

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

**Özben Kaymaz\*\***

Balikesir Elektromekanik San. Tes. A.Ş.,  
Balikesir  
ozben.kaymaz@besttransformer.com

**Gökhan Kalkan**

Balikesir Elektromekanik San. Tes. A.Ş.,  
Balikesir  
gokhan.kalkan@besttransformer.com

**Tahsin Başaran**

Doç. Dr.,  
İzmir Institute of Technology,  
Energy Engineering Program, İzmir  
tahsinbasaran@iyte.edu.tr

**Aytunç Ereğ**

Prof. Dr.,  
Dokuz Eylül Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Termodinamik Anabilim Dalı, İzmir  
aytunc.erek@deu.edu.tr

## ÖZ

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 değerini altında tutulmaktadır. Transformatörler, sıcaklığı belirli bir değerin altında tutmak için transformatörlere özel bir yağ ile soğutulmaktadır. Büyük güç transformatörlerinde doğal taşınım ile soğutmayı 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

## FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF DIFFERENT TRANSFORMER OILS IN ONE SECTION OF TRANSFORMER RADIATOR

### 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 behaviour 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.

**Keywords:** Transformer, transformer oil, transformer radiator, CFD

\*\* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 08.06.2015  
Kabul tarihi : 25.06.2015

\* 8-11 Nisan 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İzmir'de düzenlenen 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi'nde sunulan bildiri, dergimiz için yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Kaymaz, Ö., Kalkan, G., Başaran, T., Ereğ, A. 2015. "Bir Dilim Transformatör Radyatöründe Akış ve Isı Transferinin Farklı Yağ Tipleri Kullanılarak İncelenmesi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 666, s. 53-62.

## 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 ise 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]

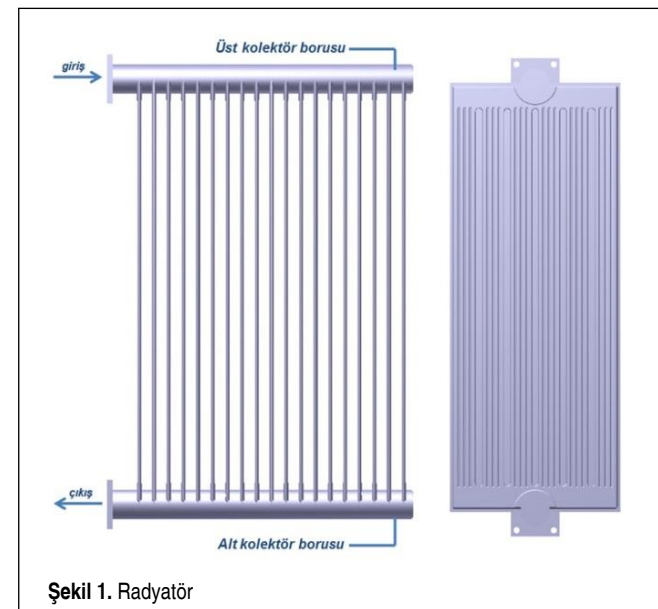
Sirkülasyon Tipi	Sembol
Doğal	N
Zorlanmış	F
Yönlendirilmiş	D

### 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 ko-



Şekil 1. Radyatör

lektör borusundan radyatöre girer ve soğutulmuş alt kolektör borusundan kazana geri verilerek yağ sirkülasyonu sağlanır.

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

### 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.

### 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:

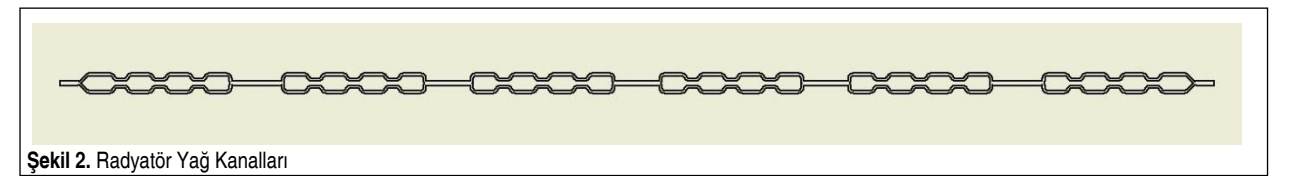
1. Mineral Yağlar
2. Silikon Yağlar
3. Ester Yağlar (Doğal Ester Yağlar, Sentetik Yağlar)

Bu çalışmada, ester yağ, silikon yağ, mineral yağ ve sentetik yağ tiplerinin farklı giriş hızlarına göre radyatördeki akışı ve ısı transfer kapasiteleri incelenmiştir. Transformatör 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

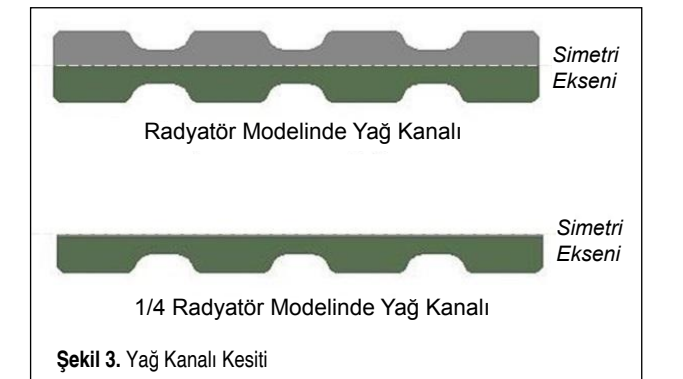


Şekil 2. Radyatör Yağ Kanalları

9. Çözümleme
10. Sonuçların değerlendirilmesi

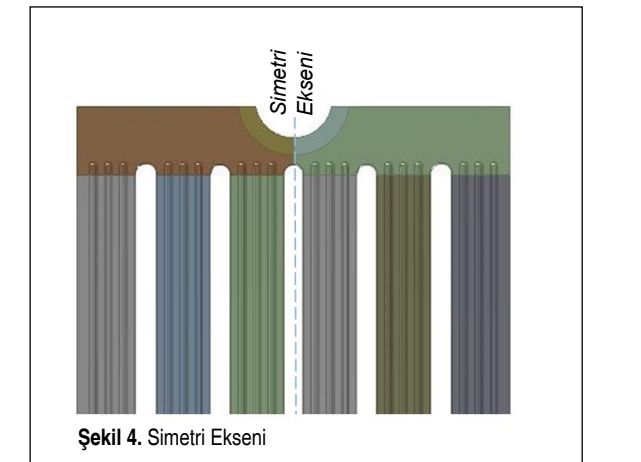
### 4.1 Model Oluşturma

3200 mm uzunluğunda ve 520 mm genişliğinde radyatör modeli, Catia V5 çizim programında modellenmiş; transformatör yağının akış ve ısı transferi analizleri ise 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 gerçekleştirilen ısı iletimi ve dış ortamdaki havanın davranışı incelenmeyeceği için dış ortam bu çalışmada modellenmemiştir.



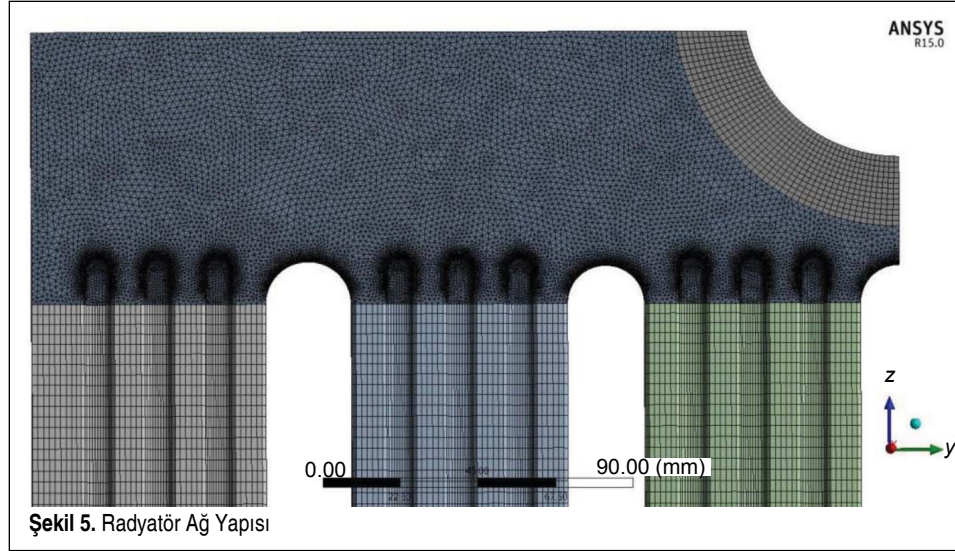
Şekil 3. Yağ Kanalı Kesiti

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 4. Simetri Eksenleri





Şekil 5. Radyatör Ağ Yapısı

doğrultusu düşey yönde olacağından, giriş ve çıkışa yakın bölgelerde 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

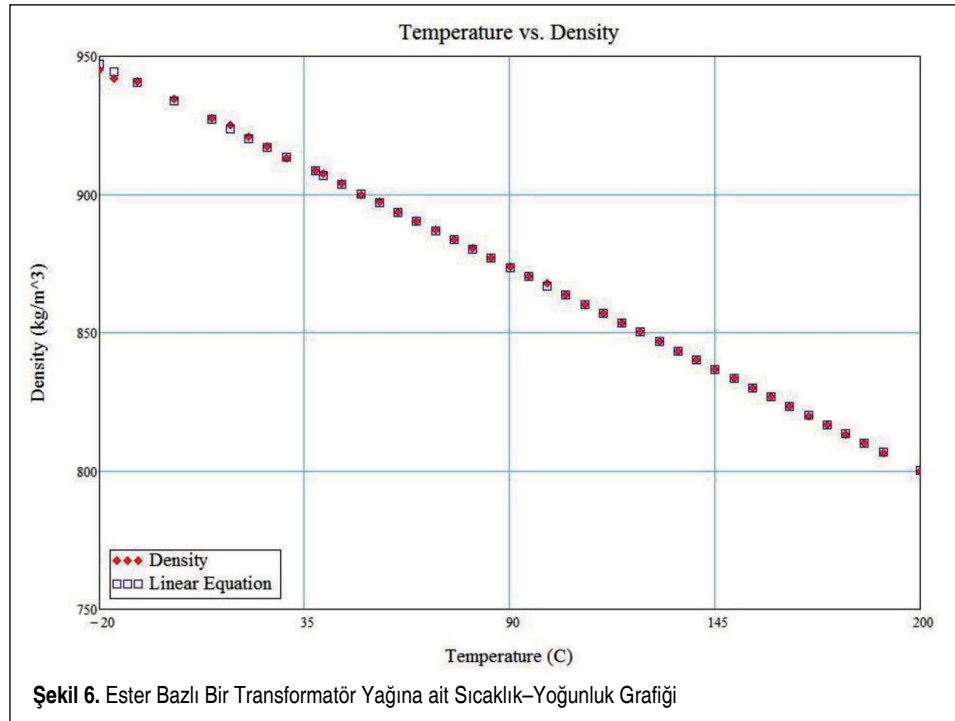
Giriş ve çıkış kesit alanlarının eşit olduğu modelde, giriş hızı sabit tanımlandığı için radyatör giriş ve çıkışında kütleli debi eşittir. Akışın herhangi bir noktasındaki hız, zamana bağlı olarak değişmediği için kararlı rejim kabul edilmiştir. Akışkan kararlı rejim durumunda,  $\partial\mu/\partial t=0$  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 sığası, ısı iletkenlik ve viskozite değerleri sıcaklığa bağlı olarak ANSYS Fluent malzeme özelliklerinde tanımlanmıştır. Transformatör yağının yoğunluk, ısı sığası 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 sığası ve ısı iletkenlik değerlerine uygun eğri uydurma en küçük kareler yöntemi ile elde edilmiştir. St 1203 radyatör sacının yoğunluk, ısı sığası ve ısı iletkenlik malzeme özellikleri sabit değerlerde tanımlanmıştır.

Levenberg–Marquardt metodu ile elde edilen lineer olmayan

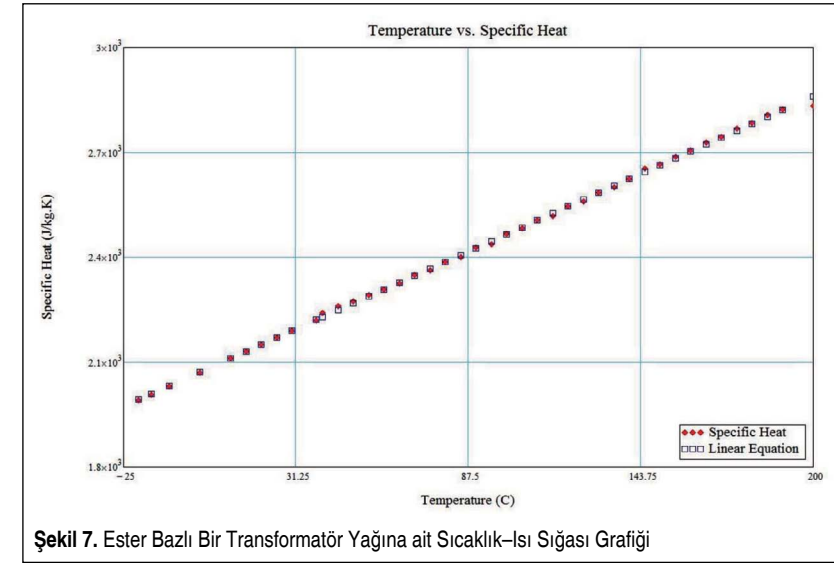


Şekil 6. Ester Bazlı Bir Transformatör Yağına ait Sıcaklık–Yoğunluk Grafiği

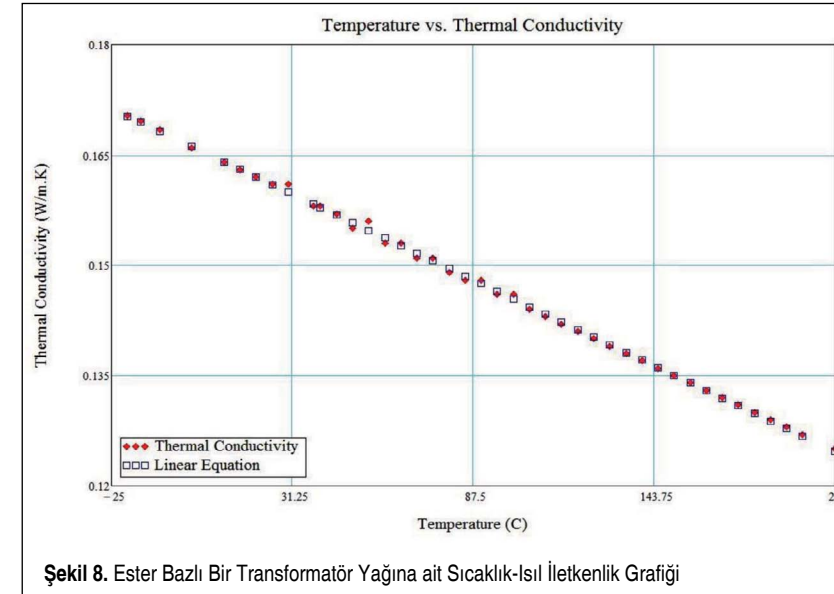
#### 4.2 Ağ Yapısı

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.

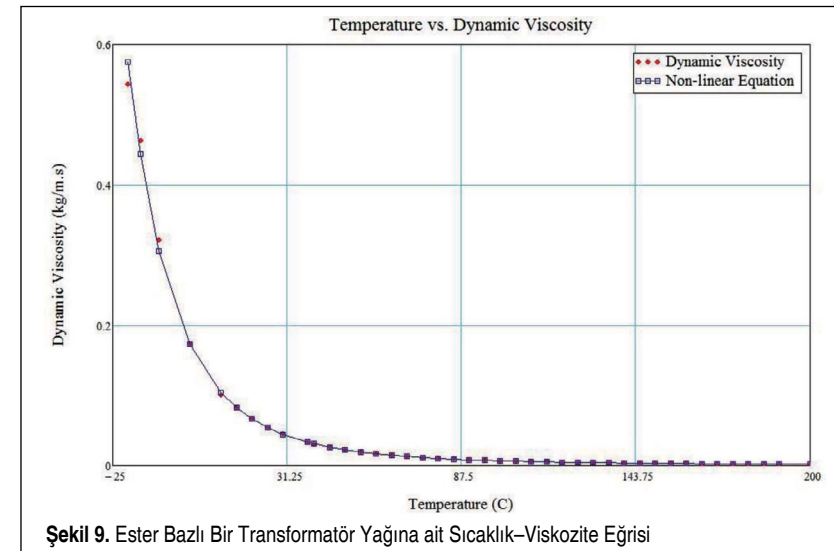
Yağ kanallarında, akışı yönlendirmek ve eleman sayısını azaltmak amacı ile ‘Bias’ özelliği kullanılan ‘Sweep Mesh’ ağ yapısı oluşturulmuştur. Kanal boyunca ilerleyen yağın akış



Şekil 7. Ester Bazlı Bir Transformatör Yağına ait Sıcaklık–Isı Sığası Grafiği



Şekil 8. Ester Bazlı Bir Transformatör Yağına ait Sıcaklık–Isıl İletkenlik Grafiği



Şekil 9. Ester Bazlı Bir Transformatör Yağına ait Sıcaklık–Viskozite Eğrisi

viskozite değerlerine uygun eğriye ait sıcaklığa bağlı viskozite denklemi aşağıda görülmektedir.

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

eşitliğinde  $\mu_{\text{ester yağ}}$  (kg/m.s) sıcaklığa bağlı dinamik viskoziteyi; T (°C), sıcaklığı ifade etmektedir. Transformatör 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.

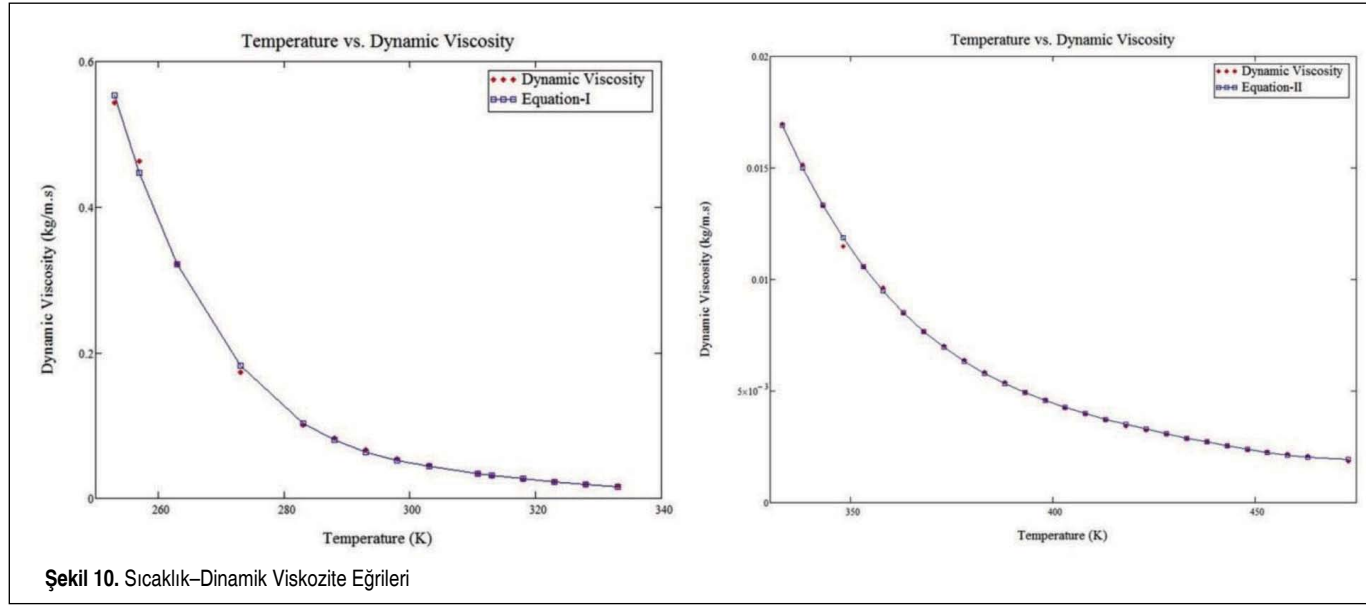
#### 4.6 Sınır Koşulları

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  $6\text{W/m}^2\text{K}$  olarak kabul edilmiştir.

#### 4.7 Çözüm Metotları

Akış ve ısı transferi, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) çözüm algoritması ile hesaplanmıştır. Kararlı





Şekil 10. Sıcaklık–Dinamik Viskozite Eğrileri

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.

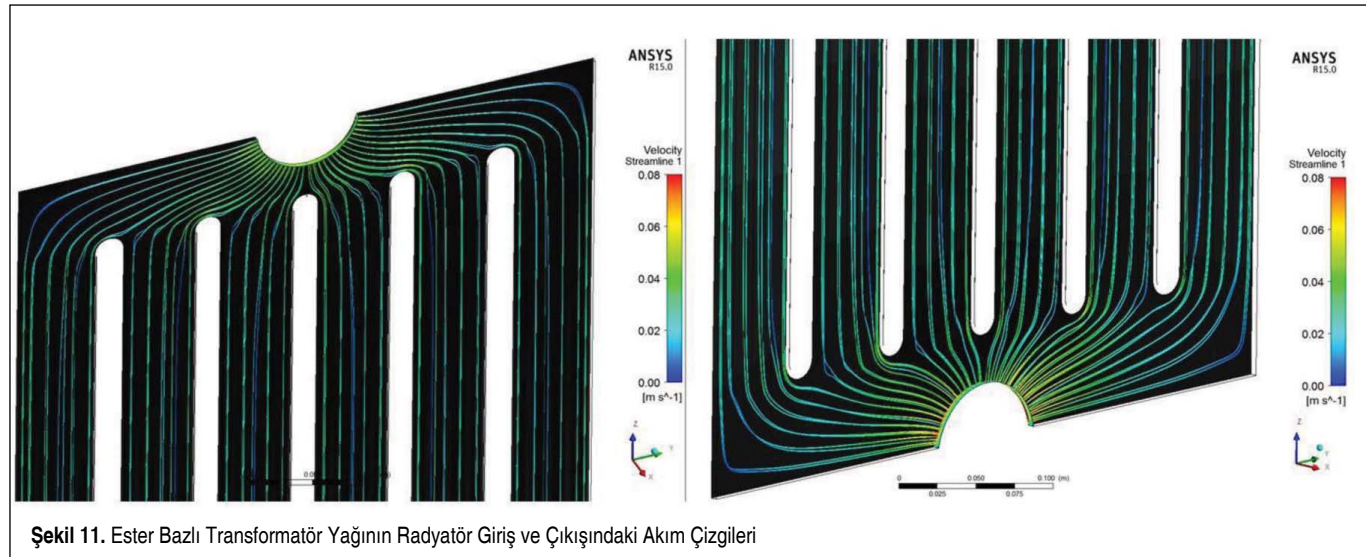
### 5.1 Ester Yağ

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

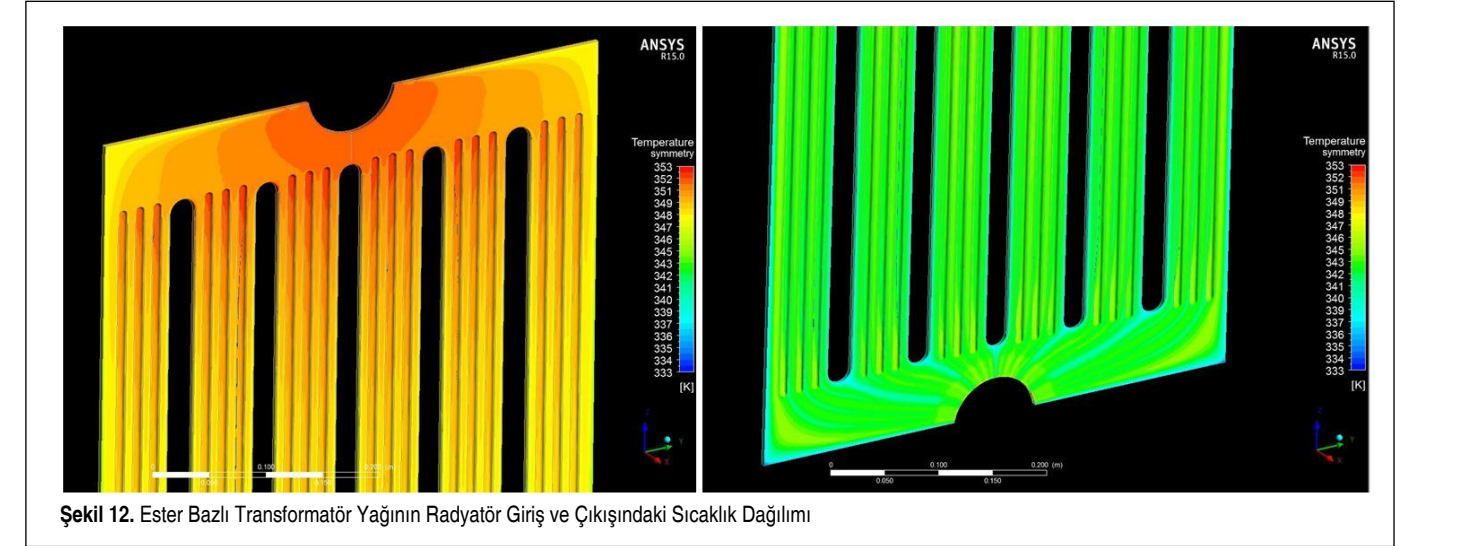
0.05 m/s giriş hızı için ester bazlı transformatör yağının akım çizgileri, sıcaklık dağılımı ve basınç dağılımına ait sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Tablo 3. Ester Yağ Değerleri

Hız	Çıkış Sıcaklığı	Basınç Kaybı	Isı Akısı	Sıcaklık Farkı
m/s	K	Pa	W/m <sup>2</sup>	K
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



Şekil 11. Ester Bazlı Transformatör Yağının Radyatör Giriş ve Çıkışındaki Akım Çizgileri

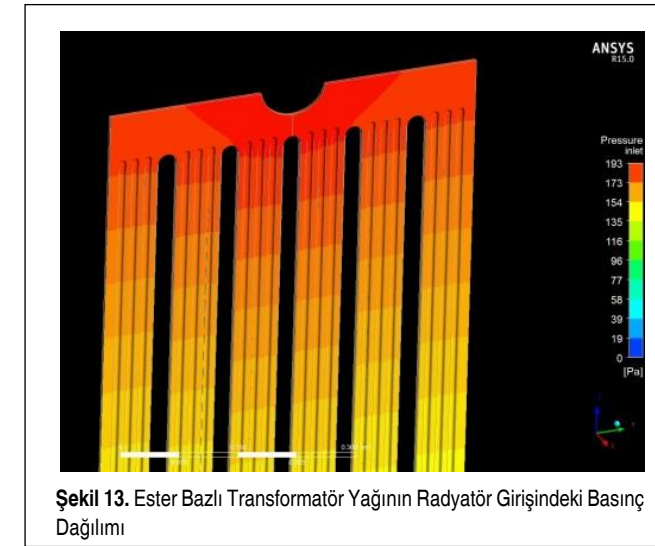


Şekil 12. Ester Bazlı Transformatör Yağının Radyatör Giriş ve Çıkışındaki Sıcaklık Dağılımı

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

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

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.

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'te görüldüğü gibidir.

Tablo 4. Mineral Yağ Değerleri

Hız	Çıkış Sıcaklığı	Basınç Kaybı	Isı Akısı	Sıcaklık Farkı
m/s	K	Pa	W/m <sup>2</sup>	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

Mineral transformatör yağına ait radyatör sıcaklık dağılımı Şekil 15'te görüldüğü gibidir.

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

### 5.3 Silikon Yağ

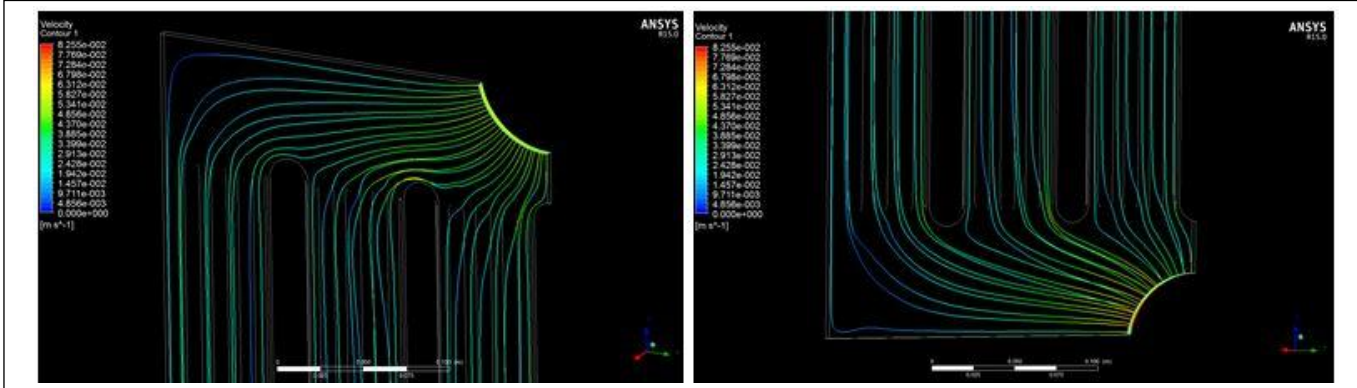
Silikon transformatör yağına ait hız, çıkış sıcaklığı, basınç kaybı ve ısı akısı değerleri Tablo 5'te gösterildiği gibidir.

Tablo 5. Silikon Yağ Değerleri

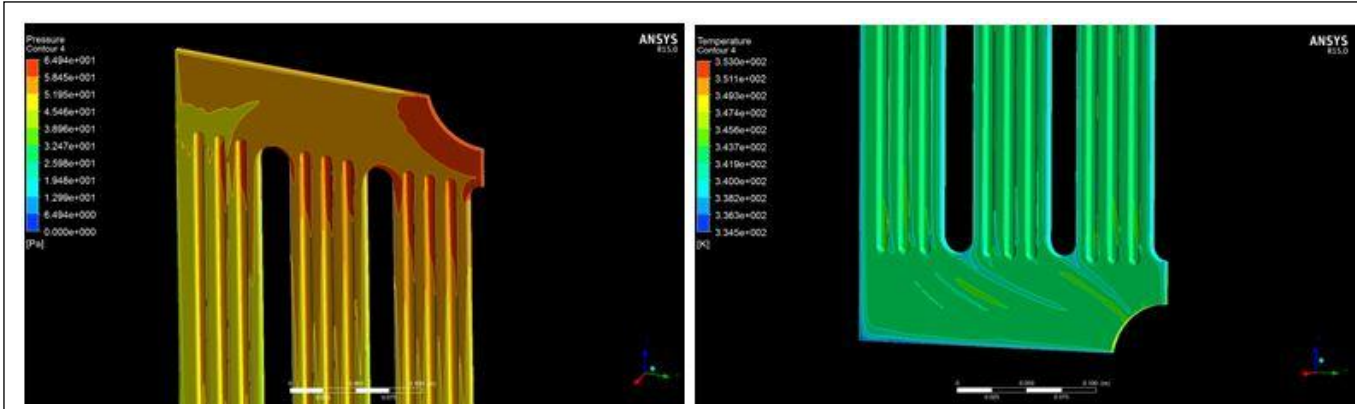
Hız	Çıkış Sıcaklığı	Basınç Kaybı	Isı Akısı	Sıcaklık Farkı
m/s	K	Pa	W/m <sup>2</sup>	K
0.05	343.0	312.9	275.8	10.1
0.04	340.8	260.0	269.3	12.2
0.03	337.6	206.6	259.2	15.4
0.02	331.7	151.8	240.6	21.3

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

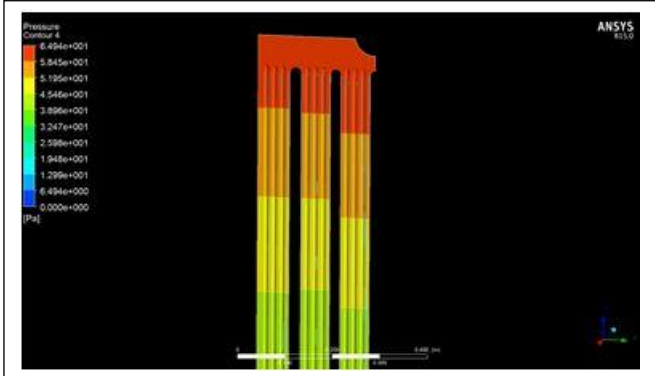




Şekil 14. Mineral Transformatör Yağının Radyatör Giriş ve Çıkışındaki Akım Çizgileri



Şekil 15. Mineral Transformatör Yağının Radyatör Giriş ve Çıkışındaki Sıcaklık Dağılımı



Şekil 16. Mineral Transformatör Yağının Radyatör Girişindeki Basınç Dağılımı

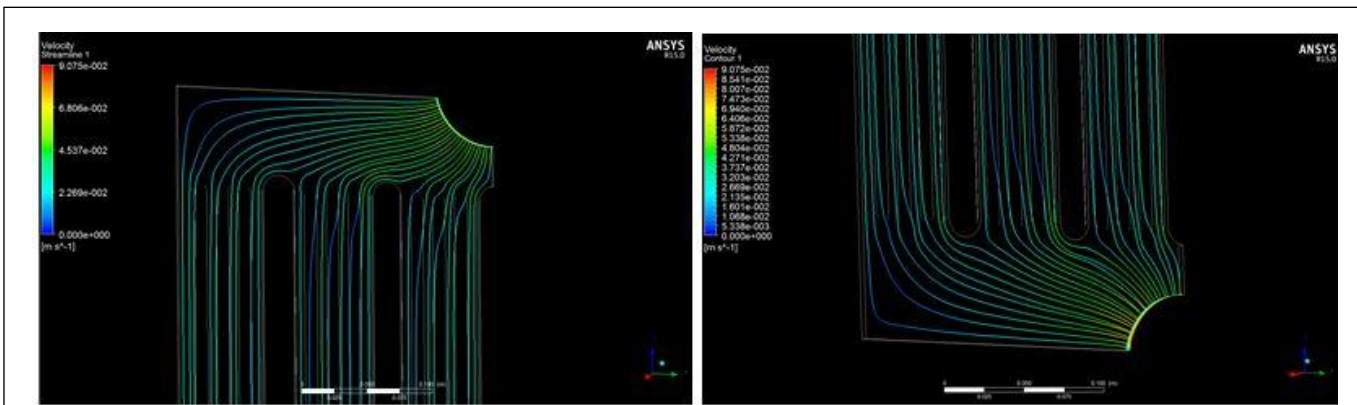
Silikon transformatör yağının radyatör giriş ve çıkışındaki akım çizgileri Şekil 17'de görüldüğü gibidir.

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

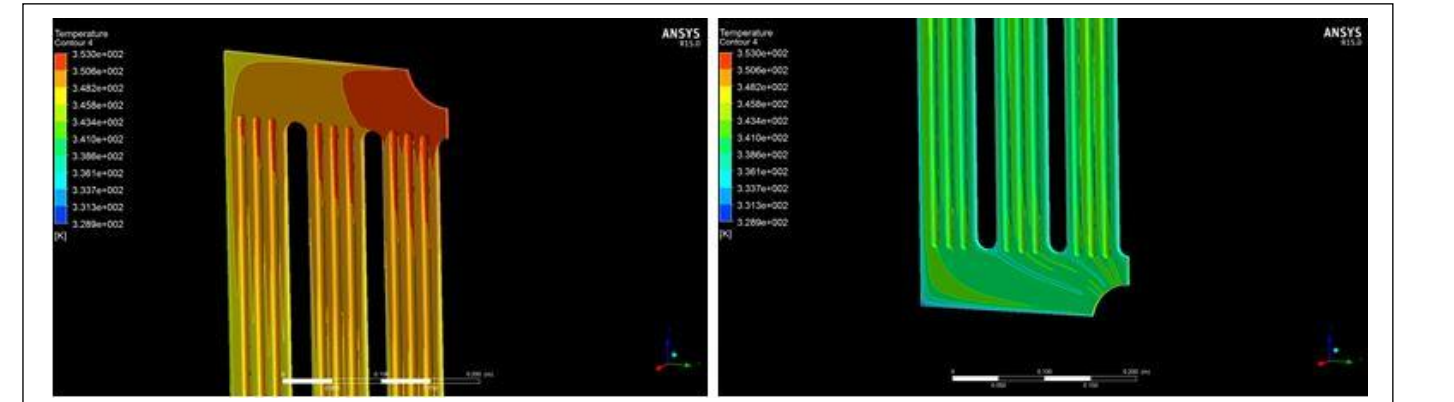
Silikon transformatör yağına ait radyatör girişinde hesaplanan basınç dağılımı Şekil 19'da görüldüğü gibidir.

#### 5.4 Sentetik Yağ

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



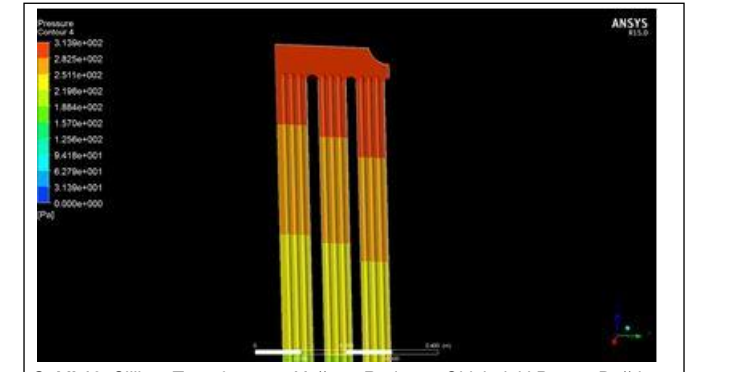
Şekil 17. Silikon Transformatör Yağının Radyatör Giriş ve Çıkışındaki Akım Çizgileri



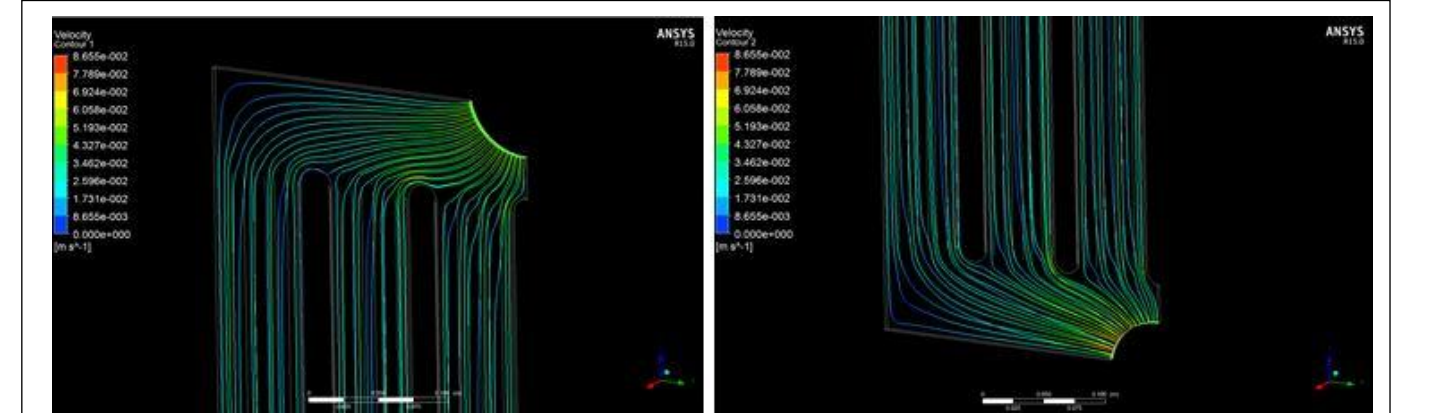
Şekil 18. Silikon Transformatör Yağının Radyatör Giriş ve Çıkışındaki Sıcaklık Dağılımı

Tablo 6. Sentetik Yağ Değerleri

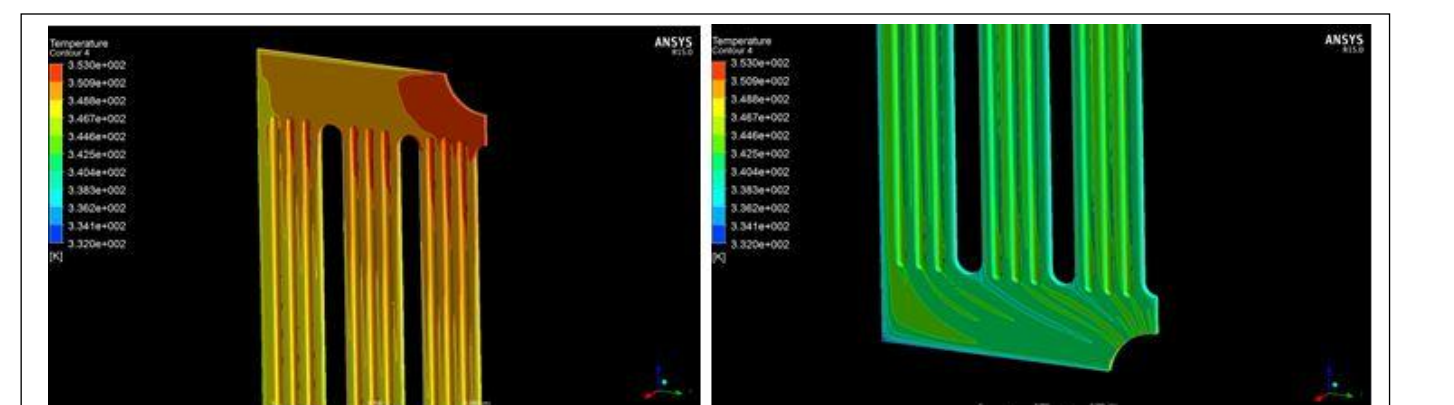
Hız	Çıkış Sıcaklığı	Basınç Kaybı	Isı Akısı	Sıcaklık Farkı
m/s	K	Pa	W/m <sup>2</sup>	K
0.05	345.0	148.7	281.5	8.0
0.04	343.3	126.5	276.5	9.7
0.03	340.6	103.9	268.4	12.4
0.02	335.7	80.4	253.5	17.3



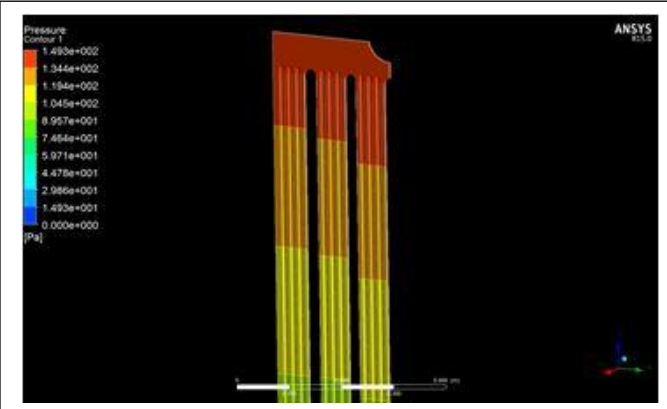
Şekil 19. Silikon Transformatör Yağının Radyatör Girişindeki Basınç Dağılımı



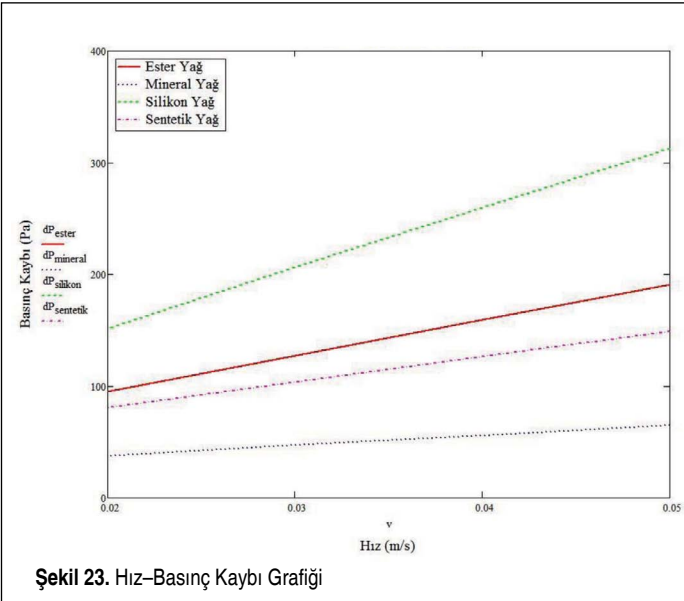
Şekil 20. Sentetik Transformatör Yağının Radyatör Giriş ve Çıkışındaki Akım Çizgileri



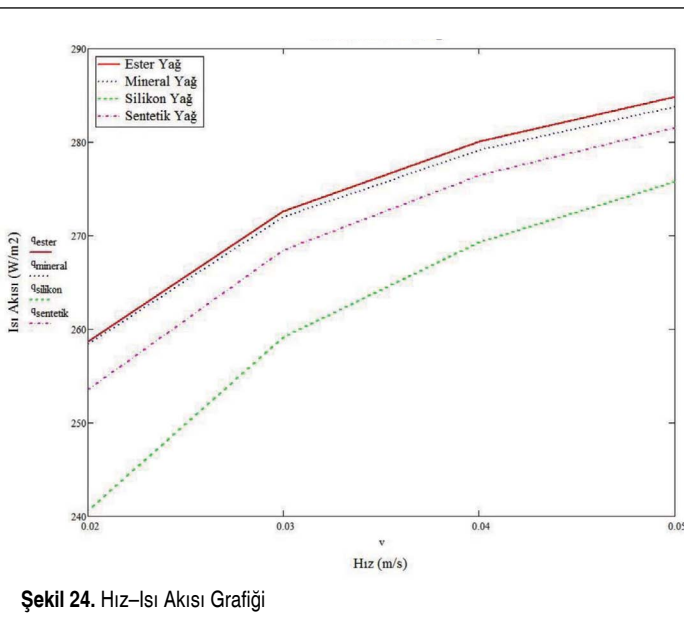
Şekil 21. Sentetik Transformatör Yağının Radyatör Giriş ve Çıkışındaki Sıcaklık Dağılımı



Şekil 22. Sentetik Transformatör Yağının Radyatör Girişindeki Basınç Dağılımı



Şekil 23. Hız-Basınç Kaybı Grafiği



Şekil 24. Hız-Isı Akısı Grafiği

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.

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

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

## 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.

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, çevre-

ye 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 vb.) 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.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya destek vererek katkıda bulunan Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri AŞ. (BEST AŞ.) ve AR-GE Merkezi'ne teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

1. Hochart, B. 1987. Power Transformer Handbook, Butterworths, London.
2. Karsai, K., Kerényi, D., Kiss, L. 1987. Large Power Transformers, Elsevier Science Publishers, ISBN no: 0-444-99511-0, Hungary.
3. Cengel, Y. A., Cimbala, J. M. 2010. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, McGraw-Hill Companies, Inc. New York, USA.
4. International Electrotechnical Committee. 2005. IEC 60076-7. Power Transformers—Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers, Geneva, Switzerland.

## DEĞERLİ ÜYELERİMİZE

**Bugün, her zamankinden daha fazla siz değerli üyelerimizin örgütlü gücüne ihtiyaç duymaktayız.**

İktidarın, kamusal denetimi gerileten uygulamaları, halkın can güvenliğini ortadan kaldırmakla birlikte, Odamızın hizmet alanlarının daralmasına da yol açmaktadır.

Bütün ekonomik zorluklara rağmen, bilimsel gerçeklikler ışığında, mühendislik uygulamalarının önemini ortaya koyan raporlar yayınlama; mesleğimizi geliştirmeye ve toplumu bilinçlendirmeye yönelik bülten, dergi, kitap, broşür vb. yayın çalışmalarımızı sürdürme kararlılığımızda.

Bu nedenle sizlere ve halkımıza verdiğimiz hizmetlerin yanında çok temsili kaldığına inandığımız üyelik aidatlarının ödenmesi konusunda katkılarınızı bekliyoruz.

<https://aidat.mmo.org.tr>