

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE FARKLI TASARIMLARIN
KISA DEVRE DAVRANIŞINA ETKİSİ**

ARDA KIZILDELİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Jüri Üyeleri: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kubilay EKER (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Murat Erhan BALCI
Doç. Dr. Aykut Fatih GÜVEN**

BALIKESİR, TEMMUZ – 2026

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Güç Transformatörlerinde Farklı Tasarımların Kısa Devre Davranışına Etkisi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Arda KIZILDEĞİ

ÖZET

**GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE FARKLI TASARIMLARIN KISA DEVRE
DAVRANIŞINA ETKİSİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ARDA KIZILDELİ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ MEHMET KUBİLAY EKER)**

BALIKESİR, TEMMUZ - 2026

Bu tez çalışmasında, güç transformatörlerinde farklı sargı geometrileri ve kademe bağlantılarının kısa devre davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada 50 MVA, 34,5/6,3 kV gerilim seviyesine sahip bir güç transformatörü referans alınmış; nüve yapısı, soğutma tipi ve temel anma değerleri sabit tutularak farklı tasarım durumları karşılaştırılmıştır.

Tasarımlar kısa devre empedansı, simetrik ve tepe kısa devre akımı, sargı akım yoğunluğu, yükte kayıplar, kısa devre sonu sıcaklıkları ve elektromanyetik kuvvetler açısından değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kısa devre empedansı ve kayıp sonuçları, analitik kısa devre ve mekanik zorlanma hesaplarıyla birlikte yorumlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, sargılar arası mesafe, ayar sargısının konumu, sarım sayısı, soğutma kanallarının varlığı ve aksiyel yerleşim gibi geometrik parametrelerin kısa devre performansını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Özellikle kısa devre empedansının azalması durumunda kısa devre akımı ve buna bağlı mekanik zorlanmalar artarken, aksiyel yerleşim değişikliklerinin toplam empedansı değiştirmese dahi uç itme kuvvetleri üzerinde kritik etkiler oluşturabildiği belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda, güç transformatörü tasarımında kısa devre davranışının yalnızca kısa devre empedansı değeri üzerinden değerlendirilmemesi gerektiği; kısa devre akımı, tepe akımı, termik zorlanma, çevresel gerilme, radyal eğilme, toplam aksiyel kuvvet ve uç itme kuvvetlerinin birlikte ele alınması gerektiği ortaya konulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Elektromanyetik kuvvetler, güç transformatörü, kısa devre, kısa devre empedansı, sargı geometrisi.

Bilim Kod / Kodları: 93412, 93413

Sayfa Sayısı: 82

ABSTRACT

THE EFFECT OF DIFFERENT DESIGNS ON SHORT-CIRCUIT BEHAVIOR IN POWER TRANSFORMERS

MSC THESIS

ARDA KIZILDELI

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. MEHMET KUBILAY EKER)

BALIKESİR, JULY - 2026

In this thesis, the effects of different winding geometries and tap winding connections on the short-circuit behavior of power transformers have been investigated. A 50 MVA, 34,5/6,3 kV power transformer has been selected as the reference design. The core structure, cooling type and main rated parameters have been kept constant, while different design cases have been compared.

The design cases have been evaluated in terms of short-circuit impedance, symmetrical and peak short-circuit currents, winding current density, load loss, final winding temperatures after short circuit and electromagnetic forces. The short-circuit impedance and loss results obtained by the finite element method have been interpreted together with analytical short-circuit and mechanical stress calculations.

The results have shown that geometrical parameters such as the distance between windings, the position of the tap winding, the number of turns, the presence of cooling ducts and the axial alignment of windings directly affect the short-circuit performance. It has also been observed that axial displacement may create critical end thrust forces even when the total short-circuit impedance remains almost unchanged.

As a result, the short-circuit behavior of power transformers should not be evaluated only by the short-circuit impedance value. Short-circuit current, peak current, thermal stress, hoop stress, radial bending stress, total axial force and end thrust force should be assessed together for a reliable transformer design.

KEYWORDS: Electromagnetic forces, power transformer, short circuit, short-circuit impedance, winding geometry.

Science Code / Codes: 93412, 93413

Page Number: 82

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	v
KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	vii
1. GİRİŞ	1
1.1 Transformatörlerde Kayıp Mekanizmaları ve Ekonomik Etkiler	2
1.2 Güç Transformatörlerinde Kısa Devre Problemi	5
1.3 Güç Transformatörlerinde Kısa Devre Akımları	7
1.4 Elektromanyetik Kuvvetlerin Oluşumu ve Mekanik Etkiler	8
1.5 Sargı Geometrisi ve Kısa Devre Davranışı Arasındaki İlişki	8
1.6 Kısa Devre Koşullarında Termik Zorlanmalar	10
1.7 Transformatör Empedansının Sistem Empedansı ile İlişkisi	11
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	13
3. REFERANS TASARIM OLARAK ELE ALINAN GÜÇ TRANSFORMATÖRÜ	17
3.1 Güç Transformatörünün Genel Teknik Özellikleri	17
3.2 Anma Akımları	18
3.3 Sargı Sırası ve Genel Yerleşim Düzeni	19
3.4 Alçak Gerilim (AG) Sargısının Yapısı ve Geometrisi	20
3.5 Yüksek Gerilim (YG) Sargısının Yapısı ve Geometrisi	21
3.6 Ayar Sargısının Yapısı ve Geometrisi	23
3.7 Kademe Yapısı ve Gerilim Ayar Aralığı	24
4. TASARIM DURUMLARI VE ANALİZ YAKLAŞIMI	31
4.1 SEY Modeli	33
4.2 Farklı Gerilim Kademesi Seviyelerinin İncelenmesi	36
4.3 Minimum Gerilim Kademesinde Sargılar Arası Radyal Mesafelerin Artırılması	37
4.4 Minimum Gerilim Kademesinde Ayar Sargısının İç Konuma Alınması	38
4.5 Minimum Gerilim Kademesinde Sarım Sayılarının Değiştirilmesi	41
4.6 Minimum Gerilim Kademesinde Eksenel Soğutma Kanallarının Kaldırılması	44
4.7 Minimum Gerilim Kademesinde Sargı Orta Nokta Mesafelerinin Dengelenmesi	45
5. BULGULARIN KARŞILAŞTIRILMASI	47
5.1 Üç Faz Kısa Devre Akımı Hesapları	51
5.2 Akım Yoğunluğu ve Kesit Bazlı Değerlendirme	55
5.3 Termik Değerlendirme (θ_1)	57
5.4 Elektromanyetik Kuvvetler ve Mekanik Gerilmelerin Hesabı	59
5.4.1 Ortalama çevresel çekme ve basma gerilmeleri	60
5.4.2 Çıtalar arasında kalan iletken grupları için radyal eğilme etkisinin değerlendirilmesi	63
5.4.3 Aksiyel kuvvetlerin değerlendirilmesi	66
5.4.4 Uç itme kuvvetleri	68
6. SONUÇLAR	72
7. KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Türkiye ve Avrupa için elektrik birim enerji maliyetlerinin karşılaştırılması	4
Şekil 3.1: Referans alınan 50 MVA güç transformatörünün genel görünümü	17
Şekil 3.2: Referans tasarımda sargıların nüveye göre yerleşimi	19
Şekil 3.3: Referans tasarımda sargılar arası radyal mesafeler.....	20
Şekil 3.4: Karşılaştırma amacıyla kullanılacak basitleştirilmiş sargı yerleşim şeması	20
Şekil 3.5: AG kat sargısının genel görünümü	21
Şekil 3.6: YG disk sargısının genel görünümü	22
Şekil 3.7: Ayar sargısı ve kademe uçlarının gösterimi.....	24
Şekil 3.8: Ayar sargısında artı ve eksi yön bağlantıları ile kademe yapısı.....	25
Şekil 3.9: Maksimum gerilim kademesinde ayar sargısı bağlantısı.....	26
Şekil 3.10: Nominal gerilim kademesi için birinci bağlantı durumu.....	27
Şekil 3.11: Nominal gerilim kademesi için ikinci bağlantı durumu.....	28
Şekil 3.12: Nominal gerilim kademesi için ayar sargısının boşta olduğu durum	29
Şekil 3.13: Minimum gerilim kademesinde ayar sargısı bağlantısı	30
Şekil 4.1: Detaylı analiz modeli	34
Şekil 4.2: İndirgenmiş analiz modeli	35
Şekil 4.3: Referans tasarımda sargılar arası radyal mesafe düzeni	38
Şekil 4.4: Durum-4 için sargılar arası radyal mesafe düzeni	38
Şekil 4.5: Referans tasarımda sargı yerleşimi	39
Şekil 4.6: Durum-5 için ayar sargısının iç konuma alınması	39
Şekil 4.7: Durum-5'te fazlar arası YG sargı yakınlığının genel görünümü	40
Şekil 4.8: Durum-5'e ait fazlar arası bölgenin detay görünümü	40
Şekil 4.9: Referans tasarımda sarım sayısına bağlı sargı yerleşimi	43
Şekil 4.10: Durum-6 için sarım sayısı değişikliğine bağlı sargı yerleşimi	43
Şekil 4.11: Referans tasarımda eksenel soğutma kanallı sargı yerleşimi.....	44
Şekil 4.12: Durum-7 için eksenel soğutma kanallarının kaldırıldığı sargı yerleşimi.....	45
Şekil 4.13: Referans tasarımda aksiyel sargı konumu	45
Şekil 4.14: Durum-8 için aksiyel sargı konumu değişimi.....	46

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1: Minimum gerilim kademesinde sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları	36
Tablo 4.2: Nominal gerilim kademesinde sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları	36
Tablo 4.3: Maksimum gerilim kademesinde sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları	37
Tablo 4.4: Sargılar arası mesafenin artırıldığı durumda kayıp değerleri ve ağırlıkları.....	38
Tablo 4.5: Ayar sargısının içte olduğunda sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları	39
Tablo 4.6: Sarım sayısı alternatiflerinin gerilim sapması açısından karşılaştırılması.....	42
Tablo 4.7: Sarım sayılarının düşürüldüğü durumda sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları	44
Tablo 4.8: Soğutma kanallarının olmadığı durumda sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları ...	45
Tablo 4.9: Sargı ortalarının birbirine denklediği sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları	46
Tablo 5.1: Sargı kayıpları ve ağırlıklarının karşılaştırılması	47
Tablo 5.2: Kısa devre empedansı, toplam sargı kaybı ve sargı ağırlığı karşılaştırması.....	49
Tablo 5.3: Simetrik ve tepe kısa devre akımları	53
Tablo 5.4: Kısa devre akım yoğunlukları.....	56
Tablo 5.5: Kısa devre sonu iletken sıcaklıkları.....	58
Tablo 5.6: Ortalama çevresel basma ve çekme gerilmeleri	61
Tablo 5.7: Çıtalar arası radyal eğilme gerilmeleri	64
Tablo 5.8: Bacak başına toplam aksiyel kuvvetler	67
Tablo 5.9: Uç itme kuvvetleri	70

KISALTMALAR LİSTESİ

AC	: Alternatif akım
AG	: Alçak gerilim
CTC	: Continuously Transposed Conductor
DC	: Doğru akım bileşeni
IEC	: International Electrotechnical Commission
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
I_{peak}	: Tepe kısa devre akımı
I_{sc}	: Simetrik kısa devre akımı
J	: Akım yoğunluğu
kA	: Kiloamper
kN	: Kilonewton
kV	: Kilovolt
kW	: Kilowatt
MVA	: Megavolt amper
N/mm²	: Gerilme birimi
ONAF	: Oil Natural Air Forced soğutma modu
ONAN	: Oil Natural Air Natural soğutma modu
RMS	: Etkin değer
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
u_k	: Kısa devre gerilimi / bağıl kısa devre empedansı
YG	: Yüksek gerilim

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, güç transformatörlerinde farklı sargı geometrisi ve kademe düzenlerinin kısa devre davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın hazırlanması sürecinde transformatör tasarımı, kısa devre dayanımı ve elektromanyetik analiz konularında edinilen teknik altyapı, görev yaptığım BEST A.Ş. Ar-Ge birimindeki çalışma ortamı ve mühendislik birikimi ile desteklenmiştir.

Başta tez çalışmam boyunca bilgi, tecrübe ve yönlendirmeleriyle bana yol gösteren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kubilay Eker'e teşekkür ederim. Çalışmanın teknik kapsamının oluşturulmasında ve değerlendirilmesinde sağladığı katkılar benim için değerli olmuştur.

Transformatör mühendisliği alanındaki bilgi ve uygulama tecrübemin gelişmesine katkı sağlayan BEST A.Ş. Ar-Ge bölümündeki yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu süreçte edindiğim teknik bakış açısı, tez çalışmasının şekillenmesinde önemli rol oynamıştır.

Hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen annem Cemile Kızıldeli'ye, babam Sadık Kızıldeli'ye ve ablam Zeynep Daşık'e teşekkür ederim. Sabırları, güvenleri ve destekleri bu çalışmanın tamamlanmasında en büyük motivasyon kaynaklarımdan biri olmuştur.

Balıkesir, 2026

Arda Kızıldeli

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin büyük ölçekte ekonomik olarak depolanmasının sınırlı olması, üretim ve tüketim dengesinin anlık korunmasını zorunlu kılar. Bu sistemlerde görev alan ekipmanların yalnızca normal işletme koşullarında değil, aynı zamanda arıza durumlarında da güvenli bir şekilde çalışması zorunludur. Bu gereklilik, güç sistemleri tasarımında güvenilirlik ve dayanım kavramlarının temel tasarım kriterleri arasında yer almasına neden olmaktadır.

Güç sistemleri; üretim tesisleri, iletim şebekeleri, transformatör merkezleri gibi farklı ekipmanların bulunduğu yapılardan oluşur. Bu yapılar arasında transformatörler, farklı gerilim değerlerinin birbirine dönüştürülmesi ile birlikte enerji aktarımını sağlayarak sistemlerin daha verimli ve sürekli işletilebilmesine imkân verir. Gerilim seviyesinin yükseltilmesi ile iletim kayıpları azaltılırken, tüketim noktalarında gerilimin uygun seviyelere düşürülmesi sağlanır. Transformatörlerin sistemdeki görevi yalnızca gerilim dönüşümü ile sınırlı değildir. Aynı zamanda güç akışı, gerilim regülasyonu, kısa devre seviyesi, koruma koordinasyonu ve işletme güvenliği üzerinde doğrudan etkileri bulunmaktadır [1].

Transformatörler; anma gücü, gerilim seviyesi, bağlantı grubu, soğutma tipi ve kullanım amacına göre farklı kullanım sınıflarında değerlendirilmektedir [2], [3], [4]. İletim seviyesinde görev yapan güç transformatörleri, yüksek gerilim ve yüksek güç değerleri altında çalıştıkları için hem yatırım maliyeti hem de sistem sürekliliği açısından kritik ekipman niteliğindedir. Bu ekipmanlarda meydana gelen bir arıza, yalnızca bağlı bulunduğu transformatör merkezini değil, geniş ölçekli enerji iletimini ve yük besleme sürekliliğini de etkileyebilmektedir.

Dünya genelinde nüfus artışı, kentleşme ve teknolojik gelişmeler, elektrik enerjisi talebini artırmakta ve güç sistemlerinin daha yüksek yüklenme seviyelerinde işletilmesine neden olmaktadır. Talep artışı, üretim tesislerindeki çeşitlilik, transformatör işletme koşullarını daha değişken hale getirmiştir. Talep artışı ve üretim yapısındaki değişim, iletim ve dağıtım altyapılarında daha esnek işletme koşulları gerektirmektedir. Bu değişkenlik, kısa devre seviyelerinin ve arıza anındaki akım yollarının tasarım aşamasında daha dikkatli ele alınmasını gerektirir.

Modern güç sistemlerinde işletme sürekliliği, arıza anında devrede kalan ekipmanların güvenli çalışma sınırları içinde kalabilmesine bağlıdır. İletim ve dağıtım ekipmanlarında meydana gelen arızalar, yalnızca ekipman hasarı ile sınırlı kalmaz; enerji kesintisi, yük kaybı ve işletme maliyeti artışı gibi sonuçlar da doğurur. Özellikle endüstriyel tesislerde kısa süreli enerji kesintileri dahi üretim kaybına ve ekipman hasarına yol açabilmektedir. Bu nedenle modern güç sistemlerinde güvenilirlik, yalnızca enerji sürekliliği değil, arıza koşullarında ekipmanların güvenli sınırlar içinde kalabilmesi olarak da değerlendirilmelidir. Bu nedenle iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanılan ekipmanların arıza koşullarındaki davranışı, tasarım aşamasında dikkate alınması gereken temel tasarım kriterleri arasında yer almasına neden olmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında güç transformatörlerinin arıza koşullarındaki davranışı, sistem güvenilirliği açısından doğrudan bir tasarım girdisi olarak ele alınmalıdır.

Güç transformatörleri, arıza ve kısa devre durumlarında yüksek akımların oluşturduğu kaçak akı, elektromanyetik kuvvetler ve mekanik zorlanmalara maruz kalmaktadır. Bu kapsamda güç transformatörleri, normal çalışma durumlarındaki koşullarda sağlanan verim ve kayıp değerleri yanında, kısa devre gibi geçici rejimlerde oluşan elektriksel, termik ve mekanik zorlanmalarla bir arada değerlendirilmelidir. Bu nedenle transformatör tasarımında sargı yerleşimi, kısa devre empedansı ve kaçak akı dağılımı birlikte dikkate alınmalıdır [5],[6].

Bu tezde, 50 MVA, 34,5/6,3 kV gerilim seviyesine sahip bir güç transformatörü referans alınarak, farklı sargı geometrileri ve kademe bağlantılarının kısa devre davranışı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Çalışmada referans transformatörün, nüve yapısı, soğutma tipi ve temel anma değerleri sabit tutularak farklı tasarım durumları açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Kısa devre esnasında, sargı yerleşimi, kademe sargısının konumu ve sargılar arası mesafe değişikliğinin etkisi, yalnızca kısa devre akımının büyüklüğü üzerinden değil aynı zamanda kısa devre empedansı, kaçak akı dağılımı ve sargılarda oluşan elektromanyetik kuvvetler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla aynı anma gücüne sahip referans transformatör üzerinde farklı kademe durumları ve sargı değişiklikleri yapılarak, geometrik değişikliklerin kısa devre performansına etkisi incelenmiştir.

1.1 Transformatörlerde Kayıp Mekanizmaları ve Ekonomik Etkiler

Bu çalışmada nüve yapısı ve nüve malzemesi sabit tutulduğu için, karşılaştırmalar ağırlıklı olarak sargılardaki enerjilendirmeden ötürü oluşan yük kayıpları ve ek kayıplar üzerinden

değerlendirilmiştir. Boşta kayıp değerleri transformatör enerji altında olduğu sürece nüve malzemesine bağlı olarak oluşurken, yükte kayıp kazan içerisindeki aktif kısımda sargılardan geçen akım ve kazan içerisindeki sargı yerleşimiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle farklı sargı yerleşimlerinin kayıp davranışına etkisi, kısa devre performansı ile birlikte ele alınmıştır [7].

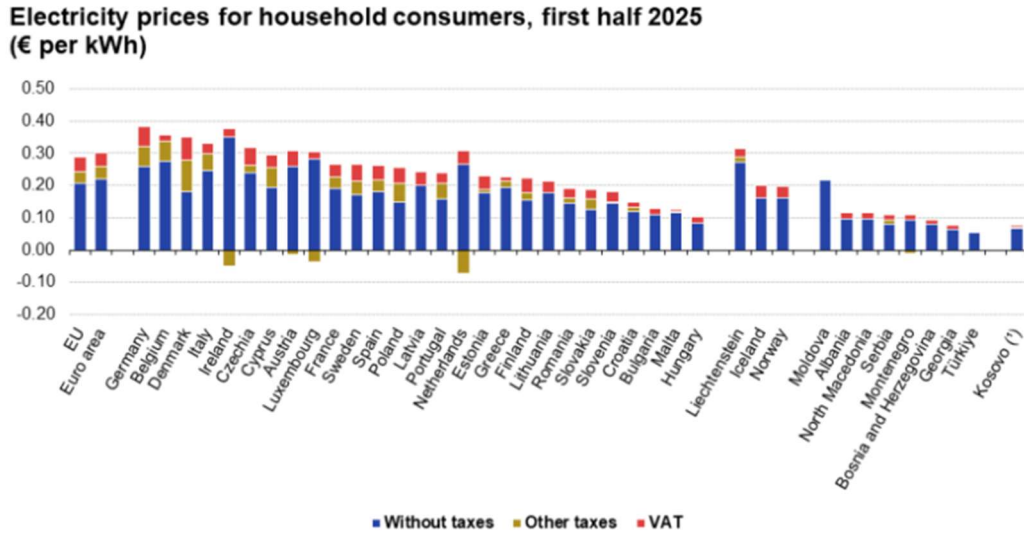
Bakır kaybı, sargı direnci değeri üzerinden oluşan ve I^2R olarak ifade edilen kayıp ifadesidir. Aynı akım değerinde iletken kesitinin düşürülmesi, direnç ve akım yoğunluğunu artırırken, iletken uzunluğundaki artış ise toplam sargı direncini yükseltir. Bu nedenle sargı geometrisinde yapılan değişiklikler, yalnızca mekanik yerleşimi değil, yük kaybı seviyesini de doğrudan etkiler.

Ek kayıplar, kaçak manyetik alanın sargı iletkenlerinde ve yakın metal yapılarda oluşturduğu girdap akımlarından kaynaklanır. Kaçak akının dağılımı; sargılar arası mesafe, sargı sırası, radyal konum ve sargı boyu gibi geometrik parametrelere bağlıdır. Bu nedenle ek kayıplar, yalnızca akım büyüklüğüyle değil, kaçak akının hangi bölgelerde yoğunlaştığıyla birlikte değerlendirilmelidir [8].

Sargı geometrisi, kayıp seviyesi ile kısa devre dayanımı arasında doğrudan bir tasarım dengesi oluşturur. Örneğin sargılar arası mesafenin artırılması kısa devre empedansını yükselterek kısa devre akımını azaltabilir; ancak aynı değişiklik ortalama sarım uzunluğunu ve kaçak akı yolunu da değiştirdiği için yük ve ek kayıplarda farklı sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle çalışmada her tasarım durumu yalnızca u_k değeriyle değil, akım yoğunluğu, kayıp ve elektromanyetik kuvvet sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. [9]. Transformatörler uzun servis ömrüne sahip ekipmanlardır. Bu nedenle küçük görünen kayıp farkları, 20–30 yıllık işletme süresi boyunca ciddi enerji maliyetine dönüşebilir.

Güç transformatörlerinin tasarımında verimlilik ve kayıpların azaltılması, yalnızca teknik bir performans kriteri değil, aynı zamanda uzun vadeli ekonomik sonuçlar doğuran temel bir problemdir. Güç Transformatörlerinde ele alınan boşta ve yükte kayıplar, ekipmanın tüm servis ömrü boyunca sürekli olarak enerji tüketimine sebebiyet vermektedir. Böylelikle transformatörün işletmeye olan toplam maliyetinin çok büyük bir kısmı transformatörün devreye alınmasından devreden çıkarılmasına kadar olan süreçteki kayıplardan gelen maliyete denk gelmektedir.

Elektrik enerjisi birim maliyetlerinin artmasıyla birlikte, özellikle yüksek güç seviyelerinde ve yaygın olarak kullanılan transformatör tasarımlarında oluşan kayıpların ekonomik etkisi daha belirgin hâle gelmektedir. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi, ülkemizdeki elektrik enerjisi maliyeti ortalama olarak yaklaşık 4 TL/kWh, Avrupa ülkelerinde ise yaklaşık 0,3 €/kWh seviyesindedir [10]. Güncel döviz kurları dikkate alındığında bu değer Avrupa için yaklaşık 13 TL/kWh’ye karşılık gelmektedir.



Şekil 1.1: Türkiye ve Avrupa için elektrik birim enerji maliyetlerinin karşılaştırılması

Bir güç transformatöründe her 1 kW’lık fazladan sürekli güç kaybı, yılda yaklaşık 8.760 kWh enerji tüketimine, yaklaşık 25 yıllık servis ömrü dikkate alındığında ise toplam 219.000 kWh seviyelerinde fazladan elektrik enerjisi kullanımına neden olmaktadır. Türkiye’deki elektrik fiyatları dikkate alındığında, yalnızca 1 kW’lık ek kaybın 25 yılda oluşturduğu toplam güncel maliyet yaklaşık 1 milyon TL mertebesinde. Şekilde verilen enerji fiyatları baz alındığında ise bu maliyet Avrupa ülkeleri için çok daha yüksek seviyelere çıkmaktadır. Bu durum, aynı kayıp seviyesinin farklı ülkelerde çok farklı ekonomik sonuçlar doğurduğunu da göstermektedir.

Avrupa Birliği Ecodesign Tier 2 düzenlemeleri, güç transformatörlerinde izin verilen boşa ve yükte kayıp seviyelerini sınırlandırarak enerji verimliliğinin artırılmasını hedeflemektedir [11]. Bu düzenlemeler, transformatör tasarımında yalnızca ilk yatırım maliyetinin değil, işletme ömrü boyunca oluşan enerji kayıplarının da dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle yüksek güçlü transformatörlerde küçük seviyedeki kayıp farkları dahi uzun servis süresi boyunca önemli bir enerji tüketimine ve ekonomik maliyete karşılık gelmektedir. Bu

nedenle transformatör tasarımında kayıp optimizasyonu, verimlilik ve yaşam döngüsü maliyeti açısından temel tasarım kriterlerinden biri haline gelmiştir.

Kayıpların azaltılması amacıyla yapılan geometrik veya iletken kesiti odaklı değişiklikler, kısa devre davranışını da etkileyebilmektedir. Sargı yerleşimi, sargılar arası mesafe, iletken kesiti ve ortalama sarım uzunluğu gibi parametreler; yük kayıplarını, kısa devre empedansını, kaçak akı dağılımını ve elektromanyetik kuvvetleri birlikte değiştirmektedir. Bu nedenle düşük kayıp hedefi ile kısa devre dayanımı birbirinden bağımsız tasarım başlıkları olarak değerlendirilmemelidir. Bu çalışmada farklı sargı ve kademe durumları karşılaştırılırken, yalnızca kayıp değerleri değil; uk, kısa devre akımı, akım yoğunluğu ve elektromanyetik kuvvet sonuçları da birlikte incelenmiştir. Böylece Ecodesign yaklaşımıyla uyumlu düşük kayıp hedefinin, kısa devre performansı üzerindeki etkileri tasarım bütünlüğü içerisinde değerlendirilmiştir.

Güç transformatörleri, uzun servis ömürleri boyunca çok sayıda geçici ve kalıcı zorlanmaya maruz kalmaktadır. Yük değişimleri, termik çevrimler ve özellikle kısa devre arızası durumlarında, transformatörün mekanik bütünlüğü ve yalıtım sistemi zaman içerisinde zayıflayabilmektedir.

Sonuç olarak, güç transformatörlerinde verim, kayıp ve güvenilirlik kavramları doğrudan birbirine bağlıdır. Kayıpların azaltılması, uzun vadeli ekonomik faydalar sağlarken; kısa devre dayanımı ve mekanik güvenilirlik, transformatörün bu ekonomik faydayı güvenli bir servis ömrü boyunca sürdürebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu nedenle tasarım sürecinde kayıp seviyesi ile kısa devre dayanımı birlikte ele alınmalıdır.

1.2 Güç Transformatörlerinde Kısa Devre Problemi

Kısa devre, şebekede meydana gelen düşük empedanslı arızalar sonucunda transformatör sargılarından çok yüksek genlikli akımların geçmesiyle ortaya çıkan, süre olarak kısa ancak etkileri bakımından son derece yıkıcı olabilen bir durumdur. Bu nedenle kısa devre durumu, normal işletme koşullarından ayrı bir tasarım sınırı olarak incelenmektedir. Güç transformatörlerinin kısa devre davranışının doğru şekilde modellenmesi ve değerlendirilmesi; tasarım güvenilirliğinin sağlanması, arıza anındaki elektromanyetik kuvvetlerin sınırlandırılması ve yalıtım sisteminin servis ömrünün korunması açısından kritik öneme sahiptir.

Kısa devre anında sargılardan geçen akım, normal işletme akımına göre birkaç kat artmakta ve bu artış, özellikle sargılar arası kaçak akıdan dolayı oluşan manyetik alan bölgesinde mekanik zorlanmayı büyötmektedir. Oluşan manyetik alan ile sargı akımlarının etkileşimi sonucunda, sargıların konumuna bağılı olarak radyal yönde genişleme veya sıkışma, eksenel yönde ise baskı ve uç itme etkileri ortaya çıkmaktadır [12]. Oluşan kuvvetler, sargıların dairesel bütönlüğünü zorlayarak genişleme, burkulma veya yer değıştirme gibi mekanik deformasyonlara yol açabilmektedir. Bu tür deformasyonlar, ilk aşamada fark edilmese dahi, uzun vadede yalıtım hasarları ve ciddi arızaların tetikleyicisi olabilmektedir.

Kısa devre sırasında oluşan elektromanyetik zorlanmaların büyüklüğü yalnızca kısa devre akımının genliğine bağılı değıldir. Sargı geometrisi, sargılar arası mesafeler, sargı sırası, sargı boyu ve sargıların nüveye göre yerleşimi gibi tasarımsal parametreler, kaçak manyetik alanın dağılımını belirleyerek elektromanyetik kuvvetlerin büyüklüğünü ve yönünü doğrudan etkilemektedir [9]. Bu nedenle kısa devre davranışı, elektriksel empedans, kaçak akı dağılımı ve mekanik dayanım birlikte değıerlendirilerek incelenmelidir.

Kısa devre olayının bir diğıer önemli boyutu termik etkileridir. Yüksek kısa devre akımları, sargılarda ani Joule kayıplarına ve ek kayıpların artmasına neden olmakta; bu durum kısa süre içerisinde iletken sıcaklığında belirgin artışlara yol açmaktadır. Her ne kadar kısa devre süresi genellikle birkaç saniye ile sınırlı olsa da bu süre boyunca oluşan etkiler, iletken ve yalıtım sisteminin termik dayanım sınırlarını zorlayabilmektedir. Bu termik zorlanmalar, mekanik zorlanmalarla birleştğinde transformatörün güvenli işletme sınırlarını daha da daraltmaktadır.

Güç transformatörlerinde kısa devre dayanımı, uluslararası standartlarda tanımlanan kriterler çerçevesinde değıerlendirilmekte olup, bu dayanım transformatörün servis ömrü boyunca güvenli bir şekilde çalışabilmesi açısından kritik öneme sahiptir [12],[13],[14],[15]. Kısa devreye karşı yeterli dayanım seviyesine sahip olmayan bir transformatör, yüksek verim ve düşük kayıp değıerlerine sahip olsa dahi, güvenilir bir ekipman olarak kabul edilemez. Bu durum, kısa devre probleminin transformatör tasarımında vazgeçilmez bir tasarım girdisi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, güç transformatörlerinde kısa devre problemi; yüksek akımların neden olduğı elektromanyetik kuvvetler, bu kuvvetlerin sargı geometrisi ile etkileşimi ve buna eşlik eden

termik zorlanmaların birlikte değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu sürecin doğru şekilde analiz edilmesi hem transformatörün mekanik bütünlüğünün korunması hem de uzun vadeli işletme güvenliğinin sağlanması açısından temel bir mühendislik gerekliliğidir.

Bu çalışmada kısa devre durumu incelenen 50 MVA güç transformatöründe, sargı geometrisine bağlı olarak değişen elektriksel, termik ve mekanik zorlanmaların ortak sonucu dikkate alınarak inceleme yapılmaktadır.

1.3 Güç Transformatörlerinde Kısa Devre Akımları

Güç transformatörlerinde kısa devre akımının büyüklüğü, transformatörün bağlandığı sistemin kısa devre gücü ve transformatörün kısa devre empedansı tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle kısa devre akımı, yalnızca şebeke karakteristiklerinin değil, aynı zamanda transformatörün tasarımsal özelliklerinin de bir sonucudur [16], [17], [18], [19].

Sargıların yerleşimi, aralarındaki mesafe ve buna bağlı oluşan kaçak reaktans da kısa devre akımının seviyesini etkileyen temel tasarım girdileridir. Özellikle mevcut ve üretilmiş bir transformatör tasarımı üzerinde yapılan geometrik revizyonların kısa devre akımı üzerindeki etkilerinin nicel olarak değerlendirilmesi, güvenilir bir karşılaştırma yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Transformatörün kısa devre empedansı (u_k), kısa devre akımını sınırlayan temel parametrelerden biridir. u_k değeri, sargılar arasındaki kaçak manyetik alanın büyüklüğüne ve dağılımına bağlı olup, doğrudan sargı geometrisi ve yerleşimi ile ilişkilidir [9]. Sargı sayısı, sargılar arası mesafeler, sargı boyları ve sargıların nüveye göre konumlandırılması gibi tasarımsal parametrelerde yapılan değişiklikler, u_k değerinde farklılıklara neden olmakta ve buna bağlı olarak kısa devre akımının genliği değişmektedir.

1.4 Elektromanyetik Kuvvetlerin Oluşumu ve Mekanik Etkiler

Kısa devre sırasında sargılardan geçen yüksek genlikli akımlar, transformatör içerisinde yoğun manyetik alanların oluşmasına neden olmaktadır. Sargı akımı ile kaçak manyetik alanın etkileşimi sonucunda, her sargı kendi geometrik konumuna bağlı olarak radyal ve eksenel yönde elektromanyetik zorlanmaya maruz kalmaktadır. Bu nedenle kısa devre akımındaki artış, mekanik zorlanmalara doğrusal değil, karesel karakterde yansımakta; özellikle düşük u_k değerine sahip tasarım durumlarında kuvvet seviyeleri belirgin biçimde yükselmektedir [20].

Radyal kuvvetler, sargının iç veya dış konumda bulunmasına göre farklı mekanik etki oluşturmaktadır; içteki sargılarda basma ve burkulma eğilimi, dıştaki sargılarda ise çevresel çekme ve genişleme eğilimi öne çıkmaktadır. Bu kuvvetler, özellikle iç ve dış sargılar arasındaki kaçak manyetik alan etkileşimlerinden kaynaklanmakta ve sargıların dairesel bütünlüğünü zorlamaktadır. Eksenel kuvvetler ise sargıların düşey eksen boyunca oluşmakta ve özellikle sargı boylarının, aksiyel merkezlerinin veya amper-sarım dağılımlarının dengeli olmadığı durumlarda uç bölgelerde daha belirgin hale gelmektedir [12].

Bu nedenle kısa devre kuvvetleri değerlendirilirken yalnızca akım genliği yeterli değildir. Kaçak akının sargılar arasındaki dağılımı, sargıların radyal konumu ve eksenel hizalanması da mekanik zorlanmaların büyüklüğünü belirlemektedir [9].

1.5 Sargı Geometrisi ve Kısa Devre Davranışı Arasındaki İlişki

Bu tezde sargı geometrisi, kısa devre davranışını değiştiren ana tasarım değişkenlerinden biri olarak ele alınmıştır. Sargı sayısı, sargı sırası, sargı boyu, sargılar arası mesafeler ve sargıların nüveye göre konumlandırılması, transformatör içerisindeki kaçak manyetik alanın büyüklüğünü ve dağılımını doğrudan etkilemektedir [9]. Bu parametreler, kısa devre empedansını, kısa devre akımını ve elektromanyetik kuvvetlerin büyüklüğünü doğrudan değiştirmektedir.

Kısa devre empedansı, esas olarak sargılar arasında oluşan kaçak manyetik alanın bir sonucudur. Sargı geometrisi, bu kaçak alanın hangi bölgelerde yoğunlaşacağını ve hangi manyetik yollar üzerinden kapanacağını belirlemektedir. Sargılar arası mesafenin artırılması, kaçak akı yolunu uzatarak kısa devre empedansının artmasına neden olurken; daha kompakt

sargı yerleşimleri kaçak akıyı azaltarak kısa devre empedansını düşürebilmektedir. Bu değişimler, kısa devre akımının genliğini ve buna bağlı olarak oluşan elektromanyetik kuvvetleri doğrudan etkilemektedir.

Sargı sırası da kısa devre davranışı açısından kritik bir parametredir. İç ve dış sargıların yer değiştirmesi, kaçak akı dağılımını ve elektromanyetik kuvvetlerin yönünü değiştirebilmektedir. Özellikle kısa devre sırasında iç sargı üzerinde oluşan radyal kuvvetler ile dış sargı üzerinde oluşan çekme veya itme kuvvetleri, sargı sırasına bağlı olarak farklı büyüklükler gösterebilmektedir. Bu durum, sargıların mekanik dayanımı ve destek yapılarının tasarımı açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır.

Sargı boyu ve sargı yüksekliği, kısa devre sırasında oluşan eksenel kuvvetlerin dağılımını belirleyen temel geometrik parametreler arasında yer almaktadır. Sargı boyunun artması, eksenel yönde oluşan elektromanyetik kuvvetlerin büyüklüğünü ve sargı uç bölgelerinde yoğunlaşmasını etkileyebilmektedir. Bu nedenle sargı boyu, yalnızca elektriksel performans açısından değil, kısa devre sırasında ortaya çıkan mekanik zorlanmalar açısından da dikkatle değerlendirilmesi gereken bir tasarım parametresidir.

Sargı geometrisindeki değişiklikler, yalnızca elektromanyetik kuvvetleri değil, aynı zamanda sargı üzerinde oluşan akım yoğunluğu dağılımını ve yerel ısınma bölgelerini de etkilemektedir. Kaçak akının yoğunlaştığı bölgelerde ek kayıplar artmakta, bu durum kısa devre sırasında termik zorlanmaların yerel olarak yükselmesine neden olabilmektedir. Dolayısıyla sargı geometrisi, kısa devre davranışını elektriksel, mekanik ve termik boyutlarıyla birlikte etkileyen çok yönlü bir tasarım değişkenidir.

Endüstriyel uygulamalarda, mevcut bir transformatör tasarımı üzerinde yapılan küçük geometrik revizyonlar çoğu zaman üretim kolaylığı veya maliyet gerekçeleriyle tercih edilmektedir. Ancak bu tür değişikliklerin kısa devre davranışı üzerindeki etkileri, çoğu zaman nitel değerlendirmelerle sınırlı kalmaktadır. Oysa sargı geometrisinde yapılan sınırlı değişiklikler dahi, kısa devre empedansı, elektromanyetik kuvvetler ve termik zorlanmalar üzerinde beklenenden daha büyük etkilere yol açabilmektedir. Bu durum, sargı geometrisinin kısa devre davranışı üzerindeki etkilerinin nicel ve karşılaştırmalı olarak incelenmesini gerekli kılmaktadır.

Sonuç olarak, sargı geometrisi güç transformatörlerinde kısa devre davranışını belirleyen temel tasarım parametrelerinden biri olup, kısa devre empedansı, elektromanyetik kuvvetler ve termik etkiler arasında bir köprü görevi görmektedir. Bu çalışmada, sargı yerleşimi ve kademe bağlantısındaki değişikliklerin kısa devre empedansı, kısa devre akımı, akım yoğunluğu ve elektromanyetik kuvvetler üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

1.6 Kısa Devre Koşullarında Termik Zorlanmalar

Güç transformatörlerinde kısa devre sırasında sargılardan geçen yüksek genlikli akımlar, iletkenlerde kısa süreli ancak yoğun Joule kayıplarına neden olmakta ve iletken sıcaklığında ani artışlar oluşturmaktadır. Bu nedenle kısa devre dayanımının değerlendirilmesinde, elektromanyetik ve mekanik etkilerin yanı sıra, kısa süreli termik zorlanmalar da dikkate alınmalıdır. IEC 60076-5 standardında bu değerlendirme, kısa devre süresince oluşan akım yoğunluğuna dayalı sıcaklık artışı yaklaşımı ile tanımlanmaktadır [12]. Standardın 4.1.5 numaralı maddesine göre, kısa devre sonunda oluşan bakır iletken sıcaklığı Denklem (1.1) ile hesaplanmaktadır:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (\theta_0 + 235)}{\frac{106000}{J^2 \cdot t} - 1} \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)'de θ_0 kısa devre başlangıç sıcaklığını, J kısa devre zaman aralığındaki kısa devre akım yoğunluğunu, t kısa devre süresini ve θ_1 kısa devre sonu iletken sıcaklığını ifade etmektedir.

Standartta göre, bakır iletkenler için kısa devre anında izin verilen maksimum sıcaklık sınırı 250 °C olarak tanımlanmaktadır [12]. Hesaplanan kısa devre sonrası iletken sıcaklığının bu sınırın altında kalması, transformatörün kısa devre koşullarında termik açıdan güvenli kabul edilmesi için temel kriterdir. Bu sınır, kısa süreli termik zorlanmalar altında bakır iletkenin mekanik ve elektriksel bütünlüğünü koruyabileceği güvenli üst limit olarak kabul edilmektedir.

Kısa devre süresi, kullanıcı tarafından belirlenir ve tasarımsal değişiklikler bu süreyi değiştirmez. Başlangıç sıcaklığı (θ_0) olarak çalışma boyunca standartların izin verdiği en yüksek sıcaklık alınmıştır. Standartta ortam sıcaklığı 40 °C, sargıların ortam sıcaklığına göre

gradiyenti 65 K olarak verilmiştir [7]. Bu iki değer toplandığında izin verilen en yüksek sargı sıcaklığı 105 °C olmaktadır. Kısa devre süresindeki akım yoğunluğu, kısa devre süresindeki akımın kesite oranıdır. Bu çalışmada sıcaklık değişimi Denklem (1.1) üzerinden hesaplanmıştır. Denklem (1.1) incelendiğinde, kısa devre süresi ile başlangıç sıcaklığının tasarımsal olarak değiştirilemeyeceği dikkate alındığında, kısa devre akım yoğunluğunun tasarımın kısa devre ısınmasını doğrudan etkilediği temel bileşen olduğu görülmektedir. Böylece sargı geometrisinde yapılan değişikliklerin termik kısa devre dayanımı üzerindeki etkileri, standartlara uygun ve karşılaştırılabilir bir çerçevede incelenmiştir.

Sonuç olarak, kısa devre koşullarında termik zorlanmalar; kısa devre akımı, iletken kesiti ve kısa devre süresinin ortak bir fonksiyonu olup, transformatör tasarımında mekanik ve elektromanyetik dayanım kadar önemli bir kriterdir. Bu nedenle sargı geometrisine bağlı tasarım değişikliklerinin değerlendirilmesinde, IEC 60076-5 standardında tanımlanan termik sınırların sağlanması gerekmektedir [12].

1.7 Transformatör Empedansının Sistem Empedansı ile İlişkisi

Güç sistemlerinde kısa devre seviyeleri, üretim kaynaklarının iç empedansları, iletim hatları ve ara ekipmanların empedansları ile transformatör empedansına da bağlıdır. Transformatörün kısa devre empedansı, sistemin eşdeğer empedansının önemli bir bileşenini oluşturmaktadır. Bu nedenle transformatör empedansının sistem empedansı ile uyumlu olması, hem kısa devre akım seviyelerinin kontrolü hem de sistem kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir. Transformatör empedansının gereğinden düşük seçilmesi, arıza durumunda kısa devre akımının aşırı yükselmesine neden olur. Bu durum kesicilerin açma kapasitelerini zorlayabilir, bara ve iletken boyutlandırmalarını büyütür ve mekanik zorlanmaları artırır. Buna karşılık empedansın gereğinden yüksek seçilmesi ise gerilim regülasyonunu olumsuz etkiler, yük altında gerilim düşümünü artırır ve sistem kararlılığını zayıflatabilir [9].

Bu nedenle transformatör empedansı, bağlanacağı sistemin kısa devre gücü ve empedans seviyeleri dikkate alınarak belirlenmelidir. Sistem empedansına çok uzak bir u_k değeri, ya ekipmanları gereksiz zorlayacak yüksek arıza akımlarına ya da kabul edilemez gerilim düşümlerine yol açabilir. Optimum tasarım yaklaşımı, kısa devre akımını sınırlandırırken işletme koşullarında kabul edilebilir gerilim regülasyonunu sağlayan empedans değerinin seçilmesi ile sağlanır.

Bu çalışmada incelenen senaryolarda u_k değerindeki değişimlerin yalnızca sargı içi parametrelerden değil, sargıların etkin sarım sayısı, konumu ve aralarındaki mesafelerden etkilendiği görülmüş; dolayısıyla empedansın sistem bağlamında değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde güç transformatörlerinin kısa devre davranışı çoğunlukla elektromanyetik kuvvetler, kaçak reaktans hesabı, sargı deformasyonları ve yapısal dayanım başlıkları altında incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda analitik yöntemler, sonlu elemanlar yöntemi veya deneysel doğrulama teknikleri kullanılarak transformatörlerin kısa devre koşulları altındaki davranışları ortaya konulmaya çalışılmıştır. Özellikle sargılarda meydana gelen radyal ve aksiyal kuvvetler, kaçak akı dağılımı, sargı deformasyonları ve kısa devre empedansına etki eden geometrik parametreler literatürde öne çıkan başlıca konular arasında yer almaktadır.

Güneri vd., 25 MVA gücündeki üç fazlı bir güç transformatörünü ANSYS Maxwell ortamında iki boyutlu olarak modelleyerek kısa devre çalışması sırasında sargılarda meydana gelen elektromanyetik radyal ve aksiyal kuvvetleri incelemiştir. Çalışmada nominal ve kısa devre çalışma koşullarına ait manyetik akı ve kaçak akı dağılımları ile sargılarda oluşan kuvvet dağılımları elde edilmiş, ayrıca analitik hesaplamalar ile sonlu elemanlar yöntemi sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, kısa devre kuvvetlerinin, sargıların belirli bölgelerinde yoğunlaştığını ve mekanik tasarım açısından bu bölgelerin kritik olduğunu göstermiştir [20].

Özüpak, güç transformatörlerinde kısa devre durumunda meydana gelen elektromanyetik kuvvetleri üç boyutlu sonlu elemanlar modeli yardımıyla incelemiştir. Çalışmada kısa devre sırasında oluşan kuvvetlerin büyüklüğü ve dağılımı değerlendirilmiş, özellikle sargıların maruz kaldığı mekanik zorlanmaların transformatör güvenilirliği açısından belirleyici olduğu ifade edilmiştir. Bu durum, kısa devre koşullarında oluşan mekanik zorlanmaların belirlenmesinde üç boyutlu sayısal analizlerin tasarım sürecine önemli katkı sağladığını göstermiştir [21].

Alpsalaz vd., gerçek boyutlara sahip bir güç transformatöründe tek faz arıza durumu altında oluşan elektromanyetik kuvvetleri üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Çalışmada sargılarda ve yapısal bölgelerde oluşan kuvvet dağılımları değerlendirilmiş, gerçek tasarım verilerinin kullanılması sayesinde sayısal modelin uygulamaya yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, kısa devre durumlarının transformatör aktif kısmında, ciddi mekanik etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur [22].

Dawood, güç transformatörlerinde kaçak reaktansın belirlenmesine yönelik güvenilir yeni bir analitik yöntem geliştirmiştir. Çalışmada iki sargılı transformatörler, sandviç sargılar, zigzag bağlantılı yapılar ve özel transformatör tipleri için kaçak reaktans hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Ayrıca iki ve üç boyutlu modeller karşılaştırılarak yöntemlerin doğruluğu değerlendirilmiş, simetrik ve asimetrik sargı geometrilerinin kaçak reaktans üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Bu yönüyle çalışma, geometrik tasarım parametrelerinin kısa devre empedansı ve elektromanyetik davranış üzerindeki etkisini göstermiştir [23].

Kladas ve Papadopoulos, güç transformatörü sargılarında kısa devre altında oluşan kaçak akı ve elektromanyetik kuvvetleri hem iki boyutlu hem de üç boyutlu modeller yardımıyla incelemişlerdir. Çalışmada görüntü teorisi ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı modeller kullanılmış, elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, özellikle kısa devre koşullarında sargıların maruz kaldığı kuvvetlerin doğru biçimde hesaplanabilmesi için üç boyutlu modellemenin önemli avantajlar sunduğunu göstermişlerdir [24]

Ahn vd., kuru tip transformatörlerde kısa devre sırasında oluşan elektromanyetik kuvvetleri sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiş ve elde edilen sonuçları deneysel ölçümlerle doğrulamışlardır. Çalışmada elektromanyetik analiz ile yapısal analiz birlikte değerlendirilmiş, kısa devre sırasında sargılarda meydana gelen kuvvetlerin deformasyon ve gerilme dağılımı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Sonuçlar, sayısal modellemenin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermiştir [25].

Ahmad vd., güç transformatörlerinde YG sargısının düşey ve yatay yer değiştirmelerinin kısa devre gerilmeleri üzerindeki etkisini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmada sargıdaki geometrik kaymaların kısa devre sırasında oluşan elektromanyetik kuvvetleri ve yapısal zorlanmaları önemli ölçüde değiştirdiği belirlenmiştir. Bu sonuç, üretim toleransları ve montaj doğruluğunun kısa devre dayanımı açısından önemli bir tasarım parametresi olduğunu göstermektedir [26].

Lambert vd., elektromanyetik geçici rejim çalışmaları için transformatör kaçak akı modellerini incelemiş ve bağlı kaçak endüktans yaklaşımına dayanan yeni bir modelin deneysel doğrulamasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, kaçak akının ve kısa devre

endüktanslarının doğru modellenmesinin, transformatörün geçici rejim davranışının güvenilir biçimde temsil edilmesi açısından önemli olduğu gösterilmiştir [27].

Cornelius vd., güç transformatörlerinde bakır ve alüminyum sargıların kısa devre koşulları altındaki elektromanyetik ve yapısal davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Elektromanyetik-yapısal bağlı analiz yaklaşımı kullanılan çalışmada, iletken malzemesinin kısa devre kuvvetleri ve buna bağlı mekanik gerilmeler üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda sargı malzeme seçiminin yalnızca iletkenlik ve kayıp açısından değil, kısa devre dayanımı açısından da değerlendirilmesi gerektiği ortaya konulmuştur [28].

Yapılan bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, güç transformatörlerinin kısa devre davranışının yalnızca akım büyüklüğüne bağlı olmadığı; sargı geometrisi, kaçak reaktans, kaçak akı dağılımı, malzeme özellikleri ve yapısal tasarım parametreleri ile doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle kısa devre etkilerinin doğru biçimde değerlendirilebilmesi için, analitik hesaplamalar, sonlu elemanlar yöntemine dayalı elektromanyetik ve yapısal analizler, ayrıca mümkün olduğunda deneysel doğrulamaların yapılması gerektiği görülmektedir.

Bu çalışmada, 50 MVA gücündeki bir transformatörde sargı geometrisindeki değişikliklerin kısa devre empedansına etkisi ve buna bağlı zorlanmalar incelenmekte ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir. Bu amaçla, Türkiye’de üretilmiş 50 MVA gücündeki bir güç transformatörü referans alınarak; anma gücü, gerilim seviyeleri, çekirdek yapısı, soğutma tipi ve kısa devre süresi sabit tutularak, sargı geometrisi ve sargı yerleşimlerinde yapılan sınırlı değişikliklerin kısa devre davranışı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu kapsamda, kısa devre akımı, kısa devre empedansı, yük ve ek kayıplar ile kısa devre süresine bağlı termik zorlanmalar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada önerilen farklı tasarım alternatifleri, referans tasarım ile analitik ve sayısal hesaplama yöntemleri sonucunda elde edilen veriler esas alınarak karşılaştırılmıştır. İncelemeler, ilgili standartlarda tanımlanan yaklaşımlar esas alınarak değerlendirilmiştir. Böylelikle, endüstriyel uygulamalarda sıkça karşılaşılan tasarım revizyonlarının kısa devre davranışı ve kayıplar üzerindeki etkilerinin nicel olarak ortaya konulması hedeflenmektedir. Literatürdeki çalışmalar çoğunlukla belirli bir kısa devre durumu, kuvvet bileşeni veya analiz yöntemi üzerine odaklanırken, bu tezde aynı referans transformatör üzerinde birden

fazla sargı tasarımının etkisi incelenmiştir. Bu yönüyle çalışmada, sargı geometrisi değişikliklerinin uk, kısa devre akımı, kayıp, sıcaklık ve mekanik kuvvet sonuçlarına birlikte etkisi incelenmektedir.

3. REFERANS TASARIM OLARAK ELE ALINAN GÜÇ TRANSFORMATÖRÜ

Bu bölümde, kısa devre davranışı ve kayıplar açısından referans olarak ele alınan güç transformatörünün genel teknik özellikleri, elektriksel yapısı, kademe düzeni, sargı geometrileri ve kullanılan malzeme özellikleri verilmektedir. İzleyen bölümlerde gerçekleştirilecek analitik kısa devre hesapları ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı analizler, bu bölümde sunulan referans tasarım esas alınarak yürütülmüştür. Bu nedenle, burada verilen parametreler çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Tasarım modeli referans alınan transformatör Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1: Referans alınan 50 MVA güç transformatörünün genel görünümü

3.1 Güç Transformatörünün Genel Teknik Özellikleri

Çalışma kapsamında incelenen transformatör, dağıtım sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış, üç fazlı bir güç transformatörüdür. Transformatörün anma gücü 50 MVA olup, anma frekansı 50 Hz’dir. YG tarafı anma gerilimi 34,5 kV, AG tarafı anma gerilimi ise 6,3 kV olarak belirlenmiştir. Bağlantı grubu Yyn olan transformatör, doğal yağ–doğal hava (ONAN) ve doğal yağ–zorlanmış hava (ONAF) soğutma modlarında çalışabilmektedir.

İncelenen güç transformatöründe, YG tarafında gerilim ayarının sağlanabilmesi amacıyla bir ayar sargısı bulunmaktadır. Kademe yapısı toplam 17 kademedan oluşmakta olup, nominal kademe merkez alınarak ± 8 basamaklı kademe sayısına sahiptir. YG tarafındaki kademeler arasındaki gerilim farkı %1,25’tir.

Kademe uçlarında sarım sayısı ve gerilim değerleri değiştiğinden, en yüksek gerilim değeri 1. kademede 265 sarım ile 37950 V (maksimum kademe) değerinde, en düşük gerilim değeri ise 17. kademede 217 sarım ile 31050 V (minimum kademe) seviyesindedir. Nominal kademe (34500 V) konumunda ayar sargısı devrede değildir ve bu durumda ayar sargısı üzerinden akım geçmemektedir.

Bu çalışmada, kademe konumunun kısa devre davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koyabilmek amacıyla özellikle minimum, nominal ve maksimum kademe durumları dikkate alınmıştır.

Kısa devre dayanımı değerlendirmelerinde kısa devre süresi 2 s olarak alınmış, kısa devre öncesi başlangıç sargı sıcaklığı ise 105°C kabul edilmiştir. Transformatörün tasarımı ve analizleri, IEC 60076 standart serisine uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

3.2 Anma Akımları

Transformatörün AG tarafı anma akımı, anma gücü ve gerilim değeri kullanılarak Denklem (3.1) ile hesaplanmıştır.

$$I_{n\ AG} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{AG}} = \frac{50000000}{\sqrt{3} \cdot 6300} \approx 4582\ A \quad (3.1)$$

YG tarafı anma akımı ise ayar kademe seçicilerinin konumuna bağlı olarak Denklem (3.2) ile Denklem (3.5) arasındaki formüllerle hesaplanmıştır. Minimum kademede en yüksek, maksimum kademede ise en düşük anma akımı oluşmaktadır. Nominal kademede ise ayar sargısı devrede değildir.

$$I_{n\ YG} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{YG}} \quad (3.2)$$

$$I_{n\ YG\ Min} = \frac{50000000}{\sqrt{3} \cdot 31050} \approx 929,7\ A \quad (3.3)$$

$$I_{n\ YG\ Nom} = \frac{50000000}{\sqrt{3} \cdot 34500} \approx 836,7\ A \quad (3.4)$$

$$I_{n\ YG\ Max} = \frac{50000000}{\sqrt{3} \cdot 37950} \approx 760,7\ A \quad (3.5)$$

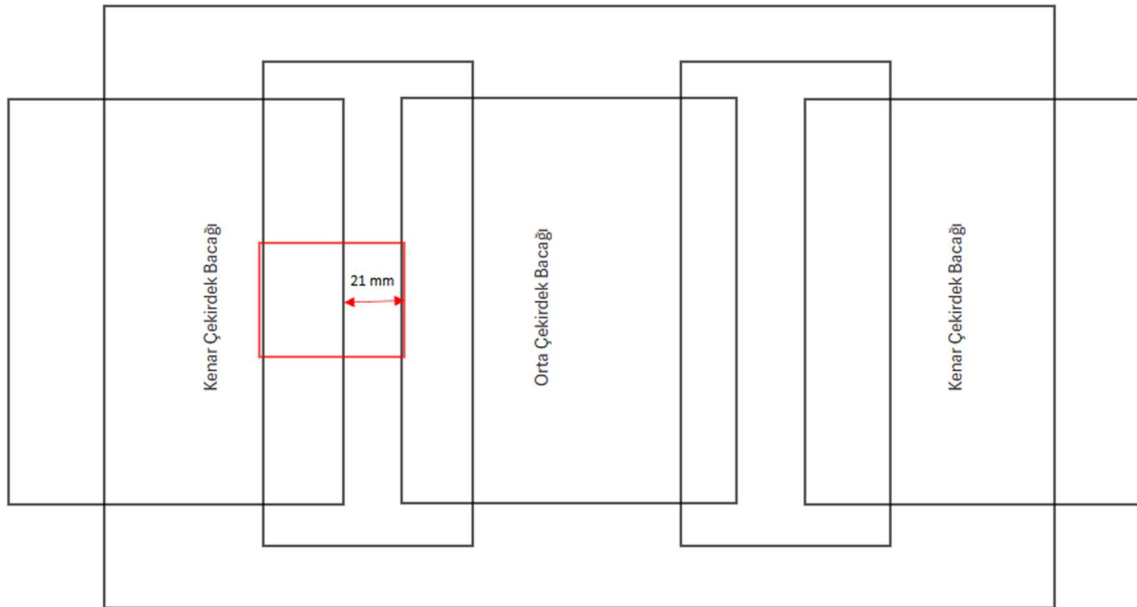
Kısa devre empedansı (u_k) değerleri, her bir durum için yapılan analizlerden elde edilmiştir. Bu nedenle u_k sabit bir tasarım girdisi olarak değil, sargı geometrisine ve yerleşimine bağlı bir sonuç parametresi olarak ele alınmıştır.

3.3 Sargı Sırası ve Genel Yerleşim Düzeni

Referans tasarımda sargılar, nüveye göre içten dışa doğru aşağıdaki sıralamada yerleştirilmiştir:

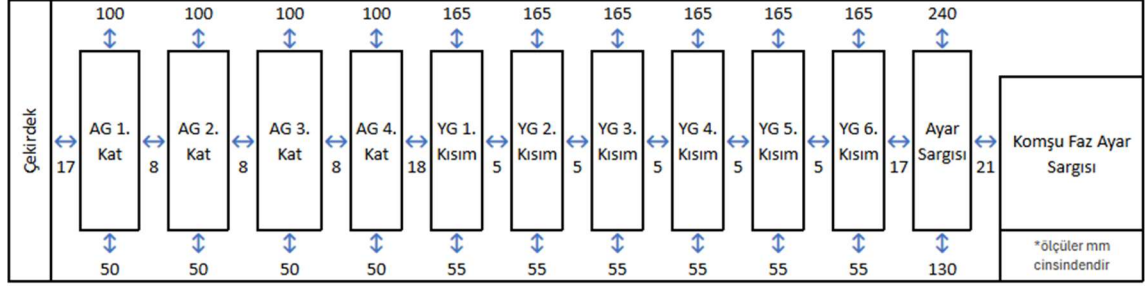
Çekirdek – Alçak Gerilim (AG) Sargısı – Yüksek Gerilim (YG) Sargısı – Ayar Sargısı

3 bacaklı transformatöre ait şematik gösterim Şekil 3.2’de verilmektedir.



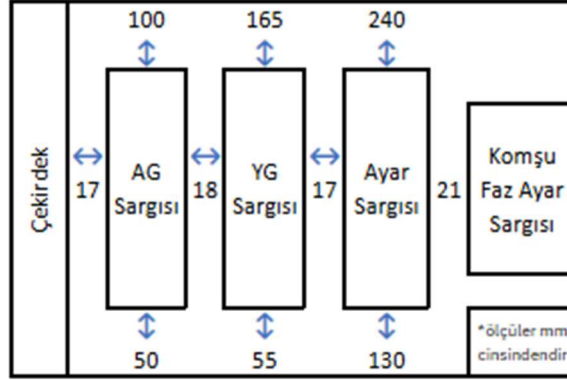
Şekil 3.2: Referans tasarımda sargıların nüveye göre yerleşimi

Şekil 3.2’de kırmızı dikdörtgen alan içerisinde örneklenen kısım için sargılar arasındaki mesafeler Şekil 3.3’te gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Referans tasarımda sargılar arası radyal mesafeler

Analiz süreçlerinde ele alınan durumların referans durumu ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla basitleştirilmiş tarzdaki şematik gösterim Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Karşılaştırma amacıyla kullanılacak basitleştirilmiş sargı yerleşim şeması

İlk üç durum için yukarıda verilen mesafeler kullanılmıştır.

3.4 Alçak Gerilim (AG) Sargısının Yapısı ve Geometrisi

Alçak gerilim (AG) sargısı, kat sargı tipinde tasarlanmıştır. Sargı dört kattan oluşmakta olup toplam sarım sayısı 44'tür. AG sargısında 3 adet aksiyel soğutma kanalı bulunmaktadır. AG sargısına ait kat yapısı Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Kat sayısının 2'nin katı olacak şekilde seçilmesi ile giriş ve çıkış uçları üst bölgede konumlandırılmıştır. Bu konfigürasyon sayesinde transformatör çıkışına erişim kolaylaştırılmıştır.

1	22	23	44
2	21	24	43
3	20	25	42
4	19	26	41
5	18	27	40
6	17	28	39
7	16	29	38
8	15	30	37
9	14	31	36
10	13	32	35
11	12	33	34

Şekil 3.5: AG kat sargısının genel görünümü

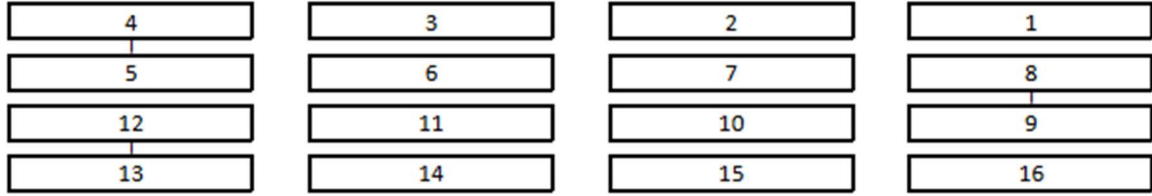
AG sargısının geometrik büyüklükleri; yaklaşık 1510 mm boy, 96 mm genişlik ve çekirdek bacağı referans alındığında 680 mm ortalama çap değerlerine sahiptir. Bu büyüklükler, kısa devre sırasında oluşan elektromanyetik kuvvetlerin ve akım yoğunluğu dağılımının belirlenmesinde temel rol oynamaktadır.

Alçak gerilim sargısı olarak radyal kanallı kat sargı seçilmiştir. Sargı, düşük gerilim ve yüksek akım karakterine sahiptir. Bu nedenle iletken kesiti büyüktür ve sargıdan geçen akım değeri yüksektir. İletken kesiti 1380 mm²'dir. İç sargı olarak konumlandırıldığından çekirdeğe doğru oluşan kuvvetleri daha güvenli olarak bu sargı taşır. Üretim açısından devrik sargıya kıyasla daha az parça ve daha az aksiyal montaj operasyonu gerektirdiğinden belirli güç ve gerilim seviyelerinde daha basit bir üretim sürecine sahiptir. İletken türü olarak CTC iletken kullanılmıştır. AG sargısında CTC kullanımı, yüksek akım seviyelerinde oluşan deri ve proximity (birbirine yakın iletkenlerin oluşturduğu manyetik alanın akım dağılımını bozması) etkilerini azaltarak AC direnci düşürmekte ve iletken kayıplarını minimize etmektedir.

3.5 Yüksek Gerilim (YG) Sargısının Yapısı ve Geometrisi

Yüksek gerilim (YG) sargısı, disk sargı tipinde tasarlanmıştır. Toplam 64 diskten oluşan sargıda her bir diskte 4 sarım bulunmaktadır. YG sargısında toplamda 15 sarımlık bir

eksiltme ile toplamda 241 adet sargı mevcuttur. Soğutma amacıyla sargı yapısında 5 adet, her biri 5 mm genişliğinde eksenel soğutma kanalı bulunmaktadır. 64 disk yerine ilk 4 disk gösterilerek görsel 16 kat küçültülmüş gösterim, Şekil 3.6’da verilmektedir.



Şekil 3.6: YG disk sargısının genel görünümü

YG sargısının yaklaşık geometrik büyüklükleri; 1440 mm boy, 112 mm genişlik ve 924 mm ortalama çap şeklindedir. Disk yapısı ve soğutma kanalları, kısa devre sırasında eksenel ve radyal kuvvetlerin dağılımı üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. YG sargılarında gerilim seviyesi yüksek olduğundan, sarım sayısı artmakta ve katlar arasında önemli potansiyel farklar oluşmaktadır. Disk (devrik) sargı yapısı, diskler arasına yerleştirilen aksiyal yağ kanalları sayesinde gerilim dağılımının daha kontrollü ve dengeli olmasını sağlamaktadır.

Disk yapının modüler karakteri, yüksek gerilim altında gerekli olan izolasyon mesafelerinin daha hassas şekilde ayarlanmasına imkân vermektedir. Bu durum özellikle darbe gerilimi dayanımı açısından önemli avantaj sağlamaktadır [29].

Kısa devre durumunda YG sargısında oluşan aksiyal elektromanyetik kuvvetler, disk sargı yapısında presleme ve ara destek elemanları sayesinde daha etkin şekilde taşınabilmektedir. Böylece mekanik stabilite artırılmaktadır. Ayrıca diskler arası yağ kanalları, soğutma performansını iyileştirerek sıcak nokta oluşumunu azaltmakta ve yüksek gerilim tarafında termal güvenliği artırmaktadır. Bu nedenlerle güç transformatörlerinde YG sargılarında disk yapı tercih edilmektedir.

YG sargısında CTC iletken kullanımı, kaçak manyetik alanın iletken kesiti boyunca daha homojen dağılmasını sağlayarak dolaşım akımlarını ve eddy kayıplarını azaltmakta, böylece sıcaklık dağılımını iyileştirerek termal güvenliği artırmaktadır. Sargı kesiti 269 mm²'dir.

3.6 Ayar Sargısının Yapısı ve Geometrisi

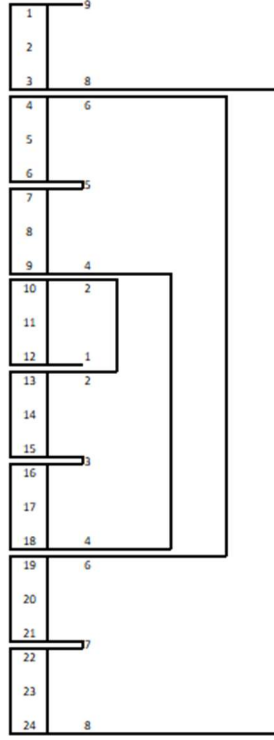
Ayar sargısı, tek katlı kat sargı yapısında tasarlanmıştır ve 8×3 sarımlık bir düzenlemeye sahiptir. Referans tasarımı ayar sargısında soğutma kanalı bulunmamaktadır. Nominal kademe konumunda ayar sargısı devrede değildir ve bu durumda üzerinden akım geçmemektedir.

Ayar sargısının yaklaşık geometrik büyüklükleri; 1290 mm boy, 9,5 mm genişlik ve 1079 mm ortalama çap değerleridir. Ayar sargısının konumu ve geometrisi, özellikle kısa devre koşullarında aksel kuvvet dağılımını etkileyen önemli bir tasarım parametresi olarak ele alınmıştır.

Ayar sargıları genellikle YG tarafında yer almakla birlikte, akım seviyeleri ana YG sargısına kıyasla daha düşüktür ve sarım sayısı sınırlıdır. Bu nedenle ayar sargısında kat yapı tercih edilebilmektedir. Kat sargı yapısı, daha kompakt bir düzen sağladığından gerilim kademesi değişim bölgelerinde oluşabilecek mekanik gerilmeleri azaltmakta ve üretim sürecini sadeleştirmektedir. Ayrıca sürekli spiral sarım, gerilim kademeleri arasındaki iletken sürekliliğini koruyarak temas noktalarında lokal ısınma riskini azaltmaktadır.

Ayar sargısında CTC iletken tercih edilmesi, kademe seçicilerin konumuna bağlı olarak değişen manyetik alan dağılımının neden olduğu akım dengesizliklerini azaltmakta ve lokal ısınma riskini sınırlandırmaktadır.

Kademe ayarının doğru yapılabilmesi için, İlk 4 sargı sağ sarım, sonraki 4 sargı sol sarım olacak biçimde tasarlanan ayar sargısına ait 24 sarımın bağlantı yapısı, Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



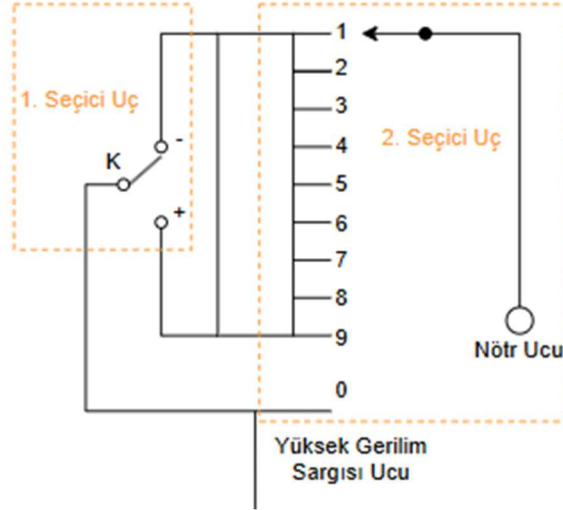
Şekil 3.7: Ayar sargısı ve kademe uçlarının gösterimi

Görselde her 3 sarımda bir bağlantı alınmıştır. Bağlantı noktaları gerilim kademe yapısında nötr uca bağlanacak uçlardır.

3.7 Kademe Yapısı ve Gerilim Ayar Aralığı

Şekil 3.8’de verilen kademe yapısından görüleceği gibi, YG tarafındaki gerilim ayarı, ayar sargısının farklı sarım sayılarında ve iki farklı yönde devreye alınması ile sağlanmaktadır. Şekilde 0 ucu, K ucu ve YG sargısı ucu birbirine bağlıdır. Bu bağlantı noktası, ayar sargısının devre dışı bırakıldığı nominal bağlantı durumunu temsil etmektedir. Ayar sargısı üzerinde 1-9 arasında numaralandırılmış uçlar bulunmaktadır ve bu uçlar üzerinden farklı gerilim kademelerine erişim sağlanmaktadır.

YG sargısı 241 sarımdan oluşmaktadır. Ayar sargısında ardışık uçlar arasındaki sarım farkı 3 sarımdır. Bu nedenle bir gerilim kademesinin YG sargısı sarım sayısına oranı 0,01245, yani yaklaşık %1,25’tir. Dolayısıyla her bir kademe değişimi, YG tarafında yaklaşık %1,25 gerilim değişimine karşılık gelmektedir.



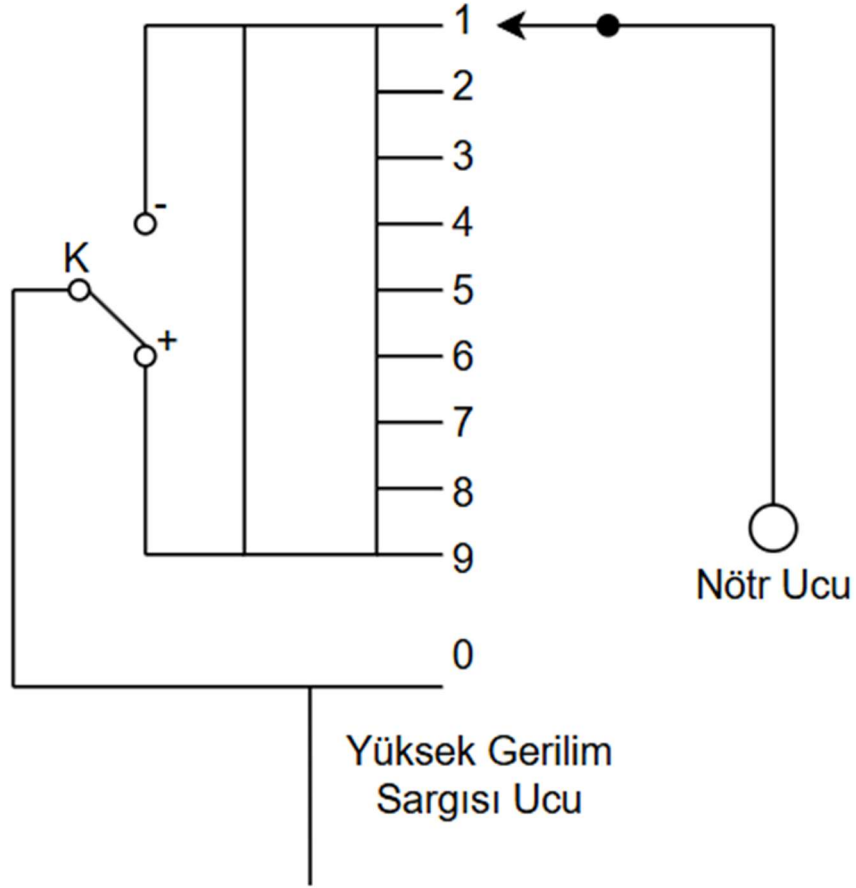
Şekil 3.8: Ayar sargısında artı ve eksi yön bağlantıları ile kademe yapısı

Sistemde iki seçici uç bulunmaktadır. Birinci seçici, K ucu üzerinden ayar sargısının “+” veya “-” yönüne bağlanmasını sağlar. Bu seçici, ayar sargısının YG sargısına aynı yönde mi yoksa ters yönde mi ekleneceğini belirler. İkinci seçici ise 0 ve 1-9 numaralı uçlar arasında seçim yaparak devreye alınacak ayar sargısı miktarını belirler.

Ayar sargısının “+” yönde devreye alınması YG tarafındaki etkin sarım sayısını artırır. “-” yönde devreye alınması ise etkin sarım sayısını azaltır. Böylece aynı ayar sargısı hem gerilim artırma hem de gerilim düşürme amacıyla kullanılabilir. Bu yapı, tek yönlü lineer bir ayar sargısına göre daha kısa ayar sargısı ile aynı gerilim ayar aralığının elde edilmesini sağlar. Ayrıca nominal gerilim kademesinde ayar sargısı sarımları kullanılmadığından olası arıza durumlarından sargı korunmuş olur.

Her yönde 8 gerilim kademesi bulunduğundan toplam ayar aralığı $\pm\%10$ 'dur. Buna göre nominal gerilim seviyesi dışında 8 adet artırma ve 8 adet azaltma konumu elde edilmektedir. Elektriksel olarak toplam 17 farklı gerilim seviyesi oluşmaktadır. Nominal gerilim seviyesi ise ayar sargısının etkin sarım katkısının sıfır olduğu durumdur.

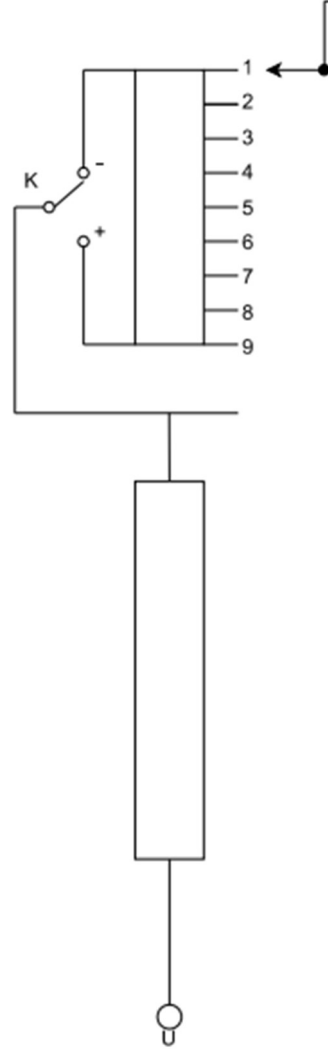
Maksimum gerilim pozisyonunda K ucu “+” uca bağlıdır ve ikinci seçici 1 numaralı uca alınır (Şekil 3.9). Bu durumda ayar sargısının tamamı YG sargısına aynı yönde eklenir. Böylece 8 kademe kademe başı $\%1,25$ artış sağlanarak $\%10$ oranında gerilim artırımı sağlanır. Bu pozisyon, YG tarafındaki en yüksek gerilim kademesidir.



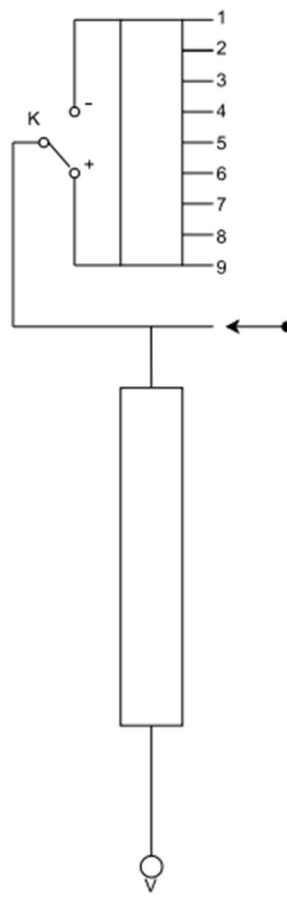
Şekil 3.9: Maksimum gerilim kademesinde ayar sargısı bağlantısı

Gerilim düşürme işlemi, ikinci seçici ucun 1 numaralı uçtan 9 numaralı uca doğru ilerletilmesiyle gerçekleştirilir. Bu geçiş sırasında ayar sargısının devreye alınan etkin sarım sayısı kademeli olarak azaltılır ve YG tarafındaki gerilim seviyesi her adımda yaklaşık %1,25 oranında düşürülür.

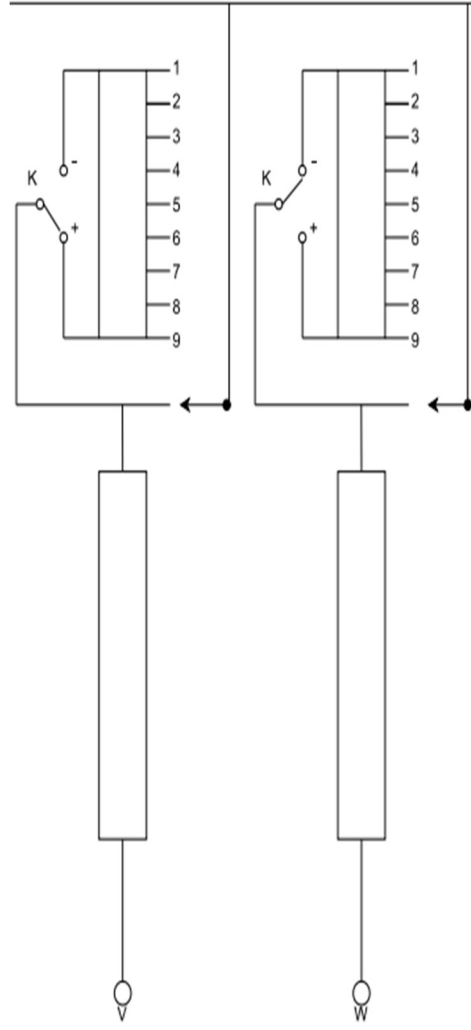
Nominal gerilim pozisyonu, ayar sargısının YG sargısına net sarım katkısı yapmadığı durumdur. Bu gerilim seviyesi üç farklı bağlantı ile elde edilebilir. Birinci durumda K ucu “-” uca bağlıyken ikinci seçici 1 numaralı uca bağlanır (Şekil 3.10). İkinci durumda K ucu “+” uca bağlıyken ikinci seçici 9 numaralı uca bağlanır (Şekil 3.11). Üçüncü durumda ise ikinci seçici 0 ucuna alınır (Şekil 3.12). Bu durumda 0 ucu, K ucu ve YG sargısı ucu aynı noktada birleştiğinden ayar sargısı devre dışı kalır. Bu üç bağlantı elektriksel olarak aynı nominal gerilim seviyesini verir.



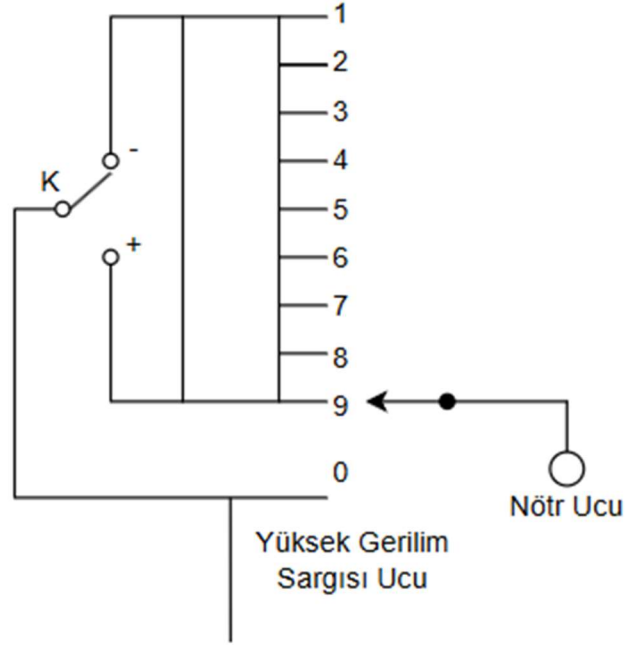
Şekil 3.10: Nominal gerilim kademesi için birinci bağlantı durumu



Şekil 3.11: Nominal gerilim kademesi için ikinci bağlantı durumu



Şekil 3.12: Nominal gerilim kademesi için ayar sargısının boşa olduğu durum



Şekil 3.13: Minimum gerilim kademesinde ayar sargısı bağlantısı

Minimum gerilim pozisyonunda K ucu “-” uca bağlıdır ve ikinci seçici 9 numaralı uca alınır (Şekil 3.13). Bu durumda ayar sargısının tamamı YG sargısına ters yönde eklenir. Böylece etkin sarım sayısı 8 kademe azaltılır ve %10 oranında gerilim düşümü sağlanır. Bu pozisyon, YG tarafındaki en düşük gerilim kademesidir.

Kademe geçişlerinde “+” ve “-” yönleri arasında doğrudan geçiş yapılması uygun değildir. Çünkü bu durumda ayar sargısının büyük bir bölümü ani olarak devreye girebilir veya devreden çıkabilir. Bu nedenle yön değişimi yapılırken önce 0 ucu veya nominal bağlantı konumları üzerinden geçiş yapılır. Böylece gerilim değişimi kontrollü şekilde sağlanır ve çalışma sırasında ani gerilim sıçramalarının oluşması engellenir.

4. TASARIM DURUMLARI VE ANALİZ YAKLAŞIMI

Farklı tasarım durumları oluşturulurken transformatörün anma gücü, gerilim seviyesi, bağlantı grubu, nüve yapısı ve soğutma tipi sabit tutulmuştur. Böylelikle, elde edilen farklılıkların doğrudan sargı geometrisi, kademe bağlantısı, radyal mesafe ve aksiyel yerleşimdeki değişikliklerden kaynaklanması sağlanmıştır. Her bir tasarım durumu, referans transformatör esas alınarak yalnızca belirli bir tasarım parametresinin etkisini ortaya koyacak şekilde oluşturulmuştur. Bu yöntem, farklı güç veya farklı nüve yapısına sahip transformatörlerin karşılaştırılmasından doğabilecek belirsizlikleri azaltmakta ve sonuçların tasarım büyüklükleri ile ilişkilendirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Bu bölümde, referans güç transformatörü üzerinde yapılan parametrik tasarım değişikliklerinin kısa devre davranışına etkisi incelenmektedir. Kısa devre davranışı temel olarak transformatörün kısa devre empedansı, kaçak akı dağılımı, etkin sarım sayısı ve amper-sarım dengesi ile ilişkilidir. Bu büyüklüklerde meydana gelen değişimler, kısa devre akımını doğrudan etkilemekte; kısa devre akımı ise sargılarda oluşan termik ve mekanik zorlanmaların temel belirleyicisi olmaktadır. Bu nedenle kısa devre performansının değerlendirilmesinde yalnızca kısa devre akımı büyüklüğünün incelenmesi yeterli değildir. Kısa devre akımının değerine etki eden empedans yapısı, kaçak akı yolu ve zıt besleme gruplarındaki sargılar arasındaki elektromanyetik etkileşim birlikte düşünülmelidir. Özellikle güç transformatörlerinde sargıların radyal ve aksiyel konumları, kaçak manyetik alan dağılımını doğrudan etkilediğinden, küçük geometrik değişiklikler yapılırsa dahi kısa devre empedansı üzerinde önemli farklılıklar oluşturabilmektedir.

Çalışmada, sargı içi küçük düzenlemelerden ziyade kısa devre empedansını ve kaçak akı yolunu doğrudan etkileyen ana tasarım parametreleri esas alınmıştır. Bu yaklaşımın nedeni, kısa devre akımı ve kısa devre kuvvetleri üzerinde belirleyici olan etkin değişkenlerin; sargıların radyal konumu, sargılar arası mesafeler, etkin sarım sayısı, gerilim kademesi değişimleri ve sargıların kazan içerisindeki yerleşimi olmasıdır. Sargı içi iletken segmentasyonu veya iletkenler üzerinde küçük düzenlemeler ise ana sargı boyutlarını ve temel kaçak akı yolunu değiştirmedikleri sürece kısa devre empedansı üzerinde etki oluşturmamaktadır.

Buna karşılık, sargı çaplarının, sargılar arası radyal mesafelerin, etkin sarım sayısının veya gerilim kademe bağlantısının değiştirilmesi, transformatörün manyetik bağlanma karakteristiğini ve kaçak reaktansını doğrudan değiştirmektedir. Bu değişim kısa devre empedansına yansımakta, kısa devre empedansındaki değişim ise kısa devre akımı, tepe kısa devre akımı, akım yoğunluğu ve elektromanyetik kuvvet seviyelerini etkilemektedir. Dolayısıyla bu bölümde incelenen tasarım durumları, kısa devre davranışı üzerinde doğrudan etkili olan ana tasarım değişkenleri üzerinden kurgulanmıştır.

Bu kapsamda, referans transformatör geometrisi esas alınarak farklı tasarım durumları oluşturulmuş ve her bir durum aynı analiz yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. İncelenen durumlarda belirli bir tasarım parametresi değiştirilmiş, diğer geometrik ve elektriksel büyüklükler mümkün olduğunca sabit tutulmuştur. Böylece yapılan değişikliğin kısa devre empedansı, kısa devre akımı, kayıplar, akım yoğunluğu, termik davranış ve mekanik kuvvetler üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Karşılaştırmalı inceleme yaklaşımı sayesinde, her bir tasarım değişikliğinin kısa devre davranışına olan etkisi ayrı ayrı değerlendirilebilmiştir. Böylece elde edilen sonuçlar yalnızca sayısal büyüklükler olarak değil, aynı zamanda tasarım parametresi ile sonuç değişkeni arasındaki neden-sonuç ilişkisi bakımından da yorumlanmıştır. Böylelikle farklı sargı yerleşimlerinin ve geometrik düzenlemelerin kısa devre performansı üzerindeki etkisi daha izlenebilir hale gelmiştir.

Analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak referans güç transformatörüne ait sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş, ardından belirlenen tasarım değişiklikleri aynı modelleme yaklaşımı ile ayrı ayrı çözümlenmiştir. Bu sayede farklı tasarım parametrelerinin kısa devre davranışı üzerindeki etkileri ortak bir hesaplama altyapısı üzerinden karşılaştırılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan modellerde, sargı geometrileri, sargılar arası mesafeler, nüve ve kazan yapısı ile ilgili temel geometrik veriler dikkate alınmıştır. Her bir durum için elde edilen elektromanyetik analiz sonuçları üzerinden kısa devre empedansı, kaçak akı dağılımı ve kayıp değerleri elde edilmiştir. Daha sonra bu sonuçlar kısa devre akımı, termik zorlanma ve mekanik kuvvet hesapları ile ilişkilendirilmiştir. Böylece tasarım

değişikliklerinin yalnızca elektriksel çıktılar üzerindeki etkisi değil, aynı zamanda kısa devre dayanımı açısından oluşturduğu genel etki de dikkate alınmıştır.

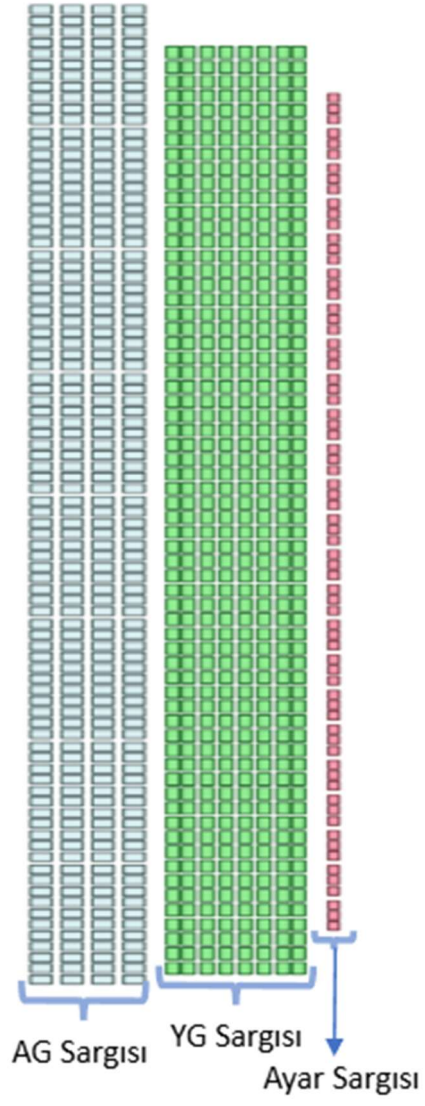
4.1 SEY Modeli

Bu çalışmada farklı tasarım durumlarının elektromanyetik davranışları Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde referans transformatör geometrisi esas alınmış, her tasarım durumu için aynı modelleme yaklaşımı ve aynı çözüm kabulleri kullanılmıştır. Böylece elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılabilir olması sağlanmıştır.

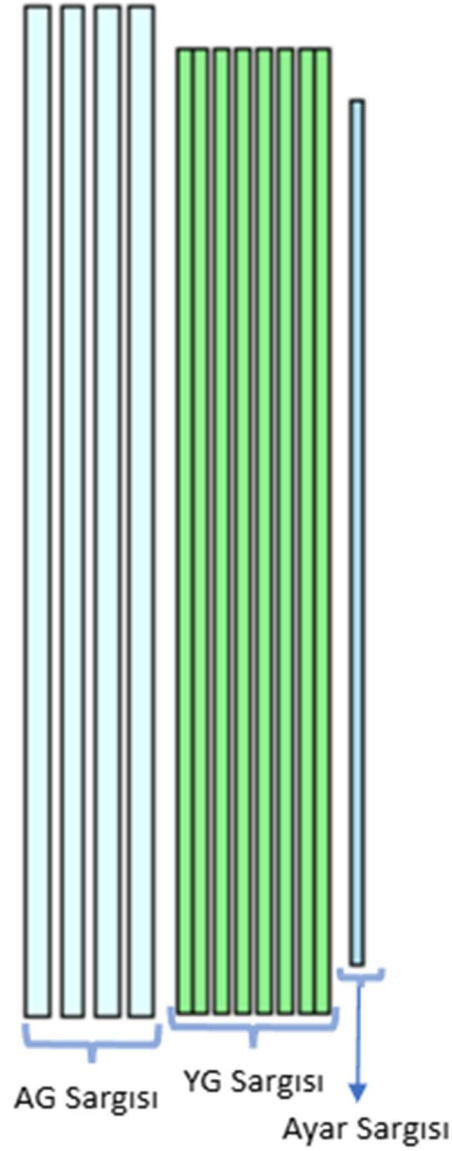
SEY modeli, transformatörün nüve ve sargı bölgelerini kapsayacak şekilde iki boyutlu olarak oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Sargılar, her bir iletkenin tek tek modellenmesi yerine eşdeğer sargı bölgeleri olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.2). Bu yaklaşım, çözüm süresini azaltmakta ve farklı tasarım durumları arasında karşılaştırmalı analiz yapılmasını mümkün kılmaktadır. Radyal soğutma kanalları ve sargı bölünmeleri, ilgili sargının efektif geometrisini ve sarım sayısını temsil edecek şekilde modele dahil edilmiştir.

Modelde nüve malzemesi manyetik B-H karakteristiği ile tanımlanmış, sargılar ise sarım sayısı, akım yönü ve etkin akım değerleri dikkate alınarak uyarılmıştır. Çözüm bölgesi, nüve ve sargıları çevreleyen hava bölgesi ile birlikte oluşturulmuş; dış sınır koşulları manyetik alanın çözüm bölgesi içinde temsil edilmesini sağlayacak şekilde tanımlanmıştır. Her durumda aynı sınır koşulları ve mesh yaklaşımı kullanılmıştır.

Elektromanyetik alan çözümleri Siemens Simcenter MAGNET yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerden manyetik alan dağılımı, kaçak akı davranışı, manyetik enerji, sargı kayıpları ve elektromanyetik kuvvet dağılımı elde edilmiştir. Manyetik enerji ve reaktans temelli sonuçlar kısa devre empedansı ve u_k değerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Sargı kayıpları ise omik kayıp ve girdap akımı kaybı bileşenleri üzerinden belirlenmiştir.



Şekil 4.1: Detaylı analiz modeli



Şekil 4.2: İndirgenmiş analiz modeli

SEY analizlerinden elde edilen u_k değerleri, sonraki bölümlerde üç faz kısa devre akımı, tepe kısa devre akımı, kısa devre akım yoğunluğu ve kısa devre sonu sıcaklık hesaplarında giriş verisi olarak kullanılmıştır. Mekanik değerlendirmede ise kısa devre akımı, tepe akım katsayısı ve sargı geometrisi birlikte kullanılarak çevresel gerilmeler, radyal eğilme gerilmeleri, toplam aksiyel kuvvetler ve uç itme kuvvetleri hesaplanmıştır.

Böylelikle, SEY modeli sayesinde, farklı sargı geometrilerinin u_k , kayıp seviyesi, kısa devre akımı ve elektromanyetik kuvvetler üzerindeki etkisini belirlemek mümkün olmuştur.

4.2 Farklı Gerilim Kademesi Seviyelerinin İncelenmesi

Bu başlık altındaki irdilemede, referans transformatör tasarım geometrisi korunmuş, yalnızca gerilim kademesi konfigürasyonu, minimum, nominal ve maksimum pozisyonda olduğu 3 farklı durum için inceleme yapılmıştır.

Durum-1: Bu durumda minimum kademede ayar sargısı YG sargısına manyetik olarak ters yönde bağlanmaktadır. Bu bağlanma yönü nedeniyle YG tarafındaki etkin sarım sayısı azalmaktadır. Etkin sarım sayısının azalması amper-sarım dağılımını değiştirmekte ve aynı güç seviyesinde akım değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum için kademe yapısı birinci seçici uç “-” uca, ikinci seçici uç ise ayar sargısının 9. ucuna bağlanmıştır. Bu duruma ilişkin her bir sargıdaki kayıp değerleri ve sargıların ağırlıkları Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4.1: Minimum gerilim kademesinde sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları

Sargı	Omik kayıp (kW)	Eddy kaybı (kW)	Toplam kayıp (kW)	Ağırlık (kg)
YG	142,99	7,75	150,07	5369
AG	91,67	4,55	96,22	3483
Ayar	19,52	0,08	19,61	503
Toplam	254,19	11,71	265,90	9355

Durum-2: Nominal gerilim seviyesinin dikkate alındığı 2. durumda referans transformatör geometrisi tamamen korunmuş ve simülasyon bu tasarım için gerçekleştirilmiştir. Nominal kademede, ayar sargısı devre dışıdır. Bu durumda yalnızca ana AG ve YG sargıları etkin durumdadır. Etkin sarım sayısı, tasarım değerine eşit olup, YG sargısı ile AG sargısı amper-sarım dağılımı simetriktir. Kayıplar ve toplam ağırlığa ilişkin sonuçlar Tablo 4.2’de verilmektedir.

Tablo 4.2: Nominal gerilim kademesinde sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları

Sargı	Omik kayıp (kW)	Eddy kaybı (kW)	Toplam kayıp (kW)	Ağırlık (kg)
YG	115,93	7,80	123,74	5369
AG	91,67	4,61	96,28	3483
Ayar	0,00	0,10	0,10	503
Toplam	207,60	12,51	220,11	9355

Durum-3: Bu durumda da geometri değiştirilmeden gerilim kademesi maksimum pozisyona alınmıştır. Maksimum gerilim kademesinde ayar sargısı YG sargısına manyetik olarak aynı yönde bağlanmaktadır. Bu kademe için 1. seçici uç “+” uca, 2. seçici uç ise ayar sargısının 1 numaralı ucuna bağlanmıştır. Bu nedenle YG tarafındaki etkin sarım sayısı artmaktadır. Kayıplar ve toplam ağırlığa ilişkin sonuçlar Tablo 4.3’de verilmektedir.

Tablo 4.3: Maksimum gerilim kademesinde sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları

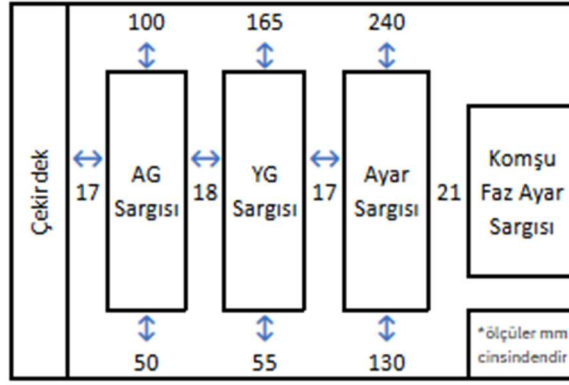
Sargı	Omik kayıp (kW)	Eddy kaybı (kW)	Toplam kayıp (kW)	Ağırlık (kg)
YG	95,89	8,58	104,47	5369
AG	91,67	4,67	96,34	3483
Ayar	13,10	0,13	13,22	503
Toplam	200,66	13,38	214,04	9355

Gerilim kademeleri müşteri talebine göre belirlenir. Nominal pozisyon genellikle en çok kullanılan gerilim kademesidir. Bu pozisyonda ayar sargısının devrede olmaması ile ana sargılara göre daha küçük olan ve gerilim kademe değişikliği üzerinden yapıldığı için kademe değişimlerinde diğer sargılara göre daha fazla zorlanan ayar sargısının korunması sağlanır. Ancak kısa devre herhangi bir gerilim kademesinde anlık olarak oluşabileceği için uç kademelerde oluşan durum için inceleme yapılması daha doğrudur. İncelenen üç durum içinde toplam kayıplar açısından en kötü durumun Durum-1'deki minimum gerilim kademesindeki durum olduğu görülmüştür. Bu tespitten dolayı diğer durumlar sadece minimum gerilim kademesindeki tasarım baz alınarak ele alınmıştır.

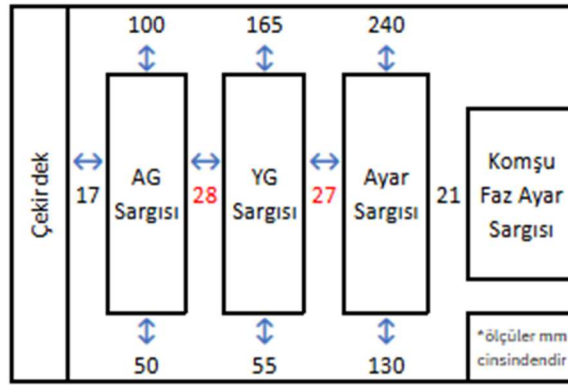
4.3 Minimum Gerilim Kademesinde Sargılar Arası Radyal Mesafelerin Artırılması

Durum-4: Bu durumda AG–YG ve YG–Ayar arası radyal mesafeler 10 mm artırılmıştır. Sargılar arası mesafenin artması kaçak akı yolunu uzatmakta ve kısa devre reaktansını artırmaktadır. Empedans artışı kısa devre akımını azaltmaktadır. Ancak çap artışı ile iletken uzunluğu büyümekte, bu da bakır miktarını ve yük kayıplarını artırmaktadır. Dolayısıyla bu senaryo, empedans artışı ile kayıp artışı arasındaki tasarım dengesini incelemek amacıyla oluşturulmuştur.

Referans tasarım Şekil 4.3’te, Durum-4 için yapılan radyal mesafe değişimi ise Şekil 4.4’te verilmiştir. Değişen ölçüler şekillerde kırmızı ile işaretlenmiştir. Kayıplar ve toplam ağırlığa ilişkin sonuçlar Tablo 4.4’de verilmektedir.



Şekil 4.3: Referans tasarımda sargılar arası radyal mesafe düzeni



Şekil 4.4: Durum-4 için sargılar arası radyal mesafe düzeni

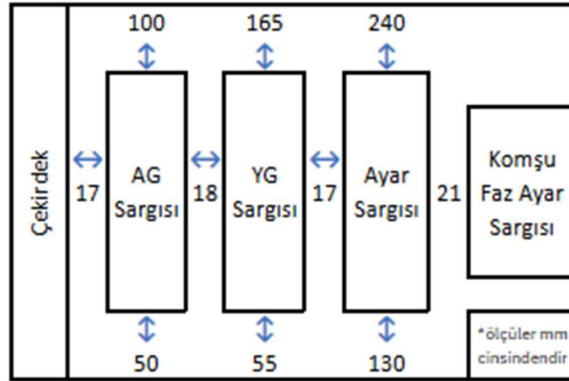
Tablo 4.4: Sargılar arası mesafenin artırıldığı durumda kayıp değerleri ve ağırlıkları

Sargı	Omik kayıp (kW)	Eddy kaybı (kW)	Toplam kayıp (kW)	Ağırlık (kg)
YG	146,10	7,30	153,41	5485
AG	91,63	4,54	96,18	3482
Ayar	20,25	0,08	20,33	521
Toplam	257,98	11,93	269,92	9488

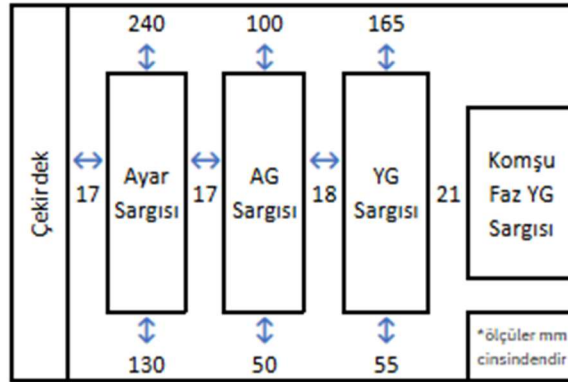
4.4 Minimum Gerilim Kademesinde Ayar Sargısının İç Konuma Alınması

Durum-5: Bu durumda ayar sargısı en dış konumdan en iç konuma alınmıştır. Ayar sargısının içeri alınması, genellikle çok yüksek gerilim seviyelerine sahip transformatörlerde ayar sargısı ile YG sargısı arasındaki mesafeyi arttırmak için veya ayardan girişli AG sargısı ayarlı transformatörlerde tercih edilebilmektedir. Bu değişiklik manyetik bağlaşımı ve kaçak akı dağılımını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında yapılacak faaliyetler ile ayar sargısının en içte ve en dışta olduğu durumlar karşılaştırılmış olacaktır. Referans

tasarım Şekil 4.5'te, Durum-5 için ayar sargısının iç konuma alındığı yerleşim ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Kayıplar ve toplam ağırlığa ilişkin sonuçlar Tablo 4.5'de verilmektedir.



Şekil 4.5: Referans tasarımda sargı yerleşimi



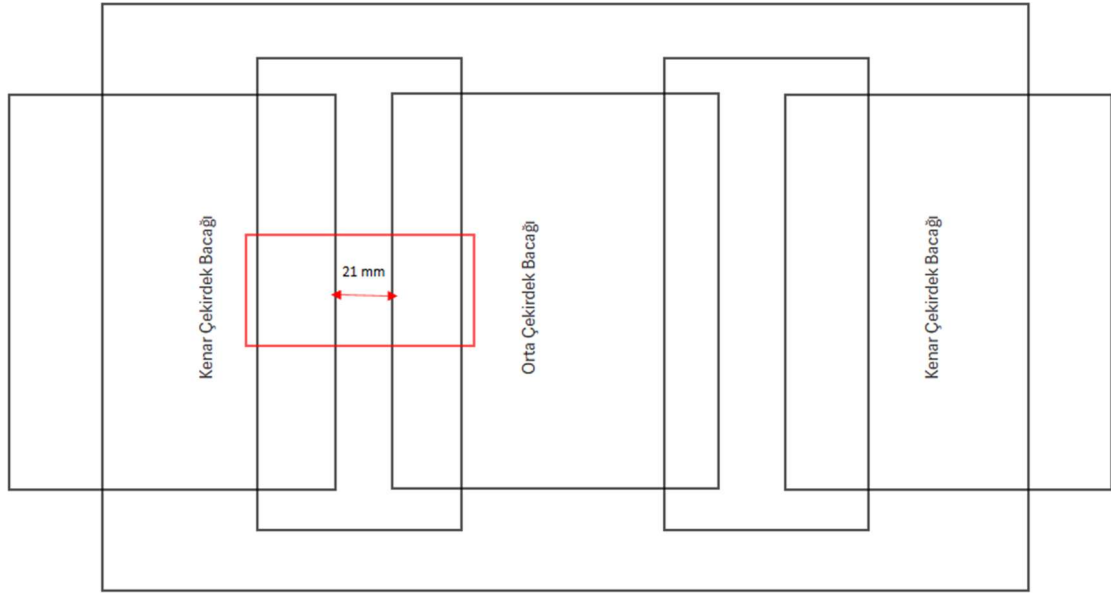
Şekil 4.6: Durum-5 için ayar sargısının iç konuma alınması

Tablo 4.5: Ayar sargısının içte olduğunda sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları

Sargı	Omik kayıp (kW)	Eddy kaybı (kW)	Toplam kayıp (kW)	Ağırlık (kg)
YG	151,55	9,06	160,61	5689
AG	98,87	5,88	104,76	3758
Ayar	10,74	0,12	10,86	277
Toplam	261,16	15,06	276,22	9724

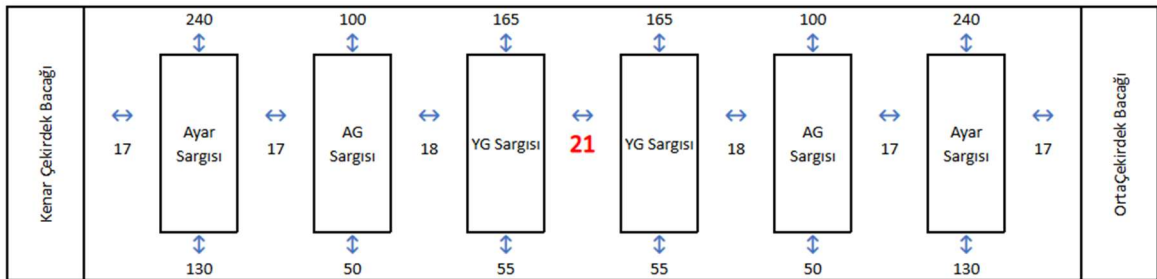
Ayar sargısının içe alınması büyük sargıların çekirdekten uzaklaşmasından ötürü ortalama çapları büyümek zorunda kalmakta, bu durum malzeme kullanımını ve yük kayıplarını artırmaktadır. Mekanik açıdan ise ince bir sargının iki ana sargı arasında konumlanması ya da çekirdeğe en yakın sargı olması ezilme riskini artırabilmektedir.

Ayrıca fazların YG sargıları komşu olduğundan ötürü dielektrik zorlanmalara sebebiyet verebilir. Bu yakınlık aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.7: Durum-5'te fazlar arası YG sargı yakınlığının genel görünümü

Şekil 4.7'de kırmızı alan içerisinde belirtilen bölge, Şekil 4.8'de detaylı olarak verilmektedir.



Şekil 4.8: Durum-5'e ait fazlar arası bölgenin detay görünümü

YG sargısında oluşabilecek ani gerilim yükselmeleri, komşu fazlarda bulunan YG sargıları çok yakın olduğundan arıza durumlarında birbirleri üzerinde gerilim yansıtabilirler. Sarım sayıları eşit olduğundan gerilim yaklaşık olarak aynı şekilde iletilir. Bu durumda aradaki 21 mm izolasyon mesafesi, özellikle geçici rejim ve arıza koşullarında daha yüksek elektriksel zorlanmaya maruz kalabilir. Yağ kalitesinin bozulması, gaz oluşumu veya partikül varlığı gibi durumlarda fazlar arası yalıtım güvenliği ayrıca risk altına girebilir. Mesafelerin artırılması durumunda ise çekirdek bacakları arasındaki mesafelerin artması gerekecektir ki

bu durumda transformatörün ağırlığını, boyutlarını ve boşta çalışma kayıplarını etkileyecektir.

4.5 Minimum Gerilim Kademesinde Sarım Sayılarının Değiştirilmesi

Durum-6: Bu durumla amaçlanan, çevirme oranı korunmaya çalışılarak AG ve YG sarım sayılarının azaltılmasıdır. Böylelikle malzeme tasarrufu sağlamak mümkün olabilecektir. AG tarafındaki gerilim seviyesi referans alınarak, YG tarafındaki gerilim nominal, minimum ve maksimum giriş gerilimlerine göre sapmaların %0,5 in altında kalması koşulu standartta belirtilmektedir. Ancak sarım oranındaki değişim özellikle uç kademe pozisyonlarında çevirme oranı sapmalarına neden olabilmektedir.

Referans tasarımda, AG tarafı gerilim değeri 6300 V (faz-faz) ve sarım sayısı 44'tür. Bu durumda AG tarafında sarım başına düşen faz gerilim değeri 82,67 V'tur. YG tarafında da sarım başına düşen gerilim değeri 82,67 V olması durumu için, nominal kademedeki (34500 V faz-faz) sarım sayısının 240,95 (yaklaşık 241 sarım, sapma=%0,2) olması gerekecektir. Benzer hesaplama mantığı ile maksimum kademedeki 265,05 (yaklaşık 265 sarım, sapma=%0,18) ve minimum kademedeki ise 216,86 (yaklaşık 217 sarım, sapma=%0,66) sarımın mevcut olması gerekmektedir. Ayar sargısı ise $265-241=24$ sarım (maksimum kademe sarım sayısı- nominal kademe sarım sayısı) ve $241-217=24$ sarım (nominal kademe sarım sayısı- minimum kademe sarım sayısı) olmak üzere çift yönlü 24 sarımdan oluşması gerekecektir. 8 farklı ayar gerilimi kademe aralığı için kademe başına düşen sarım sayısı ise 3 olacaktır.

Bu hesaplamalar dikkate alınarak AG sargısı sarım sayısının azaltılması ve artırılması durumları için aşağıdaki Tablo 4.6 oluşturulmuştur. Tablodan görüleceği üzere AG sargısı sarım sayısı değiştikçe sarım başına düşen gerilim de değişmektedir. Buna bağlı olarak YG tarafında olması gereken toplam sarım sayısı da değişmektedir. Bu sarım sayısı teorik sarım sayısı olarak verilmiştir. Tabloda görülen ondalık değere sahip sarım sayıları gerçek ortamda kullanılmayacağından pratik sarım sayılarına yuvarlanmıştır. Teorik ve pratik sarım sayılarının sapma değerleri binde sapma değeri olarak verilmiştir.

Tablo 4.6: Sarım sayısı alternatiflerinin gerilim sapması açısından karşılaştırılması

Poz.	AG sarım sayısı	YG teorik sarım sayısı	YG pratik sarım sayısı	YG binde sapma	Ayar sarımı değişimi	Kademe başına değişen sarım sayısı
Maks.	22,00	132,52	133,00	3,58	13,00	1,62
Nom.	22,00	120,48	120,00	3,97	0,00	0,00
Min.	22,00	108,43	108,00	3,97	-12,00	-1,50
Maks.	33,00	198,79	199,00	1,08	18,00	2,25
Nom.	33,00	180,71	181,00	1,58	0,00	0,00
Min.	33,00	162,64	163,00	2,19	-18,00	-2,25
Maks.	40,00	240,95	241,00	0,20	22,00	2,75
Nom.	40,00	219,05	219,00	0,22	0,00	0,00
Min.	40,00	197,14	197,00	0,73	-22,00	-2,75
Maks.	40,00	240,95	243,00	8,43	24,00	3,00
Nom.	40,00	219,05	219,00	0,22	0,00	0,00
Min.	40,00	197,14	195,00	10,99	-24,00	-3,00
Maks.	42,00	253,00	254,00	3,94	24,00	3,00
Nom.	42,00	230,00	230,00	0,00	0,00	0,00
Min.	42,00	207,00	206,00	4,85	-24,00	-3,00
Maks.	42,00	253,00	253,00	0,00	23,00	2,88
Nom.	42,00	230,00	230,00	0,00	0,00	0,00
Min.	42,00	207,00	207,00	0,00	-23,00	-2,88
Maks.	44,00	265,05	265,00	0,18	24,00	3,00
Nom.	44,00	240,95	241,00	0,20	0,00	0,00
Min.	44,00	216,86	217,00	0,66	-24,00	-3,00
Maks.	48,00	289,14	289,00	0,49	26,00	3,25
Nom.	48,00	262,86	263,00	0,54	0,00	0,00
Min.	48,00	236,57	237,00	1,81	-26,00	-3,25
Maks.	55,00	331,31	331,00	0,94	30,00	3,75
Nom.	55,00	301,19	301,00	0,63	0,00	0,00
Min.	55,00	271,07	271,00	0,26	-30,00	-3,75
Maks.	66,00	397,57	398,00	1,08	37,00	4,62
Nom.	66,00	361,43	361,00	1,19	0,00	0,00
Min.	66,00	325,29	325,00	0,88	-36,00	-4,50
Maks.	88,00	530,10	530,00	0,18	48,00	6,00
Nom.	88,00	481,90	482,00	0,20	0,00	0,00
Min.	88,00	433,71	434,00	0,66	-48,00	-6,00

Sarım başına gerilimde fazla sapma yaşanmadan AG sargısının 42, YG sargısının 230 sarım olduğu durumda tabloda görüldüğü üzere gerilim sapması olmamaktadır. Ancak uç gerilimler ile orta kademe arasında 8 kademe olduğundan ayar sargısı sarım sayısı 8 ve tam katları olmalıdır. AG sargısının 42 sarım olduğu durumda ve gerilim sapması olmadığı durumda ayar sargısının kademe başına sarım sayısının 2,875 olması gerektiği görülmektedir. Bu fiziksel olarak mümkün olmadığı için ayar sargısının kademe başına sarım sayısı 3 olmalıdır. Bu sebeple gerilim sapması oluşacaktır. Ayrıca 4 katta 44 sarımlı yapıyı 42 sarıma çevirmek için eksiltilecek 2 sarım, fiziksel olarak boşluğa sebep olacaktır. Bu boşluk üretim sonrası sargının kayması için alan oluşturabileceği için tehlikeli bir durumdur.

4 kat 11'er sarım yerine 3 kat 14'er sarım olması durumunda transformatör dikeyde 3'er sarım uzayacak bu da boyut maliyeti gibi başka sorunlara sebebiyet verebilecektir.

Durum-6 kapsamında incelenen diğer sarım sayıları alternatiflerinden ana tasarıma yakın sarım sayılarına sahip, AG sargısının 40 sarım, YG sargısının 219 sarım olduğu alternatif incelenecektir (Şekil 4.10). Bu başlık altında incelenen durum, standart toleranslarını tam karşılamasa da kısa devre davranışının sarım sayısına duyarlılığını incelemek amacıyla dikkate alınmıştır. Sargılar arası mesafe orijinal durum ile aynı tutularak simülasyon çalışması yapılmıştır. Kayıplar ve toplam ağırlığa ilişkin sonuçlar Tablo 4.7'de verilmektedir.

1	22	23	44
2	21	24	43
3	20	25	42
4	19	26	41
5	18	27	40
6	17	28	39
7	16	29	38
8	15	30	37
9	14	31	36
10	13	32	35
11	12	33	34

Şekil 4.9: Referans tasarımda sarım sayısına bağlı sargı yerleşimi

1	20	21	40
2	19	22	39
3	18	23	38
4	17	24	37
5	16	25	36
6	15	26	35
7	14	27	34
8	13	28	33
9	12	29	32
10	11	30	31

Şekil 4.10: Durum-6 için sarım sayısı değişikliğine bağlı sargı yerleşimi

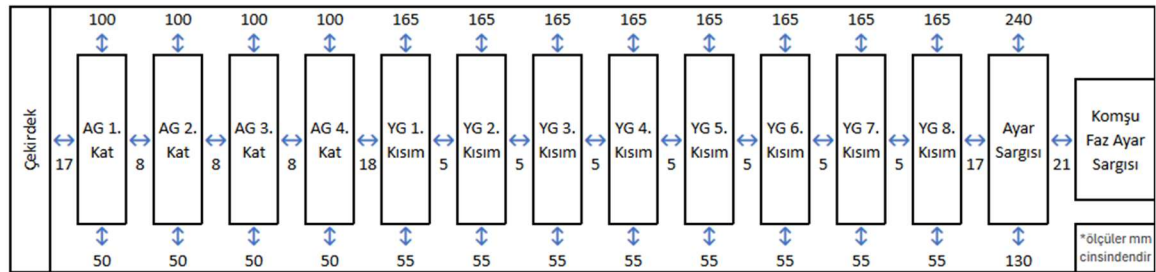
Tablo 4.7: Sarım sayılarının düşürüldüğü durumda sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları

Sargı	Omik kayıp (kW)	Eddy kaybı (kW)	Toplam kayıp (kW)	Ağırlık (kg)
YG	126,80	8,20	135,01	4866
AG	83,33	3,76	87,01	3167
Ayar	19,52	0,17	19,70	503
Toplam	229,66	12,14	241,81	8536

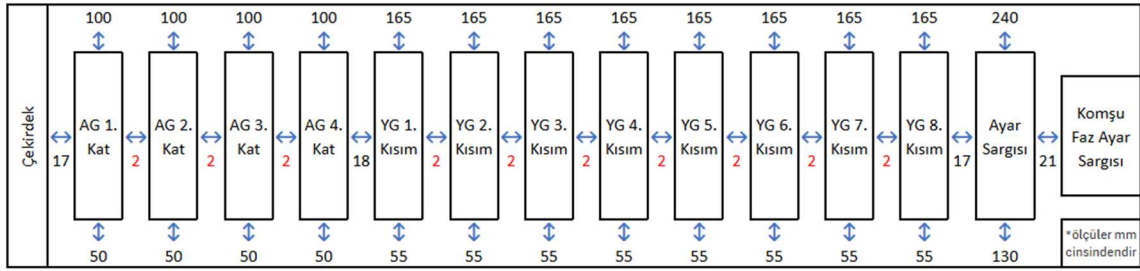
4.6 Minimum Gerilim Kademesinde Eksenel Soğutma Kanallarının Kaldırılması

Durum-7: Bu durumda AG sargısındaki 3 adet 8 mm ve YG sargısındaki 5 adet 5 mm eksenel soğutma kanalı kaldırılmıştır. Bu sayede toplam sargı kalınlığı azalmış ve bu duruma bağlı azalan çaplar ile kullanılan bakır miktarı azalmıştır. Bu değişiklik sargı geometrisini, kaçak akı dağılımını, kısa devre empedansını ve kayıpları etkilemektedir. Ayrıca mekanik gerilme dağılımında da farklılıklar oluşmaktadır. Bu senaryo, soğutma tasarımının elektromanyetik ve mekanik davranış üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla incelenmiştir. AG sargısında 3 adet 8 mm, YG sargısında 5 adet 5 mm soğutma kanalı bulunmaktadır. Bu çalışmada tüm kanallar çıkarılarak analiz yapılmıştır. Boyutlar azaldığı için u_k daha düşük, ağırlıklar ve kayıplar daha az çıkması beklenmektedir. Bu durum istenilen bir durumdur ancak bu kanallar isminden de anlaşılacağı üzere soğutma etkilerine sahip olduklarından termal dayanım için üretilecek tasarımlarda bulunmaları elzemdir.

Sargılar arası mesafe Şekil 4.12’de verilmektedir. Sargılar arası şişme payları ve izolasyonlar için 2 mm pay ile analizler gerçekleştirilmiştir. Kayıplar ve toplam ağırlığa ilişkin sonuçlar Tablo 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.11: Referans tasarımda eksenel soğutma kanallı sargı yerleşimi



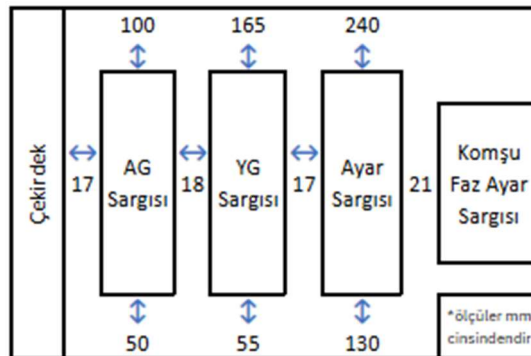
Şekil 4.12: Durum-7 için eksenel soğutma kanallarının kaldırıldığı sargı yerleşimi

Tablo 4.8: Soğutma kanallarının olmadığı durumda sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları

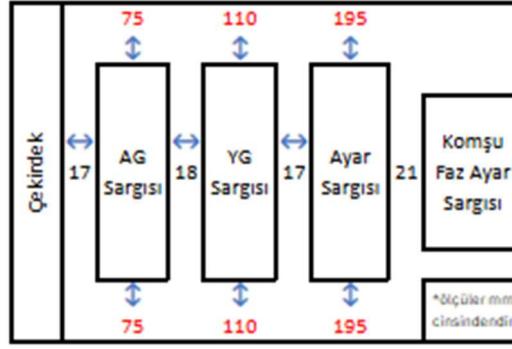
Sargı	Omik kayıp (kW)	Eddy kaybı (kW)	Toplam kayıp (kW)	Ağırlık (kg)
YG	132,55	7,09	139,64	4972
AG	88,40	4,60	93,00	3359
Ayar	17,76	0,09	17,84	457
Toplam	238,70	11,77	250,47	8788

4.7 Minimum Gerilim Kademesinde Sargı Orta Nokta Mesafelerinin Dengelenmesi

Durum-8: Bu senaryoda, minimum gerilim kademesinde sargıların aksiyel yöndeki konumları değiştirilerek üst ve alt boyunduruklara olan mesafelerin etkisi incelenmiştir. Durum-8’de AG sargısı 25 mm, YG sargısı ise 55 mm yukarı taşınmıştır (Şekil 4.14). Böylece sargı merkezleri arasındaki düşey mesafe azaltılmış, aksiyel yerleşimin uç itme kuvvetleri üzerindeki etkisi ayrıca incelenmiştir. Bu düzenleme ile sargıların radyal boyutları, sarım sayıları ve bağlantı durumu korunmuş; yalnızca aksiyel yerleşim değiştirilmiştir. Amaç, aksiyel konum değişiminin u_k , kısa devre akımı, kayıplar ve özellikle uç itme kuvvetleri üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Kayıplar ve toplam ağırlığa ilişkin sonuçlar Tablo 4.9’da verilmektedir.



Şekil 4.13: Referans tasarımda aksiyel sargı konumu



Şekil 4.14: Durum-8 için aksiyel sargı konumu değişimi

Tablo 4.9: Sargı ortalarının birbirine denklediği sargı kayıp değerleri ve ağırlıkları

Sargı	Omik kayıp (kW)	Eddy kaybı (kW)	Toplam kayıp (kW)	Ağırlık (kg)
YG	143,00	5,36	148,35	5369
AG	91,67	3,54	95,20	3483
Ayar	19,53	0,03	19,55	503
Toplam	254,19	8,93	263,11	9355

5. BULGULARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Üçüncü bölümde, çalışmada referans alınan ana transformatöre ait tasarım verileri verilmiş ve transformatörün temel elektriksel büyüklükleri, geometrik ölçüleri, sargı düzeni ve kısa devre hesabında kullanılan başlangıç parametreleri tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde ise bu referans tasarım üzerinden sekiz farklı tasarım durumu oluşturulmuş ve her durum için kısa devre davranışını etkileyen değişkenler ayrı ayrı incelenmiştir. Bu senaryolarda gerilim kademesi, sargı yerleşimi, sargılar arası mesafe, sarım sayısı, soğutma kanalı düzeni ve aksiyel konumlandırma gibi parametreler kontrollü biçimde değiştirilmiştir.

Bu bölümde, önceki bölümde ayrı ayrı değerlendirilen sekiz durumun sonuçları birlikte ele alınmaktadır. Karşılaştırmanın sağlıklı yapılabilmesi için her durumda aynı hesaplama yaklaşımı kullanılmış; kısa devre empedansı, kısa devre reaktansı, direnç bileşeni, sargı kayıpları ve toplam sargı ağırlığı ortak değerlendirme kriterleri olarak seçilmiştir. Böylece elde edilen farkların doğrudan ilgili tasarım değişikliğinden kaynaklandığı kabul edilerek durumlar arası karşılaştırma yapılmıştır.

Karşılaştırma kapsamında ilk olarak sargı kayıpları ve ağırlıklar değerlendirilmiştir. Tablo 5.1’de sekiz farklı durum için omik kayıp, girdap akımı kaybı, toplam kayıplar ve sargıların toplam ağırlığı birlikte verilmiştir.

Tablo 5.1: Sargı kayıpları ve ağırlıklarının karşılaştırılması

Durum	Omik kayıp (kW)	Eddy kaybı (kW)	Toplam kayıp (kW)	Toplam Ağırlık (kg)
Durum-1	254,19	11,81	265,90	9355
Durum-2	207,60	12,51	220,11	9355
Durum-3	200,65	13,38	214,03	9355
Durum-4	257,99	11,93	269,92	9488
Durum-5	261,16	15,06	276,22	9724
Durum-6	229,66	12,14	241,80	8536
Durum-7	238,70	11,77	250,47	8788
Durum-8	254,19	8,92	263,11	9355

Tablo 5.1'den görüleceği üzere, kademe konumu ile sargı geometrisinin kayıp dağılımına etkisinin doğrudan olduğunu söylemek mümkündür. Durum-1’de toplam sargı kaybı 265,9 kW olarak belirlenirken, ayar sargısını devre dışı bıraktığımız Durum-2’de ise, toplam

kayıplar 220,11 kW olarak bulunmakta, maksimum kademe Durum-3'te ise 214,03 kW olarak kayıp değeri elde edilmektedir. Böylelikle, ilk üç durum için kayıp seviyesini etkileyen temel unsurların aktif sarım sayısı ile akım dağılımı olduğunu söylemek mümkündür.

Durum-4 ve Durum-5'te toplam kayıplar referans duruma göre artmıştır. Bu artış, sargılar arası mesafe ve yerleşim değişikliklerinin iletken uzunluğu ile kaçak akı dağılımını değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Durum-5'te toplam sargı ağırlığının 9724 kg'a yükselmesi, bu tasarımın malzeme kullanımı açısından da daha ağır bir çözüm ürettiğini göstermektedir.

Durum-6 ve Durum-7'de toplam sargı ağırlığı referans duruma göre azalmıştır. Ancak bu azalma yalnızca kayıp ve ağırlık açısından yorumlanmamalıdır. Soğutma kanallarındaki daralma veya kanal sayısındaki azalma, yağ dolaşımı ve termal dayanım açısından ayrıca incelenmelidir. Bu nedenle bu iki durum, elektriksel sonuçlar bakımından avantajlı görünse de üretilebilirlik ve soğutma performansı açısından ek değerlendirme gerektirmektedir.

Durum-8'de toplam ağırlık ve kayıp değerleri referans tasarımla aynı seviyede kalmıştır. Bu durum, aksiyel yöndeki yer değiştirmenin sargı malzeme miktarını ve kayıp seviyesini değiştirmedikçe, ancak mekanik kuvvet dağılımı açısından ayrıca incelenmesi gereken bir tasarım etkisi oluşturduğunu göstermektedir.

Tablo 5.1'e bakıldığında, tasarım senaryoları arasında toplam sargı kaybı ve sargı ağırlığı bakımından belirgin farklar olduğu görülmektedir. En düşük toplam kayıp kademe değişimine bağlı olarak Durum-3'te elde edilirken, en yüksek kayıp ve ağırlık artışı geometrik değişikliklerin etkili olduğu durumlarda ortaya çıkmıştır. Bu nedenle kısa devre davranışı değerlendirilirken yalnızca empedans ve kısa devre akımı değil, aynı zamanda kayıp seviyesi, iletken ağırlığı ve termal uygulanabilirlik birlikte ele alınmalıdır.

Analizlerde sargıların geometrik yerleşimi ve iletken kesitleri ilgili durum tasarımına göre güncellenmiş; diğer parametreler karşılaştırılabilirlik amacıyla sabit tutulmuştur. Kısa devre empedansı, kısa devre reaktansı ve kayıp bileşenleri aynı yöntemle hesaplanarak R_k , X_k ve u_k değerleri elde edilmiştir (Tablo 5.2). Bu sayede, sonuçlar arasındaki farklar doğrudan tasarım değişikliğine bağla olarak incelenebilir hale getirilmiştir.

Tablo 5.2: Kısa devre empedansı, toplam sargı kaybı ve sargı ağırlığı karşılaştırması

Durum	u_k (%)	R_k (%)	X_k (%)	Toplam kayıp (kW)	Toplam ağırlık (kg)
Durum-1	12,61	0,53	12,60	265,90	9355
Durum-2	13,27	0,44	13,27	220,11	9355
Durum-3	14,06	0,43	14,06	214,03	9355
Durum-4	14,36	0,54	14,35	269,92	9488
Durum-5	18,17	0,55	18,16	276,22	9724
Durum-6	11,67	0,484	11,662	241,81	8536
Durum-7	10,36	0,50	10,36	250,47	8788
Durum-8	12,27	0,53	12,26	263,11	9355

Tablo 5.2, tasarım değişikliklerinin kısa devre empedansı üzerindeki etkisini ve buna bağlı olarak kısa devre akım seviyesini belirlemek açısından temel karşılaştırma tablosu niteliğindedir. Çünkü kısa devre akımı doğrudan kısa devre empedansı ile ters orantılıdır; u_k değeri arttıkça kısa devre akımı azalmakta, u_k değeri düştükçe kısa devre akımı artmaktadır.

Referans tasarım olan Durum-1’de kısa devre gerilimi %12,616 olarak elde edilmiştir. Benzer kısa devre gerilimi Durum-8’de de görülmektedir. Bu durum, aksiyel yönde yapılan simetrik sargı düzenlemesinin toplam kısa devre empedansını değiştirmediğini göstermektedir. Buna karşılık Durum-8’de toplam kayıp ve toplam ağırlık referans durum ile yakın seviyede kalmıştır. Bu nedenle aksiyel yerleşim değişikliğinin, kayıp ve ağırlık üzerinde belirgin etkisi oluşmamıştır.

Kademe konumlarının etkisi incelendiğinde, Durum-2’de u_k değeri %13,27’ye, Durum-3’te ise %14,064’e yükselmiştir. Bu artış, kademe değişiminin etkin sarım sayısı ve kaçak reaktans üzerinde belirgin etkisi olduğunu göstermektedir. Durum-3’te hem u_k değerinin artması hem de toplam sargı kaybının 214,029 kW ile en düşük seviyede kalması, bu durumun kısa devre akımını sınırlama ve kayıp azaltma açısından olumlu bir sonuç verdiğini göstermektedir.

Durum-4 ve Durum-5’te sargılar arası mesafe ve yerleşim değişikliklerinin etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Özellikle Durum-5’te u_k değeri %18,166’ya yükselmiş ve bu durum tüm senaryolar içinde en yüksek kısa devre empedansını vermiştir. Bu sonuç, sargılar arası mesafe artışının kaçak reaktansı yükselttiğini ve kısa devre akımını önemli ölçüde düşüreceğini göstermektedir. Ancak aynı durumda toplam sargı ağırlığının 9724 kg’a

çıkması, bu tasarımın malzeme kullanımı açısından daha ağır ve ekonomik açıdan daha dezavantajlı olduğunu göstermektedir.

Durum-6 ve Durum-7'de u_k değerinin azaldığı görülmektedir. Durum-6'da u_k %11,67'ye, Durum-7'de ise %10,36'ya düşmüştür. Özellikle Durum-7, tüm durumlar içinde en düşük kısa devre empedansına sahiptir. Bu durum, kısa devre akımının ve buna bağlı elektrodinamik kuvvetlerin en yüksek seviyeye çıkabileceği senaryodur. Bu nedenle Durum-7, kayıp ve ağırlık açısından bazı avantajlar sağlasa da kısa devre dayanımı bakımından daha kritik bir tasarım olarak değerlendirilmelidir.

Genel olarak Tablo 5.2, kısa devre empedansının esas olarak reaktans bileşeni tarafından belirlendiğini göstermektedir. Tüm durumlarda X_k değeri R_k değerine göre çok daha büyüktür. Bu nedenle u_k değişimleri büyük ölçüde kaçak reaktans değişiminden oluşmaktadır. Sargılar arası mesafenin artırıldığı durumlarda X_k ve u_k artarken, sargıların birbirine yaklaştığı veya kanal düzeninin değiştirildiği durumlarda u_k azalmaktadır.

Bu sonuçlara göre, kısa devre akımını sınırlama açısından yüksek u_k değerine sahip Durum-5 ve Durum-4 avantajlı tasarım durumları olarak öne çıkmaktadır. Ancak yalnızca kısa devre akımını düşürmek yeterli bir tasarım kriteri değildir. Ağırlık, kayıp, maliyet ve termal performans da dikkate alındığında, Durum-3 daha dengeli bir sonuç vermektedir. Durum-7 ise düşük u_k nedeniyle kısa devre akımı ve elektromanyetik kuvvetler açısından en kritik durum olarak değerlendirilmelidir.

Tablo 5.2'de elde edilen u_k değerleri, çalışmanın devamında yapılacak kısa devre akımı, tepe kısa devre akımı, akım yoğunluğu ve kısa devre sonrası sıcaklık artışı hesaplamaları için temel giriş verisi olarak kullanılmıştır. Her bir durum için hesaplanan kısa devre empedansı farklı olduğundan, kısa devre akımı ve buna bağlı termal/mekanik zorlanmalar da doğrudan değişmektedir. Bu nedenle sonraki alt bölümlerde, burada verilen u_k değerleri esas alınarak her tasarım durumuna ait kısa devre akımı, akım yoğunluğu ve sargı sıcaklıkları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Böylece geometrik tasarım değişikliklerinin yalnızca empedans seviyesine göre değil, kısa devre anındaki elektriksel ve termal dayanım davranışına olan etkisi de incelenmektedir.

5.1 Üç Faz Kısa Devre Akımı Hesapları

Güç transformatörlerinin kısa devre dayanımının değerlendirilmesinde, arıza anında oluşan akımın hem termik hem de elektrodinamik etkilerinin birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle kısa devre incelemelerinde yalnızca başlangıç simetrik kısa devre akımının değil, aynı zamanda akımın tepe değerinin ve bu tepe değeri belirleyen sistem parametrelerinin de hesaplanması zorunludur. IEC 60076-5 standardında transformatörlerin dış kısa devre koşullarına karşı termik ve mekanik açıdan yeterli dayanım göstermesi gerektiği belirtilmektedir.

Çalışmanın bu kısmında üç faz kısa devre akımı hesapları, IEC 60909-0 standardında tanımlanan hesap yaklaşımı esas alınarak yürütülmüştür. Bu kapsamda başlangıç simetrik kısa devre akımı, tepe kısa devre akımı, tepe faktörü ve sistemin X/R oranı temel büyüklükler olarak ele alınmıştır. IEC 60909-0'a göre başlangıç simetrik kısa devre akımı, kısa devre noktasındaki eşdeğer gerilim kaynağı ile eşdeğer kısa devre empedansına bağlı olarak belirlenmektedir. Aynı standartta tepe kısa devre akımının hesabında kullanılan k katsayısının şebekenin direnç-reaktans oranına bağlı olduğu ve kısa devrenin ilk yarım periyodundaki en büyük akım değerinin bu yolla elde edildiği ifade edilmektedir.

Kısa devre akımının tepe değeri, sargılar üzerinde oluşan elektromanyetik kuvvetlerin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Çünkü kısa devrenin ilk anında ortaya çıkan asimetric akım bileşeni, simetrik kısa devre akımına göre daha yüksek zorlanmalara neden olmakta ve transformatörün mekanik dayanımını belirleyen esas yükleme durumunu oluşturmaktadır. Bu bağlamda, X/R oranı yalnızca kısa devre akımının zamana bağlı değişimini tanımlayan bir büyüklük değil, aynı zamanda sargılarda meydana gelen maksimum radyal ve eksenel kuvvet seviyelerinin belirlenmesinde doğrudan etkili olan bir parametredir. IEC 60076-5 standardında da kısa devre şartlarındaki mekanik etkilerin değerlendirilmesinde akımın ilk tepe değerinin esas alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

Bu bölümde öncelikle başlangıç simetrik kısa devre akımı hesaplanmış, daha sonra sistemin X/R oranına bağlı olarak tepe faktörü belirlenmiş ve buna bağlı tepe kısa devre akımı elde edilmiştir. Hesaplanan bu büyüklükler, izleyen bölümlerde sargılar üzerinde oluşan elektromanyetik kuvvetlerin ve kısa devre dayanım performansının değerlendirilmesinde temel girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Böylece kısa devre akımının yalnızca

büyüklüğü değil, kısa devrenin transformatör üzerinde oluşturduğu en kritik mekanik yükleme seviyesi de analize dahil edilmiştir.

Her durum için üç faz simetrik kısa devre akımı Denklem (5.1) ile hesaplanmıştır [16], [17], [18], [19]. Elde edilen bu akım değeri üzerinden Denklem (5.2) ile Denklem (5.6) arasındaki denklemler kullanılarak eşdeğer X/R oranı ve ilgili k katsayısı belirlenmiş; tepe kısa devre akımı ise Denklem (5.7) ile elde edilmiştir. Bu yaklaşım ile kısa devre rejimindeki başlangıç simetrik akım bileşeni ile ilk tepe değeri birlikte dikkate alınarak termik ve mekanik zorlanmaların değerlendirilmesine esas teşkil eden akım büyüklükleri elde edilmiştir.

$$I_{sc} = I_n \cdot \frac{100}{u_k} [A] \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de I_{sc} kısa devre anındaki simetrik akımı, I_n anma akımını ve u_k analiz sonuçlarından elde edilen kısa devre empedansını ifade etmektedir. Kısa devre akımının tepe değerini elde etmek için Denklem (5.2) ile Denklem (5.7) arasındaki denklemler kullanılmıştır.

$$R = \frac{P_k}{3 \cdot I_n^2} [\Omega] \quad (5.2)$$

Denklem (5.2)'de P_k transformatörün kısa devre kaybını, R ise kısa devre empedansının direnç bileşenini ifade etmektedir. Analizlerde elde edilen kayıpların üzerine ilave kayıplar eklenmiş ve ilave kayıplar 5 kW kabul edilmiştir.

$$V_{ph} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} [V] \quad (5.3)$$

Denklem (5.3)'te V_{ph} , üç fazlı sistemde hat-hat geriliminden elde edilen faz gerilimidir. Bu değer, kısa devre empedansının faz başına mutlak değerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$Z = \frac{u_k \cdot V_{ph}}{I_n} [\Omega] \quad (5.4)$$

Denklem (5.4)'te Z , transformatörün faz başına kısa devre empedansını ifade etmektedir.

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} [\Omega] \quad (5.5)$$

Denklem (5.5)'te X , kısa devre empedansının reaktans bileşenidir.

$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}} \quad (5.6)$$

Denklem (5.6)'da k, IEC 60909 yaklaşımına göre kısa devre akımının tepe değerinin hesaplanmasında kullanılan asimetri katsayısıdır. Bu katsayı, kısa devre eşdeğer devresindeki X/R oranına bağlıdır. X/R oranı arttıkça doğru akım bileşeninin etkisi artmakta ve kısa devre akımının ilk tepe değeri daha yüksek olmaktadır.

$$I_{peak} = I_{sc} \cdot (k\sqrt{2}) [A] \quad (5.7)$$

Denklem (5.7)'de I_{peak} , kısa devre akımının ilk tepe değeridir.

Tablo 5.3: Simetrik ve tepe kısa devre akımları

Durum	$I_{sc} AG (kA)$	$I_{sc} YG (kA)$	$k\sqrt{2}$	$I_{peak} AG (kA)$	$I_{peak} YG (kA)$
Durum-1	36,32	7,37	2,66	96,7	19,61
Durum-2	34,53	6,31	2,69	93,0	16,99
Durum-3	32,58	5,41	2,71	88,1	14,63
Durum-4	33,95	6,89	2,67	90,6	18,39
Durum-5	25,22	5,12	2,71	68,2	13,85
Durum-6	38,54	7,82	2,67	102,8	20,85
Durum-7	44,23	8,97	2,64	116,7	23,67
Durum-8	37,36	7,58	2,66	99,3	20,15

Her bir durum için üstteki hesaplamalar yapılarak Tablo 5.3 verileri elde edilmiştir. I_{sc} , kısa devre koşullarında termik zorlanmaların ve kısa devre akım yoğunluklarının belirlenmesinde temel akım büyüklüğü olarak kullanılmıştır.

Durum-2 hariç tüm tasarım durumlarında ayar sargısı YG sargısı ile elektriksel olarak bağlı olduğundan, ayar sargısından geçen akım YG sargı akımı ile aynı kabul edilmiştir. Durum-2'de ise ayar sargısı devreye bağlı olmadığından, bu sargı üzerinden akım akışı oluşmamış ve ayar sargısı akımı 0 A olarak alınmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde genel eğilimin, kısa devre gerilimi u_k arttıkça simetrik kısa devre akımının azalması yönünde olduğudur. Bu durum, kısa devre akımının u_k ile ters orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. I_{sc} akımındaki azalmaya bağlı olarak tepe kısa devre akımı I_{peak} değerlerinde de genel olarak düşüş gözlenmiştir. Ancak I_{peak} yalnızca u_k değerine bağlı değildir. X/R oranındaki değişim, asimetrik akım katsayısı k üzerinde etkili

olduğundan, bazı tasarım durumlarında I_{peak} değerindeki değişim I_{SC} ile birebir aynı oranda gerçekleşmemektedir. Bu nedenle kısa devre sonuçları değerlendirilirken yalnızca u_k değeri değil; X/R , k , I_{SC} ve I_{peak} büyüklükleri birlikte ele alınmalıdır.

Referans tasarım olan Durum-1’de AG tarafı kısa devre akımı 36,318 kA, YG tarafı kısa devre akımı ise 7,37 kA olarak hesaplanmıştır. Benzer kısa devre akımı değerlerinin Durum-8’de de elde edilmesi, bu tasarım değişikliğinin kısa devre empedansı ve simetrik kısa devre akımı açısından referans tasarımla aynı sonucu verdiğini göstermektedir. Ancak bu eşdeğerlik yalnızca elektriksel kısa devre büyüklükleri için geçerlidir. Durum-8’in mekanik etkisi, aksiyel yerleşim ve uç itme kuvvetleri üzerinden ayrıca değerlendirilmiştir.

En düşük kısa devre akımı Durum-5’te elde edilmiştir. Bu durumda AG tarafında 25,22 kA, YG tarafında ise 5,12 kA kısa devre akımı hesaplanmıştır. Referans tasarıma göre kısa devre akımının belirgin şekilde azalması, bu durumun kısa devre kaynaklı termik ve mekanik zorlanmaları azaltma açısından olumlu olduğunu göstermektedir. Bunun temel nedeni, ilgili tasarım değişikliği sonucunda kısa devre empedansının artması ve buna bağlı olarak kısa devre akımının sınırlandırılmasıdır. Bu nedenle Durum-5, kısa devre akımı bakımından en avantajlı tasarım durumu olarak öne çıkmaktadır.

En yüksek kısa devre akımı ise Durum-7’de oluşmuştur. Bu durumda AG tarafında 44,23 kA, YG tarafında ise 8,97 kA kısa devre akımı hesaplanmıştır. Durum-7’de soğutma kanallarının kaldırılması sonucunda sargı yapısı daha kompakt hale gelmiş, kaçak reaktans azalmış ve u_k değeri düşmüştür. Buna bağlı olarak kısa devre akımı referans tasarıma göre artmıştır. Elektromanyetik kuvvetlerin kısa devre akımının karesi ile orantılı olduğu dikkate alındığında, Durum-7’de oluşacak mekanik zorlanmaların referans tasarıma göre önemli ölçüde artacağı değerlendirilmektedir. Bu nedenle Durum-7, kısa devre akımı ve mekanik zorlanma açısından en kritik tasarım durumu olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 5.3’te verilen $k\sqrt{2}$ katsayısının tüm durumlarda 2,64–2,71 aralığında kaldığı görülmektedir. Bu dar aralık, tepe kısa devre akımındaki ana belirleyici unsurun asimetrik akım katsayısından çok simetrik kısa devre akımı seviyesi olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte X/R oranındaki değişim tepe faktörünü etkilediğinden, özellikle birbirine yakın I_{SC} değerlerine sahip tasarımlarda I_{peak} karşılaştırması ayrıca önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, sargı geometrisi ve yerleşim değişiklikleri yalnızca kısa devre gerilimini değil, kısa devre anında oluşacak termik ve mekanik zorlanma seviyelerini de doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda I_{SC} termik zorlanmalar ve kısa devre akım yoğunluğu açısından, I_{peak} ise elektromanyetik kuvvetler ve mekanik dayanım açısından belirleyici büyüklük olarak değerlendirilmiştir. Buna göre Durum-5 kısa devre akımını sınırlama açısından en olumlu tasarım durumu olarak öne çıkarken, Durum-7 kısa devre kuvvetleri ve mekanik dayanım açısından en kritik tasarım durumu olarak ortaya çıkmaktadır.

5.2 Akım Yoğunluğu ve Kesit Bazlı Değerlendirme

Akım yoğunluğu, transformatör sargılarının elektriksel ve termal yüklenme seviyesini tanımlayan temel tasarım parametrelerinden biridir. Birim iletken kesitinden geçen akım miktarını ifade eden bu büyüklük, yük kayıpları, sıcaklık artışı, soğutma gereksinimi ve iletken boyutlandırması ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle akım yoğunluğunun uygun sınırlar içerisinde tutulması, yalnızca verimli işletme açısından değil, aynı zamanda sargıların termal dayanımı, yalıtım ömrü ve uzun dönem işletme güvenilirliği açısından da kritik önem taşımaktadır.

Bu kısımda, her bir durum ve her bir sargı için akım yoğunluğu ayrı ayrı hesaplanmış ve elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Kısa devre anındaki akım yoğunluğu Denklem (5.8) ile hesaplanmıştır.

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{Q} \quad (5.8)$$

Akım yoğunlukları, her durum ve her sargı için dördüncü bölümde verilen iletken kesitleri (Q , AG sargısı için 1380 mm², YG sargısı için 269 mm², ayar sargısı için 225 mm² alınmıştır) ve Tablo 5.3'te verilen kısa devre akımları (I_{SC}) kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.4: Kısa devre akım yoğunlukları

Durum	$J_{SC\ AG} (A/mm^2)$	$J_{SC\ YG} (A/mm^2)$	$J_{SC\ Ayar} (A/mm^2)$
Durum-1	26,32	27,40	32,90
Durum-2	25,02	23,44	0,00
Durum-3	23,61	20,11	24,15
Durum-4	24,60	25,61	30,75
Durum-5	18,28	19,03	22,85
Durum-6	27,93	29,07	34,91
Durum-7	32,05	33,36	40,06
Durum-8	27,07	28,18	33,84

Tablo 5.4’te verilen kısa devre akım yoğunlukları incelendiğinde, tasarım durumlarına bağlı olarak AG, YG ve ayar sargılarında oluşan zorlanmaların belirgin şekilde değiştiği görülmektedir. Durum-1 referans tasarım olarak alındığında AG sargısında 26,32 A/mm², YG sargısında 27,40 A/mm² ve ayar sargısında 32,90 A/mm² kısa devre akım yoğunluğu elde edilmiştir. Durum-8’de ise bu değerler sırasıyla 27,07 A/mm², 28,18 A/mm² ve 33,84 A/mm² olarak hesaplanmıştır. Durum-8’de benzer değerlerin elde edilmesi, bu durumdaki geometrik değişikliğin kısa devre akımı ve sargı kesitleri bakımından referans tasarıma eşdeğer sonuç verdiğini göstermektedir.

Durum-2’de ayar sargısının devrede olmaması nedeniyle $J_{sc\ Ayar}$ değeri 0,00 A/mm² olarak verilmiştir. Bu durum için AG ve YG sargılarındaki akım yoğunlukları referans duruma göre azalmıştır. Durum-3’te de benzer şekilde AG, YG ve ayar sargısı akım yoğunlukları referans tasarıma göre daha düşük seviyede kalmıştır. Bu sonuç, ilgili kademe konumlarında kısa devre empedansının artmasına bağlı olarak kısa devre akımının ve dolayısıyla akım yoğunluklarının azaldığını göstermektedir.

Durum-5, tüm sargılar için en düşük kısa devre akım yoğunluklarının elde edildiği durumdur. AG sargısında 18,28 A/mm², YG sargısında 19,03 A/mm² ve ayar sargısında 22,85 A/mm² değerleri hesaplanmıştır. Bu durum, sargılar arası mesafe artışıyla kısa devre empedansının yükselmesi ve kısa devre akımının düşmesi sonucunda oluşmuştur. Buna karşılık Durum-7’de tüm sargılar için en yüksek akım yoğunlukları meydana gelmiştir. Özellikle ayar sargısında 40,06 A/mm² değerine ulaşılması, bu durumun termal zorlanma açısından en kritik tasarım olduğunu göstermektedir.

Genel olarak kısa devre akım yoğunluğu değerleri, önceki bölümde hesaplanan u_k değerleriyle uyumlu bir eğilim göstermektedir. u_k değerinin yüksek olduğu tasarım durumlarında kısa devre akımı ve akım yoğunluğu azalırken, u_k değerinin düşük olduğu durumlarda akım yoğunlukları artmaktadır. Bu nedenle Durum-5 kısa devre akım yoğunluğu bakımından en güvenli durum olarak öne çıkarken, Durum-7 kısa devre süresince AG sargısında 32,05 A/mm², YG sargısında 33,36 A/mm² ve ayar sargısında 40,06 A/mm² değerlerine çıktığından sıcaklık artışı ve termal dayanım açısından ayrıca dikkatle değerlendirilmesi gereken en kritik durumdur.

Akım yoğunluğu sonuçları, kısa devre termik zorlanmasının u_k değişimine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Durum-5'te kısa devre akımının azalmasına bağlı olarak tüm sargılarda en düşük akım yoğunluğu elde edilmiştir. Buna karşılık Durum-7'de AG sargısında 32,05 A/mm², YG sargısında 33,36 A/mm² ve ayar sargısında 40,06 A/mm² değerlerine ulaşılmıştır. Bu nedenle Durum-7, akım yoğunluğu açısından en kritik tasarım durumudur. Ancak bu değerler termik kısa devre sıcaklığı açısından izin verilen sınırların altında kaldığından, Durum-7 için temel risk termik dayanımdan çok mekanik zorlanma seviyesidir.

5.3 Termik Değerlendirme (θ_1)

Kısa devre koşullarında sargı iletkenlerinden geçen yüksek genlikli akımlar, kısa süreli fakat yoğun bir Joule ısınmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kısa devre dayanımının değerlendirilmesinde yalnızca elektrodinamik kuvvetler değil, kısa devre süresi sonunda sargı iletkenlerinde oluşan sıcaklık artışı da dikkate alınmalıdır. Bu bölümde termik değerlendirme, her bir tasarım durumu için kısa devre sonu iletken sıcaklığının hesaplanması esasına dayandırılmıştır.

Kısa devre sonu iletken sıcaklığı θ_1 , bakır iletkenler için IEC 60076-5 standardında verilen Denklem (5.9) kullanılarak hesaplanmıştır [12]. Denklem (5.9)'da θ_1 kısa devre sonu iletken sıcaklığını, θ_0 kısa devre öncesi başlangıç sıcaklığını, J kısa devre akım yoğunluğunu ve t kısa devre süresini ifade etmektedir. Hesaplamalarda kısa devre öncesi başlangıç sıcaklığı (θ_0) değeri 105 °C, kısa devre süresi (t) ise 2 s olarak alınmıştır. Kısa devre süresi müşteri şartnamesinde ayrıca belirtilmediği durumda, ilgili standartta verilen 2 s değeri esas alınmaktadır.

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (\theta_0 + 23)}{\frac{106000}{J^2 \cdot t} - 1} \quad (5.9)$$

Denklem (5.9)'da: θ_1 kısa devre sonu iletken sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), θ_0 kısa devre öncesi başlangıç sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), J kısa devre akım yoğunluğunu (A/mm^2), t kısa devre süresini (s) ifade etmektedir.

Tablo 5.4'te verilen kısa devre akım yoğunluğu değerleri kullanılarak AG, YG ve ayar sargıları için kısa devre sonu iletken sıcaklıkları Tablo 5.5'te hesaplanmıştır. Nominal kademe durumunda, yani Durum-2'de, ayar sargısı devrede olmadığından bu sargı için hesaplama yapılmamıştır. Bu nedenle ilgili değer sıcaklık değeri olarak değil, devre dışı durum göstergesi olarak değerlendirilmelidir.

Tablo 5.5: Kısa devre sonu iletken sıcaklıkları

Durum	θ_1 AG ($^{\circ}\text{C}$)	θ_1 YG ($^{\circ}\text{C}$)	θ_1 Ayar ($^{\circ}\text{C}$)
Durum-1	114,00	114,77	119,18
Durum-2	113,13	112,12	-
Durum-3	112,23	110,23	112,56
Durum-4	112,86	113,52	117,35
Durum-5	109,31	109,68	111,76
Durum-6	115,15	116,02	121,00
Durum-7	118,44	119,59	126,24
Durum-8	114,53	115,34	120,01

Tablo 5.5 incelendiğinde, kısa devre akım yoğunluğu arttıkça kısa devre sonu iletken sıcaklığının da yükseldiği görülmektedir. En düşük sıcaklık değerleri, kısa devre empedansının yüksek ve buna bağlı olarak kısa devre akım yoğunluğunun düşük olduğu Durum-5'te elde edilmiştir. Buna karşılık en yüksek sıcaklık değerleri Durum-7'de oluşmuştur. Bu durumda AG sargısında $118,44^{\circ}\text{C}$, YG sargısında $119,59^{\circ}\text{C}$ ve ayar sargısında $126,24^{\circ}\text{C}$ sıcaklık hesaplanmıştır. Bu sonuç, Durum-7'nin termik zorlanma bakımından en kritik senaryo olduğunu göstermektedir.

Hesaplanan tüm durumlarda kısa devre sonu iletken sıcaklıkları bakır iletkenler için izin verilen 250°C sınırının oldukça altında kalmıştır. Dolayısıyla incelenen tasarım senaryolarının tamamı, kısa devre sonrası termik dayanım açısından uygun kabul edilmektedir. Ancak Durum-7'de akım yoğunluğu ve sıcaklık değerlerinin diğer durumlara

göre daha yüksek olması nedeniyle, bu tasarımın mekanik kısa devre kuvvetleri ve soğutma kanalı etkileriyle birlikte ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir.

5.4 Elektromanyetik Kuvvetler ve Mekanik Gerilmelerin Hesabı

Önceki bölümde yapılan termik değerlendirme sonucunda, tüm tasarım durumlarında kısa devre sonu iletken sıcaklıklarının izin verilen sınır değerlerin altında kaldığı görülmüştür. Ancak güç transformatörlerinde kısa devre dayanımı yalnızca termik açıdan değerlendirilmemelidir. Kısa devre sırasında sargılardan geçen yüksek akımlar, kaçak manyetik alan ile etkileşerek sargı iletkenleri, izolasyon yapıları, radyal ve aksiyel destek elemanları üzerinde önemli mekanik zorlanmalar meydana getirmektedir.

IEC 60076-5 standardında kolon tipi transformatörlerde kısa devre sırasında dikkate alınması gereken temel elektromanyetik kuvvetler; her bir fiziksel sargı üzerindeki radyal içe veya dışa yönlü kuvvetler, maksimum aksiyel sıkıştırma kuvvetleri, maksimum aksiyel uç itme kuvvetleri, ortak baskı halkası veya pres plakası üzerindeki aksiyel kuvvetler ve AG sargısı çıkış uçlarında oluşan itme kuvvetleri olarak tanımlanmaktadır. Aynı standartta, bu kuvvetlerden kaynaklanan çevresel çekme/basma gerilmeleri, radyal eğilme gerilmeleri, aksiyel eğilme gerilmeleri ve izolasyon elemanlarındaki basma gerilmelerinin değerlendirilmesi gerektiği belirtilmektedir.

Bu çalışmada mekanik kısa devre değerlendirmesi, G. Bertagnolli'nin güç transformatörlerinde kısa devre dayanımına yönelik çalışmasında verilen hesap yaklaşımı temel esas alınarak yapılmıştır [30]. Bu kapsamda sargıların kısa devre davranışı; ortalama çevresel gerilme, iletkenin radyal eğilme gerilmesi ve aksiyel kuvvet bileşenleri üzerinden incelenmiştir. Böylece farklı sargı yerleşimleri ve geometrik değişikliklerin yalnızca kısa devre akımı ve termik dayanım üzerindeki etkisi değil, aynı zamanda mekanik zorlanma seviyesi üzerindeki etkisi de karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Mekanik hesaplar, tasarım durumları arasında göreceli karşılaştırma yapabilmek amacıyla kullanılmıştır. Hesaplanan değerler nihai mekanik dayanım onayı olarak değil; farklı sargı geometrilerinin kısa devre zorlanmasına etkisini ortaya koyan mühendislik göstergeleri olarak değerlendirilmiştir. Nihai mekanik dayanım değerlendirmesinde sargı presleme kuvveti, takoz düzeni, çıta yapısı, iletken mekanik dayanımı, izolasyon sıklığı ve üretim toleransları ayrıca dikkate alınmalıdır.

5.4.1 Ortalama çevresel çekme ve basma gerilmeleri

Kısa devre sırasında konsantrik sargı yapılarında oluşan radyal elektromanyetik kuvvetler, sargılarda çevresel yönde mekanik gerilmelere neden olmaktadır. Dış sargılarda radyal kuvvet etkisi sargıyı dışa doğru genişletmeye çalıştığından çevresel çekme gerilmesi oluşurken, iç sargılarda radyal kuvvet içe doğru etki ettiğinden çevresel basma gerilmesi meydana gelmektedir. Bu nedenle çekme ve basma gerilmeleri için kullanılan temel hesap yaklaşımı aynı olmakla birlikte, gerilmenin yorumu sargının iç veya dış konumda bulunmasına göre değişmektedir.

Bu çalışmada ortalama çevresel çekme ve basma gerilmeleri, Short-Circuit Duty of Power Transformers kitabında verilen ve ortalama sargı çapı esasına dayanan Denklem (5.10) kullanılarak hesaplanmıştır [30].

$$\sigma_t^* = 0,314 \cdot \frac{N \cdot I}{H_w} \cdot D_m \cdot J \cdot r^2 \cdot (k\sqrt{2})^2 \cdot 10^{-6} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (5.10)$$

Denklem (5.10)'da σ çevresel gerilmeyi, $N \cdot I$ amper-sarım değerini, D_m ortalama sargı çapını, H_w sargı yüksekliğini ve r aşırı akım katsayısını ifade etmektedir. Aşırı akım katsayısının karesi, kısa devre akımının anma akımına oranı olarak değerlendirilmiştir. YG ve AG tarafı zıt elektromanyetik alana sahip olsalar da hesap formülü aynı kalmakta; gerilmenin mekanik yorumu, sargının kısa devre sırasında içe veya dışa zorlanmasına bağlı olarak değişmektedir.

Dış sargıda hesaplanan gerilme, iletkenlerin dışa doğru genişleme eğilimine bağlı ortalama çevresel çekme gerilmesi olarak değerlendirilmiştir. İç sargıda ise aynı bağıntı ile elde edilen değer, sargının içe doğru basılmasına bağlı ortalama çevresel basma gerilmesi olarak yorumlanmıştır. Bu ayrım, kısa devre dayanımı açısından büyük önem taşımaktadır; çünkü çekme gerilmesi iletkenin mekanik akma dayanımıyla, basma gerilmesi ise iletkenin burkulma ve radyal stabilite davranışıyla ilişkilidir.

Tablo 5.6: Ortalama çevresel basma ve çekme gerilmeleri

Durum	$\sigma_{\text{AG}} (\text{sıkma}) (\text{N/mm}^2)$	$\sigma_{\text{YG}} (\text{germe}) (\text{N/mm}^2)$	$\sigma_{\text{Ayar}} (\text{N/mm}^2)$
Durum-1	46,90	73,32	12,36
Durum-2	41,00	51,96	-
Durum-3	36,82	38,60	6,34
Durum-4	38,94	61,53	10,19
Durum-5	23,15	35,52	3,03
Durum-6	53,15	82,91	12,25
Durum-7	62,26	93,45	15,53
Durum-8	46,80	73,16	12,03

Tablo 5.6’da verilen sonuçlar incelendiğinde, ortalama çevresel gerilmelerin kısa devre akımı ve sargı geometrisine bağlı olarak belirgin şekilde değiştiği görülmektedir. İç sargı konumundaki AG sargısı için hesaplanan değerler çevresel basma gerilmesi, dış sargı konumundaki YG sargısı için hesaplanan değerler ise çevresel çekme gerilmesi olarak değerlendirilmiştir. Ayar sargısındaki gerilme karakteri ise ilgili tasarım durumundaki bağlantı yönüne ve etkin amper-sarım dağılımına bağlı olarak yorumlanmıştır.

Referans tasarım olan Durum-1’de AG sargısında 46,90 N/mm² sıkma gerilmesi, YG sargısında 73,32 N/mm² germe gerilmesi ve ayar sargısında 12,36 N/mm² gerilme hesaplanmıştır. Bu değerler, sonraki tasarım durumlarının mekanik zorlanma seviyesinin karşılaştırılmasında referans alınmıştır.

Durum-2’de ayar sargısı devre dışı olduğundan ayar sargısı üzerinden akım geçmemekte ve bu nedenle ayar sargısı için çevresel gerilme oluşmamaktadır. Bu durumda AG sargısında 41,00 N/mm², YG sargısında ise 51,96 N/mm² gerilme hesaplanmıştır. Değerlerin referans tasarıma göre düşük çıkması, kademe bağlantısı ve etkin amper-sarım dağılımındaki değişimin kısa devre kuvvetlerini azaltmasıyla ilişkilidir.

Durum-3’te AG sargısında 36,82 N/mm², YG sargısında 38,60 N/mm² ve ayar sargısında 6,34 N/mm² gerilme elde edilmiştir. Bu durum, incelenen tasarımlar arasında çevresel gerilmelerin referans tasarıma göre belirgin şekilde azaldığı durumlardan biridir. Kademe bağlantısının değişmesiyle etkin amper-sarım dağılımı farklılaşmış ve özellikle YG sargısındaki çevresel çekme gerilmesi düşmüştür.

Durum-5, ortalama çevresel gerilmeler açısından en düşük zorlanma seviyesine sahip tasarım olarak öne çıkmaktadır. Bu durumda AG sargısında $23,15 \text{ N/mm}^2$, YG sargısında $35,52 \text{ N/mm}^2$ ve ayar sargısında $3,03 \text{ N/mm}^2$ gerilme hesaplanmıştır. Durum-5'te sargılar arası mesafenin artması kısa devre empedansını yükseltmiş, kısa devre akımını düşürmüş ve buna bağlı olarak elektromanyetik kuvvetler ile çevresel gerilmeler azalmıştır. Bu nedenle Durum-5, çevresel çekme ve basma gerilmeleri açısından en avantajlı tasarım durumudur. Buna karşılık en yüksek çevresel gerilmeler Durum-7'de elde edilmiştir. Durum-7'de AG sargısında $62,26 \text{ N/mm}^2$ sıkma gerilmesi, YG sargısında $93,45 \text{ N/mm}^2$ germe gerilmesi ve ayar sargısında $15,53 \text{ N/mm}^2$ gerilme hesaplanmıştır. Bu artış, soğutma kanallarının kaldırılmasıyla sargı yapısının daha kompakt hale gelmesi, kısa devre empedansının düşmesi ve kısa devre akımının yükselmesiyle açıklanabilir. Elektromanyetik kuvvetlerin kısa devre akımının karesiyle ilişkili olduğu dikkate alındığında, Durum-7'nin çevresel mekanik zorlanma açısından en kritik durum olduğu görülmektedir.

Durum-6'da AG ve YG sargılarındaki çevresel gerilmeler referans tasarıma göre bir miktar artmıştır. AG sargısında $53,15 \text{ N/mm}^2$, YG sargısında $82,91 \text{ N/mm}^2$ ve ayar sargısında $12,25 \text{ N/mm}^2$ değerleri hesaplanmıştır. Bu sonuç, ilgili geometrik değişikliğin kısa devre empedansını düşürmesi ve kısa devre akımını artırması nedeniyle çevresel gerilmeleri yükselttiğini göstermektedir.

Durum-8'de çevresel gerilme değerleri referans tasarıma yakın seviyede kalmıştır. Bu durumda AG sargısında $46,80 \text{ N/mm}^2$, YG sargısında $73,16 \text{ N/mm}^2$ ve ayar sargısında $12,03 \text{ N/mm}^2$ değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç, Durum-8'in ortalama çevresel gerilme bakımından referans tasarıma yakın davrandığını göstermektedir. Ancak Durum-8'de uç itme kuvvetlerinin yüksek çıkması nedeniyle bu tasarım yalnızca çevresel gerilme sonuçlarına bakılarak mekanik açıdan güvenli kabul edilmemelidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kısa devre empedansının yükseldiği durumlarda kısa devre akımı ve buna bağlı çevresel gerilmeler azalmaktadır. Kısa devre empedansının düştüğü durumlarda ise kısa devre akımı artmakta ve sargılarda oluşan çevresel çekme/basma gerilmeleri yükselmektedir. Bu nedenle ortalama çevresel gerilme hesabı, farklı sargı geometrilerinin genel radyal kısa devre zorlanması üzerindeki etkisini karşılaştırmak için temel bir mekanik gösterge olarak değerlendirilmiştir.

5.4.2 Çıtalar arasında kalan iletken grupları için radyal eğilme etkisinin değerlendirilmesi

Önceki bölümde, kısa devre sırasında sargılarda oluşan ortalama çevresel gerilme değerlendirilmiştir. Bu hesap, radyal kısa devre kuvvetlerinin tüm sargı kesiti üzerinde oluşturduğu genel çekme veya basma etkisini ifade etmektedir. Ancak sargı iletkenleri çevresel yönde sürekli olarak desteklenmiş bir yapı değildir. İletkenler, aksiyel çıtaların temas ettiği bölgelerde mekanik olarak desteklenirken, çıtalar arasında kalan bölgelerde kısa devre kuvveti altında serbest olarak zorlanmaktadır.

Bu nedenle, ortalama çevresel gerilme hesabına ek olarak, aksiyel çıtalar arasında kalan iletken bölgelerinin lokal radyal eğilme açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. IEC 60076-5 standardı kapsamında kısa devre dayanımının dinamik etkileri değerlendirilirken, iletkenlerin aksiyel çıtalar veya ara parça elemanları arasında kalan bölgedeki radyal eğilme davranışı ayrı bir kontrol başlığı olarak ele alınmaktadır. Bu nedenle bu bölümde yapılan değerlendirme, sargının genel çevresel gerilmesini değil; aksiyel çıtalar arasında desteklenmeden kalan iletken grubunun kısa devre kuvveti altındaki lokal radyal eğilme eğilimini temsil etmektedir.

Bu çalışmada değerlendirme, en kritik iletken grubu üzerinden yapılmıştır. Kritik grup olarak, iki soğutma kanalı arasında kalan ve en yüksek amper-sarım değerine sahip iletken grubu esas alınmıştır. Böylece hesaplama, tüm sargıya yayılmış ortalama bir büyüklük yerine, kısa devre kuvveti bakımından en olumsuz yerel bölgeyi temsil edecek şekilde yapılmıştır.

Çıtalar arasında desteklenmeyen çevresel uzunluğun belirlenmesi için öncelikle ilgili iletken grubunun dış çapı üzerinden dış çevre uzunluğu dikkate alınmıştır. Daha sonra bu çevre uzunluğundan, çevresel yönde çıtaların kapladığı toplam uzunluk çıkarılmıştır. Elde edilen değer, iletken grubunun çıtalara temas etmeyen toplam çevresel kısmını ifade etmektedir. Bu kısım, kısa devre sırasında radyal kuvvet altında desteklenmeden kalan bölge olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen desteklenmeyen çevresel uzunluk, ilgili iletken grubunun radyal kalınlığına oranlanmıştır. Bu oran, çıtalar arasında serbest kalan iletken bölgesinin kendi radyal kalınlığına göre ne kadar uzun olduğunu göstermektedir. Oranın büyümesi, iletkenin radyal

kuvvet altında eğilme eğiliminin artabileceğini göstermektedir. Bu nedenle söz konusu büyüklük, doğrudan bir gerilme değeri olarak değil, radyal eğilme açısından karşılaştırmalı bir kritikleşme göstergesi olarak kullanılmıştır.

Bu yaklaşım özellikle iç sargılar için dikkate alınmalıdır. İç sargılar kısa devre sırasında çekirdeğe doğru zorlandığından, çıtalar arasında kalan desteklenmeyen iletken bölgelerinde lokal eğilme ve stabilite kaybı riski oluşabilmektedir. Dış sargılarda ise radyal kuvvet dışı doğru açılma etkisi oluşturduğundan, çevresel çekme gerilmesine ek olarak yerel eğilme davranışının da dikkate alınması gerekir.

Sonuç olarak bu bölümde yapılan değerlendirme, önceki bölümde verilen ortalama çevresel gerilme hesabının yerine geçen bir hesap değildir. Ortalama çevresel gerilme sargının genel mekanik davranışını temsil ederken, bu bölümde aksiyel çıtalar arasında kalan ve desteklenmeyen iletken bölgelerinin lokal radyal eğilme eğilimi incelenmiştir. Böylece kısa devre mekanik dayanımı hem genel sargı gerilmesi hem de yerel iletken zorlanması açısından daha kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

Tablo 5.7: Çıtalar arası radyal eğilme gerilmeleri

Durum	$\sigma_{r \text{ AG}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_{r \text{ YG}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_{r \text{ Ayar}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
Durum-1	5,83	29,75	11,95
Durum-2	5,09	21,09	-
Durum-3	18,30	15,66	6,13
Durum-4	4,84	25,31	10,12
Durum-5	3,22	15,51	1,03
Durum-6	6,92	33,65	11,83
Durum-7	26,75	129,90	12,91
Durum-8	5,81	29,69	11,63

Tablo 5.7’de verilen sonuçlar incelendiğinde, radyal eğilme gerilmelerinin sargı tipine ve tasarım durumuna bağlı olarak belirgin şekilde değiştiği görülmektedir. AG sargısında radyal eğilme gerilmeleri genel olarak düşük seviyede kalırken, YG sargısında daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu durum, YG sargısının dış sargı konumunda bulunması, ortalama çapının daha büyük olması ve kısa devre sırasında radyal yönde genişleme eğilimi göstermesi ile ilişkilidir.

Referans tasarım olan Durum-1’de radyal eğilme gerilmesi AG sargısında $5,83 \text{ N/mm}^2$, YG sargısında $29,75 \text{ N/mm}^2$ ve ayar sargısında ise $11,95 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, radyal eğilme açısından en kritik sargının YG sargısı olduğunu göstermektedir. AG sargısı içte yer aldığından kısa devre sırasında içe doğru basma etkisine maruz kalmakta, YG sargısı ise dışa doğru genişleme eğilimi göstermektedir. Bu nedenle YG sargısında çıtalar arasında kalan iletken gruplarının lokal eğilme açısından ayrıca kontrol edilmesi gerekmektedir.

Durum-5’te radyal eğilme gerilmeleri tüm sargılarda düşük seviyeye inmiştir. Bu durumda AG sargısında $3,22 \text{ N/mm}^2$, YG sargısında $15,51 \text{ N/mm}^2$ ve ayar sargısında ise $1,03 \text{ N/mm}^2$ değerleri elde edilmiştir. Durum-5’te kısa devre empedansının yüksek olması kısa devre akımını sınırlamış, buna bağlı olarak radyal elektromanyetik kuvvetler ve lokal eğilme gerilmeleri azalmıştır. Bu nedenle Durum-5, radyal eğilme açısından en düşük zorlanmaya sahip tasarım durumlarından biridir.

En yüksek radyal eğilme gerilmesi ise YG sargısında Durum-7’de elde edilmiştir. Durum-7’de YG sargısında $129,90 \text{ N/mm}^2$, AG sargısında $26,75 \text{ N/mm}^2$ ve ayar sargısında $12,91 \text{ N/mm}^2$ radyal eğilme gerilmesi hesaplanmıştır. Durum-7’de soğutma kanallarının kaldırılması sonucunda sargı yapısı daha kompakt hale gelmiş, kısa devre empedansı azalmış ve kısa devre akımı artmıştır. Bu artış, radyal kuvvetlerin ve buna bağlı olarak çıtalar arasında kalan iletken gruplarındaki lokal eğilme gerilmelerinin yükselmesine neden olmuştur.

Durum-3’te AG sargısı için $18,3 \text{ N/mm}^2$ değerinin elde edilmesi dikkat çekicidir. Bu değer, diğer durumlara göre AG sargısında belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Bu artış, ayar sargısının bağlantı yönü ve etkin amper-sarım dağılımındaki değişim nedeniyle AG sargısı üzerindeki lokal radyal kuvvet dağılımının değişmesiyle açıklanabilir. Buna karşılık aynı durumda YG sargısındaki radyal eğilme gerilmesi $15,66 \text{ N/mm}^2$ seviyesine düşmüştür. Bu sonuç, kademe bağlantı düzeninin radyal kuvvet dağılımını sargılar arasında farklı şekilde etkileyebildiğini göstermektedir.

Durum-6 ve Durum-8 sonuçları referans tasarıma yakın seviyededir. Durum-6’da YG sargısında $33,65 \text{ N/mm}^2$, Durum-8’de ise $29,70 \text{ N/mm}^2$ radyal eğilme gerilmesi hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, söz konusu tasarım değişikliklerinin radyal eğilme açısından

referans tasarıma yakın bir davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ancak Durum-8'in uç itme kuvvetleri açısından kritik hale geldiği dikkate alındığında, yalnızca radyal eğilme sonuçlarına bakılarak mekanik açıdan güvenli kabul edilmemesi gerekmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, radyal eğilme gerilmeleri bakımından YG sargısı en kritik sargı olarak öne çıkmaktadır. Kısa devre akımının arttığı ve kısa devre empedansının düştüğü durumlarda radyal eğilme gerilmeleri artmakta; kısa devre empedansının yükseldiği durumlarda ise bu gerilmeler azalmaktadır. Bu nedenle radyal eğilme hesabı, sargıların genel çevresel gerilmesinden farklı olarak, aksiyel çıtalar arasında desteklenmeden kalan iletken gruplarının lokal mekanik davranışını değerlendirmek için gerekli bir kontrol adımındır.

5.4.3 Aksiyel kuvvetlerin değerlendirilmesi

Kısa devre sırasında sargılar üzerinde oluşan elektromanyetik kuvvetler yalnızca radyal yönde etkili olmamaktadır. Sargılar arasındaki kaçak alanın aksiyel bileşeni radyal kuvvetleri oluştururken, özellikle sargı uç bölgelerinde meydana gelen radyal kaçak alan bileşeni aksiyel kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kısa devre mekanik dayanımının değerlendirilmesinde radyal kuvvetlerle birlikte aksiyel kuvvetlerin de ayrıca incelenmesi gerekmektedir.

İdeal durumda, iç ve dış sargıların aksiyel yükseklikleri eşit, amper-sarım dağılımları dengeli ve manyetik merkezleri aynı eksen üzerinde çakışıktır. Bu durumda sargı uçlarında oluşan aksiyel kuvvetler sargı merkezine doğru yönelmekte ve genel olarak sargı üzerinde sıkıştırıcı bir etki meydana getirmektedir. Ancak gerçek transformatör geometrilerinde sargı yükseklikleri, kademe bağlantıları, ayar sargısının konumu, üretim toleransları ve amper-sarım dağılımındaki değişimler nedeniyle bu ideal durum her zaman sağlanamamaktadır.

Aksiyel kuvvetler; baskı halkaları, pres plakaları, uç izolasyon elemanları, radyal ve aksiyel ara parçalar ile sargı sıkıştırma sistemi üzerinde mekanik zorlanma oluşturmaktadır. Bu nedenle aksiyel kuvvet seviyesi, yalnızca sargı iletkenlerinin dayanımı açısından değil, aynı zamanda sargıların kısa devre sırasında konumunu koruması ve sıkıştırma sisteminin yeterliliği açısından da değerlendirme kapsamına alınmalıdır.

IEC 60076-5 kapsamında güç transformatörlerinde kısa devre dayanımı değerlendirilirken, sargılar üzerinde oluşan dinamik etkilerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda

aksiyel kuvvetler, sargı uçlarında ve baskı sisteminde oluşabilecek mekanik zorlanmaların belirlenmesi açısından temel kontrol büyüklüklerinden biridir. Bacak başına toplam aksiyel kuvvet Denklem (5.11) ile hesaplanmıştır [30].

$$F_{ax}^* = \frac{510 \cdot S_i}{f \cdot H_w} \cdot r \text{ [kN]} \quad (5.11)$$

Burada F_{ax}^* bacak başına toplam aksiyel kuvveti, S_i bacak başına gücü, f frekansı, H_w sargıların ortalama aksiyel uzunluğunu ve r aşırı akım katsayısını ifade etmektedir. Aşırı akım katsayısı kısa devre akımının anma akımına oranı olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada r değeri, her tasarım durumu için hesaplanan kısa devre akımının ilgili sargı anma akımına oranlanmasıyla elde edilmiştir. Şebeke empedansının ihmal edildiği basitleştirilmiş durumda bu oran, kısa devre empedansının tersine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle kısa devre empedansı azaldıkça r değeri artmakta, buna bağlı olarak aksiyel kuvvet seviyesi de yükselmektedir.

Denklem (5.11) ile hesaplanan değer, tek bir iletken üzerinde oluşan lokal gerilme değerini değil, bir transformatör bacağına sargı sistemi tarafından karşılanması gereken toplam aksiyel mekanik yükü temsil etmektedir. Dolayısıyla hesaplanan F_{ax}^* değeri; sargıların uç bölgeleri, baskı halkaları, pres plakaları ve sargı sıkıştırma sistemi açısından değerlendirilmiştir.

Hesaplamalarda her bir tasarım durumu için kısa devre akımı, kısa devre akım çarpanı ve sargı geometrisi dikkate alınarak bacak başına toplam aksiyel kuvvet değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8: Bacak başına toplam aksiyel kuvvetler

Durum	$F_{ax}^* \text{ AG (kN)}$	$F_{ax}^* \text{ YG (kN)}$	$F_{ax}^* \text{ Ayar (kN)}$
Durum-1	803,49	935,76	104,05
Durum-2	848,37	887,21	-
Durum-3	800,50	761,29	84,85
Durum-4	705,71	819,61	91,39
Durum-5	558,01	648,07	72,26
Durum-6	950,94	1156,85	112,27
Durum-7	978,45	1136,38	126,71
Durum-8	826,41	959,80	107,02

Tablo 5.8’de verilen sonuçlar, kısa devre empedansı ve kısa devre akım çarpanındaki değişimlerin bacak başına toplam aksiyel kuvvet üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Kısa devre empedansının azaldığı durumlarda kısa devre akımı artmakta ve buna bağlı olarak toplam aksiyel kuvvet seviyesi yükselmektedir. Buna karşılık kısa devre empedansının arttığı durumlarda kısa devre akımı sınırlanmakta ve aksiyel kuvvet seviyesi azalmaktadır.

Aksiyel kuvvet seviyesinin değerlendirilmesinde yalnızca kuvvet büyüklüğü değil, bu kuvvetin sargı yüksekliği boyunca oluşturduğu mekanik etki de dikkate alınmalıdır. Dengeli amper-sarım dağılımına sahip sargılarda aksiyel kuvvetler daha simetrik bir dağılım gösterirken, kademe konumu veya sargı yerleşimi nedeniyle oluşan dengesizliklerde kuvvet dağılımı sargı uç bölgelerinde yoğunlaşabilmektedir. Bu durum, özellikle baskı sistemi ve uç izolasyon elemanlarının kısa devre dayanımı açısından önem kazanmaktadır.

Sonuç olarak bu bölümde hesaplanan bacak başına toplam aksiyel kuvvet, farklı tasarım durumlarında sargıların kısa devre sırasında maruz kaldığı genel aksiyel sıkıştırma etkisini ortaya koymaktadır. Böylece gerilim kademesi, sargı yerleşimi, sarım sayısı, soğutma kanalı düzeni ve kısa devre empedansı değişimlerinin aksiyel mekanik zorlanmalar üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

5.4.4 Uç itme kuvvetleri

Kısa devre sırasında oluşan aksiyel kuvvetlerin değerlendirilmesinde yalnızca toplam sıkıştırma kuvvetinin incelenmesi yeterli değildir. Sargıların aksiyel manyetik merkezlerinin birbirine göre yer değiştirmesi, sargı yüksekliklerinin farklı olması veya amper-sarım dağılımının aksiyel yönde simetrik olmaması durumunda, sargı uç bölgelerinde ilave aksiyel uç itme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu kuvvetler, mevcut aksiyel kaçıklığı artıracak yönde etki edebildiğinden kısa devre sırasında sargı bloklarının yer değiştirmesi, baskı kaybı, izolasyon ezilmesi veya lokal deformasyon açısından ayrıca değerlendirilmelidir.

Uç itme kuvvetleri özellikle sargı yüksekliklerinin farklı olduğu, ayar sargısının devrede bulunduğu, kademe pozisyonuna bağlı amper-sarım dağılımının değiştiği veya sargıların aksiyel merkezlerinin çakışmadığı durumlarda önem kazanmaktadır. Bu nedenle uç itme kuvveti, toplam aksiyel basma kuvvetinden ayrı bir kontrol büyüklüğü olarak ele alınmıştır.

Bu çalışmada uç itme kuvveti hesabında, kaynakta verilen aksiyel kaçıklık esaslı analitik yaklaşım kullanılmıştır. Hesaplamalarda ilgili sargı çiftlerinin amper-sarım değeri, ortalama sargı çapı, sargı yüksekliği, aksiyel kaçıklık, kısa devre akım çarpanı ve tepe akım katsayısı dikkate alınmıştır. Böylece uç itme kuvveti yalnızca kısa devre akımı büyüklüğüne bağlı bir sonuç olarak değil; sargı geometrisi, aksiyel merkez uyumu ve kademe bağlantı yönünün ortak sonucu olarak değerlendirilmiştir.

$$F_s^* = 1,6 \cdot \frac{(N \cdot I)^2}{H_w^2} \cdot v \cdot \pi \cdot D_m \cdot r^2 \cdot (k\sqrt{2})^2 \cdot 10^{-6} \text{ [N]} \quad (5.12)$$

Denklem-5.12’de yer alan N·I ilgili sargı çiftinin amper-sarım değerini, D_m ortalama sargı çapını, H_w sargı yüksekliğini, v aksiyel kaçıklık değerini, r kısa devre akım çarpanını ve $k\sqrt{2}$ tepe kısa devre akımı katsayısını ifade etmektedir. Denklem gereği uç itme kuvveti amper-sarım değerinin karesi, kısa devre akım çarpanının karesi, tepe akım katsayısı ve aksiyel kaçıklık ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle kısa devre empedansının azalması uç itme kuvvetini artırma eğilimindedir. Ancak aynı kısa devre empedansına sahip iki tasarımda dahi, aksiyel merkez kaçıklığı veya etkin amper-sarım dağılımı farklı ise uç itme kuvvetleri belirgin şekilde değişebilmektedir.

Uç itme kuvvetleri; baskı halkaları, pres plakaları, uç izolasyon elemanları, radyal ve aksiyel ara parçalar ile sargı sıkıştırma sistemi üzerinde ek mekanik zorlanma oluşturmaktadır. Bu elemanların yeterli rijitlikte olmaması durumunda kısa devre sırasında sargı bloklarında aksiyel hareket, izolasyon ezilmesi, baskı kaybı veya lokal deformasyon meydana gelebilmektedir. Bu nedenle uç itme kuvveti, kısa devre mekanik dayanımının değerlendirilmesinde ayrı bir kontrol başlığı olarak ele alınmalıdır.

Hesaplamalarda her bir tasarım durumu için ilgili sargı çiftlerinin amper-sarım değeri, ortalama çapı, sargı yüksekliği, kısa devre akım çarpanı, tepe akım katsayısı ve aksiyel kaçıklık değeri dikkate alınarak uç itme kuvvetleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9: Uç itme kuvvetleri

Durum	F_{uç AG} (kN)	F_{uç YG} (kN)	F_{uç Ayar} (kN)
Durum-1	253,18	528,91	275,73
Durum-2	202,55	202,55	-
Durum-3	282,14	162,80	119,35
Durum-4	182,46	382,91	200,44
Durum-5	131,47	236,69	105,23
Durum-6	363,93	516,52	152,59
Durum-7	447,83	633,86	186,02
Durum-8	1638,39	1783,33	144,94

Tablo 5.9’da elde edilen sonuçlar, uç itme kuvvetinin yalnızca kısa devre akımı seviyesine bağlı olmadığını; sargıların aksiyel merkez kaçıklığı, etkin amper-sarım değeri, ortalama çap ve kademe bağlantı yönü ile birlikte değiştiğini göstermektedir. Bu nedenle kısa devre empedansı benzer olan durumlarda dahi, sargılar arası aksiyel konum farkı veya ayar sargısının devreye girme yönü değiştiğinde uç itme kuvveti farklı seviyelere ulaşabilmektedir.

Durum-2’de ayar sargısı devre dışı olduğundan uç itme kuvveti yalnızca AG-YG sargı çifti üzerinden oluşmuştur. Durum-3’te ayar sargısı YG sargısı ile aynı yönde çalıştığından AG-Ayar etkileşimi dikkate alınmıştır. Diğer durumlarda ise ayar sargısı YG sargısına ters yönde çalıştığından YG-Ayar etkileşimi değerlendirmeye dahil edilmiştir. Böylece her durumda fiziksel olarak zıt amper-sarım etkisi oluşturan sargı çiftleri toplam kuvvete katılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, Durum-8’in uç itme kuvvetleri açısından en kritik durum olduğu görülmektedir. Durum-8’de AG sargısında 1638,39 kN, YG sargısında 1783,33 kN ve ayar sargısında 144,94 kN uç itme kuvveti hesaplanmıştır. Bu değerlerin elde edilmesinin en önemli sebebi merkez kaçıklık olarak ifade edilen sayının çok fazla yükselmesidir. Durum-8’in kısa devre empedansı ve kısa devre akımı bakımından referans tasarıma yakın olmasına rağmen, aksiyel yerleşim ve uç bölgesi kuvvet dağılımı açısından çok daha kritik hale geldiğini göstermektedir. Bu nedenle Durum-8 yalnızca u_k ve kısa devre akımı üzerinden referans tasarımla eşdeğer kabul edilmemelidir.

Durum-7’de de kısa devre akımının yüksek olması nedeniyle uç itme kuvvetleri referans tasarıma göre artmıştır. Bu durumda AG sargısında 447,83 kN, YG sargısında 633,85 kN ve

ayar sargısında 186,02 kN uç itme kuvveti hesaplanmıştır. Ancak Durum-8'deki yüksek değerler, kısa devre akımından çok aksiyel yerleşim ve manyetik merkez uyumu ile ilişkilidir. Bu sonuç, uç itme kuvvetlerinin kısa devre mekanik dayanımında yalnızca akım büyüklüğüyle açıklanamayacağını göstermektedir.

En düşük uç itme kuvvetleri genel olarak Durum-5'te elde edilmiştir. Bu durumda kısa devre empedansının artması kısa devre akımını sınırlamış, buna bağlı olarak uç itme kuvvetleri de azalmıştır. Durum-5'te AG sargısında 131,46 kN, YG sargısında 236,70 kN ve ayar sargısında 105,23 kN uç itme kuvveti hesaplanmıştır. Bu sonuç, kısa devre empedansındaki artışın mekanik uç itme kuvvetleri üzerinde azaltıcı etki oluşturduğunu göstermektedir.

Uç itme kuvvetleri açısından aksiyel merkez uyumu ve ayar sargısı bağlantı yönü belirleyici olmuştur. Bu nedenle kısa devre dayanımı değerlendirilirken yalnızca toplam aksiyel sıkıştırma kuvveti değil, sargı çiftleri arasında oluşan uç itme kuvvetleri de ayrıca kontrol edilmelidir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 50 MVA gücünde, 34,5/6,3 kV gerilim seviyesine sahip bir güç transformatörü referans alınarak farklı sargı geometrisi ve kademe durumlarının kısa devre davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı biçimde ele anılarak incelenmiştir. Çalışmada referans tasarım ile birlikte sekiz farklı tasarım durumu değerlendirilmiş; sargılar arası radyal mesafe, ayar sargısının konumu, kademe bağlantısı, soğutma kanallarının varlığı, sarım sayısı ve aksiyel yerleşim değişikliklerinin kısa devre empedansı, kısa devre akımı, tepe kısa devre akımı, akım yoğunluğu, kısa devre sonu sıcaklıkları ve mekanik kuvvetler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Çalışmanın temel amacı, aynı anma gücü ve gerilim seviyesine sahip bir güç transformatöründe sınırlı geometrik değişikliklerin kısa devre davranışını hangi yönde ve hangi büyüklükte etkilediğini ortaya koymaktır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, transformatör tasarımında yalnızca kısa devre empedansı veya yalnızca kayıp değerinin yeterli bir değerlendirme kriteri olmadığını göstermiştir. Sargı geometrisinde yapılan her değişiklik, elektriksel, termik ve mekanik sonuçları birlikte etkilemektedir. Bu nedenle kısa devre dayanımı değerlendirmesi çok parametrelili bir tasarım problemi olarak ele alınmalıdır.

Referans tasarım olan Durum-1’de kısa devre gerilimi %12,266 olarak elde edilmiştir. Bu değer, diğer tasarım durumlarının karşılaştırılmasında temel alınmıştır. Kademe konumlarının değiştirilmesiyle Durum-2’de u_k değeri %13,27’ye, Durum-3’te ise %14,064’e yükselmiştir. Bu sonuç, kademe bağlantısının ve etkin sarım sayısının kaçak reaktans üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle Durum-3’te u_k değerinin artmasına rağmen toplam sargı kaybının düşük seviyede kalması, bu durumun elektriksel açıdan dengeli bir sonuç verdiğini göstermektedir.

Sargılar arası mesafe değişikliklerinin etkisi Durum-4 ve Durum-5’te daha belirgin hale gelmiştir. Durum-5’te kısa devre gerilimi %18,166’ya yükselmiş ve tüm tasarım durumları içinde en yüksek kısa devre empedansı elde edilmiştir. Bu artış, kısa devre akımının sınırlandırılması açısından olumlu bir sonuçtur. Ancak aynı durumda toplam sargı ağırlığının artması, kısa devre akımını düşürmenin, malzeme kullanımı ve ekonomik açıdan bir bedeli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle Durum-5 kısa devre dayanımı açısından olumlu, ancak ağırlık ve maliyet açısından sınırlı bir tasarım seçeneği olarak değerlendirilmelidir.

Durum-6 ve Durum-7’de kısa devre geriliminin azaldığı görülmüştür. Durum-7’de u_k değerinin %10,36’ya düşmesi, kısa devre akımının yükselmesine neden olmuştur. Bu durumda AG tarafı kısa devre akımı 44,23 kA, YG tarafı kısa devre akımı ise 8,97 kA olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, incelenen tüm tasarım durumları içindeki en yüksek kısa devre akımı seviyesini temsil etmektedir. Elektromanyetik kuvvetlerin kısa devre akımının karesiyle ilişkili olduğu dikkate alındığında, Durum-7’nin kısa devre kuvvetleri ve mekanik dayanım açısından en kritik tasarım durumu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Durum-8’de kısa devre gerilimi ve kısa devre akımı referans tasarımla aynı seviyede kalmıştır. Bu sonuç, aksiyel yerleşim değişikliğinin toplam kısa devre empedansı üzerinde belirgin bir değişiklik oluşturmadığını göstermektedir. Ancak mekanik değerlendirmede Durum-8’in uç itme kuvvetleri açısından kritik hale geldiği görülmüştür. Bu nedenle Durum-8, yalnızca u_k veya I_{SC} değerleri üzerinden referans tasarımla eşdeğer kabul edilmemelidir. Bu sonuç, kısa devre tasarımında elektriksel eşdeğerliğin mekanik eşdeğerlik anlamına gelmediğini açıkça göstermektedir.

Kısa devre arıza akımı değeri kısa devre empedansı ile ters orantılı bir davranış göstermiştir. Kısa devre empedansı değerinin yükseldiği durumlara sahip tasarımlarda kısa devre akımı azalmış, u_k değerinin düştüğü durumlarda ise kısa devre akımı yükselmiştir. Bu eğilim, kısa devre akımının temel olarak kısa devre empedansı ile bağıntılı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte tepe kısa devre akımı yalnızca simetrik kısa devre akımına bağlı değildir. X/R oranındaki değişim, asimetrik akım katsayısını etkilediğinden, I_{peak} değerlerinin hesaplanmasında kısa devre akımı ile birlikte $k\sqrt{2}$ katsayısı da hesaplama da dahil edilmiştir.

Tepe kısa devre akımı bakımından en yüksek değerler Durum-7’de elde edilmiştir. Bu durum, mekanik kuvvet hesaplarında Durum-7’nin neden kritik hale geldiğini açıklamaktadır. Buna karşılık Durum-5’te kısa devre empedansının yükselmesiyle hem simetrik kısa devre akımı hem de tepe kısa devre akımı azalmıştır. Bu nedenle Durum-5 kısa devre akımını sınırlama açısından en olumlu tasarım durumu olarak değerlendirilmiştir. Ancak bu olumlu etki, artan sargı ağırlığı ve kayıp seviyesiyle birlikte değerlendirilmelidir.

Akım yoğunluğu sonuçları da kısa devre akımı sonuçlarıyla uyumlu bir eğilim göstermiştir. Kısa devre akımının azaldığı Durum-5’te sargı akım yoğunlukları düşmüş, kısa devre akımının arttığı Durum-7’de ise tüm sargılarda daha yüksek akım yoğunlukları elde

edilmiştir. Özellikle Durum-7’de ayar sargısında ulaşılan yüksek akım yoğunluğu, bu tasarımın termik zorlanma açısından diğer durumlara göre daha kritik olduğunu göstermektedir. Buna karşın hesaplanan kısa devre sonu sıcaklıkları izin verilen sınırların altında kalmıştır.

Termik değerlendirme sonucunda tüm tasarım durumlarında bakır sargılar için izin verilen 250 °C sınırının altında kalınmıştır. En düşük kısa devre sonu sıcaklıkları Durum-5’te elde edilmiş, en yüksek sıcaklıklar ise Durum-7’de hesaplanmıştır. Durum-7’de AG sargısında 118,44 °C, YG sargısında 119,59 °C ve ayar sargısında 126,24 °C sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerler izin verilen sınırın altında olduğundan, incelenen tüm durumlar termik kısa devre dayanımı açısından uygun kabul edilmiştir. Ancak Durum-7’nin diğer durumlara göre daha yüksek sıcaklık ve akım yoğunluğu oluşturması, bu tasarımın mekanik zorlanmalarla birlikte ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Mekanik değerlendirme sonuçları, kısa devre dayanımında belirleyici farkın termik sınırlardan çok elektromanyetik kuvvetler üzerinden ortaya çıktığını göstermiştir. Ortalama çevresel gerilmeler incelendiğinde, Durum-7’de AG, YG ve ayar sargılarında en yüksek gerilme seviyelerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu durum, düşük kısa devre empedansı ve yüksek kısa devre akımı ile doğrudan ilişkilidir. Durum-5’te ise kısa devre akımının sınırlanmasıyla çevresel gerilmeler belirgin şekilde azalmıştır.

Radyal eğilme gerilmeleri açısından YG sargısı genel olarak en kritik sargı olarak öne çıkmıştır. Dış sargı konumundaki YG sargısı, kısa devre sırasında dışa doğru genişleme eğilimi gösterdiğinden radyal eğilme açısından daha yüksek zorlanmaya maruz kalmaktadır. Durum-7’de YG sargısında en yüksek radyal eğilme gerilmesinin elde edilmesi, soğutma kanallarının kaldırılmasıyla oluşan daha kompakt yapının mekanik zorlanmaları artırdığını göstermektedir. Bu nedenle radyal destekleme elemanları, çıta aralıkları ve iletkenlerin lokal eğilme dayanımı kısa devre tasarımında ayrıca kontrol edilmelidir.

Toplam aksiyel kuvvetler incelendiğinde, yine Durum-7’nin en kritik değerleri verdiği görülmüştür. Bu durum, kısa devre akımındaki artışın aksiyel yöndeki sıkıştırma kuvvetlerini de artırdığını göstermektedir. Aksiyel kuvvetler; baskı halkaları, pres plakaları, uç izolasyon elemanları ve sargı sıkıştırma sistemi tasarlanması açısından tasarım kararını etkileyen bir parametredir. Bu nedenle kısa devre mekanik dayanımı değerlendirilirken

yalnızca radyal kuvvetler değil, aksiyel yönde oluşan toplam kuvvetler de dikkate alınmalıdır.

Uç itme kuvvetleri açısından ise en kritik durum Durum-8 olmuştur. Durum-8’de u_k ve kısa devre akımı referans tasarımıyla benzer bir seviyede olmasına rağmen, sargıların aksiyel yerleşimindeki değişim uç bölgelerdeki kuvvet dağılımını değiştirmiştir. Bu durum, sargı merkezlerinin aksiyel uyumunun kısa devre mekanik dayanımı açısından bağımsız bir tasarım parametresi olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bir tasarımın elektriksel olarak referans tasarıma yakın olması, mekanik olarak da aynı davranışı göstereceği anlamına gelmemektedir.

Genel karşılaştırma yapıldığında, Durum-3 kısa devre empedansı, kayıp seviyesi ve kısa devre akımı bakımından dengeli bir tasarım durumu olarak öne çıkmaktadır. Durum-5 kısa devre akımını en fazla sınırlayan tasarım olmasına rağmen, sargı ağırlığı, malzeme kullanımı ve olası dielektrik yerleşim riskleri açısından ayrıca değerlendirilmesi gereken bir tasarım durumudur. Durum-7 termik sınırlar içinde kalmasına rağmen, kısa devre akımı, akım yoğunluğu ve mekanik kuvvetler bakımından en kritik tasarım durumudur. Durum-8 ise elektriksel açıdan referans tasarıma yakın sonuç vermesine rağmen, aksiyel merkez uyumu ve uç itme kuvvetleri bakımından ayrıca riskli bir tasarım durumu olarak değerlendirilmiştir.

Bu sonuçlar, güç transformatörlerinde sargı geometrisinin kısa devre davranışı üzerinde çok yönlü bir etkisi olduğunu göstermektedir. Sargılar arası mesafe, ayar sargısının konumu, kademe bağlantısı, soğutma kanalı düzeni ve aksiyel merkez uyumu; kısa devre empedansını, kaçak akı dağılımını, kısa devre akımını, termik zorlanmayı ve mekanik kuvvetleri birlikte etkilemektedir. Bu nedenle tasarım değişiklikleri yalnızca tek bir performans kriterine göre değerlendirilmemelidir.

Çalışmadan elde edilen en önemli sonuçlardan birisi de kısa devre empedansının artırılmasının kısa devre akımını ve buna bağlı termik/mechanik zorlanmaları azaltmasıdır. Ancak bu yaklaşım her durumda optimum çözüm değildir. Çünkü kısa devre empedansını artıran tasarım değişiklikleri, sargı ağırlığını, iletken uzunluğunu, kayıpları ve maliyeti artırmaktadır. Bu nedenle kısa devre dayanımı ile kayıp, ağırlık ve ekonomik tasarım kriterleri arasında mühendislik dengesi kurulmalıdır.

Bir diğ er önemli sonuç, soğutma kanallarının kaldırılması gibi köklü değişikliklerin kısa devre empedansını düşürerek kısa devre akımını artırabilmesidir. Bu durum termik olarak izin verilen sınırların altında kalsa bile, mekanik kuvvetler açısından kritik sonuçlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle soğutma kanalı düzeni yalnızca ısı performans açısından değil, kaçak reaktans ve kısa devre kuvvetleri açısından da değerlendirilmelidir.

Aksiyel yerleşim değişiklikleri ise toplam kısa devre empedansını değiştirmese bile uç itme kuvvetlerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle transformatör tasarımımda aksiyel merkez uyumu, sargı yükseklikleri, kademe sargısının konumu ve uç bölgesi destek yapıları kısa devre mekanik dayanımı açısından dikkatle incelenmelidir. Özellikle yüksek güçlü transformatörlerde küçük aksiyel yerleşim farklılıkları, kısa devre anında b y  k mekanik kuvvet farklarına neden olabilmektedir.

 ncelenen tasarım durumları, kısa devre davranışının yalnızca u_k değeriyle açıklanamayacağını ortaya koymuştur. u_k kısa devre akımını belirleyen ana parametredir. Ancak mekanik dayanım için X/R oranı, tepe kısa devre akımı, akım yoğunluğu, sıcaklık artışı, çevresel gerilme, radyal eğilme, toplam aksiyel kuvvet ve uç itme kuvvetleri birlikte kontrol edilmelidir. Bu bütüncül değerlendirme yaklaşımı, kısa devre dayanımı açısından daha güvenilir ve dengeli transformatör tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada mekanik gerilmeler analitik ve karşılaştırmalı değerlendirme amacıyla ele alınmıştır. Nihai mekanik dayanım onayı için ilerleyen çalışmalarda bu gerilmelerin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanması önerilmektedir. Ayrıca sargı sıkıştırma sistemi, pres plakaları, radyal çıtalar, uç izolasyon elemanları ve iletkenlerin mekanik dayanım sınırları modele dahil edilerek daha ayrıntılı bir yapısal analiz gerçekleştirilebilir. Böylece kısa devre sırasında oluşan elektromanyetik kuvvetlerin yalnızca b y  kl ğ  değil, bu kuvvetlerin sargı ve destek yapılarında meydana getirdiği yer değiştirme ve gerilme dağılımları da incelenebilir.

Bunun yanında farklı kademe pozisyonları, farklı kısa devre süreleri, farklı başlangıç sıcaklıkları ve farklı şebeke kısa devre g   leri için ek analizler yapılması önerilmektedir. Bu tür çalışmalar, transformatörün yalnızca tek bir işletme koşulu için değil, farklı işletme ve arıza senaryoları altında da güvenilirliğinin değerlendirilmesini sağlayacaktır. Ayrıca  retim toleransları ve sargı merkez ka ıklıklarının kısa devre kuvvetleri üzerindeki etkilerinin

incelenmesi, tasarım ile imalat süreci arasındaki ilişkinin daha net ortaya konmasına katkı sağlayacaktır.

7. KAYNAKLAR

- [1] **International Energy Agency (IEA).** “Getting wind and solar onto the grid”. <https://www.iea.org/reports/getting-wind-and-solar-onto-the-grid> (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [2] **International Energy Agency (IEA).** (2026). “Electricity 2026: Executive summary”. <https://www.iea.org/reports/electricity-2026/executive-summary> (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [3] **Taishan Transformer.** “Voltage range of power transformer”. <https://taishantransformer.com/voltage-range-of-power-transformer/> (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [4] **International Electrotechnical Commission.** (2021). IEC 60038:2009+AMD1:2021 CSV, IEC standard voltages. Geneva: IEC.
- [5] **IEEE Standards Association.** IEEE Std C57.12.34, Standard requirements for pad-mounted, compartmental-type, self-cooled, three-phase distribution transformers. New York: IEEE.
- [6] **Winders, J. J., Jr.** (2002). Power transformers: Principles and applications. New York: Marcel Dekker.
- [7] **International Electrotechnical Commission.** (2011). IEC 60076-1:2011, Power transformers - Part 1: General. Geneva: IEC.
- [8] **Grigsby, L. L. (Ed.).** (2012). Electric power transformer engineering (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [9] **Kulkarni, S. V. ve Khaparde, S. A.** (2013). Transformer engineering: Design, technology, and diagnostics (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [10] **Eurostat.** (2025). “Electricity prices for household consumers, first half 2025”. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity_prices_for_household_consumers,_first_half_2025_.png (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [11] **European Commission.** “Energy efficient products - Power transformers”. https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/power-transformers_en
- [12] **International Electrotechnical Commission.** (2006). IEC 60076-5:2006, Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit. Geneva: IEC.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [13] **International Electrotechnical Commission.** (2011). IEC 60865-1:2011, Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods. Geneva: IEC.
- [14] **International Electrotechnical Commission.** (2015). IEC TR 60865-2:2015, Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of calculation. Geneva: IEC.
- [15] **IEEE Standards Association.** (2018). IEEE Std C57.109-2018, IEEE guide for liquidimmersed transformers through-fault-current duration. New York: IEEE.
- [16] **International Electrotechnical Commission.** (2016). IEC 60909-0:2016, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents. Geneva: IEC.
- [17] **International Electrotechnical Commission.** (2002). IEC TR 60909-1:2002, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0. Geneva: IEC.
- [18] **International Electrotechnical Commission.** (2009). IEC 60909-3:2009, Short-circuit currents in three-phase AC systems - Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents flowing through earth. Geneva: IEC.
- [19] **International Electrotechnical Commission.** (2000). IEC TR 60909-4:2000, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents. Geneva: IEC.
- [20] **Güneri, S., Kömürgöz, G. ve Gündoğdu, T.** (2014). “Transformatörde kısa devre kuvvetleri / Short circuit forces in transformers”. ELECO 2014 Elektrik - Elektronik - Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa. https://www.emo.org.tr/ekler/7eb0dc1a03c3a04_ek.pdf (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [21] **Özüpak, Y.** (2019). “Kısa devre durumunda güç trafosunda meydana gelen elektromanyetik kuvvetlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi”. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(10), 10-22. <https://dergipark.org.tr/en/pub/adyumbd/article/511360> (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [22] **Alpsalaz, F., Mamiş, M. ve diğerleri.** (2022). “Güç transformatörünün kısa devre durumundaki elektromanyetik kuvvetlerinin incelenmesi”. CIGRE Türkiye Güç Sistemleri Konferansı. <https://www.cigreturkiye.org.tr/gsk2022/bildiri/7267724.pdf> (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [23] **Dawood, K.** (2024). “Development of a new reliable analytical technique for the determination of the leakage reactance in the power transformers”. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul. <https://polen.itu.edu.tr/items/7e4715ce-d2c5-41e4-be51-f2d2ba00cda5> (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [24] **Kladas, A. G., & Papadopoulos, M. P.** (1994). “Leakage flux and force calculation on power transformer windings under short-circuit: 2D and 3D models based on the theory of images and the finite element method compared to measurements”. IEEE Transactions on Magnetics, 30(5), 3487-3490. <https://ieeexplore.ieee.org/document/312690> (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [25] **Ahn, H.-M., Oh, Y.-H., Son, J.-W., & Hahn, S.-C.** (2011). “Experimental verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer”. COMPUMAG 2011, Sydney. https://www.compumag.org/Proceedings/2011_Sydney/papers/Contribution676.pdf (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [26] **Ahmad, A.** (2018). “Short circuit stress analysis using FEM in power transformers”. Alexandria Engineering Journal. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016816302976> (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [27] **Lambert, M., Martínez-Duró, M., Mahseredjian, J., de León, F., & Sirois, F.** (2014). “Transformer leakage flux models for electromagnetic transients: Critical review and validation of a new model”. IEEE Transactions on Power Delivery, 29(5), 2180-2188. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6766808> (Erişim tarihi: 2 Haziran 2026).
- [28] **Cornelius, R. G., Lenhard, B. L., Medeiros, L. H., Fontoura, H. C., Correa, C. H., Carraro, R., Beltrame, R. C., dos Santos, T., Marchesan, T. B. ve Bender, V. C.** (2024). “Electromagnetic-structural finite element analysis of copper and aluminum windings in power transformers under short-circuit conditions”. Energies, 17(16), 3994. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/16/3994>
- [29] **Majidi, M., Meshkatoddini, M. R. ve diğerleri.** (2011). “Comparative study of the effect of various shields on lightning electric field in power transformer windings”. https://www.researchgate.net/publication/261348923_Comparative_study_of_the_effect_of_various_shields_on_lightning_electric_field_in_power_transformer_windings

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [30] Bertagnolli, G.** (1996). Short circuit duty of power transformers: The ABB approach.
Italy: Golinelli Industrie Grafiche.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Arda Kızıldeli

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	2026
Lisans	Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği	2020
Lise	Balıkesir 15 Temmuz Şehitler Anadolu Lisesi	2014

Yayın Listesi

Kızıldeli, A., Hazar, İ. ve Aksoy, M. (2025). “Offshore rüzgar santrali topraklama transformatöründe sargılar arası mesafe optimizasyonu”. IV. Güç Sistemleri Konferansı Bildiri E-Kitabı, ISBN: 978-625-94054-5-2.

Kızıldeli, A., Hazar, İ., Koçanalı, N. M., Kervan, E. ve Aksoy, M. (2026). “Investigation of the thermal impact of stray losses at the high-current LV exit region on the transformer tank wall in GSU transformers - Part I”. Transformers Magazine, 13(2), 104–111.

Kızıldeli, A., Hazar, İ., Koçanalı, N. M., Kervan, E. ve Aksoy, M. (2026). “Investigation of the thermal impact of stray losses at the high-current LV exit region on the transformer tank wall in GSU transformers - Part II”. Transformers Magazine, 13(SE1), 52–60.