

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



**KABİNLİ KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE SOĞUMA  
SÜRECİNİN CFD ANALİZİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR İLE  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RAMAZAN ALTAY**

**BALIKESİR, ARALIK - 2018**

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



**KABİNLİ KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE SOĞUMA**  
**SÜRECİNİN CFD ANALİZİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR İLE**  
**İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RAMAZAN ALTAY**

**Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Gülşen YAMAN (Tez Danışmanı)**

**Doç. Dr. Alper KILIÇ**

**Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İREN**

**BALIKESİR, ARALIK - 2018**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Ramazan ALTAY** tarafından hazırlanan “**KABİNLİ KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE SOĞUMA SÜRECİNİN CFD ANALİZİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR İLE İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 20.12.2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Gülşen YAMAN



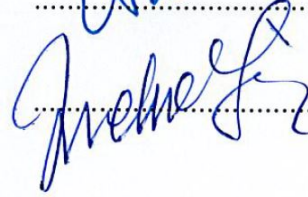
.....

Üye  
Doç. Dr. Alper KILIÇ



.....

Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İREN



.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof.Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 3.2015.0010 numaralı proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tez çalışması ile birlikte, 27/07/2017 tarihinde 2017/11039 numaralı patent başvurusu yapılmıştır.**



## ÖZET

**KABİNLİ KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE SOĞUMA SÜRECİNİN  
CFD ANALİZİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR İLE İNCELENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
RAMAZAN ALTAY  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ GÜLŞEN YAMAN)**

**BALIKESİR, ARALIK - 2018**

Kuru tip transformatörler için ısınma önemli problemler arasında yer almaktadır. Isınma hesaplamaları, kabinsiz kuru tip transformatörler için yapıldığından dolayı, kabin etkisi ile transformatörün soğuma performansının nasıl etkilendiği bilinmemektedir.

Literatürde kuru tip transformatör sargıları için ısınma analizi ve deneysel çalışmalar yeterince olmasına rağmen, kabinli kuru tip transformatörler için yapılmış analiz veya deneysel çalışma çok fazla bulunmamaktadır. Enerji sektöründe yüksek güvenilirlikleri nedeniyle kuru tip transformatörler önem kazanmaya devam etmektedir. Bu çalışmayla birlikte, her türlü ortamda çalışmaya uygun olan kabinli kuru tip transformatörlerin ısınma analizleri yapılmıştır.

Çalışmalarda, 250kVA 33/0.4kV Dyn11 IP31 (kayıp değeri 3kW) kabinli kuru tip transformatör referans olarak alınmıştır. Referans alınan bu transformatör kabini için üç farklı çatı geometrisi denenmiştir. Bu üç farklı kabin geometrisi için, ANSYS FLUENT/CFD analizleri ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar ile birlikte kabin içinde yer alan havanın sıcaklıkları değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar sırasında transformatör kayıp değerleri ile birebir uyumlu ısıtıcılar kullanılmıştır. Bu ısıtıcılar ise transformatör bobinlerinin ölçülerine göre imal edilen temsili bobinlerinin içine yerleştirilmiştir. Çalışmalar sırasında 158 adet deney ile 1480 adet noktanın sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu sıcaklıklar birleştirilerek 3D sıcaklık-koordinat grafikleri elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalar ile elde edilen 3D grafikler ile CFD analiz sonuçları birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca kabin duvarlarından meydana gelen ısı transferi miktarları da analizler ile belirlenmiştir. Kabin içinde elde edilen sıcaklık değerleri farklılık göstermesine rağmen, sıcaklık dağılımları çok farklı çıkmamıştır. Bu sonuçlar ile birlikte, gelecek çalışmalarda transformatör ile kabin çatısı arası mesafenin ve havalandırma için oluşturulan formların soğutmaya olan etkisinin araştırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Kuru tip transformatör, CFD analizi, tabii taşınım, sıcaklık dağılımı.

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF THE COOLING PROCESS IN DRY TYPE TRANSFORMERS WITH CABIN WITH CFD ANALYSIS AND EXPERIMENTAL STUDIES**

**MSC THESIS**

**RAMAZAN ALTAY**

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. GÜLŞEN YAMAN )**

**BALIKESİR, DECEMBER 2018**

Among the most important problems for dry type transformers is heating. Usually heating calculations are made for dry type transformers without cabin. Therefore, it is not known how the cooling performance of the transformer is affected by the cabin.

Although the warm-up analysis and experimental studies for dry type transformer windings are sufficient, there is not much analysis or experimental work for dry type transformers with cabins. In the energy sector, dry type transformers continue to gain importance due to their high reliability. In this study, heating analysis of dry type transformers with cabin which are suitable for working in all kinds of environments were made.

In this studies, 250kVA 33/0.4kV Dyn11 (loss value 3kW) dry type transformer with IP31 cabin is taken as the reference. Three different roof geometries have been tried for this transformer cabinet. ANSYS FLUENT/CFD analysis and experimental studies were performed for these 3 different geometries. With these studies, the temperature of the air in the cabin was evaluated. The data obtained were compared with each other.

For the experimental studies, suitable quartz heat elements for the transformer loss values were used. These heat elements are placed inside the representative coils produced. During the study, 158 experiments were carried out and temperature values of 1480 points were recorded. 3D temperature-coordinate graphs were obtained by combining these obtained temperature values.

The results obtained from experimental studies and 3D graphics were found to be consistent with the results of CFD analysis. In addition, mount of heat transfer from cabin walls was determined by the analysis. Although the temperature values obtained in the cabin differed, the temperature distributions were similiar. Fort his reason, the effect of the distance between transformer and cabin roof and geometric form of the air flow gaps on cooling will be investigated in future studies.

**KEYWORDS:** Dry type transformer, CFD analysis, natural convection, temerature distribution.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ .....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1    Kuru Tip Transformatörler .....	2
1.1.1    Genel Bilgiler.....	2
1.1.2    Yerleşim Kriterleri .....	4
1.1.3    Çevre Sıcaklığı.....	7
1.1.4    Sıcaklık kontrolü.....	7
1.1.5    Soğutma Sistemi .....	8
1.1.5.1    Tabii Soğutma .....	9
1.1.5.2    İletim İle Soğutma.....	11
1.1.5.3    Cebri Soğutma.....	11
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI.....</b>	<b>14</b>
<b>3. SAYISAL ANALİZ VE TEST DÜZENEGİ.....</b>	<b>22</b>
3.1    Matematiksel Model.....	22
3.2    Problemin Tanımı .....	24
3.3    Model.....	25
3.4    Mesh .....	26
3.5    Malzeme Özellikleri .....	29
3.6    Sınır Şartları .....	30
3.7    Çözüm Modelleri.....	33
3.8    Test Düzenegi Modeli .....	34
3.9    Kullanılan Materyaller .....	38
<b>4. CFD ANALİZİ VE DENEYSEL SONUÇLAR .....</b>	<b>39</b>
4.1    Sıcaklık Dağılımı.....	40
4.2    Hız Dağılımı .....	43
4.3    Isı Transferi Değerleri .....	44
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>46</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>48</b>
<b>7. EKLER.....</b>	<b>51</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Kuru tip transformatör yapısı .....	4
Şekil 1.2: Şalt tesisi için yerleşim örneği .....	5
Şekil 1.3: Rüzgâr türbini için yerleşim örneği.....	6
Şekil 1.4: Petrol sondaj gemisi için yerleşim örneği .....	7
Şekil 1.5: Sıcaklık kontrol sistemi .....	8
Şekil 1.6: Havalandırma kesiti ile ilgili veriler.....	9
Şekil 1.7: Transformatör odasının tabii havalandırması ile ilgili nomogram ...	10
Şekil 1.8: Cebri havalandırma ile ilgili nomogram .....	13
Şekil 2.1: Transformatörün 2D sonlu elemanlar modeli .....	14
Şekil 2.2: Transformatörün sıcaklık dağılımı .....	14
Şekil 2.3: Emissivity değerlerinin karşılaştırılması .....	15
Şekil 2.4: Transformatörün şematik resmi.....	15
Şekil 2.5: Analiz sonucunda hot-spot bölgesi ve hız dağılımları .....	16
Şekil 2.6: Sonlu farklar yöntemi ile bobinlerin matematiksel modeli .....	16
Şekil 2.7: 3D analiz modeli, mesh ve sıcaklık dağılımı .....	17
Şekil 2.8: YG ve AG bobinlerinin z-r yönündeki sıcaklık dağılımı .....	17
Şekil 2.9: Hava kanalı genişliğinin YG ve AG bobinlerinin ortalama sıcaklığına etkisi.....	18
Şekil 2.10: Hava kanalı sayısının ortalama sıcaklığa etkisi.....	18
Şekil 2.11: Emissivity değerinin sıcaklığa olan etkisi .....	19
Şekil 2.12: Sonlu elemanlar(üçgen geometri) modeli .....	19
Şekil 2.13: TPN modeli ile CFD analizinin karşılaştırılması .....	20
Şekil 2.14: Su soğutmalı kuru tip transformatör / Yönlendirici ölçüsünün basınca ve hıza etkisi.....	21
Şekil 3.1: Autodesk Inventor 'de çizilmiş analiz geometrileri .....	22
Şekil 3.2: ANSYS Design Modeler 'de hazırlanmış analiz geometrileri .....	24
Şekil 3.3: Örnek kabinli kuru tip transformatörler .....	24
Şekil 3.4: Autodesk Inventor çizimi .....	25
Şekil 3.5: ANSYS Design Modeler çizimi .....	26
Şekil 3.6: Farklı kabin geometrilerinin çözüm ağları .....	26
Şekil 3.7: Çözüm ağında skewness değeri dağılımı .....	27
Şekil 3.8: Çözüm ağının genel görünümü .....	28
Şekil 3.9: Havanın sıcaklığa bağlı viskozite değişimi .....	30
Şekil 3.10: CFD analizi için sınır şartları .....	31
Şekil 3.11: Kabin(çatı tipi-1) için hız ve enerji yakınsaması.....	33
Şekil 3.12: Kabin(çatı tipi-1) için hava çıkış hızı yakınsaması .....	34
Şekil 3.13: Kabin(çatı tipi-1) için duvarlardan atılan ısı miktarının yakınsaması .....	34
Şekil 3.14: Test düzeneği/çatı tipi-1 .....	35
Şekil 3.15: Test düzeneği/çatı tipi-2 .....	36
Şekil 3.16: Test düzeneği/çatı tipi-3 .....	36
Şekil 3.17: Test düzeneği notasyonu .....	37
Şekil 3.18: Deneysel çalışma fotoğrafları.....	37
Şekil 4.1: AZ çizgisi(1-4 problemleri) sıcaklığının rejime girme eğrisi .....	39
Şekil 4.2: Kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı .....	40

<b>Şekil 4.3:</b> Yüzey sıcaklıklarının dağılımı .....	40
<b>Şekil 4.4:</b> XY ve YZ kesitleri için sıcaklık dağılımı .....	41
<b>Şekil 4.5:</b> Deneysel çalışmalarda elde edilen (XZ Kesiti-E) sıcaklık dağılımı	41
<b>Şekil 4.6:</b> YZ kesiti için hız dağılımı .....	43
<b>Şekil 4.7:</b> XY kesiti için hız dağılımı .....	43
<b>Şekil 4.8:</b> Kabin yüzeylerinden atılan ısı miktarı-Tip1 .....	44
<b>Şekil 4.9:</b> Kabin yüzeylerinden atılan ısı miktarı-Tip2 .....	44
<b>Şekil 4.10:</b> Kabin yüzeylerinden atılan ısı miktarı-Tip3 .....	45

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 1.1:</b> Çevre sıcaklığına bağlı güç değişimi .....	7
<b>Tablo 1.2:</b> Bazı malzemelerin ısı iletim katsayıları.....	11
<b>Tablo 1.3:</b> Basınç kaybı değerleri .....	12
<b>Tablo 2.1:</b> Farklı hava sıcaklıkları ile transformatör güçlerinin karşılaştırılması .....	20
<b>Tablo 2.2:</b> CFD analizi ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	21
<b>Tablo 3.1:</b> Kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri .....	30
<b>Tablo 3.2:</b> Test düzeneği için kullanılan malzemeler .....	38
<b>Tablo 4.1:</b> CFD analizi ile AG-YG bobinleri ve çekirdek için ortalama ve maksimumu sıcaklık değerleri .....	42
<b>Tablo 4.2:</b> XY kesiti-Y(Tip1) için sıcaklıkların karşılaştırılması .....	42
<b>Tablo 4.3:</b> Kabin sacından atılan ısı miktarları .....	45

## SEMBOL LİSTESİ

- $Q_v$  : Transformatörden dışarı atılacak toplam ısı miktarı ( $kW$ )
- $P_v$  : Transformatörün güç kaybı ( $kW$ )
- $P_0$  : Transformatörün boşa çalışma kayıpları ( $kW$ )
- $P_k$  : Transformatörün kısa devre kayıpları ( $kW$ )
- $S_N$  : Transformatörün sürekli gücü ( $kVA$ )
- $S_{AN}$  : Tabii havalandırma (AN) ile çalıştığında transformatör gücü ( $kVA$ )
- $S_{AF}$  : Cebri havalandırma (AF) ile çalıştığında transformatör gücü ( $kVA$ )
- $Q_{V1}$  : Tabii havalandırma ile atılan ısı miktarı ( $kW$ )
- $Q_{V2}$  : Duvar ve tavan üzerinden atılan ısı miktarı ( $kW$ )
- $Q_{V3}$  : Cebri havalandırma ile atılan ısı miktarı ( $kW$ )
- $H$  : Etkili termik yükseklik ( $m$ )
- $\Delta T_L$  : Hava sıcaklık artışı (sıcaklık farkı) ( $K$ )
- $v$  : Havanın kabine giriş hızı ( $m/s$ )
- $A_{1,2}$  : Hava giriş ve çıkış menfez kesitleri ( $m^2$ )
- $Q_{W,D}$  : Duvarlardan ve tavandan atılan ısı gücü ( $kW$ )
- $A_{W,D}$  : Duvarların ve tavanın alanı ( $m^2$ )
- $K_{W,D}$  : Duvarların ve tavanın ısı iletim katsayısı ( $W/mK$ )
- $V_L$  : Hava debisi ( $m^3/s$ )
- $\Delta T_{W,D}$  : Duvar ve tavandaki sıcaklık farkı ( $K$ )
- $C_{PL}$  : Havanın ısı kapasitesi ( $J/kg.K$ )
- $\rho_L$  : 20°C 'de havanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
- $\eta$  : % fan verimi
- $V_K$  : Kanal kesitindeki hava hızı ( $m/s$ )
- $P_A$  : Hava akımı sonucu oluşan basınç farkı ( $N/mm^2$ )
- $T_f$  : Ortalama film sıcaklığı ( $K$ )

- $Re_x$**  : Reynould sayısı  
 **$\delta$**  : Ortalama film kalınlığı ( $m$ )  
 **$\vartheta$**  : Kinematik vizkozite ( $m^2/s$ )  
 **$x$**  : Boyut faktörü  
 **$L$**  : Karakteristik uzunluk  
 **$k$**  : Isı iletim katsayısı ( $W/mK$ )  
 **$h$**  : Isı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ )  
 **$N_u$**  : Nusselt sayısı  
 **$P_r$**  : Prandtl sayısı



## ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca maddi ve manevi tüm desteklerinden dolayı danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gülşen YAMAN 'a ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Ramazan YAMAN 'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarımın verdiği destekten dolayı firmam BEST A.Ş. ve firmadaki yöneticilerime teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında, tez yazımı için beni sürekli motive eden eşim Sayın Yasemin ALTAY 'a, ağabeyim Sayın Yücel ALTAY 'a ve manevi desteklerinden dolayı babam İbrahim ALTAY 'a, annem Nurten ALTAY 'a, kızlarım Elif ve Erva 'ya, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

Transformatörler frekans ve güç değerlerini değiştirmeden, akım ve gerilim değerlerini indirip yükselten, hiçbir hareketli parçası bulunmayan statik elektrik makinalarıdır. Transformatörler temel olarak, giriş sargısı, çıkış sargısı ve demir nüveden oluşmaktadır. Çalışma prensibi ise, giriş sargısına uygulanan alternatif gerilim, devir nüve üzerinde manyetik alan oluşturur. Nüve üzerinde meydana gelen bu manyetik alan, yine nüve üzerine sarılmış olan çıkış bobinini keserek gerilim elde edilir.

Transformatörlerde ısınma önemli problemler arasında yer almaktadır. Bu ısınmanın nedeni ise transformatörde meydana gelen kayıplardır. Transformatör kayıpları ise temel olarak demir ve bakır kayıpları şeklinde ikiye ayrılabilirler. Demir kayıpları transformatörün boşta çalışması sırasında oluşan kayıp değerleridir. Bu kayıplar histeresiz ve fuko kayıpları şeklinde ikiye ayrılırlar. Histeresiz, nüve moleküllerinin frekansa göre birbiri ile sürtünmesi sonucu ısı olarak ortaya çıkmaktadır. Demir nüve içerisine silisyum atarak bu kayıp düşürülebilir. Fuko kayıpları ise, demir nüve üzerinde indüklenen akımın neden olduğu ısı kayıplarıdır. Bu kayıp değeri de demir nüvenin daha ince saclardan kesilmesi ile azaltılabilir. Bakır kayıpları ise giriş ve çıkış sargılarından geçen akımın neden olduğu ısınmalardır. Bu sargılardaki dirençlerden dolayı meydana gelmektedir. Sargılardaki akımın artmasıyla bu kayıp değerleri de artmaktadır.

Transformatörler soğutma tipine göre, yağlı tip ve kuru tip transformatörler olmak üzere ikiye ayrılabilirler. Yağlı tip transformatörler, sargıların ve demir nüvenin bir kazan içine montajı ve bu kazanın izolasyon ve soğutma için yağ ile doldurulmasıyla elde edilirler. Yeterli soğutmaya sağlayabilmek için de kazan içindeki bu yağ, yan duvarlarda yer alan radyatörlerden geçirilmektedir. Kuru tip transformatörlerde ise soğutma için hava dışında hiçbir şey kullanılmamaktadır. Ortamda bulunan hava transformatör sargıları ve nüve üzerinden geçerek doğal bir soğutma sağlanmaktadır. Bu çalışmada da hava ile doğal soğutma sağlayan kabinli kuru tip transformatörler incelenmiştir.

Kuru tip transformatörlerde ısınma araştırılması gereken konular arasındadır. Bu tip transformatörlerde ısınma hesapları ampirik formüller ile yapılabilmektedir. Ancak kabinli bir kuru tip transformatörün, kabinsiz olana göre ısı atma kapasitesinin ne kadar değiştiği bilinmemektedir. Bu nedenle bu çalışmada, ortam sıcaklığında bulunan durgun bir havanın, kabine girişinden, kabinden çıkış anına kadar olan kısmı incelenmiştir. Böylece kabin ile birlikte ısınmayı etkileyen dizayn parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

## 1.1 Kuru Tip Transformatörler

### 1.1.1 Genel Bilgiler

Genel olarak elektrik dağıtım tesislerinde, örneğin şalt cihazlarında, transformatörlerde, kondansatörlerde izole edici sıvı olarak madeni yağ kullanılmaktadır. Bununla beraber pek çok endüstri ülkesinde meydana gelen ağır birkaç yangın olayı madeni yağlarla yalıtılmış cihazların bina içinde kullanılmasını yasalarla kısıtlamışlardır. Çözüm olarak da yerine 250-300 °C'e kadar yanmayan klofen kullanılmış, böylece yangın olayları nispeten önlenmiştir. Ancak klofenin zararlı olması ve doğada yok edilememesi bilinmesine rağmen kullanılmaya devam edilmiştir. Fakat klofenli bir transformatörün yanması sırasında sıcaklığın 600 °C'e ulaşmasıyla meydana gelen çok zehirli gazların neden olduğu olaylar, bu tür transformatörlerin değiştirilmesi kampanyasını başlatmıştır. Doğal olarak bu da çok miktardaki zehirli atığın yok edilmesi ile ilgili büyük sorunlar ortaya çıkarmıştır. Problem, önceleri transformatör içindeki klofenin boşaltılması ve silikon yağı ile doldurulması suretiyle çözülmeye çalışıldı. Transformatörün aktif kısmı tarafından emilmiş olan klofen, belli bir zaman sonra sıvı hale dönüşüp silikon yağı içinde poliklorlu bifeniller (PCB) konsantrasyonunu izin verilen düzeyin üzerine çıkartmaktaydı [1].

Diğer yanda, yangın tehlikesi dolayısıyla yağlı tip transformatörlerin izin verilmediği bina içi tesislerde klofenli transformatörlerin yerine silikon yağlı transformatörler de kabul edilememektedir. Çünkü silikon yağının alevlenme noktası, yağın alevlenme noktasından yaklaşık 150 °C daha az olmasına rağmen kapalı hallerdeki yangın emniyeti açısından silikonun da güvenli bir çözüm olmadığı kabul edilmiştir.

Yukarıda belirtilen klofenli ve silikon yağlı transformatörlere ek olarak akla gelen klasik kuru tip transformatörler ise esas itibariyle ilk transformatörler olup, klofenin bulunmasından çok önce bilinmekteydi.

1960'lı yılların ortalarına kadar yağlı transformatörlere alternatif olarak üretilen klasik kuru tip transformatörler kullanılmaktaydı. Klasik kuru tip transformatörler yeterli olmayan dielektrik özelliklerinden dolayı yalnız 10 kV'a kadar olan anma gerilimlerinde uygun bir alternatif çözüm olabiliyordu. Zira 20 kV ve daha yukarı anma gerilimlerinde darbe dayanım gerilimleri yeterli olmadığından proje mühendisleri bu gerilimlerde yağlı veya klofen transformatörleri seçmek zorunda kalıyordu.

10 kV'a kadar anma gerilimlerinde bile uzun süre devre dışı kalan klasik kuru tip transformatörün nemi alınıp tekrar devreye sokulması sırasında kurutulması gerektiğinden, sorunlu bir alternatif çözüm olabiliyordu.

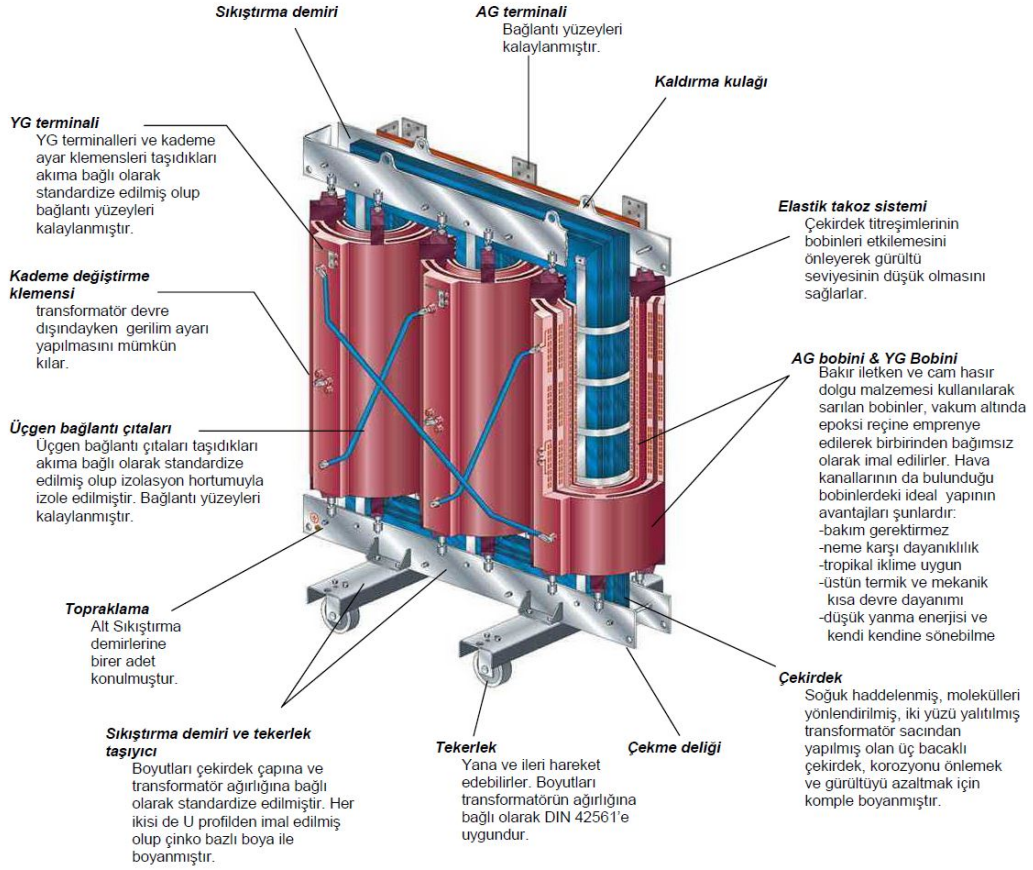
Günümüzde dahi klasik kuru tip transformatörlerin kullanıldığı işletmelerde bu tür nem sorunlarına rastlamak mümkündür.

Ayrıca klasik kuru tip transformatörlerin gürültü düzeyinin, çekirdeğinin büyüklüğü, dolayısıyla sıvı izolasyonlu (yağlı ve klofen) transformatörlere oranla oldukça yüksek olması da klasik kuru tip transformatörlerin başka olumsuz yanındır. Zira gürültü istenmeyen hastane, okul vs. gibi işletmelerde gürültünün kesilmesi için maliyeti arttıran önlemlerin alınması gerekmektedir [1].

Kısaca, klasik kuru tip transformatörler işletme tekniği açısından olumsuz yanları olan ve yağlı transformatörlere sınırlı bir alternatif çözüm getiren bir transformatör tipidir.

1964 yılında 20 kV'luk transformatörlerin bina içine yerleştirilmesi istendiğinde bu tip işletme koşullarına uygun klasik kuru transformatörler mevcut olmadığından, vakum altında dökülen dökme reçineli kuru tip transformatörler yapılmıştır. Bu transformatörlerin yüksek gerilim sargıları dökme reçineli orta gerilim sınıfındaki gerilim transformatörlerinin sargılarına benzemektedir [1].

Kısa sürede gerçekleştirilen geliştirme çalışmaları sonucunda büyük miktardaki dökme reçinenin işlenmesinde, kısmi deşarj ve reçinenin ömrü açısından var olan bazı problemler çözülmüştür. Problemlerin çözülmesiyle, 36 kV'a kadar anma gerilimlerinde, ekonomik sınırlar içinde, tüm test koşullarını yerine getiren, bina içi tesislerde yüksek güvenilirlik ve işletme emniyeti sağlayan, çevreyi kirlilemeyen "dökme reçineli kuru tip transformatör" ortaya çıkmıştır.



**Şekil 1.1:** Kuru tip transformatör yapısı [2].

Alçak gerilim (AG) ve yüksek gerilim (YG) sargıları bakır iletkenlerle sarılıp kalıplandıktan sonra vakum altında reçine dökülerek emprenye edilirler. Aynı ayrı dökülen AG ve YG bobini arasında hava kanalı olup herhangi bir mekanik bağlantı yoktur. Böylece aşırı kirlenme ve korozyona sebep olacak çevre koşullarında dahi AG ve YG bobinleri arasında yüzeysel deşarj oluşmaz. Bobinler sıcaklık değişimleriyle genişleme veya büzülme sonucu boyunun uzayıp kışalmasını absorbe edecek elastiki destek parçalarıyla monte edilirler. Tropikal iklim şartlarında ve nem oranı %100 olan ortamlarda bile kullanılabilirler. Bobinler, standartlarda belirtilen kısa devre esnasında kolay tutuşmayan ve kendi kendine sönebilme özelliğe sahiptir. Etkin bir soğutma ve hava ile sargılar arasındaki sıcaklık farklılıklarının düşük tutulması amacıyla; sargı çevresindeki cam hasır dolgulu reçine cidar kalınlığı minimum düzeyde tutulmuştur. AG ve YG bobinlerindeki hava kanalları sayesinde müsaade edilen sıcaklık artışının üzerine çıkmadan fanlı soğutma sistemiyle transformatörün güç kapasitesi %140'a çıkarılabilir [1,2].

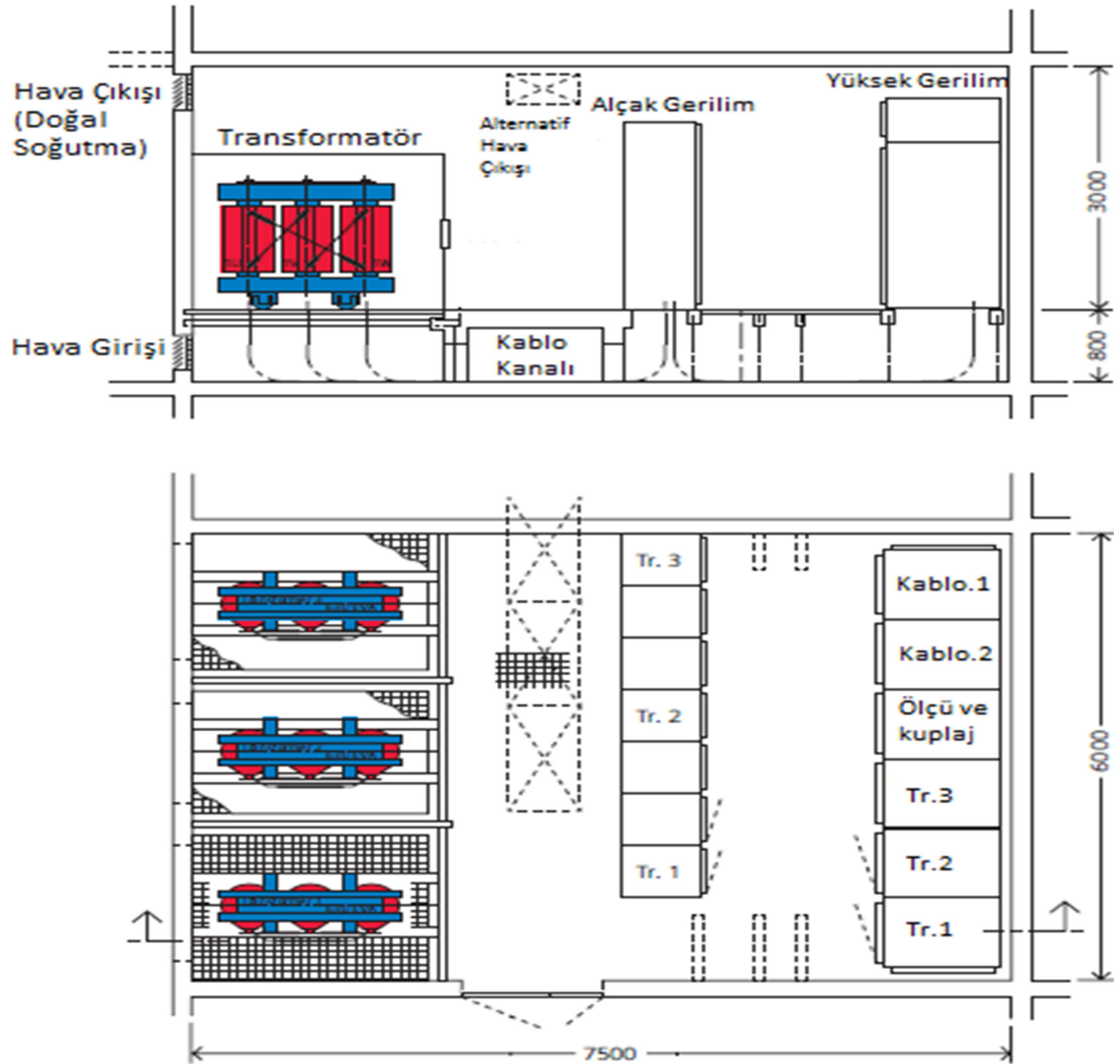
### 1.1.2 Yerleşim Kriterleri

Her şeyden önce dökme reçineli kuru tip transformatörlerin bina içi yerleşimler için tasarlandıkları göz önünde bulundurulmalıdır. Ultraviyole ışınların

dökme reçineli bobinler üzerindeki tahribatı nedeniyle dökme reçineli kuru tip transformatörler, güneş ışığına, yağmura ve sıçrayan suya karşı gerekli koruma sağlandığı takdirde dışarıda da kullanılabilirler [1].

Yağ ve PCB toplama çukuru ihtiyacı duyulmadığı için dökme reçineli kuru tip transformatörler, yağlı veya PCB 'li transformatörlere göre bina içi kullanımda yerleştirileceği yere ilişkin fazla özellik istemeyen bir kullanım olanağına sahiptirler.

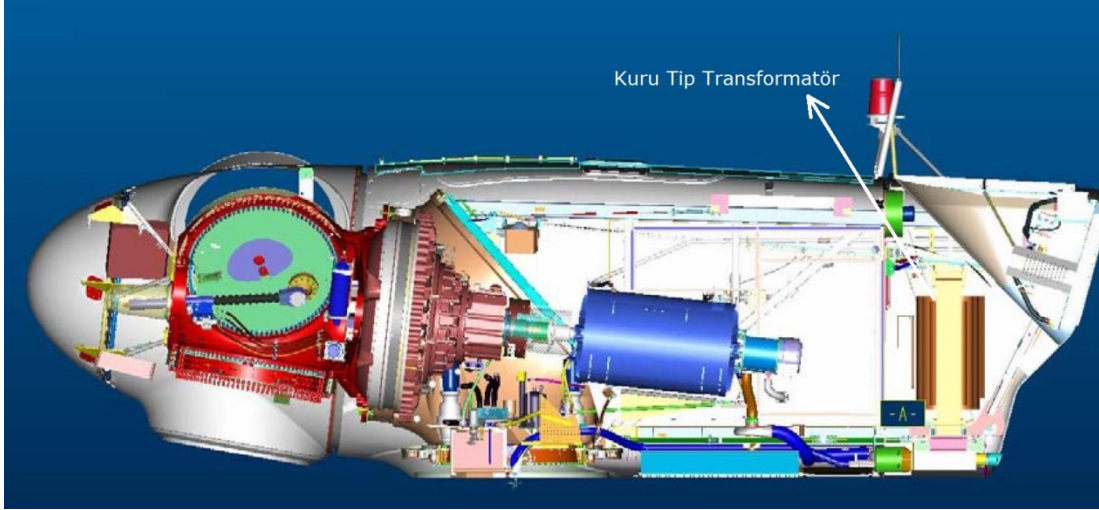
Dökme reçineli kuru tip transformatörlerle bina içi transformatör merkezi düzenlemesi, kablo güzergâhı da göz önüne alınarak optimize edilebilir. Böyle bir durumda dökme reçineli kuru tip transformatörler farklı imkânları sunabilecek esnekliğe sahiptirler. Örneğin AG ve orta gerilim (OG) şalt tesisleri ile aynı odaya yerleştirilebilirler. Ayrıca yangına karşı özel önlemlerin alınmasına gerek yoktur. Böylece Şekil 1.2'de de görüldüğü gibi transformatörler için gerekli bağımsız bir transformatör odasına gerek kalmamaktadır.



Şekil 1.2: Şalt tesisi için yerleşim örneği [3].

Rutubete karşı son derece dayanıklı olması nedeniyle işletmeye alınmadan önce kurutulmasına gerek yoktur. Herhangi bir sebeple meydana gelebilecek ark arızası sonucundaki yanmalarda zehirli gazların oluşması söz konusu değildir.

Rüzgâr türbinlerinde, sıcaklık, titreşim ve aleve dayanıklı yapısı sayesinde kuru tip transformatörler kullanılmaktadır. Kuru tip transformatörlerin türbin muhafazası için yerleşim örneği Şekil 1.3'de gösterilmektedir. Burada da görüldüğü gibi kuru transformatörler, türbin muhafazasının arka bölümüne konulmakta ve titreşim için sabitlenmektedir.



**Şekil 1.3:** Rüzgâr türbini için yerleşim örneği [4].

Kuru tip transformatörler, kule üzerinde bulunan muhafazaya kurulacağı gibi istenilirse türbin kulelerinin giriş bölgesine de kurulumları yapılabilmektedir.

Şekil 1.4'de görüldüğü gibi petrol sondaj gemileri ve açık deniz sondaj platformları gibi, yüksek güç gerektiren yerlerde enerji dağıtımı orta gerilimle sağlanabilir. Deniz iklimine uygunluk, yüksek yangın emniyeti ve geminin dalgalarla sallanmasında bile yüksek güvenilirlik gibi zorunluluklar dökme reçineli kuru tip transformatörle karşılanabilir [1].



Şekil 1.4: Petrol sondaj gemisi için yerleşim örneği.

### 1.1.3 Çevre Sıcaklığı

Transformatörün yerleştirildiği yerdeki çevre sıcaklığı  $40^{\circ}\text{C}$ 'i geçmemelidir. Değişik çevre sıcaklıklarında transformatörün gücü Tablo 1.1'deki değerleri alır [3].

Tablo 1.1: Çevre sıcaklığına bağlı güç değişimi [1,3].

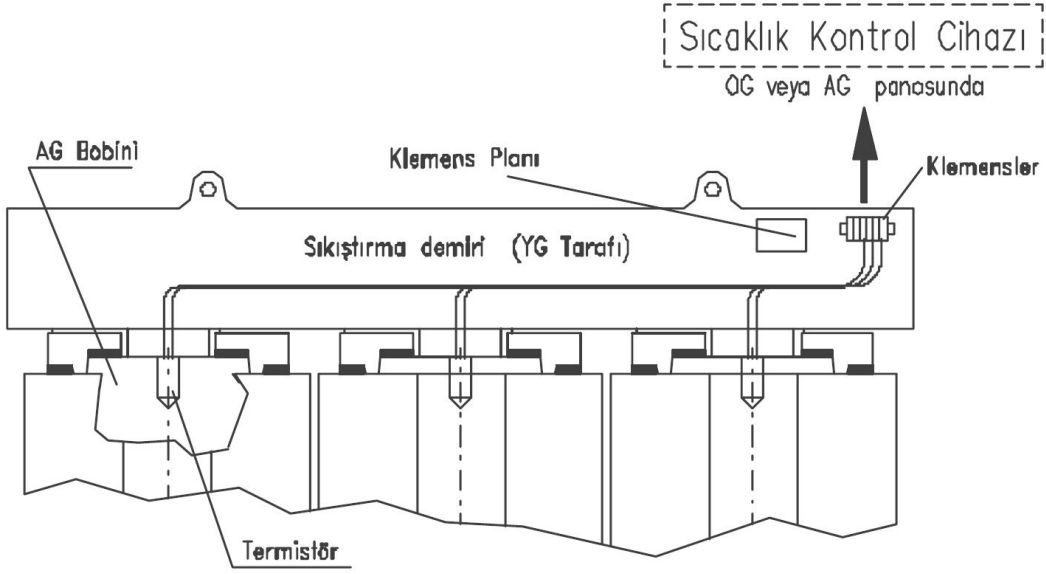
Çevre sıcaklığı $^{\circ}\text{C}$	Sürekli gücü $S_N$
-20	% 124
-10	% 118
0	% 112
+10	% 106
+20	% 100
+30	% 93

Tropikal iklimlerde çalışacak transformatörler için çevre sıcaklıkları ve boya özelliği ayrıca verilmelidir.

### 1.1.4 Sıcaklık kontrolü

Sıcaklık kontrol sistemi, transformatör sargılarını yüksek çevre sıcaklığının veya aşırı yüklenmelerin neden olduğu izin verilmeyen aşırı ısınmalara karşı korur. Böylece transformatör gücünden tam olarak tehlikesizce yararlanılmasını sağlar. Sıcaklık kontrol sisteminin bağlantı şeması Şekil 1.5'de gösterilmiştir.



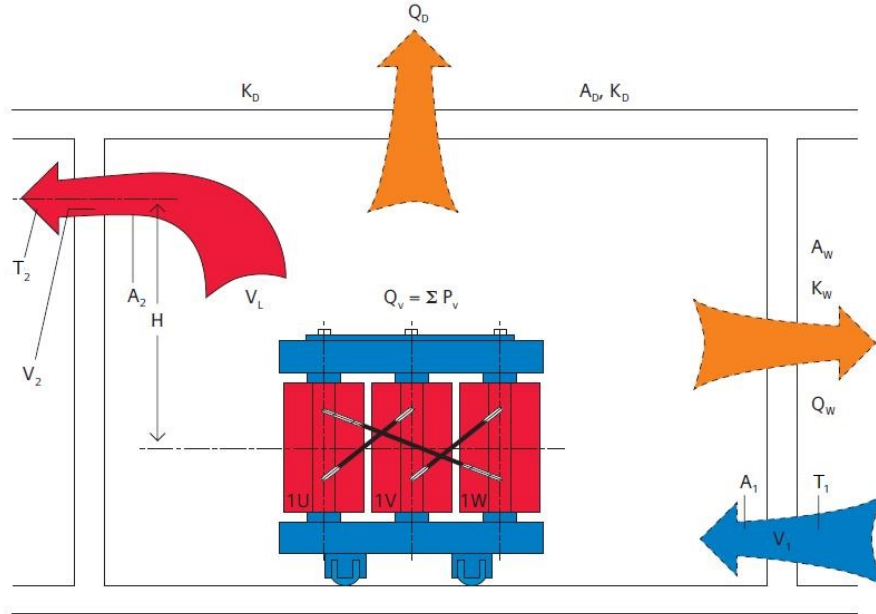


**Şekil 1.5:** Sıcaklık kontrol sistemi [2].

Termistörler; değeri sıcaklığa bağlı olarak birdenbire artan küçük boyutlardaki dirençlerdir. Transformatör sargılarına yerleştirilen bu termistörler, sıcaklık kontrol cihazına seri olarak bağlanmış olup, transformatör sargılarında sıcaklığın yükselmesiyle termistör takımının direnci de artarak sıcaklık kontrol cihazını harekete geçirir. Böylece alarm veya açma kumandası verilmiş olur. Bu koruma sistemi; Alçak gerilimi 1,1 kV'a kadar olan transformatörlerde kullanılır. 1,1 kV 'dan yukarı olanlarda ise özel koruma sistemi uygulanır [2].

### 1.1.5 Soğutma Sistemi

İşletmelerde transformatör kayıplarından oluşan ısının, dışarı atılması zorunludur. Bunun için öncelikle transformatör odasının tabii olarak havalandırılması incelenmelidir. Fakat çoğunlukla kayıplardan oluşan ısının bir havalandırma düzeni ile dışarı atılması gerekmektedir (cebri havalandırma). Aşağıda transformatör odalarının basit sistemlerle tabii ve cebri olarak havalandırma hesapları, havalandırma tesisinin amaca uygun olarak dizayn edilmesi ve buna ilişkin ölçülendirme diyagramları ele alınmıştır [1,3]. Transformatör odasından atılan ısı değerlerini belirten şema Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Havalandırma kesiti ile ilgili veriler [3].

Transformatör odasında transformatör kayıplarından meydana gelen ısı her transformatör için (1.1) eşitliği ile hesaplanır.

$$P_v = P_0 + 1.2 \times P_k \left( \frac{S_{AF}}{S_{AN}} \right)^2 \quad (1.1)$$

Burada  $P_0$ ,  $P_k$  ve  $P_v$  sırasıyla transformatörün boşa, yükte ve fanlı kayıp değerleridir. Transformatörün toplam ısı kaybı ( $Q_v$ ) ise (1.2) eşitliği ile hesaplanır.

$$Q_v = \sum P_v = Q_{V1} + Q_{V2} + Q_{V3} \quad (1.2)$$

Atılan ısı miktarları ( $Q_{V1} + Q_{V2} + Q_{V3}$ ) aşağıda sırası ile ele alınmıştır.

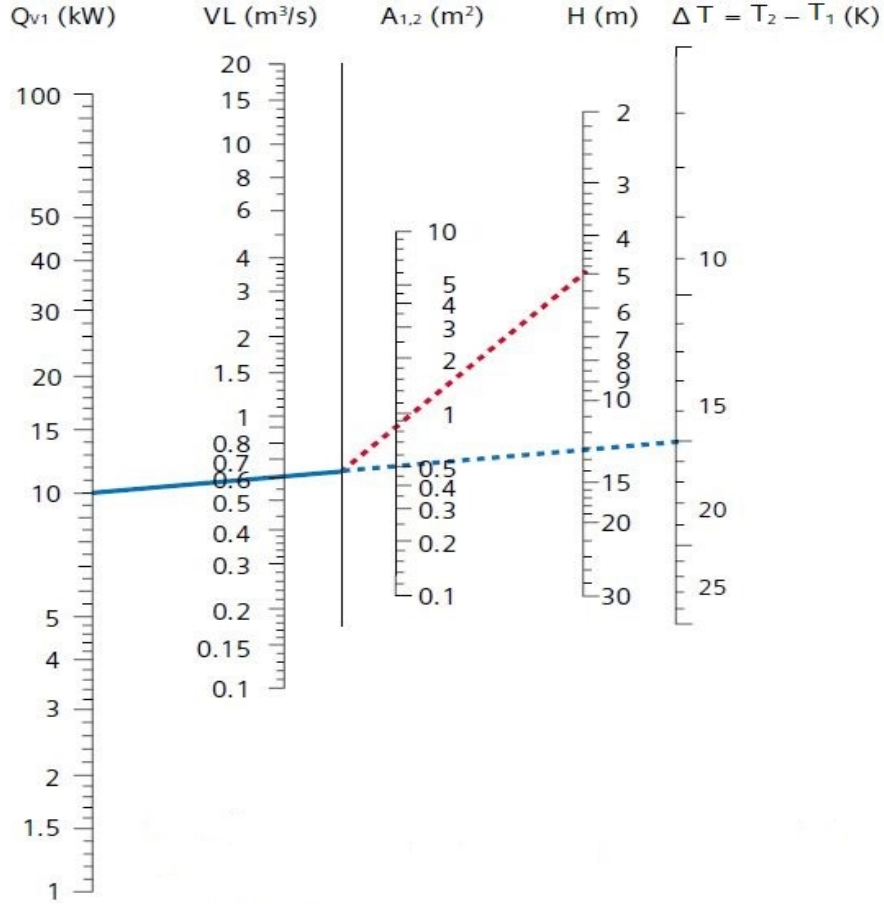
### 1.1.5.1 Tabii Soğutma

Tabii havalandırma ile atılan ısı miktarı,

$$Q_{V1} = 0.0098 \times A_{1,2} \times \sqrt{H \times \Delta T_L^3} \quad (1.3)$$

Eşitliği ile verilmektedir. Burada  $A_{1,2}$  hava giriş ve çıkış menfez kesitlerini,  $H$  transformatörün ağırlık merkezi ile hava çıkış menfezi arası mesafeyi,  $\Delta T_L$  ise havanın giriş çıkış sıcaklık farkını ifade etmektedir.

Bu (1.3) eşitliğinin içeriği Şekil 1.7'de görülmekte olup, terimler ise Şekil 1.8'deki nomograma tekabül etmektedir [1,3,6].



**Şekil 1.7:** Transformatör odasının tabii havalandırması ile ilgili nomogram [3].

Tabii havalandırma için bir hesap örneği:

Verilenler;  $Q_{V1} = \sum P_V = 10 \text{ kW}$ ,  $H=5\text{m}$ ,  $\Delta T_L = T_2 - T_1 = 15\text{K}$

İstenilenler;  $v_L$ : Hava miktarı ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

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

Şekil 1.8'deki nomogramdan  $Q_{V1}=10 \text{ kW}$  ve  $\Delta T_L=15 \text{ K}$  olduğuna göre  $v_L$  skalasında  $0.58 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik bir hava miktarı,  $H=5\text{m}$  olduğundan  $A_{1,2}$  skalasından  $0.78 \text{ m}^2$ 'lik bir hava kanalı kesiti okunur. Bulunan hava kanalı kesiti gerekli olan serbest kesittir. Kesiti azaltıcı elemanlar dikkate alınmalıdır [1,3].

Nomogramda hava akım dirençleri, hava giriş menfezinde tel aralıkları 10-20 mm olan bir tel kafes kullanılacağı, hava çıkış menfezinde ise panjur kullanılacağı düşünülmüşür. Hava çıkış menfezinde de tel kafes kullanılacaksa kesit %10 oranında küçültülebilir [1,3].

### 1.1.5.2 İletim İle Soğutma

Duvarlardan ve tavandan iletimle atılan ısı miktarı ( $Q_{V2}$ ) (1.4) eşitliği ile hesaplanır.

$$Q_{V2} = 0.7 \times A_W \times K_W \times \Delta T_W + A_D \times K_D \times \Delta T_D \quad (1.4)$$

Transformatör kabinlerinde iletimle atılan ısı miktarı ( $Q_{V2}$ ), taşınım ile atılan ısıdan ( $Q_{V1}$ ) genel olarak çok daha düşüktür.

**Tablo 1.2:** Bazı malzemelerin ısı iletim katsayıları [7].

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

### 1.1.5.3 Cebri Soğutma

Cebri hava akımı ile atılan ısı miktarı ( $Q_{V3}$ ), doğal taşınım ( $Q_{V1}$ ) ve iletim ısı transferi ( $Q_{V2}$ ) değerlerinden oldukça yüksektir. Bu nedenle cebri taşınım ile atılan ısı transferi hesaplamalarında, ( $Q_{V1}$ ) ve ( $Q_{V2}$ ) emniyet faktörü için ihmal edilerek (1.5) eşitliğinde kullanılmazlar [1,3].

$$Q_{V3} = V_L \times C_{PL} \times \rho_L \times \Delta T_L \quad (1.5)$$

Şekil 1.8 'deki nomogram yukarıdaki formülü içerir. Havalandırma kanalında 10 m/s 'lik bir hava akımı hızında ve değişik sıcaklık farklarında ( $\Delta T_L$ ), aşağıdaki parametreler belirlenmektedir [1,3].

- İletilecek hava miktarı
- Hava kanallarının kesiti
- Hava kanal kesitine oranla 4 kat büyütülmüş menfez kesitleri

Hava giriş miktarı ( $V_L$ ), hava hızı ( $v$ ) ve giriş çıkış menfezi kesitleri ( $A$ ) arasındaki bağlantı aşağıda verilmiştir.

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

### Fan

Havalandırmada kullanılacak fan radyal veya aksenal olabilir. Havalandırma sisteminde gerekli toplam basınç farkı ( $N/mm^2$ ) tespit edildikten sonra uygun bir fan seçilir. Transformatörün gürültüsüne ek olarak fanların neden olduğu gürültü gerekirse gürültü önleyici elemanlarla yalıtılabilir [1,3].

### Fan gücü

Fanın tahrik gücü;

$$P = \frac{p \times v_L}{3.6 \times 10^6 \times \eta} \quad (1.7)$$

formülü ile kW olarak hesaplanır. Burada;

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

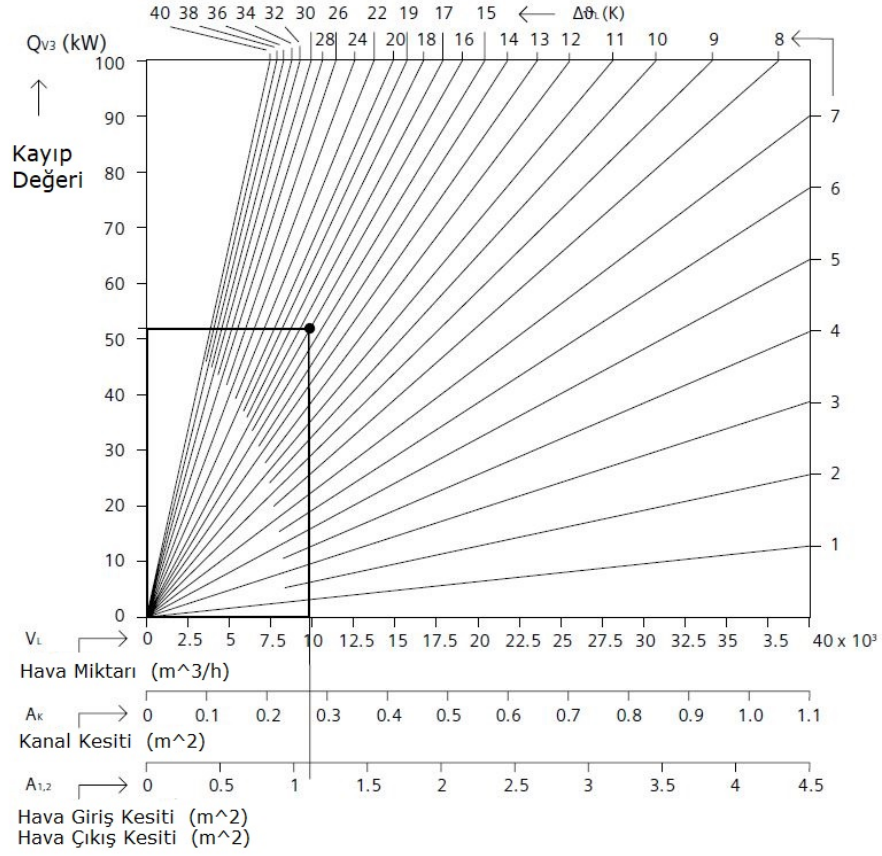
ifadesi ile hesaplanır.

### Hava akımı sonucu oluşan basınç farkı

$p_R$  basınç farkı doğrusal kanallardaki sürtünme direncinden ve dirsek, T-parçaların, tel kafes ve kesit değişikliklerinin neden olduğu dirençlerden oluşur.

**Tablo 1.3:** Basınç kaybı değerleri [1,3].

Elemanın Tanımı	Basınç Kaybı ( $N/mm^2$ )
Panjurlu Duvarlar	$\approx 40-70$
Panjurlar	$\approx 10-50$
Tel Kafes	$\approx 10-20$
Gürültü Önleyici Elemanlar	$\approx 50-100$



Şekil 1.8: Cebri havalandırma ile ilgili nomogram [3].

### İvmenin neden olduğu basınç farkı

$$P_B = 0.61xV_K^2 \quad (1.9)$$

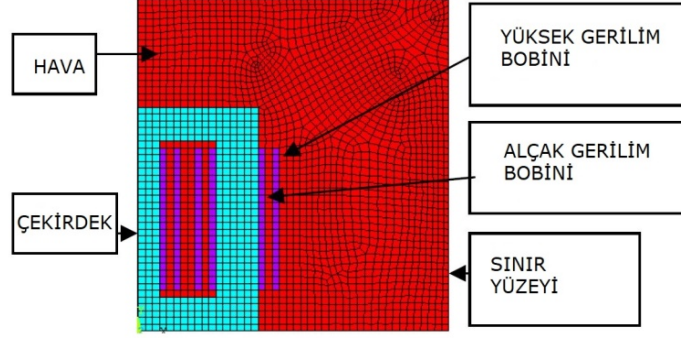
formülü ile hesaplanır. Burada;  $V_K$  kanal kesitindeki hava hızı olup,

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

şeklindedir.

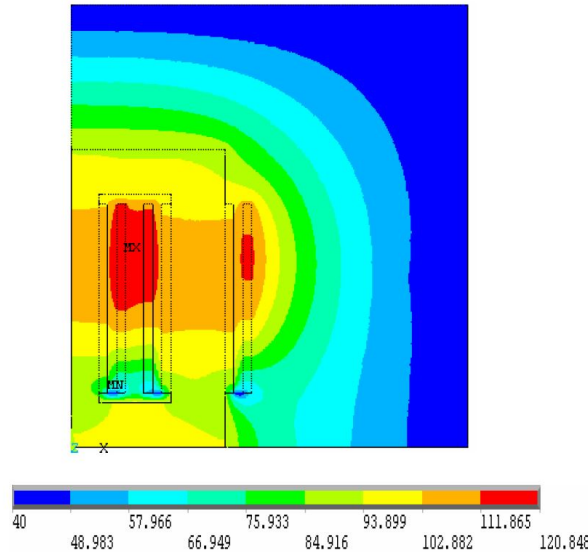
## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Magdy vd. [8] çalışmalarında kuru tip transformatörün termal modelini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak oluşturmuşlardır. Termal model 2D çekirdek, AG ve YG bobinlerinden oluşturulmuştur (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2).



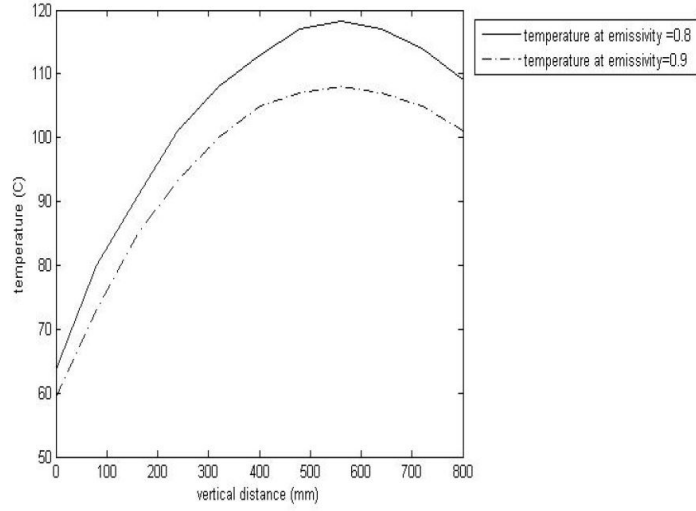
Şekil 2.1: Transformatörün 2D sonlu elemanlar modeli [8].

Yapılan analizler farklı ortam sıcaklıkları, hava kanalı genişliği ve *emissivity* değerleri dikkate alınarak yapılmış ve deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 2.3).



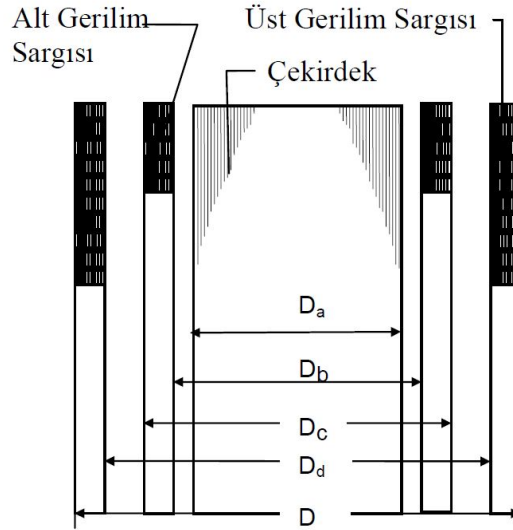
Şekil 2.2: Transformatörün sıcaklık dağılımı [8].

Sonuçlar da 3 parametrenin kuru tip transformatörün sıcaklığına olan etkisi dikey yöndeki yüksekliği dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yapılan bu analizler ile transformatörün hot-spot bölgesi belirlenmiştir.



Şekil 2.3: Emissivity değerlerinin karşılaştırılması [8].

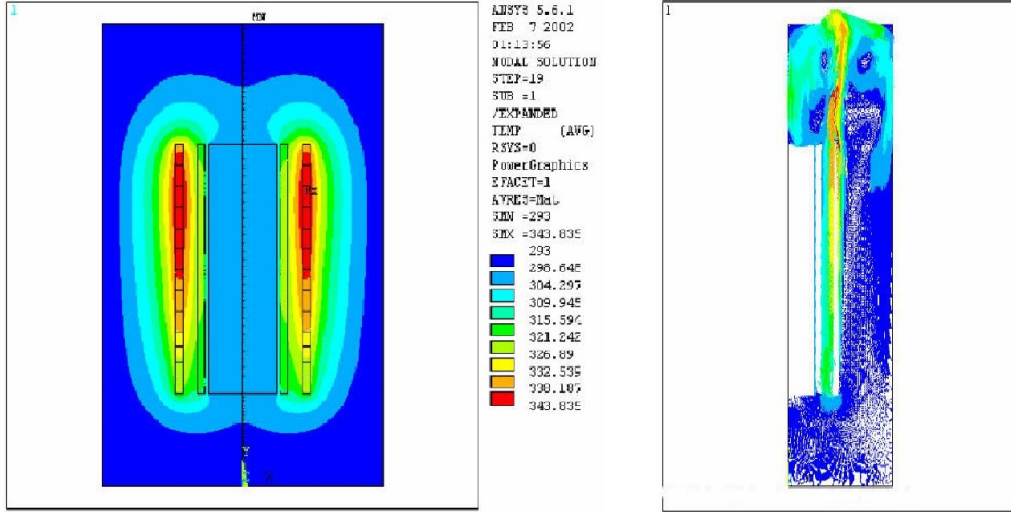
Kömürgöz ve Güzelbeyoğlu [9] çalışmalarında, kuru tip transformatörün Şekil 2.4 'de görüldüğü gibi çekirdek, alçak gerilim ve yüksek gerilim bobinlerini sonlu elemanlar yöntemi ile 2D olarak modellemiştir.



Şekil 2.4: Transformatörün şematik resmi [9].

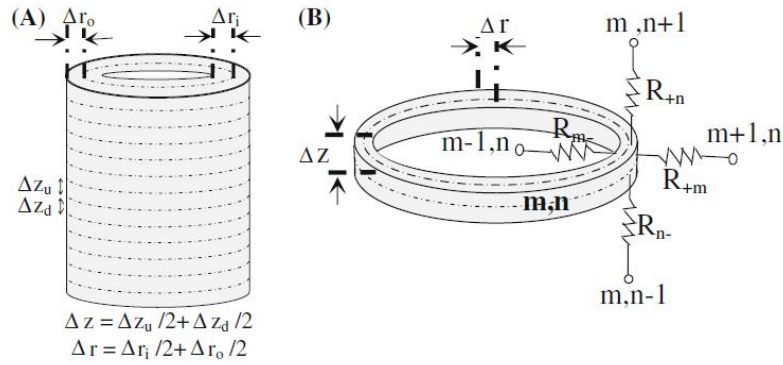
Yapılan analizler sonucunda transformatörün hot-spot bölgesi, bobin yüksekliğine göre sıcaklık dağılımı, çevredeki havanın sıcaklığı ve hareketi belirlenmiştir (bkz. Şekil 2.5).





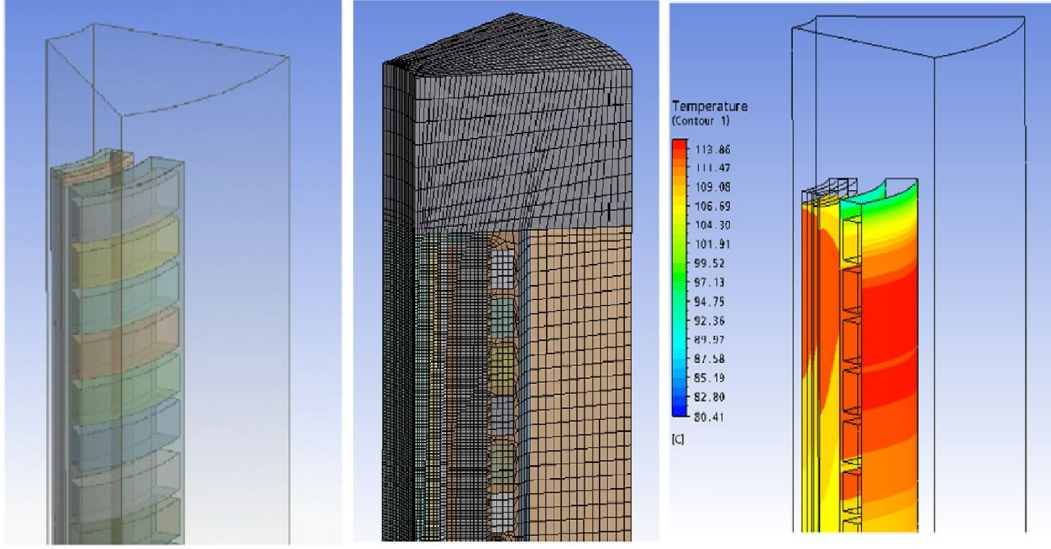
Şekil 2.5: Analiz sonucunda hot-spot bölgesi ve hız dağılımları [9].

Rahimpour ve Azizian [10] çalışmalarında, kuru tip transformatörün matematiksel modelini çıkartıp, sonlu farklar yöntemi kullanarak problem çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar Eslamian vd. [11] çalışmaları ile uyumluluk göstermektedir.



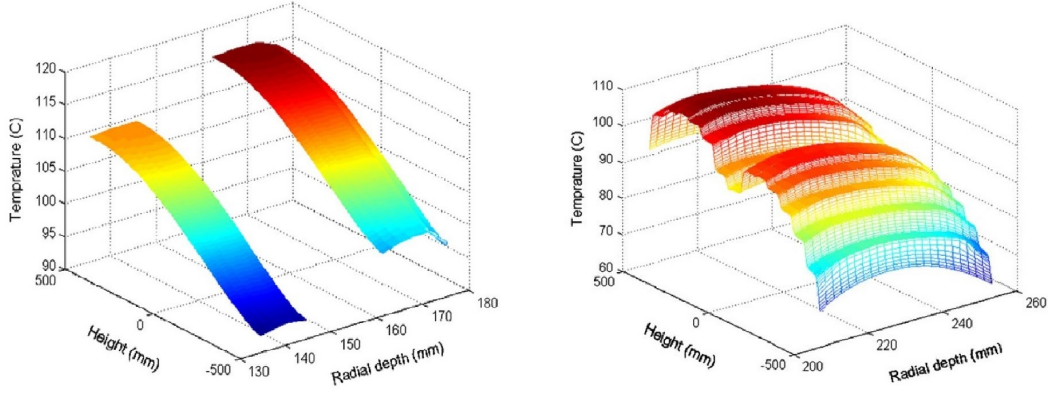
Şekil 2.6: Sonlu farklar yöntemi ile bobinlerin matematiksel modeli [10].

Eslimian vd. [11] çalışmalarında ise sonlu hacimler yöntemi kullanarak (Computational Fluid Dynamics, CFD) analizler yapılmıştır. Modelde AG ve YG sargıları 3D katı olarak bir dilim geometri oluşturulmuştur. Aşağıda Şekil 2.7-2.11 'de model, mesh ve sonuç görüntüleri yer almaktadır.



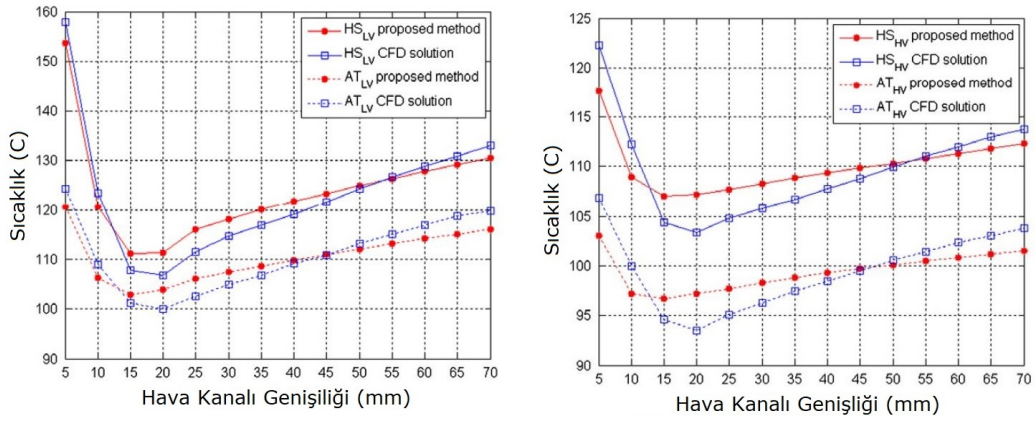
**Şekil 2.7:** 3D analiz modeli, mesh ve sıcaklık dağılımı [11].

Analizler neticesinde AG ve YG bobinlerinin radyal ve eksenel mesafelerine göre sıcaklık dağılımlarının değişim grafikleri aşağıda belirtilmiştir. Alçak gerilim için 1m boy, 2x10 mm bobin kalınlığı ve 20 mm havalandırma kanalı genişliğine göre, yüksek gerilim bobini için ise, 1m yükseklik 40 mm bobin kalınlığına göre sıcaklık dağılımı çıkarılmıştır.

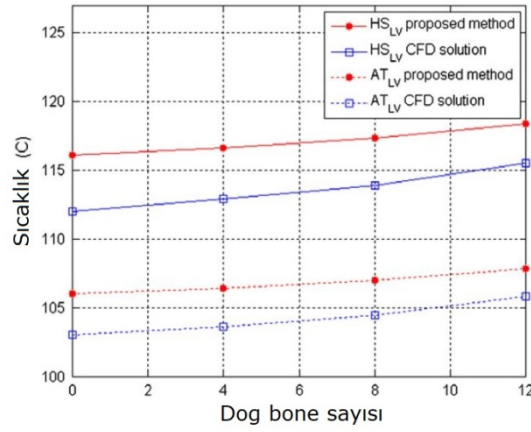


**Şekil 2.8:** YG ve AG bobinlerinin z-r yönündeki sıcaklık dağılımı [11].

Yapılan analizler sonucunda, AG-YG arasında kullanılan hava kanallarının (dogbone) genişliğinin ve sayısının ortalama sıcaklık dağılımına olan etkisi incelenmiştir. (HS: Hot-Spot, AT: Ortalama Sıcaklık) (Şekil 2.8)



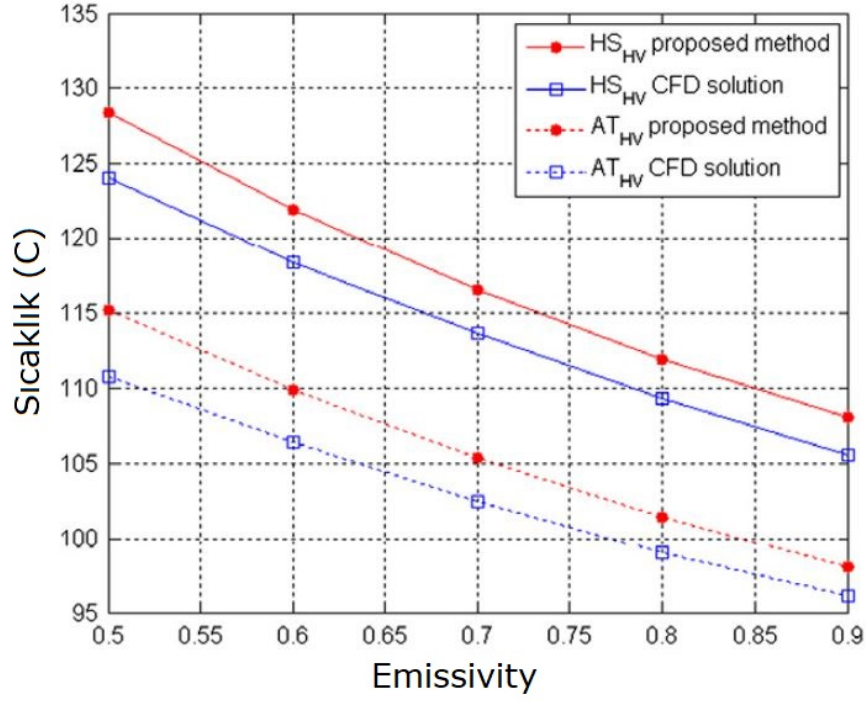
Şekil 2.9: Hava kanalı genişliğinin YG ve AG bobinlerinin ortalama sıcaklığına etkisi [11].



Şekil 2.10: Hava kanalı sayısının ortalama sıcaklığa etkisi [11].

Soğutma kanalı genişliğinin 20-40mm aralığında optimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Kanal sayısının ise ortalama sıcaklığa olumsuz etkisi lineer olarak artmaktadır.

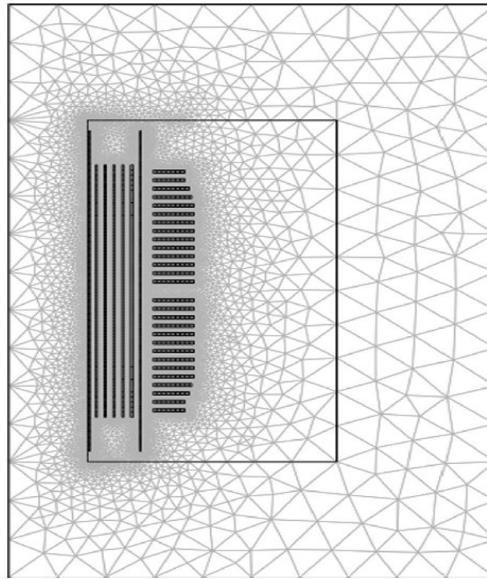
Eslamian vd.[11] radyasyon etkisine ( $\epsilon$ =emissivity) bağlı olarak sıcaklık değişimlerini Şekil 2.11'deki gibi elde etmişlerdir. Bu analizler sonucunda AG bobinlerinde radyasyon etkisinin düşük, YG bobinlerinde ise etkinin yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.11: Emissivity değerinin sıcaklığa olan etkisi [11].

Bunlara ek olarak çalışmalar sonucunda, bobinlerde kullanılan ince kâğıt izolasyonlarının sıcaklığa herhangi bir etkisinin olmadığı (ihmal edilebilir olduğu) anlaşılmıştır.

Lee vd. [12] çalışmalarında sabit ve değişken hava sıcaklıklarının farklı güçlerdeki kuru tip transformatörlerdeki sıcaklığa olan etkisini incelemiştir. Daha sonra hesaplamalar ile deneysel sonuçları karşılaştırmıştır. Model olarak 2D alçak gerilim folyo ve yüksek gerilim disk sargıları modellenmiştir (Şekil 2.12).



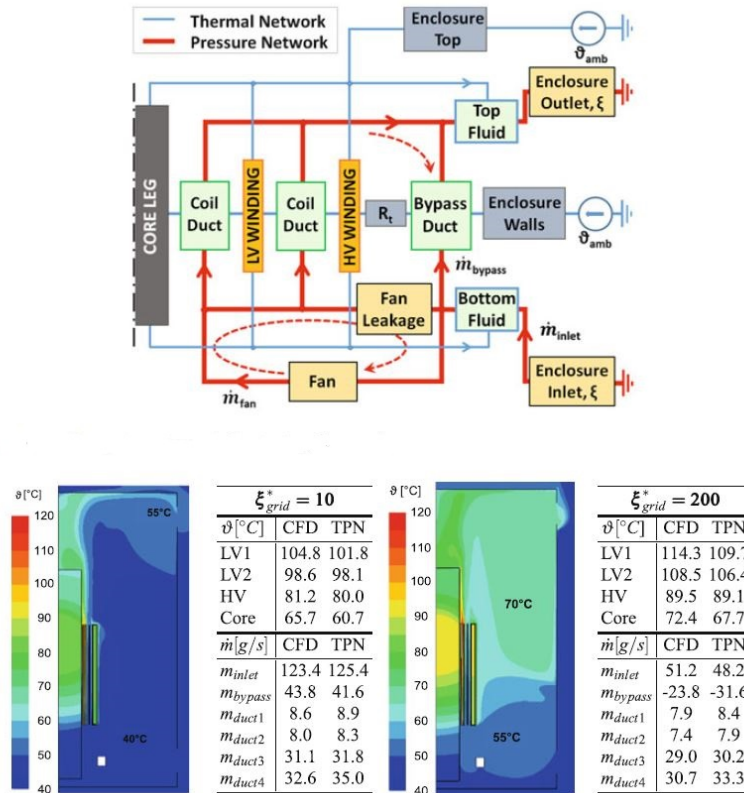
Şekil 2.12: Sonlu elemanlar(üçgen geometri) modeli [12].

Ölçümler alçak gerilim bobinlerinde yer alan hava kanallarının iç yüzeylerinden alınmıştır. Tablo 2.1’de görüleceği gibi 4 adet hava kanalının 2. ve 4. Kanallarından, 3 farklı güç için değerler alınıp karşılaştırma yapılmıştır.

**Tablo 2.1:** Farklı hava sıcaklıkları ile transformatör güçlerinin karşılaştırılması [12].

kVA	Hesaplanan yüzey sıcaklığı		Ölçülen yüzey sıcaklığı
	Sabit hava sıcaklığı	Değişken hava sıcaklığı	
1500kVA	69.7°C	92.1 °C	87.4 °C
1750kVA	79.9 °C	114.1 °C	106.5 °C
2000kVA	90.5 °C	129.5 °C	129.6 °C

Creмасco vd. [13] çalışmalarında, bobinleri VPI ile imal edilmiş olan kuru tip transformatörün (kabinli) TPN (Termal-Pressure Network) modeli ile doğal ve fanlı soğutma hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar CFD analizleri ile gerçek transformatörün termal sonuçları ile doğrulanmıştır.



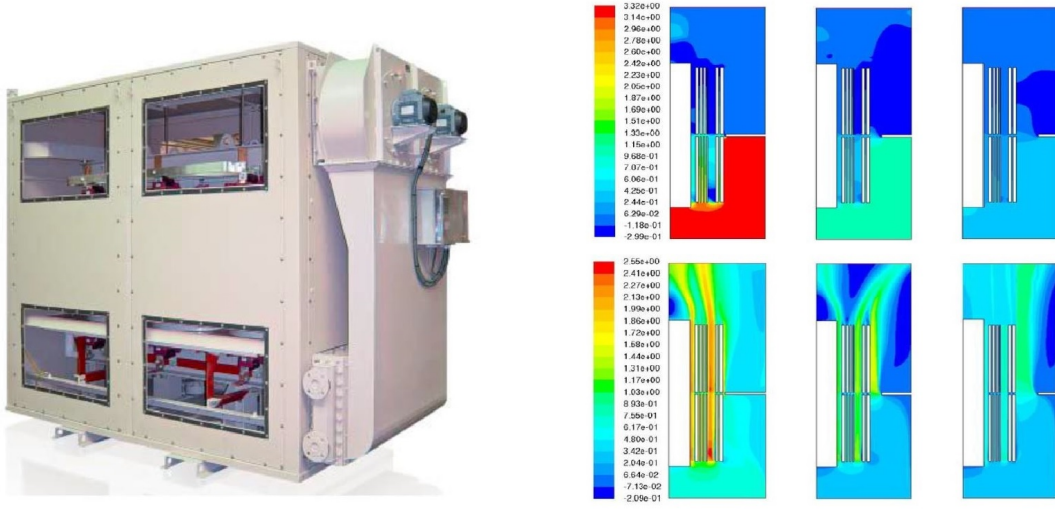
**Şekil 2.13:** TPN modeli ile CFD analizinin karşılaştırılması [13].

TPN modelden elde edilen veriler, transformatörün soğutma sisteminin optimizasyon döngüsü içerisine dahil edilmiştir.

Wu vd. [14] çalışmalarında, Şekil 2.14’de görüldüğü gibi su soğutmalı kuru tip transformatörde hava yönlendirici plaka kullanmış ve soğutma performansını



arttırmayı hedeflemiştir. Bu plakanın konumunu ve ölçülerini değiştirerek, 2D CFD analizleri yapmıştır.



**Şekil 2.14:** Su soğutmalı kuru tip transformatör / Yönlendirici ölçüsünün basınç ve hız etkisi [14].

Tablo 2.2’de elde edilen bu sonuçlarla deneysel sonuçları karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonuçlarında çekirdekten YG bobinine doğru olan kötüleşmeyi; 2D analiz olması ve hava kanalları ile bobinler arasında kullanılan bariyerin ihmal edilmesine bağlanmıştır.

**Tablo 2.2:** CFD analizi ile deneysel sonuçların karşılaştırılması [14].

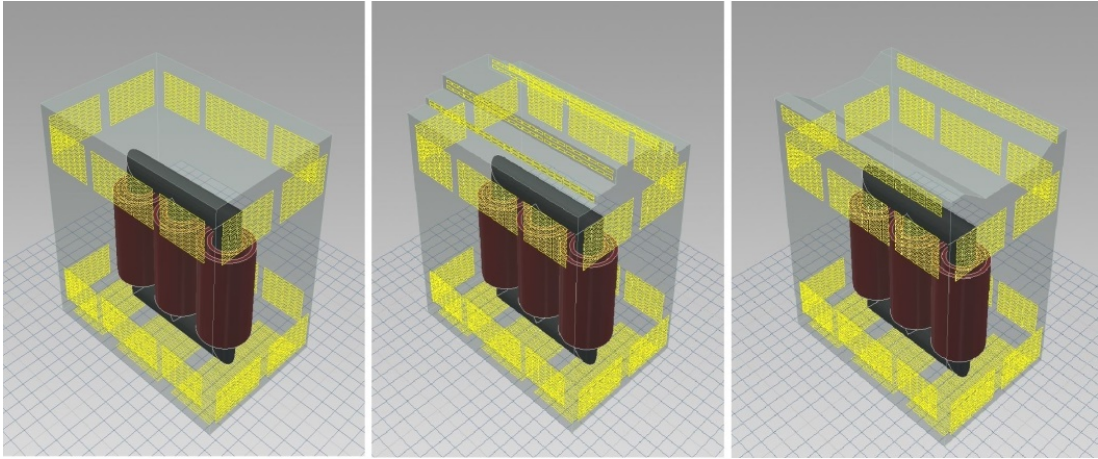
	Sıcaklık Artışı (CFD), K	Sıcaklık Artışı (Deneysel), K	Fark (CFD-Deneysel)
Çekirdek	77	78	-1
Alçak Gerilim Sargısı I	36	34	2
Alçak Gerilim Sargısı II	42	46	-4
Yüksek Gerilim Sargısı	65	70	-5

Sonuç olarak; yapılan CFD analizleri sonucunda, yönlendiricinin en ideal geometrisi ve konumu belirlenmiştir.

### 3. SAYISAL ANALİZ VE TEST DÜZENEĞİ

Bu çalışmada, 250kVA-33/0.4kV-Dyn11-IP31 kuru tip transformatörün kabin geometrisi değiştirilerek soğutucu akışkan olan havanın sıcaklık ve hız değerleri incelenmiştir. Burada kabin çatısı için üç farklı tasarım hazırlanarak, ANSYS18.1/FLUENT CFD analizi ve deneysel çalışmalar ile sıcaklık-hız değişimleri elde edilmiş ve bu değerler karşılaştırılmıştır. Hazırlanan üç çatı tipi Şekil 3.1 'de gösterilmiş ve sırasıyla Tip1, Tip2 ve Tip3 olarak adlandırılacaktır.

Tasarımlar hazırlanırken AUTODESK INVENTOR çizim programı kullanılmıştır. Hazırlanan Tip1, Tip2 ve Tip3 tasarımları Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Daha sonra bu modeller, analiz için 3D çizim .stp formatında ANSYS Design Modeler programına aktarılmış ve burada akış hacmi çıkartılmıştır. Deney setinin imalatı için ise, AUTODESK INVENTOR programının 2D modülü kullanılarak, teknik resimler hazırlanmıştır. Yine deneysel çalışmalar sırasında elde edilen veriler EK-A 'da ayrıca paylaşılmıştır.



Şekil 3.1: Autodesk Inventor 'de çizilmiş analiz geometrileri.

ANSYS FLUENT akışkan ve ısı transferi problemlerini çözümleyen CFD analiz programıdır. CFD analizleri model, çözüm ağı, çözücü ve sonuç olmak üzere, dört ana başlık altında yapılmaktadır. ANSYS/FLUENT CFD programı sonlu hacimler metodunu kullanmaktadır [15].

#### 3.1 Matematiksel Model

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) hesaplamaları süreklilik, momentum ve enerji eşitliklerini çözmektedir. Süreklilik denklemi laminer akış için eşitlik (3.1)'de gösterilmektedir. Analizler  $t=0$  anı (*steady state*) için çözülmüştür [15].

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

X, Y, Z momentum eşitlikleri aşağıda Eşitlik3.2-4 ile gösterilmektedir [15].

X yönündeki momentum:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} &= -\frac{\partial(P)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Y yönündeki momentum:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} &= -\frac{\partial(P)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \rho g \end{aligned} \quad (3.3)$$

Z yönündeki momentum:

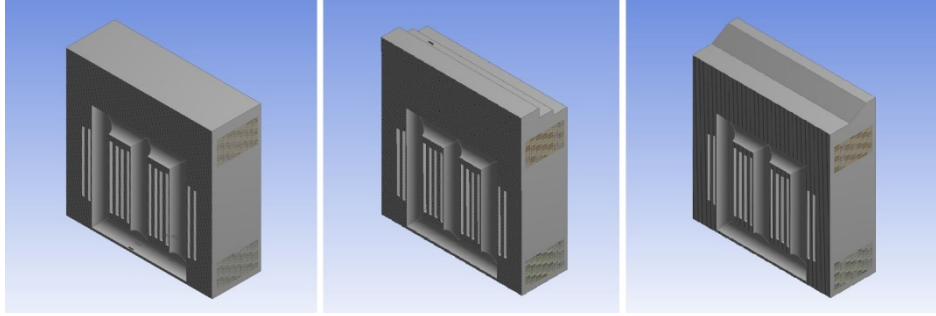
$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} &= -\frac{\partial(P)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Enerji eşitliği aşağıda belirtilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C_p u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_p w T)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$



Analiz modeli, havanın akış geometrisini çıkartıp, sınır şartları yüzey olacak şekilde hazırlanmıştır. Farklı kabin geometrileri için hazırlanmış analiz modelleri Şekil3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2: ANSYS Design Modeler ‘de hazırlanmış analiz geometrileri.

### 3.2 Problemin Tanımı

Kuru tip transformatörlerde ısınma, önemli problemler arasındadır. Bu transformatörlerin kabinli olması durumunda ise, kabin etkisi ile ısınma bir miktar daha artmaktadır. Örnek kabinli kuru tip transformatör Şekil 3.3’de gösterilmektedir. Kabin etkisi ile artan sıcaklığın belirlenmesi, transformatörün daha etkin şekilde soğutulmasını sağlamak için önemlidir. Kabin içindeki sıcaklık dağılımının belirlenmesiyle birlikte, alınması gereken önlemlerin veya iyileştirmelerin önü açılmış olacaktır.



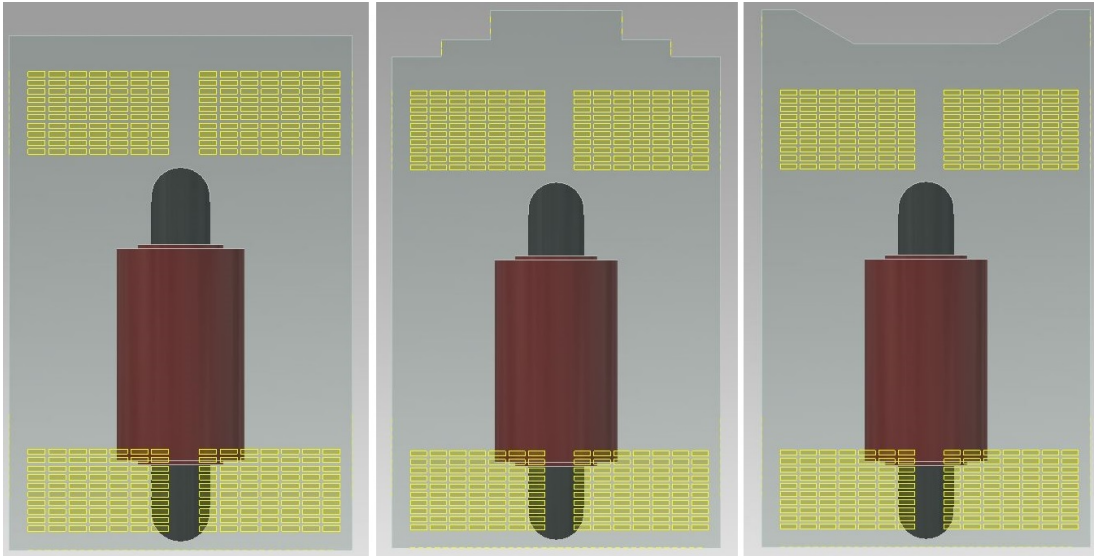
Şekil 3.3: Örnek kabinli kuru tip transformatörler.

Bu çalışmayla birlikte farklı çatı geometrileri analiz edilerek (Diğer sınır şartları aynı olmak koşuluyla) soğutma performansı en iyi olan çatı geometrisi belirlenecektir. Elde edilen veriler ile birlikte, kabin nedeniyle ısınma problemi oluşan transformatörlerde yeni dizaynı yapılan kabinlerin kullanılması hedeflenmektedir.

Optimum kabin dizaynına ulaşabilmek için gelecek çalışmalarda; en iyi soğutma performansı elde edilen kabin geometrisi üzerinde, hava giriş-çıkış geometrileri için de ayrıca CFD analizleri yapılabilecektir. Böylece Ingress Protection (IP) sınıfına göre de soğutma performansının değişimi incelenmiş olacaktır.

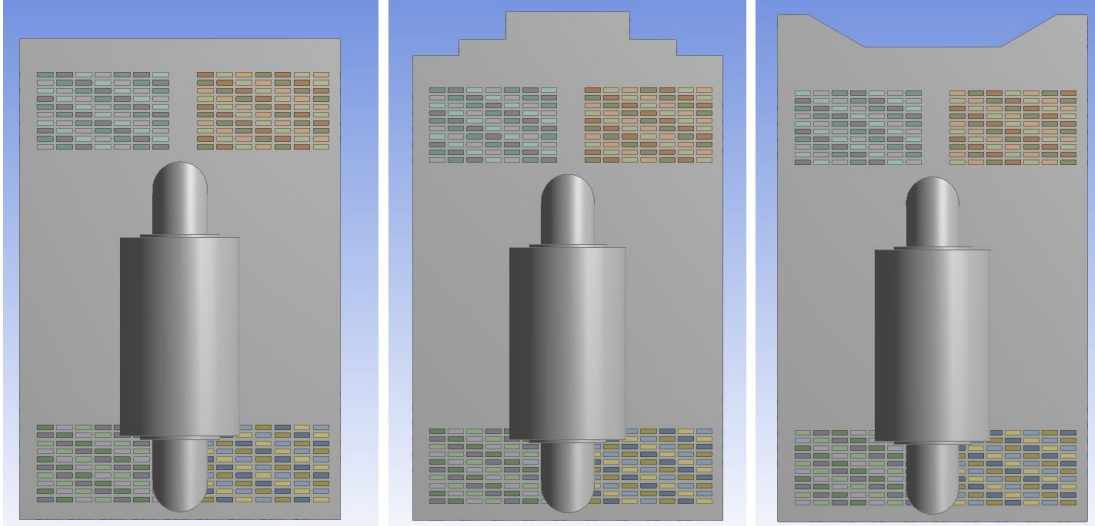
### 3.3 Model

Şekil 3.4'de gösterilen ANSYS/FLUENT CFD analizi için gerekli olan modeller, AUTODESK INVENTOR programı ile hazırlanmıştır. INVENTOR programında hazırlanan model ANSYS Design Modeler programına aktarılarak burada akış hacmi çiktartılmıştır.



Şekil 3.4: Autodesk Inventor çizimi.

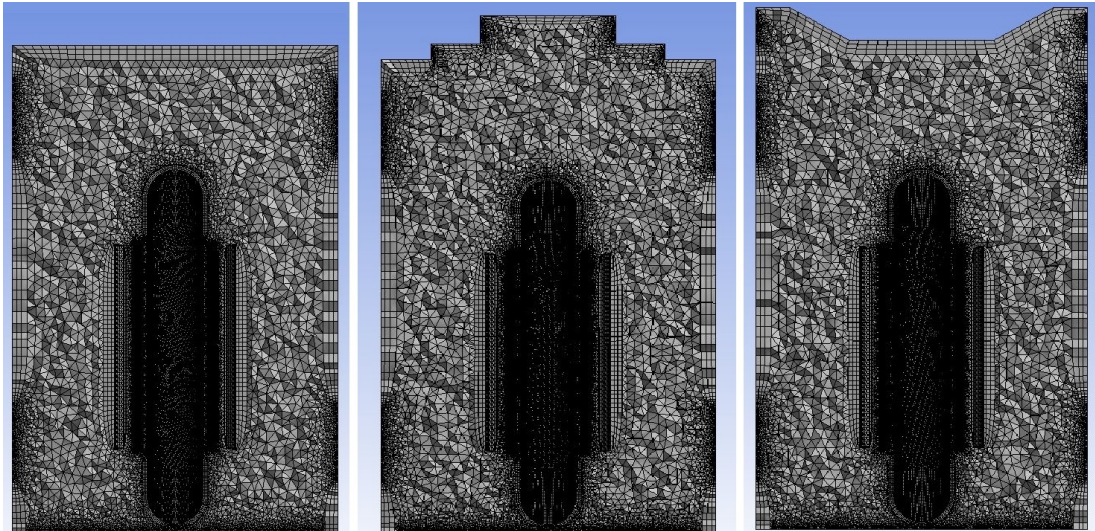
Model olarak 250kVA 33/0.4kV Dyn11 IP31 kuru tip transformatör örnek alınmıştır. Bu transformatörün dış ölçüleri (en/boy/yükseklik) (1m)x(1.5m)x(1.5m) şeklindedir. Analiz modelinde mesh sayısı ve *skewness* değerlerinin azaltılması amacıyla, bobinler, çekirdek ve hava giriş çıkışları, yüzey olarak modellenmiştir. Böylece analiz modelinde olabildiğince sadeleştirmeye gidilmiştir. Design Modeler 'da hazırlanan model Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: ANSYS Design Modeler çizimi.

### 3.4 Mesh

CFD analizleri için çözüm ağının (*mesh*) kalitesi, doğru sonuçlar almak ve problemin yakınsayabilmesi için çok önemlidir. Bu nedenle çözüm ağı oluşturulurken, duvar yüzeylere *inflation mesh*, dar bölgelerde ise en az 3 eleman kullanılmış ve gerekli olan yerlere de daha yoğun mesh atılmıştır. Ayrıca geometrinin izin verdiği bölgelere yüzey meshi kullanılarak homojen bir çözüm ağı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu iyileştirmeler neticesinde, farklı kabin geometrileri için elde edilen çözüm ağları Şekil 3.6 'da gösterilmektedir.



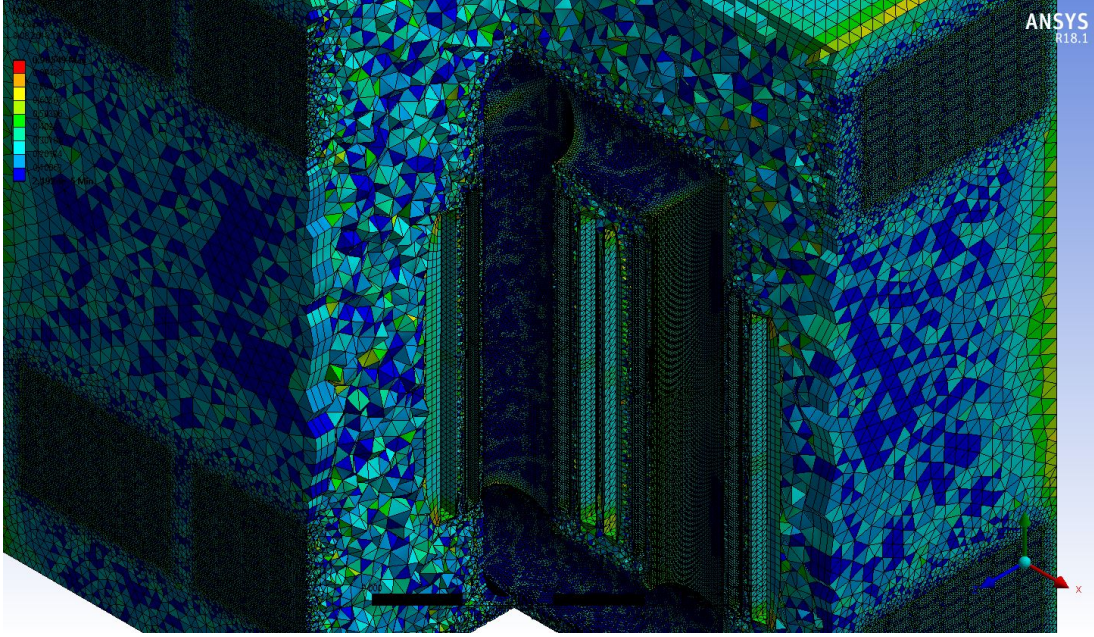
Şekil 3.6: Farklı kabin geometrilerinin çözüm ağları.

Yapılan bu iyileştirmeler ile daha kaliteli bir mesh yapısı hedeflenmiştir. Çözüm ağı oluşturulduktan sonra *skewness* için (üç çatı geometrisi için) maksimum



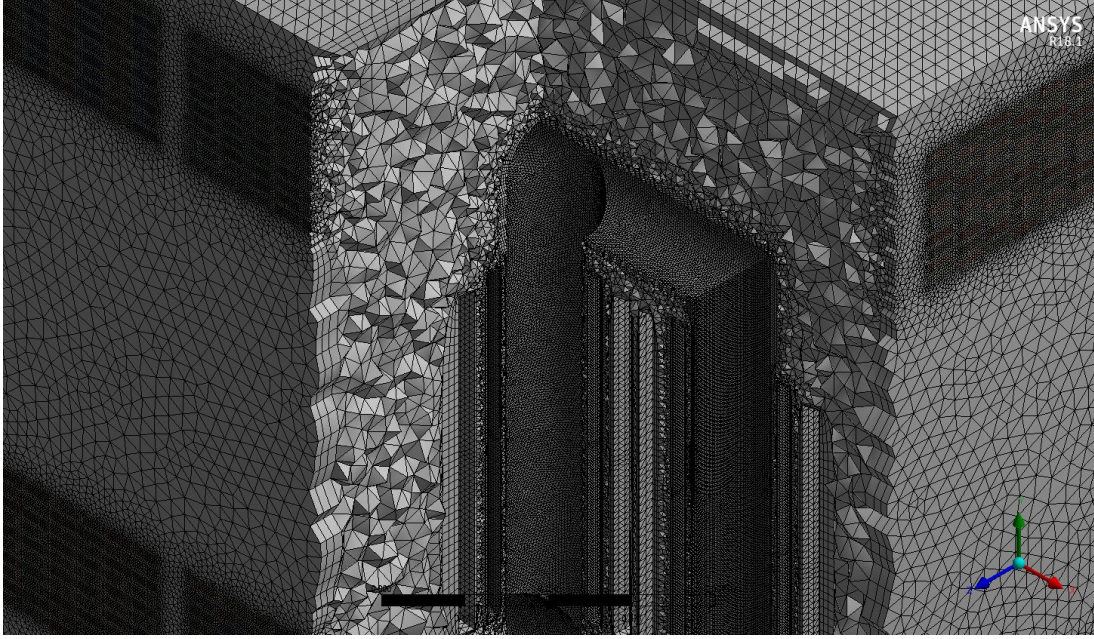
0.905 değeri elde edilmiştir. *Skewness* değerinin mesh elemanlar için olan dağılımı şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Mesh elemanı, TİP1 için 8,072,066 adet, TİP2 için 8,644,690 adet ve TİP3 için ise 8492622 adet kullanılmıştır. Mesh eleman tipi olarak ise, *Quad/Tri* elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 3.7: Çözüm ağında skewness değeri dağılımı.

Çözüm ağının oluşturulması aşamasında, ANSYS/FLUENT SOLVER programında girilecek olan sınır şartları da belirlenmektedir. Bu sınır şartları için gerekli tanımlamalar da çözüm ağı oluşturulurken yapılmaktadır. Bu tanımlamalar; akışkanın giriş-çıkış bölgeleri, ısı transferinin gerçekleşmesini öngördüğümüz duvar yüzeyler, ısı akısının olduğu yüzeyler ve ısı transferi için pasif olan bölgeler şeklinde yapılmaktadır. Mesh yapısı oluşturulduktan sonra genel görünümü Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



**Şekil 3.8:** Çözüm ağının genel görünümü.

Çözüm ağı içinde, duvar yüzeylere atılan meshler için belirlenen sınır tabaka kalınlıkları ampirik formüller ile hesaplanıp, programa tanımlanmaktadır. Bunun için yapılan hesaplamalar aşağıda gösterilmektedir.

Kabin duvarlarında oluşan sınır tabaka kalınlığı hesabı için öncelikle ortalama sıcaklık değerleri alınarak, akışkan için kinematik viskozite değeri belirlenmektedir.

Burada,  $T_s$  yüzey,  $T_\infty$  ortam ve  $T_f$  yüzey film sıcaklıklarıdır.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = 35^\circ\text{C} = 308\text{ K} \rightarrow$$

$$x = 1.5\text{ m} ,$$

$$\vartheta = 16.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Daha sonra akış rejimi, Reynold ( $Re$ ) sayısı hesaplanarak belirlenmektedir. Akış rejimi belirlendikten sonra uygun eşitlik seçilerek sınır tabaka kalınlığı hesaplanmaktadır [7].

Burada,  $Re_x$  Reynolds sayısını,  $U_\infty$  yüzeydeki hava hızını,  $x$  yüzeyin karakteristik uzunluğunu,  $\vartheta$  dinamik viskoziteyi ve  $\delta$  sınır tabaka kalınlığını temsil etmektedir.

$$Re_x = \frac{\rho U_\infty x}{\mu} = \frac{U_\infty x}{\vartheta} \quad \delta = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}}$$

$$Re_x = \frac{0.3 \times 1.5}{16.7 \times 10^{-6}} = 2.6 \times 10^4 = 26946$$

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} = \frac{5 \times 1.5}{\sqrt{26946}} = 0.0456 \text{ m}$$

Bobin ve çekirdek yüzeylerinde oluşan sınır tabaka kalınlığı için yapılan, benzer hesaplama da aşağıda gösterilmektedir.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = 110^\circ\text{C} = 383\text{ K} \rightarrow$$

$$x = 0.6\text{ m} ,$$

$$\vartheta = 24.54 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re_x = \frac{\rho U_\infty x}{\mu} = \frac{U_\infty x}{\vartheta} \quad \delta = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}}$$

$$Re_x = \frac{0.3 \times 0.6}{24.54 \times 10^{-6}} = 7.33 \times 10^3 = 7334.9$$

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} = \frac{5 \times 0.6}{\sqrt{7334.9}} = 0.035\text{ m}$$

Hesaplanan ısı sınır tabaka kalınlıkları dikkate alınarak, uygun mesh ve mesh yoğunlukları oluşturulmuştur. Böylece duvar yüzeylerindeki ısı iletim ve taşınım hesaplamalarının daha doğru olması hedeflenmiştir.

### 3.5 Malzeme Özellikleri

Havanın malzeme özellikleri tanımlanırken sıcaklığa bağlı değişim denklemleri çıkartılıp (yoğunluk, ısı kapasite, ısı iletkenlik ve viskozite), bu denklemler ANSYS/FLUENT programına tanımlanmıştır.

Malzeme özellikleri için oluşturulan sıcaklığa bağlı grafikler, 3.dereceden polinom eşitliği şeklinde Excel2010 programında elde edilmiştir. Bu denklemler yoğunluk, ısı kapasite, ısı iletkenlik ve viskozite için (3.6-3.9) eşitlikleri ile gösterilmektedir. Örnek olarak Şekil 3.9'da viskozite için sıcaklığa bağlı değişim grafiği gösterilmektedir.

Havanın sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi:

$$\rho(x) = -7E - 09x^3 + 8E - 06x^2 - 0.0041x + 1.2824 \quad (3.6)$$

Havanın sıcaklığa bağlı ısı kapasite değişimi:

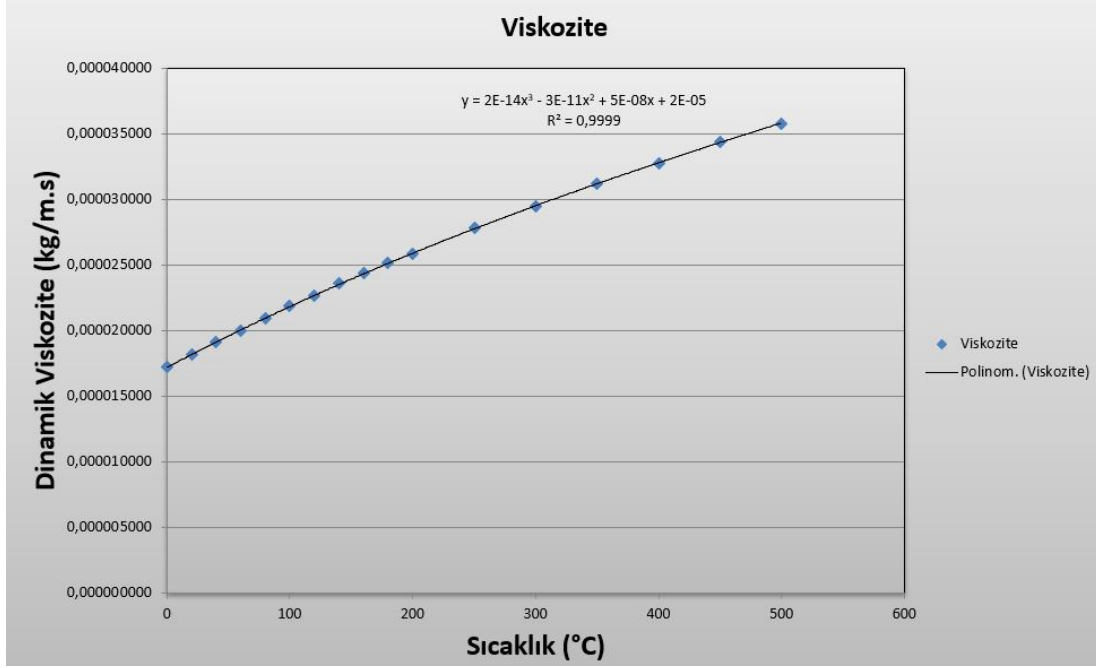
$$C_p(x) = -4E - 07x^3 + 0.0006x^2 + 0.0055x + 1003.1 \quad (3.7)$$

Havanın sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değişimi:

$$k(x) = -4E - 11x^3 + 8E - 09x^2 + 6E - 05x + 0.0208 \quad (3.8)$$

Havanın sıcaklığa bağlı viskozite değişimi:

$$\mu(x) = 2E - 14x^3 - 3E - 11x^2 + 5E - 08x + 2E - 05 \quad (3.9)$$



Şekil 3.9: Havanın sıcaklığa bağlı viskozite değişimi.

Analiz için kullanılan diğer malzemeler; kabin için 2 mm S235JR, AG-YG bobinleri için reçine-quartz kumu karışımı ve çekirdek için silisli sacların özellikleri sabit değerler olarak alınmıştır. Malzeme özellikleri Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1: Kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri.

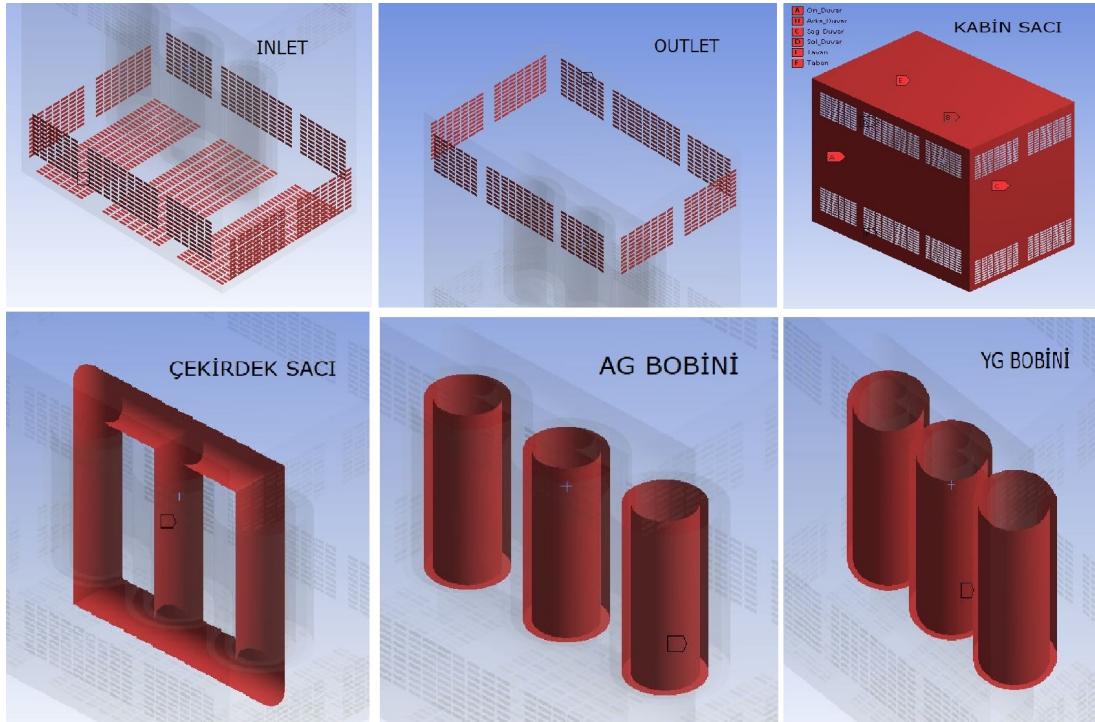
Malzeme/Özellik	Yoğunluk ( $\rho$ )	Isıl Kapasite ( $C_p$ )	Isıl İletkenlik ( $k$ )
S235JR (Gri Boyalı)	7850	502.48	16.27
Reçine-Kum	1800	800	1
Silisli Sac	7650	490	23-37

### 3.6 Sınır Şartları

Sınır şartı olarak kabinin alt bölgesinde bulunan havalandırma delikleri *velocity-inlet*, üst havalandırma delikleri ise *pressure-outlet* olarak tanımlanmıştır. Isı kaynağı olan AG-YG bobinleri ve çekirdek ise kayıp değerleri dikkate alınarak heat flux sınır şartı verilmiştir. Yine ısı transferinin gerçekleştiği kabinin dış çerçevesi



için, ısı taşınım katsayısı hesaplanıp ANSYS/FLUENT programına girilmiştir. Bu sınır şartları üç çatı tipi içinde aynı olacak şekilde girilmiştir.



Şekil 3.10: CFD analizi için sınır şartları.

Sınır şartları belirlenirken; giriş hız değeri, deneysel çalışmalar sırasında anemometre ile ölçülen değerler kullanılmıştır. Bobin ve çekirdekten dolayı meydana gelen ısı kayıpları ise, referans alınan 250kVA 33/0.4kV kuru tip transformatörün test laboratuvarında ölçülen değerleridir. Kabinin dikey ve yatay duvarlarında taşınım ile meydana gelen ısı transferi hesabı için gerekli olan ısı taşınım katsayıları ise aşağıda belirtilmiştir.

Kabin ön ve yan duvarındaki sıcaklıklar yaklaşık 50 °C civarında, ortam sıcaklığı ise 20 °C'dir. Duvarların karakteristik uzunluğu ise 1.5 m'dir. Bunlara göre duvardaki ısı taşınım katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Kabinin dikey konumdaki duvarları için doğal taşınım katsayısı,

$$h = \frac{N_u \times k}{L}$$

şeklindedir. Burada;  $N_u$  Nusselt sayısını,  $k$  iletim katsayısını,  $L$  karakteristik uzunluğunu ve  $R_a$  Rayleigh sayısını ifade etmektedir.

$$N_u = \left\{ 0.825 + \frac{0.387xR_a^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492/P_r)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 ; \quad R_a = \frac{gx\beta x(T_s - T_\infty)x\delta^3}{\nu^2} x P_r$$



$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = 35^\circ\text{C} = 308\text{ K} \rightarrow$  Film sıcaklığı ve 1 atm 'de havanın özellikleri tablolardan [7] okunmuştur.

$$\beta = 3.24 \times 10^{-3} \text{ 1/K}, \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2, \quad k = 26.9 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$\delta = 1.5 \text{ m}, \quad \vartheta = 16.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad Pr = 0.705$$

$$Ra = \frac{9.81 \times 3.24 \times 10^{-3} \times (30) \times (1.5)^3}{(16.7 \times 10^{-6})^2} \times 0.705 = 11.5 \times 10^9$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \times (11.5 \times 10^9)^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492/0.7)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = 264.8$$

Buna göre ön ve yan kabin duvarlarının, üst noktasındaki (maks.) ısı taşınım katsayısı,

$$h = \frac{264.8 \times 26.9 \times 10^{-3}}{1.5} = 4.74 \text{ W/m}^2\text{K}$$

olarak elde edilir.

Kabinin tavan bölgesindeki maks. sıcaklık yaklaşık  $50^\circ\text{C}$  civarında, ortam sıcaklığı ise  $20^\circ\text{C}$ 'dir. Duvarın karakteristik uzunluğu ile ilgili ölçüler ise  $1.5 \times 1$ 'dir. Bunlara göre duvardaki ısı taşınım katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$h = \frac{Nu \times k}{L}$$

Şeklindedir. Burada;

$$Nu = 0.27 \times Ra^{1/4}; \quad Ra = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times \delta^3}{\vartheta^2} \times Pr$$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = 35^\circ\text{C} = 308\text{ K} \rightarrow$$

$$\beta = 3.24 \times 10^{-3} \text{ 1/K}, \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$k = 26.9 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$\delta = 0.3 \text{ m},$$

$$\vartheta = 16.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad Pr = 0.705$$

$$Ra = \frac{9.81 \times 3.24 \times 10^{-3} \times (30) \times (0.3)^3}{(16.7 \times 10^{-6})^2} \times 0.705 = 9.2 \times 10^7$$

$$Nu = 0.27 \times (9.2 \times 10^7)^{1/4} = 26.44$$

Tavandaki ısı taşınım katsayısı,

$$h = \frac{26.44 \times 26.9 \times 10^{-3}}{0.3} = 2.37 \text{ W/m}^2\text{K}$$

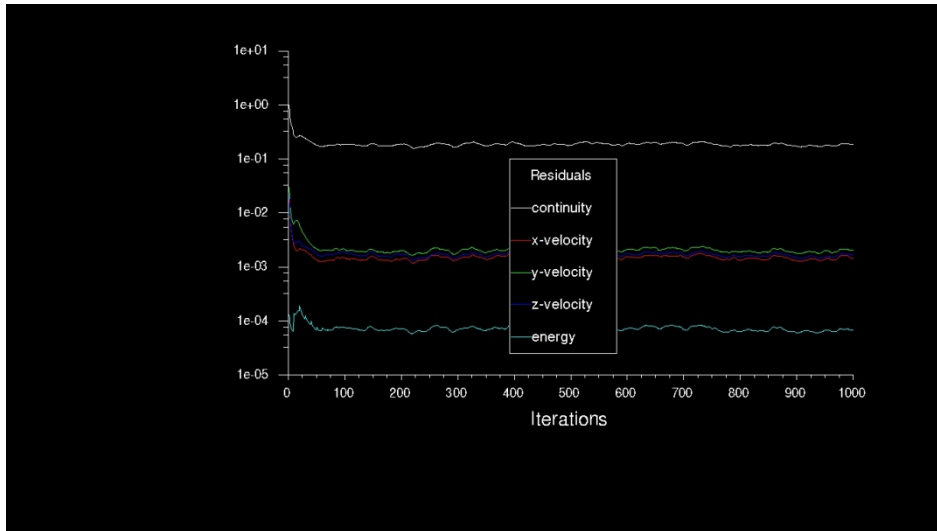
Olarak elde edilir.

### 3.7 Çözüm Modelleri

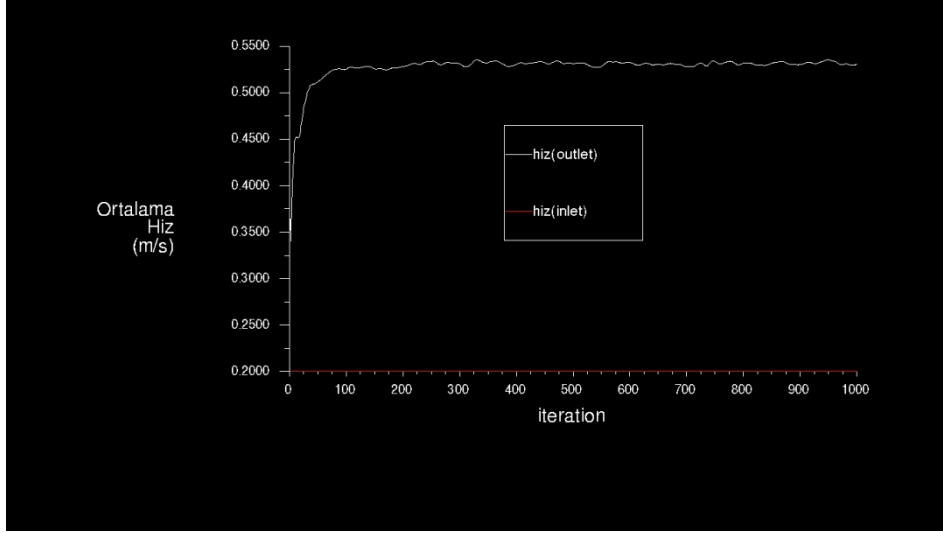
Analizler  $t=0$  (*steady-state*) durum için, Coupled çözüm algoritması kullanılmıştır. Çözümlere enerji, radyasyon etkisi (S2S yöntemiyle), iletim ve taşınım eşitlikleri dâhil edilmiştir.

Çözüm başlamadan önce tüm çözüm ağı elemanlarının başlangıç değerlerinin belirlenmesi için 10 iterasyonluk hyprit initialization koşturulmuştur.

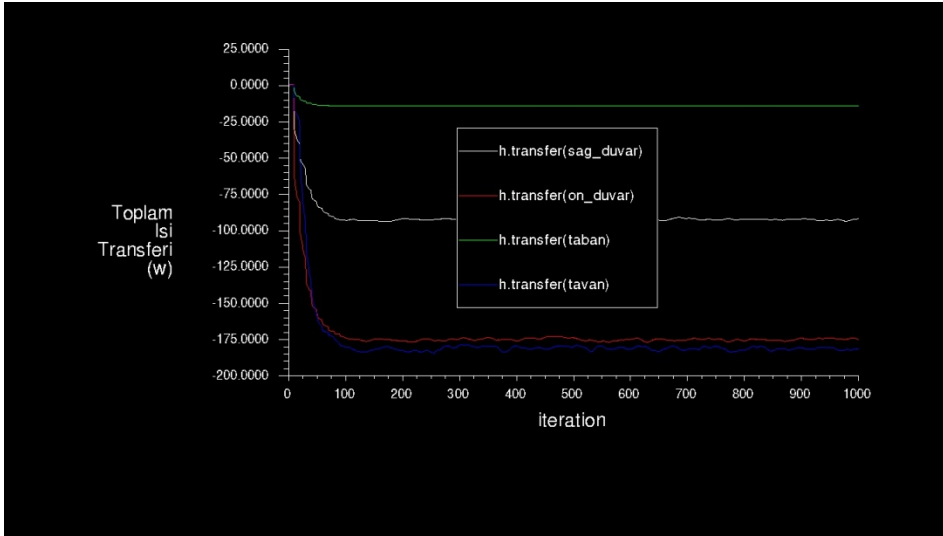
Problemin yakınsamasını kontrol etmek için, hava giriş çıkış hızları, AG-YG bobini ile çekirdek sıcaklıkları ve kabinden atılan ısı transferi değerleri ekrandan anlık olarak takip edilmiştir. Yakınsama sonuçları için örnekler Şekil 3.11-13'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11: Kabin(çatı tipi1) için hız ve enerji yakınsaması.



Şekil 3.12: Kabin(çatı tipi) için hava çıkış hızı yakınsaması.



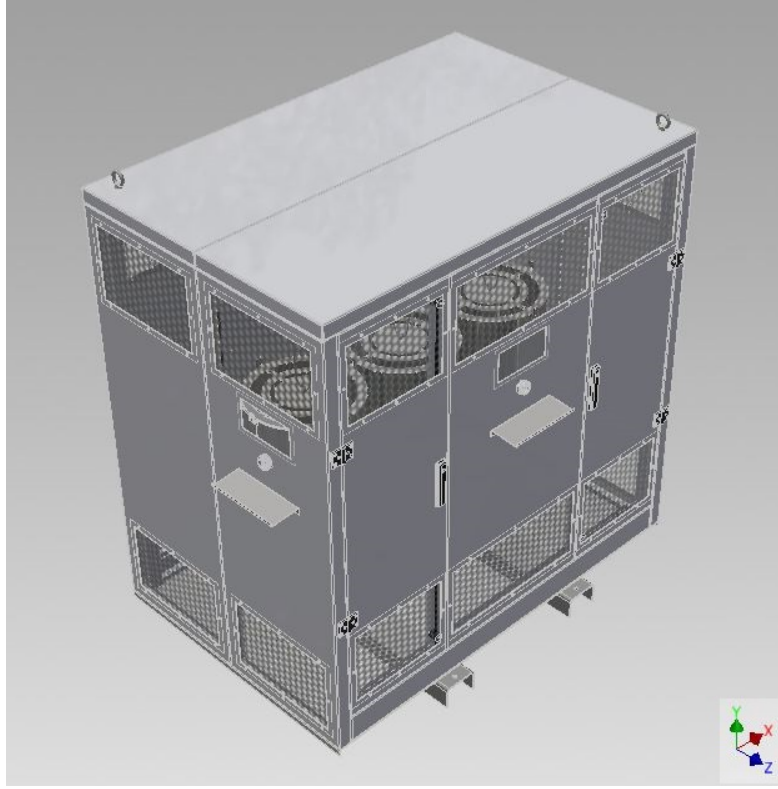
Şekil 3.13: Kabin(çatı tipi) için duvarlardan atılan ısı miktarının yakınsaması.

Tüm çatı tipleri için yakınsama kontrolleri yapılmış ve 600 iterasyondan sonra yakınsadıkları belirlenmiştir. Ayrıca tüm çatı tipleri için ekrandan alınan değerler, CFD analizi sonuçları ile birlikte EK-B 'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

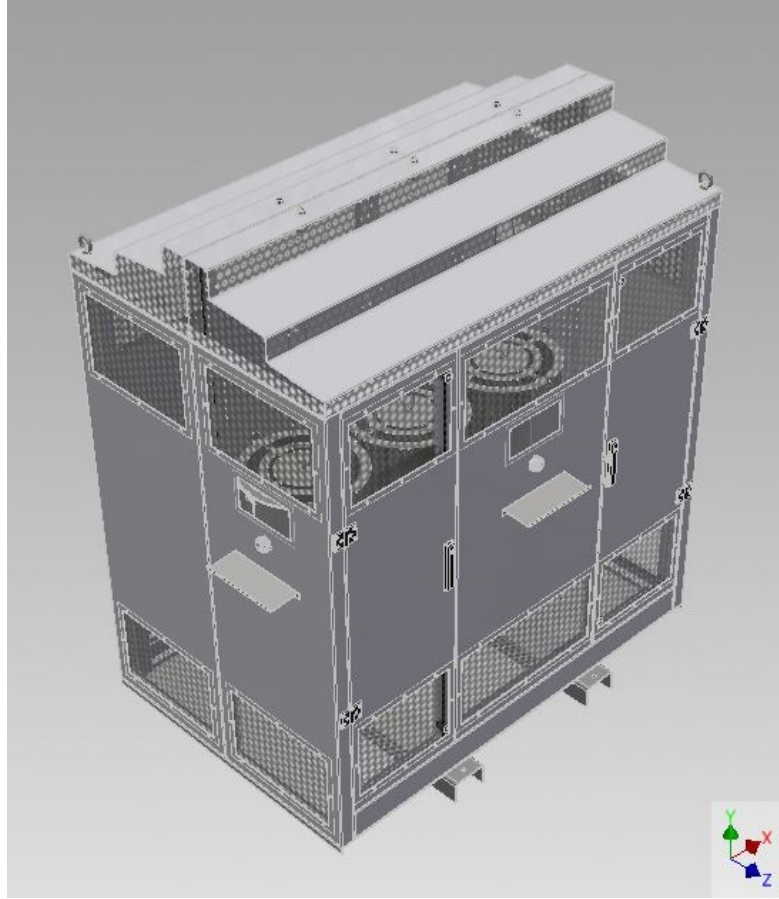
### 3.8 Test Düzeneği Modeli

Yapılan analizlerin doğruluğunu kanıtlamak için bir test düzeneği hazırlanmıştır. Bu test düzeneğinin imalatı ve testleri, Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Destekleme Projesi (no:3.2015.0010) kapsamında gerçekleştirilmiştir.

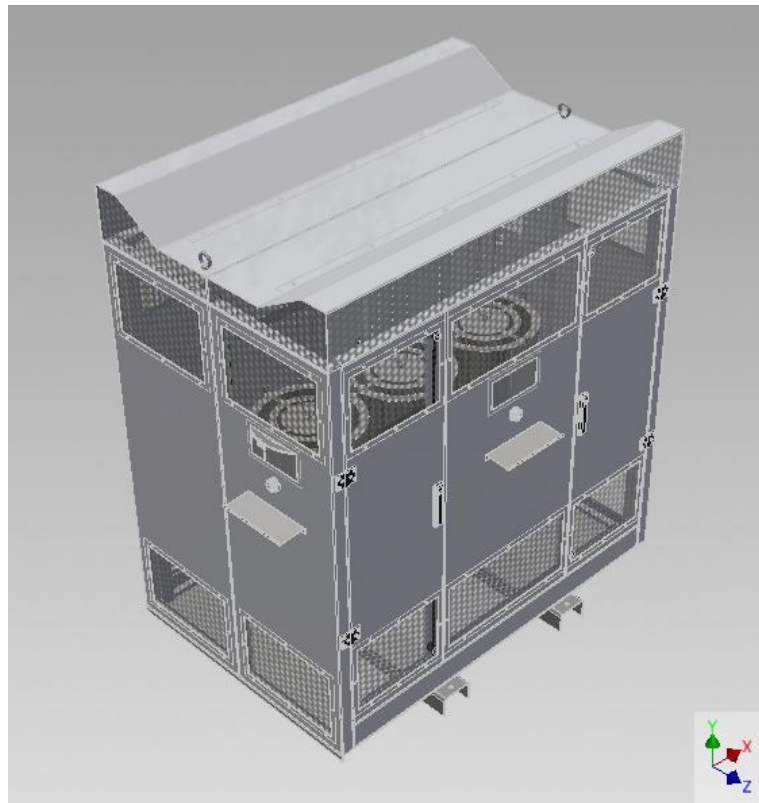
Test düzeneğinde ısı kaynağı olarak belirlenen bobinler temsili olarak iç ve dış çapları dikkate alınarak 2 mm S235JR malzemesinden imal edilmiştir. Kayıp değeri olan 3kW ısı kaynağı ise 3 adet 1 kW infrared ısıtıcının, imal edilen temsili bobinlerin içine yerleştirilmesi ile sağlanmıştır. İmalatı yapılan test düzeneğinin 3D çizimi ve imal edilmiş görünümleri Şekil 3.14-16’da gösterilmektedir. Ayrıca test düzeneği imalat resimleri, EK-C bölümünde yer almaktadır.



Şekil 3.14: Test düzeneği/çatı tipi1.

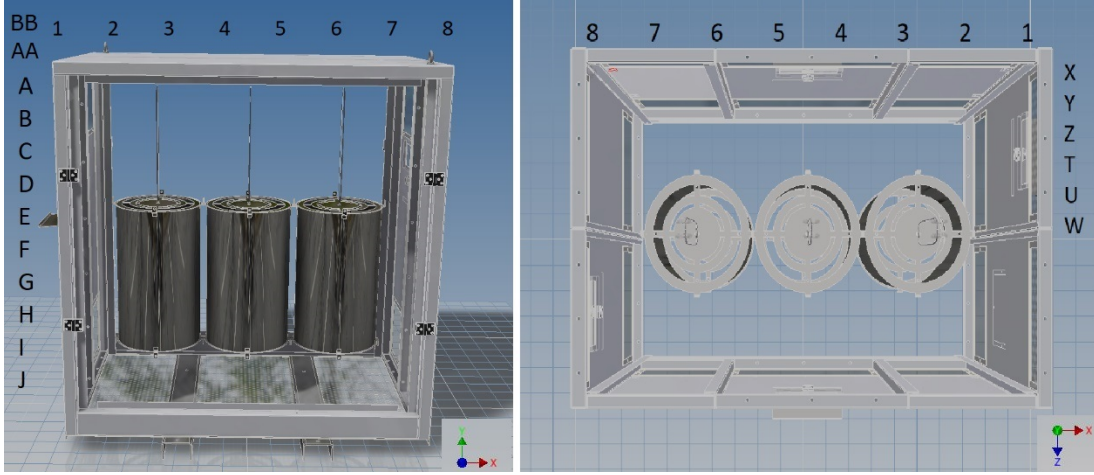


Şekil 3.15: Test düzeneği/çatı tipi2.



Şekil 3.16: Test düzeneği/çatı tipi3.

Test düzeneğinden alınan ölçümler, kabin içinde yer alan havanın sıcaklığı ve hızıdır. Ölçümler için belirlenen notasyon; X eksenini için 1,2,3...8, Y eksenini için A,B,C...J, Z eksenini için ise X,Y,Z...W şeklindedir. Böylece üç farklı çatı geometrisi için, 158 adet deney ile toplam 1480 farklı noktanın sıcaklık değeri ölçülmüştür. Notasyon gösterimi Şekil 3.17’de gösterilmektedir.



Şekil 3.17: Test düzeneği notasyonu.

DeneySEL çalışmaların tamamlanması 8 aydan uzun bir süre almıştır. Bu çalışmalar sırasında alınan görüntüler Şekil 3.18’de gösterilmektedir. Datalogger’den alınan veriler Excel formatında, hem tablo hem de zamana bağlı (1 dakikada bir) grafik şeklinde alınarak, bilgisayarda toplanmıştır.



Şekil 3.18: DeneySEL çalışma fotoğrafları.

### 3.9 Kullanılan Materyaller

Bu ölçümler için kullanılan materyaller Tablo 3.2’de belirtilmiştir. Belirtilen materyaller BAP projesi kapsamında Balıkesir Üniversitesi’nin desteği ile temin edilmiştir.

**Tablo 3.2:** Test düzeneği için kullanılan malzemeler.

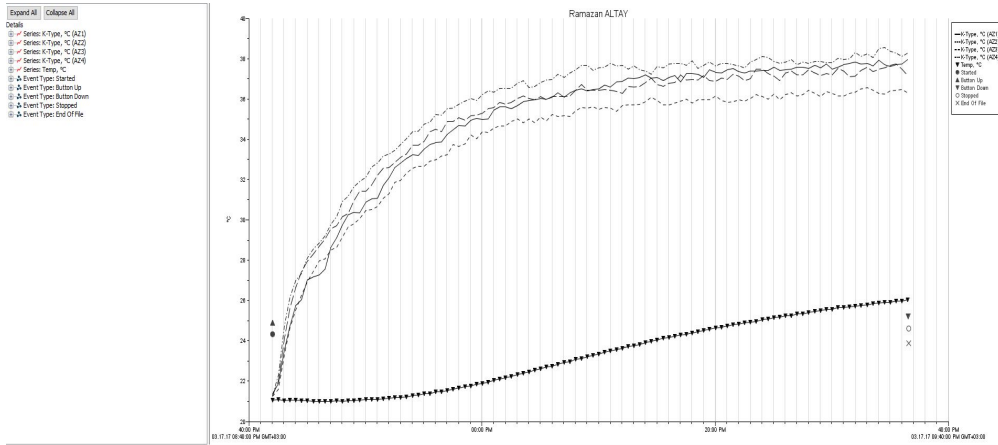
Malzeme	Tanımı	Miktar
Kabin imalatı	S235JR 2mm sac	1 adet
Datalogger	Onset hobo ux120	2 adet
Termokupl	Penta – mt-07-1mt K tipi soketli 1 MT ucu kaynaklı tel prob	2 adet
Termokupl	Penta – Mt-07-2mt K tipi soketli 2 MT ucu kaynaklı tel prob	2 adet
Termokupl	Penta – mt-07-3mt K tipi soketli 3 MT ucu kaynaklı tel prob	2 adet
Termokupl	Penta – mt-07-5mt K tipi soketli ucu kaynaklı tel prob	2 adet
Anenometre	Testo 405 termal anemometre	1 adet

## 4. CFD ANALİZİ VE DENEYSEL SONUÇLAR

ANSYS/FLUENT CFD simülasyon programı, enerji ve momentum denklemlerinin çözümü için sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. Ayrıca bu problemin hesaplamalarına S2S radyasyon etkisi de dâhil edilmiştir. Bunun için birbirini gören tüm yüzeyler için, S2S view factor değerleri ANSYS/FLUENT CFD analiz programına hesaplatılmıştır.

Simülasyonda hesaplanan kabin içinde yer alan hava, sıkıştırılmaz ideal gaz olarak kabul edilmiştir. Kabine giriş hızı olarak 0.2 m/s sabit değeri alınmıştır. Bu değer, deneysel çalışmalar sırasında Testo405 termal anemometre ile ölçülen havanın giriş hız değeridir. Giriş sıcaklığı ise deneysel çalışmalar sırasında ortam sıcaklığıdır. Ancak deneysel çalışmalar, 8 ay'dan daha uzun bir sürede tamamlandığı için ortalama ortam sıcaklığı 25 °C olarak alınmıştır.

Deneysel çalışmalar sırasında, termokupl ve datalogger cihazları ile kaydedilen sıcaklıklar, ortam sıcaklığının rejime girdiği andaki değeridir. Deney düzeneğinde sıcaklığın rejime girmesi 45~55 dk arasında süre almıştır. Ayrıca deneysel çalışmalar sırasında ortam sıcaklığı, mevsim geçişleri nedeniyle 8~10 °C arasında farklılık göstermiştir. Bu nedenle sonuçlar karşılaştırılırken, sıcaklık artışı miktarına bakılmıştır. Şekil 4.1'de deneysel çalışmalar sırasında kaydedilmiş olan sıcaklık değerinin, rejime girme grafiği verilmiştir.

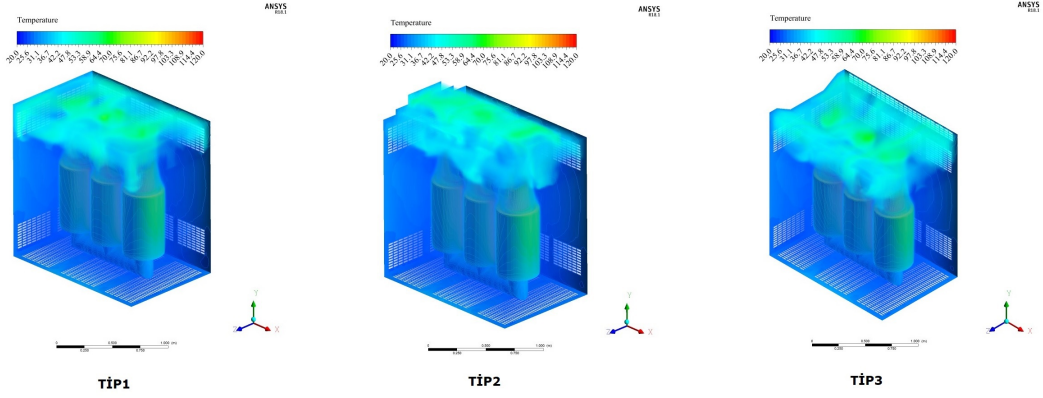


Şekil 4.1: AZ çizgisi(1-4 problemleri) sıcaklığının rejime girme eğrisi.

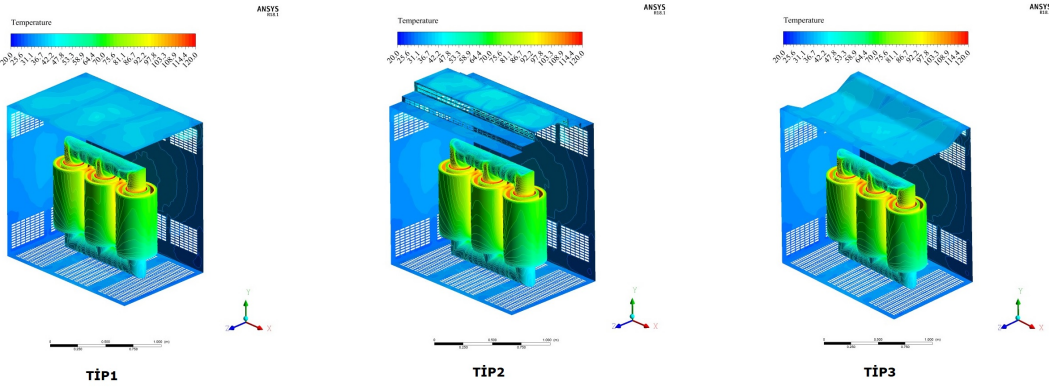


## 4.1 Sıcaklık Dağılımı

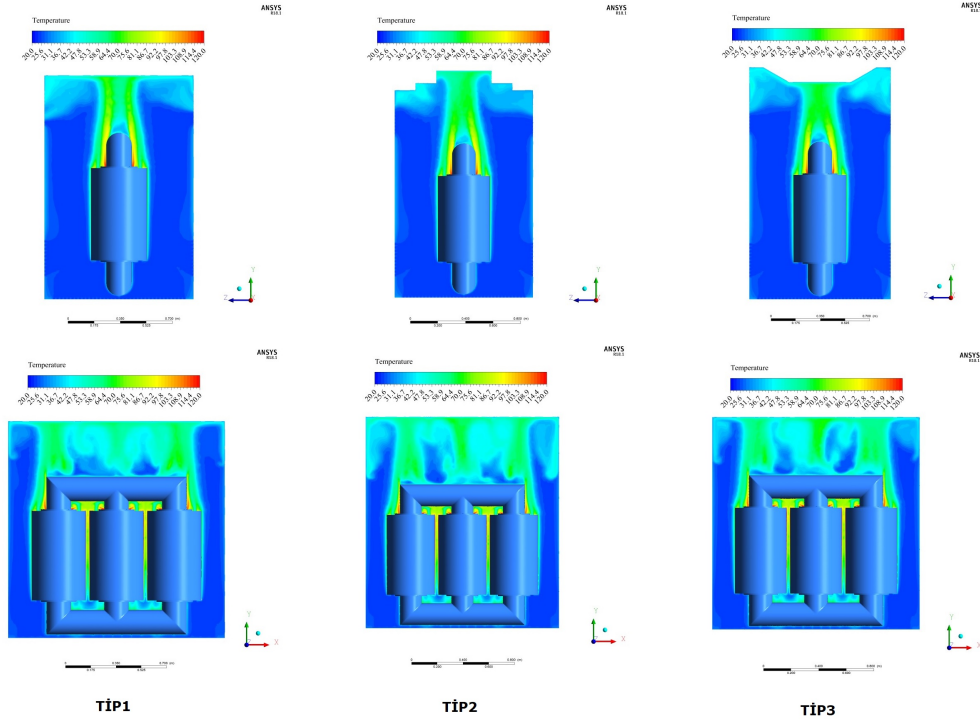
Elektriksel hesaplamalar sonucunda elde edilen kayıp değerleri, ANSYS/FLUENT CFD programında, AG-YG bobini ve çekirdek geometrilerine  $W/m^2$  olarak uygulanmıştır. Ancak deneysel çalışmalarda gerçek trafo yerine, aynı kayıp değerine sahip bobin şablonları kullanıldığı için, karşılaştırmalar ortamda yer alan hava sıcaklıkları için yapılmıştır. Ayrıca hot-spot noktası bobinlerin içinde olduğundan dolayı, en sıcak bölgelerde (Bobinlerin üst bölgesinde) sıcaklık farklılıkları ortaya çıkmıştır. Bununla beraber bobinlerden uzak olan bölgelerdeki sıcaklıklar ile genel sıcaklık dağılımlarının (Deneysel çalışmalar ile CFD analizleri) birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.2-4.4'de her üç tip kabin içinde sıcaklık dağılımları gösterilmektedir.



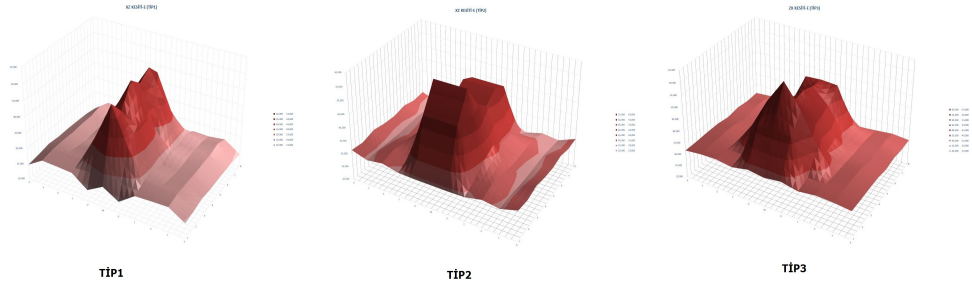
Şekil 4.2: Kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı.



Şekil 4.3: Yüzey sıcaklıklarının dağılımı.



**Şekil 4.4:** XY ve YZ kesitleri için sıcaklık dağılımı.



**Şekil 4.5:** Deneysel çalışmalarda elde edilen (XZ Kesiti-E) sıcaklık dağılımı.

Deneysel çalışmalar ve CFD analizi sonucu elde edilen tüm sıcaklık değerleri EK-A ve EK-B 'de gösterilmektedir. Deneysel çalışmalar 8 ay gibi uzun bir sürede tamamlandığı için, deneysel çalışma sonuçlarını, ortam sıcaklığı da dikkate alınarak irdelemek gerekmektedir. TİP1 kabininin deneysel çalışmalarına ocak ayı gibi başlanmış ve 3. Tip kabininin tamamlanması Eylül ayı ortasını bulmuştur. Buna göre TİP1 için ortam sıcaklığı 19~20 °C, TİP2 ve TİP3 için ortam sıcaklığı 25~26 °C olarak değerlendirilebilir. İlk olarak TİP1 'in deneysel çalışmaları yapıldığı için, bazı problemlerin giderilmesi bu kabinde olmuş ve en uzun süre bu kabinde harcanmıştır.

CFD analizleri yapılırken, AG-YG bobinleri ile çekirdek sacının ortalama ve maksimum sıcaklıkları kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler, deneysel çalışmalardan bağımsız olarak hazırlanmıştır. Çünkü deneysel çalışmalar sırasında en

sıcak noktanın belirlenmesi veya bobin yüzey sıcaklıklarının ölçümü yapılmamıştır. Kaydedilen bu değerler, Tablo 4.1’de gösterilmektedir.

**Tablo 4.1:** CFD analizi ile AG-YG bobinleri ve çekirdek için ortalama ve maksimumu sıcaklık değerleri.

	AG Bobini (°C)		YG Bobini (°C)		Çekirdek (°C)	
	Ortalama	Maksimum	Ortalama	Maksimum	Ortalama	Maksimum
<b>Tip1</b>	352.2	397.4	346.4	392.7	344.9	399.1
<b>Tip2</b>	352.3	397.6	346.3	392.2	344.9	399.1
<b>Tip3</b>	352.3	397.5	346.4	393.1	344.8	399.0

Sıcaklık değerleri irdelendiğinde, çalışma sonuçları olarak kabin içi sıcaklık dağılımı dikkate alınabilir, ancak bobin sıcaklıklarının incelenmesi için yeni bir çalışma yapılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır. Çünkü analizlerde bobinler ve çekirdek geometrileri, ayrıntılı olarak modellenmemiştir. Bobinler ayrıntılı olarak modellendikten sonra, kabinlerin bobin sıcaklıklarına olan etkisi için daha doğru yorumlar yapılabilir.

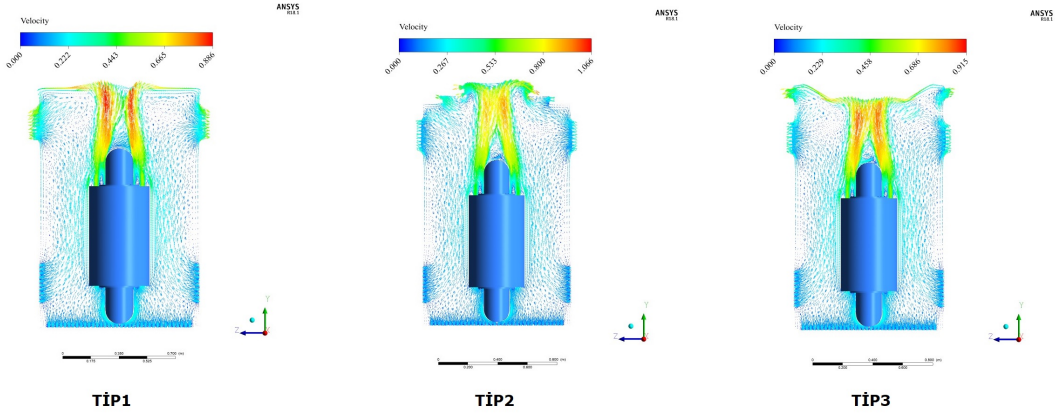
Aşağıda verilen Tablo 4.2’de TIP1 kabinin deneysel çalışmalar sırasında elde edilen Y kesitinin (XY görünüşü için) sıcaklıkları verilmiştir. Ve bu sıcaklıklar CFD analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

**Tablo 4.2:** XY kesiti-Y(Tip1) için sıcaklıkların karşılaştırılması.

Y		1	2	3	4	5	6	7	8
<b>A</b>	<i>Deneysel</i>	37.84	37.46	38.52	39.50	38.52	38.41	37.03	37.68
	<i>CFD</i>	43.60	36.78	42.88	42.23	43.09	38.21	34.46	39.03
<b>B</b>	<i>Deneysel</i>	37.42	35.64	36.73	37.67	37.65	37.04	36.15	36.84
	<i>CFD</i>	43.17	40.11	42.85	41.97	42.53	41.37	30.64	40.82
<b>C</b>	<i>Deneysel</i>	36.45	33.99	34.77	35.92	35.85	35.25	34.27	36.64
	<i>CFD</i>	40.32	31.59	33.51	33.40	27.68	27.41	27.11	39.93
<b>D</b>	<i>Deneysel</i>	28.08	29.64	29.95	29.94	30.05	29.53	29.84	27.91
	<i>CFD</i>	26.77	25.61	25.62	25.44	25.45	25.42	26.30	27.41
<b>E</b>	<i>Deneysel</i>	27.74	28.39	28.39	28.15	28.21	28.37	28.9	27.32
	<i>CFD</i>	25.69	25.53	25.63	25.49	25.50	25.53	25.82	25.93
<b>F</b>	<i>Deneysel</i>	26.30	26.72	26.59	26.52	26.96	26.94	27.21	25.76
	<i>CFD</i>	25.72	25.57	25.69	25.60	25.62	25.59	25.56	25.67
<b>G</b>	<i>Deneysel</i>	26.14	26.77	26.55	26.44	26.78	27.22	27.11	25.89
	<i>CFD</i>	25.24	25.30	25.79	25.43	25.47	25.61	25.34	25.35
<b>H</b>	<i>Deneysel</i>	25.47	25.92	26.59	25.44	26.40	26.46	26.22	24.26
	<i>CFD</i>	25.19	25.27	25.52	25.39	25.39	25.49	25.25	25.17
<b>I</b>	<i>Deneysel</i>	26.48	25.99	26.68	25.70	25.97	26.43	25.27	25.40
	<i>CFD</i>	25.17	25.24	25.33	25.76	25.77	25.33	25.25	25.17
<b>J</b>	<i>Deneysel</i>	24.58	24.98	26.12	26.29	26.36	24.89	25.03	24.33
	<i>CFD</i>	25.16	25.28	26.24	25.34	25.34	26.18	25.25	25.19

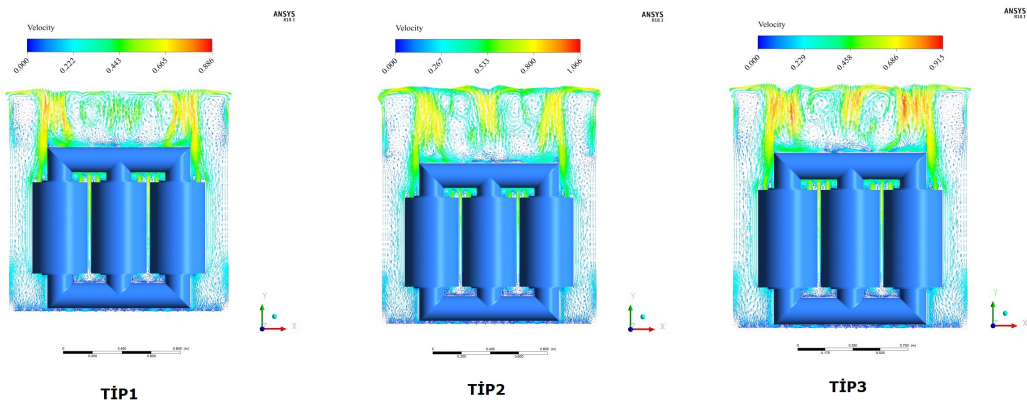
## 4.2 Hız Dağılımı

CFD analizlerinde başlangıç sınır şartı olarak, deneysel çalışmalar sırasında Testo 405 termal anemometre ile yapılan ölçümlerden elde edilen 0.2 m/s değeri kullanılmıştır. Aynı sınır şartları dikkate alınarak yapılan CFD analizleri sonucunda hız dağılımlarındaki farklılıklar ortaya çıkartılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen değerler çok fazla farklılık göstermese de TİP2 'de hava hızlarının daha yüksek olduğu söylenebilir. Şekil 4.6'da üç tip çatı için YZ kesiti, Şekil 4.7'de XY kesiti için hız dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 4.6: YZ kesiti için hız dağılımı.

Ancak sadece hız değeri ısı transferi için referans alınmamalıdır. Sıcaklık dağılımı ve kabin duvarlarından atılan ısı miktarları da ayrıca incelenmelidir.

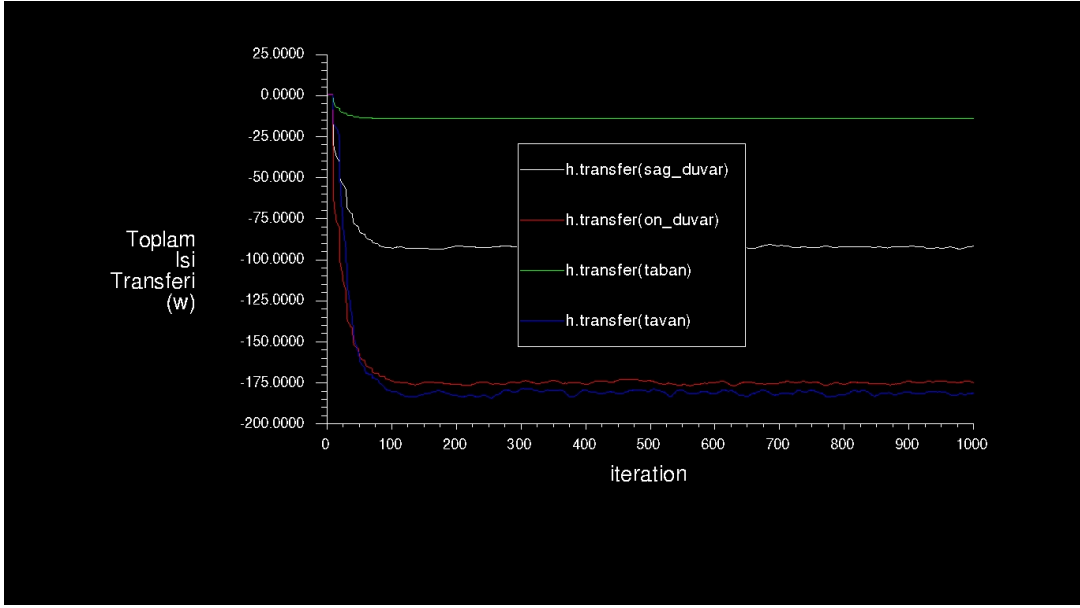


Şekil 4.7: XY kesiti için hız dağılımı.

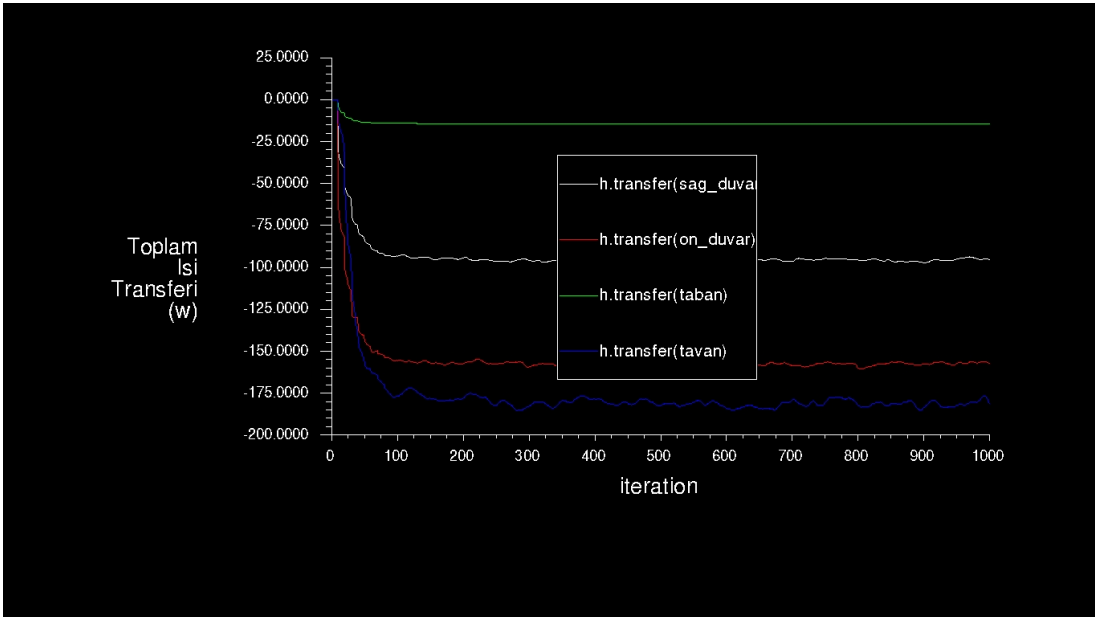
### 4.3 Isı Transferi Değerleri

CFD analizlerinde sınır şartı olarak verilen ısı kayıp değerleri bobin ve çekirdek yüzeylerine ( $W/m^2$ ) verilmiştir. Sınır şartı olarak verilen bu kayıp değerleri sonucu oluşan sıcak hava, kabinin dışarı açılan havalandırma delikleri ve kabin sacından atılmaktadır.

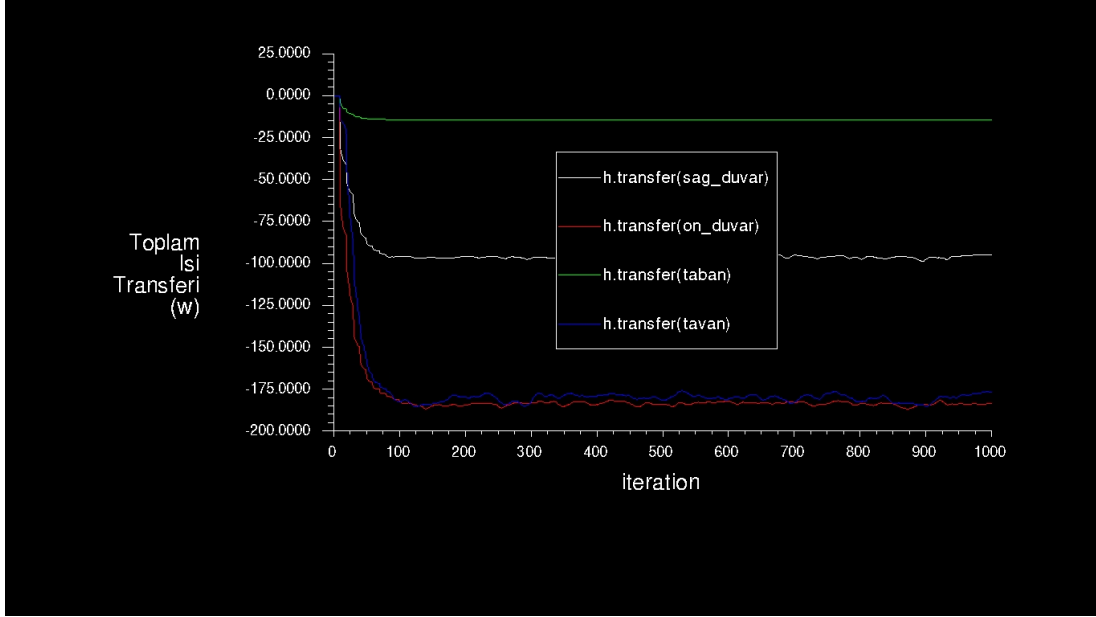
Çözüm sırasında, kabin sacının her bir yüzeyi (ön, arka, sağ, sol, taban ve tavan duvarları) için ayrı ayrı atılan ısı miktarlarının grafiği oluşturulmuştur. Grafikler Şekil 4.8-4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.8: Kabin yüzeylerinden atılan ısı miktarı-Tip1.



Şekil 4.9: Kabin yüzeylerinden atılan ısı miktarı-Tip2.



**Şekil 4.10:** Kabin yüzeylerinden atılan ısı miktarı-Tip3.

Yapılan CFD analizlerine göre, kabin saclarının her bir yüzeyinden atılan ısı miktarları aşağıda verilen Tablo 4.3'de gösterilmektedir.

**Tablo 4.3:** Kabin sacından atılan ısı miktarları.

	Ön Duvar Sacı (W)	Sağ Duvar Sacı (W)	Tavan Sacı (W)	Taban Sacı (W)
<b>Tip1</b>	-174.7	-91.5	-181.1	-14.1
<b>Tip2</b>	-157.4	-95.6	-181.2	-14.3
<b>Tip3</b>	-183.3	-95.2	-176.9	-14.4

Analizlerde transformatör için verilen toplam kaybın 3 kW civarında olduğu düşünülürse, toplam kaybın kabin sacından dışarıya atılması, Tip1 için % 24.25, Tip2 için % 23.38, Tip3 için % 24.94 civarında olduğu görülmektedir. Değerler her üç kabin için de yakındır ve toplam transformatör kaybının yaklaşık % 24'ü kabinin dış çeperlerinden atılmaktadır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kabinli kuru tip transformatörlerde kabin içindeki havanın sıcaklık ve hız dağılımı, ANSYS18.1/FLUENT CFD analiz programı ve deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Analiz sınır şartları için gerekli olan, kabinlerin yan duvar, tavan ve taban sacları için ısı taşınım katsayıları hesaplanıp CFD analiz programına girilmiştir. Analizde hacmi oluşturan havanın termofiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri elde edilerek programa dahil edilmiştir. Yine kabin duvarlarında oluşan ısıl sınır tabaka kalınlıkları hesaplanmış ve bu hesaba göre inflation meshler oluşturulmuştur. Yine deneysel çalışmalar kapsamında imal edilen kabin ve temsili bobinler, araştırılan 250kVA kuru tip transformatörün ölçülerine göre birebir üretilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında, üç farklı çatı tipine sahip kabinler için toplam 158 adet deney yapılmış, bu deneyler ile 1480 adet farklı noktanın sıcaklığı ölçülmüştür.

Bu tez çalışması ile elde edilen veriler değerlendirildiğinde, kabinli kuru tip transformatörde kabin içi sıcaklığın tavan sacında yoğunlaştığı görülmektedir. Buda kabin nedeniyle ısınma problemi olan bir transformatörde, kabin ile transformatör arası mesafenin ve hava çıkış alanının azlığı veya tavan geometrisinin incelenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Yine üç farklı kabin için elde edilen, kabin saclarından meydana gelen ısı transferi değeri, transformatör toplam kaybının yaklaşık %24 'ü kadar olduğu ortaya çıkmıştır. Isı transferi miktarları, en fazla tavadan daha sonra sırasıyla ön-arka duvarlar, sağ-sol duvarlar ve taban şeklinde sıralanmaktadır.

Gelecek çalışmalarda yapılması düşünülen, kabinli kuru tip transformatörlerin bobin içi sıcaklıklarının araştırılmasında, bu tez çalışmasından yararlanılacaktır. Kabinli bir transformatör bobininin CFD analizinde tanımlanan, bobine giren havanın sıcaklığı ve hızı, bu tez çalışması ile elde edilen veriler olacaktır. Ayrıca yapılacak bobin analizlerinde mesh sayısının azaltılması için hava modellenmediğinde, bu çalışmada elde edilen ısı taşınım katsayıları kullanılacaktır. Bu çalışmaya paralel olarak, kabinsiz kuru tip transformatörün bobin içi sıcaklıklarının araştırması da yapılarak, kabinli ve kabinsiz olarak bobin sıcaklıkları karşılaştırılıp, incelenecektir.

Bu çalışmalara ek olarak kabinli kuru tip transformatörlerde, kabin hava girişlerinin incelenmesi de gelecek çalışmalar arasındadır. Ingress Protection (IP) standartlarında yer alan değerlere göre, hava girişlerinin kabin içindeki hava ve bobin sıcaklığına olan etkisi araştırılacaktır. Ancak IP standardında yer alan değerler, 2.5 mm gibi çok küçük değerler olabildiğinden, mesh sayısının azaltılması için model küçültmesi yapılması gerekecektir. Bu yüzden analiz için gerekli olan sınır şartları, bu çalışmada elde edilen veriler olacaktır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara bakıldığı zaman, sıcaklık dağılımının kabinin tavan bölgesinde olduğu anlaşılmaktadır. Isı transfer değerlerine bakıldığında da, tavadan atılan ısı miktarlarının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle kuru transformatör ile tavan arasındaki mesafenin azaltılması veya arttırılmasında ortaya çıkabilecek ısı problemleri de gelecek çalışmalar arasında yer alacaktır. Bu mesafenin transformatör kaybına, IP sınıfına, hava giriş ve çıkış alanlarına göre optimizasyonu yapılacaktır. Böylece modellenecek olan kuru tip transformatör kabinin, en uygun tasarımı ortaya çıkartılmış olacaktır.



## 6. KAYNAKLAR

- [1] Alstom, “GETİ-Dökme Reçineli Kuru Tip Transformatörler – Projelendirme bilgileri”, Anonim, (2000).
- [2] Areva, “HARMONY-Dökme Reçineli Kuru Tip Transformatör - İşletme Talimatı”, (2012).
- [3] Siemens, “GEAFOL-Cast-Resin Transformers Planning Guidelines [online]”, (10March2016),<https://www.siemens.com/content/dam/internet/siemens-com/global/products-services/energy/high-voltage/transformers/geafol/geafol-pdf-english/siemens-brochure-transformers-geafol-planning-guidelines-en.pdf>, (2015).
- [4] Vestas, “General Specification for V90 – 3.0 MW-60 Hz Variable Speed Turbine”,(4June2017),[http://www.gov.pe.ca/photos/sites/envengfor/file/95001\\_0R1\\_V90-GeneralSpecification.pdf](http://www.gov.pe.ca/photos/sites/envengfor/file/95001_0R1_V90-GeneralSpecification.pdf), (2004).
- [5] ANSYS 2018.1, “Ansys help viewer – Ansys documentations”,  
<https://ansyshelp.ansys.com/>, (2018).
- [6] IEC 60076-11, Edition2.0, 2018-08 “Power transformers – Part11: Dry type transformers”, (2018).
- [7] Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Vol7, USA: John Wiley-Sons, 980-1011, (2011).
- [8] Eteiba, M.B., Alzahab, E.A. and Shaker, Y.O., “Steady state temperature distributions of cast-resin dry transformer based on new thermal model using finite element method”, *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 4 (2), 361-365, (2010).
- [9] Kömürgöz, G. ve Güzelbeyoğlu, N., “Kendi kendine soğuyan kuru tip güç transformatörlerinde sıcaklık dağılımının belirlenmesi”, *İtüdergisi/d mühendislik*, 1 (1), (2002).
- [10] Rahimpour, E. and Azizian, D., “Analysis of temperature distribution in cast-resin dry-type transformers”, *Electr Eng*, 89, 301-309, doi: 10.1007/s00202-006-0008-4, (2007).

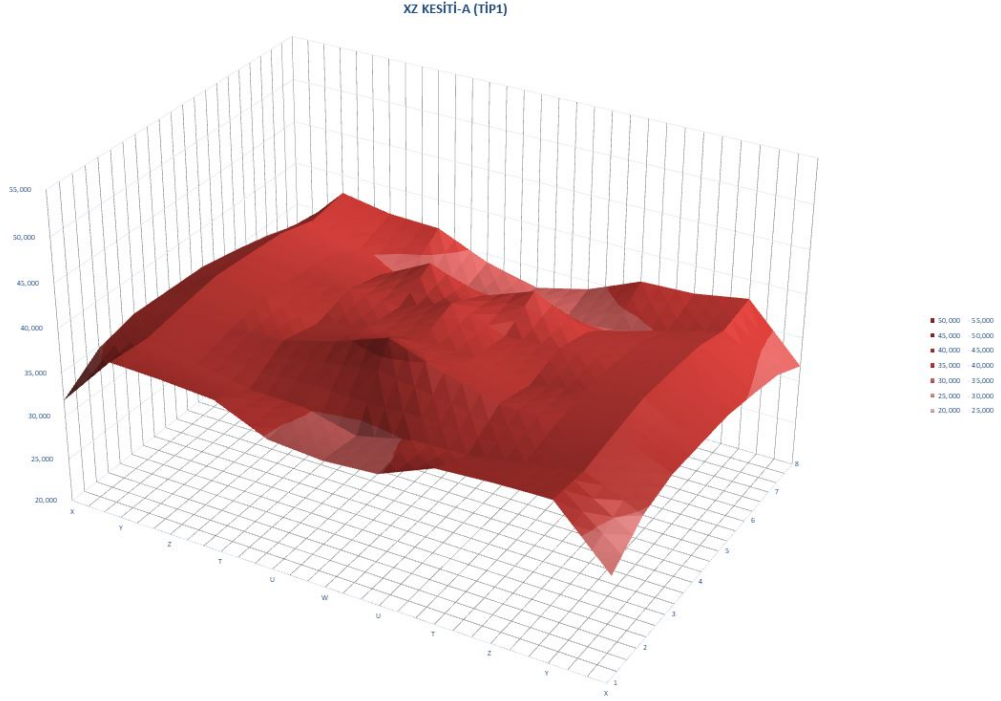
- [11] Eslimian, M., Vahidi, B. and Eslimian, A., “Thermal analysis of cast-resin dry-type transformer”, *Energy Conversion and Management*, 52, 2479-2488, (2011).
- [12] Lee, M., Abdullah, H.A., Jofriet, J.C., Patel, D. and Fahrioglu, M., “Air temperature effect on thermal models for ventilated dry-type transformers”, *Electric Power System Research*, 81, 783-789, (2011).
- [13] Cremasco, A., Barba, P.D., Cranganu-Cretu, B., Wu, W. and Blaszczyk, A., “Thermal simulations for optimization of dry transformers cooling system”, *Scientific Computing in Electrical Engineering, Mathematics in Industry* 23, 103-113, doi: 10.1007/978-3-319-30399-4\_11, (2016).
- [14] Wu, W., Wang, Y. and Wang, Z., “CFD simulation on heat exchanger cooled dry-type transformers”, *Proceedings of the 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer System and Science(EECSS'16)*, doi:10.11159/eee16.143, (2016).
- [15] Kaymaz, Ö., “Investigation of oil flow and heat transfer in transformer radiator”, Msc Thesis, The Graduate School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, Izmir, (2015).

# **EKLER**

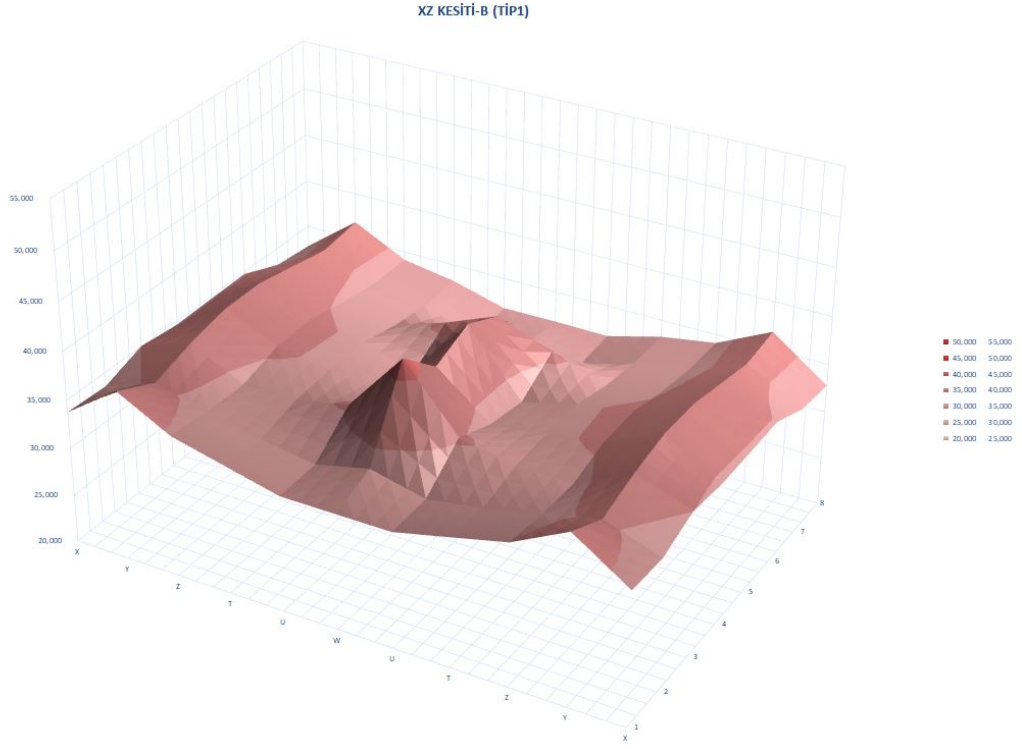
## 7. EKLER

### EK A: DENEYSEL ÇALIŞMALAR

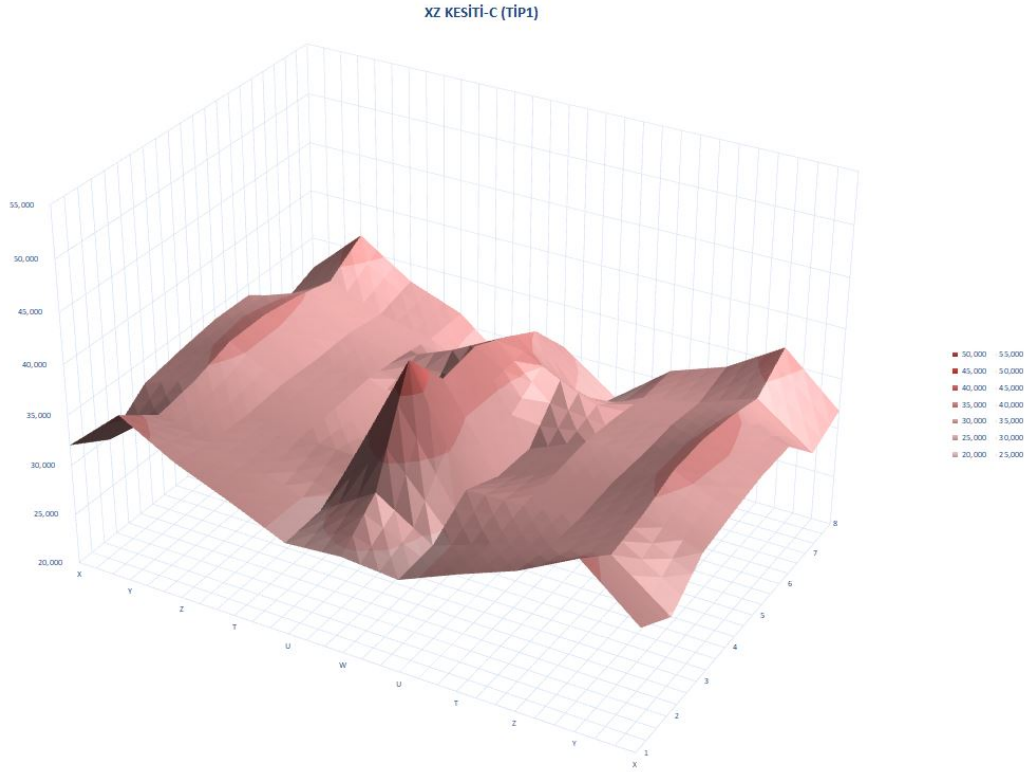
#### EK A.1: TİP1 KABİNİNİN XZ KESİTLERİ İÇİN SICAKLIK DAĞILIMI



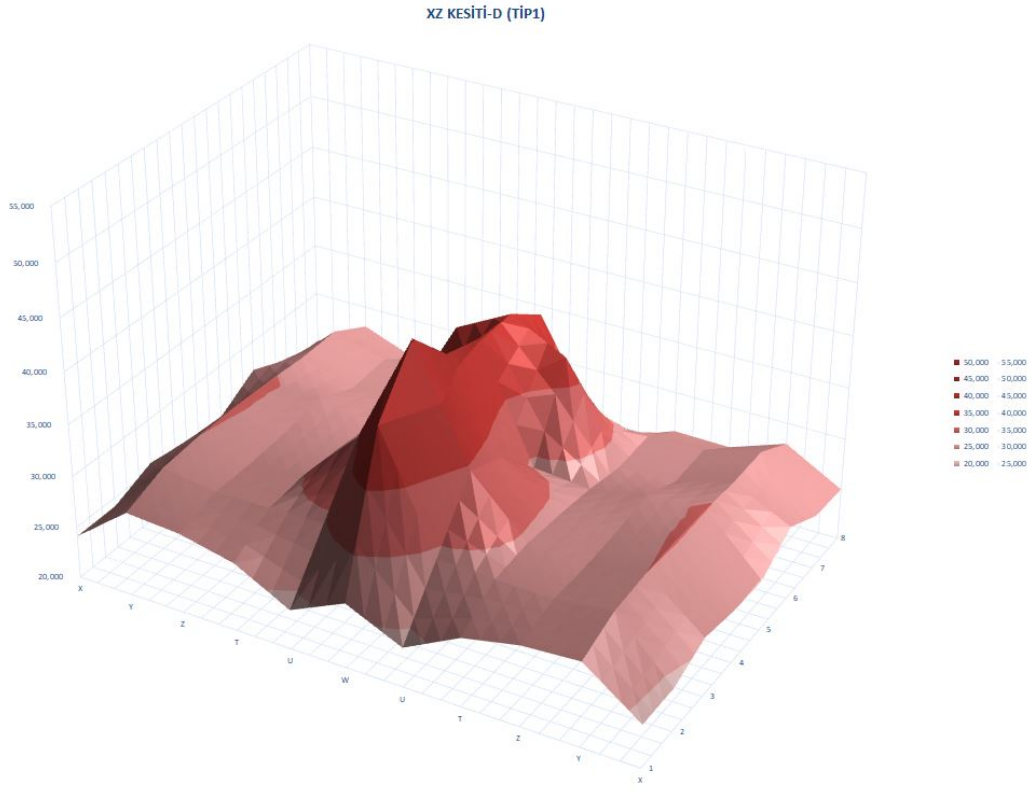
Şekil A.1. 1: XZ kesiti-A(Tip1) için sıcaklık dağılımı.



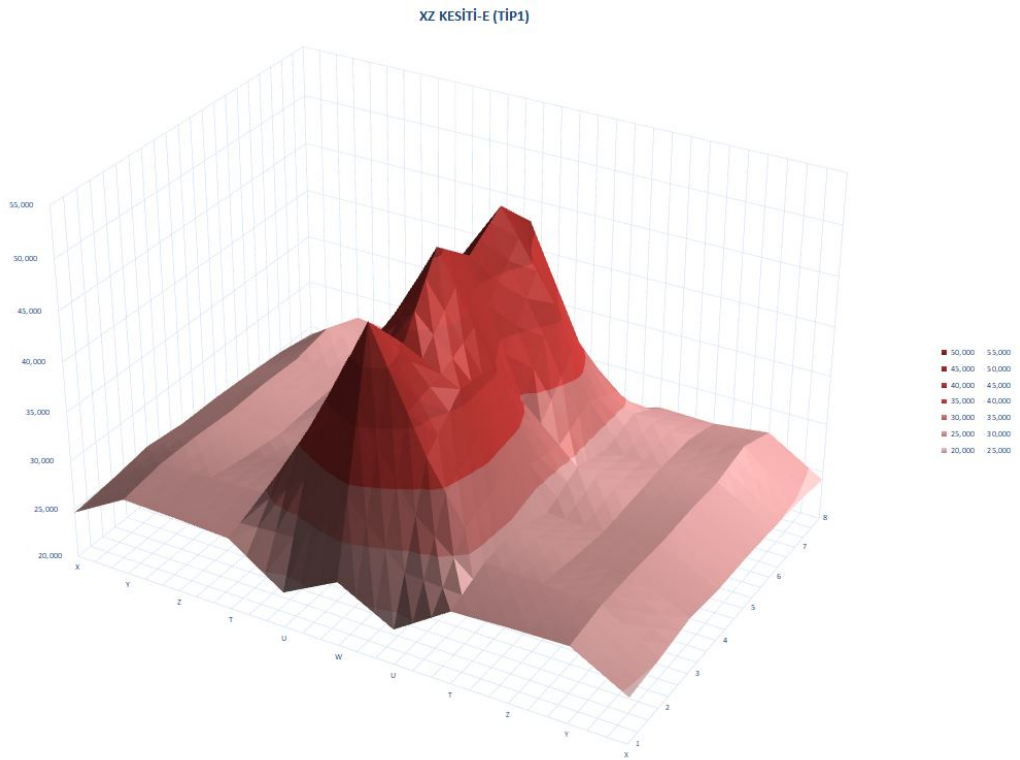
**Şekil A.1. 2:** XZ kesiti-B(Tip1) için sıcaklık dağılımı.



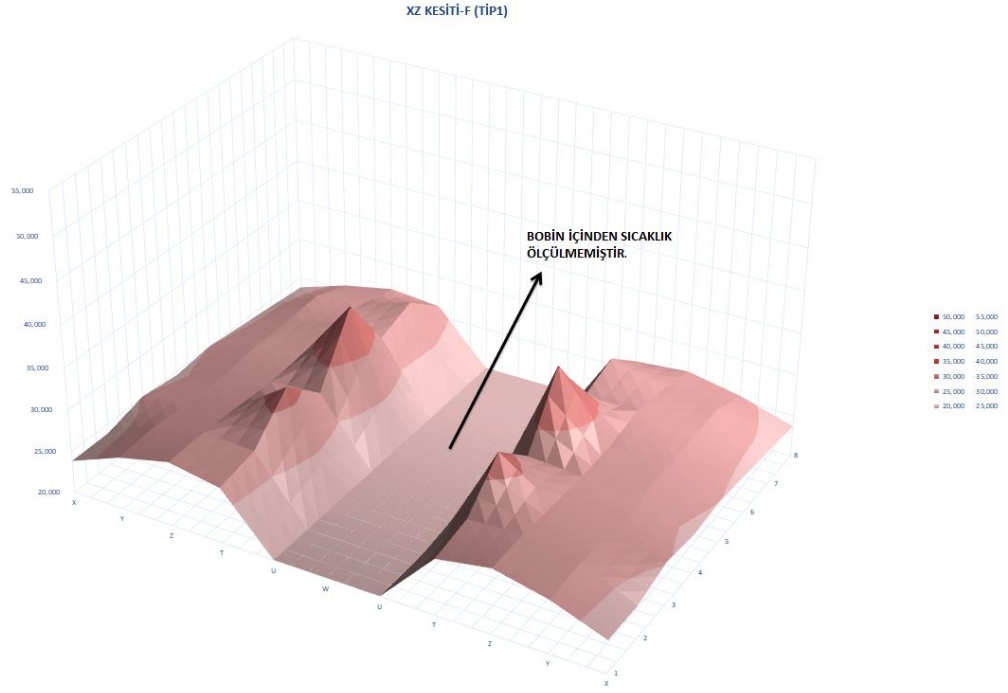
**Şekil A.1. 3:** XZ kesiti-C(Tip1) için sıcaklık dağılımı.



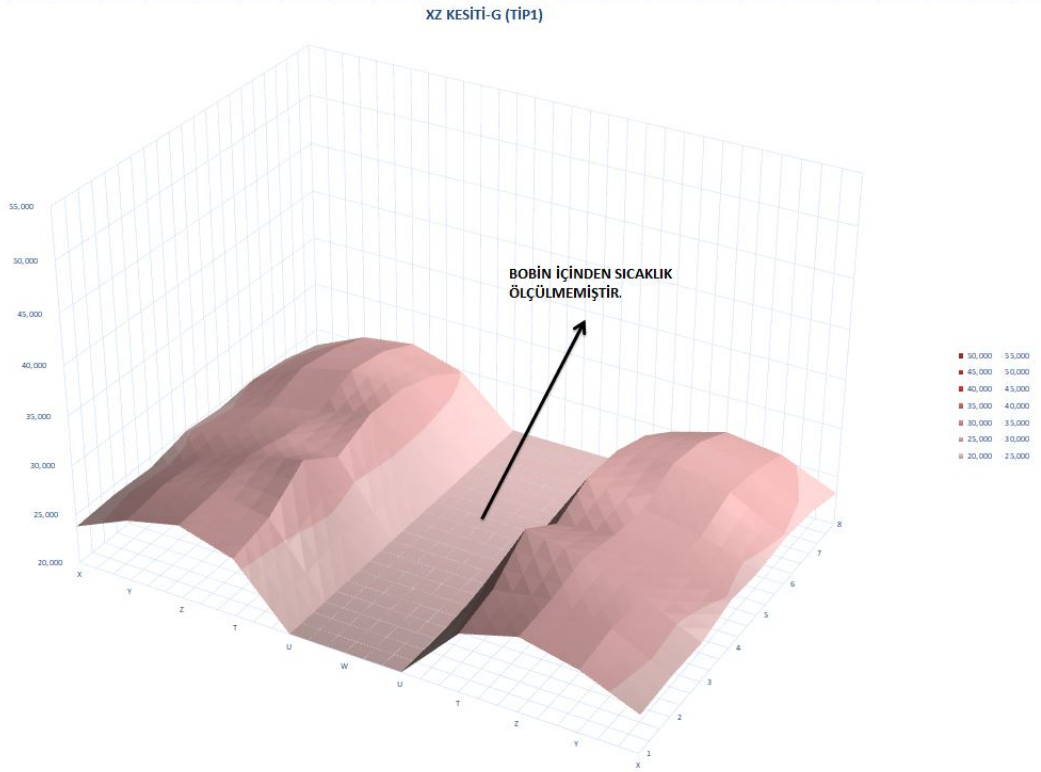
**Şekil A.1. 4:** XZ kesiti-D(Tip1) için sıcaklık dağılımı.



**Şekil A.1. 5:** XZ kesiti-E(Tip1) için sıcaklık dağılımı.

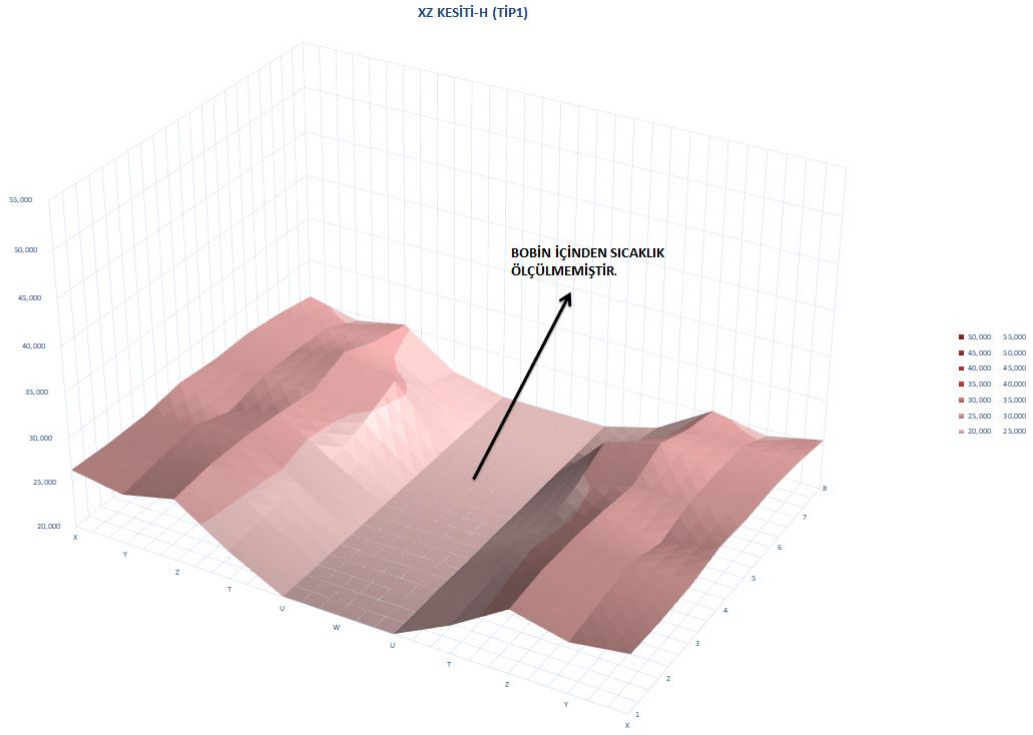


Şekil A.1. 6: XZ kesiti-F(Tip1) için sıcaklık dağılımı.

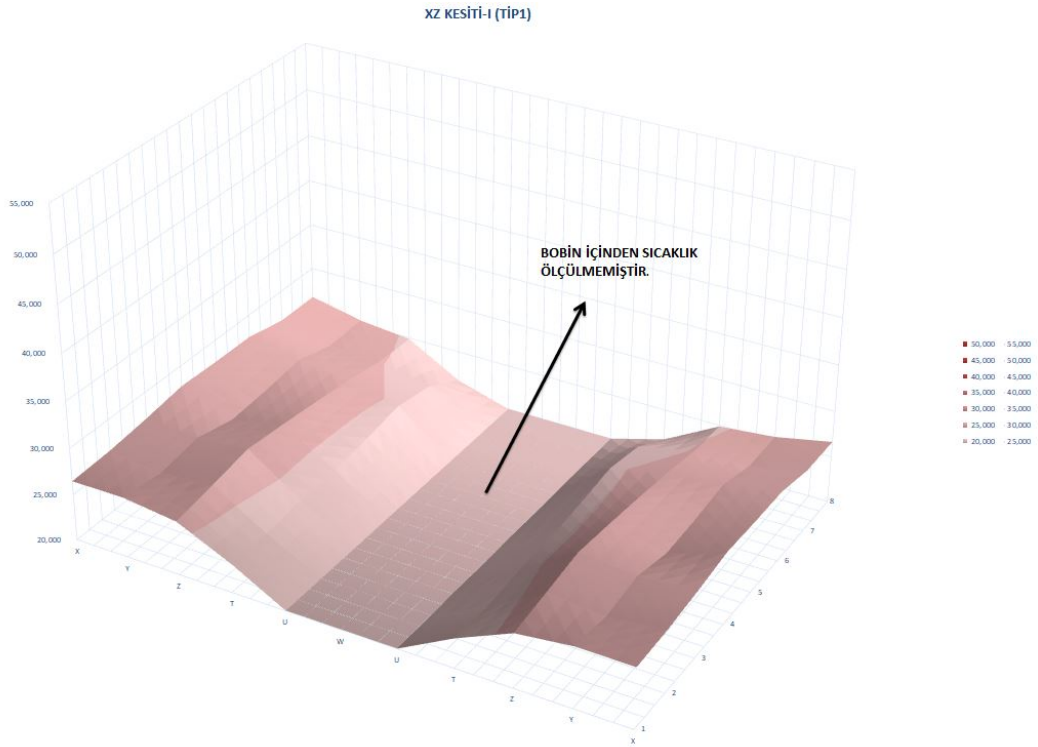


Şekil A.1. 7: XZ kesiti-G(Tip1) için sıcaklık dağılımı.



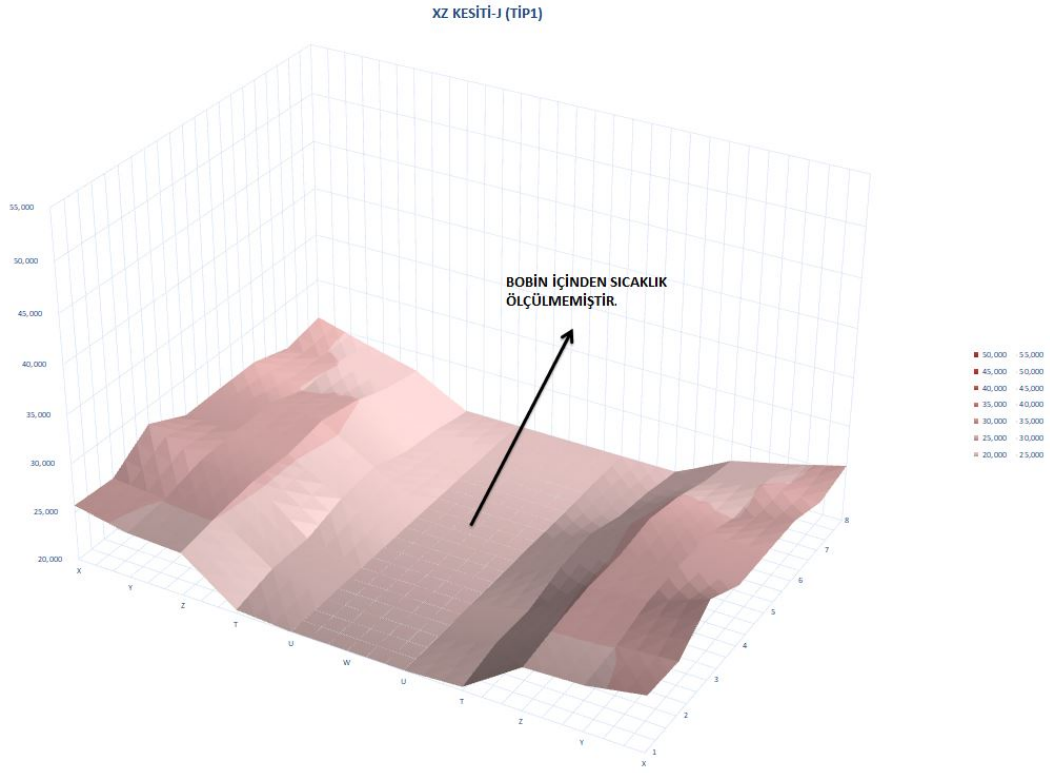


**Şekil A.1. 8:** XZ kesiti-H(Tip1) için sıcaklık dağılımı.



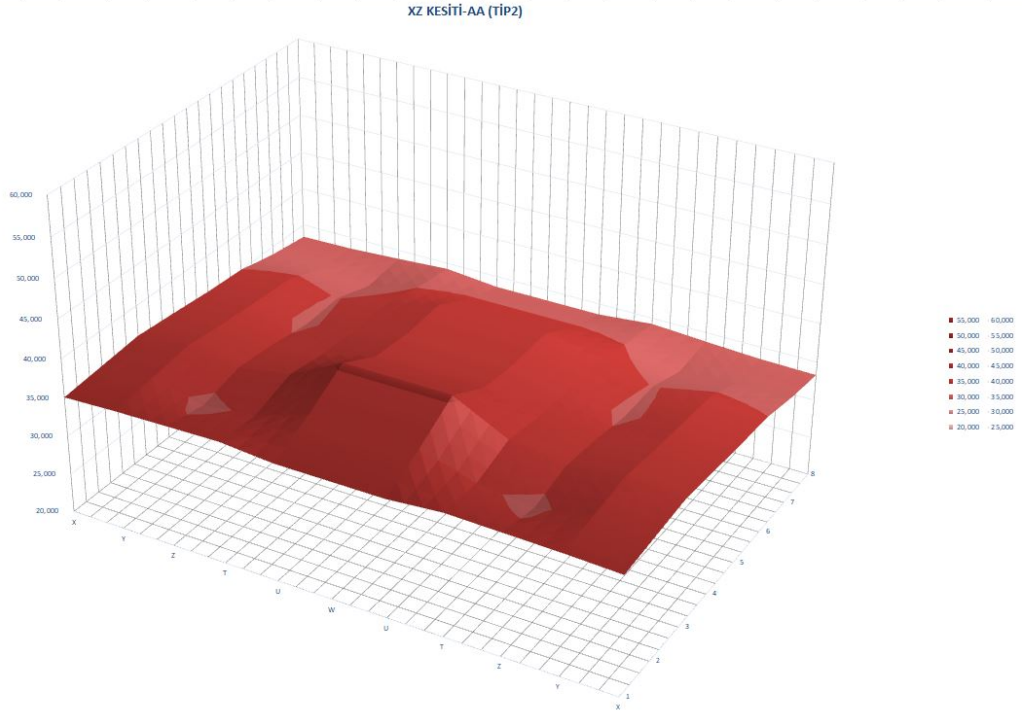
**Şekil A.1. 9:** XZ kesiti-I(Tip1) için sıcaklık dağılımı.



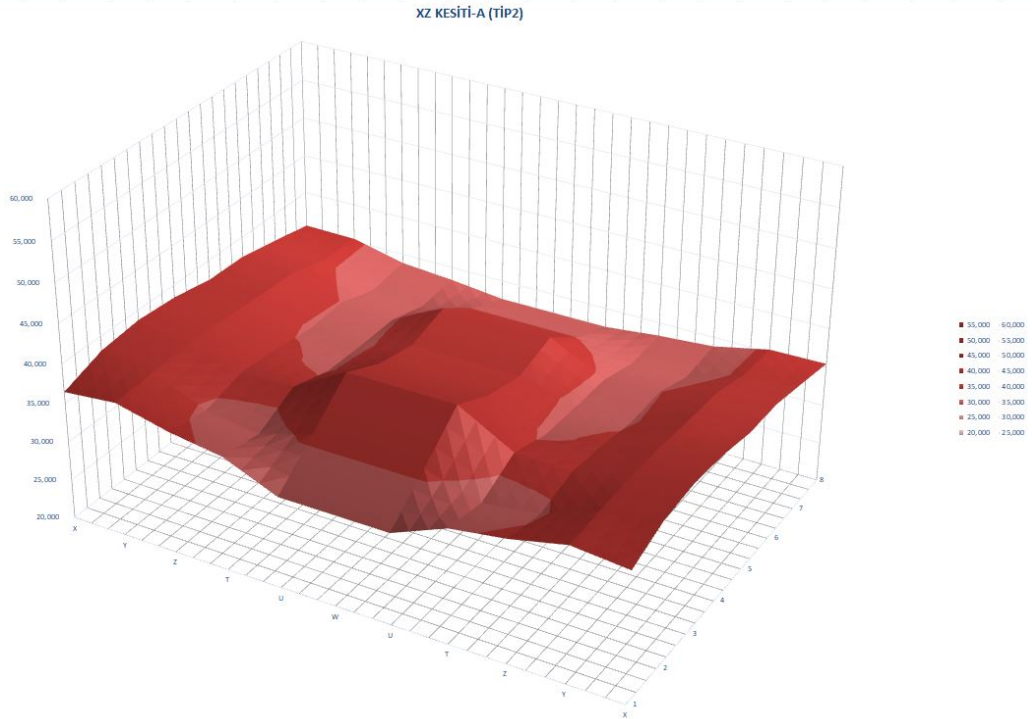


**Şekil A.1. 10:** XZ kesiti-J(Tip1) için sıcaklık dağılımı.

## EK A.2: TİP2 KABİNİNİN XZ KESİTLERİ İÇİN SICAKLIK DAĞILIMI

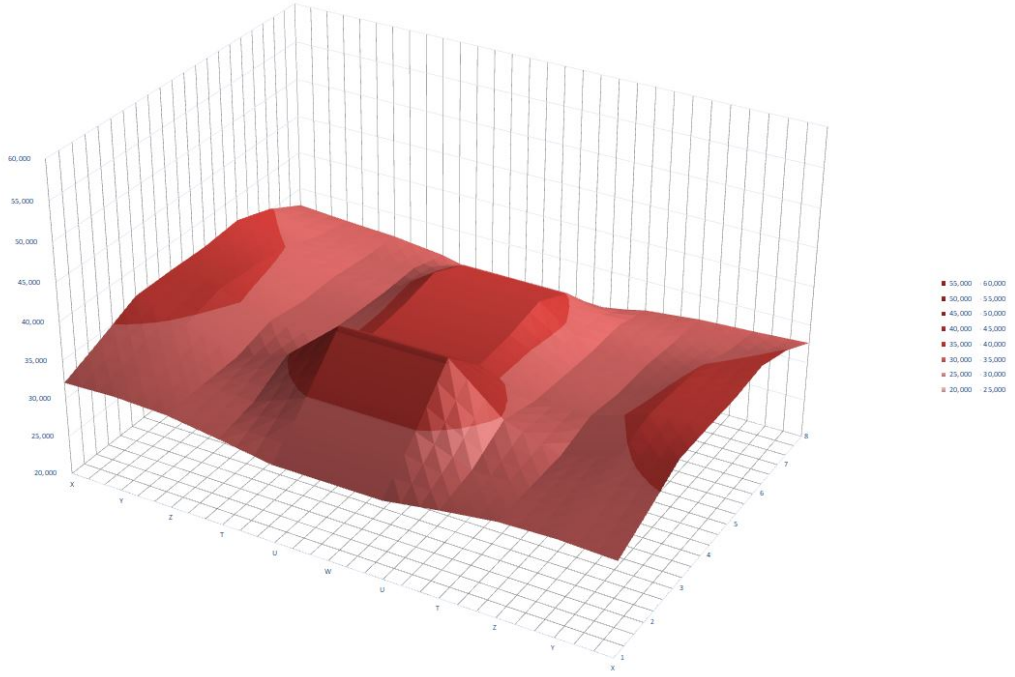


Şekil A.2. 1: XZ kesiti-AA(Tip2) için sıcaklık dağılımı.



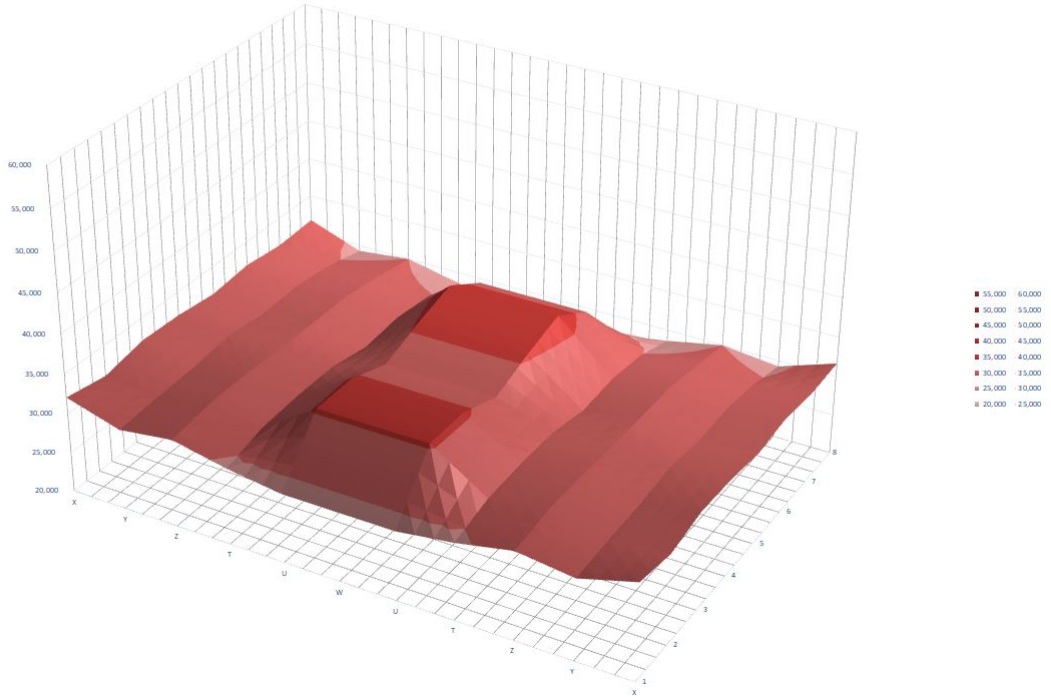
Şekil A.2. 2: XZ kesiti-A(Tip2) için sıcaklık dağılımı.

XZ KESİTİ-B (TİP2)



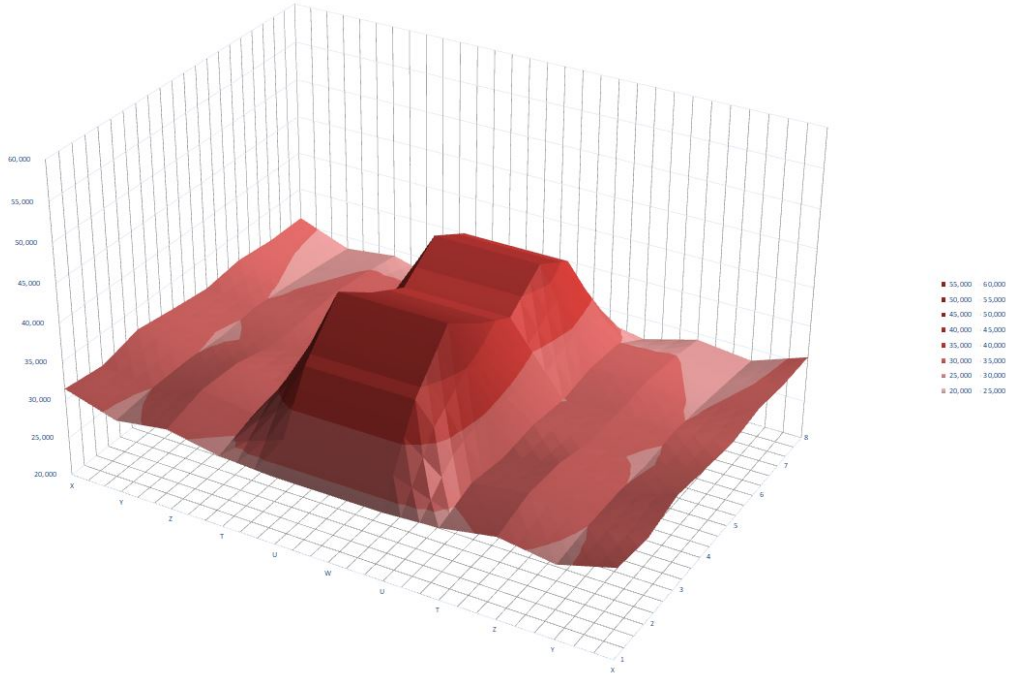
Şekil A.2. 3: XZ kesiti-B(Tip2) için sıcaklık dağılımı.

XZ KESİTİ-C (TİP2)



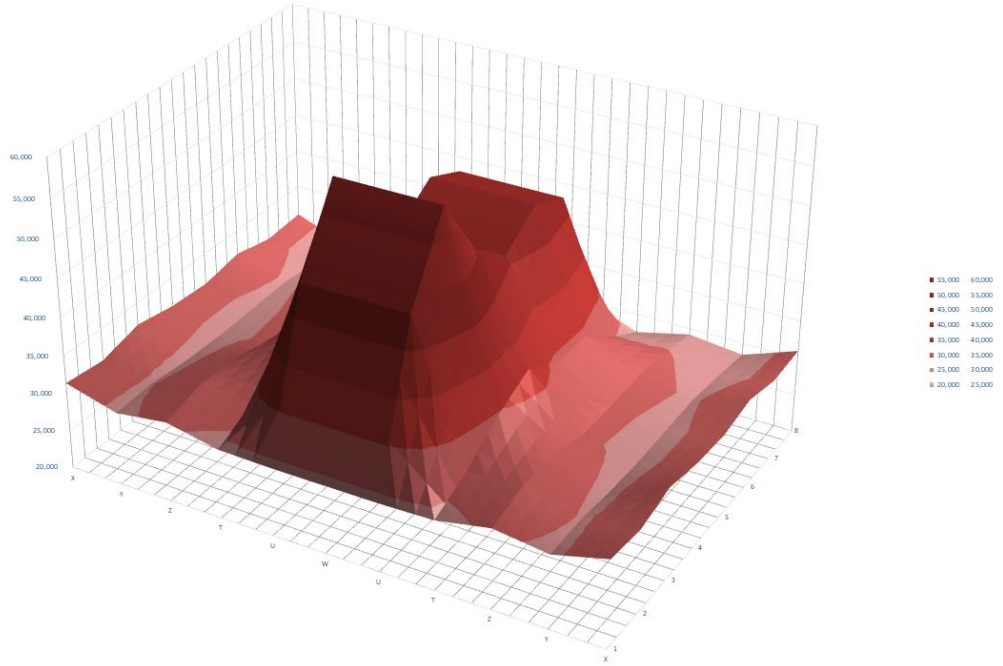
Şekil A.2. 4: XZ kesiti-C(Tip2) için sıcaklık dağılımı.

XZ KESİTİ-D (TİP2)



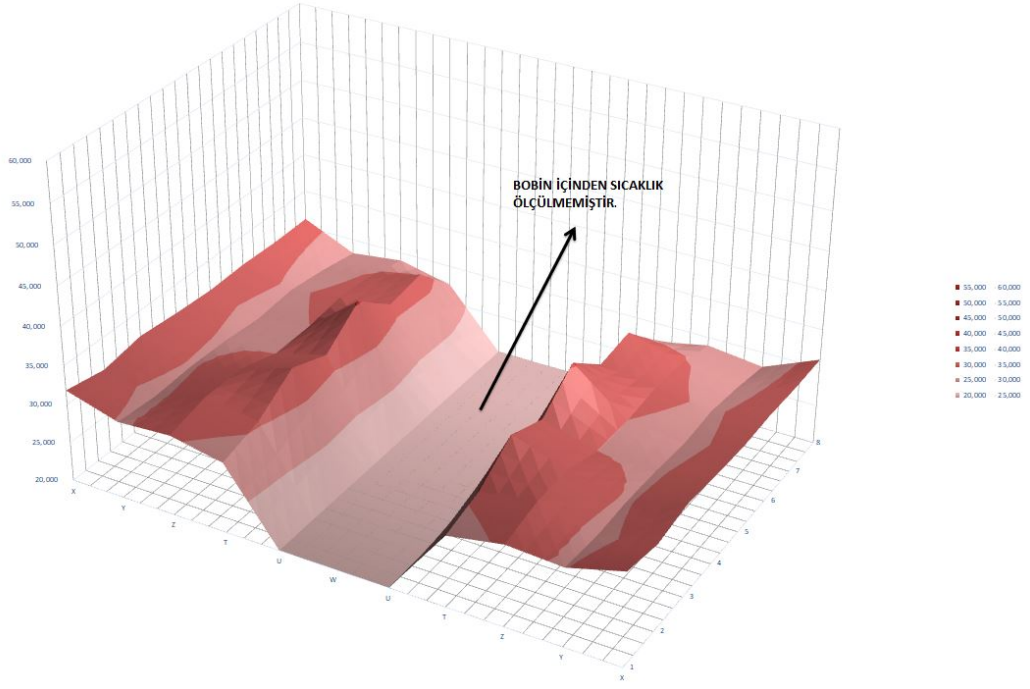
Şekil A.2. 5: XZ kesiti-D(Tip2) için sıcaklık dağılımı.

XZ KESİTİ-E (TİP2)



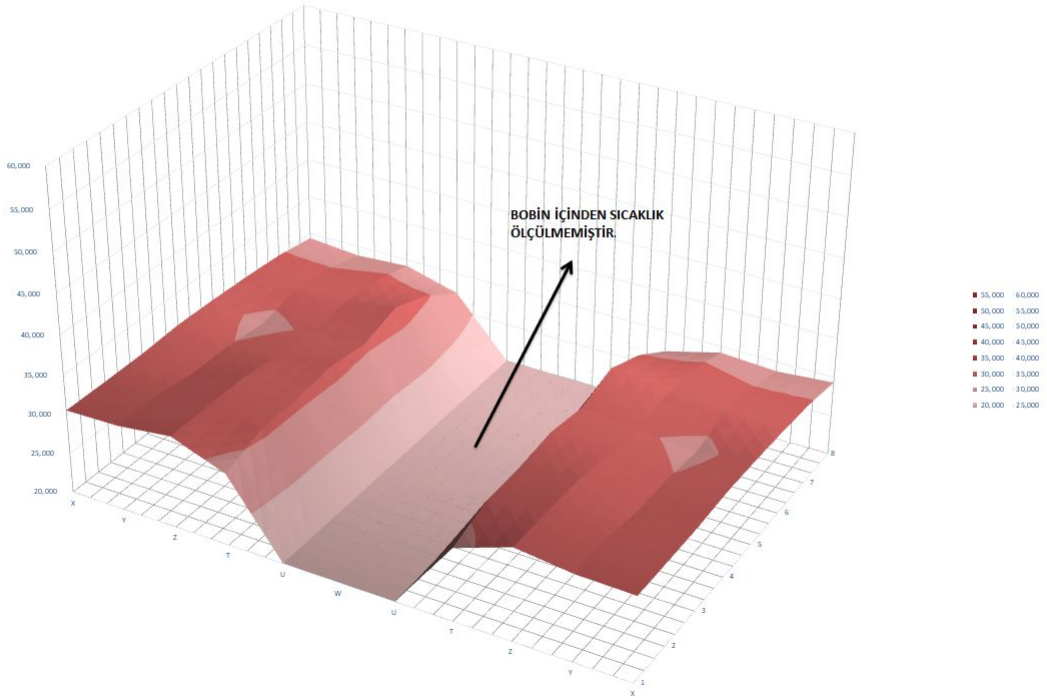
Şekil A.2. 6: XZ kesiti-E(Tip2) için sıcaklık dağılımı.

XZ KESİTİ-F (TİP2)



Şekil A.2. 7: XZ kesiti-F(Tip2) için sıcaklık dağılımı.

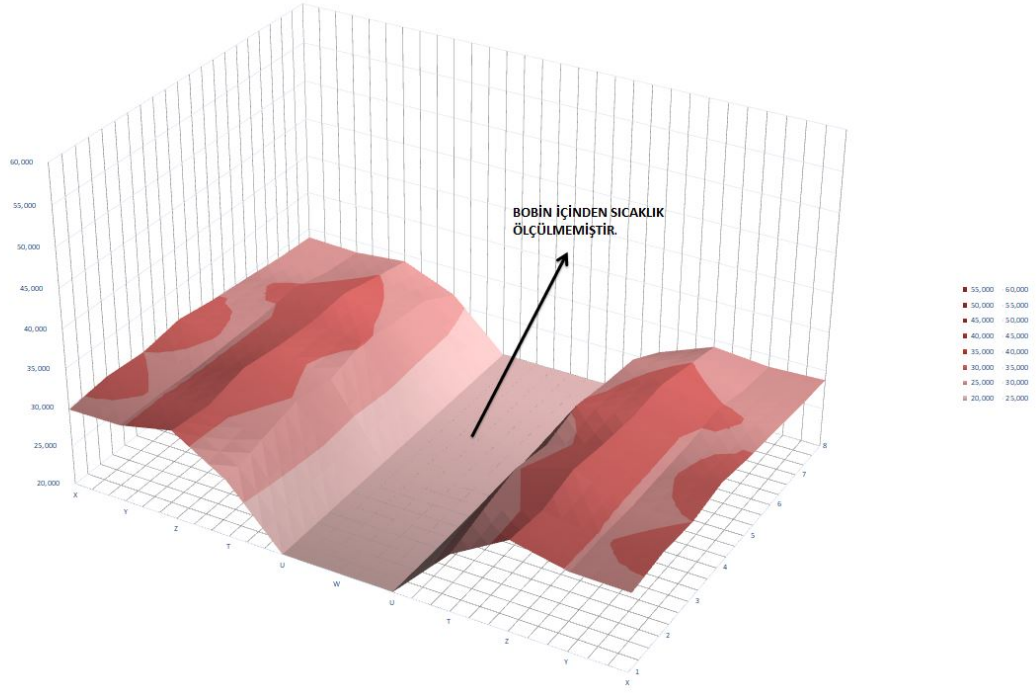
XZ KESİTİ-G (TİP2)



Şekil A.2. 8: XZ kesiti-G(Tip2) için sıcaklık dağılımı.

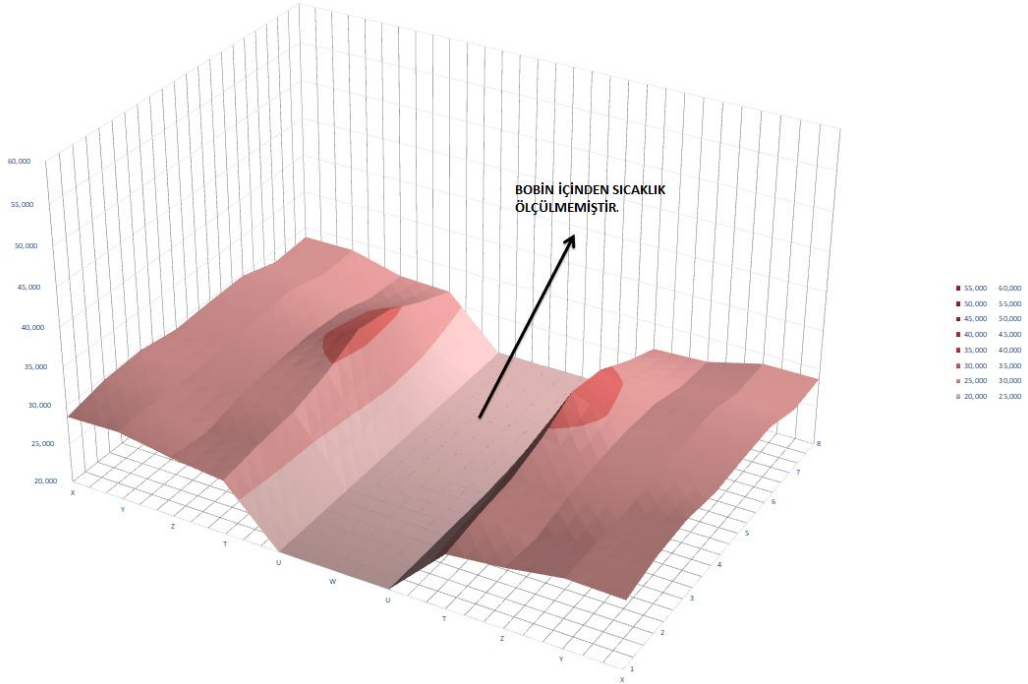


XZ KESİTİ-H (TİP2)

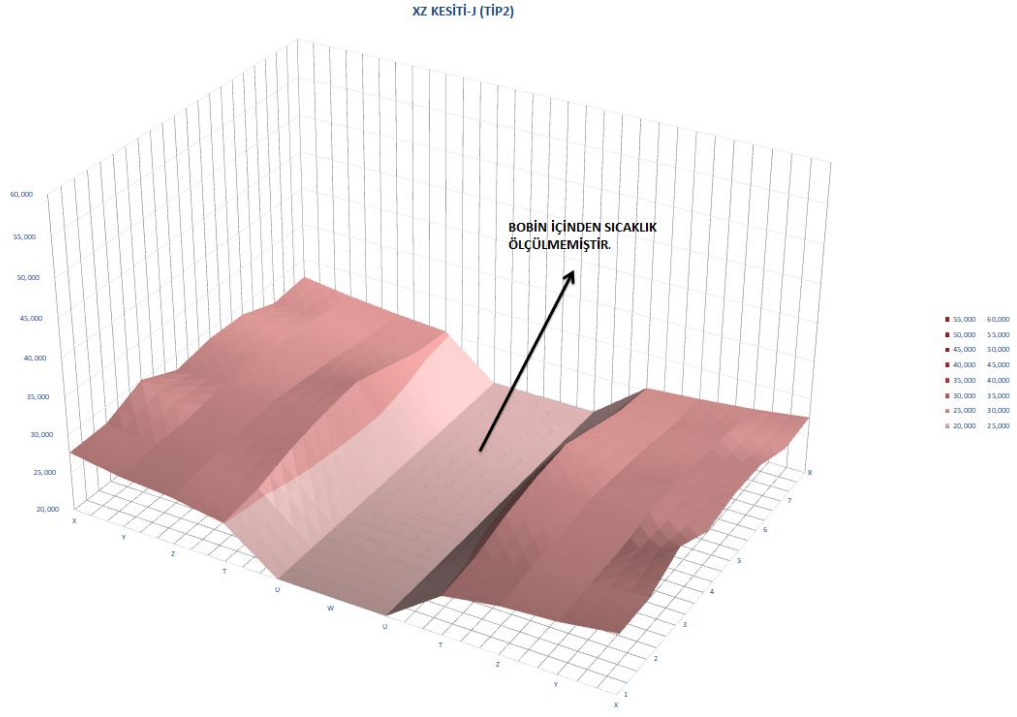


Şekil A.2. 9: XZ kesiti-H(Tip2) için sıcaklık dağılımı.

XZ KESİTİ-I (TİP2)



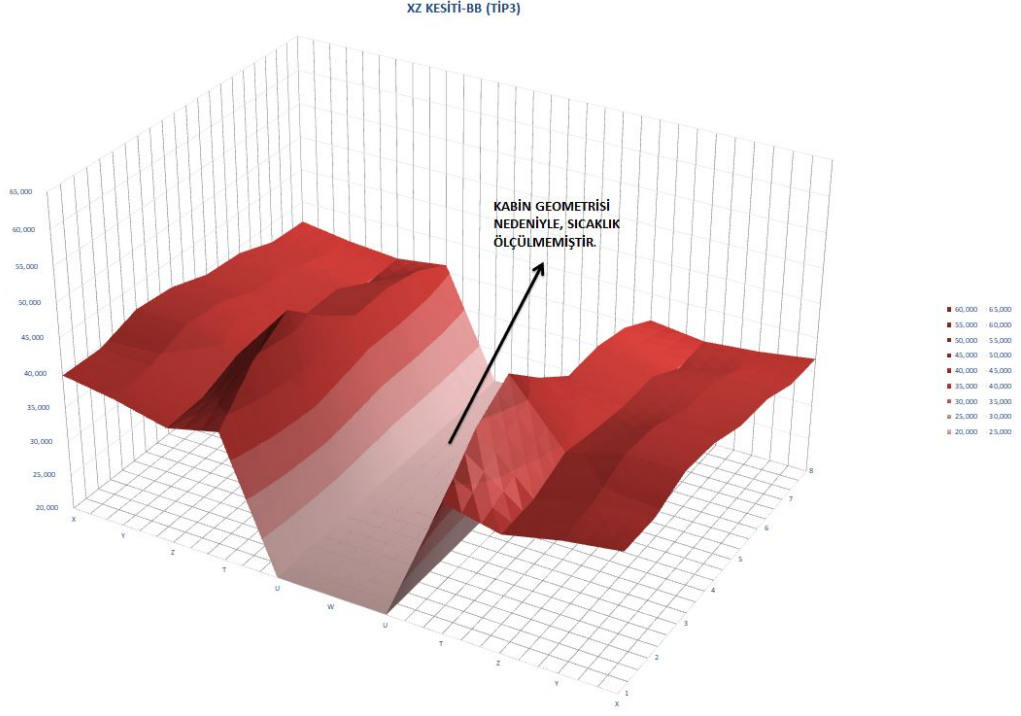
Şekil A.2. 10: XZ kesiti-I(Tip2) için sıcaklık dağılımı.



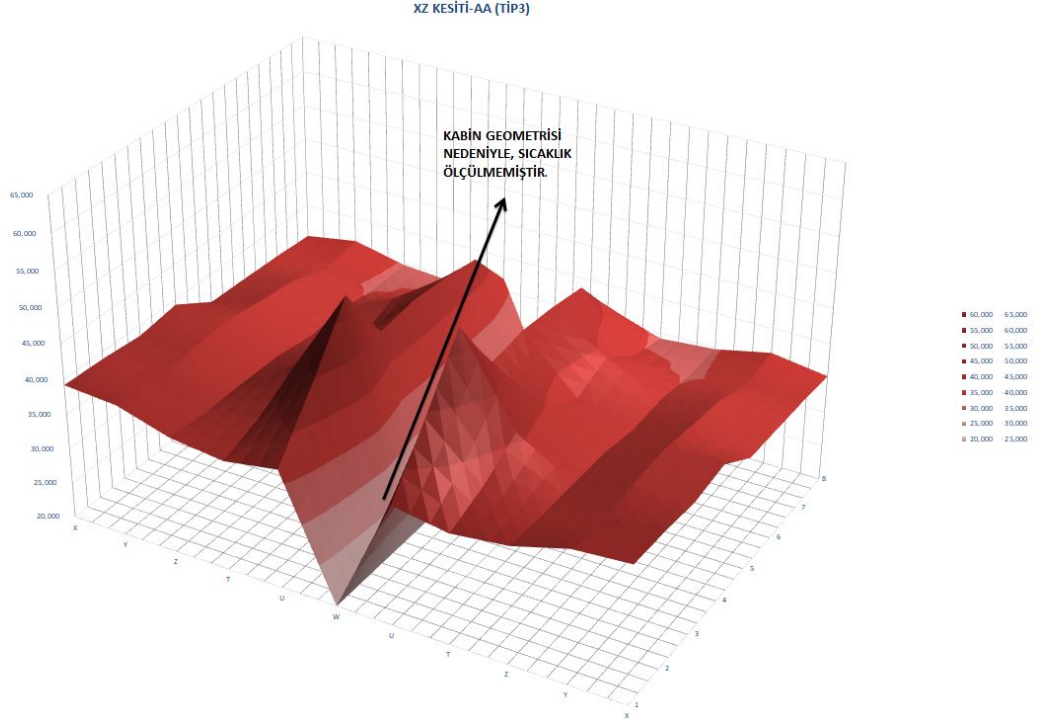
Şekil A.2. 11: XZ kesiti-J(Tip2) için sıcaklık dağılımı.



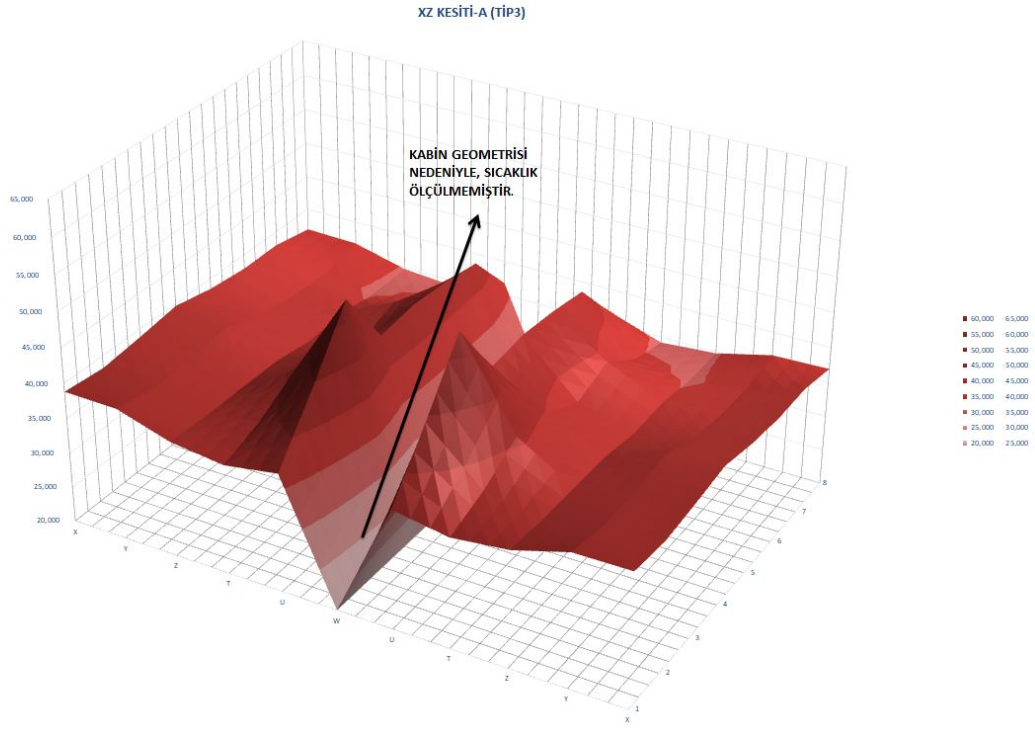
## EK A.3: TİP3 KABİNİNİN XZ KESİTLERİ İÇİN SICAKLIK DAĞILIMI



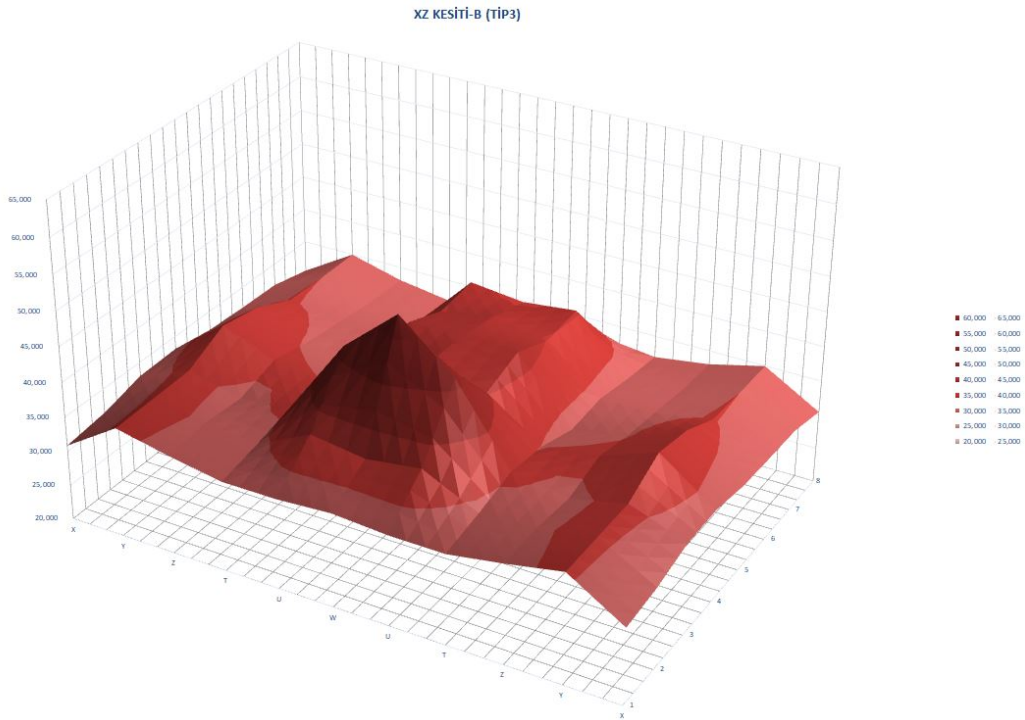
Şekil A.3. 1: XZ kesiti-BB(Tip3) için sıcaklık dağılımı.



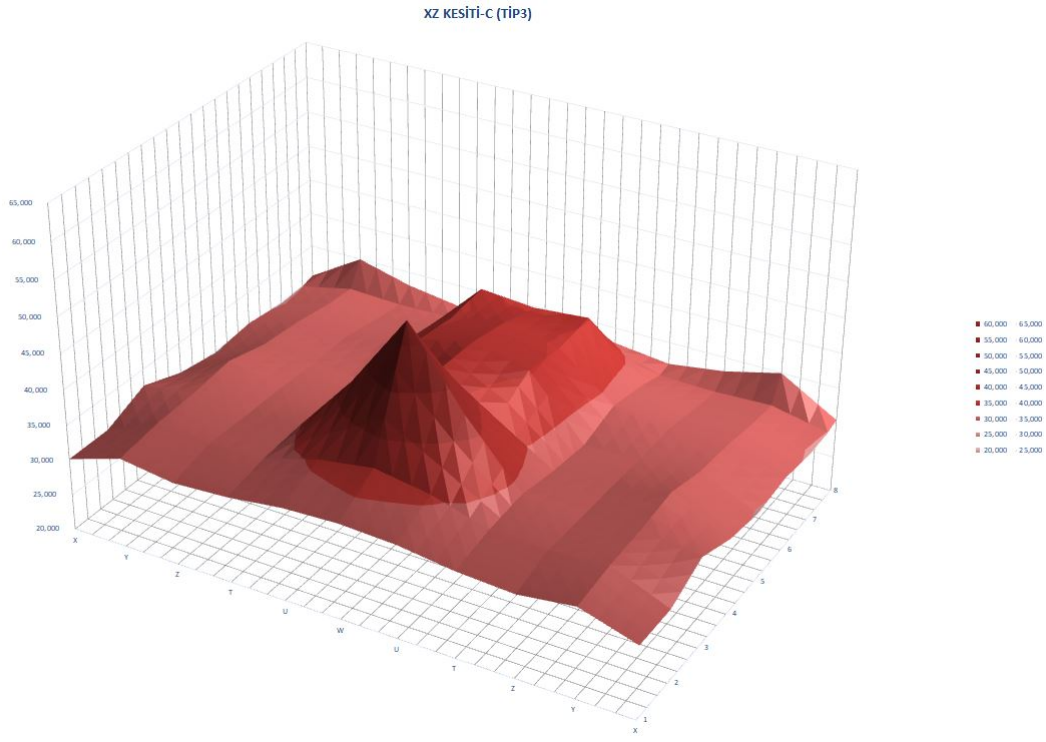
Şekil A.3. 2: XZ kesiti-AA(Tip3) için sıcaklık dağılımı.



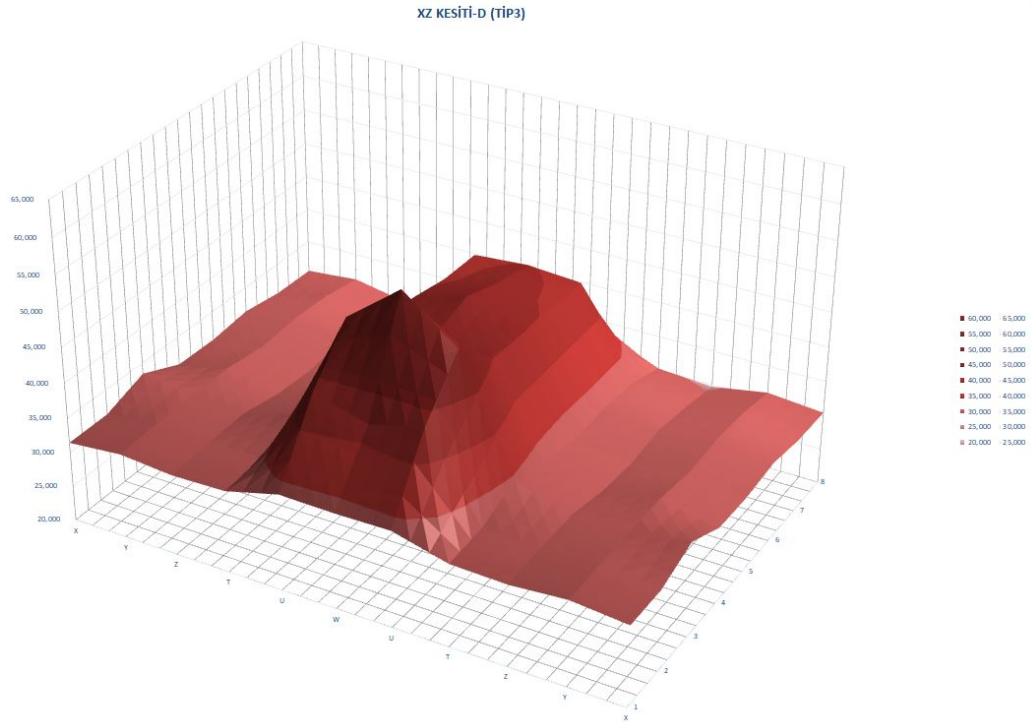
**Şekil A.3. 3:** XZ kesiti-A(Tip3) için sıcaklık dağılımı.



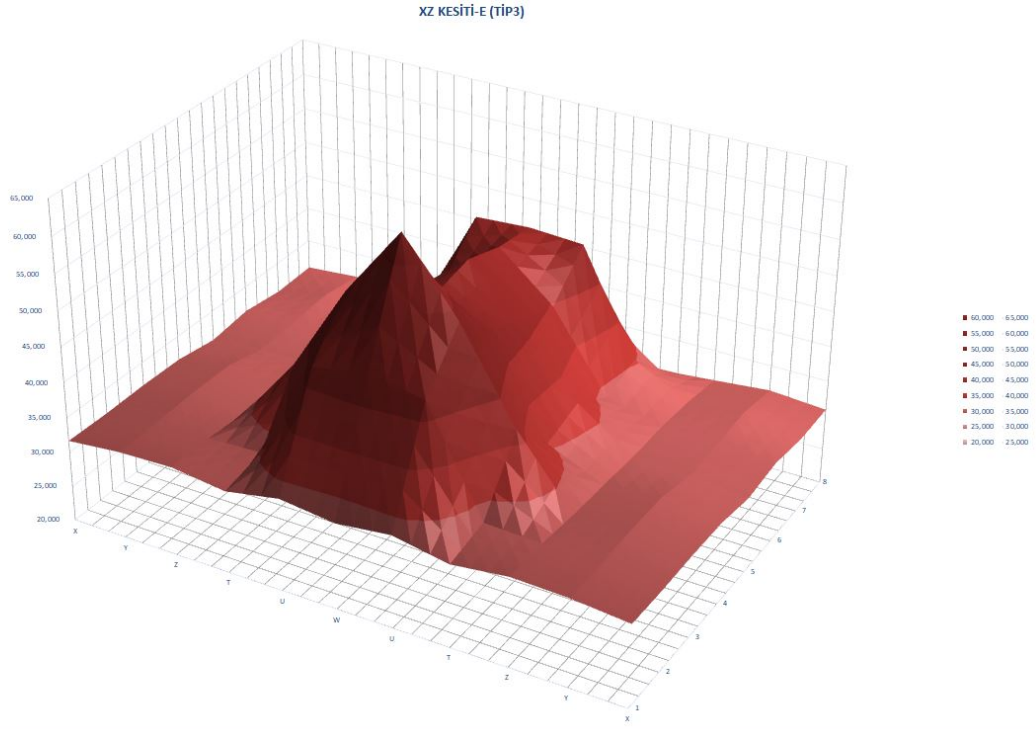
**Şekil A.3. 4:** XZ kesiti-B(Tip3) için sıcaklık dağılımı.



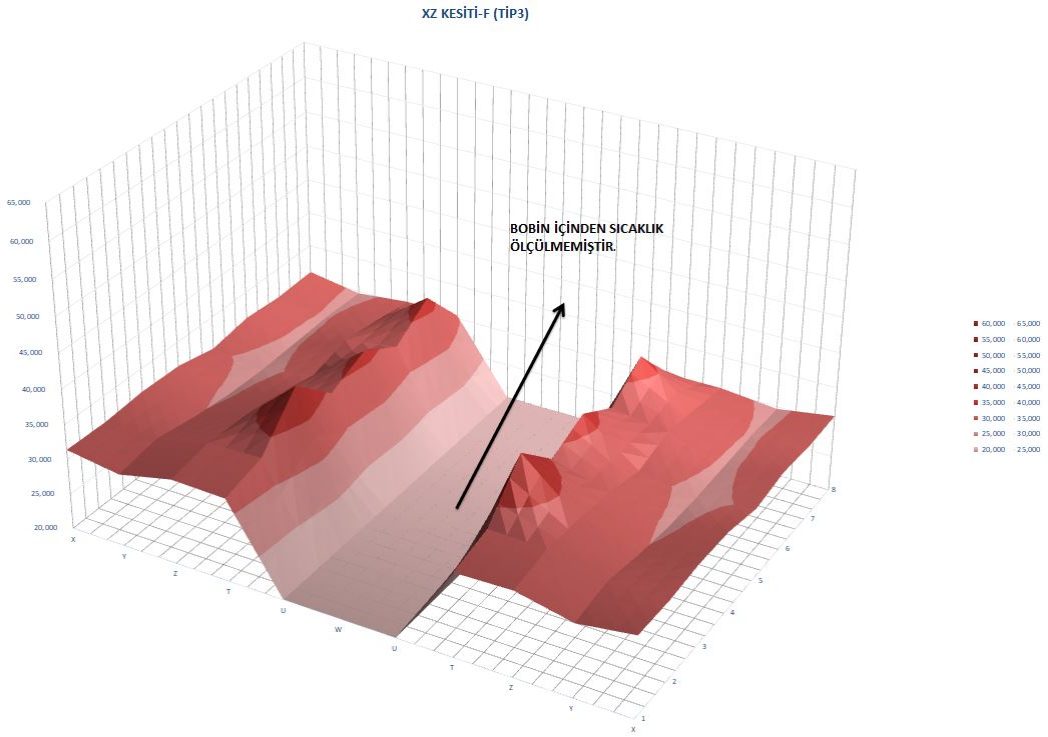
**Şekil A.3. 5:** XZ kesiti-C(Tip3) için sıcaklık dağılımı.



**Şekil A.3. 6:** XZ kesiti-D(Tip3) için sıcaklık dağılımı.

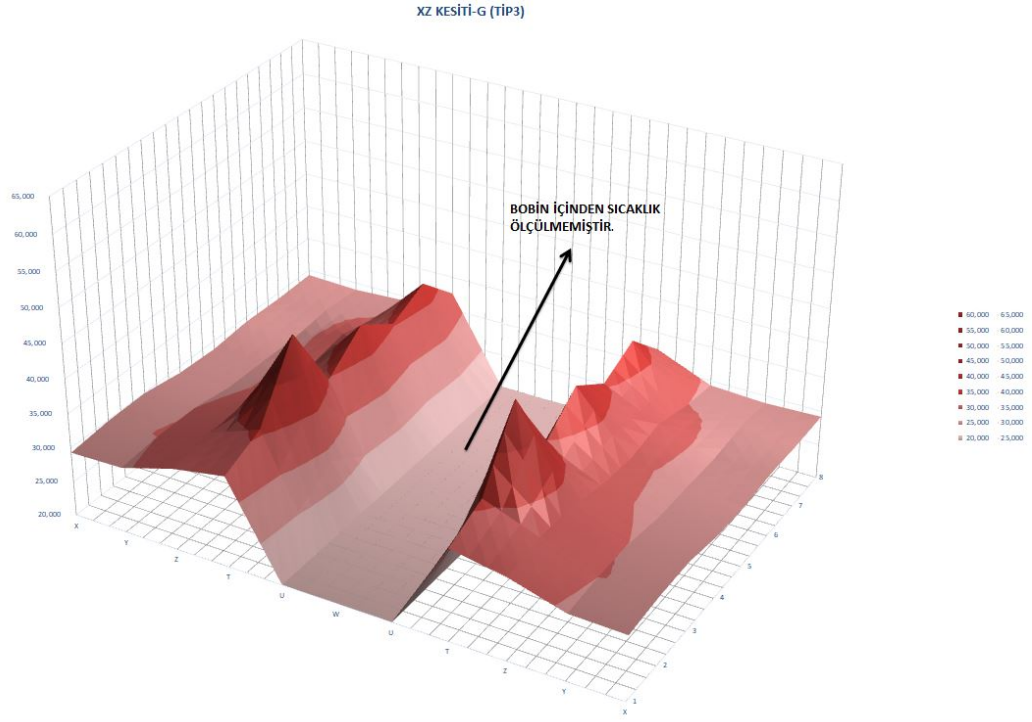


**Şekil A.3. 7:** XZ kesiti-E(Tip3) için sıcaklık dağılımı.

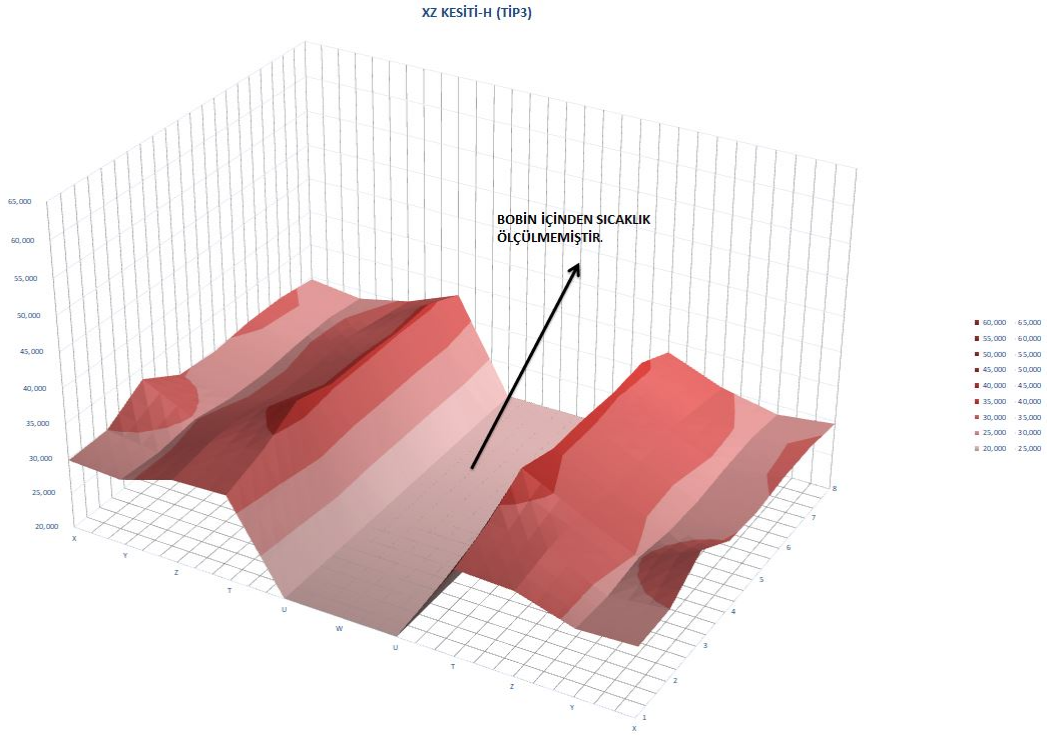


**Şekil A.3. 8:** XZ kesiti-F(Tip3) için sıcaklık dağılımı.

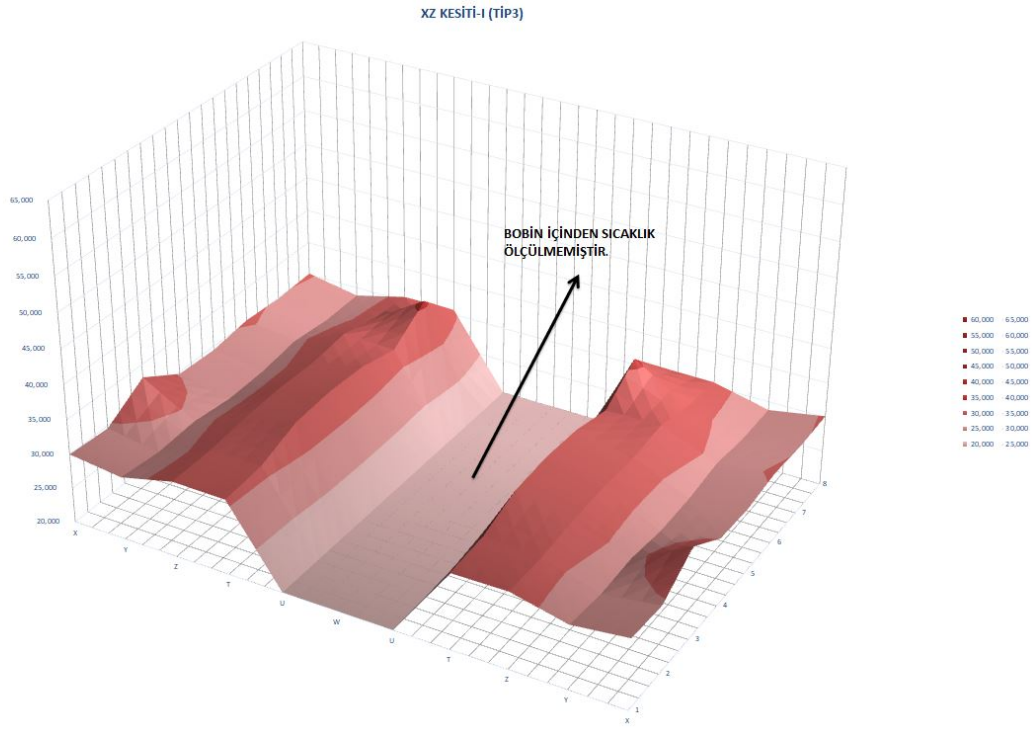




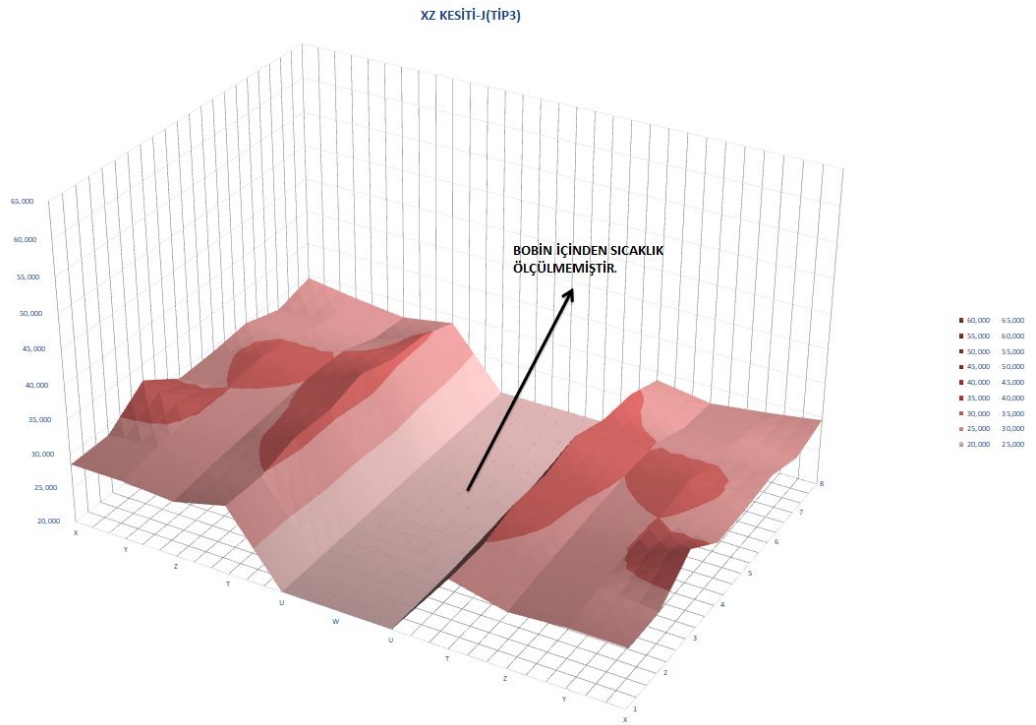
Şekil A.3. 9: XZ kesiti-G(Tip3) için sıcaklık dağılımı.



Şekil A.3. 10: XZ kesiti-H(Tip3) için sıcaklık dağılımı.



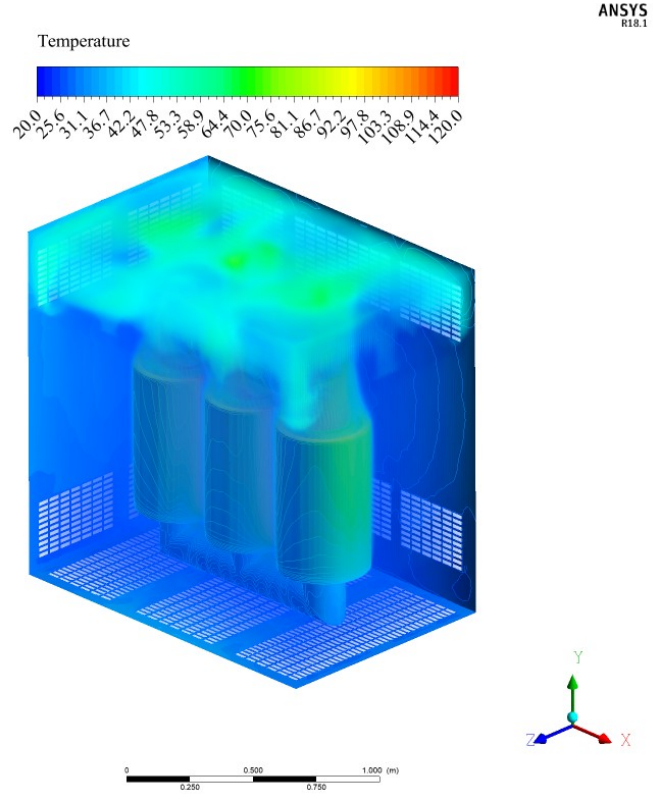
**Şekil A.3. 11:** XZ kesiti-I(Tip3) için sıcaklık dağılımı.



**Şekil A.3. 12:** XZ kesiti-J(Tip3) için sıcaklık dağılımı.

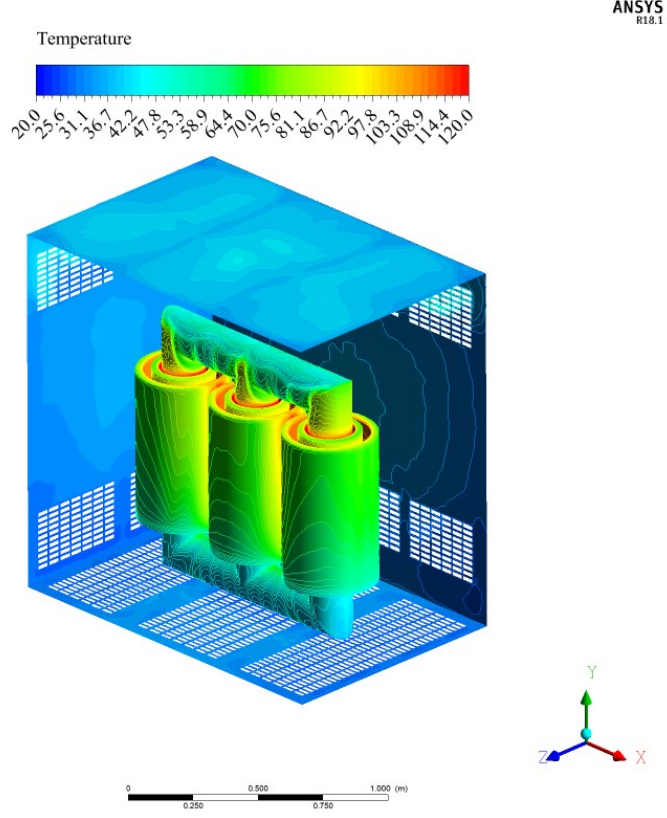
## EK B: ANSYS FLUENT CFD ANALİZİ SONUÇLARI

### EK B.1: TİP1 KABİNİ İÇİN CFD ANALİZİ SONUÇLARI

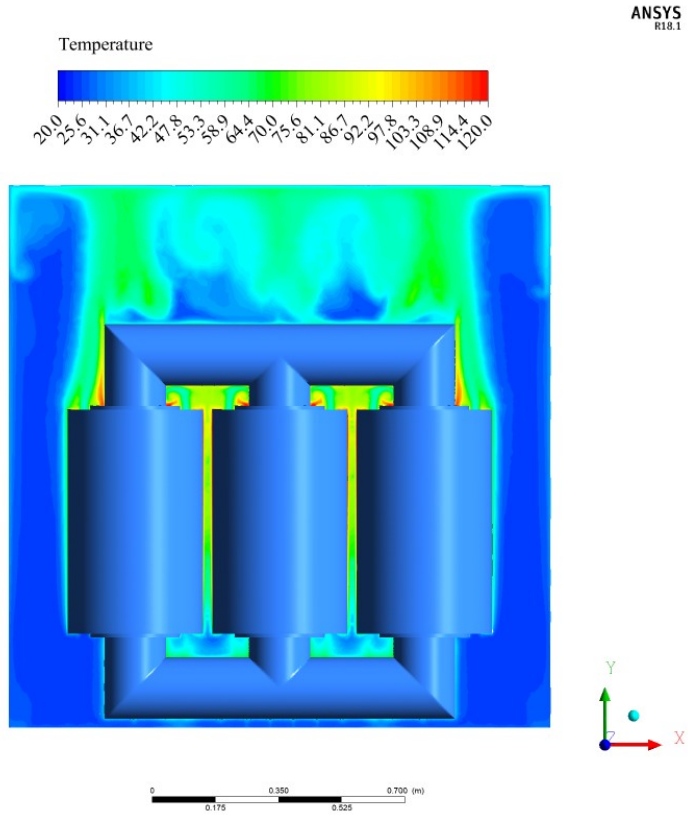


Şekil B.1. 1: Kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı (Tip1).

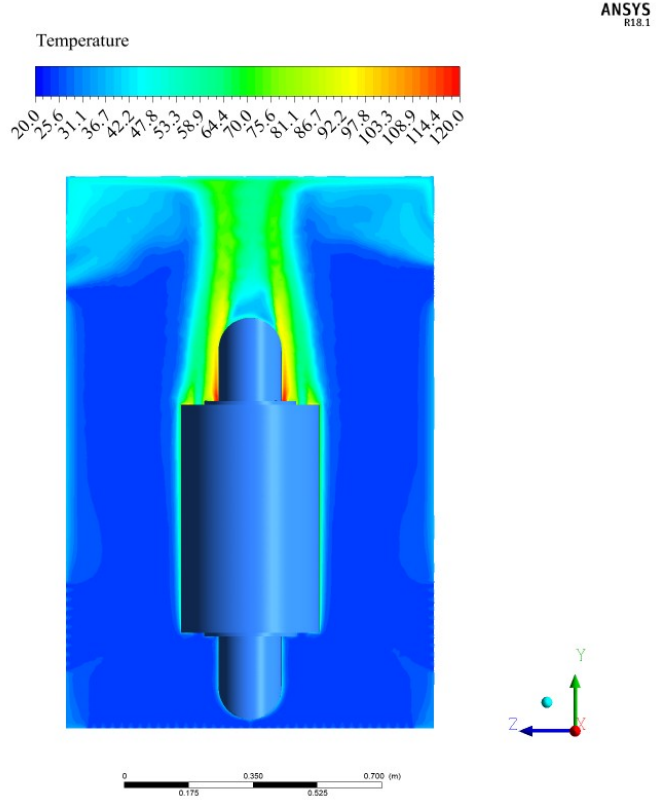




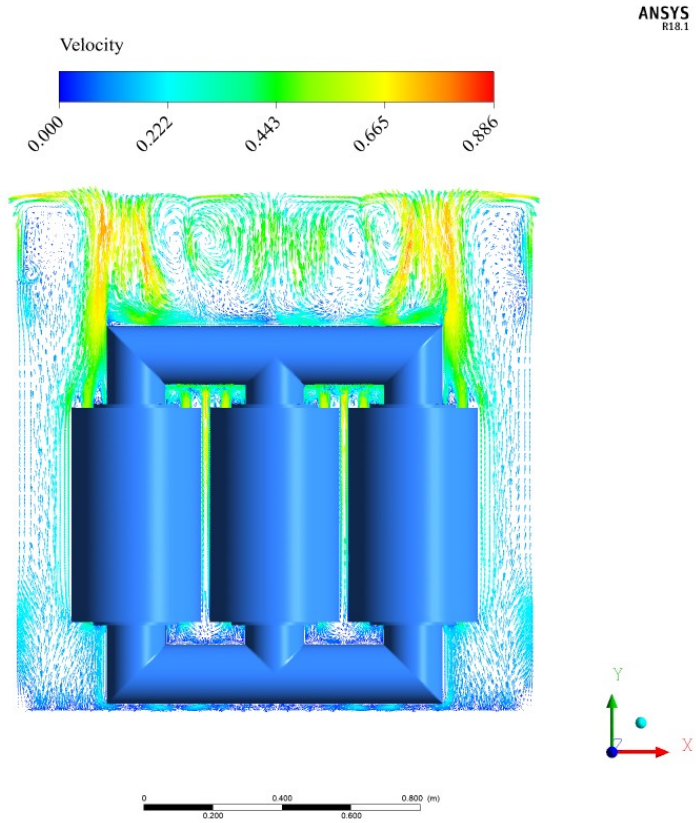
Şekil B.1. 2: Kabin sacı ve bobin yüzeyleri için sıcaklık dağılımı (Tip1).



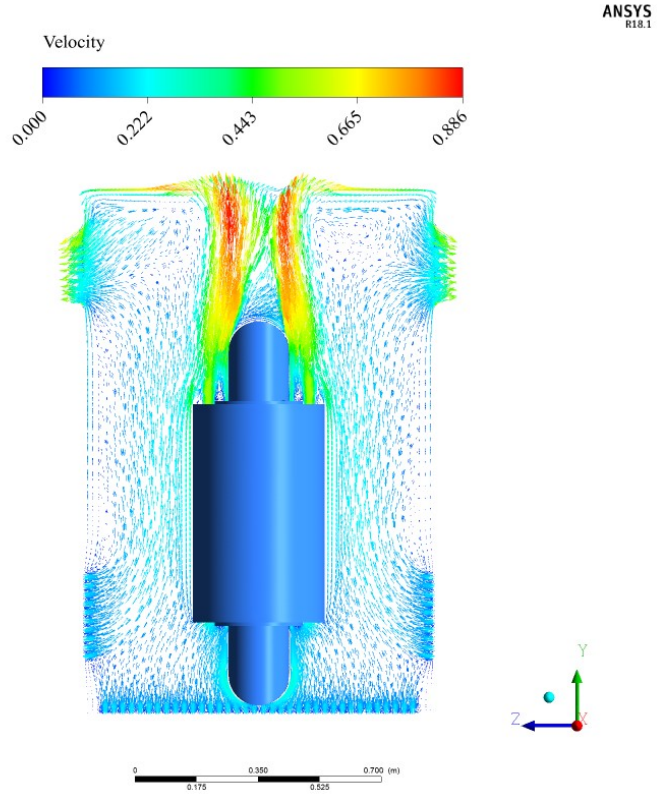
Şekil B.1. 3: XY kesiti için, kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı (Tip1).



**Şekil B.1. 4:** YZ kesiti için, kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı (Tip1).

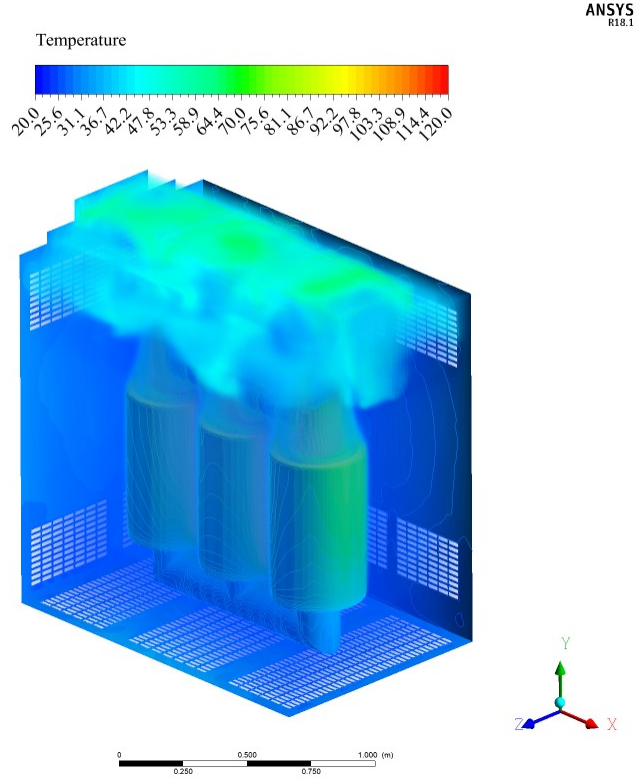


**Şekil B.1. 5:** XY kesiti için, kabin içindeki havanın hız dağılımı (Tip1).

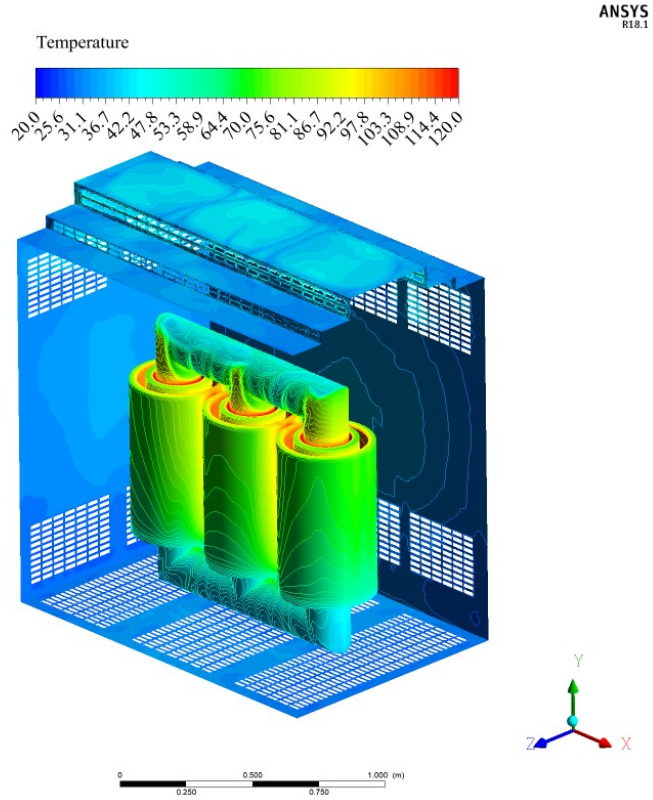


Şekil B.1. 6: YZ kesiti için, kabin içindeki havanın hız dağılımı (Tip1).

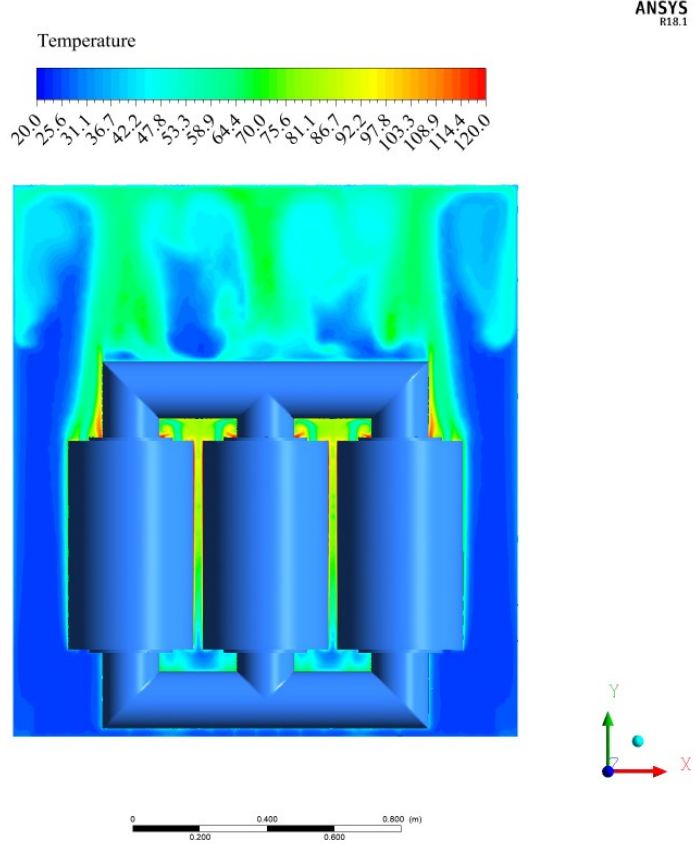
## EK B.2: TİP2 KABİNİ İÇİN CFD ANALİZİ SONUÇLARI



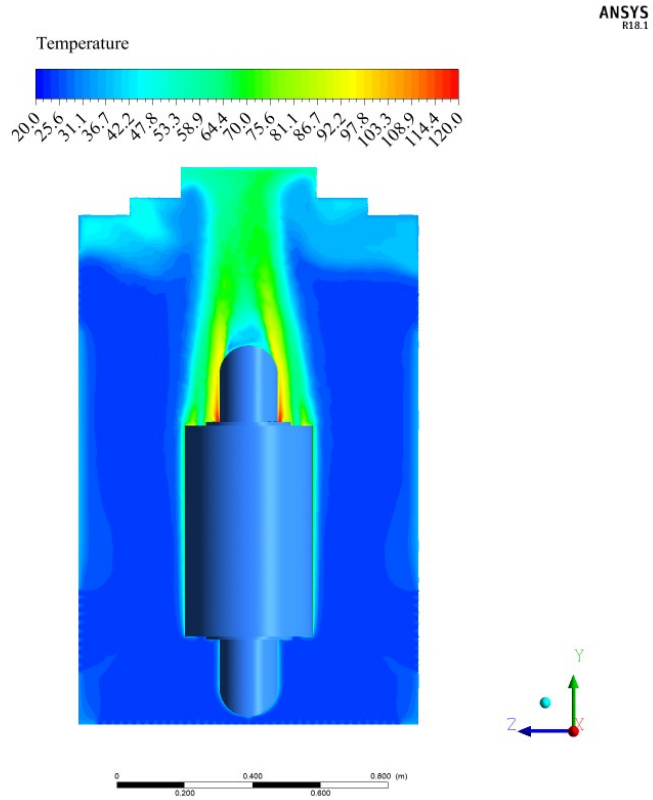
Şekil B.2. 1: Kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı (Tip2).



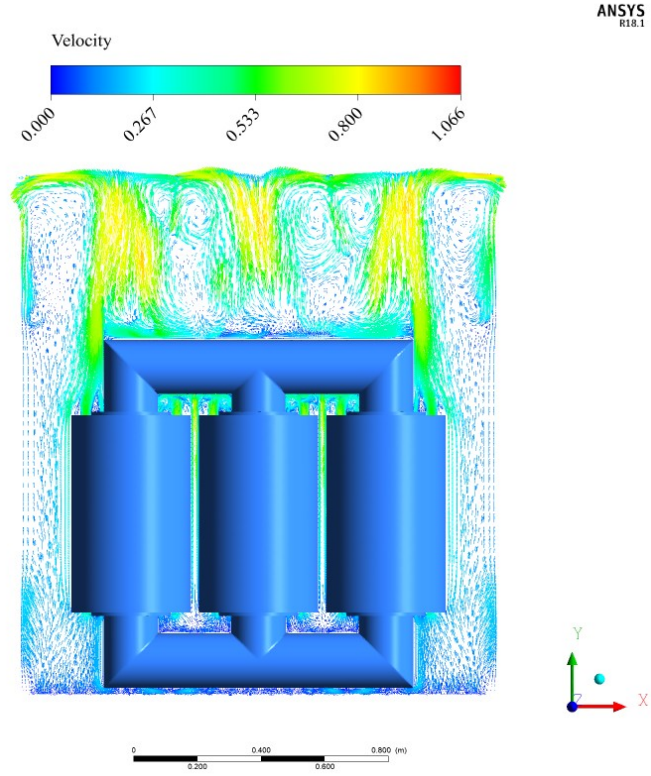
Şekil B.2. 2: Kabin sacı ve bobin yüzeyleri için sıcaklık dağılımı (Tip2).



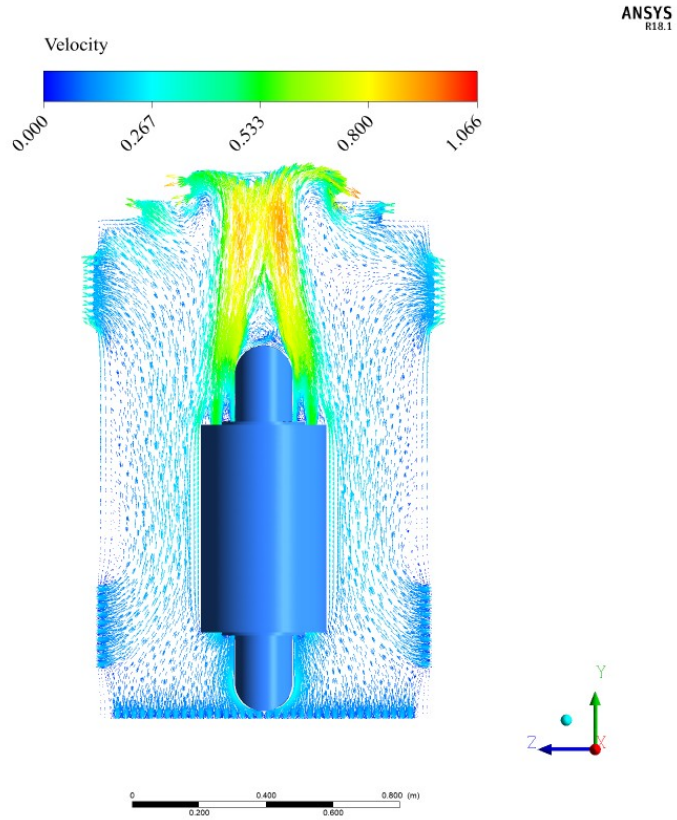
Şekil B.2. 3: XY kesiti için, kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı (Tip2).



Şekil B.2. 4: YZ kesiti için, kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı (Tip2).



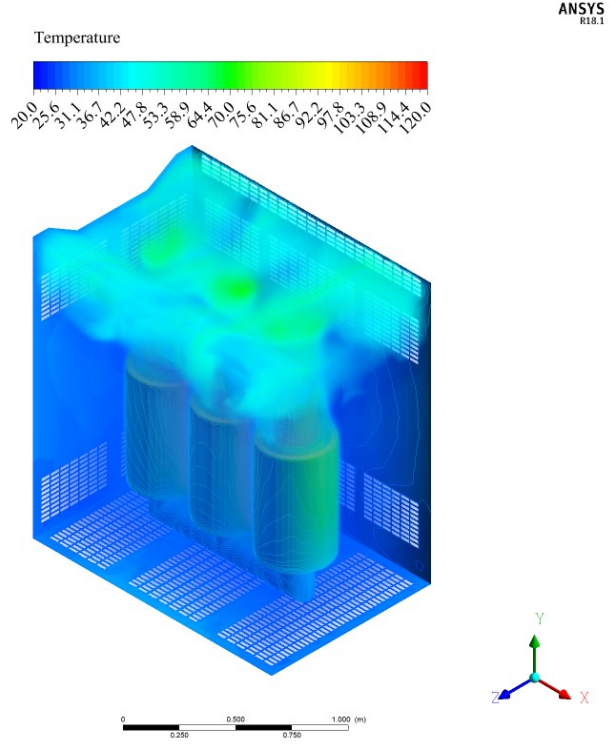
Şekil B.2. 5: XY kesiti için, kabin içindeki havanın hız dağılımı (Tip2).



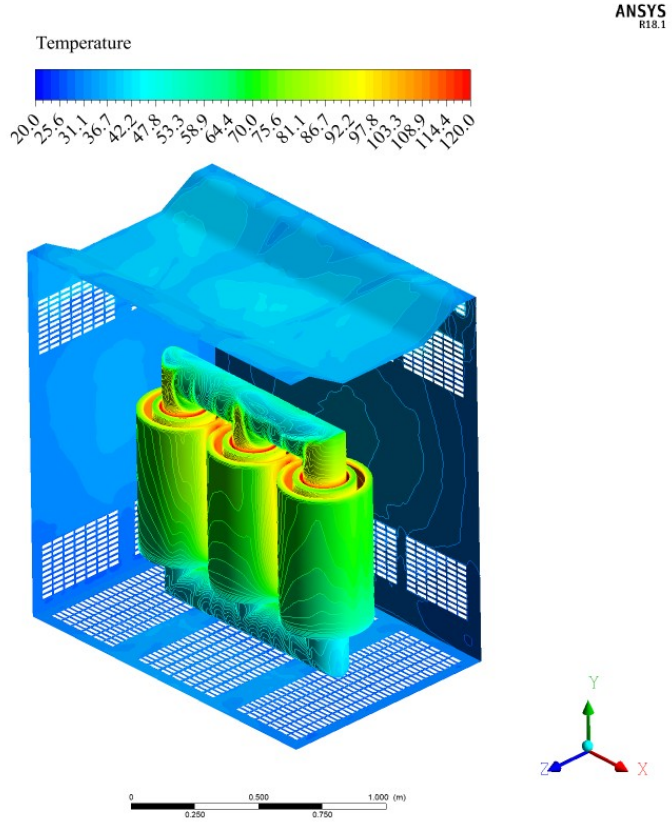
Şekil B.2. 6: YZ kesiti için, kabin içindeki havanın hız dağılımı (Tip2).



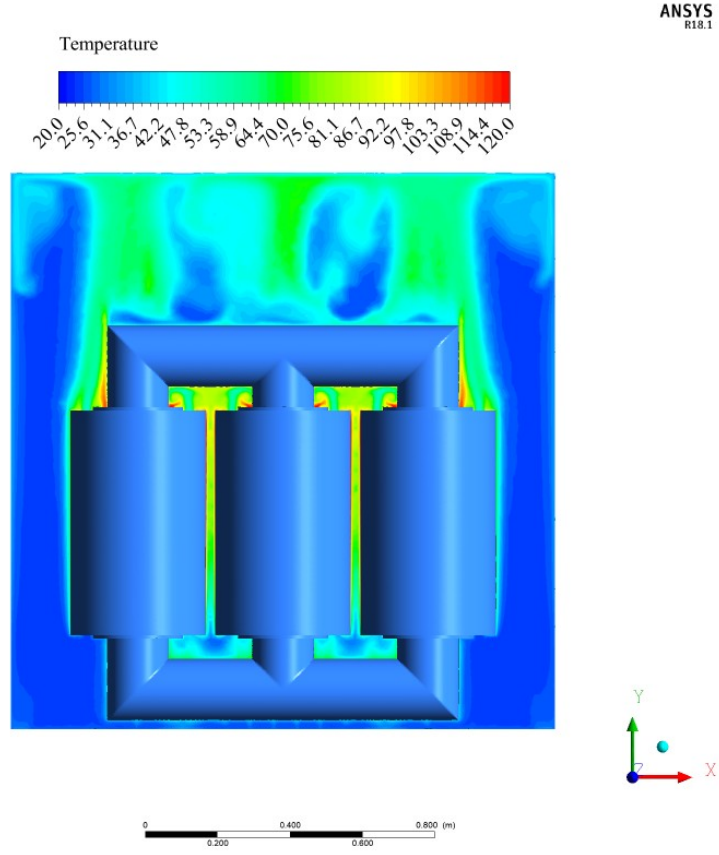
## EK B.3: TİP3 KABİNİ İÇİN CFD ANALİZİ SONUÇLARI



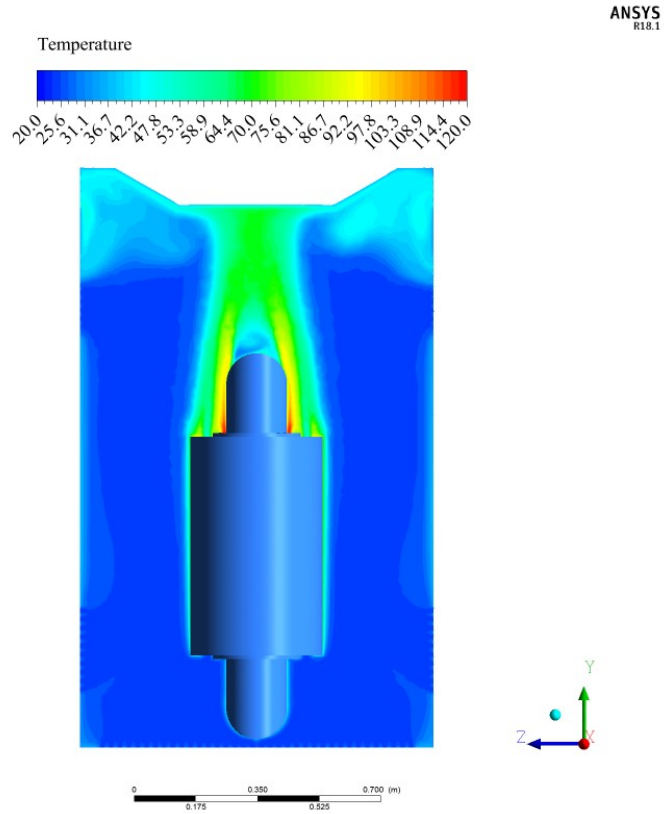
Şekil B.3. 1: Kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı (Tip3).



Şekil B.3. 2: Kabin sacı ve bobin yüzeyleri için sıcaklık dağılımı (Tip3).

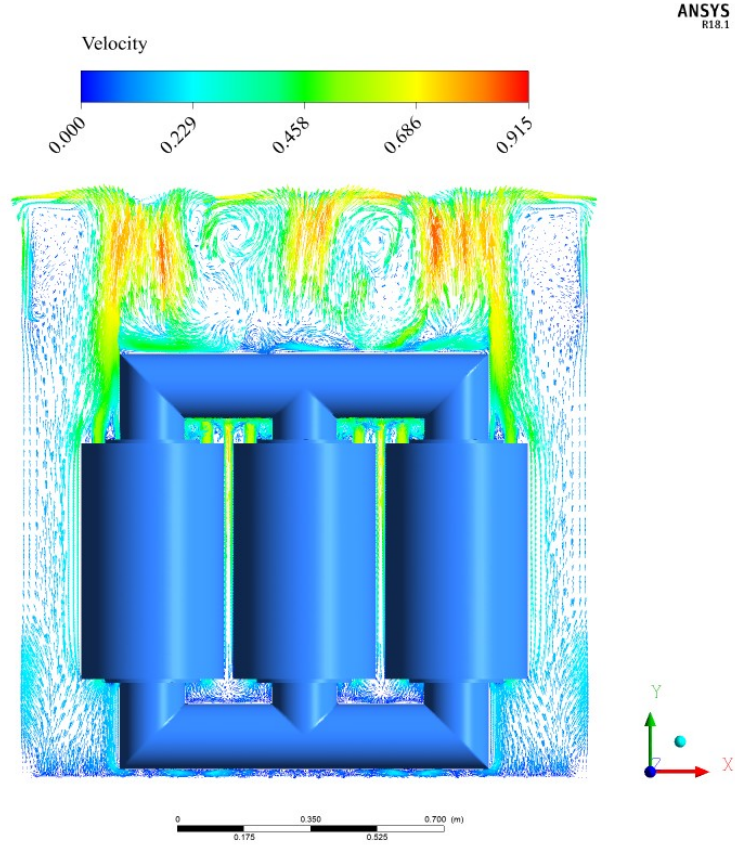


Şekil B.3. 3: XY kesiti için, kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı (Tip3).

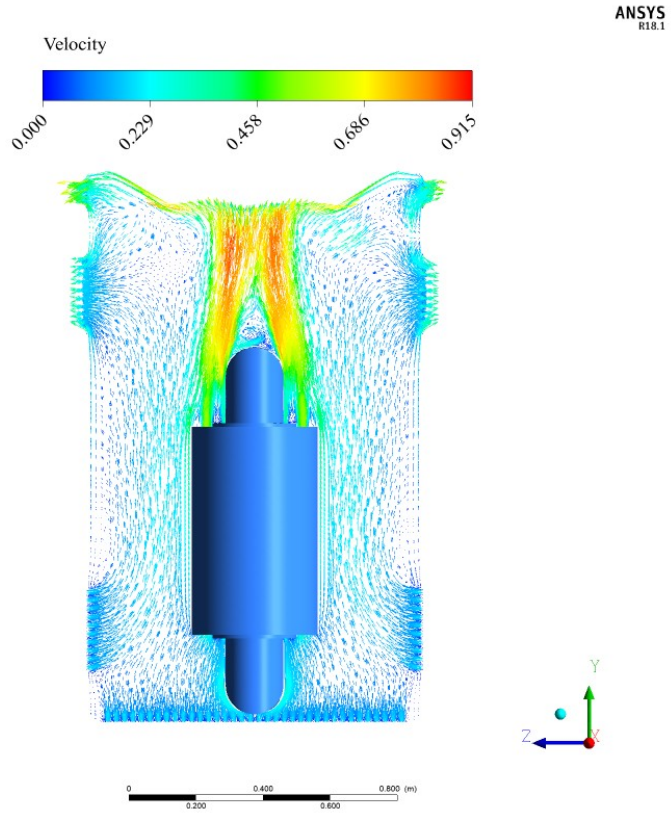


Şekil B.3. 4: YZ kesiti için, kabin içindeki havanın sıcaklık dağılımı (Tip3).





Şekil B.3. 5: XY kesiti için, kabin içindeki havanın hız dağılımı (Tip3).



Şekil B.3. 6: YZ kesiti için, kabin içindeki havanın hız dağılımı (Tip3).

## EK C: DENEY DÜZENEGİNİN TEKNİK RESİMLERİ

