rağmen, tüm elektrik makineleri gibi transformatörlerde de kayıplar oluşmaktadır. Transformatör çekirdeğinde histeriz ve girdap akımlarından dolayı oluşan enerji kayıplarına demir kayıpları, sargıda dirençten dolayı oluşan enerji kayıplarına bakır kayıpları denir. Oluşan enerji kayıpları ısı enerjisine dönüşerek transformatörün sıcaklığını arttırmaktadır.

Transformatörler, IEC (International Electrotechnical Commission) standartları çerçevesinde belirlenen sıcaklık değerlerinde çalışmaktadırlar [4]. Soğutucunun en yüksek sıcaklığı, sargılarda oluşacak toplam sıcaklık artışı gibi özellikler ilgili standartta tanımlanmıştır. Sargıyı oluşturan iletkenler iki iletken arasında elektriksel boşalma, elektriksel sürünme/yürüme ve kısmi deşarj olaylarını önlemek amacı ile selüloz bazlı kağıt ile izole edilir. Yüksek sıcaklık sargı üzerindeki izolasyon malzemesini olumsuz yönde etkiler ve transformatör ömrünü kısaltır. Bu nedenle, transformatörlerde demir ve bakır kayıpları sonucu oluşan ısının atılması gerekmektedir. Transformatörlerde soğutma farklı sistemler kullanılarak yapılmaktadır.

## 2. TRANSFORMATÖR SOĞUTMA TIPLERİ

Transformatörde açığa çıkan ısı enerjisinin en büyük kaynağı sargıda oluşan bakır kayıplarıdır. Transformatörler soğutma tiplerine göre iki gruba ayrılabilir:

1. Kuru tip transformatörler
2. Yağlı tip transformatörler

Soğutucu ve sirkülasyon tipini belirten tablolar Tablo 1 ve Tablo 2' de IEC standartlarına göre tanımlanmıştır. Dört harf ile belirtilen soğutma metodlarında, ilk harf transformatör içindeki soğutucunun tipini, ikinci harf transformatör içinde gerçekleşen sirkülasyon metodunu, üçüncü harf dış ortamdaki soğutucunun tipini ve dördüncü harf dış ortamda gerçekleşen sirkülasyonun metodunu belirtir.

**Tablo 1.** Transformatör soğutucu tipleri [1].

Soğutucu tipi	Sembol
Mineral yağ	O
Gaz	G
Su	W
Hava	A
Katı	S

**Tablo 2.** Transformatör sirkülasyon tipleri [1].

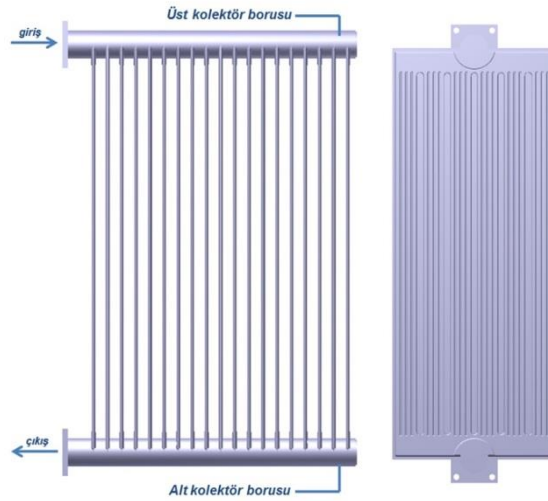
Sirkülasyon tipi	Sembol
Doğal	N
Zorlanmış	F
Yönlendirilmiş	D

## 2.1. Kuru Transformatörler

Kuru transformatörlerde soğutucu olarak hava kullanılır. Genel olarak AN (Air-Natural) ve FA (Air-Forced) olmak üzere iki tip soğutma sistemi bulunmaktadır. AN soğutma sistemi havanın doğal akışından faydalanarak sirkülasyonun sağlandığı 20 MVA gücüne kadar olan transformatörlerin soğutmasında kullanılabilir. FA soğutma sisteminde ise hava akışını sağlamak için fanlar kullanılarak, transformatör içinde hava akışı sağlanır. Bu tip soğutma 25 MVA güce sahip olan transformatörler için kullanılır.

## 2.2. Yağlı Transformatörler

Yağlı transformatörlerde çekirdek ve sargılar, kazan içinde yağa daldırılmış konumdadır. Çekirdek ve sargı tarafından ısınan yağ yoğunluk farkından dolayı yukarı doğru hareket eder. Şekil 1’ de görüldüğü gibi ısınan yağ radyatörün üst kolektör borusundan radyatöre girer ve soğutulmuş alt kolektör borusundan kazana geri verilerek yağ sirkülasyonu sağlanır.



Şekil 1. Radyatör.

Yağlı transformatörlerde yağ akışının ve konveksiyonun sağlanabilmesi için çeşitli sistemler kullanılmaktadır.

### 2.2.1. ONAN (Oil Natural Oil Natural)

Transformatör içindeki yağ ve dış ortamdaki hava akışı konveksiyon ile sağlanır. Çekirdek ve sargıda açığa çıkan ısı nedeniyle yükselen yağ sıcaklığı, yağın yukarı yönde hareket ederek radyatör içine akışını sağlar. ONAN soğutma metodunda, ısı radyatörlerden doğal konveksiyon ile atılır.

### 2.2.2. ONAF (Oil Natural Air Forced)

ONAF soğutma metodunda, radyatör yüzeyinde konveksiyon ile gerçekleşen ısı transferini arttırmak amacı ile fanlar kullanılır. Zorlanmış hava radyatör yüzeyinde gerçekleşen ısı transferini artırır.

## 3. TRANSFORMATÖR YAĞ TIPLERİ

Genel olarak transformatörlerde kullanılan yağ tipleri kimyasal özelliklerine göre 3 gruba ayrılabilir:

1. Mineral Yağlar
2. Silikon Yağlar
3. Ester Yağlar (Doğal ester yağlar, sentetik yağlar)

Bu çalışmada ester yağ, silikon yağ, mineral yağ ve sentetik yağ tiplerinin farklı giriş hızlarına göre radyatördeki akışı ve ısı transfer kapasiteleri incelenmiştir. Transformator yağlarına ait yoğunluk, ısı sıçması, ısıl iletkenlik ve viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı denklemleri MathCAD yazılımı kullanılarak bulunmuştur.

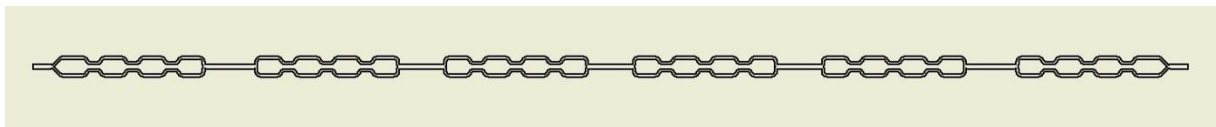
#### 4. SAYISAL ÇÖZÜM METODU

Sonlu hacimler yöntemi ile yapılan sayısal çözümleme basamakları aşağıdaki gibidir:

1. Geometrinin oluşturulması
2. Ağ yapısının oluşturulması
3. Çözücünün seçilmesi
4. Akış modelinin seçilmesi
5. Malzeme özelliklerinin tanımlanması
6. Sınır koşullarının tanımlanması
7. Çözüm metodlarının belirlenmesi
8. Çözüm kontrol faktörlerinin belirlenmesi
9. Çözümleme
10. Sonuçların değerlendirilmesi

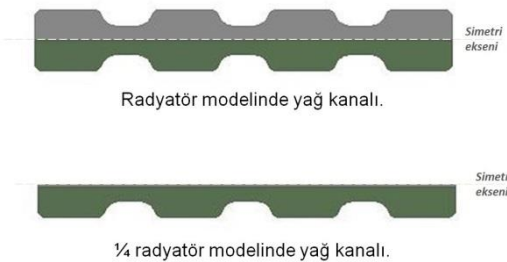
##### 4.1. Model oluşturma

3200 mm uzunluğunda ve 520 mm genişliğinde radyatör modeli Catia V5 çizim programında modellenmiş, transformator yağının akış ve ısı transferi analizleri ANSYS Fluent simülasyon programında tamamlanmıştır. 6 adet yağ kanalından oluşan akışkan hacmi ANSYS Design Modeler modülünde oluşturulmuştur. Radyatör yağ kanalları kesiti Şekil 2' de görülmektedir. 1.2 mm kalınlığındaki radyatör sacında gerçekleşen ısı iletimi ve dış ortamdaki havanın davranışı incelenmeyeceği için dış ortam bu çalışmada modellenmemiştir.

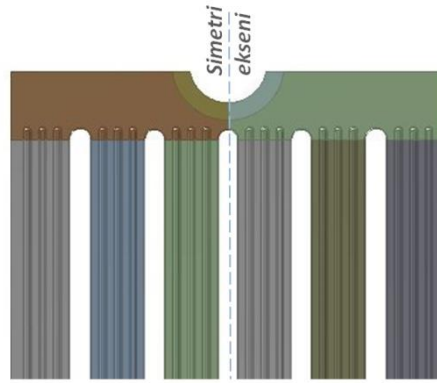


Şekil 2. Radyatör yağ kanalları.

Eleman sayısını azaltarak ağ yapısını basitleştirmek ve çözüm süresini düşürmek amacı ile Şekil 3 ve Şekil 4'te görülen simetri eksenleri kullanılarak çeyrek radyatör modeline ait akış hacmi oluşturulmuştur. Oluşturulan bir yağ kanalı kesiti Şekil 3'teki gibidir.



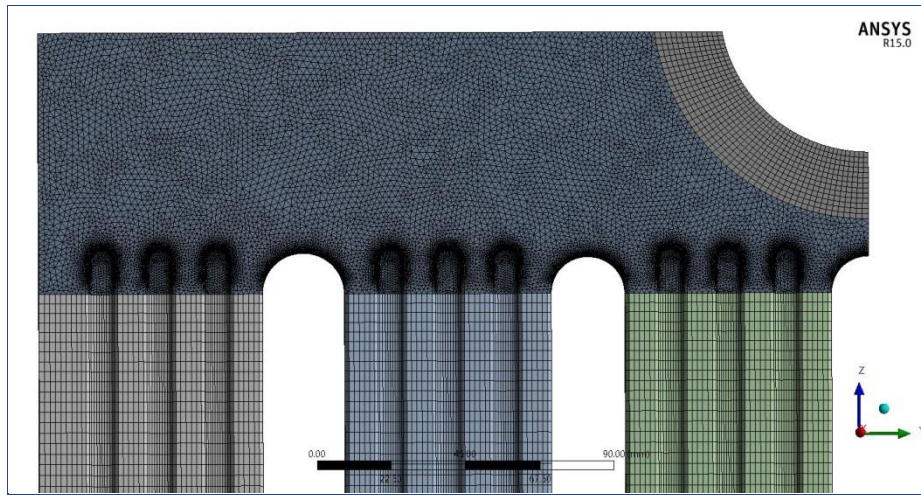
Şekil 3. Yağ kanalı kesiti.



Şekil 4. Simetri eksenini

#### 4.2. Ağ Yapısı

Oluşturulan ¼ radyatör modeli, giriş, çıkış ve kanallar olmak üzere ayrılarak, Şekil 5'te görüldüğü gibi Fluent Mesh modülünde farklı tipte elemanlar kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Giriş, çıkış ve kanallar için dörtgen elemanlardan oluşan Sweep Mesh, kalan parçalar için üçgen elemanlardan oluşan ağ yapısı kullanılmıştır. Çeyrek akışkan hacmi 2143041 elemandan oluşmaktadır.



Şekil 5. Radyatör ağ yapısı.

Yağ kanallarında, akışı yönlendirmek ve eleman sayısını azaltmak amacı ile 'Bias' özelliği kullanılan 'Sweep Mesh' ağ yapısı oluşturulmuştur. Kanal boyunca ilerleyen yağın akış doğrultusu düşey yönde olacağından; giriş ve çıkışa yakın bölgelere doğru küçülen elemanlardan oluşan 'Bias' metodu kullanılmıştır.

#### 4.3. Çözücü

Sıvılarda sıkıştırılabilirlik etkisi çok az olduğu için göz ardı edilerek basınç tabanlı (pressure based) çözücü seçilmiştir.

#### 4.4. Akış

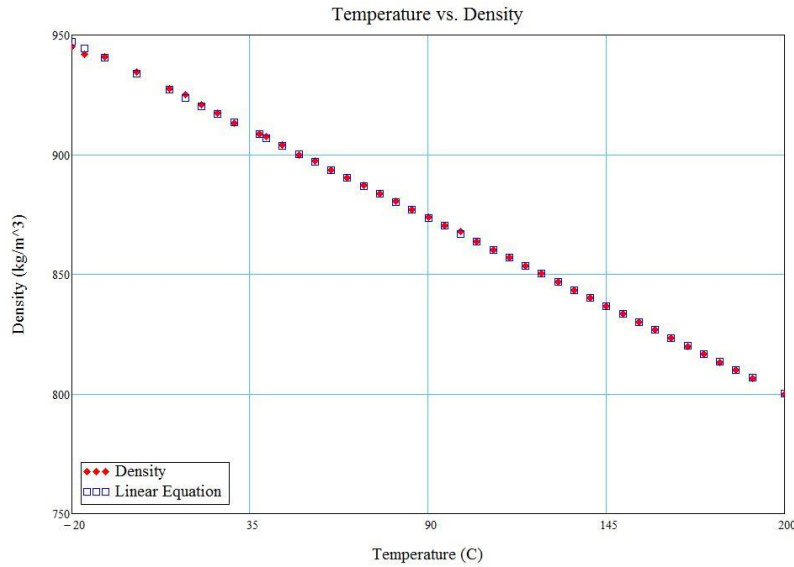
Giriş ve çıkış kesit alanlarının eşit olduğu modelde, giriş hızı sabit tanımlandığı için radyatör giriş ve çıkışında kütleli debi eşittir. Akışın herhangi bir noktasındaki hız zamana bağlı olarak değişmediği

için kararlı rejim kabul edilmiştir. Akışkan kararlı rejim durumunda  $\partial u/\partial t = 0$  ve  $\partial P/\partial z = dP/dz$  olarak Navier-Stokes enerji denklemlerinde hesaplamalara katılır.

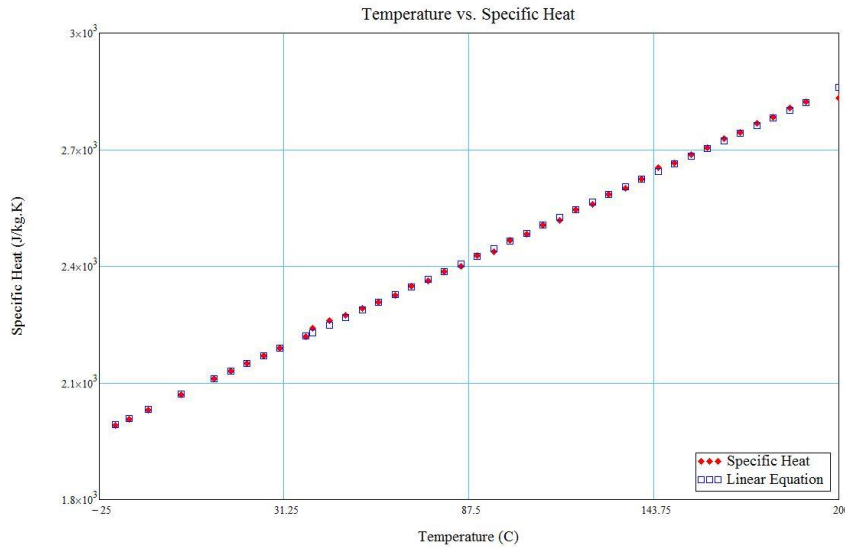
Çalışmada modellenen radyatör geometrisinde, transformatör yağının aktığı en büyük kanal kalınlığı 9.1mm' dir. Transformatör yağları yüksek viskozite özelliği gösterir. Yüksek viskoziteli transformatör yağının, radyatöre giriş hızına göre akışı laminer kabul edilmiştir [2] , [3]. Radyatör yüzeyi pürüzsüz ve geometri basitleştirilmiştir. Yer çekimi ivmesi (-)z yönünde  $9.81\text{m/s}^2$  olarak belirlenmiştir.

#### 4.5. Malzeme Özellikleri

Transformatör yağlarına ait yoğunluk, ısı sıçası, ısı iletkenlik ve viskozite değerleri sıcaklığa bağlı olarak ANSYS Fluent malzeme özelliklerinde tanımlanmıştır. Transformatör yağının yoğunluk, ısı sıçası ve ısı iletkenlik özellikleri Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de görüldüğü gibi doğrusal eğilim gösterirken, viskozite değerlerindeki değişim Şekil 9'da görüldüğü gibi üssel olarak ifade edilmektedir. Yoğunluk, ısı sıçası ve ısı iletkenlik değerlerine uygun eğri uydurma en küçük kareler yöntemi ile elde edilmiştir. St 1203 radyatör sacının yoğunluk, ısı sıçası ve ısı iletkenlik malzeme özellikleri sabit değerlerde tanımlanmıştır.

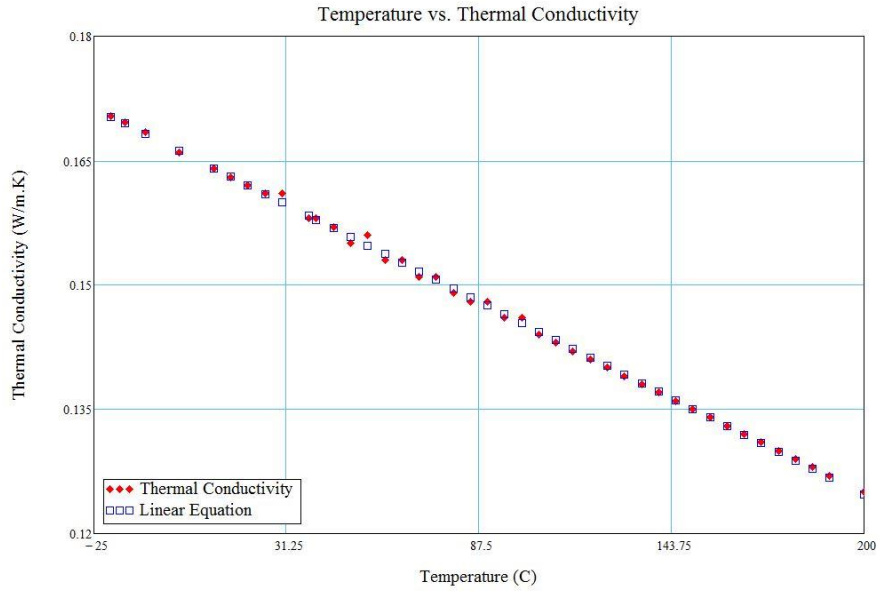


Şekil 6. Ester bazlı bir transformatör yağına ait sıcaklık – yoğunluk grafiği.

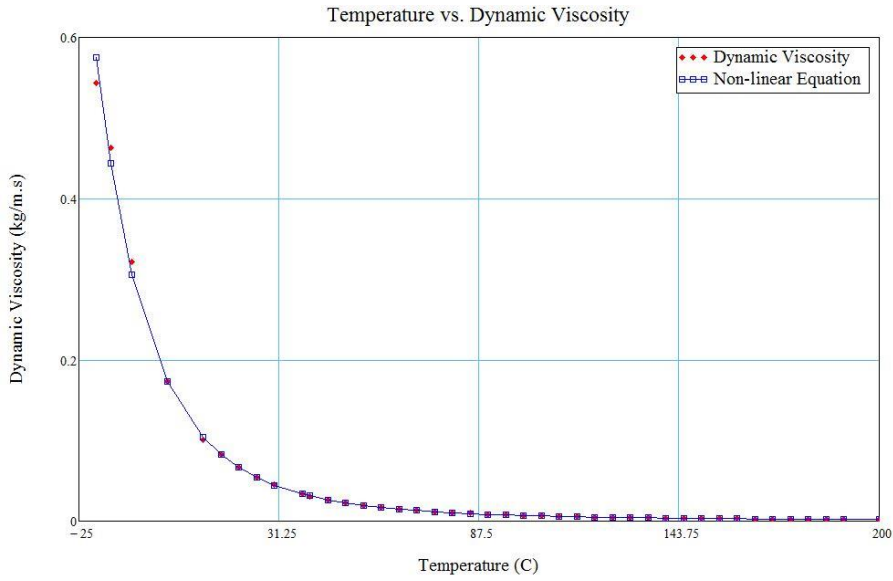


Şekil 7. Ester bazlı bir transformatör yağına ait sıcaklık – ısı sıçası grafiği.





Şekil 8. Ester bazlı bir transformör yağına ait sıcaklık – ısı iletkenlik grafiği.



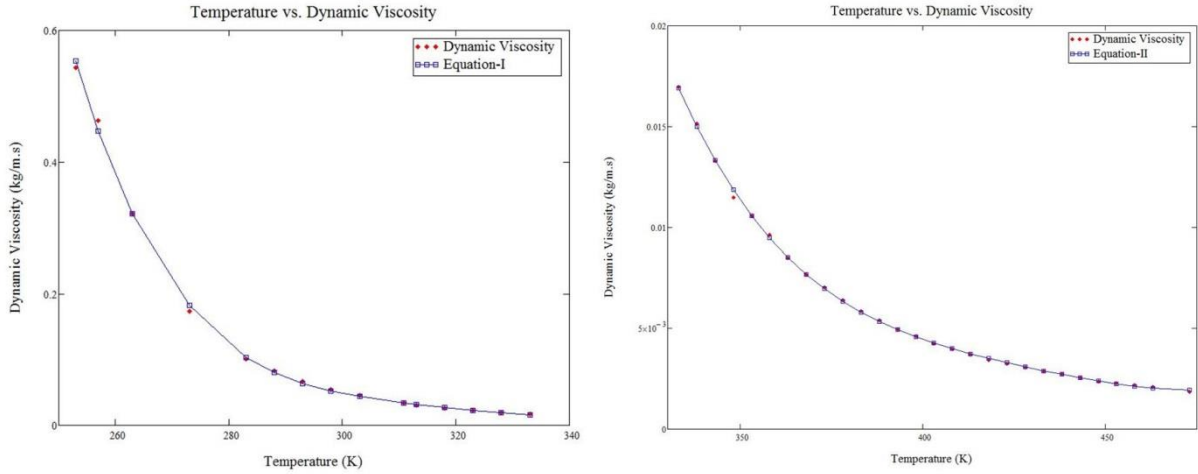
Şekil 9. Ester bazlı bir transformör yağına ait sıcaklık – viskozite eğrisi.

Levenberg – Marquardt metodu ile elde edilen lineer olmayan viskozite değerlerine uygun eğriye ait sıcaklığa bağlı viskozite denklemi aşağıda görülmektedir.

$$\mu_{ester\ yağı}(T) = e^{\left[-20.722 + \frac{1.689 \cdot 10^4}{T+273.15} - 8.02 \cdot 10^6 \left(\frac{1}{T+273.15}\right)^2 + 1.849 \cdot 10^9 \left(\frac{1}{T+273.15}\right)^3 - 1.453 \cdot 10^{11} \left(\frac{1}{T+273.15}\right)^4\right]} \quad (1)$$

(1) eşitliğinde  $\mu_{ester\ yağı}$  (kg/m.s) sıcaklığa bağlı dinamik viskoziteyi, T (°C) sıcaklığı ifade etmektedir. Transformör yağının sıcaklığa bağlı viskozite denklemi, Fluent simülasyon programında UDF (User Defined Function) olarak ifade edilen çeşitli kodların yazımı ile tanımlanabilir.

Bu çalışmada, sıcaklığa bağlı viskozite değerleri, 'piecewise-polynomial' malzeme tanımlama özelliği kullanılarak, mevcut viskozite eğrisinde iki sıcaklık aralığı oluşturularak hesaplamalarda kullanılmak üzere malzeme kütüphanesine eklenmiştir. Şekil 10'da görüldüğü gibi ester transformatör yağının viskozite eğrisinde 253 K ile 333 K sıcaklık aralığındaki ve 333 K ile 473 K sıcaklık aralığındaki değerlere uygun eğriler oluşturulmuştur.



Şekil 10. Sıcaklık – dinamik viskozite eğrileri.

#### 4.6. Sınır Koşulları

Çeyrek akışkan hacmi modellenerek simetri yüzeyleri tanımlanmıştır. Radyatör analizleri farklı hız değerleri için farklı yağlarda meydana gelen basınç kayıplarının incelenmesi amacı ile 0.02m/s, 0.03m/s, 0.04m/s ve 0.05m/s hızlarında gerçekleştirilmiştir. ONAN soğutma tipinde bir transformatörün maksimum üst yağ sıcaklığı olarak standartlarda tanımlanmış olan 80°C radyatöre giriş sıcaklığı olarak ve dış ortam sıcaklığı 25°C olarak kabul edilmiştir. Giriş hızı, çıkış basıncı, simetri yüzeyi ve radyatör duvarı tanımlanmıştır. Radyatör yüzeyinde ısı transfer katsayısı 6W/m<sup>2</sup>.K olarak kabul edilmiştir.

#### 4.7. Çözüm Metotları

Akış ve ısı transferi, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) çözüm algoritması ile hesaplanmıştır. Kararlı rejim problemlerinde SIMPLE çözüm metodunu kullanmak uygundur. Hız bileşenleri momentum denkleminin çözümü ile hesaplanır. Giriş hızının tanımlandığı bu çalışmada, basınç dağılımı tahmini başlangıç değerlerini kullanarak, bir önceki iterasyon değerine göre hesaplanır. Elde edilen basınç dağılımından basınç farkları hesaplanarak basınç-hız bağlantısı elde edilir.

### 5. ANALİZLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Transformatör yağlarına ait analizler sonucu elde edilen basınç kayıpları ve atılan ısı miktarını gösteren tablolar aşağıdaki gibi olup, değerler çeyrek model üzerinden hesaplanmıştır. ANSYS Fluent modülünde sıcaklık birimi Kelvin olduğu için, radyatör giriş sıcaklığı 353 K olarak tanımlanmıştır.

#### 5.1. Ester Yağ

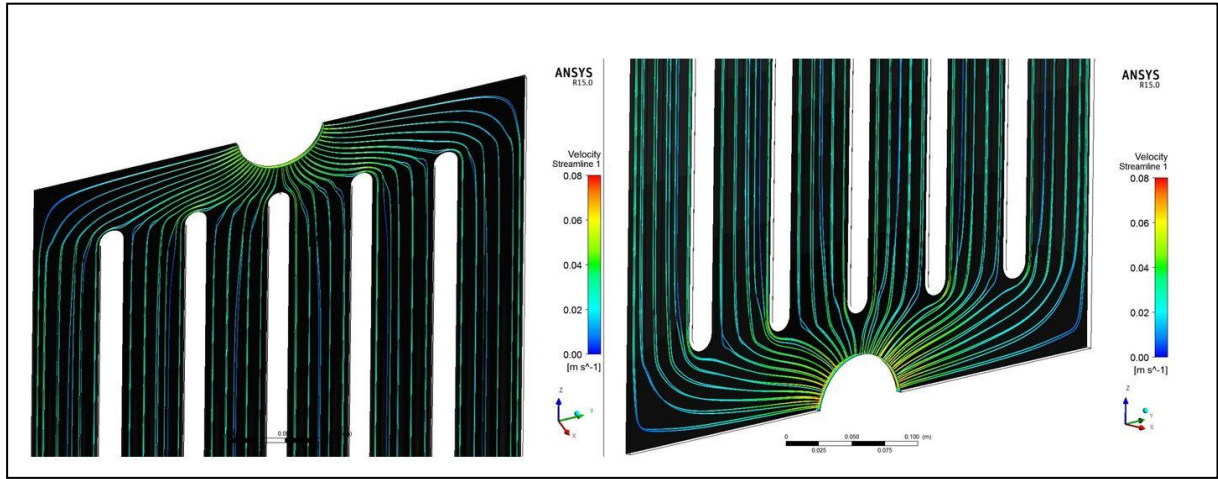
Doğal ester transformatör yağına ait hız, çıkış sıcaklığı, basınç kaybı ve ısı akısı değerleri Tablo 3'te gösterildiği gibidir.

**Tablo 3.** Ester yağ değerleri.

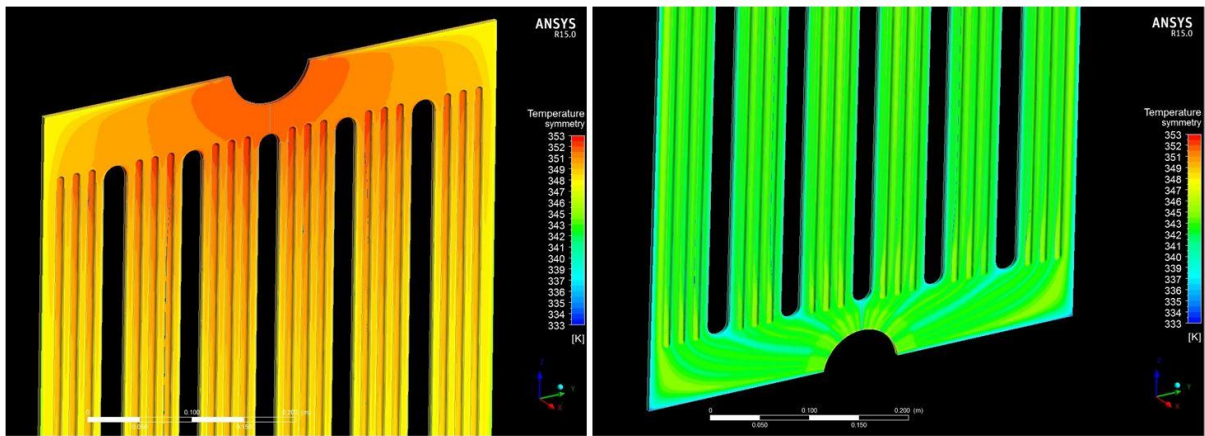
Hız	Çıkış sıcaklığı	Basınç kaybı	Isı akısı	Sıcaklık Farkı
<i>m/s</i>	<i>K</i>	<i>Pa</i>	<i>W/m<sup>2</sup></i>	<i>K</i>
0.05	345.7	190.8	284.9	7.4
0.04	344.1	159.3	280.1	8.9
0.03	341.7	127.5	272.6	11.3
0.02	337.1	94.9	258.7	15.9

0.05 m/s giriş hızı için ester bazlı transformatör yağının akım çizgileri, sıcaklık dağılımı ve basınç dağılımına ait sonuçlar aşağıdaki gibidir.

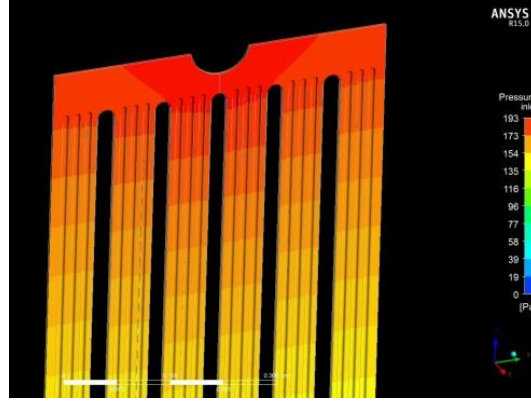
Ester bazlı transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki akım çizgileri Şekil 11’de görüldüğü gibidir.

**Şekil 11.** Ester bazlı transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki akım çizgileri.

Ester bazlı transformatör yağına ait radyatör sıcaklık dağılımı Şekil 12’de görüldüğü gibidir.

**Şekil 12.** Ester bazlı transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki sıcaklık dağılımı.

Ester bazlı transformatör yağına ait radyatör girişinde hesaplanan basınç dağılımı Şekil 13'te görüldüğü gibidir.



Şekil 13. Ester bazlı transformatör yağının radyatör girişindeki basınç dağılımı.

## 5.2. Mineral Yağ

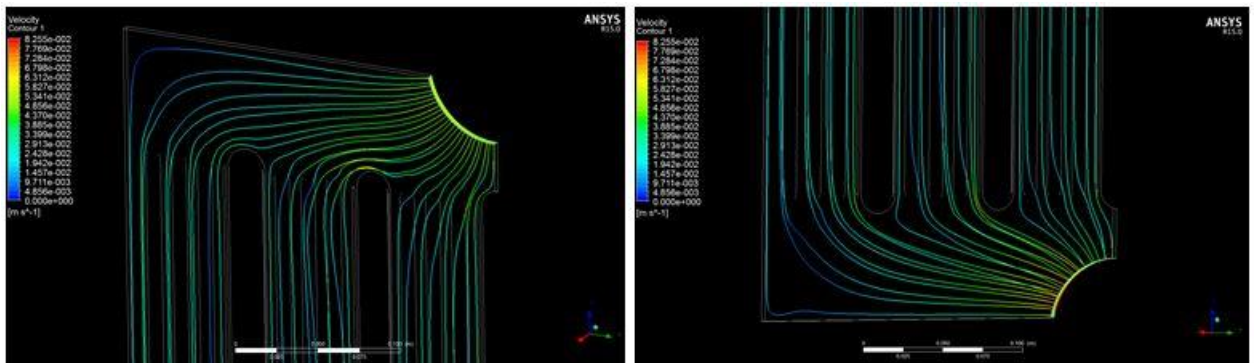
Mineral transformatör yağına ait hız, çıkış sıcaklığı, basınç kaybı ve ısı akısı değerleri Tablo 4' te gösterildiği gibidir.

Tablo 4. Mineral yağ değerleri.

Hız	Çıkış sıcaklığı	Basınç kaybı	Isı akısı	Sıcaklık Farkı
$m/s$	$K$	$Pa$	$W/m^2$	$K$
0.05	345.7	64.6	283.7	7.3
0.04	344.1	56.0	279.2	8.9
0.03	341.6	47.0	272.0	11.4
0.02	337.0	37.2	258.4	16.1

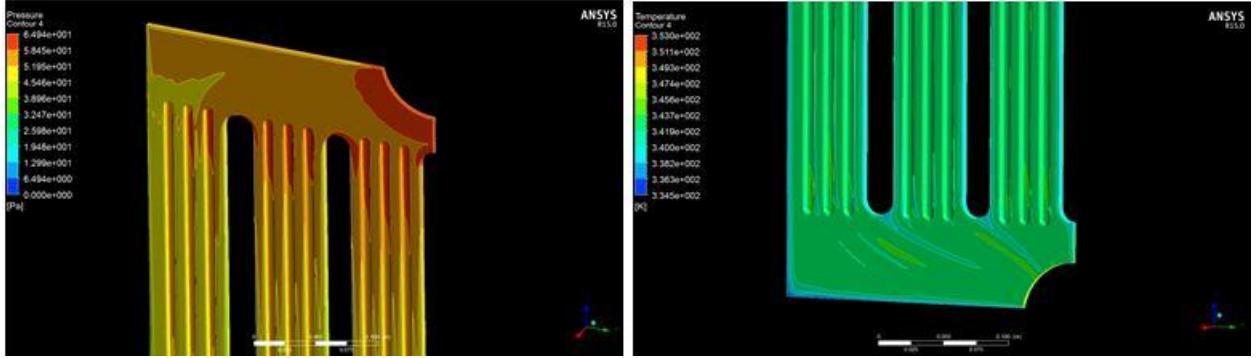
0.05 m/s giriş hızı için mineral transformatör yağının akım çizgileri, sıcaklık dağılımı ve basınç dağılımına ait sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Mineral transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki akım çizgileri Şekil 14'da görüldüğü gibidir.



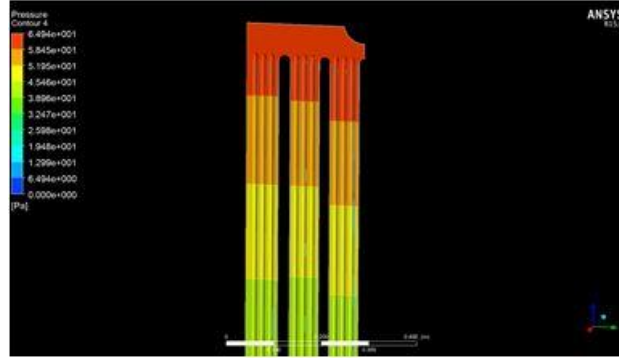
Şekil 14. Mineral transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki akım çizgileri.

Mineral transformatör yağına ait radyatör sıcaklık dağılımı Şekil 15’de görüldüğü gibidir.



Şekil 15. Mineral transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki sıcaklık dağılımı.

Mineral transformatör yağına ait radyatör girişinde hesaplanan basınç dağılımı Şekil 16’da görüldüğü gibidir.



Şekil 16. Mineral transformatör yağının radyatör girişindeki basınç dağılımı.

### 5.3. Silikon Yağ

Silikon transformatör yağına ait hız, çıkış sıcaklığı, basınç kaybı ve ısı akısı değerleri Tablo 5’te gösterildiği gibidir.

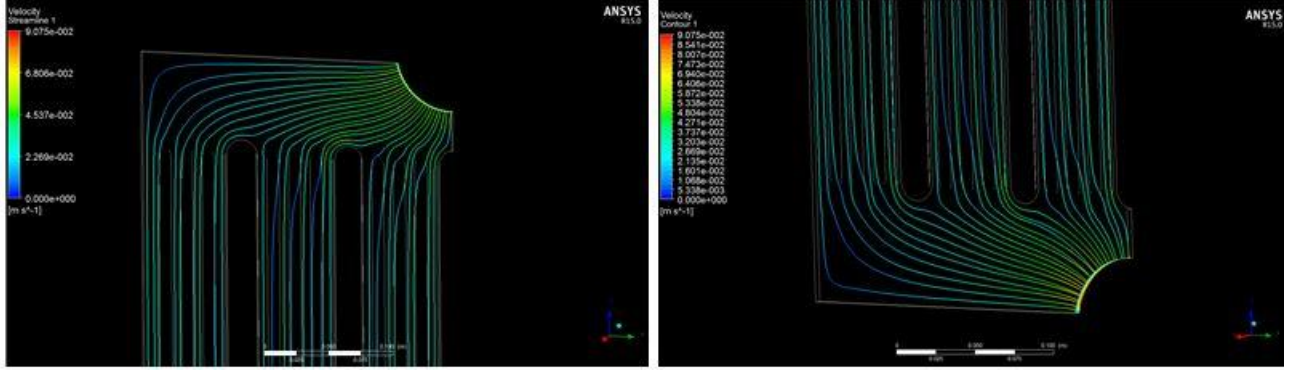
Tablo 5. Silikon yağ değerleri.

Hız	Çıkış sıcaklığı	Basınç kaybı	Isı akısı	Sıcaklık Farkı
<i>m/s</i>	<i>K</i>	<i>Pa</i>	<i>W/m<sup>2</sup></i>	<i>K</i>
0.05	343.0	312.9	275.8	10.1
0.04	340.8	260.0	269.3	12.2
0.03	337.6	206.6	259.2	15.4
0.02	331.7	151.8	240.6	21.3

0.05 m/s giriş hızı için silikon transformatör yağının akım çizgileri, sıcaklık dağılımı ve basınç dağılımına ait sonuçlar aşağıdaki gibidir.

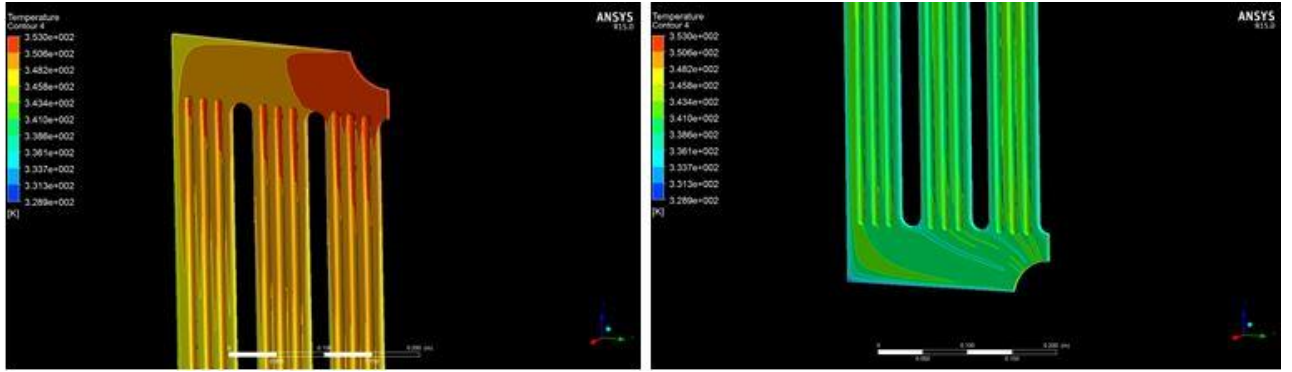
Silikon transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki akım çizgileri Şekil 17’de görüldüğü gibidir.





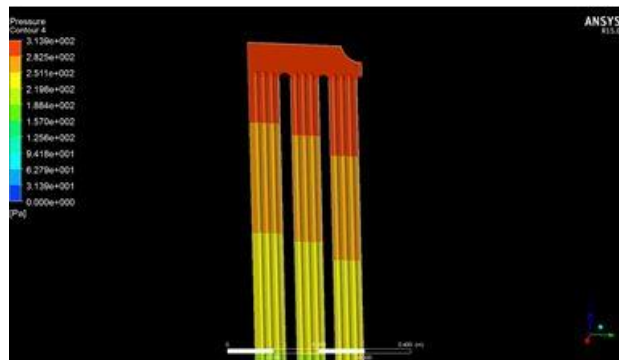
Şekil 17. Silikon transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki akım çizgileri.

Silikon transformatör yağına ait radyatör sıcaklık dağılımı Şekil 18'de görüldüğü gibidir.



Şekil 18. Silikon transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki sıcaklık dağılımı.

Silikon transformatör yağına ait radyatör girişinde hesaplanan basınç dağılımı Şekil 19'da görüldüğü gibidir.



Şekil 19. Silikon transformatör yağının radyatör girişindeki basınç dağılımı.

#### 5.4. Sentetik Yağ

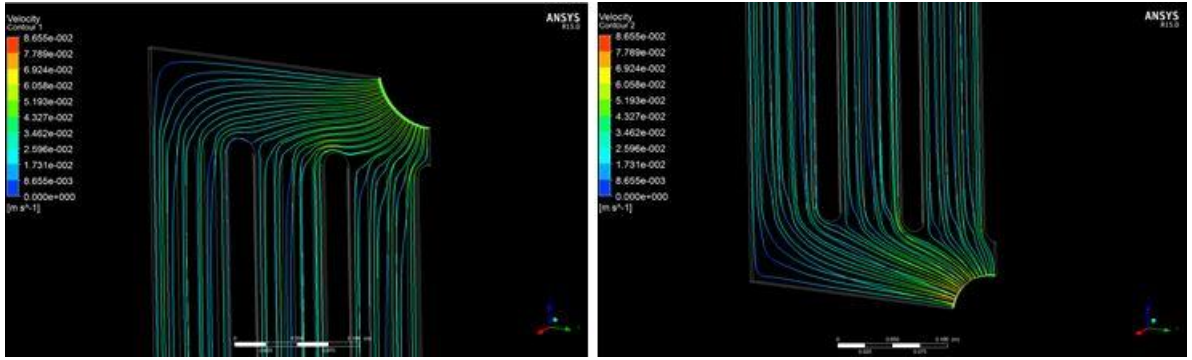
Sentetik transformatör yağına ait hız, çıkış sıcaklığı, basınç kaybı ve ısı akısı değerleri Tablo 6'da gösterildiği gibidir.

**Tablo 6.** Sentetik yağ değerleri.

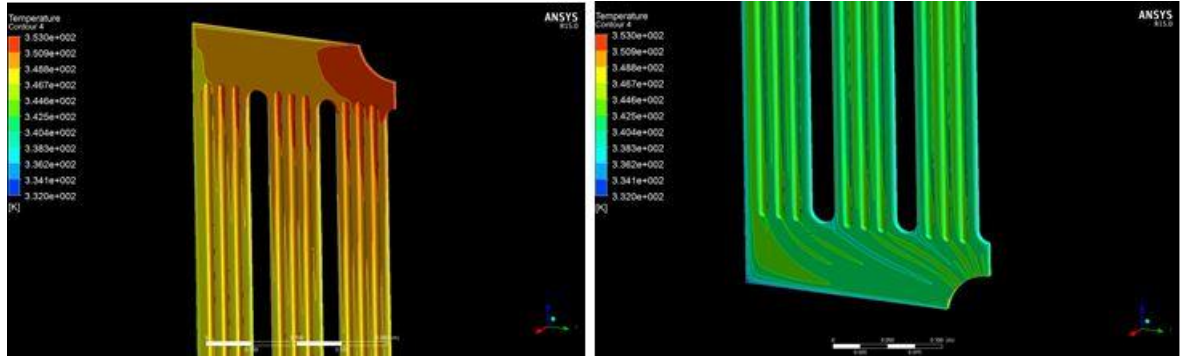
Hız	Çıkış sıcaklığı	Basınç kaybı	Isı akısı	Sıcaklık Farkı
<i>m/s</i>	<i>K</i>	<i>Pa</i>	<i>W/m<sup>2</sup></i>	<i>K</i>
0.05	345.0	148.7	281.5	8.0
0.04	343.3	126.5	276.5	9.7
0.03	340.6	103.9	268.4	12.4
0.02	335.7	80.4	253.5	17.3

0.05 m/s giriş hızı için sentetik transformatör yağının akım çizgileri, sıcaklık dağılımı ve basınç dağılımına ait sonuçlar aşağıdaki gibidir.

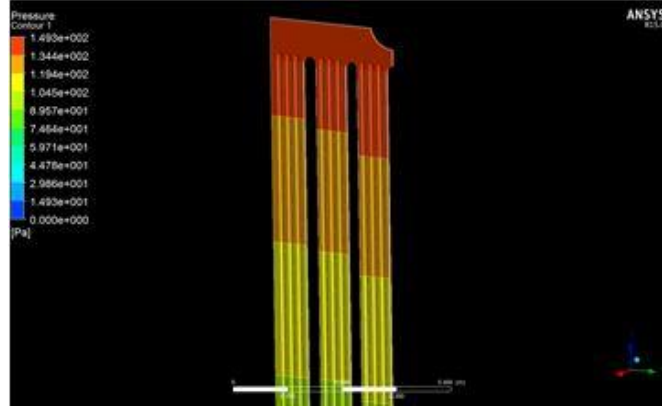
Sentetik transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki akım çizgileri Şekil 20'de görüldüğü gibidir.

**Şekil 20.** Sentetik transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki akım çizgileri.

Sentetik transformatör yağına ait radyatör sıcaklık dağılımı Şekil 21'de görüldüğü gibidir.

**Şekil 21.** Sentetik transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki sıcaklık dağılımı.

Sentetik transformatör yağına ait radyatör girişinde hesaplanan basınç dağılımı Şekil 22'de görüldüğü gibidir.



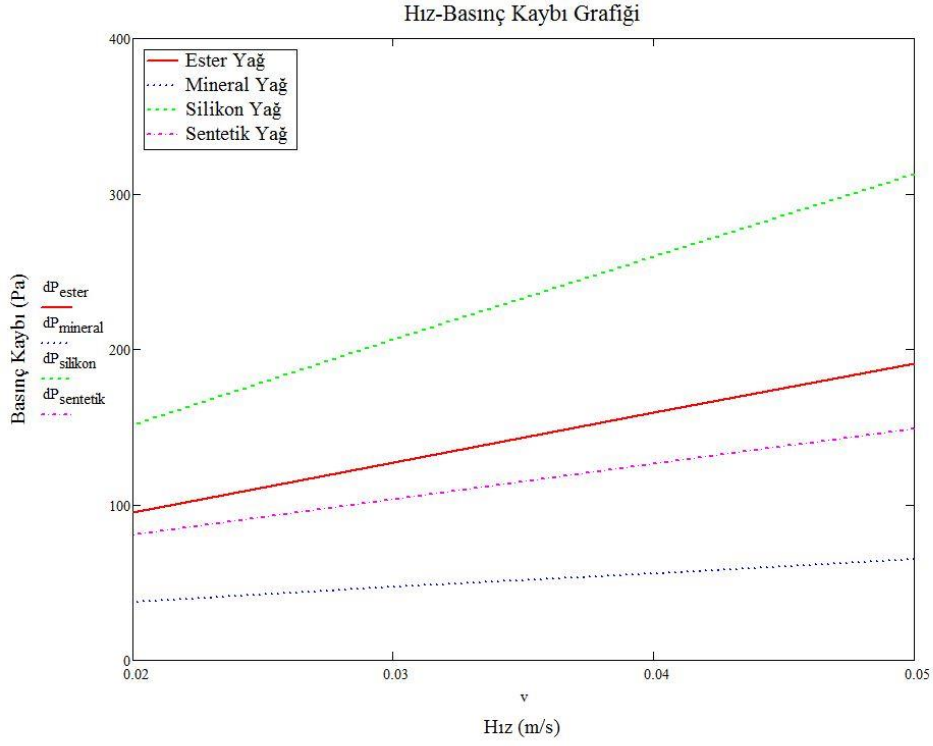
Şekil 22. Sentetik transformatör yağının radyatör girişindeki basınç dağılımı.

## 6. SONUÇ

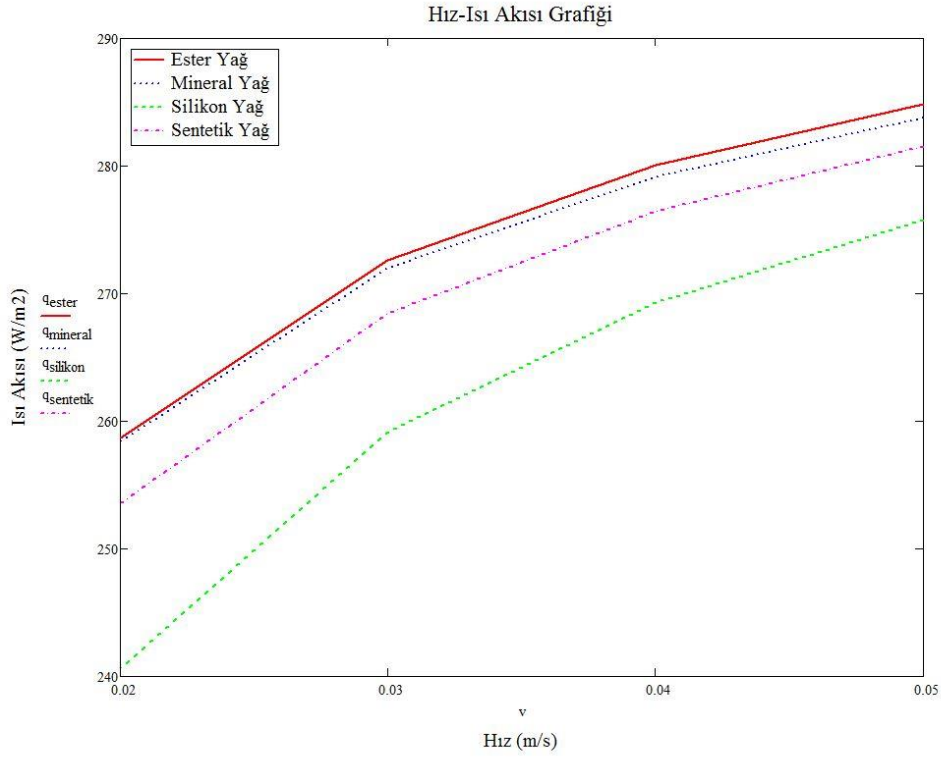
Bir güç transformatörünün HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ile termal analizinin gerçekleştirilebilmesi çok fazla eleman sayısı (ağ-mesh) gerektirmektedir. Bu yüzden, sonlu hacimler yöntemini kullanan simülasyon programları için çok yüksek kapasitede sürücüler gerekmektedir. İzolasyon malzemesinin yaşlanması, transformatör ömrünü belirleyen temel faktördür. Bir transformatörde hot-spot sıcaklık değerinin belirlenebilmesi için ağ yapısında fazla sayıda elemana ihtiyaç duyulur. Bu yüzden, radyatörlerin hız-basınç kaybı eğrilerinin oluşturularak transformatör analizlerinde bir filtre olarak tanımlanması gerekmektedir. Transformatörlerin termal analizlerinde kullanılmak üzere, farklı özelliklerdeki transformatör yağlarının hız-basınç kaybı eğrileri oluşturulmuştur.

Bu çalışma sonucu transformatör hot-spot sıcaklık değerlerinin hesaplanabileceği çözüm algoritmasının oluşturulmasındaki ilk adım tamamlanmıştır. Aşağıda görüldüğü gibi hız-basınç kaybı ve hız-ısı akısı grafikleri MathCAD programı yardımı ile oluşturulmuştur. Şekil 23'te transformatör yağlarına ait hız-basınç kaybı eğrileri ve Şekil 24'te transformatör yağlarına ait hız-ısı akısı eğrileri verilmiştir. Silikon yağda basınç kaybının en fazla olduğu görülmektedir. En az basınç kaybı ise mineral yağlarda meydana gelmektedir. Ester yağ ile mineral yağda ısı akısının yaklaşık olarak aynı olduğu gözlenmiştir. Sentetik yağ ise en düşük ısı transfer hızına sahiptir. Şekil 23 ve Şekil 24'te görüldüğü gibi ortalama basınç kaybının görüldüğü ester yağın ısı transfer hızı diğerlerinden yüksektir. En az basınç kaybı ve en yüksek ısı akısına sahip olmasına karşın, çevreye olan zararlı etkilerinden dolayı; mineral yağlara alternatif olarak ester yağların kullanımının uygun olduğu söylenebilir.





**Şekil 23.** Hız – basınç kaybı grafiği.



**Şekil 24.** Hız – ısı akısı grafiği.

Elde edilen sonuçlara göre silikon transformatör yağının ısı atma kabiliyetinin diğer yağlardan daha düşük olduğu görülmektedir. Son yıllarda geliştirilen ester bazlı transformatör yağının çevre dostu olmasının yanında, ısı atma kabiliyetinin de yüksek olduğu belirlenmiştir. Mineral yağların ısı atma kabiliyetleri yüksek olmasına rağmen, çevreye olan olumsuz etkilerinden dolayı yerleşim merkezlerine yakın bölgelerde bulunan transformatörlerde kullanımı tercih edilmemelidir.

Avrupa ülkelerinde, Amerika Birleşik Devletleri'nde ve son yıllarda ülkemizde kurulan rüzgâr türbinlerinde ve gökdelenlerde ve yerleşime yakın bölgelerde yüksek parlama noktasına sahip oldukları için ester bazlı veya sentetik transformatör yağları tercih edilmektedir. Günümüze kadar mineral yağ ile soğutulması talep edilen transformatörler, son yıllarda farklı tip (ester, sentetik v.b.) ve düşük sıcaklıkta viskozitesi yüksek yağ tipleri ile soğutulması talep edilmektedir.

Bu çalışma, ONAN soğutma tipinde, tam yükte çalışmakta olan bir transformatörde bulunan radyatör dilimindeki kararlı akış davranışını ve radyatör diliminde farklı yağ tiplerinin kullanımının akışa etkisini belirlemek amacı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma yöntemi kullanılarak 'cold-start' olarak adlandırılan düşük sıcaklıklarda çalışmaya başlayan bir transformatörde mevcut radyatör akış kanalı incelemeleri gerçekleştirilecektir. Simülasyon sonuçlarına göre radyatör kanal ölçüleri ve geometrisinde yapılması gereken iyileştirmeler belirlenecektir. Çalışmalar bir transformatörde ısı dağılımını ve hot-spot sıcaklıklarını belirlemek üzere birçok dilimden oluşan radyatör gruplarının analizleri ile devam edecektir. Radyatörde olduğu gibi transformatör sargısında da yağ kanalları bulunmaktadır. Sargı içindeki kanallarda gerçekleşen yağ akışı ve ısı transferi belirlenecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] HOCHART, B., "Power Transformer Handbook", Butterworths, 1987.
- [2] KARSAI, K., KERÉNYI, D. & KISS, L., "Large Power Transformers", Elsevier Science Publishers, 1987.
- [3] CENGEL, Y.A. & CIMBALA, J. M., "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications", McGraw-Hill Companies, Inc. 2010.
- [4] International Electrotechnical Committee, IEC 60076-7. "Power Transformers – Loading guide for oil-immersed power transformers"., 2005.

## ÖZGEÇMİŞ

### Özben KAYMAZ

Doğu Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2011 yılında mezun olmuştur. 2011 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Enerji Mühendisliği Bölümü' nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2012 yılında BEST A.Ş. (Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri A.Ş.)' de çalışmaya başlayarak, Ar-Ge Termal ve CFD Analiz Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.

### Gökhan KALKAN

2007 yılında Manchester Üniversitesi' nde yüksek lisans eğitimini birincilikle tamamlamış, 2012 yılında Imperial College London' dan doktor unvanını almıştır. 2002 yılında BEST A.Ş. (Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri A.Ş.)' de çalışma hayatına başlamış ve halen BEST A.Ş.'de Ar-Ge Merkezi Müdürü olarak görevine devam etmektedir. Çalışma konuları; güç transformatörlerinde kullanılan selülöz malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri, elektromanyetik olarak yüklenen cisimlerin yapısal bütünlüğü, kompozit malzemeler, yüksek gerilim altında çalışan elektromekanik cisimlerin elektriksel analizleri ve coupled manyetik alan-mekanik analizleridir.

**Tahsin BAŞARAN**

Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur ve aynı üniversiteden 1995 yılında yüksek mühendis, 2002 yılında ise doktor unvanını almıştır. 1993 – 2010 yılları arasında aynı üniversitede araştırma görevlisi ve yardımcı doçent olarak çalışmış, ardından da 2010 yılı itibariyle İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mimarlık Bölümü'nde yardımcı doçent olarak çalışmalarına devam etmiştir. 2012 yılından itibaren doçent olarak aynı bölümde görevine devam etmektedir. Çalışma konuları; binalarda ısı transferi ve akışı, bina enerji performansı, ısı enerji depolama ve ısı konfor üzerinedir.

**Aytunç EREK**

1966 yılı İzmir doğumludur. 1989 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü, Termodinamik ABD' dan 1993 yılında yüksek lisans ve 1999 yılında doktora derecelerini almıştır. 2014 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Prof. unvanını alarak, görevine devam etmektedir. Sayısal akışkanlar mekaniği, faz değişimli ısı transferi uygulamaları, katı modelleme ve ısı analiz konularında çalışmaktadır.

