

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



**KURU TİP TRANSFORMATÖRLERİN ÇELİK  
PARÇALARINDA ŞEKİL OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ILGAZ BEYİN**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

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



**KURU TİP TRANSFORMATÖRLERİN ÇELİK**  
**PARÇALARINDA ŞEKİL OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ILGAZ BEYİN**

**Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi İLKER EREN (Tez Danışmanı)**

**Dr. Öğr. Üyesi YILMAZ GÜR**

**Dr. Öğr. Üyesi ASİYE ASLAN ÇAM**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Ilgaz BEYİN tarafından hazırlanan “KURU TIP TRANSFORMATÖRLERİN ÇELİK PARÇALARINDA ŞEKİL OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 14.06.2019 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. ÜYESİ İLKER EREN

Üye  
DR. ÖĞR. ÜYESİ YILMAZ GÜR

Üye  
DR. ÖĞR. ÜYESİ ASİYE ASLAN ÇAM



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

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

## ÖZET

**KURU TİP TRANSFORMATÖRLERİN ÇELİK PARÇALARINDA ŞEKİL  
OPTİMİZASYONU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ILGAZ BEYİN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ İLKER EREN)  
BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

Kuru tip transformatörler, ticari ve endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın olarak kullanılmakta ve diğer tipteki trafolardan farklı olarak insan güvenliği açısından daha az riskli olduğu için tercih edilmektedir.

Bu çalışmada; Şekil-ağırlık Optimizasyonu yöntemi kullanılarak yapılacak analiz için ön bilgi niteliğindeki literatür taraması yapılmış olup ve transformatörün çelik parçaları yeniden tasarlanmıştır.

Uygulama için 1600 kVA'lık üç fazlı, kuru, çekirdek tipi nüveli transformatör kullanılmış olup; öncelikle 3D katı modeli çıkarılıp, transformatör üzerine etkiyen ağırlıklar ANSYS programında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Trafonun elektriksel değerleri optimize edilerek ağırlık ve maliyetin optimum seviyeye çekilmesi hedeflenmiştir. Bu yüksek lisans tezinin devamı niteliğinde olacak olan doktora tezinde performans analizi ayrıntılı şekilde yapılarak uygulanan optimizasyon yönteminin faydası ortaya konacaktır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Kuru tip transformatörler, çelik parçalar, statik analiz, şekil optimizasyonu.

## **ABSTRACT**

### **SHAPE OPTIMIZATION IN STEEL PARTS OF DRY TYPE TRANSFORMERS**

**MSC THESIS**

**ILGAZ BEYİN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ÜYESİ İLKER EREN )**

**BALIKESİR, JUNE 2019**

Dry type transformers are widely used in commercial and industrial applications and are preferred because they are less risky in terms of human safety unlike other types of transformers.

In this study; for the analysis to be made by using Shape-Weight Optimization method, literature review was made as preliminary information and the steel parts of the transformer were redesigned.

1600 kVA three phase, dry, core type core transformer is used for application and firstly 3D solid model is removed and then weights are realized in ANSYS program.

By optimizing the electrical values of the transformer, it is aimed to reduce the weight and cost to the optimum level. In the PhD thesis, which will be the continuation of this thesis, the performance analysis will be done in detail and the benefit of the optimization method applied will be revealed.

**KEYWORDS:** Dry type transformers, steel parts, static analysis, shape optimization.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>1.GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ŞEKİL-AĞIRLIK OPTİMİZASYONU HAKKINDA GENEL BİLGİ</b> .....	<b>2</b>
<b>3. TRANSFORMATÖRLER HAKKINDA GENEL BİLGİ</b> .....	<b>4</b>
3.1 Bobinin Tanımı .....	4
3.2 Bobin Çeşitleri .....	5
3.2.1 Hava Nüveli Bobinler.....	5
3.2.2 Ferrit Nüveli Bobinler .....	5
3.2.3 Demir Nüveli Bobinler.....	6
3.2.4 Sac Nüveli Bobinler .....	6
3.2.5 Nüvesi Hareketli Ayarlı Bobinler .....	6
3.2.6 Sargı Ayarlı Bobinler (Varyometre) .....	6
3.2.7 Kademeli Bobinler .....	6
3.3 Bobinlerin Kullanım Alanları .....	6
3.4 Transformatör Tanımı .....	7
3.4.1 Transformatörlerin Yapıları .....	8
3.4.2 Transformatörlerin En Önemli Özellikleri ve Görevleri.....	8
3.4.3 Transformatörlerin Çalışma Prensibi .....	8
3.4.4 Transformatörde Nüve Çeşitleri.....	9
3.4.5 Çalışma Gerilimlerine Göre Transformatörler.....	10
3.5 Transformatör Çeşitleri.....	10
3.5.1 Kuru Tip Transformatör.....	10
3.5.2 Kuru Tip Transformatör Özellikleri.....	11
3.5.3 Kullanım Avantajları Özellikleri.....	16
3.5.4 Kuru Tip Transformatör Kullanım Yerleri.....	17
3.5.5 Kuru Tip Transformatör Sarım Aşaması.....	17
3.5.6 Dağıtım Transformatörleri Üretim Aşamaları.....	23
3.5.7 Güç Transformatörleri Üretim Aşamaları.....	25
<b>4.YAPISAL ANALİZLERDE KULLANILAN BİLGİSAYAR PROGRAMLARI HAKKINDA GENEL BİLGİ</b> .....	<b>28</b>
4.1 ANSYS Programı.....	29
4.1.1. ANSYS Programında Analiz Kategorileri .....	30
4.1.2 ANSYS Sonlu Eleman Metodunun Çözümü .....	31
4.1.3 ANSYS'te Sonlu Eleman Tipleri .....	33
4.1.4 Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları .....	35
4.2 Mesh.....	36
<b>5. ANALİZ</b> .....	<b>37</b>
<b>6. SONUÇ</b> .....	<b>40</b>
<b>7.KAYNAKLAR</b> .....	<b>41</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Tasarım sürecindeki topoloji optimizasyonu.....	3
Şekil 3.1 : Transformatorde nüve çeşitleri.....	9
Şekil 3.2 : Transformator önden görünüşü.....	12
Şekil 3.3 : Transformator arkadan görünüşü .....	13
Şekil 3.4 : Transformator yandan görünüşü .....	13
Şekil 3.5 : Transformatorün çelik parçaları .....	14
Şekil 3.6 : Üst sıkıştırma demiri/poz-1 .....	15
Şekil 3.7 : Baskı plakası/poz-2 .....	15
Şekil 3.8 : Üst sıkıştırma demiri/poz-3 .....	15
Şekil 3.9 : Taşıyıcı/poz-4.....	15
Şekil 4.2 : Model mesh görüntüsü .....	36
Şekil 5.1 : Analiz sınır koşulları .....	37
Şekil 5.2 : Toplam şekil değiştirme .....	38
Şekil 5.3 : Von-Misses gerilimi .....	39
Şekil 5.4 : Emniyet katsayısı .....	39

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1 :</b> Transformatörün çelik parçalarının detaylı listesi .....	14
<b>Tablo 3.2 :</b> Yağlı tip transformatör ile kuru tip transformatör kıyası .....	16





## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi, sabır ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Dr. İlker EREN'e teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme ve Funda ASLANTAŞ 'a hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için teşekkür ederim.

BALIKESİR, 2019

İlgaz BEYİN

# 1.GİRİŞ

Transformatör sözcüğü Türkçe'ye Fransızca'dan geçmiş olup 'dönüştürücü' anlamına gelmektedir. Transformatörün temel çalışma ilkesini 1831'de Micheal Faraday keşfetmiştir. Faraday yaptığı deneyler sonucunda icat ettiği basit transformatörün alternatif akım üzerinde yarattığı etkiyi gözlemlemiştir. Günlük hayatta kullanılan alternatif akım ile çalışan aletlerin insan hayatına ne kadar kolaylaştırdığı düşünülürse Faraday'ın icadının önemi bir kez daha anlaşılır.

Transformatörler herhangi bir alternatif akımı (AC) ve gerilim seviyesini frekansını değiştirmeden istenilen oranda düşürmeye veya yükseltmeye yarayan elektrik makineleridir. Kuru tip transformatörler; sargıları cam elyaf destekli epoksi reçine ile örtülmüş ve dış etkilere karşı yalıtılmış, manyetik devresi ve sargıları yalıtkan bir sıvıda korunmayan, cebri soğutmalı olarak tasarlanan, meydana gelen ısıyı hava sirkülasyonu ile dışarı atan transformatör çeşitleridir. Bu bahsedilen tipteki kuru transformatörler; gerilim bobinleri, çekirdek (nüve), yardımcı ekipmanlar (bara,sensörler) ve bu yapıları bir arada tutmaya yarayan çelik iskeletten meydana gelmektedir.

Günümüzde; varolan kaynakların verimli kullanılması, düşük maliyet yüksek verim mantığıyla yola çıkıldığı zaman akla gelenlerden bir unsur da topolojik optimizasyondur. Bir optimizasyon hedefi mantığına dayanmaktadır. Şekil, hacim, ağırlık miktarlarında yapılacak iyileştirmeleri kapsamaktadır.

Tez çalışmasının konusu doğrultusunda; 1600 kVA 31,5/0,4 Dyn11 elektriksel özelliklerine sahip bir kuru transformatörün 3D modellemesi AutoCAD Inventor programında yapılmıştır. Oluşturulan modeldeki transformatör ana iskeleti olan, transformatörün rijit bir yapıda durmasını sağlayan ve ağırlığını taşıyan çelik parçaları üzerinde analiz yapılmıştır. ANSYS programı kullanılarak yapılan bu statik analizde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu, ortaya çıkan gerilmeleri ve yer değiştirmeleri saptamak için uygun bir tekniktir. Çözümlenmeler sonucu elde edilen değerlerin yorumlanması yapılarak çelik parçaların Topoloji Optimizasyonuna uygunluğuna atıf yapılmıştır.

## 2. ŞEKİL-AĞIRLIK OPTİMİZASYONU HAKKINDA GENEL BİLGİ

Tasarlanması planlanan bir parçanın sınırlı bir alana sığdırılması, ağırlığının optimum hale getirilmesi ve işletme ömrünün uzun olması istendiğinde ortaya çıkacak yeni tasarım hakkında yalnızca kabaca bir fikir akla gelmektedir. Parçalar çoğu zaman varolan bir dizayn veya konsept baz alınarak tasarlanmaktadır. Bu gibi durumlarda, boyutlar veya diğer tasarım unsurları parametreler vasıtasıyla tanımlanmaktadır. Halihazırda üzerinde çalışılabilecek bir tasarım olmadığı durumlarda ise birkaç kavramsal tasarım oluşturulabilmektedir[1].

Bu tasarımlar parametrik olarak tanımlanıp, ardından standart optimizasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Optimizasyon yazılımına alternative olarak, tüm tasarım özellikleri, şekil ve boyut belirlemesi konusunda sınırlamadan yapılan çalışmalara topoloji (şekil-ağırlık) optimizasyonu denmektedir[2].

Bir optimizasyon hedefi ve bir kısıtlama seti ile verilen problemde, malzemenin parça içinde optimum dağılımı, topoloji optimizasyon kullanılarak yapılabilir. Belirlenen analiz için; analizi yapacak olan tarafından yazılıma farklı sınır koşulları tanımlanabilir[3]. Optimizasyon yazılımı verilen sınır koşullarına uygun olarak; kütle, hacim veya yer değiştirme gibi parametreleri optimum hale getirmek için analizi yapılan malzeme içinde boşluklar oluşturur.

Örneğin bir test platformunun doğal frekansları, belirlenmiş sakıncalı sınır koşullarından uzakta tutularak kütlesi en aza indirgenmek üzere optimize edilebilir. Bu türdeki optimizasyon çalışmaları yeni ve karmaşık şekilleri ortaya çıkarabilir. Geçtiğimiz dönemlerde bu tür karmaşık şekillerin hayata geçirilmesi sınırlı geleneksel imalat yöntemleri yüzünden pratik değildi. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte seri üretim imkanları çok daha kapsamlı hale gelmiştir[4].

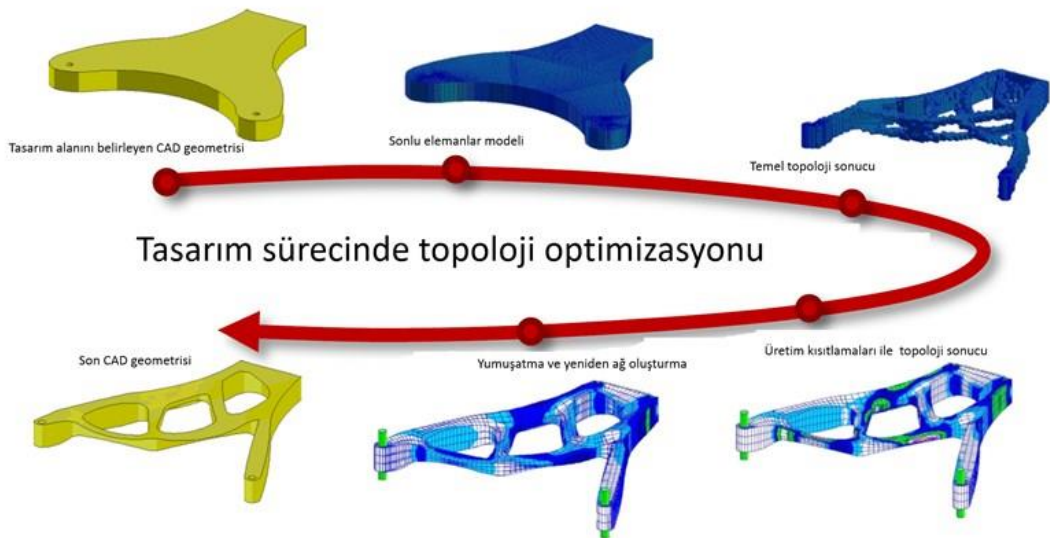
ANSYS Topoloji Optimizasyonu (ANSYS Topology Optimization) gibi bazı yazılımlar bir düzleme ilişkin simetri, ekstrüzyon yönü ve izin verilen max/min eleman boyutu gibi imalat kısıtlamalarını da tanımlamaya izin vermektedir. Bu özellikler sayesinde imalata geçilmeden önce 3D olarak ürünün ön izlemesi yapılabilmektedir. Dolayısıyla imalatı çok zor ve maliyetli parçalara erken müdahale şansı tanınmasına kapı açılmaktadır[5]. Yazılım farklı dosya uzantılarını da desteklediği için; yazılım harici bir platformda tasarımlar görüntülenip, tersine mühendislik yapılabilmektedir. Yeni şekiller ve konsept tasarımlar geliştirmek için en genel ve en güçlü araç olarak Topoloji optimizasyonu geçerliliğini sürdürmektedir.

Avantajları ;

Bu tür optimizasyon programlarının kullanıcıya sağladığı avantajlar; hafif ve imalata hazır ürün tasarımları hazırlanmasına imkan sağlaması ve piyasaya sürme süresini, fiziksel testleri ve prototip imalat süresini azaltması olarak açıklanabilir.

Oluşturulan optimize edilmiş tasarımların aşağıda belirtilmiş olan Finite Element Analysis(FEA) simülasyonlarına dayandırılmış olması gerekmektedir[6].

- Kullanılabilir tasarım alanı
- Gerçekçi yük senaryoları ve sınır koşulları
- Tasarım ve imalat kısıtlamaları



Şekil 2.1 : Tasarım sürecindeki topoloji optimizasyonu.

### 3. TRANSFORMATÖRLER HAKKINDA GENEL BİLGİ

#### 3.1 Bobinin Tanımı

Bobin bir iletken telin üst üste ya da yanyana sarılması ile üretilen devre elemanıdır. Bobinin birimi henry (H), simgesi ise L dir.

Bobine AC akım uygulandığında, akımın yönü sürekli değiştiğinden dolayı bobin etrafında bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan akıma karşı ek bir direnç gösterdiğinden, AC devrelerde bobinin akıma gösterdiği direnç artar. DC devrelerde ise bobinin akıma karşı gösterdiği direnç, sadece bobinin üretildiği metalden kaynaklanan omik dirençtir.

Bobinlerin üzerine sarıldığı kısma makara, mandren ya da karkas, iletken mandren üzerinde bir tur yapışına ise sipir, tur ya da sarım denir. Bobin sarımlarında genellikle üzeri vernikli (izoleli) bakır tel kullanılır.

İndüktans, bobinin kendi kendini etkileme derecesidir. İndüktans birimi henry 'dir. Bir henry, bobin üzerinden geçen 1 A değerindeki AC akımın 1 saniyedeki değişimi, 1 voltluk zıt elektromotor kuvveti (EMK) oluşturuyorsa bu bobinin indüktansına karşılık gelen miktardır. Henry, indüktans değeri bakımında çok yüksek bir değere karşılık geldiği için uygulamalarda çoğunlukla henry 'nin ast katları kullanılır.

$$1 \text{ H} = 1000 \text{ milihenry} = 1000000 \text{ mikrohenry}$$

Bobinler ile kondansatörler arasındaki benzerlik her iki devre elemanının da elektrik enerjisini harcamayan reaktif devre elemanları olmalarıdır. Kondansatörlerin elektrik yüklerini depolayabildikleri gibi, bobinler de elektrik enerjisini kısa süreliğine manyetik alan olarak depo ederler. Bu iki devre elemanı arasındaki önemli fark ise; kondansatörler devreye bağlıyken gerilimi geri bırakırken (faz farkı), bobinlerin gerilimi ileri kaydırmasıdır. Bobin ve kondansatörlerin gerilim ve akım arasında yarattığı faz farkı uygulamalarda farklı şekillerde fayda ve zararlara neden olur.

## **3.2 Bobin Çeşitleri**

### **3.2.1 Hava Nüveli Bobinler**

Daha çok yüksek frekanslı (FM radyo alıcıları, telsiz, TV ve anten yükselteci devreleri vb.) sistemlerde kullanılan bobin çeşididir. Devreye bağlı olan bu tip bir bobinin pozisyonunun el sürerek dahî değiştirilmesi sakıncalıdır. Çünkü, bobinin indüktans değeri değişerek devrenin çalışmasını olumsuz etkiler. Bu nedenle bazı cihazlarda kullanılan hava nüveli bobinlerin üst kısmı, mekanik zorlanmalardan etkilenmemesi için silikon benzeri yapıştırıcı maddelerle kaplanır.

### **3.2.2 Ferrit Nüveli Bobinler**

Ferrit nüveli bobinler radyo frekans ve yüksek frekanslı devrelerde kullanılır. Nüve, demir, nikel, kobalt, alüminyum, bakır ve bazı katkı maddelerinin bir araya getirilmesiyle üretilmiştir. Ferrit nüveli radyo frekans bobinleri çoğunlukla petek şeklinde sarılır. Petek sargı bobin sipleleri arasındaki kaçak kapasiteyi azaltır. Ferrit nüve yüksek değerli bobinin üretilmesini sağlar. Bu nüvelerin bir başka yararı ise, az bir iletkenle istenilen değerde bobin yapılabilmesini sağlamasıdır. Ferrit nüveler indüktansı artırıcı etki yaparken, manyetik kuvvet çizgilerine karşı yüksek direnç gösteren pirinç ve alüminyumdan yapılmış nüveler indüktansı düşürürler. İletken olan bu tip nüvelerin üzerinden manyetik alandan dolayı yüksek değerli kısa devre akımları (iç akımlar) dolaşır. Özellikle MHz (megahertz) düzeyindeki frekanslara sahip devrelerde bobin nüveleri kısa devre akımlarının az dolaşmasını sağlayacak malzemelerden yapılır.

### **3.2.3 Demir Nüveli Bobinler**

Demir nüveli bobinlere şok bobini de denir. Uygulamada daha çok filtreleme ve ses frekans devrelerinde kullanılır.

### **3.2.4 Sac Nüveli Bobinler**

Transformatör, balast, AC ile çalışan motor, kontaktör vb. gibi yerlerde fuko akımlarının etkisini azaltmak için birer yüzleri yalıtılmış saclardan yapılmış nüveli bobinlerdir.

### **3.2.5 Nüvesi Hareketli Ayarlı Bobinler**

Bobinlerin içindeki nüve hareketlidir. Nüvenin hareket ettirilmesiyle birlikte bobinin manyetik alanı değişerek indüktans değişmektedir.

### **3.2.6 Sargı Ayarlı Bobinler (Varyometre)**

Bobinin üzerine sürtünen tırnak şeklindeki bir uç aracılığıyla bobinin değeri ayarlanabilir.

### **3.2.7 Kademeli Bobinler**

Bobinden alınan uçlar çok konumlu bir anahtara (komütatör) bağlanarak farklı indüktanslar elde edilebilir.

## **3.3 Bobinlerin Kullanım Alanları**

- Doğrultucularda şok bobini
- Transformatörler
- Isıtıcılar
- Elektromıknatıs
- Osilatör
- Telekomünikasyon
- Yüksek frekans devreleri

- Radyolarda ferrit devre elemanı
- Şönt motorlar
- Seri motorlar
- Fırçasız DC motorlar
- Üniversal motorlar
- Relüktans motorlar
- Bir fazlı asenkron motorlar
- Üç fazlı asenkron motorlar
- Bilezikli asenkron motorlar

### **3.4 Transformator Tanımı**

Elektromanyetik endüksiyon yolu ile akımı veya gerilimi frekansı değiştirmeden yükselten veya düşüren hareketli parçası olmayan elektrik makinelerine transformator denir.

Transformatorler, ince silisli saçlardan oluşan kapalı bir manyetik gövde ile bunun üzerine, yalıtılmış iletkenlerden sarılan sargılardan oluşur. En basit şekli ile transformatorlerde iki sargı bulunur. Bunlardan birine birincil (primer), diğerine ise ikincil (sekonder) sargı denir. Transformator sargılarına gerilim değerlerine göre alçak gerilim sargısı veya yüksek gerilim sargısı gibi isimler de verilmektedir. Primer ve sekonder sargılarının birbiriyle elektriksel bağlantısı yoktur.

Elektrik enerjisi depolanamadığından üretildikten hemen sonra kullanıcıya taşınması gerekmektedir. Bu taşınmanın verimli bir şekilde yapılabilmesi için gerilimin yeteri kadar büyük olması gerekir. Santrallerde generatörler yardımı ile üretilen elektrik enerjisinin gerilimi çok yüksek değildir. Generatör çıkış gerilimleri 0,4-3,3-6,3-10,6-13,0-14,7-15,8 ve 35 kV değerlerindedir. Bu gerilimler enerjinin çok uzak bölgelere taşınabilmesini sağlayacak kadar yüksek olmadığından gerilimi yükseltmek için transformatorler kullanılır.



### **3.4.1 Transformatörlerin Yapıları**

Alçaltıcı transformatörler: Sekonder gerilimi primer geriliminden küçüktür ve gerilimi alçaltır. Primeri ince kesit çok siper, sekonderi kalın kesit az siper olur.

Yükseltici transformatörler: Sekonder gerimi primer geriliminden büyüktür ve gerilimi yükseltir. Primeri kalın kesit az siper, sekonderi ince kesit çok siper olur.

Tüm bunlara göre transformatör; sargılarından geçen elektrik akımını elektromanyetik indüksiyon etkisi ile öteki sargısından aynı frekanslı fakat farklı şiddet ve gerilimde başka bir akım sistemine dönüştüren statik bir elektrik makinesi olarak adlandırılır.

### **3.4.2 Transformatörlerin En Önemli Özellikleri ve Görevleri**

1. Elektrik güç sistemlerinde akım ve gerilim seviyelerini değiştirmek.
2. Elektronik ve kontrol devrelerinde maksimum güç transferi için kaynak ve yük empedansı uyumunu sağlamak
3. Elektriksel izolasyonu sağlamak, bir devreyi diğerinden izole etmek. Örneğin, doğrultma devrelerinde alternatif akım tarafında sürekliliği sağlarken doğru akım tarafını izole eder.

### **3.4.3 Transformatörlerin Çalışma Prensibi**

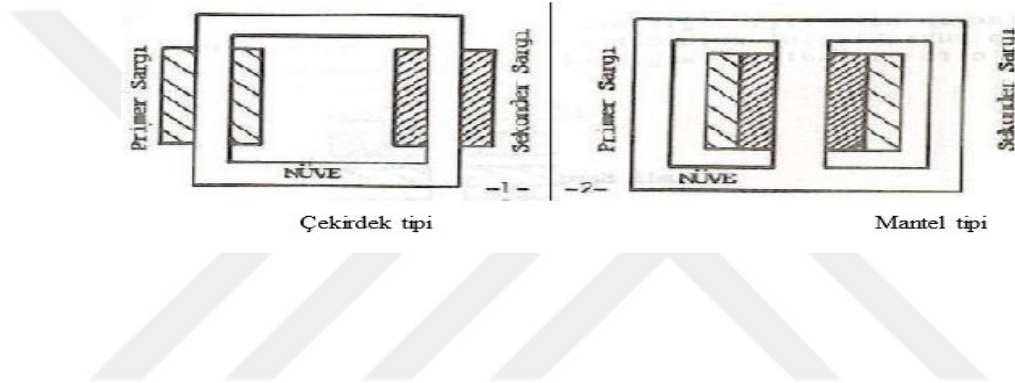
Transformatörün primer sargısına alternatif bir gerilim uygulandığında bu sargıda zamana göre yönü ve şiddeti değişen bir manyetik alan oluşur. Bu alan üstünde sekonder sargının da bulunduğu manyetik demir nüve üzerinden devresini tamamlar. Zamana göre yönü ve şiddeti değişen bu alanın sekonder sargılarını kesmesi ile bu sargıda alternatif gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilimin değeri; Sekonder sarım sayısına, manyetik akının maksimum değerine ve frekansına bağlı olarak değişir.

Transformatörün primer sargılarına doğru gerilim uygulandığında demir nüve üzerinde sabit bir manyetik alan oluşur. Bu alan değişken olmadığından sekonder sargılarda gerilim indüklenemez. Çünkü indüksiyon prensibine göre; değeri değişen manyetik alanlar tarafından etkilenen sargılarda indüksiyon gerilimi oluşabilir. Bu nedenle transformatörler özel durumlar dışında doğru akımda kullanılmazlar.

### 3.4.4 Transformatörde Nüve Çeşitleri

- Çekirdek tipi nüve

- Mantel Tipi nüve



Şekil 3.1 : Transformatörde nüve çeşitleri.

Transformatör sargıları manyetik nüveyi saracak şekilde yapılırsa “Çekirdek tipi”, manyetik devre sargıları kavrayacak şekilde ise “Mantel tipi” transformatör denir. Transformatör tiplerinin seçiminde yapım kolaylığı, soğutma yalıtkanlarının elektriksel zorlanmalara dayanımı, daha az gereç kullanımı dikkate alınır.

1. Manyetik nüvenin kesiti her yerde aynıdır. Belirli güç ve gerilimler için mantel tipi transformatörlerde daha az demir, daha fazla bakır kullanılır. Yalıtma işi için daha fazla yer olduğundan büyük güçlerde ve yüksek gerilimde kullanılır. Sargıların kontrolü kolaydır.

2. Bu nüve düşük güçlü alçak gerilimli transformatörlerde kullanılır. Bu tip nüvede sargılar orta bacak üzerine yerleştirilir. Bu ayağın kesiti hesaplama sonucu bulunan kesittir. Yandaki ayakların kesitleri birbirlerine eşit ve orta bacağın yarısı kadardır. Mantel tipi transformatörlerde ortalama manyetik alan yolunun kısa olması demir(fuko) kayıplarının az olmasına sebep olur.

Transformatörlerin güçleri büyüdükçe, yapım şekillerinde bazı değişimler görülür. Nüve kesitinde yapılan değişimler sonucu soğutma ve yapım şekillerinde bazı kolaylıklar sağlanmıştır. Küçük güçlü transformatörlerin nüveleri kare, dikdörtgen; orta büyüklükteki transformatörlerin nüveleri ise artı(+) şeklindedir. Artı şeklindeki kesitlerde sargılar ile ayaklar arasında soğutma için hava kanalları bırakılır. Dikdörtgen kesitlere göre daha çok saç yerleştirilir. Transformatörün hacmi küçültülmüş olur. Transformatörün nüvesinin kesiti hesaplandıktan sonra bu kesiti verecek şekilde saçlar dizilip, istenilen nüve oluşturulur. Saçların birer yüzeyleri yalıtılmıştır. Buna göre üstteki saçın yalıtılmış yüzü ile alttaki saçın yalıtılmamış yüzü üst üste gelecek şekilde yerleştirilir. 10 kVA'dan küçük transformatörlerde, nüveyi oluşturan saçlar sicim veya tiretlerle sarılarak sıkıştırılabilir. Boyunduruk veya ayakların uç kısımlarında açılan deliklerden perçin, cıvata gibi sıkıştırma parçaları, saçların manyetik gürültüsünü azaltır.

### **3.4.5 Çalışma Gerilimlerine Göre Transformatörler**

- Alçak gerilim: 0-1 kV
- Orta gerilim: 1-3-5-10-20-25-30 Kv
- Yüksek gerilim: 45-60-110 kV

## **3.5 Transformatör Çeşitleri**

### **3.5.1 Kuru Tip Transformatör**

Transformatör ya da trafo, alternatif akımlı sistemlerde gerilimin seviyesini frekans değiştirilmeden manyetik indüksiyon yoluyla dönüştürmek için kullanılan ve hareketli parçası bulunmayan bir elektrik makinesidir.

Transformatörler genellikle enerji iletiminde ve dağıtımında kullanılır. Elektrik enerjisinin santrallerden, kullanım alanlarına iletimi sırasında ; elektrik dağıtım merkezlerinde gerilimin düşürülmesi gereklidir. Elektrik enerjisini sabit güç ve sabit frekansta, gerilim seviyesini yükseltip/alçaltarak iletmede güç transformatörü denilen özel tip elektrik makineleri kullanılmaktadır.

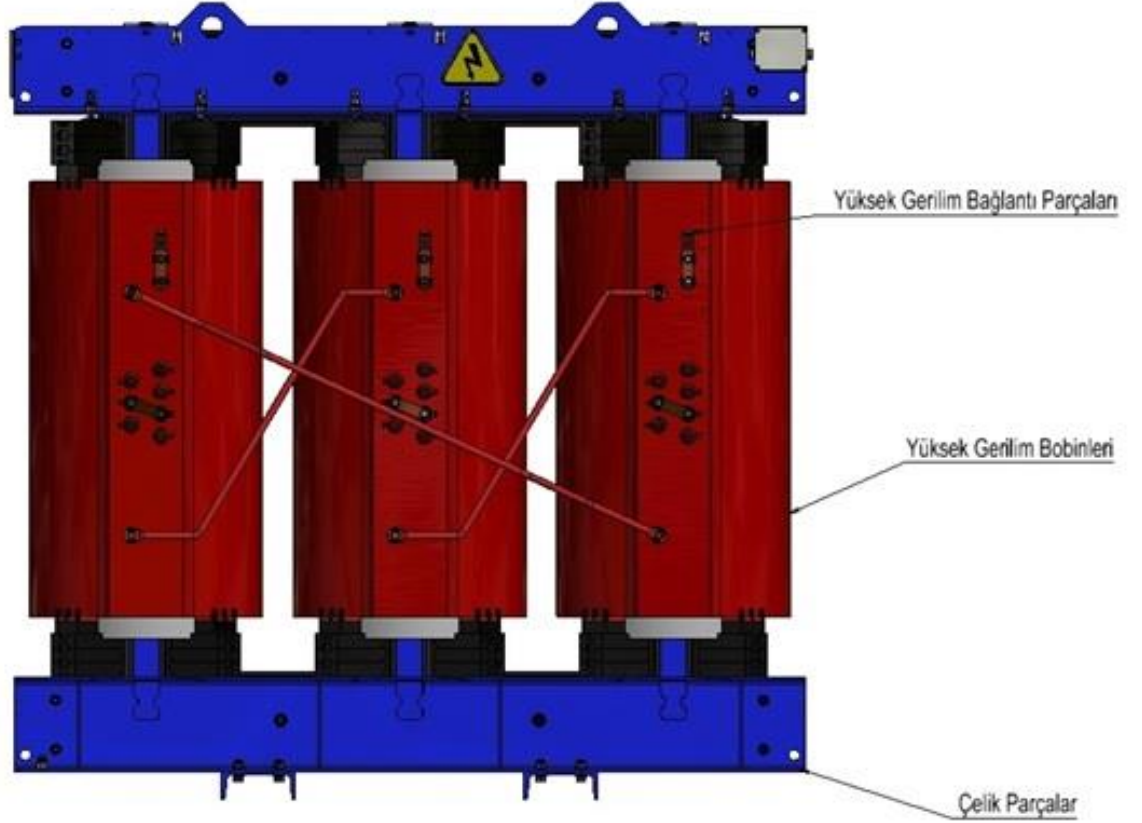
Genel olarak transformatörler bir elektrik devresinde voltaj veya akımı indirmek veya yükseltmek için kullanılır. Elektronikte ise esas olarak farklı devrelerdeki yükselticileri birleştirmek, doğru akım dalgalarını daha yüksek bir

değerdeki alternatif akıma çevirmek ve sadece belirli frekansları iletmek için kullanılır. İzolasyon amacıyla ve bazen de sığaçlar ve dirençlerle beraber kullanılır. Elektrik akım iletiminde, esas olarak voltajı yükseltmek veya düşürmek için kullanılır[7].

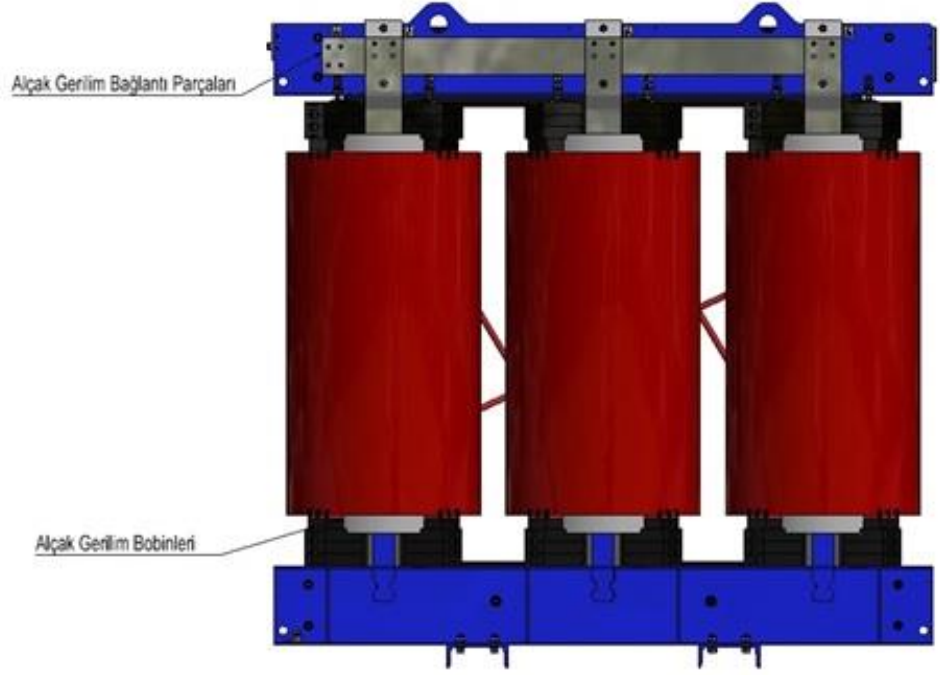
### 3.5.2 Kuru Tip Transformatör Özellikleri

- Yük merkezlerine yakın mesafede kurulabilmesi ve buna bağlı olarak kablo yatırım masraflarının düşük olması
  - Gürültü seviyesinin düşük olması
  - Yangına ve patlamaya karşı güvenli olmasıKoruma sinyal donanımı olarak sadece sargıları, yüksek çevre sıcaklığı ve aşırı yüklenmelerin sebep olduğu izin verilmeyen aşırı ısınmalara karşı koruyan sıcaklık kontrol sistemi vardır.
    - Aynı güçteki yağlı transformatörlere oranla daha az yer kaplaması
    - Bobinlerinin nem almaması
    - Uzun süre devre dışı kalması halinde tekrar işletmeye alınırken kurutulmasına gerek duyulmaması
    - Herhangi bir nedenle bobinlerinin yerinde değiştirilebilmesi
    - Soğutucu fan kullanılarak nominal gücünün sürekli olarak %40 olarak artırılabilmesi
  - İçerisinde zehirli kimyasal maddeler içermemesi sebebiyle çevre dostu olması
  - Yüksek aşırı yüklenme yeteneği
  - Kısa devreleri ve sismik etkilere karşı mükemmel dayanım
  - Mühendislik aşamasında müşteri taleplerini karşılamak için esneklik
  - Zorlu çevre koşullarında çalışabilme

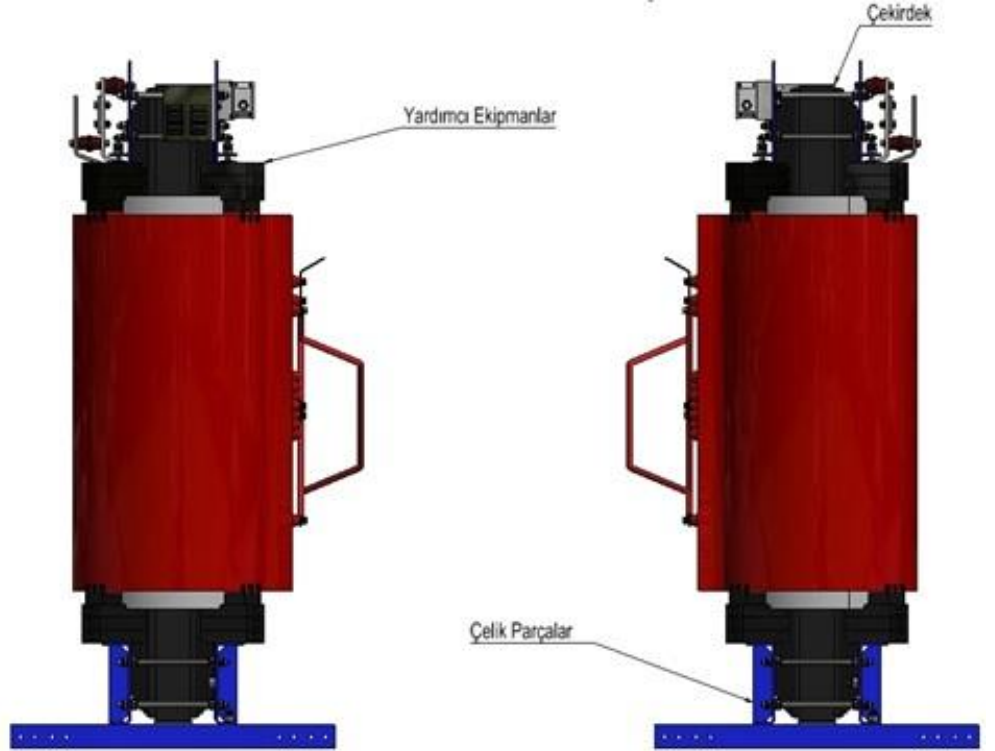
Bir kuru trafo genel anlamda; çekirdek (nüve), yüksek gerilim bobinleri, alçak gerilim bobinleri, yardımcı elektriksel/mekaniksel ekipmanlar ve bu yapıları bir arada tutmak için gerekli çelik yapıdan oluşmaktadır.



Şekil 3.2 : Transformör önden görünüşü.

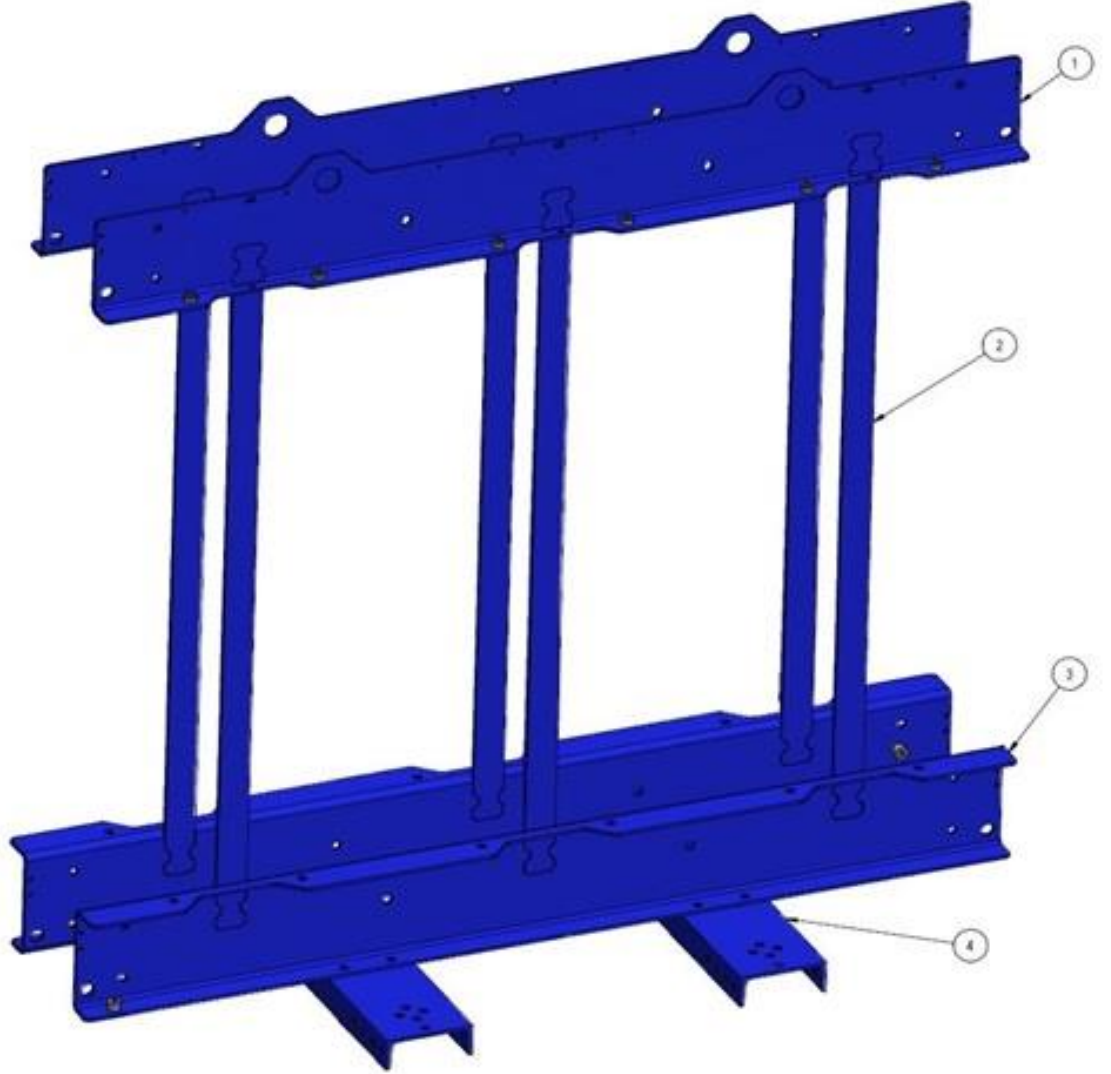


Şekil 3.3 : Transformatör arkadan görünüşü.



Şekil 3.4 : Transformatör yandan görünüşü.

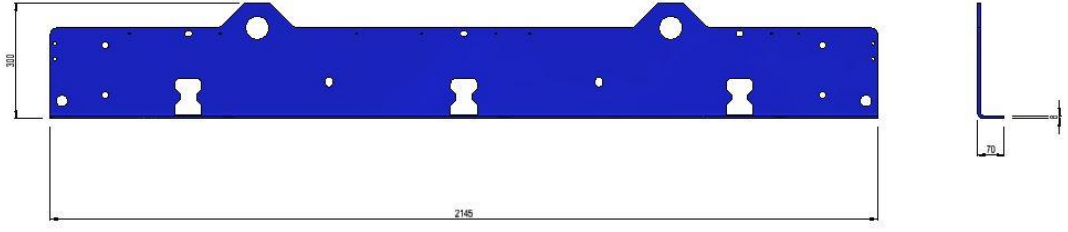
Bu çalışmada analiz kısmında örnek olarak kullanılacak olan 1600 kVA 31,5/0,4 Dyn11 elektriksel değerlerine sahip, kuru trafonun yapısını bir arada tutmaya yarayan çelik parçaların görselleri alt kısımda verilmiştir.



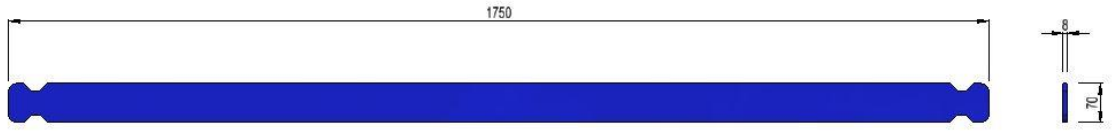
**Şekil 3.5 :** Transformatörün çelik parçaları.

**Tablo 3.1 :** Transformatörün çelik parçalarının detaylı listesi.

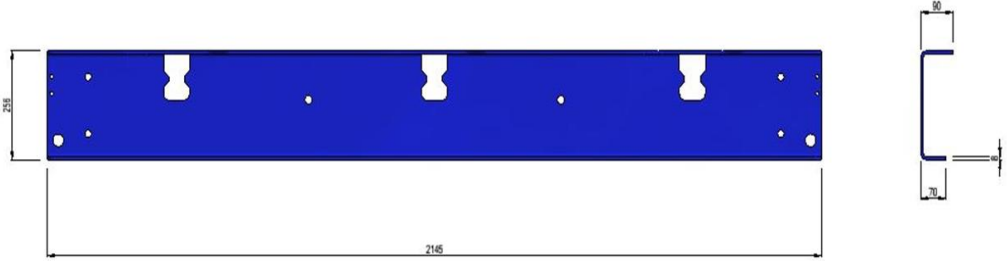
PARÇA LİSTESİ					
POZ	TANIM	AÇIKLAMA	MİKTAR	AĞIRLIK	TOP. AĞIRLIK
1	Üst Sıkıştırma Demiri	St 37-2 Tabaka Sac	2	37.47 kg	74.95 kg
2	Baskı Plakası	St 37-2 Tabaka Sac	6	7.59 kg	45.52 kg
3	Alt Sıkıştırma Demiri	St 37-2 Tabaka Sac	2	52.23 kg	104.47 kg
4	Taşıyıcı	DIN 1026 NPU Profil	2	25.86 kg	51.73 kg



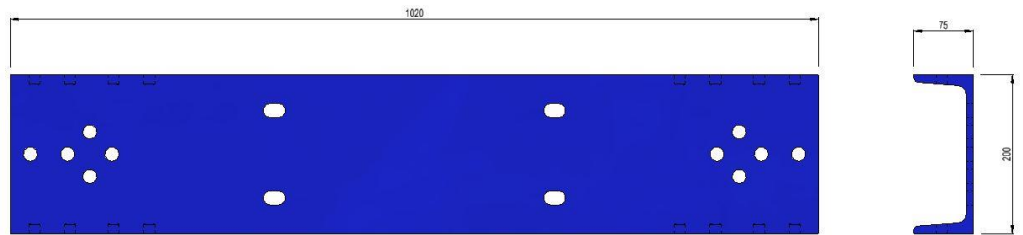
Şekil 3.6 : Üst sıkıştırma demiri / poz-1.



Şekil 3.7 : Baskı plakası / poz-2.



Şekil 3.8 : Alt sıkıştırma demiri / poz-3.



Şekil 3.9 : Taşıyıcı / poz-4.



### 3.5.3 Kullanım Avantajları

- Zor tutuşur. Kendi kendine sönebilir.
- Çevre dostudur.
- Tüketici merkezlerine yakın yerleştirilebilirler.
- Kablo maliyetleri, iletim kayıpları ve tesis maliyetleri düşüktür.
- Bakım gerektirmez.
- İzolasyon malzemeleri içindeki yanıcı malzeme oranı çok düşüktür.
- Yağlı trafolar için yapılması gereken yağ toplama çukuru vs. gibi işlemler yoktur.
- Fan ilavesi ile gücü % 40 oranında arttırılabilir.
- Kısa devre ve yıldırım darbesine karşı mükemmel izolasyona sahiptir.
- Soğutma sıvısı içermediği için sıvı kaçağı söz konusu değildir.
- AG/YG kablo bağlantılarını aşağıdan/ yukarıdan yapma imkanı verir.
- Neme karşı dirençlidir. %100 nem altında çalışabilir.
- Kısmi şarj seviyesi çok düşüktür.

**Tablo 3.2 :** Yağlı tip transformatör ile kuru tip transformatör kıyası.

	Yağlı tip trafo	Kuru tip trafo
Kullanım yeri:	Normalde harici, yağ çukuru, patlamaya karşı koruma ve uzun kablolama gerektirir.	Dâhili ve harici özel yapı gerekmez. Kablo uzunlukları kısadır.
Yangına karşı koruma:	Kötü	Çok iyi
Soğutma:	Yağ (-40C/+60C derece)	Hava (-40C/+60C derece)
Aşırı yüklenme:	Uzun süreli düşük miktarda	Kısa süreli yüksek miktarda
Kayıplar:	Düşük boşa kayıp, yüksek yükte kayıp.	Yüksek boşa kayıp, düşük yükte kayıp.
Bakım:	Gerektirir. (yağ ve gaz analizi).	Normalde gerekmez.
Kısa devre dayanımı:	Tasarıma göre iyi	Tasarıma göre Çok İyi
Yedek parçalar:	Gerekir.	Normalde gerekmez.

### 3.5.4 Kuru Tip Transformatörlerin Kullanım Yerleri

- Dahili ve harici transformatör merkezleri
- Endüstrinin her alanında
- Enerji üretim tesisleri
- Okullar
- Hastaneler
- Havaalanları
- Alışveriş Merkezleri
- Rüzgar santralleri

### 3.5.5 Kuru Tip Transformatör Sarım Aşaması

#### a) Dökümlü AG Bobinlerinin Sarımı

Dökümlü AG bobinlerinin sarımına başlamadan önce resimdeki ölçülere göre nötr ve faz baralarının lamaları hazırlanır. Bobinin giriş çıkış uçları olan bu lamaların kesiti folyo kesiti ile aynıdır. Alüminyum tel ile alüminyum lama, bakır tel ile de bakır lama kullanılır. Bakır alüminyuma göre iletkenliği daha iyi olan bir malzeme olmasına karşın alüminyuma göre maliyeti yüksek olduğundan, genelde sarım alüminyum ile yapılır[8].

Daha sonra bobin iç çapına uygun tambur seçilir. Seçilen tambur sarım makinesine yerleştirilir ve tamamına kalıp ayırıcı ayırıcı sürülür. Dökümlü bobinlerde tambur kalıbın bir parçası olduğu için bu işlem yapılır. Dökümlü bobinlerde reçinenin dolgu olarak kullanılacağı bölgelerde cam elyaftan yapılmış ızgara şeklinde bir izolasyon malzemesi kullanılır. Bu izolasyon malzemesine grid denir. Resimde belirtildiği üzere alt izolasyonun kalınlığına göre grid seçilir. Grid tamburu çevreleyecek biçimde ve ek yerleri üst üste gelmeyecek şekilde yerleştirilir. Böylece izolasyonun tamburun çevresi boyunca aynı kalınlıkta kalması sağlanır.

Dökümlü ve dökümsüz AG bobinlerinde iletken kesiti büyük olduğu için levha şeklinde iletken tel kullanılır. Bu tele folyo denir. Folyonun genişliği bobinin boyuna yakındır. Sarılan folyonun katları arasındaki izolasyona kat arası izolasyonu denir.

Kat arası izolasyonda kullanılan izolasyon kağıdına “prepreg” denir ve kalınlık olarak ince olmasına rağmen izolasyonu oldukça güçlü bir malzemedir. Prepreg reçine emdirilmiş, cam elyaftan oluşan bir kağıttır. DMD 0,16 olarak da adlandırılır. Folyo ve prepreg aynı anda ve birlikte sarılır. Bu birlikte yapılan sarım sayesinde prepreg her katın arasında kalır ve kat izolasyonunu sağlar.

Sarıma başlamadan önce nötr laması folyoya kaynatılır. Kaynak, sarım makinesi üzerinde bulunan elektrikli bir kaynak makinesi ile yapılır. Kaynak yapıldıktan sonra lamanın tambur üzerindeki yeri resimde verilen ölçülere göre tespit edilir. Ardından sarıma başlanır. Sarımın ilk katı bittiğinde lama ile sarımın ikinci katı arasına, yine resimde belirtilen ölçülerde DMD izolasyon kağıdı yerleştirilir. DMD izolasyon kağıdı da prepreg ile aynı yapıya sahip olan fakat 0,30 mm kalınlığında bir malzemedir. Bu izolasyona “bara izolasyonu” denir. Baranın keskin köşelerinin ve kaynak sırasında bara yüzeyinde kalan metal parçaların sarım esnasında kat arası izolasyona verebileceği zararı engeller. Eğer AG bobininde hava kanalı bırakılacak ise 1. ana kat sarımı bittikten sonra hava kanalı çıtaları yerleştirilir.

Daha sonra sarım kaldığı yerden devam eder. 2. ana katın sarımı da bittiğinde son katın sarımı yapılmadan faz lamasının kaynatılması gerekir. Bunun için önce lama bobin üzerindeki yerine yerleştirilir ve folyo lama üzerine gerilir. Bu aşamada lama ile folyonun kaynaklanacağı yerler işaretlenir. Daha sonra folyo kesilir, lama ile birlikte kaynak makinesine yerleştirilir ve her ikisi birbirine kaynaklanır. Ardından faz lamasının altına ve üstüne DMD izolasyon kağıdı yerleştirilir ve lama bobin üzerindeki yerine yerleşecek şekilde son kat sarımı da tamamlanır. Sarım bittiğinde nötr ve faz baraları bobinin aynı tarafında ve aynı hizada yer alırlar. Son katın üzerinden resimde belirtilen ölçülerde son kat izolasyonu yapılır. İzolasyon malzemesi cam elyaf şeritlerle ve iplerle sıkıca sarıldıktan sonra kalıp hazırlanması için “Reçine Döküm Atölyesi”ne gönderilir.

## **b) Dökümsüz AG Bobinlerinin Sarımı**

Dökümsüz AG bobinlerinin sarımı da dökümlü AG sarımına benzer fakat bu bobinlere reçine dökümü yapılmaz. Sarım başlamadan önce faz ve nötr baralarının lamaları hazırlanır. Daha sonra sarım yapılacak tambur hazırlanır. Dökümsüz bobinin sarımı da dökümlü bobin gibi folyo ve prepreg ile yapılır. Her iki bobin türünde de baralar aynı yapıdadır ve bobin üzerindeki yerleşimleri aynı şekildedir.

Sarıma başlamadan önce alt izolasyonu oluşturmak üzere önceden belirlememen ölçülere göre tambur çevresine prepreg sarılır. Resimde verilen alt izolasyon ölçüsüne bağlı olarak prepreg birkaç kat sarılı olabilir. Prepreg sarıldıktan sonra dökümlü bobinde olduğu gibi nötr laması folyoya kaynaklanarak bobindeki yerine yerleştirilir ve sarıma başlanır.

Dökümsüz AG bobinlerinde hava kanalı bırakılacaksa 1. Ana katın sarımı bittikten sonra 1. Ana kat ile 2. ana kat arasında kalacak şekilde dogbone denilen çıtalar kullanılır. Bu çıtaların sayısı resimde verilir ve bu sayıya göre aralarında eşit boşluk kalacak şekilde yerleştirilir. Bu çıtalar hava kanalı çıtalarının aksine yerlerinden çıkarılmaz. Çünkü dökümsüz bobinlerin hava kanallarını bu çıtanın arasında kalan boşluklar oluşturur.

Dökümsüz bobinin hava kanalı oluşturulduktan sonra 2. ana kat sarımı yapılır. 2. ana kat sarımı bittiğinde faz laması dökümlü bobinde olduğu gibi yerine tespit edilir ve folyoya kaynaklanır. Her iki lamanın da alt ve üstünde DMD izolasyon kağıdı kullanılır. 2. ana katın sarımı da bittikten sonra resimde belirtilen ölçülerde üst izolasyon yapılır. Ardından bobin cam elyaftan yapılmış bantlarla ve iplerle sarılarak makineden vinç yardımıyla indirilir ve kurutma fırınına gönderilir. Kurutma fırında prepreglerde bulunan reçine erir ve kağıtların birbirine yapışmasını sağlar. Ayrıca bobin tamamen nemden arındırılır. Bobin fırından çıktıktan sonra montaja hazır hale gelir. AG bobinlerinde müşterinin talebine bağlı olarak, AG ve YG arasında bulunmak elektrostatik ekranlama da bulunabilir.

### c) AG ve YG Bobinlerinin Birlikte Sarımı

AG ve YG bobini birlikte olan bobinlerde önce AG bobini sarılır. Sarımda kullanılacak tambur da bobin ölçülerine uygun olacak şekilde seçilir. Bu bobinde de tambur aynı zamanda kalıbın bir parçasıdır. Tambur ile ilk kat arasında ve her katın arasında resimde verilen izolasyon ölçülerine bağlı olarak grid yerleştirilir. Kat arası izolasyonda grid yerine prepreg de kullanılabilir, projeye göre değişir. AG bobininin sarımı folyo ile veya profil tel ile yapılır. AG bobininin iletkeni folyo ise çıkış uçları olarak lama tipi baralar kullanılır. Folyo ile sarım yapıldığında baralar sarımın başında ve sonunda folyoya kaynaklanır ve dökümlü AG bobinlerinde olduğu gibi sarım yapılır.

Eğer bobin iletkeni profil tel ise çıkış iletkenleri herhangi bir kaynak yapılmadan profil telin devamı olarak bobinin dışına kıvrılır. Bobinin dökümü yapılıp montaj aşamasına geldiğinde bu iletkenlerin uçlarına kablo pabuçları takılır ve baralara bağlanır. AG bobininin iletken kesiti kalın olduğundan, sarım profil tel ile yapıldığında bu kalınlığı sağlayacak ölçüde sipirlerde birkaç kat profil tel kullanılır.

Sarım kat sargı mantığıyla yapılır. Bir katın sarımı bittiğinde diğer kata geçmeden önce katlar arası izolasyonu sağlamak için resimde verilen ölçülere göre izolasyon malzemesi yerleştirilir ve sarım bu malzemenin üstünden devam eder. Ayrıca sarımdan önce tamburun etrafına ve hava kanalı çıtalarının her iki tarafına resimde verilen ölçülere bağlı olarak grid yerleştirilir. Bu bobinlerde bırakılan hava kanalı, soğutmanın yanında AG ve YG bobinleri arasındaki izolasyonu sağlar.

AG bobinin sarımı bittiğinde çıkış ucu olarak ayrılan tel, sarımın başlangıcında olduğu gibi bobinin dışına kıvrılır. Ardından AG bobininin çevresine resimde verilen ölçülerde hava kanalı çıtaları yerleştirilir. Çıtalar yerleştirildikten sonra YG bobininin sarımına başlanır. Resimde belirtilen sipirlerden ayar uçları çıkartılır. Ayar uçları için ayar bağlantılarına yetecek uzunlukta çekilerek çıkarılır. Düşük güçlü ve düşük gerilimli oldukları için kaynak yapılmasına gerek yoktur. Ayar uçları çıkarılacak sipirlerden iletken teller, kalıp hazırlama esnasındaki yapılan tellerin aralarında ayrıca izolasyon malzemesi kullanılmaz. Döküm fırınında reçine

dökümü yapıldığında teller arasında kalan boşluklar reçine ile dolar ve bu şekilde sağlanan izolasyon da bu tip bobinler için yeterlidir.

YG bobininin sarımı da bittiğinde, resimde verilen bobin dış çapı ölçüsüne göre bobinin dışına grid sarılır. Ardından kalıbı hazırlanmak üzere reçine döküm atölyesine gönderilir.

#### **d) YG Bobinlerinin Sarımı**

YG bobinlerinden AG bobinlerine göre daha az akım akar. Buna bağlı olarak YG bobinlerinin iletken kesitleri AG bobinlerinden ince olur. YG bobinlerinde iletken olarak genellikle profil tel kullanılır.

Bobinin iç çap ölçüsüne uygun tambur seçilip makineye takılır. YG bobini dökümlü olduğu için tambur aynı zamanda kalıbın bir parçasıdır. Ardından ilk olarak ayar ucunun yeri tespit edilir. İletken, ayar ucunun çıkarılacağı yerde bobin eksenine yönünde dışa doğru kıvrılır. Ayar ucunun tespit edildiği noktadan sarım başlar. Bobin profil tel ile sarılırsa kat sargısı yapılır. Profil tellerin çevresi cam elyaftan yapılmış izolasyon malzemesiyle kaplıdır. Tasarlanan bobinin iletken kesitine bağlı olarak yan yana 2 veya daha fazla profil tel ile de sarım yapılabilir ve bu durum resimde verilir. Sarılan her katın arasına izolasyon yerleştirilir. Sarılan bir katın sarımı soldan sağa doğru olduysa onun üstündeki katın sarımı sağdan sola doğru olur ve bu şekilde devam eder. Strip folyo ile sarılırsa AG bobinlerinde olduğu gibi üst üste sarım yapılır. Hava kanalı için hava kanalı çıtası kullanılır. Hava kanalı çıtaları 1. ana kat üzerindeki yerlerine yerleştirilir ve sabitlenir. 2. ana kat sarımı bu çıtaların üzerinden başlar. 1. ana kat bobinlerinden çıkarılan uçlar 2. ana kat bobinlerinin ilk sipirlerine kaynaklanarak sarıma devam edilir. İlk bobin çıtalarının üzerine sıkı bir şekilde sarıldıktan sonra kılıfları yerlerine sabitleyen halatlar alınır. 2. ana katta ayar uçları çıkarılır.

Uçların hangi bobinden ve kaçınıcı sipirden çıkarılacağı resimde verilmiştir. Bu değerler sarım makinesine girildiğinde uçların çıkarılacağı sipire gelince makine durur ve uç o noktadan çıkarılır. Eğer uç çıkarılacak sipir bulunduğu bobinin son sipiri ise 90° kıvrılarak dışarı uç olarak çıkarılır. Uç çıkarılacak sipir bulunduğu bobinin son sipiri değilse de ayar ucunun çıkarılacağı noktaya, ayar ucu bobinden

90° derecelik açıyla dışarı çıkacak şekilde profil tel kaynaklanır. 2. ana katın son bobini de sarıldıktan sonra YG bobininin sarım aşaması tamamlanmış olur.

Sarım bittikten sonra bobin resimde verilen ölçülerde grid ile sarılır ve naylon iplerle sabitlenir. Ardından kalıbı hazırlanmak üzere reçine döküm atölyesine gönderilir.

Sarımı yapılan dökümlü bobinler Reçine Döküm Atölyesine getirilir. Burada öncelikle tekerlekli alt kalıplara yerleştirilir. AG bobinleri alt kalıba düz yerleştirilir. YG bobinleri ve AG-YG bobinleri ise alt kalıba bobinin üst kısmı aşağıda olacak şekilde yerleştirilir. Tekerlekli bobinlere yerleştirilen AG bobinlerinin dışına gömlek geçirilmeden önce gömleğin alt kalıp ile temas edeceği yerlere kauçuk takılır. Gömlek yerine yerleştirildikten sonra da kauçuk takılan ek yerinin dış kısmına silikon sıkılır. Silikon, döküm esnasında alt kısımdan reçinenin sızmasını önler. Gömlek yerleştirildikten sonra, gömleğin birbirine temas eden kısımlarına döküm sırasında reçinenin sızmasını engellemek amacıyla sünger çekilir ve gömlek bu kısımlardan işkence ile sıkılarak döküme hazır hale gelir.

AG-YG bobinleri ve YG bobinlerinin dışına gömlek geçirilmeden önce ayar uçlarının bağlantıları yapılır. Bağlantıların nasıl yapılacağı yüksek gerilim bobini kalıplama resminde verilmiştir. Bunun yanında bu bobinlerin kalıbında, AG bobinlerinin kalıbından farklı olarak kalıp kapağı vardır. Kalıp kapağı üzerinde konik şekilde birbirlerine çapraz olarak ve çift sıra halinde yerleştirilmiş YG bobinlerinin ayar uçlarının çıkarılacağı bağlantı noktaları bulunur. Bu bağlantı noktalarından bobinin ayar bağlantıları yapılacak olanlar hariç diğerleri kapalı halde bırakılır. Hazırlanmış olan ayar uçları bu bağlantı noktalarına takılır ve kalıp kapağı resimde gösterildiği şekilde gömleğin birbirine yakın olan iki kenarı arasındaki yere yerleştirilir. Kalıp kapağının gömlek ile temas ettiği yerlere reçinenin sızmasını önlemek için sünger çekilir. Kalıp kapağı ve gömlek birlikte işkence ile sıkılarak döküme hazır hale gelir. Hazırlanan bobinler sırası geldiğine fırına verilir. Bobinler fırına verildikten sonra fırın ve bobinler belli bir sıcaklığa ulaşana kadar 2-3 saat kadar bir süre reçine dökümü yapılmaz.

Bu süre geçtiğinde ve fırın istenen sıcaklığa ulaştığında reçine döküm işlemine geçilir. Bunun için önce fırın içindeki hava vakumlanır.

Vakumdan sonra reçine dökümü yapılır ve vakum sayesinde reçine bütün sargıların arasındaki boşluklara dolar. Yeterince reçine dökümü yapıldıktan sonra vakumlanmış olan fırına hava geri verilir ve vakumdan sonra meydana gelen hava basıncıyla reçine vakumdan önce ulaşamadığı noktalara da nüfuz ederek oldukça iyi bir yalıtkan sağlar. Fırından çıkan bobinlerin gömlek kısmı ve hava kanalı çıtalrı özel bir aparat ve vinç yardımıyla sökülür. Kalıp kapağı üzerindeki cıvata somunları söküldükten sonra da kalıp kapağı bobinden ayrılır ve ayar uçları ortaya çıkar.

Bobine kesim ve boyama işlemleri yapılacağından, ayar uçlarının bu esnada zarar görmemesi için cıvata somunları tekrar ayar uçlarına takılır. Bobinin kalıbı ayrıldıktan sonra boya atölyesine gönderilir. Burada öncelikle bobin boyunun teknik resimde verilen değere getirilmesi için özel bir makine yardımıyla resimde verilen ölçülere göre bobin, üst ve alt kısımdan kesilir. Daha sonra bobin üzerinde dökümden sonra kalmış olan reçine kalıntıları taşlama makinesiyle temizlenir ve reçinenin bobinin köşelerini oluşturan sivri kısımları yuvarlatılır. Kesme ve taşlama işleminden sonra bobin üzerinde kalan tozlar temizlenir ve bobine boya atılır. Boyanan bobinler boyanın kuruması için kurutma fırınına yerleştirilir. Bobinler kurutma fırınından çıktıktan sonra montaja hazır hale gelir[9].

### **3.5.6 Dağıtım Transformatörleri Üretim Aşamaları**

Dağıtım transformatörlerinde AG bobini ve YG bobini veya ikisinin üst üste sarıldığı AG-YG bobini bulunur. Bu transformatörlerde ayrıca ayar bobini bulunmaz. Transformatörün ayar kısmı YG bobininde yer alır. Dağıtım transformatörlerinin bobinleri kat sargısı ile sarılır. Devrik sargı olmaz. Katların arasında presbant izolasyon kağıdı kullanılır.

Dağıtım transformatörlerinin AG bobinleri folyo ile veya profil tel ile sarılır, tasarıma göre değişir. Sarıma başlamadan önce faz ve nötr baralarının lamaları hazırlanır. Ardından bobinin izole silindiri ve daha sonra sarım yapılacak tambur hazırlanır. Dağıtım transformatörlerinin sarımında kullanılan tamburlar ayarlıdır. Tambur resimde verilen iç çaplara uygun olacak şekilde tambur ayarlanır.



Dağıtım transformatörlerinin dökümsüz AG bobinlerinin sarımı kuru tip transformatörlerin dökümsüz AG bobinlerinin sarım yöntemiyle aynıdır. Sadece kullanılan izolasyon malzemelerinde fark vardır. Kuru tip transformatörde epoksi reçine emdirilmiş prepreg kağıt kullanılırken dağıtım transformatöründe presbant kullanılır.

YG bobini AG bobininin üstüne ya da ayrı olarak sarılır. YG bobini yalnız sarılacaksa resimde iç çap ölçümünde tambur ayarlanır. AG bobininin üstüne sarıldığında ise YG bobininin iç çapı AG bobininin dış çapına eşittir. YG bobinleri profil tel veya emaye telle sarılır. Flanş vardır. YG bobininin giriş çıkış uçları ve ayar uçları AG bobininin giriş çıkış ucunun karşısından çıkarılır. YG bobininin bütün uçları aynı tarafta yer alır. Ayar uçlarının çıkarılacağı sipirlerde sarım teline kaynak yapılır. Ayar uçlarında, kaynaktan bobinin çıkışına kadar krep boru kullanılır. Bobindeki yağ kanallarının olduğu yere sarım esnasında çıtalı kağıt yerleştirilir.

Önce tek numaralı ayar uçları çıkarılır daha sonra çift numaralı ayar uçları çıkarılır. Tek ayar uçlarından çift ayar uçlarına geçerken arada dolgu malzemesi kullanılır. Örneğin 6 ayar ucuna sahip bir bobinde bu işlemin sıralaması 1-3-5-dolgu-6-4-2 şeklindedir. Bütün ayar uçları aynı kattan çıkar(ara katta ya da en üst katta olabilir). Bu örnekte 5 ve 6 numaralı uçlar kaynak yapılmadan çıkarılır.

Bobin sarımı bittikten sonra epoksili kağıt ile sarılır. Bu kağıttaki epoksi maddesi kurutma fırınında yapışkan hale gelir ve kağıt tamamen bobin etrafında yapışmış olur.

Emaye tel ile sarılan YG bobininde ayar uçları kaynak yapılmadan kıvrılarak çıkar. Flanş olarak masnet halkası (kenar şeridi) kullanılır. Kat arası izolasyonda da bu kağıt sarılarak izolasyon yapılmış olur. Burada da yine önce tek numaralı uçlar çıkarılır. Ayar uçları ayrı katlarda olabileceği gibi, hepsi aynı kat üzerinde veya tek numaralı uçlar ile çift numaralı uçlar ayrı katlar üzerinde olabilir. Profil tel ile sarım yapılırken ayar uçları genellikle aynı kat üzerinde olur.

Tek numaralılar ile çift numaralılar ayrı katlarda da olabilir. Ayar uçlarının çıkaracağı katlar ve sipirler her projede farklı olabilir. Tasarıma bağlıdır.

Tasarıma bağılı olarak transformatör Dz veya Yz bağlantı grubundaysa üst üste yerleştirilen YG bobinlerinin resimleri aynıdır. Dolayısıyla o bobinlerin ayar uçları da aynıdır ve aynı yerlerden çıkar. Yağ kanalı için resimde gösterilen yerlerde çita kullanılır. Bu çitalar yağlı kağıt üzerine yapıştırılmış şekilde hazır gelir ve yerleştirileceği kat üzerine sarılır. Ayar uçları orta katta olan bobinlerde ayar uçları ayrı katlarda yer alıyorsa (1-3-5 ve 6-4-2 şeklinde) her iki ayar ucunun bulunduğu kat arasında yağ kanalı vardır.

Ayar uçları çıkılıp krep boru kullanıldıktan sonra ayar uçlarının oynamaması için bobin üzerinde sağlam durması için sender bant ile sarılır. En son, sarım bittikten sonra bobin epoksili kağıt ile sarılır. Fırına girince bu kağıt yapışır ve sargıların yeniden oynamasını engeller.

### **3.5.7 Güç Transformatörleri Üretim Aşamaları**

12,5 MVA'dan büyük güçteki transformatörler Güç Transformatörleri olarak adlandırılır. Güç transformatörlerinin sarımında, tasarıma bağılı olarak aşağıda verilmiş olan tel çeşitleri kullanılır;

- Profil tel
- Bakır
- Alüminyum
- İkiz Tel
- Üçüz Tel
- Dördüz Tel
- CTC (Drillater) Tel
- Bakır
- Alüminyum

Bakırın iletkenliği alüminyuma göre daha yüksek olduğu için yüksek güçlü bobinlerde daha çok tercih edilir. Alüminyum ise genellikle maliyeti düşürmek için kullanılır.

Güç transformatörlerinde aşağıdaki bobin çeşitleri bulunur. Hangi bobin çeşidinin hangi transformatörde kullanılacağı yine tasarıma bağlıdır. Tel çeşitleri de tasarıma bağlı olarak her bobin çeşidinde kullanılabilir. Aşağıda güç transformatörlerinde yer alan bobin çeşitleri verilmiştir. Yazılan bobin çeşitlerinde hangi tel ile sarıldığı belirtilmeyen bobinler CTC tel ile veya profil teller ile sarılabilir. Ancak CTC tel ile sarılan bobinin maliyeti yüksek olduğu için söz konusu bobinlerde genellikle profil tel ile sarım yapılır.

- Kat sargı
- Radyal kanallı kat sargı (ara parçalı)
- Sadece CTC tel
- Ara Parçasız
- CTC tel ile sarılan
- Profil tel ile sarılan

Güç transformatörlerinde sarıma başlamadan önce resim ölçülerine göre izole silindir hazırlanır. İzole silindir etrafında dolaşacak şekilde üzerine bobin boyunca uzanan çıtalar yapıştırılır. Bu çıtaların aralıkları eşittir. İzole silindirin üzerine çıtalar yapıştırılmış haline kit montajı denir. 2009 yılından beri bu izole silindir kit montajı yapılmış halde hazır getirilmektedir[10].

İzole silindir tambura yerleştirilir ve ayarlı tambur sıkılarak izole silindir tambur üzerindeki yerine sabitlenir. Ardından sarım makinesine kullanılacak olan tellerin makaraları yerleştirilir, makine ayarlanır ve sarıma başlanır. Sarımın başlangıcında nötr ucu bobinin dışına doğru kıvrılarak çıkarılır.

Kat sargı ile sarım yapıldığında iletken teller yan yana sarılır ve ilk katın sarımının bittiği yerden üst katın ilk sipiri başlar ve sarım böylece devam eder. Resimde belirtildiği üzere yağ kanalı bırakılması gereken noktaya bobin boyunca uzanan çıtalar yerleştirilir. Sarım bu çıtalar üzerinden devam eder. Çıtaların oluşturduğu bobin boyunca uzanan bu kanal bobinin yağ kanalıdır. Kat sargılı bobinler CTC tel ile sarıldığında radyal kanal da bırakılabilir. Radyal kanal bobinde bırakılan enine kanallara denir. Bu kanalları bırakmak için ara parça denilen

preslenmiş kağıttan yapılmış parçalar yerleştirilir. Radyal kanal bu parçalar sayesinde oluşan kanallardır.

Kat sargılı bütün AG ve YG bobinlerinde sarım mantığı aynıdır. Yalnızca üzerinde ayar bobini bulunan YG bobininin son katındaki sarım farklıdır. Ayar ucunun çıkarılacağı noktadan iletkene profil tel kaynaklanır ve tel bobin dışında kalır. Bu uç bobinin ayar ucunu oluşturur. Ayar uçlarının hepsi bu şekilde bobinden çıkarılır.

Kat sargılı bobinlerin sarımında ikiz, üçüz veya dördüz tel kullanıldığında, her katın ortasında tellerin dışındaki izolasyon sıyrılır. İzolasyon sıyrıldığında ortaya çıkan tellerden, üstteki tel alta, alttaki tel de üste gelecek şekilde çaprazlama yapılır ve tekrar izolasyon malzemesi sarılarak sarıma devam edilir.

Eğer üst üste ikiz tel sarılmışsa bu ikiz teller her katta birbiri arasında çaprazlanır. Ayrıca sarımın ortasına gelindiğinde her iki ikiz telin de izolasyonları sıyrılır ve içlerindeki profil teller birbirleri ile çaprazlanır. Çaprazlama sayesinde bobine sarılan profil tellerin dirençlerinin eşit olması sağlanır.

## 4. YAPISAL ANALİZLERDE KULLANILAN BİLGİSAYAR PROGRAMLARI HAKKINDA GENEL BİLGİ

Analizlerin tasarımı ve gelişimi için gerçekçi bir şekilde oluşturulması gerekmektedir. 1930'larda araştırmacılar tarafından temel denklemler oluşturulmasından bu yana birçok farklı çalışma yapılmıştır. Bu gelişimin ilk safhalarında, sorunların karmaşık olması sebebiyle bulunan çözümler yaklaşık olarak nitelendirilmektedir. 1960'lı yıllardaki bilgisayarlardaki gelişmeler, analizlerdeki doğruluk oranının artmasına imkan tanımıştır. Bilgisayarların hızlı gelişimini; sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sayısal integrasyondaki gelişmeler takip etmiştir. Özellikle kullanım esnekliği nedeniyle sonlu elemanlar yöntemi günümüzde çok yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Kabuk yapı analizleri için birçok bilgisayar programı geliştirilmiş ve etkin bir şekilde de kullanılmaktadır. Farklı analiz tipleri için sayısal formülasyonlar türetilmiştir.

Bunlar ;

- a) Lineer gerilme analizi,
- b) Lineer bifurkasyon (çatallanma) analizi,
- c) Elastik büyük sehim analizi,
- d) Elastik-plastik küçük sehim analizi,
- e) Elastik-plastik büyük sehim analizi olarak özetlenebilir.

Yapılardaki sistem elemanlarına yönelik uygulanmış klasik yöntem çözümlerinde sistem elemanlarının; herhangi bir kuvvet veya moment etkisiyle şekil ve formlarının sabit tutulduğunu kabul edilmektedir. Bu sebeple klasik yöntemli çözümler yapı sistem elemanlarının yer değiştirmelerine yönelik gerekli bilgiyi sağlamamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde ise katı ve sert cisim sınırlaması ortadan kaldırılıp, sistem elemanlarının yer değiştirmeleri gibi problemlerin çözülmesine imkan sağlanmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanımına yönelik olarak başlıca ANSYS, SAP 2000 ve ABAQUS gibi farklı bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır[11].

#### 4.1 ANSYS Programı

ANSYS programı; ürünün gerekli testlerinin, ürünün prototipi yapılmadan önce, bilgisayar ortamında yapılmasına imkan tanımaktadır. Bilgisayarda ürünlerin simulasyonlarının yapılması prototip üretmekten çok daha az maliyetli olup, daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşılabilmesini sağlamaktadır. Ürünün olası zayıf noktalarının tespiti ve önlem alınması, kullanım ömrü hesaplanması ve doğabilecek diğer problemlerin öngörülmesi, ürünün bilgisayar ortamında 3D olarak tasarlanmasının sağladığı avantajlardandır. Bu avantajlar; ürünün prototipinin üretilmesi yerine bilgisayar destekli olarak tasarlanmasını tercih ettiren en önemli unsurlardır.

ANSYS programı, bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design – CAD) programlarından veri alımına imkan verdiği gibi kendi araçları ile de geometrik olarak tasarım oluşturulabilmektedir. Ayrıca sonlu elemanlar yönteminde ihtiyaç duyulan model (*mesh*) özelliğine de sahiptir. Oluşturulmuş olan modele yük tanımlanıp, sonrasında yapılan analizler ile sayısal ve grafiksel sonuçlar elde edilmektedir.

Mühendislikte birçok problemin çözümünde sonlu elemanlar yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İlk olarak gerilme analizinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Yöntem bir büyüklük alanının hesaplanmasına dayanmaktadır. En büyük değer veya gradyen olarak hesaplanan büyüklük, pratikte önemli bir yere sahiptir. Bu değer, akışkan problemlerinde akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonuna, ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akışına, gerilme analizinde ise deplasman veya gerilme alanına karşılık gelmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde yapı, önceden davranışı belirlenen birden fazla elemana bölünmektedir. Bu elemanlar, nod olarak adlandırılan noktalar ile tekrar birleşmekte, böylece matematiksel bir denklem takımı elde edilmektedir. Nodlardaki denge denklemleri, gerilme analizi örneğinde elde edilen denklemlere karşılık gelmektedir. Problemin niteliğine göre birden çok denklem üretilmekte olup, bu denklemler de bilgisayar programlarında çözüme ulaştırılmaktadır.

#### 4.1.1. ANSYS Programında Analiz Kategorileri

ANSYS programı kullanılarak yapılması planlanan bir analiz genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır :

1. Aşama (Preprocessor): Bu kısımda bir model oluşturulur veya başka bir CAD tabanlı programdan model programa aktarılır. Model oluşturulduktan sonra malzemenin kendine has özellikleri programı tanıtılır (Poisson oranı, birimsel ağırlık, elastisite modülü gibi). Yapılacak analiz doğrusal analiz ise sadece elastisite modülünün ve poisson oranının tanıtılması yeterli olmaktadır. Analiz doğrusal olmayan sınıfta ise malzemeye ait diğer katsayılara veya gerilme-deformasyon diyagramına da gerek duyulmaktadır. Ardından model sonlu elemanlara bölünüp mesh edilir. Sonlu elemanlara bölme sırasında analiz biçimine ve geometrisine uygun eleman tipinin seçilmesi gerekmektedir. Eleman tipine yönelik seçimlerde; serbestlik derecesine, şekline (üçgen, silindir, koni, kare vb.), varsayılan deformasyon biçimine (lineer, nonlinear, quadratik vb.) ve boyutu (2D, 3D) göre düzenlemeler yapılabilmektedir. Bu aşamada malzeme tanımlanması ve malzeme atanması yapılmaktadır.

2. Aşama (Solution): Yapılması planlanan analiz tipinin seçildiği kısımdır. Analizin seçilmesinden sonra model üzerine sınır koşullarının ve yüklemelerin tanımlanması yapılır. ANSYS programında sonlu elemanlar mantığına dayandığından dolayı yüklemeler ve sınır koşulları direkt nodlara dağıtılarak hesaplamaları yapılır. Bu işlem, sonsuz noddan oluşan gerçek yapının sonlu nodlara bölünmesini sağlar. Dış hacim, bölünen bu nodlarla tanımlanmaktadır. Yükleme işlemi noktasal olabileceği gibi yayılı bir şekilde de uygulanabilir. Bu aşamada yapılması gerekenler bittiğinde “solve” komutu verilerek çözüm başlatılır.

3. Aşama (Postprocessor): Sonuçların elde edildiği kısımdır. Sonuçları değerlendirirken, her noddan oluşan gerilme ve deformasyon miktarları ile birlikte gerilmenin bir yol boyunca takip ettiği değerler de gözlemlenmektedir[12].

#### 4.1.2 ANSYS Sonlu Eleman Metodunun Çözümü

Sonlu Elemanlar Yöntemi ( The Finite Element Method ) incelenmek istenen cismin sonlu sayıda küçük elemana bölünmesi esasına dayanır. Bu yöntem ile analizi yapılan model, düğüm noktalarından birbirine bağlı sonlu sayıda küçük elemana bölünür. Seçilen birim eleman, geometik bir şekildir. Bunun arkasında yatan neden ise geometrik yapısı bilinen küçük elemanlar üzerinde inceleme ve çözüm yapılmasının kolay olmasıdır. Bu işlem ANSYS'te ve MESH komutuyla yapılır. Birim eleman boyutunun küçülmesi daha hassas çözüm yapmamızı sağlarken, denklem sayısını artırdığı için işlem süresini uzatır[13].

Sonlu elemanlar metoduyla çözüm yapılırken izlenmesi gereken yol ;

**1-** Yapıyı ya da sürekli elemanı birim elemanlara bölmek. Malzemenin fiziki özellikleri, birim elemanın boyutunu ve şeklini belirleyecek önemli bir kriterdir.

**2-** Sonlu elemanlar birbirine düğüm noktalarından bağlanmış kabul edilirler. Problemin bilinmeyen ana parametreleri, basit yapıların analizlerinde de olduğu gibi bu düğüm noktalarının yer değiştirmeleridir.

**3-** Her bir sonlu elemanın yer değişimini tanımlamak için düğüm noktalarının yer değişimleri cinsinden fonksiyon seçilir (genelde bir polinomdur, polinomun derecesi birim elemanın düğüm sayısına bağlıdır.)

**4-** Elemanla yer değiştirme fonksiyonları seçildikten sonra her bir elemanın özelliklerini ifade eden matris denklemleri oluşturulur. Bunun için dört yaklaşımdan biri kullanılır.

Bu yaklaşımlar ;

**a) Direkt Yaklaşım :** Tek boyutlu ve basit problemlerin analizinde diğer yaklaşımlara kıyasla daha uygulanabilir olan yaklaşım biçimidir.



**b) Varyasyonel Yaklaşım :** Bir fonksiyonun matematiksel olarak ekstremize edilmesi (maksimum ve minimum edilmesi) anlamına gelmektedir. Bu bağlamda katı cisim mekaniğinde en çok kullanılan fonksiyon tipleri;

- Potansiyel Enerji Prensibi,
- Komplementer (tümleyen) Potansiyel Enerji Prensibi
- Reissner Prensibi olarak belirtilebilir.

Bu fonksiyonu maksimum ya da minimum eden değerler, o fonksiyonun 1. türevinin sıfıra eşit olduğu noktada hesaplanır. Aynı fonksiyonun 2. türevinin sıfırdan büyük veya küçük olması, ekstremize eden değerini maksimum ya da minimum olmasını belirleyen kıstastır.

**c) Ağırlıklı Kalanlar Yaklaşımı :** Bir fonksiyonun çeşitli değerler karşılığında elde edilen yaklaşık çözümü ile gerçek çözüm arasındaki farkların, bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak toplamlarını minimize etme işlemi olarak ifade eder. Bu yaklaşımı avantajlı hale getiren olgu, fonksiyonların elde edilemediği problemlerde kullanılabilir olmasıdır.

**d) Enerji Dengesi Yaklaşımı :** Bir sisteme giren ve sistemden çıkan termal veya mekanik enerjilerin eşitliğini savunan bir yaklaşımdır. Bir fonksiyonele gerek duymaz.

**5- Sonlu elemanlar yöntemi** kullanılarak bölünmüş olan sistemin özelliklerini toplamak gerekir. Bu da sistemin davranışını ifade eden matris denklemleri oluşturmakla, elemanların matris denklemlerini birleştirerek yapılabilir. İşlemlerin yapılabilmesi için sistemin matris denklemleri, bir elemanın matris denklemleriyle aynı forma sahip olmalıdır.

### 4.1.3 ANSYS'te Sonlu Eleman Tipleri

Eleman tiplerinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılması, sonlu eleman problemlerinin çözümünde izlenecek işlem adımlarında ilk sırada gelmektedir. Çözüm için seçilen alanine geometrik yapısı belirlenerek, belirlenen yapıya optimum uyum sağlayacak eleman tipleri seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etme oranı, ulaşılabilecek sonuçlar gerçek çözüme yaklaşılmış olma durumlarını belirleyecektir.

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan elemanlar; boyutlarına göre dört grupta incelenebilirler.

**a) Tek boyutlu elemanlar:** Tek boyutlu olarak tanımlanan problemlerin çözümünde tercih edilen eleman grubudur.

**b) İki boyutlu elemanlar:** İki boyutlu (düzlem) problemlerinin çözümünde tercih edilir. Bu grubun temel elemanı, üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanların 6, 9 ve daha fazla düğüm içeren tipleri de mevcuttur. Belirlenecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine bağlı olarak düğüm sayısı kararlaştırılır. Üçgen eleman tipi, çözüm bölgesini gerçeğe uygun olarak temsil edilmesi açısından elverişlidir.

Dörtgen eleman tipi, dik üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelmektedir. Bu eleman tipinin kullanışlılığı problemin geometrisine uyum sağladığı boyuttadır. Dört veya daha fazla düğüme sahip olduğu durumlarda mevcuttur. Bu eleman şekilleri genellikle özel hal olan dikdörtgen eleman şeklinde sisteme aktarılır.

**c) Dönel elemanlar:** Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde kullanılmaları tercih edilir. Bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam tur yapmasıyla meydana gelmektedirler. Bu eksenel simetrik problemleri, kendisinin 3 boyutlu olmasına karşın 2 boyutlu problem gibi çözüm imkanı sağladığı için bu elemanlar çok kullanışlıdır.

**d) 3 boyutlu elemanlar:** Üçgen piramit şeklindeki eleman tipi bu grupta kullanılan temel elemandır. Bu tip haricinde, 3 boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleri dikdörtgenler prizması veya daha ağırlıklı olarak 6 yüzeyle elemanlardır.

İzoparametrik Elemanlar: Kenarları doğru olan elemanların sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmış çözüm için belirlenen bölgeyi ifade etmesi mümkün değildir. Bu gibi durumlarda bölgeyi gereken duyarlılıkta tanımlamak için elemanların boyutlarının küçültülmesi, dolayısıyla adetlerinin artırılması gerekmektedir. Çözülmesi gereken problemlerin bu durumda sayısı artacaktır. Bundan dolayı gereken bilgisayar kapasitesinin ve zamanın artması söz konusu olacaktır. Bu olumsuzlukları elimine etmek için, çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum gösterecek eğri kenarlı elemanlara gereksinim vardır. Böylelikle ivedi bir hızla çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm elde edilebilecektir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanacaktır. Her noktasının yerleşiminin ve yer değiştirmesinin aynı dereceden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile belirtilebiliyor olması, izoparametrik sonlu elemanın özelliğidir. İzoparametrik elemanlardan eş parametrelili elemanlar olarak da bahsedilmektedir. İzoparametrik elemanların özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

a) Lokal koordinatlarda iki komşu eleman arasında süreklilik sağlanmakta ise, izoparametrik elemanlarda da sağlanıyor anlamına gelmektedir.

b) Eğer interpolasyon fonksiyonu lokal koordinat takımındaki elemanda sürekli ise, izoparametrik elemanda da sürekli olduğu söylenebilir.

c) Çözümün tamlığı lokal koordinatlarda sağlanıyor ise izoparametrik, elemanlarda da sağlanacaktır. İnterpolasyon fonksiyonları, izoparametrik elemanların bahsedilen özellikleri sayesinde lokal koordinatlarda seçilir.

d) İnterpolasyon Fonksiyonların Seçimi: İnterpolasyon fonksiyonu olan değişkenin eleman üzerindeki değişimini ifade etmektedir. İnterpolasyon fonksiyonunun saptanması seçilen eleman tipine ve çözülecek denklemin mertebesine bağlıdır.

Ek olarak interpolasyon aşağıda belirtilen koşulları da sağlamalıdır:

a) İnterpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeni ve alan değişkeninin en yüksek dereceden bir önceki dereceye kadar olan kısmi türevleri eleman sınırlarında sürekli olmak durumundadır.

b) İnterpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeninin her noktadaki türevi, eleman boyutları sıfıra yaklaşsa dahi alan değişkenini biçimlendirmelidir.

c) Belirlenen interpolasyon fonksiyonu koordinat değişimlerinden etkilenmiyor olmalıdır. Hem yukarıda belirtilen şartları sağlamaları hem de türev ve integral almadaki rahatlığından dolayı interpolasyon fonksiyonu olarak çoğunlukla polinomlar seçilir.

#### **4.1.4 Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları**

Sonlu elemanlar yönteminin diğer yöntemlere kıyasla avantajları;

\* Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilecek model ne kadar karışık olsa da modelin şekline ve boyutlarına esneklik kazandırmaktadır.

\* İlgili olduğu alanlar çoğaltılabilir.

\* Değişik malzeme nitelikleri ve geometrisinde farklı zorluklar ortaya çıkmaz.

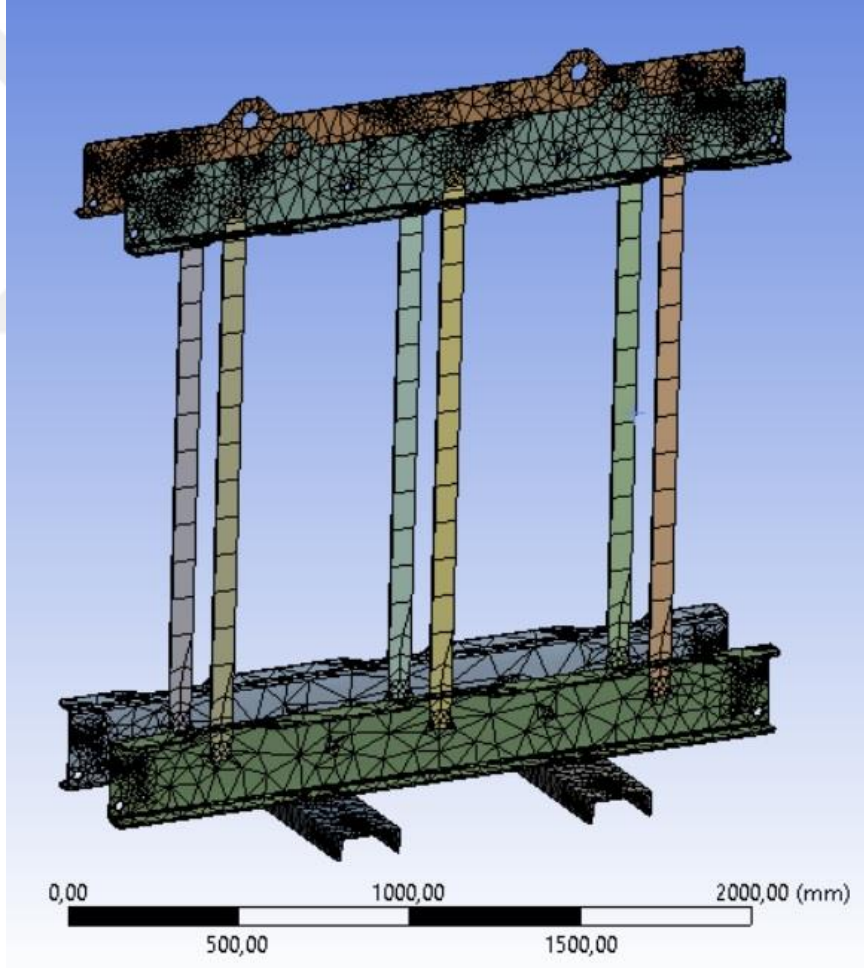
\* Genel katılık maddesiyle ilişkili kuvvet ve yer değiştirmesi açısından formüle edilmiş neden sonuç ilişkisi problemdir. Bu durum sonlu elemanlar yöntemiyle problemin çözümlerini kolaylaştırmaktadır.

\* Sınır şartları kolayca tespit edilir.

\* Sonlu elemanlar yönteminin kullanım esnekliği sayesinde fonksiyonel karmaşık yapılarda diğer problemlerdeki sonuç ilişkisinden efektif olarak kullanılması tercih edilir. Sonuçları diğer analitik veya deneysel yöntemlerle daha iyi kıyas yapılabilir.

## 4.2 Mesh

Mesh belirlenmiş bir bölgenin belli aralıklarla parçalara ayrılması işlemidir. Temel olarak bu işlem, denkleminin çözümünü kolaylaştırmak için yapılır. Çözüm eleman tipine ve eleman sayısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Meshleme işlemi yapılırken eleman sayısını artırmak simülasyon ortamında yapılan analizin süresini uzatır. Eleman sayısı az tutulduğunda ise sağlıklı bir çözümden uzaklaşılacaktır. Bu işlemde optimum eleman sayısını zamanı doğru kullanmak ve doğru sonuca ulaşmak için en önemli kriterdir. Bu bahsedilenlerden dolayı analiz programlarında meshleme en kritik aşamalardan biridir. Bu çalışmada model; 15804 adet nod'a ve 7556 adet element'e ayrılmıştır.



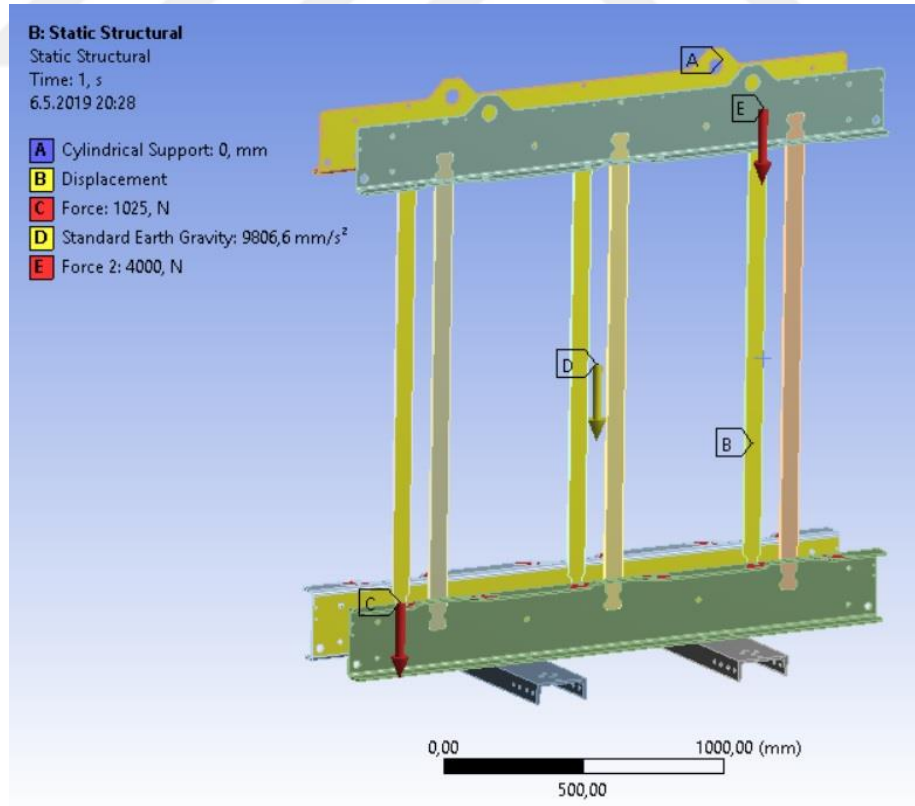
Şekil 4.2 : Model mesh görüntüsü.

## 5. ANALİZ

Analiz için , 1600 kVA gücünde 31,5/0,4 dönüşüm oranında, Dyn11 bağlantı tipine sahip kuru tip dökme reçineli transformatör uygun görülmüştür. Analizin ilk adımında yukarıda elektriksel özellikleri verilen transformatörün çelik parçalarının birbirine olan contact'ları ' No Seperation' olarak tanımlandı.

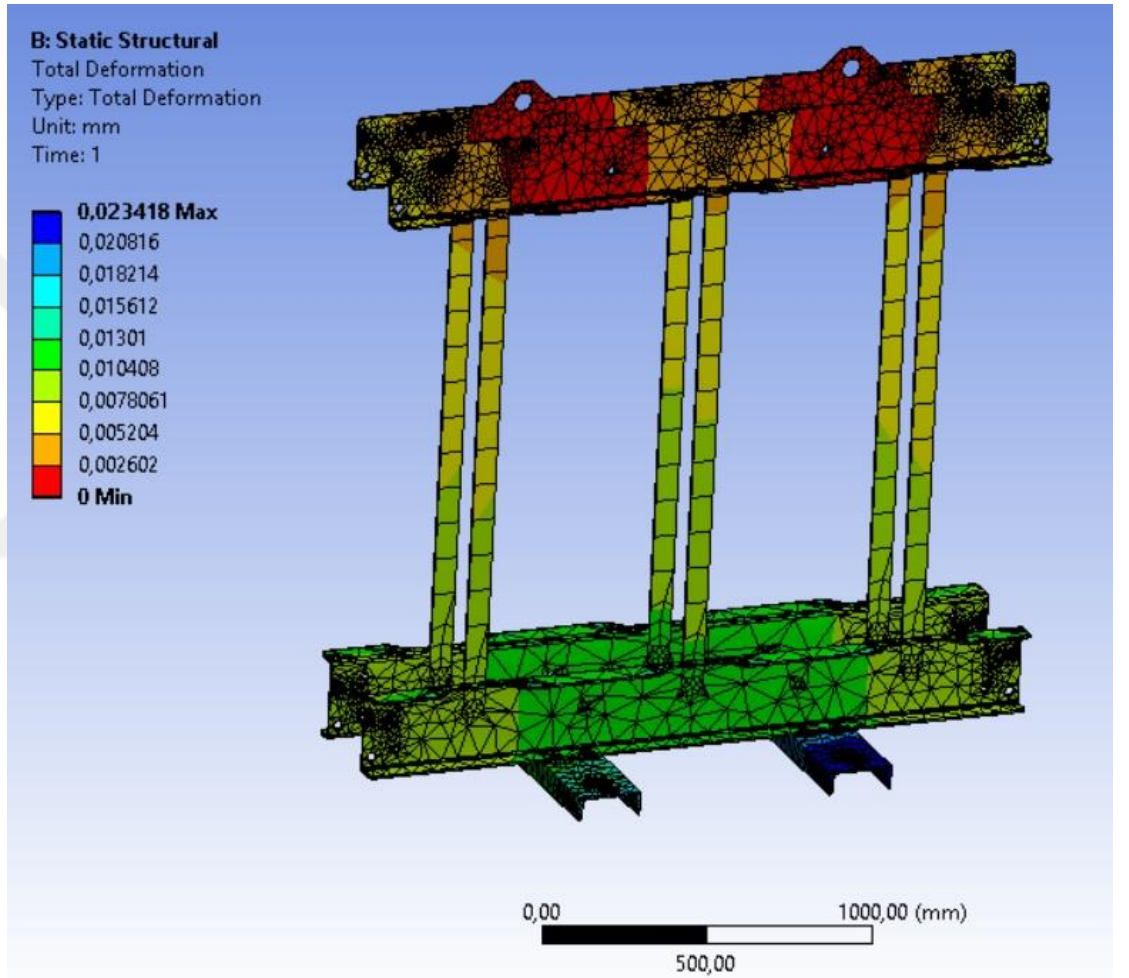
Parçaların birbirine olan montaj ilişkisi tanımlanıp oluşturulan iskelet üzerine kendi ağırlığından dolayı yer çekim kuvvetinden dolayı üzerine etkiyen 'Standart Earth Gravity' kuvveti eklendi.

Transformatör iskeletinde üst sıkıştırma demirlerinde yer alan kaldırma kulaklarına 'Cylindrical Support' tanımı verildi. Çelik parçalarının arasında nüve montajlı olduğu için Z yönünde yapacağı hareketler kısıtlandı. X ve Y yönünde serbest hareket edebilecek şekilde hareket serbestliği atandı. Transformatörün toplam ağırlığı parça üzerine, bobinlerin ağırlığı alt sıkıştırma demirinin üzerine tanımlandı.

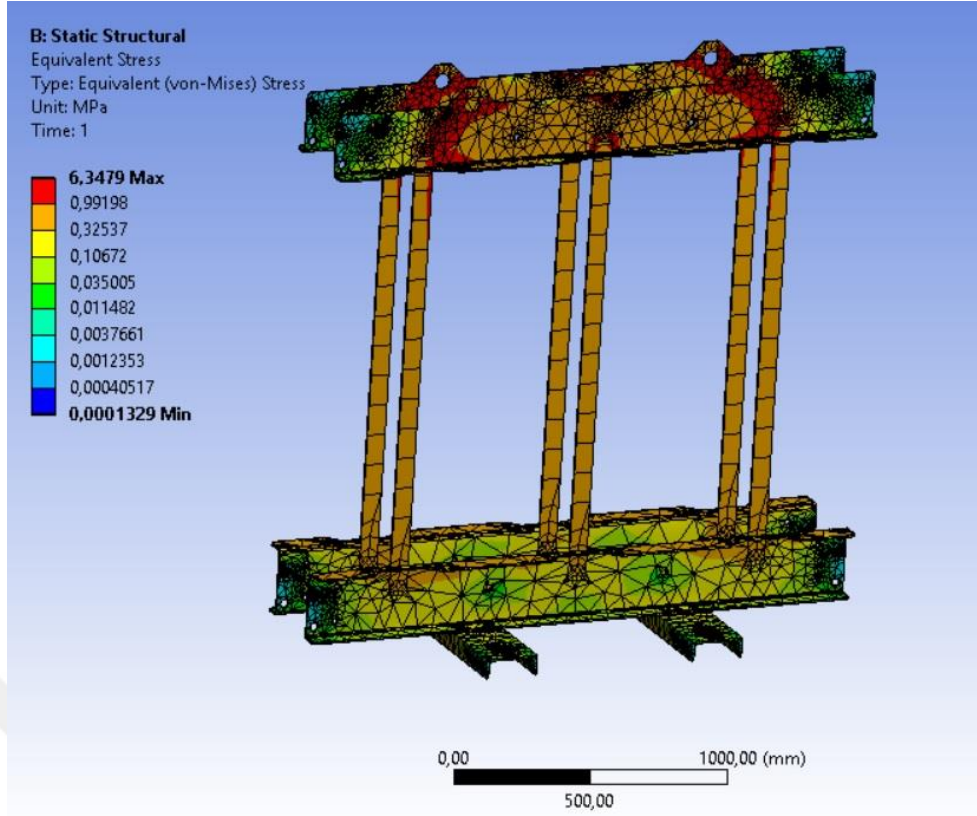


Şekil 5.1 : Analiz sınır koşulları.

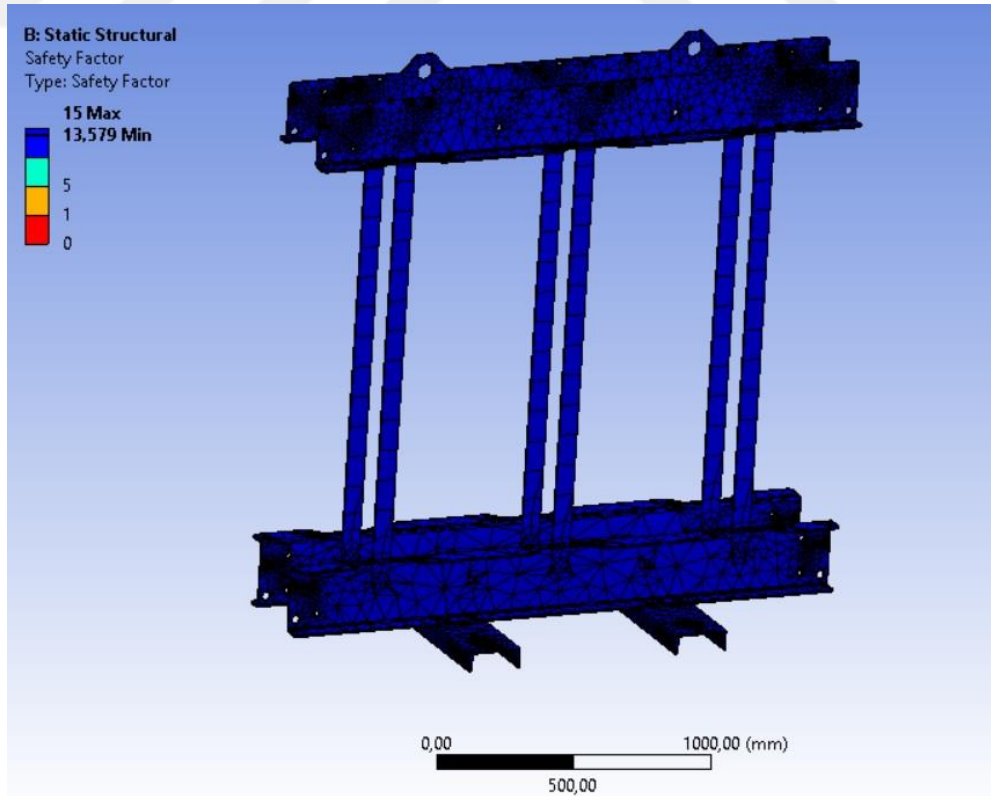
Belirtilen sınır koşullarından sonra analiz 'solve' komutuyla başlatıldı. Analiz başarılı bir şekilde analiz tamamlanıp, sonuçlar gözlemlendi. Sonuç kısmında toplam şekil değiştirmesine, maruz kaldığı Von-Misses gerilmeleri değerlendirilip ve modelin emniyet katsayıları yorumlandı.



**Şekil 5.2** : Toplam şekil değiştirme.



Şekil 5.3 : Von-Misses gerilme.



Şekil 5.4 : Emniyet katsayısı.



## 6. SONUÇ

Bu çalışmada elektriksel ve mekaniksel özellikleri belirtilmiş olan transformatör üzerinde Şekil-Ağırlık Optimizasyonu hedeflenmiştir. İşlem adımları önceki başlıkta verilen analizin sonuçları aşağıda yorumlanmıştır.

Transformatör, yükün en fazla etkidiği yani üst sıkıştırma demirindeki kaldırma kulaklarından havada asılı olduğu durumda anda; sonlu elemanlar metodu kullanılarak statik analiz uygulanmıştır.

Analiz kısmında model üzerine transformatör ağırlığı ve yer çekim kuvveti etkisi uygulanmıştır. Yük altındayken modelde meydana gelen Von-Misses gerilmeleri gözlemlenmiştir. Gerilmelerin; maximum 6,3479 MPa ve minimum  $1 \times 10^{-7}$  MPa değer aralığında olduğu belirlenmiştir. Modelin şekil değiştirmesi ise maximum  $1 \times 10^{-6}$  mm ile minimum 0 mm arasında bulunmuştur.

Bütün bu işlemler sonucunda kullanılan model, minimum 13 kat emniyetli çıkmıştır.

Belirtilen sınır koşullarında seçilen modele uygulanması planlanan optimizasyon için yeterli niteliklere sahip olduğu saptanmıştır.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] Bendsøe, M.P., Sigmund O., *Topology Optimization* : Springer-Verlag Berlin; Heidelberg , (2004).
- [2] Linari, M.I., “*Topology and Shape Optimization Seminar*”, (2012).
- [4] [online], (05/03/2019), <http://volkan.com.tr/volmagazine/topoloji-optimizasyonu>.
- [5] [online], (21/03/2019) , <https://caei.com/blog/what-topology-optimization-and-why-use-it>.
- [6] [online], (17/03/2019), <http://www.serdarkorkut.com/2017/06/08/topoloji-optimizasyonu-nedir-ne-zaman-kullanilir>.
- [7] Demirdelen, T., Kuru Tip Transformatör Optimizasyonuna Yeni Bir Yaklaşım: Ateş Böceği Algoritması, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (1), 87-96, (2018).
- [8] [online], (12/02/2019), <http://www.elektrikrehberiniz.com>.
- [9] [online], (14/02/2019), <https://giraybalci.wordpress.com>.
- [10] [online], (01/03/2019), <http://www.robotiksystem.com>.
- [11] Yıldız, A.R., Kaya, N. ve Öztürk, F., “Taşıt Elemanlarının Optimum Topoloji Yaklaşımı ile Tasarımı”, *Mühendis ve Makina*, 44, 23-28, (2004).
- [12] Weck, O.D., “*Structural Design Optimization Lecture Notes*”, (2005).
- [13] MSC Software, “*Nastran SOL200 Manual*”, (2007).