



Yağlı tip transformatörlerde hibrit bir soğutma sistem tasarımının FEM ve CFD analizleri

FEM and CFD analysis of a hybrid cooling system design in oil-type transformers

Murat Tören^{1,*} 

¹ Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize Türkiye

Öz

Yağlı tip transformatörler (YTT), elektrik enerjisinin iletim ve dağıtım sürecinde yüksek kullanıma sahip elektrik makineleridir. Bu transformatörler üretim maliyetlerinin düşük olması ve kullanım alanının geniş olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin dağıtım sistemi içerisinde transformatörlerin yaklaşık % 80-85'i YTT den oluşmaktadır. Bu veriler dikkate alındığında yağlı tip transformatörlerin çalışmaları, performans parametreleri ve bunları etkileyen soğutma sistemlerinin önemi de artan ölçüde ön plana çıkmaktadır. YTT'nin soğutulması genel olarak trafo yağı da denilen naftanik / parafinik bazlı yağlarla sağlanmaktadır. YTT'de soğutma amaçlı olarak yağların kullanılması, çevre kirliliğine neden olduğu gibi işletme, bakım-onarım faaliyetleri için yüksek maliyet gerektirmektedir. Günümüzde, transformatörlerin alternatif yöntemler ile soğutulması için, güncel ve disiplinler arası araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada ise 5kVA YTT'de çalışma sırasında oluşan ısının hibrit bir sistemi ile mahfaza hacminin belirli oranlarda su ve yağ akışkanları kullanılarak soğutulması sağlanmaktadır. Tasarlanan hibrit soğutma sistemi sonlu elemanlar metodu (FEM) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile analiz edilerek sonuçlardan YTT faydalı ömrünün 5.48 – 166.6 saate kadar artırılabilirliği incelenmektedir.

Anahtar kelimeler: Yağlı tip transformatör, FEM, CFD, Hibrit soğutma, Faydalı ömür

1 Giriş

Transformatörler, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtım için oldukça önemli bir unsurdur. Transformatörlerin çalışma esnasında meydana gelen ısının transfer edilmesi için soğutulmaları gerekmektedir. Soğutma türlerine göre genel olarak kuru tip ve yağlı tip olarak iki başlık altında transformatörler sınıflandırılmaktadır. Yüksek gerilim olarak adlandırılan 1 kV üstü ve alçak gerilim şebekesi olarak adlandırılan 1 kV altı elektrik şebeke sisteminde, yağlı tip transformatörler daha yoğunlukla kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni, diğer transformatör tiplerine (kuru tip, SF6 gazlı soğutma vb.) göre, düşük kurulum maliyeti gerektirmeleri ile güç ve dağıtım sistemlerinde çeşitli büyüklüklerde üretilebilmeleridir. Soğutma malzemesi

Abstract

Oil-type transformers (YTT) are electrical machines with high usage in the transmission and distribution process of electrical energy. These transformers are widely used due to their low production costs and wide usage area. In the distribution system of electrical energy, approximately 80-85% of transformers consist of YTT. When these data are taken into account, the importance of the operation, performance parameters and the cooling systems that affect them come to the fore increasingly. The cooling of YTT is generally provided with naphthenic / paraffinic based oils, also called transformer oil. The use of oils for cooling purposes in YTT causes environmental pollution and requires high costs for operation, maintenance-repair activities. Today, current and interdisciplinary researches are carried out for the cooling of transformers with alternative methods. In this study, with a hybrid system, the heat generated during operation at 5kVA YTT is provided to cool the enclosure volume by using water and oil fluids at certain rates. The designed hybrid cooling system is analyzed with the finite element method (FEM) and computational fluid dynamics (CFD), and it is examined from the results that the YTT life cycle can be increased up to 5.48 - 166.6 hours.

Keywords: Oil type transformer, FEM, CFD, Hybrid cooling, Life cycle

olarak yağların kullanıldığı YTT, düşük maliyetli olarak üretilmesine rağmen, işletme ve bakım-onarım maliyetleri fazladır. Ayrıca, soğutmada kullanılan yağların yanıcı ve patlayıcı özellikte olması, çevre kirliliğine sebep olması, yağlı tip transformatörlerin diğer dezavantajları olarak gösterilebilir [1]. Bu dezavantajların asgari seviyeye düşürülmesi, maliyetlerin azalması ve transformatörün kullanım ömrünün artmasına neden olacaktır.

Bu sebeple, önerilen çalışma ile yağlı tip transformatörlerde soğutma amaçlı kullanılan yağın miktarı azaltılarak yerine daha iyi ısı transfer özelliğine sahip nanopartiküler akışkanlar kullanılarak hibrit bir soğutma sistemi tasarlanması amaçlanmaktadır. Bu sistemin gerçekleşmesiyle, daha çevreci olan, yanıcı ve patlayıcı riskleri azaltılmış, bakım-onarım maliyeti daha düşük ve

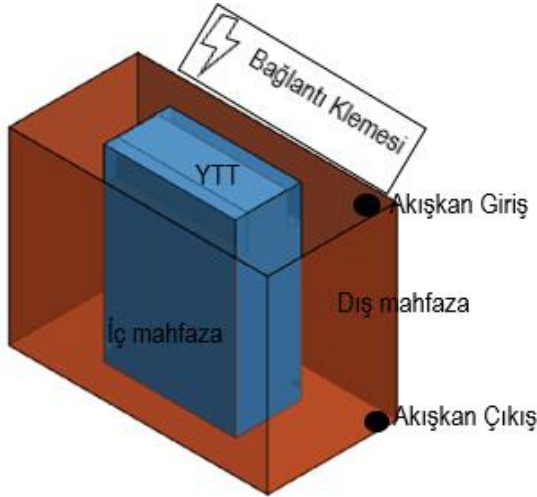
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: murat.toren@erdogan.edu.tr (M. Tören)

Geliş / Received: 27.05.2022 Kabul / Accepted: 26.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1122317

kullanım ömrünün artmasına bağlı olarak işletme maliyetleri daha az olan hibrit bir soğutma sağlanacaktır. Bu konu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde transformatörlerdeki soğutma sistemlerinin, transformatörün gücüne ve kullanıldığı yere göre değişiklik gösterecek şekilde sınıflandırıldığı görülmektedir [2]. Ancak, yapılan sınıflandırmalar ve soğutmada kullanılan geleneksel malzemeler üzerinden değerlendirmeler yapıldığı, soğutma sınıflandırması ve soğutma malzemesi, standardı oluşturulamamıştır. Dolayısıyla, elektrik makinelerinin soğutulması için gerçekleştirilen çalışmalarda, transformatörlerin ömür kaybı analizi yapılarak, kullanım ömürlerinin uzun olabilmesi için en sıcak noktalar belirlenerek bu sıcaklık değerlerinin faydalı ömürdeki yüzdelik kayıpları ve kullanım (faydalı) ömrünün değerlendirilmesi araştırılmıştır [3–6]. Son zamanlarda, yağlı tip transformatörlerin soğutulmasında kullanılan naftanik ya da parafinik bazlı yağların yerine, ester ve silikon bazlı yağlar kullanıldığı görülmektedir [7–12]. Tüm bu çalışmalarda, yağlı tip transformatörün, iyi bir ısı transferi ile soğuması sağlanmaktadır. Ayrıca, bakım-onarım maliyetlerinin de düşürüldüğü görülmektedir. Ancak ester ve silikon bazlı yağlar ile son yıllarda geliştirilen ısı iletkenliği artırılmış diğer transformatör soğutma yağları, endüstride ilk günden bu güne kullanılan geleneksel transformatör soğutma yağlarına göre üstün özelliklere sahip olsa da, yağın belirli bir süre sonra morfolojisinin bozulması ve çevre kirliliği oluşturması hala daha en önemli sorunlar olarak dikkat çekmektedir.

Bu yüzden, transformatörlerin soğutulmasında Şekil 1 'de görülen hibrit bir soğutma mahfazası tasarlanarak transformatörün bulunduğu hacimde ısı transferinin en optimum seviyede olması sağlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 1. YTT Hibrit Soğutma Mahfazası Görüntüsü

Bu tasarımda yağ ve suyun ısı transferi için akışkan olarak farklı hacimsel oranlarla kullanıldığı farklı mahfaza tasarımları FEM ve CFD analizleri ile incelenerek, yağlı tip transformatör soğutulmasında kullanılan yağ oranının ve yağın uzun süreler kullanımına bağlı oluşan dezavantajlarının azaltıldığı optimum hacimsel dağılımlı endüstriyel, çevre dostu olarak çalışan ve faydalı ömrü daha

uzun olan hibrit soğutma sistemli YTT mahfazası elde edilebilecektir. Tasarlanması amaçlanan sistem sağlayacağı avantajlar yanı sıra kısa süreli kullanımlarda gerek duyulan dağıtım türü vb. transformatörlerde ek maliyet gerektiren durumu, soğutma sıvısı olarak suyun kullanımından kaynaklanabilecek mahfazada oluşabilecek deformasyonlar dolayısıyla da dezavantaj oluşturabilir ancak orta ve uzun süreli kullanımlar bu maliyetlerin faydalı ömürde sağlanacak faydayla giderilebileceğini gösterecektir.

2 Materyal ve metot

Yağlı tip transformatörde, nominal koşullarda çalışma esnasında meydana gelen ısınmalar; bakır kayıpları, kaçak kayıplar, nüve ve çekirdekdeki kayıplardan kaynaklanmaktadır. Transformatör faydalı ömür olarak belirlenen süresi içerisinde bu kayıplar sonucu oluşan ısının transferi için soğutma sistemleri tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada kullanılacak olan ve IEEE Std C57.91-1995 [13] ve IEC 60076-11 [14] standartlarına göre belirlenen çalışma koşullarında oda sıcaklığı 30°C olan ortamda çalışacak şekilde tasarlanan yağlı tip transformatörün, teknik özellikleri ve üretim parametreleri Tablo 1 'te verilmektedir.

Tablo 1. Yağlı tip transformatör özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Güç	VA	5000
Primer Sargı Gerilimi	V	380
Sekonder Sargı Gerilimi	V	220
Frekans	Hz	50
Sargı Grubu	-	Yzn-11
Standartlar	-	IEEE Std C57.91-1995-IEC 60076-11
Nominal gerilimdeki empedans	%	6.0
Soğutma	-	Hibrit
Sargı İletken Türleri	-	Bakır

Transformatördeki çekirdek (nüve) malzemesinde oluşan demir kayıpları, histerezis etkisinden dolayı meydana gelen kayıplar (P_h) Denklem 1 'de ve (P_e) ile ifade edilen girdap akımları dolayısıyla oluşan girdap (eddy akımları) akımı kayıpları da Denklem 2 'te verilen şekliyle elde edilmektedir. Bu kayıplar, bobin üzerinden değişken akım akıtıldığında, çekirdek gövdesi üzerinden indüklenen gerilimin, sebep olduğu akımlardır [15].

$$P_h = \sigma_h * f * B_m * G_{fe} \quad (1)$$

Burada, σ_h , f , B_m ve G_{fe} sırasıyla, histerezis kayıp faktörü, frekans değeri, akı yoğunluğu ve demir çekirdek kütleliğini ifade etmektedir.

$$P_e = \sigma_e * f^2 * B_m^2 * G_{fe} \quad (2)$$

Denklem 2'te, σ_e , malzemeye bağlı olarak değişen Eddy sabitidir.

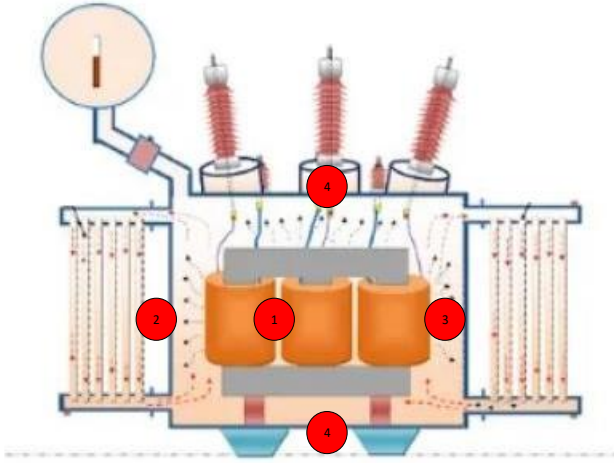
Transformatörlerde ısının yaklaşık olarak $\frac{3}{4}$ 'ünü sargılarından geçen akımın (I) meydana getirdiği kayıplar meydana getirmektedir. Bu kayıplar ise, bakır kayıplarıdır ve **Denklem 3'**te verilmektedir.

$$P_{cu} = I^2 R \quad (3)$$

Bu çalışmada kullanılacak olan 5kVA YTT'nin kayıplar dolayısıyla oluşan ısının transferinde ise şu ısı transfer yöntemlerinden faydalanılır.

2.1 Yağlı tip transformatörde ısı transferi

Yağlı tip transformatörün çalışması sırasında, meydana gelen kayıplarla oluşan ısının transferi, dört farklı noktadan farklı ısı transfer yolları ile gerçekleştirilmektedir. Söz konusu ısı transfer yolları **Şekil 3'**te gösterilmektedir



Şekil 3. Yağlı tip transformatörde ısı transfer noktaları[16]

1. Sargılar arasında ısı transferi iletim yoluyla gerçekleşir. **Denklem 4'**da verilen silindirik koordinatlardaki ısı transfer denklemi ile ısınma değeri elde edilmektedir [3].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = - \frac{\dot{q}}{k_u} \quad (4)$$

Burada, \dot{q} spesifik kayıp yoğunluğu (W/m^3), T sıcaklık ve k_u birim ısı iletkenliğidir (W/mK).

2. Dış yüzeyde yağlı tip transformatör ısı transferi doğal taşınım ve ışınım yoluyla gerçekleşir. Dış yüzeylerin ışınım ile ısı transferinde **Denklem 5** ve **6'**de verilen eşitlikler kullanılır [17].

$$q_r = \frac{q_r}{A} = \varepsilon \sigma A (T_w^4 - T_a^4) = h_r (T_w - T_a) \quad (5)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_w^3 + T_w T_a^3 + T_w^2 T_a + T_a^3) \quad (6)$$

3. Burada, q_r ışınım ile ısı transferinde z düzleminde Z mesafesi boyunca transfer edilen ısı olup ışınım ile ısı transfer katsayısı h_r 'dir. Dış yüzeylerin taşınım ile ısı transferinde kullanılan eşitlikler **Denklem 7-10** 'de verilmektedir[18].

$$q_{co} = \frac{q_{co}}{A} = h_{co} (T_w - T_a) \quad (7)$$

$$h_{co} = \frac{Nu_z k_{air}}{Z} \quad (8)$$

$$\overline{Nu_z} \cong \left[\frac{4Pr^2 Gr^*}{36 + 45Pr} \right]^{1/5} \quad (9)$$

$$Gr^* = \frac{g \beta \overline{q_{co}} Z^4}{k_{air} v^2}, 10^5 \leq Gr^* \leq 10^{10} \quad (10)$$

Denklem 7-10'da, q_{co} taşınım ile transfer edilen ısı, k_{air} yağın ısı iletkenliği, h_{co} taşınım ile transfer edilen ısı iletim katsayısı, Pr Prandtl sayısı, Gr Grashoff sayısı, $\overline{q_{co}}$ dış yüzeyin ortalama ısı akısı, β yağın volumetrik genişleme katsayısı ($1/K$), v kinematik viskozite (m^2/sec), g yerçekimi ivmesi (m/sec^2), Z dikey uzunluğu (m) ifade etmektedir.

4. Sargılar arasında ve yağlı tip transformatör kabininde yer alan yağın olduğu kısımda ısı transferi taşınım yoluyla gerçekleşir. Bu bölgedeki ışınım ısı transferi durumu, iletim ısı transferi durumu ile taşınım ısı transferine göre küçük değerlerde olup ihmal edilebilir [3]. Dolayısıyla bu kısımda hesap edilen ısı transferi taşınım ve iletim ile elde edilen ısı transfer değeridir. Yağlı tip transformatörün üst kısmından görülebilecek sargılar ve aralarındaki yağ olan kısımların ısı transfer katsayısının hesaplanmasında Miyatake ve Fujii tarafından önerilen Nusselt bağlantıları kullanılabilir [19,20]. Bu bağlantılar, **Denklem 11-14'**de verilmektedir.

$$q_{cd} = \frac{q_{cd}}{A} = h_{cd} (T_w - T_a) \quad (11)$$

$$h_{cd} = \frac{Nu_z k_{oil}}{b} \quad (12)$$

$$\overline{Nu_z} \cong C_1 (1 + R)^{\frac{1}{6}} \psi_z^{\frac{1}{3}}, \psi_z \leq 60^\circ \quad (13)$$

$$\overline{Nu_z} \cong C_2 \left[(1 + R) \left[\frac{1}{\psi_z} \left(\frac{24}{1+R} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{9}{70} \right] + \frac{1}{2} \right]^{-1}, \psi_z \geq 60^\circ \quad (14)$$

Burada, $C_1=0.697$ ve $C_2 = 1$ değerleri Miyatake ve Fujii tarafından hesaplanmış olup, q_{cd} taşınım ile transfer edilen ısı (W/m^2), h_{cd} taşınım ile transfer edilen ısı iletim katsayısı (W/m^2K), R iç duvar ve dış duvar için ortalama ısı akısı eşitliği, a boyunduruk genişliği (m), b hava kanalı genişliği (m), L toplam kanal yüksekliği (m), N boyunduruk sayısıdır.

5. Üst ve alt yüzeylerde ise taşınım ve ışıma olabilir ancak yağ ve diğer akışkan hızları ve diğer farklı parametrelerin karmaşıklığından dolayı ihmal edilir.

Ayrıca ısıl analiz için kullanılacak momentumun ve enerjinin korunumu denklemleri ile sıvı akışkanlar için Laminer akışında kullanılacak eşitlikler **Denklem 15-20**'de verilmektedir [17]. **Denklem 15**, akış alanı kartezyen koordinat sistemi ile tanımlandığında; sıkıştırılmaz akıştaki süreklilik denklemdir. **Denklem 16-18** momentum denklemlerini ifade ederken, **Denklem 19-20** enerji denklemleridir.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = X_f - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (16)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = Y_f - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = Z_f - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (18)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi \quad (19)$$

$$\Phi = 2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (20)$$

Laminer akışlarda geçerlilik gösteren bu denklemlerde kullanılan X_f, Y_f ve Z_f parametreleri x, y ve z yönlerindeki birim hacime düşen kuvvetleri tanımlarken, **Denklem 22**'de verilen Φ ile gösterilen yayılım denklemini ise viskoziten kaynaklanan kuvvetin akışkan parçacıkları üzerinde yaptığı geri dönüşümü olmayan iş miktarını göstermektedir. Tasarlanan mahfaza boyut değerleri Laminer akış için **Denklem 16-20**'de verilen momentum ve enerji eşitlikleri çoğu zaman akış yapılarının karmaşıklığı nedeniyle analitik çözüme olanak sağlamadığından integral metodunun kullanışlı yaklaşık çözüm yöntemleri kullanılır. İki boyutlu, sıkıştırılmaz, sürekli akışlar için momentum ve enerji integral denklemleri sırasıyla, **Denklem 21** ve **22**'deki gibi olur.

$$\frac{d\theta}{dx} + \frac{\theta}{U_\infty} \frac{dU_\infty}{dx} (H+2) = \frac{C_f}{2} \quad (21)$$

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta_T} (T_\infty - T) u dy = -\frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (22)$$

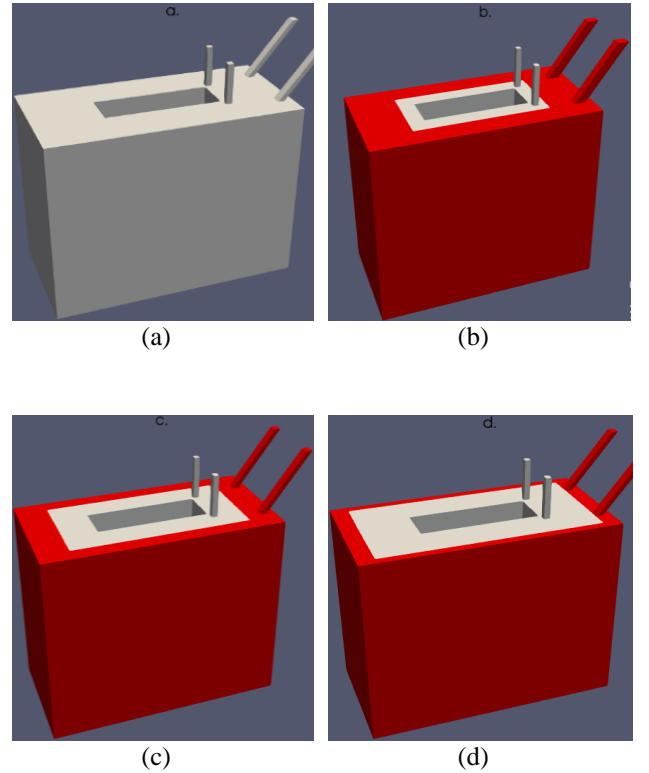
Burada C_f sürtünme katsayısı, T sıcaklık değerleri, H şekil parametresi, C_p öz ısı, ρ öz iletkenlik katsayısıdır. Çalışmada kullanılacak iki sıvı alanının akış ve ısı transferi çözümü *chtMultiRegionFoam* adlı ısı transferi çözücü ile gerçekleştirilecektir. Simülasyon sürecinde hız ve basıncın birleştirilmesine *Pimple algoritması* kullanılacaktır. Konveksiyon terimlerin çözümünde *second-order upwind* şeması, difüzyon terimlerinde ise *second-order central difference* şeması kullanılacaktır. Süreklilik ve momentum denkleminin yakınsama kriteri 10^{-6} , enerji denkleminin yakınsama kriteri olarak ise 10^{-7} seçilecektir.

2.2 Yağlı tip transformator hibrit mahfaza tasarımı

Yapılacak çalışmada, YTT farklı oranlarda yağ ve suyun termal sıvı olarak kullanılarak ısıl performansı dört farklı mahfaza tasarımı ile araştırılacaktır:

- Tamamen yağ
- 1/4 oranında yağ
- 1/2 oranında yağ
- 3/4 oranında yağ

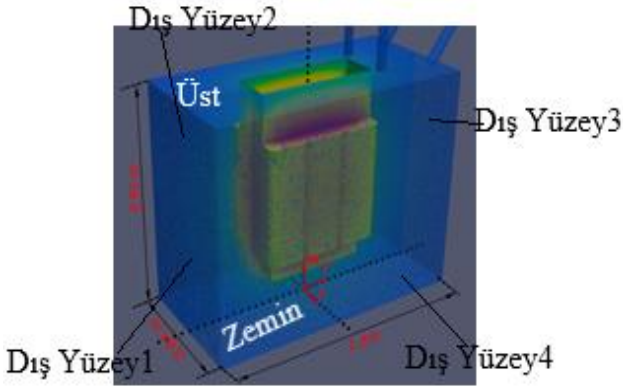
Senaryolardaki yağ ve su oranları farklı mahfazalar **Şekil 5**'de gösterilmiştir.



Şekil 5. YTT Mahfazasında yağ ve su oranları; (a) tamamen yağ, (b) 1/4 yağ-3/4 su, (c) 1/2 yağ-1/2su, (d) 3/4 yağ-1/4 su.

Tasarlanacak YTT mahfazasının tasarım boyutları **Şekil 6**'da görüldüğü gibi belirlenmektedir. Mahfazanın dış kısmı 2mm çelik sac levhadan, iç kısmındaki YTT konulacak yağ-

su akışkan ayrımı yapılan kısım ise 1-1.5 mm kalınlıkla çelik sac levha olarak tasarlanmaktadır.



Şekil 6. Tasarlanan mahfaza boyut değerleri

3 Bulgular ve tartışma

Yapılacak olan çalışmada, 5 kVA gücündeki yağlı tip transformatörün mahfaza tasarımı Solidworks 'de iki ve üç boyutlu olarak tasarlandıktan sonra sırasıyla aşağıda belirtilen yazılımlar kullanılarak benzetim analizleri yapılacaktır:

- Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak, Sonsuz elemanlar metodu (FEM) ile elektromanyetik analiz yapılacak ve kayıp güç verileri elde edilecektir.
- Salome yazılımı ve OpenFoam SnappyHexMesh yöntemi kullanılarak, fiziksel model ve buna karşılık gelen ağ sistemi tasarlanacaktır.
- Sonrasında ise kayıp güç verileri ile Open FOAM' da ısı analiz yapılacaktır.

Yapılacak çalışmada YTT yüzeylerin ısı iletim katsayısı 85 W/mK seçilmiştir. Çevre sıcaklığı ise 30 °C seçilmiştir. Ayrıca yüzeylerde oluşan ısı şartları ise Tablo 2 'de verildiği gibi olacaktır.

Tablo 2. Çalışmada Kullanılan Transformatörün yüzeyler için seçilen sınır şartları

Sınır şartı	T (K)	
YTT	400	YTT yüzeyinin akış alanına ısı transferi 150 W
Dış yüzey1	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=5W/m^2K$
Dış yüzey2	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=3W/m^2K$
Dış yüzey3	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=3W/m^2K$
Dış yüzey4	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=5W/m^2K$
Üst Kısım	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=5W/m^2K$
Üst-Dış yüzey	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=5W/m^2K$
Zemin	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=3W/m^2K$

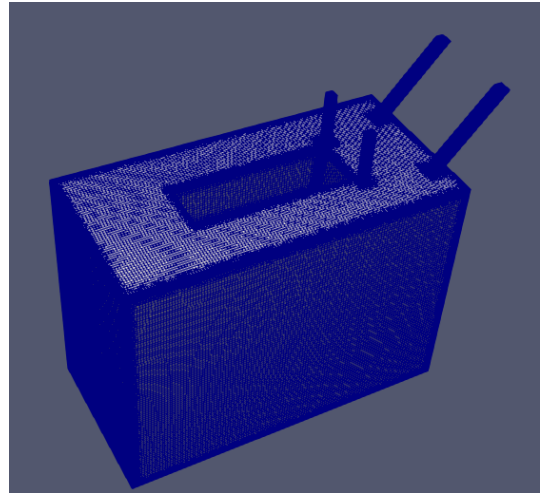
Buna göre 4 farklı mahfaza tasarımı ile yapılan analizler ve elde edilen bulgular şu şekilde elde edilmektedir.

3.1 Isıl sıvının tamamen yağ olduğu durum

Isıl sıvının tamamen yağ olduğu senaryodaki mesh yapısı Şekil 7'de gösterilmiştir. Tanımlanan akış alanının mesh sayısı 1590069'dir. İlk etapta meshten bağımsız çözüm elde etmek için optimal şekilde tanımlanan mesh sayısından yaklaşık olarak %25 ve %50 daha fazla iki akış alanı daha tanımlanmıştır. Bu çerçevede yürütülen simülasyonlar sonucunda YTT'nin farklı mesh sayılarında hesaplanan ortama ısı taşınım katsayısı (h) Tablo 3'de verilmiştir. Tasarlanan mesh sayısından yaklaşık %25 daha fazla bir mesh ile akış alanı tanımlandığında ısı taşınım sayısındaki sapma %0.6 olmaktadır. %50 daha fazla mesh sayısında ise sapma %0.9 olmaktadır. Sapmanın çok düşük seviyelerde olmasından dolayı yürütülen simülasyon sonuçları meshten bağımsızdır.

Tablo 3. Isıl sıvının tamamen yağ olduğu senaryo için farklı mesh sayılarında yürütülen simülasyonlarda trafonun hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayıları (h).

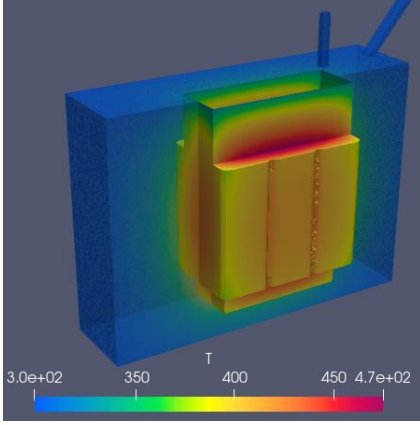
Mesh Sayıları	1590069	1987689	2385328
h(W/m ² K)	1.41105	1.42004	1.39805



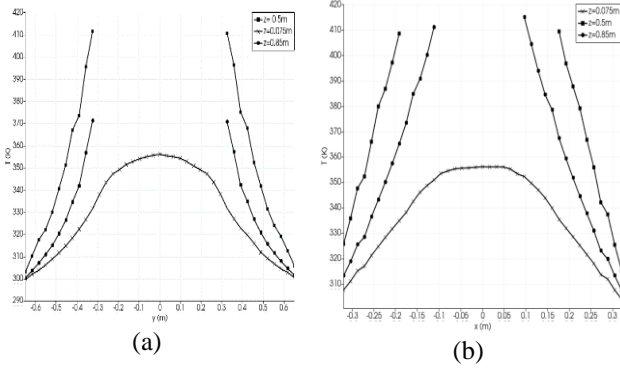
Şekil 7. Isıl sıvının tamamen yağ olduğu Mahfazadaki mesh yapısı.

Isıl sıvının tamamen yağ olduğu senaryoda akış alanı boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere trafonun üst ve alt kısmındaki yatay yüzey üzerinde sıcaklık maksimum değeri olan 470°K ulaşmaktadır. Yapılan hesaplamalarda trafo yüzeyinde sıcaklık 320-470°K arasında değişmektedir. Yine yapılan hesaplamalarda trafo yüzeyinin ortalama yaklaşık sıcaklığı 398 °K olarak tespit edilmiştir. Sonuçları detaylandırmak amacıyla akış alanında $x=0$ noktasında yz düzlemindeki ve $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenini boyunca ki sıcaklık dağılımları ve $y=0$ noktasında xz düzlemindeki, $z=0.075,$

0.5, 0.85 noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımları Şekil 9' da gösterilmiştir.



Şekil 8. Isıl sıvının tamamen yağ olduğu Mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 9. Isıl sıvının tamamen yağ olduğu Mahfaza akış alanında (a) $x=0$ noktasında yz düzlemindeki ve (b) $y=0$ noktasında xz düzlemindeki $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımı

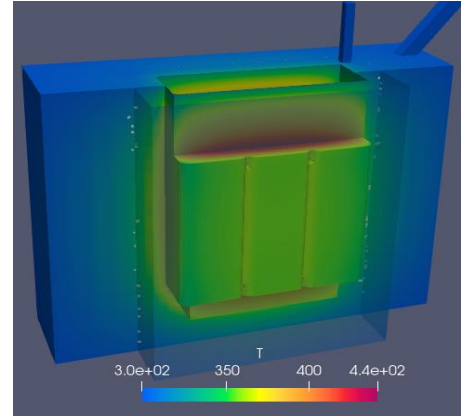
3.2 Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu durum

Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki mesh sayısı ve ısı taşınım katsayısı Tablo 4'de gösterilmiştir. Tanımlanan akış alanının mesh sayısı 2658970'dir. İlk etapta meshten bağımsız çözüm elde etmek için optimal şekilde tanımlanan mesh sayısından yaklaşık olarak %25 ve 50 daha fazla iki akış alanı daha tanımlanmıştır. Tasarlanan mesh sayısından yaklaşık %25 daha fazla bir mesh ile akış alanı tanımlandığında ısı taşınım sayısındaki sapma %1.3 olmaktadır. %50 daha fazla mesh sayısında ise sapma %0.72 olmaktadır. Sapmanın çok düşük seviyelerde olmasından dolayı yürütülen simülasyon sonuçları meshten bağımsızdır.

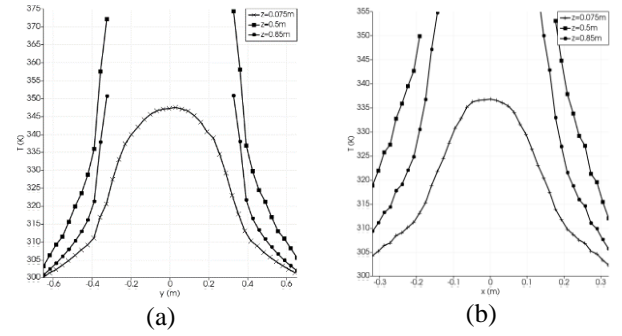
Tablo 4. Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu senaryo için farklı mesh sayılarında yürütülen simülasyonlarda trafonun hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayıları

Mesh Sayıları	2658970	3323542	3988155
$h(W/m^2K)$	2.47905	2.512584	2.497023

Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki akış alanı boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere YTT'nin üst ve alt kısmındaki yatay yüzey üzerinde sıcaklık maksimum değeri olan $440^{\circ}K$ ulaşmaktadır. Yapılan hesaplamalarda YTT yüzeyinde sıcaklık $320-440^{\circ}K$ arasında değişmektedir. Ayrıca trafo yüzeyinin ortalama yaklaşık sıcaklığı $365^{\circ}K$ olarak ölçülmektedir. Benzer olarak akış alanında $x=0$ noktasında yz düzlemindeki ve $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımları ve $y=0$ noktasında xz düzlemindeki $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımları Şekil 11'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 11. Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanında (a) $x=0$ noktasında yz düzlemindeki ve $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenı boyunca, (b) $y=0$ noktasında xz düzlemindeki $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımları

3.3 Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu durum

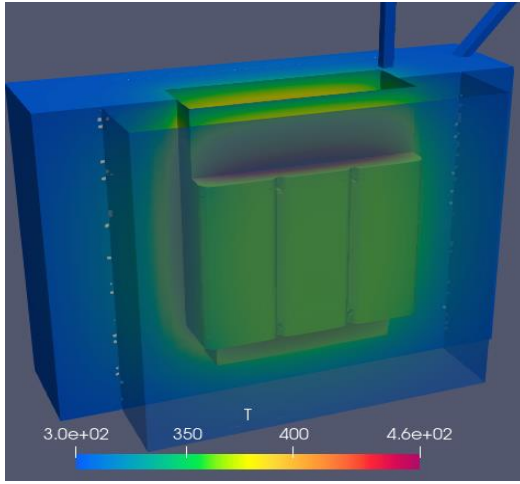
Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki mesh sayısı ve ısı taşınım katsayısı Tablo 5'te gösterilmiştir. Tanımlanan akış alanının mesh sayısı 2715162'dir. İlk etapta meshten bağımsız çözüm elde etmek için optimal şekilde tanımlanan mesh sayısından yaklaşık olarak %25 ve 50 daha fazla iki akış alanı daha tanımlanmıştır. Tasarlanan mesh sayısından yaklaşık %25 daha fazla bir mesh ile akış alanı

tanımlandığında ısı taşınım sayısındaki sapma %1.1 olmaktadır. %50 daha fazla mesh sayısında ise sapma %0.85 olmaktadır. Sapmanın çok düşük seviyelerde olmasından dolayı yürütülen simülasyon sonuçları meshten bağımsızdır.

Tablo 5. Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu senaryo için farklı mesh sayılarında yürütülen simülasyonlarda trafonun hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayıları.

Mesh Sayıları	2715162	3393825	4072896
$h(W/m^2K)$	2.01333	2.035476	2.030443

Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki akış alanı boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 12’de gösterilmiştir.



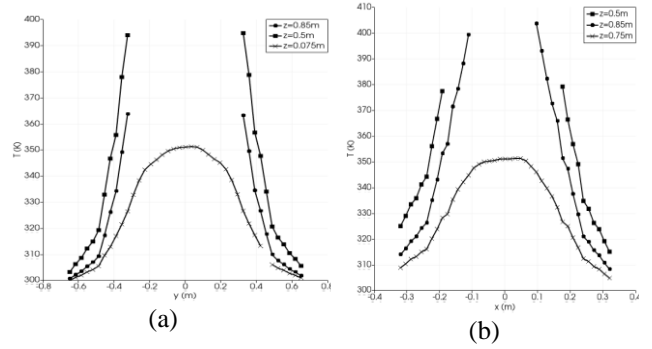
Şekil 12. Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı.

Şekilden görüleceği üzere trafonun üst ve alt kısmındaki yatay yüzey üzerinde sıcaklık maksimum değeri olan 458°K ulaşmaktadır. Yapılan hesaplamalarda YTT yüzeyinde sıcaklık 319-458°K arasında değişmektedir. Ayrıca YTT yüzeyinin ortalama yaklaşık sıcaklığı 380°K olarak ölçülerek belirlenmektedir. Sonuç olarak elde edilen sıcaklık değerlerini akış alanında $x=0$ noktasında yz düzlemindeki ve $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenini boyunca ki sıcaklık dağılımları Şekil 13(a) da ve $y=0$ noktasında Şekil 13(b) deki gibi gösterilmiştir.

3.4 Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu durum

Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki mesh sayısı ve ısı taşınım katsayıları Tablo 6’da olduğu gibi elde edilmektedir. Tanımlanan akış alanının mesh sayısı 2735104’dır. İlk etapta meshten bağımsız çözüm elde etmek için optimal şekilde tanımlanan mesh sayısından yaklaşık olarak %25 ve 50 daha fazla iki akış alanı daha tanımlanmıştır. Tasarlanan mesh sayısından yaklaşık %25 daha fazla bir mesh ile akış alanı tanımlandığında ısı taşınım sayısındaki sapma %0.92 olmaktadır. %50 daha fazla mesh sayısında ise sapma %1.26 olmaktadır. Sapmanın çok düşük

seviyelerde olmasından dolayı yürütülen simülasyon sonuçları meshten bağımsızdır.

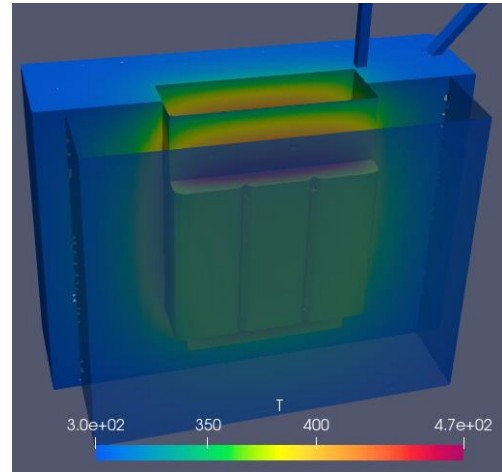


Şekil 13. Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanında (a) $x=0$ noktasında yz düzlemindeki ve $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenini boyunca, (b) $y=0$ noktasında xz düzlemindeki $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenini boyunca ki sıcaklık dağılımları

Tablo 6. Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu senaryo için farklı mesh sayılarında yürütülen simülasyonlarda trafonun hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayıları

Mesh Sayıları	2735104	3418126	4102842
$h(W/m^2K)$	1.52468	1.538707	1.543891

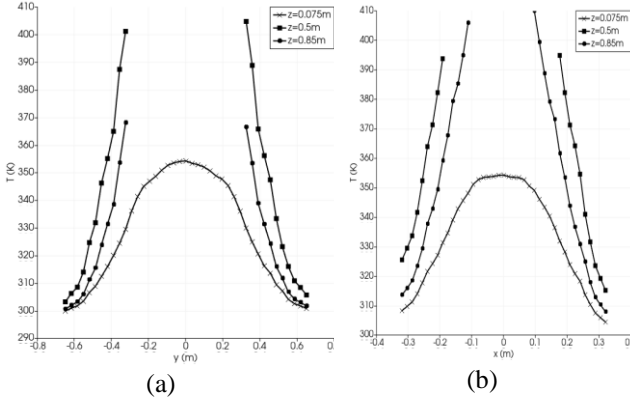
Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazada akış alanı boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 14’de gösterilmiştir.



Şekil 14. Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı.

Şekilden görüleceği üzere trafonun üst ve alt kısmındaki yatay yüzey üzerinde sıcaklık maksimum değeri olan 467°K ulaşmaktadır. Yapılan hesaplamalarda trafo yüzeyinde sıcaklık 320-467 °K arasında değişmektedir. Yine yapılan hesaplamalarda trafo yüzeyinin ortalama yaklaşık sıcaklığı 380°K olarak tespit edilmiştir. Buradaki sıcaklık dağılımları

da $x=0$ noktasında yz düzlemindeki ve $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenini boyunca Şekil 15 (a) ile $y=0$ noktasında xz düzlemindeki ve $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında x eksenini boyunca Şekil 15 (b) de görüldüğü gibi elde edilmektedir.



Şekil 15. Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanında (a) $x=0$ noktasında yz düzlemindeki ve $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında y eksenini boyunca, (b) $y=0$ noktasında xz düzlemindeki $z=0.075, 0.5, 0.85$ noktalarında x eksenini boyunca ki sıcaklık dağılımları

Burada yapılan ısıl analizler sonucunda çerçevesinde aynı sınır şartlarında yürütülen simülasyonlarda 5kVA YTT ısı üreten bileşenini ısı taşınım katsayısı Tablo 7’de verilmiştir. Bu değerlere göre en düşük ısı transfer katsayısı ısıl sıvının tamamen yağ olduğu durumda meydana gelmiştir. En yüksek ısı transfer katsayısı ise 1/4 yağ oranındaki senaryoda meydana gelmektedir. Dolayısıyla ısıl performans açısından en iyi durum 1/4 yağ oranına sahip mahfaza tasarımıyla elde edilmektedir. Söz konusu durumda ısı transfer katsayısındaki artış tamamen yağ durumuna göre %75.69 olmaktadır.

Tablo 7. Hibrit Mahfazalardaki YTT soğutma sistemlerinin ısı taşınım katsayıları

Senaryo	H(W/m ² K)
Tamamen yağ	1.41105
1/4 oranında yağ	2.47905
1/2 oranında yağ	2.01333
3/4 oranında yağ	1.52468

Yapılan ısıl analiz neticesinde tasarlanan hibrit soğutma sisteminde nominal yük koşullarında çalıştırılan YTT’nin çalışma süresi sonunda nüve ve sargılarında oluşan en yüksek sıcaklık değerine göre faydalı ömründe meydana gelecek IEEE C57.91-1995 standardına göre elde edilen faydalı ömründen %0.00133 kayba uğrama süreleri de Tablo 8 ile verilen değerler olarak elde edilmektedir. Bu değerlere

göre YTT faydalı ömrü 1/4 yağ ve 3/4 su olan hibrit bir soğutma sistemi ile çalıştırılırsa faydalı ömründen %0.0133 lük kısmının 166.6 saat sonra kaybetmektedir.

Tablo 8. Hibrit Mahfazalardaki YTT soğutma sistemlerinin Faydalı Ömre Etkisi

En sıcak noktanın sıcaklığı	Yaşlanma ivme faktörleri	% 0.0133 lük kayba ulaşılan zaman (saat)	Transformatörün Soğutulma Senaryoları
398 K -125°C	4,376	5,48	Tamamen yağ
325 K - 92°C	0,144	166,6	Hibrit (1/4 yağ, 3/4 su)
380 K - 107°C	0,734	17,616	Hibrit (1/2 yağ, 1/2 su)
380 K - 106°C	0,661	36,30	Hibrit (3/4 yağ, 1/4 su)

4 Sonuçlar

Yapılan çalışmada elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde yoğun kullanıma sahip YTT transformatörler için tasarlanan hibrit soğutma yapabilecek bir sistemin manyetik ve ısıl analizleri yapılmıştır. Burada tasarlanan soğutma sisteminde farklı oranlarda ısı transfer akışkanı olarak transformatör yağı ve su kullanılmıştır. Bu akışkanların Tamamen yağ, 1/4 oranında yağ -3/4 oranında su, 1/2 oranında yağ- 1/2 oranında su ve 3/4 oranında yağ- 1/4 oranında su kullanılarak yapılan ısıl analizlerinde yağ miktarının azaldığı, YTT ile teması olmayan dış mahfazada su miktarının fazla olduğu 1/4 yağ-3/4 su oranlı mahfaza tasarımında ısı taşınım katsayısının 2.47905 W/m²K değeri ile en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. YTT için elde edilen bu ısı taşınım katsayısı YTT’nin standartlarla belirlenen faydalı kullanım ömründe ise 166.6 saat sonunda %0.0133 lük kaybın oluşmasını sağlamaktadır. Buna göre de YTT’lerin yağ oranının azaltıldığı, soğutma akışkanının oranının fazla olduğu daha ekonomik ve daha uzun kullanım ömrüne sahip bir soğutma sistemli hibrit mahfaza tasarlanıp üretilebileceği değerlendirilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] I. Iskender, A. Mamizadeh, Nonlinear Thermal Modeling of Indoor and Outdoor Oil – Immersed Power Transformers, J. Electr. Eng., 60, 321–327, 2009.
- [2] D. Aşkın, Kuru Tip Transformatörlerin Sargı Sıcaklık Davranışının Yapay Sinir Ağları Kullanarak Modellenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [3] E. Rahimpour, D. Azizian, Analysis of temperature

- distribution in cast-resin dry-type transformers, *Electr. Eng.*, 89, 301–309, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00202-006-0008-4>.
- [4] X. Huang, L. Zhou, G. Wu, Q. Du, Simulation models of transformer hot-spot temperature, in: *Proc. IEEE Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater.*, 2012. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2012.6318943>.
- [5] Y.Z. Lv, Y. Zhou, C.R. Li, Q. Wang, B. Qi, Recent Progress in Nanofluids Based on Transformer Oil: Preparation and Electrical Insulation Properties, 2014. <https://doi.org/10.1109/MEI.2014.6882597>.
- [6] J. Liu, L. Zhou, G. Wu, Y. Zhao, P. Liu, Q. Peng, Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation modified by nanoparticles, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 19, 510–520, 2012. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6180245>.
- [7] G. Yaman, R. Altay, R. Yaman, Validation of computational fluid dynamic analysis of natural convection conditions for a resin dry-type transformer with a cabin, *Therm. Sci.*, 2019. <https://doi.org/10.2298/TSCI180919327Y>.
- [8] L. Garelli, G.A. Ríos Rodriguez, K. Kubiczek, P. Lasek, M. Stepien, J. Smolka, M. Storti, F. Pessolani, M. Amadei, Thermo-magnetic-fluid dynamics analysis of an ONAN distribution transformer cooled with mineral oil and biodegradable esters, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 23, 100861, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2021.100861>.
- [9] O. Kaymaz, G. Kalkan, A. Erek, Flow and heat transfer characteristics of different transformer oils in one section of transformer radiator, *Mühendis ve Makina.*, 56, 53–63, 2015.
- [10] R. Liao, J. Hao, L. Yang, S. Liang, J. Yin, Improvement on the anti-aging properties of power transformers by using mixed insulating oil, in: *2010 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE 2010*, 588–591, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2010.5640772>.
- [11] Y. Yuan, R. Liao, A novel nanomodified cellulose insulation paper for power transformer, *J. Nanomater.*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/510864>.
- [12] T.W. Park, S.H. Han, Numerical analysis of local hot-spot temperatures in transformer windings by using alternative dielectric fluids, *Electr. Eng.* 97, 261–268, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00202-015-0335-4>.
- [13] T. Committee, IEEE C57.91-1995 Guide for Loading Mineral-Oil- Immersed Transformers, 1995. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1996.79665>.
- [14] J. Rouabeh, L. M'barki, A. Hammami, I. Jallouli, A. Driss, Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers, *Heliyon.*, 5, e01159, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01159>.
- [15] M. Tören, M. Celebi, Comparative implementation of graphene sheet insulation heat effect in dry-type transformers, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 26, 101131, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101131>.
- [16] Parts of a Transformer and Basics Explained. <http://www.apogeeweb.net/article/1997.html#viii-test-and-transportation-of-the-transformer>, Accessed 27 May 2022.
- [17] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, heat and mass transfer - Incropera 6e, *Fundam. Heat Mass Transf.*, John Wiley and Sons, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.022>.
- [18] L.W. Pierce, Predicting hottest spot temperatures in ventilated dry type transformer windings, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 9, 1160–1172, 1994. <https://doi.org/10.1109/61.296303>.
- [19] Miyatake Osamu; Fujii Tetsu, Natural Convective Heat Transfer Between Vertical Parallel Plates With Unequal Heat Fluxes., *Heat Transf. - Japanese Res.* 3, 29–33, 1972.
- [20] M. Fujii, S. Gima, T. Tomimura, X. Zhang, Natural convection to air from an array of vertical parallel plates with discrete and protruding heat sources, *Int. J. Heat Fluid Flow.*, 17, 483–490, 1996. [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(96\)00051-3](https://doi.org/10.1016/0142-727X(96)00051-3).

