



**KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİ İÇİN ALTİGEN SARGI  
TASARIMI, ENDÜKTANS HESABI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Emrullah AYDIN**

**DOKTORA TEZİ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2019**

Emrullah AYDIN tarafından hazırlanan “KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİ İÇİN ALTİGEN SARGI TASARIMI, ENDÜKTANS HESABI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof.Dr. M.Timur AYDEMİR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi .....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

**Başkan:** Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi .....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak ..... Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

**Üye:** Prof.Dr. İres İSKENDER

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Çankaya Üniversitesi .....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak ..... Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

**Üye:** Doç. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi .....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak ..... Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

**Üye:** Dr.Öğr. Üyesi Ozan KEYSAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Ortadoğu Teknik Üniversitesi .....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak ..... Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 18/12/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Emrullah AYDIN

18/12/2019

# KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİ İÇİN ALTIGEN SARGI TASARIMI, ENDÜKTANS HESABI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Emrullah AYDIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2019

## ÖZET

Kablosuz Güç Aktarım (KGA) sistemleri farklı güç seviyelerindeki batarya şarj işlemleri için temiz, güvenilir ve kolay bir yöntem olması nedeniyle gün geçtikçe daha yaygın bir kullanım alanına sahip olmaktadır. Literatürde, KGA sistemlerinde kullanılmak üzere birçok sargı yapısı önerilmiştir. Bunlardan biri olan altıgen sargı yapısı yüksek bağlaşım katsayısı, uygulama kolaylığı ve özellikle çoklu sargı yapılarında efektif alan kullanımı nedeniyle özellikle küçük güçlü uygulamalarda sıkça kullanılmıştır. Ancak bu sargı yapısının öz ve ortak endüktans değerlerinin hesaplanabilmesine yönelik kısıtlı çalışmalar mevcuttur ve bu çalışmalar genellikle birden fazla katsayının kullanıldığı karmaşık integral çözümleri içermektedir. Öte yandan elektrikli araç bataryalarının şarjı gibi yüksek güçlü uygulamalarda ise kullanımına ilişkin çalışmalar ise yok denecek kadar azdır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak için, öncelikle altıgen bir sargının öz ve ortak endüktans hesaplamalarında akı dağılımlarının elde edilebilmesi için Biot-Savart Kuralı temel alınarak tek bir temel manyetik akı yoğunluğu denklemi kullanılmış ve geliştirilen algoritma yardımıyla en az hata ile endüktans hesaplamalarının yapılabilmesi için yeni bir nümerik yöntem önerilmiştir. Önerilen nümerik yöntemin doğrulanabilmesi için 10 cm ve 20 cm kenar uzunluklarına sahip altıgen sargılar 1.78 mm<sup>2</sup> iletken kesitine sahip litz teli kullanılarak üretilmiş ve endüktans değerleri ölçülmüştür. Önerilen nümerik yöntem sonuçları mevcut yöntemler, benzetim çalışmaları ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak doğruluğu gösterilmiştir. Elde edilen endüktans formülleri kullanılarak 1 kW gücünde bir KGA sistem tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu tasarım benzetim ve uygulama sonuçları ile doğrulanmıştır. Endüktans hesaplamalarının ölçüm sonuçları ile karşılaştırıldığında büyük oranda örtüştüğü görülmüştür. 1 kW gücündeki uygulama sonuçlarına göre %85 verimle 10 cm'lik bir hava aralığından kablosuz güç aktarımı başarılmıştır. Ayrıca daha iyi bir bağlaşım katsayısına sahip çift primer sargı yapısı önerisi yapılmış, benzetim ve deneysel sonuçlar verilmiştir.

Bilim Kodu : 90514  
Anahtar Kelimeler : Kablosuz Güç Aktarımı, Sargı tasarımı, Elektrikli araçlar  
Sayfa Adedi : 90  
Danışman : Prof.Dr. M. Timur AYDEMİR

DESIGN, INDUCTANCE CALCULATION AND IMPLEMENTATION OF  
HEXAGONAL COIL FOR WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEMS

(Ph. D. Thesis)

Emrullah AYDIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2019

ABSTRACT

Wireless Power Transfer (WPT) systems are becoming more popular since it is a clean, reliable and easy method for battery charging at different power levels. In the literature, several coil structures have been proposed for use in WPT systems. One of them, hexagonal coil, is frequently used especially in low power applications due to its high coupling coefficient, ease of application and effective use of space especially in multiple coil structures. However, there are limited work to calculate the self and mutual inductance values for this coil structure and these work have complicated process which require complex integral solutions by using several coefficients. On the other hand, in high-power applications such as charging of electric vehicle batteries, its use is very rare. In order to fill this knowledge gap, a new analytical method has been proposed in this thesis. A single basic magnetic flux density equation which is based on Biot-Savart Law was used in order to obtain flux distribution in a hexagonal coil for the self and mutual inductance calculations. In order to verify the results obtained with the analytical approach, two hexagonal coils with 10 and 20 cm outer side lengths were produced by using litz wire with a conductive cross section of  $1.78 \text{ mm}^2$ . The results obtained with the new approach are compared with the Finite Element Analysis results, the other work presented in the literature and experimental results in order to prove the accuracy of the proposed method. The obtained inductance equations have been used to design a 1 kW WPT system with hexagonal coils. The theoretical and simulation results have been validated with an implementation in the laboratory and a DC-to-DC power efficiency of 85% is achieved across a 10 cm air gap between the coils. Furthermore, a novel double primary coil design is proposed in order to increase coupling coefficient and the proposed model has been validated by simulation and experimental results.

Science Code : 90514  
Key Words : Wireless Power Transfer, Coil design, Electric vehicle  
Page Number : 90  
Supervisor : Prof.Dr. M.Timur AYDEMİR

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, teorik ve laboratuvar çalışmalarım da bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan çok kıymetli hocam Prof. Dr. Mehmet Timur AYDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarım boyunca yaptıkları katkılardan dolayı Sayın Prof. Dr. İres İSKENDER ve Dr. Öğr. Üyesi Ozan KEYSAN hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım da değerli katkı ve desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. İlhan AYDIN'a ve Öğr. Gör. Ali PASHAEİ'ye teşekkür ederim. Her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen canımdan çok sevdiğim değerli eşim Duygu AYDIN'a, hayatım boyunca destek ve dualarımı eksik etmeyen sevgili annem, babam ve ablalarım a teşekkür ederim. Bu çalışmaların bir bölümü 5160042 numaralı TEYDEB 1505 projesi kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK'a, ASELSAN A.Ş.'ye ve çalışmalarda yer alan proje çalışanlarına teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ .....	17
2.1. Genel Şema ve Çalışma Prensibi .....	17
2.2. Yüksek Rezonanslı Sistemler ve Kompanzasyon Yapıları .....	19
2.3. Sargı Tasarımı .....	26
2.4. KGA Sistemlerde Uygulanan Uluslararası Sağlık Standartları .....	28
3. ALTİGEN SARGI YAPISI İÇİN ÖZ VE ORTAK ENDÜKTANS HESABI .....	37
3.1. Ortak Endüktans Hesabı .....	37
3.2. Öz Endüktans Hesabı .....	44
3.3. Endüktans Hesaplamalarının Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması .....	49
3.4. Endüktans Hesaplamalarının Ölçüm ve Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması .....	53
4. ALTİGEN SARGI YAPISI İLE 1 kW GÜCÜNDE BİR KGA SİSTEMİNİN TASARIM, BENZETİM VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	59
5. ALTİGEN SARGI YAPISI KULLANILARAK ÇİFT PRİMER SARGI YAPISI ÖNERİSİ .....	71
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	77



**Sayfa**

KAYNAKLAR ..... 81

ÖZGEÇMİŞ ..... 89



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. KGA sistemler konusunda yapılan akademik çalışmaların yıllara ve özelliklerine göre gösterimi .....	9
Çizelge 1.2. Akademik çalışmalarda kullanılan sargı boyut ve kapladığı alanlar [1-5 kW] .....	12
Çizelge 1.3. Piyasada bulunan ticari KGA sistem ürünlerinin firma adına ve özelliklerine göre gösterimi .....	13
Çizelge 1.4. Piyasada bulunan ticari otomobil firmalarına ait ürün ve özellikleri .....	14
Çizelge 2.1. Rezonans frekansında parametrelerin hesaplanması .....	23
Çizelge 2.2. Temel kompanzasyon yapılarının karşılaştırılması .....	24
Çizelge 2.3. Sargı boyutları .....	26
Çizelge 2.4. Hizalanma probleminin bağlaşım katsayısı üzerindeki % etkisi .....	27
Çizelge 2.5. Zamanla değişen manyetik ve elektrik alanların 10 GHz değerine kadar izin verilen SAR değerleri .....	32
Çizelge 2.6. 100 kHz çalışma frekansı için iletkenlik ve enerji tutabilme kapasitesi değerleri .....	32
Çizelge 3.1. Önerilen yöntemin diğer yöntemler ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması	51
Çizelge 3.2. Öz endüktans değerlerinin önerilen yöntemle elde edilen sonuçlarının SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması .....	54
Çizelge 3.3. Öz endüktans değerlerinin önerilen yöntemle elde edilen sonuçlarının SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması ( $2k_{dış}=10$ cm) .....	55
Çizelge 3.4. Öz endüktans değerlerinin önerilen yöntemle elde edilen sonuçlarının SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması ( $2k_{dış}=20$ cm) .....	55
Çizelge 4.1. Hedeflenen sistem tasarımı .....	59
Çizelge 4.2. SS kompanzasyon topolojisine ait eşitlikler .....	60
Çizelge 4.3. Sistem tasarım sonuçları .....	61
Çizelge 4.4. Öz ve ortak endüktans değerlerinin önerilen yöntemle elde edilen sonuçlarının SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması .....	62
Çizelge 4.5. Giriş ve çıkışta ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri .....	67

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 5.1. Sargı özellikleri .....	72
Çizelge 5.2. Sarım sayısının bağlaşım katsayısına etkisi .....	73
Çizelge 5.3. Primer iç sargısının kenar uzunluğunun bağlaşım katsayısına etkisi .....	74
Çizelge 5.4. Primer iç sargı kenar uzunluğunun bağlaşım katsayısına etkisi .....	75



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Akademik çalışmalarda kullanılan frekanslar ve verim başarımlarının yıllara göre dağılımı .....	10
Şekil 1.2. Akademik çalışmalarda kullanılan sargı şekillerinin yıllara göre dağılımı ...	11
Şekil 1.3. Akademik çalışmalarda kullanılan kompanzasyon topolojilerinin yıllara göre dağılımı .....	12
Şekil 1.4. Ticari ürünlerde tercih edilen çalışma frekansları .....	15
Şekil 2.1. KGA sınıflandırması .....	17
Şekil 2.2. Tüm sistemi gösterir blok diyagramı .....	18
Şekil 2.3. Genel devre şeması .....	18
Şekil 2.4. Yüksek verimli bir KGA sistemini etkileyen faktörler .....	19
Şekil 2.5. Elektromanyetik rezonatöre ait eşdeğer devre şeması devreye ait rezonans frekansı $\omega_0$ .....	20
Şekil 2.6. Temel kompanzasyon yapıları .....	21
Şekil 2.7. Hibrit kompanzasyon yapıları .....	24
Şekil 2.8. a) Sabit gerilim modu için topoloji, b) Sabit akım modu için topoloji, c) Sabit gerilim ve sabit akım modalarında çalışabilecek hibrit topoloji .....	25
Şekil 2.9. Sargı yapıları a) dikdörtgen b) kare c) altıgen d) daire .....	26
Şekil 2.10. ICNIRP standardına ait referans değerler .....	30
Şekil 2.11. IEEE standardına ait referans değerler .....	30
Şekil 2.12. ICNIRP ve IEEE standartlarının yıllara göre değişimi .....	31
Şekil 2.13. Sargı yüzeyinden 170 mm uzakta bulunan bir insanın vücudu boyunca ölçülen manyetik akı yoğunluğu değerleri .....	33
Şekil 3.1. Altıgen sargı yapısının xyz koordinat sistemi üzerinde gösterimi .....	37
Şekil 3.2. Dikdörtgen alanlara bölünmüş altıgen sargı yapısının gösterimi .....	40
Şekil 3.3. Öz endüktans hesabı için altıgen sargı yapısının gösterimi .....	45
Şekil 3.4. Endüktans hesabı akış şeması .....	49

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.5. Öz endüktans değerinin iterasyon sayısı ile değişimi .....	51
Şekil 3.6. Ortak endüktans değerinin Grover yöntemi ile karşılaştırılması .....	52
Şekil 3.7. Ortak endüktans değerinin iterasyon sayısı ile değişimi .....	53
Şekil 3.8. Üretilen ve üç boyutlu SEA modelleri oluşturulan sargılar .....	53
Şekil 3.9. Üretilen ve üç boyutlu SEA modelleri oluşturulan sargılar .....	56
Şekil 4.1. Üretilen ve üç boyutlu SEA modelleri oluşturulan sargılar .....	62
Şekil 4.2. Bağlaşım katsayısının hizalanmaya bağlı olarak değişimi .....	63
Şekil 4.3. Benzetim devre modeli .....	63
Şekil 4.4. Primer ve sekonder taraflara ait akım ve gerilim dalga formları .....	64
Şekil 4.5. Laboratuvarında kurulu test düzeneğinin gösterimi .....	65
Şekil 4.6. a) Primer ve b) Sekonder taraflara ait akım ve gerilim dalga formlarına ait osiloskop ekran görüntüsü .....	66
Şekil 4.7. Çıkış gücünün hizalanmaya bağlı olarak değişimi .....	67
Şekil 4.8. Sistemin insan sağlığı üzerine etkisinin incelenmesi .....	68
Şekil 5.1. a) Klasik primer sargı yapısı ve b) çift primer sargı yapısı .....	71
Şekil 5.2. Klasik sargı yapısının x ve y eksenlerindeki kayma miktarına göre bağlaşım katsayısının değişimi .....	72
Şekil 5.3. Klasik sargı yapısının ve farklı iç sargı sarım sayılarının kayma miktarına göre bağlaşım katsayısına etkisi .....	73
Şekil 5.4. Çift primer sargı yapısının farklı iç sargı boyutları kullanılarak tasarımı .....	74
Şekil 5.5. Klasik primer ve çift primer sargı yapısına sahip üretilmiş sargılar .....	75

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

$r_w$	iletken yarıçapı (mm)
$w$	sargı kalınlığı (mm)
$g$	sargılar arasındaki mesafe (mm)
$\omega_0$	rezonans frekansı
$f$	frekans (Hz)
$\mu_0$	havanın manyetik bağıl geçirgenliği

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>KGA</b>	Kablosuz Güç Aktarımı
<b>SEA</b>	Sonlu Elemanlar Analizi



## 1. GİRİŞ

Fosil yakıt kaynaklarının azalmaya başlaması ve sebep olduğu çevre kirliliği yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu kılmıştır. Güneş santralleri, rüzgâr türbinleri, hidrojen enerjisi ve dalga enerjisinden elektrik üretimi kullanılan yöntemlerden sadece birkaç tanesidir. Elektriğin birden fazla yöntemle üretilebilir ve üretimin sürdürülebilir olması ile elektrikli araçlara olan ilgi hızla artmaktadır. Elektrikli araçlar ilk satın alma anında fiyatlarının yüksek olmasına rağmen, içten yanmalı motorlu geleneksel araçlara oranla bakım maliyetlerinin az olması ve kilometre başına çok daha düşük ücretlerle yolculuk yapılabilmesi gibi önemli avantajlara sahiptir. Ayrıca, yaşanan mevsim değişimleri ve küresel ısınma etkilerinin insanlar tarafından fark edilebilir düzeye gelmesi ile karbonmonoksit salınımının düşük seviyelerde olması nedeniyle elektrikli ve hibrit araçlara olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Son yıllarda, neredeyse tüm büyük araç üreticileri dizel ve benzin tabanlı araçların üretimlerini azaltıp, hibrit ve tamamen elektrikle çalışan araçlara ağırlık vereceğini açıklamıştır. Ancak bu araçların üretilip piyasaya sürülmeden önce batarya dolum istasyonlarının kurulması ve alternatif şarj yöntemlerinin gerçekleştirilmesi bir zorunluluktur. Çünkü günümüzde hala elektrikli araçların en büyük sorunu menzil problemidir. Bu problemler nedeniyle elektrikli araçların kullanım oranları hala çok düşük seviyelerdedir. Bu konuya en fazla yatırım yapan özellikle Kuzey Avrupa ülkelerinde bile tüm araçlar içinde elektrikli araçların oranı yüzde birkaç kullanım değerinin üzerine çıkamamaktadır. Bu tezde bu sorunun çözümüne yönelik önemli bir alternatif olarak sunulan Kablosuz Güç Aktarım (KGA) sistemlerinin tasarım ve gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu yöntemle herhangi bir kablo bağlantısına ihtiyaç duyulmadan kolaylıkla araçların şarj edilebilmesi ve otoparklarda, kırmızı ışıkta beklerken veya duraklarda araç durduğu anda şarj edilebilmesi ile menzilin arttırılması da mümkün olmaktadır.

Kablo kullanımından kaynaklanan hareket kısıtlamasının azaltılması amacıyla küçük güçlü elektrikli aletlerden büyük güçlü uygulamalara kadar birçok alanda batarya kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Batarya kullanımının artması ise bu bataryaların daha kolay nasıl şarj edilebilmesi sorusunu gündeme getirmiştir. Arada bir temas olmaması nedeniyle kablosuz güç aktarım sistemleri; kullanım kolaylığı, yüksek emniyet, yüksek güvenilirlik, düşük bakım maliyeti ve uzun kullanım ömrü gibi avantajları beraberinde getirmektedir. Bu



avantajları nedeniyle cep telefonları, elektrikli araçlar, biyomedikal implantlar, uzay uygulamaları, tekstil uygulamaları ve askeri alanda olmak üzere çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu bölümde konuyla ilgili geçmişten günümüze kadar yapılmış olan ve bu teknolojiye ışık tutmuş önemli akademik çalışmalar ve ticari uygulamalara ait ürünler detaylı olarak incelenecektir.

### Akademik çalışmalar

Geleneksel kablolu enerji iletiminin yerine Nikola Tesla tarafından 1891 yılında ilk kez enerjinin kablosuz olarak aktarımı fikri ortaya atılmıştır. Fikrin ilk ortaya atıldığı dönemlerde yapılan çalışmalar genellikle, sadece birkaç mm mesafeden yüksek miktarda nüve kullanılarak güç aktarımının gerçekleştirildiği uygulamalardır. Daha çok hareket halinde ve raylı sistemlerde kullanılan uygulamalardır. Elektrikli araçların kablosuz olarak enerjilendirilmesi fikrinin bilinen ilk örneği Hutin ve Le-Blanc isimli araştırmacıların yayınlamış oldukları patenttir (Hutin ve Leblanc,1894). Bir başka çalışmada uzun ferrite bar kullanılarak primer ve sekonder sargılar arasında sadece birkaç mm'lik mesafeden güç aktarımı amaçlanmıştır (Abel ve Third, 1984). 1989 yılında anahtarlama kayıplarının tristörlere paralel kondansatörler bağlanarak azaltılması ve yüksek verimli kablosuz güç aktarımı amaçlanmıştır (Delmas ve diğerleri, 1989). 500 W'lık güç değeri %52 verimle yaklaşık 260 W olarak aktarılmıştır. Makale yazarı 1988'de Paris Üniversitesinde bu konuda doktora tezini tamamlamıştır ve bu tez bu alandaki ilk doktora tezlerinden biridir. Literatürde buna benzer yapılan çalışmalar mevcuttur (Egtesadi, 1990; Esser, 1995). Elektrikli bir aracın seyir halindeyken 75 mm mesafeden ve  $\pm 400$  mm hizalanmada şarj edilmesi ve 1.2 kW bir güç transferinin gerçekleştirildiği çalışmada, anahtarlama frekansı 10 kHz olarak seçilmiştir (Elliott ve diğerleri, 1995). Yeni Zelanda da elektrikli araçların kablosuz olarak şarj edilmesi fikri gündeme getirilmiş ve 2002'de Genoa da otobüs durağında ilk defa şarj edilebilen elektrikli otobüs projesi gerçekleştirilmiştir. 20 kHz frekansta 30 kW nominal bir gücün 45 mm bir mesafeden aktarımı için primer ve sekonder tarafında 800×600 mm boyutlarında ve eş dikdörtgen sargılar kullanılmıştır (Wang ve diğerleri, 2004). Bu çalışmada sargı kenar noktalarında bağlaşımı arttırmak için küçük ferrit nüveler kullanılırken aynı boyutlarda nüvesiz sargı yapısı ile güç aktarımının gerçekleştirildiği yapı önerilmiştir (Wang ve diğerleri, 2005). 2007 yılında MIT'de bir grup araştırmacı tarafından iki büyük bakır sargı ve yaklaşık olarak aynı rezonans frekansına sahip bir sistem tarafından 60W gücünde bir ampulün yaklaşık 2.4 m mesafeden

yakılması başarılmıştır (Kurs ve diğerleri, 2007). Böylece dünya genelinde bilim adamlarının konuya olan ilgisi artmış ve bu konudaki çalışmaların hızla artmıştır. Yapılan çalışmalarla kompanzasyon yöntemleri kullanılarak %90'nın üzerinde verimler elde edilebilmesi, kablosuz enerji aktarımının en büyük sorunlarından bir olan verim konusunun çözümü noktasında önemli bir yol kat edilmesine katkı sağlamıştır.

KGA sistem tasarımı için akademik çalışmalarda hedeflenen güç değeri, uygun sargı yapısının seçilmesi, nüve kullanımının gerekli olup olmadığı, çalışma frekansının ve uygun kompanzasyon topolojisinin seçimi en önemli odak noktaları olmuştur. Bu amaçla özetlenen çalışmalarda bu odak noktalarının seçimleri ve uygulamaları üzerinde durulmuştur. 2 kW gücünde bir elektrikli aracın şarj edilmesi için önerilen bir çalışmada, primer ve sekonder sargılar arasındaki mesafenin 0-160 mm arasında değişimine karşılık bağlaşım katsayısının değişmesiyle, verimin de değişeceği göz önünde bulundurularak paralel bir LCL tankı yapısı kullanılarak çıkış gücünün kontrol edilebilmesi sağlanmıştır (Huang ve diğerleri, 2009). KGA sistemleri alanında önemli çalışmalar yapıldığı üniversitelerden biri olan Zaragoza Üniversitesinde bulunan bir ekibin 2009 yılında yayınlamış olduğu makalede (Sallan ve diğerleri, 2009), 2 kW gücünde bir elektrikli aracın kablosuz şarj edilebilmesi için en uygun sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sargılar arasındaki mesafe 150 mm, çalışma frekansı 20 kHz ve sargı yapısı olarak dikdörtgen sargı seçilmiştir. Sargı şekli, sargı boyutları, hava aralığı, maksimum çalışma frekansı, primer gerilimi, yük gerilimi ve çıkışta istenen güç sabit alınan değerlerdir. İletken kesiti, sarım sayıları ve diğer bileşenlerin hesaplanmaları için çıkarımı yapılan analitik denklemler önerilen parametrik optimizasyon algoritmasında kullanılarak en uygun tasarım parametreleri elde edilmiştir. KGA sistemlerinde verici sargının boyutları ile ilgili önemli bir kısıtlama bulunmazken, özellikle elektrikli araçların şase altına yerleştirilen verici sargıların boyutları üretici firmaların tasarımları ile uyumlu ve minimum olmalıdır. Özellikle kompanzasyon devrelerinin kullanımı ile sistem boyutu büyümektedir. Boyutun küçültülmesi ve daha kompakt bir yapı oluşturulması için, kompanzasyon endüktansı ana sargıların merkezine yerleştirilerek iki kutuplu bağlaşımlı yeni bir yapı önerilmiştir (Deng ve diğerleri, 2015). Önerilen yapıda sistem boyutu küçülürken, ana sargılar ile çaprazlarında bulunan kompanzasyon sargıları arasında bir bağlaşım oluşması sistemin güç faktörünün azalmasına dolayısıyla sistem veriminin düşmesine sebep olur. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için gerilim fazörlerinin ağırlık oranları olarak tanımlanan  $m$  parametresi tanımlanmış ve bu parametrenin minimize edilmesi ile deneysel çalışmalarda

%95'in üzerinde verim elde edilmiştir. Diğer önemli bir problem verici sargının araç şasesi üzerinde olması nedeniyle alıcı ve verici sargılar arasında ortaya çıkan hizalanma problemidir. Dairesel sargı yapısı için alıcı ve verici sargılar arasındaki mesafenin değişimi ve merkez noktalarının kayma problemlerinin bağlaşım katsayısı üzerine etkisi incelenmiştir (Zheng ve diğerleri, 2015). Dairesel sargı yapısının kullanıldığı bir çalışmada, sargı çapı 700 mm olarak belirlenmiş ve en az ferrit nüve kullanımının sağlanabilmesi için parametrik optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. 12 adet "I" tipi ferrit nüveler farklı boyutlar ve şekillerde yerleştirilerek en uygun tasarımın seçilmesi amaçlanmıştır (Budhia ve diğerleri, 2011). Diğer bir çalışmada ise hizalanma problemine bağlı olarak tüm kayma durumlarında sistem performansı incelenmiş ve Yüksek Verimli Güç Aktarım Bölgesi elde edilmiştir. Hizalanma problemi ve aradaki mesafenin bağlaşım üzerine etkisinin azaltılması için farklı sargı tasarım önerileri incelenmiştir. Ferrite barlar ile akının alıcı ve verici sargılar arasında kalması sağlanmış, DD sargı yapısı ve buna ek bir sargı (Q) ile yatay hizalanma problemi (sıfır bölgesi) için performans iyileştirmesi hedeflenmiştir (Budhia ve diğerleri, 2013). Bir diğer çalışmada farklı güçlerdeki SUV ve sedan tipi elektrikli araçların tamamında kullanılacak geniş hava aralıklarında KGA sağlanması için 300 mm'den 1000 mm'ye kadar genişlikte DD sargı yapısının boyutlandırılması incelenmiştir (Nagendra ve diğerleri, 2014). DD yapısının kullanıldığı uygulamalarda kaçak akıların önlenmesi için uç köşe noktalara ferrite barlar yerleştirilerek kaçak akılar %46 oranında azaltılmıştır (Lin ve diğerleri, 2014). BP(Bipolar Pad) tasarımının önerildiği ve DD yapısı ile karşılaştırıldığı makale önemli yapılardan bir tanesidir (Zaheer ve diğerleri, 2012). BP pad iki sargının birbirinden bağımsız olduğu ve kısmi olarak kesiştikleri yeni bir yapıdır. 20 kHz frekansta performansları karşılaştırılmış ve DD yapısı ile benzer sonuçlar vermesine karşın %25 daha az bakır kullanılmıştır. Asimetrik sargı yapısı önerisi ile hizalanma problemlerinin çözümü hedeflenen bir çalışmada ise 15 cm hava aralığı, 40 cm yanlamasına ve 20 cm uzunlamasına kayma durumunda 20 kHz çalışma frekansında 15 kW maksimum çıkış gücü elde edilmiştir. Ayrıca, özellikle zamanla değişen manyetik alan vektörlerin analizinde kolaylık sağlayan Baskın Alan Analizi adı verilen DOFA sonlu elemanlar yöntemi ile alıcı ve verici sargıların birbirinden bağımsız olarak tasarlanması sağlanmıştır (Choi ve diğerleri, 2014). DD sargı yapısının kullanıldığı ve yeni bir kompanzasyon topolojisinin önerildiği çalışmada, çıkışta sabit akım sağlayan bu yapı ile batarya şarj edilmiştir. LC/S topolojisi olarak isimlendirilen bu topolojinin temel dört topolojiden daha iyi ve verimli sonuç verdiği gösterilmiştir (Wang ve diğerleri, 2018).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda özellikle hizalanma toleransının azaltılması ve bağlaşım katsayısının artırılması amacıyla yeni sargı yapıları önerilmektedir. Bu yapılardan biri olan QDQ (Quad D Quadrature) sargı tasarımının önerildiği çalışmada, öncelikle analitik eşitlikler elde edilmiştir. Daha sonra kompanzasyon yapıları detaylıca karşılaştırılmış ve S-S yapısına avantajlarından dolayı karar verilmiştir. Dıştaki büyük kare sargı 30×30 cm, içteki dairesel sargılar ise 10 cm çapında seçilmiştir. Sargılar elektriksel olarak paralel, manyetik olarak seri bağlanmışlardır. Çalışma frekansı 33 kHz olarak seçilmiştir. Bu sargı yapısı, sargı boyutlarının %50'sine kadar hizalanma problemlerinde yüksek bağlaşım sağlamaktadır. Mükemmel hizalanmada verim %91.4 iken, %50 kayma durumunda verim %78'e düşmüştür. Manyetik akı yoğunluğu Teslametre cihazı ile ölçülmüş ve izin verilen aralıklar da olduğu gösterilmiştir (Kalwar ve diğerleri, 2016). Diğer bir çalışmada, iki tane dikdörtgenin artı şeklinde hem primer hem de sekonder tarafta sargı tasarımı ile hizalanma toleransının artırılması amaçlanmıştır. Bu tasarımın sadece hizalanma probleminde değil aynı zamanda düşük öz endüktans değerleri ile daire ve kare yapılardan daha yüksek bağlaşım katsayısına sahip olduğu gösterilmiştir (Sis ve Orta, 2018).

Gevşek bağlaşımlı KGA sistemlerde bağlaşım katsayısı genellikle 0.1 ile 0.3 arasında değişmektedir. Bağlaşım katsayısının artırılmasına yönelik son yıllarda en çok önerilen yapılardan biri de ana sargılara yardımcı sargıların eklenmesi fikridir. Bir veya daha fazla yardımcı sargının eklenmesi ile üretilen akı miktarı ve bağlaşım katsayısı artırılabilir (Ahn ve Hong, 2013; Kim ve diğerleri, 2011; Lee ve diğerleri, 2012). Böylece güç aktarım kapasitesi ve verimi de arttırmak mümkün olabilmektedir. Yardımcı sargılar primer ve sekonder sargılar arasında herhangi bir noktaya yerleştirilebilirken, bazı çalışmalarda ana sargıların iç bölgesinde kalan alanda bağımsız kompanzasyon kapasitörleri kullanılarak konumlandırılabilir (Hatchavanich ve diğerleri, 2019a, 2019b). Elektrikli araç uygulamalarında flat (düz) spiral sargı yapısı kullanıldığından daha çok iç bölgeye yerleştirilen uygulamalar mevcuttur. Buna örnek bir çalışmada geleneksel iki sargı yapısı yerine, primer sargısına ek iki tane yardımcı sargı eklenmiştir. 3.3 kW'lık bir sistemin 20 cm mesafeden 90 kHz frekansla aktarımı sağlanmıştır (%96.56 AC-DC verim). Bağlaşım katsayısının verim üzerinde direkt etkisi olduğu analitik denklemlerle gösterilmiştir. Bu tasarımda verim iki şekilde artırılır. İlk olarak primer sargının sarım sayısı yardımcı sargılar nedeniyle azaltıldığından primer sargının eşdeğer direnci azalır. İkinci etki ise birinci durumdaki eşdeğer direncin azalması ile görünen bağlaşım katsayısı artar. Bu yüksek bağlaşım katsayısı, güç aktarımına katkısı olmayan bir dolaşım akımı oluşturur ve

giriş akımının RMS değeri azalır. Bu tasarımın hizalanma problemi durumuna etkisi de incelenmiş olup 25 cm'lik bir kayma durumunda elde edilen verimin, iki sargılı yapının mükemmel hizalanması durumuna eşdeğer olduğu bildirilmiştir. Farklı güçlerde, iki sargılı yapı, tek yardımcı sargılı yapı ve önerilen iki yardımcı sargılı yapının verimleri karşılaştırılmış ve sistem kayıpları da incelenmiştir (Moon ve diğerleri, 2014). Benzer bir makalede primer ve sekonder sargılara birer tane yardımcı sargı ve bu yardımcı sargıların uçlarına kendi rezonans kapasitörleri eklenmiştir. Böylelikle primer ve sekonder sargılar arasındaki manyetik empedans ve dolayısıyla bağlaşım katsayısı nüve kullanılmadan artırılmıştır. 200 mm mesafeden 6.6 kW güç aktarımı sabit gerilim ve sabit akım modlarında amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilerde sabit gerilim modundan 3.7 kW değerinde bir güç %97 dc-dc verimle aktarılmıştır (Tran ve diğerleri, 2018).

Geleneksel KGA sistemlerinde akı çizgileri verici sargının bir yüzeyinden çıkarak alıcı sargı üzerinden geçer ve yolunu verici sargının diğer yüzünden girerek tamamlar. Verici sargının arka yüzeyinde kalan ve aktif olmayan bölge olarak tanımlanan alanın güç aktarımına katkısı yoktur. Aynı zamanda ekranlama elemanı üzerinde girdap akımlarının oluşmasına ve elektrikli araçlarda insan sağlığında olumsuz etkilere neden olur. Bu etkileri ortadan kaldırarak ana sargıya ek olarak yardımcı sargılar eklenmiş ve manyetik alanın aktif bölgede yoğunlaşması sağlanarak verim artırılmıştır. Ayrıca girdap akımları ve EMG'nin azaltılmasında da oldukça etkili olmuştur (Chiang, 2013). Akı yönlendirmesine yönelik yapılan bir çalışmada DA kutuplamalı mıknatıslar kullanılarak ekranlama elemanının mıknatısın koyulduğu noktada doyuma ulaşması ve düşük geçirgenlik ile birlikte akı çizgileri alıcı sargıya iletilerek akı penceresi oluşturulmuş, böylece bir veya birden fazla alıcı sargıdan sadece istenen sargıların uçlarında gerilim endüklenmesi sağlanmıştır (Umenei ve diğerleri, 2012).

KGA sistemlerinin manyetik optimizasyonu, uygun çalışma frekansı, geometrik tasarım ve kullanılan çekirdek materyallerinin belirlenmesi hedeflenen bir çalışmada 4 farklı sargı yapısı incelenerek bağlaşım katsayıları değişimi incelenmiştir. Dairesel sargı yapısının tüm durumlarda daha iyi bir bağlaşım katsayısına sahip olduğu görülmüş, iletken kesiti, sarım sayısı, sargı iç ve dış yarıçapı, kalite faktörünün değişimi ve çekirdek yapısının etkileri incelenerek optimum sargı tasarımı elde edilmiştir (Bosshard ve diğerleri, 2013). 52mm hava aralığında %96 verimle 5kW'lık güç transferi yapabilecek bir KGA sistemin tasarımı

gerçekleştirilmiş ve sistemdeki kayıp oranları elde edilmiştir. Toplam kayıpların %30 kadarı sargı kayıplarından kaynaklanmakta ve sargı kayıplarının da %24'ü çekirdek kullanımından kaynaklanan kayıplar olduğu görülmüştür (Bosshard ve diğerleri, 2014). Ortak ve öz endüktans ile AA direnç değerleri analitik yöntemlerle hesaplanarak, geliştirilen algoritma ile en uygun sarım sayıları ve iletken kesitleri bulunarak tasarım gerçekleştirilmiştir. 1 MHz çalışma frekansı ile 19.6 W güç %81 verimle aktarılmıştır (Noda ve diğerleri, 2015). Aynı çalışma ekibi en uygun parametre değerlerinin bulunmasında parçacık sürü optimizasyonu kullanarak farklı bir yaklaşım sergilemişlerdir (Noda ve diğerleri, 2016). Başka bir çalışma grubunun yayınlamış olduğu bir makalede ise altı basamaklı iteratif bir algoritma kullanarak en uygun tasarım parametreleri elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Jow ve Ghovanloo, 2007).

KGA sistem tasarımının önemli parametrelerinden olan sargı boyutlarının, sarım sayılarının ve aradaki mesafenin bağlaşım katsayısı üzerine etkisinin bilinmesi gereklidir. SEA programları kullanılarak bu değerler elde edilebilir. Ancak uzun analiz süreleri birden fazla analiz ve tasarım imkânını neredeyse imkânsız kılmaktadır. Bu nedenle sargıların öz ve ortak endüktans değerlerinin denklem takımlarının nümerik yöntemlerle elde edilmesi gerekmektedir. 1908 yılında Grover tarafından birçok sargı yapısının endüktans hesaplamalarında kullanılabilecek denklem takımları önermiştir. Ancak farklı boyut ve mesafelerde kullanılması için her bir yapı için birden fazla karmaşık katsayıların kullanılması gerekmektedir (Grover, 1922). Neumann formülleri ve Biot Savart kuralı kullanılarak özellikle dikdörtgen ve daire sargı yapılarının ortak endüktans değerinin hesaplanmasına yönelik çalışmalar mevcuttur (Akyel ve diğerleri, 2002), (Joy ve diğerleri, 2014), (Babic ve Akyel, 2006). Altıgen sargı yapısı ise daha çok küçük güçlü uygulamalarda kullanılan bir yapı olarak öne çıkmaktadır. Altıgen sargı yapısının ortak endüktans denklemleri farklı yöntemler kullanılarak kısıtlı sayıda çalışmada yer almaktadır. Ancak bu denklemler sadece ortak endüktans hesabına dayanıp, öz endüktans değerine yönelik çalışmalar değildir. Ayrıca birçok çalışma karmaşık denklem takımları ve farklı katsayılar kullanılarak elde edilmiştir (Tavakkoli ve diğerleri, 2016), (Tan ve diğerleri, 2018). Bu yapının hem öz hem de ortak endüktans denklemlerinin elde edilmesine yönelik nümerik bir yaklaşım gerekliliği görülmektedir. Bu amaçla tek bir temel akı denklemi kullanılarak endüktans değerlerinin hesabında kullanılabilecek yeni bir nümerik yöntem tezin dördüncü bölümünde detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tezin kapsamı ve amacı göz önünde bulundurularak KGA sistemlerin fikir olarak ortaya atıldığı 1890 yılından günümüze kadar olan akademik çalışmalar detaylıca incelenmiştir.

Gerçekleştirilmesi planlanan 1 kW gücündeki sistem mimarisinde kritik parametrelerin, frekans, sargı yapısı, aktarım mesafesi olduğu görülmektedir. Bu amaçla, literatürde kullanılan sargı yapıları, güç, frekans, verim ve mesafe gibi önemli tasarım parametreleri Çizelge 1.1’de verilmiştir. İncelenen tüm çalışmalar, KGA sistem tasarımlarının deneysel olarak gerçekleştirildiği ve akademik literatürde kabul görmüş çalışmalardır.

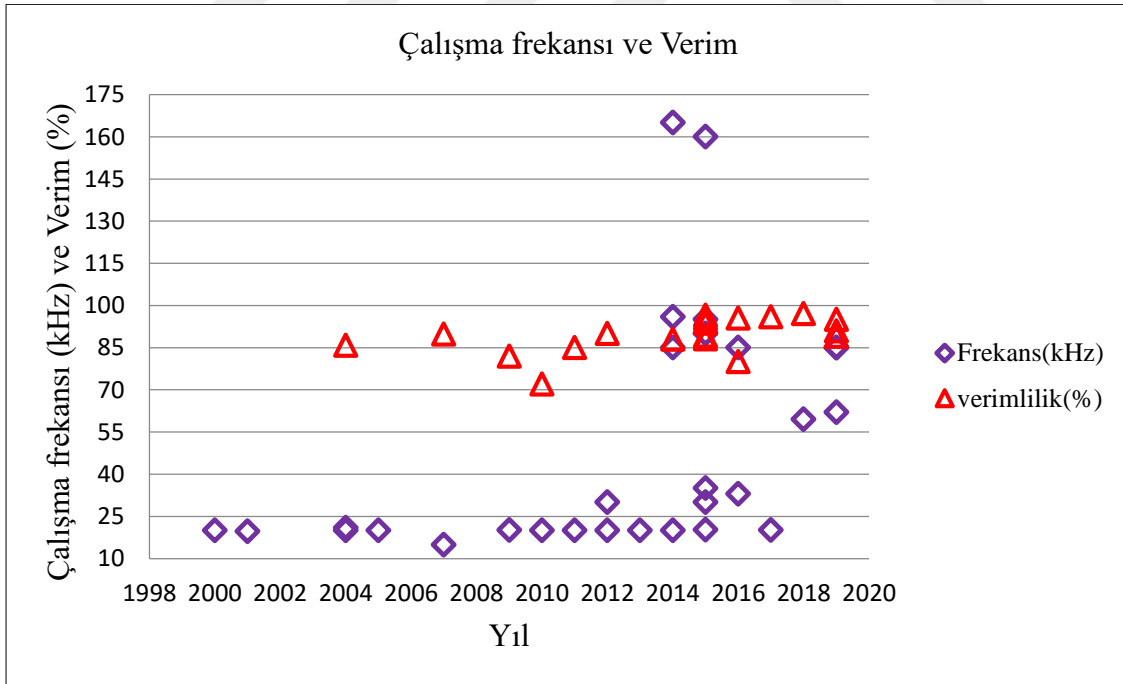


Çizelge 1.1. KGA sistemler konusunda yapılan akademik çalışmaların yıllara ve özelliklerine göre gösterimi (\*BY: Bilgi Yok)

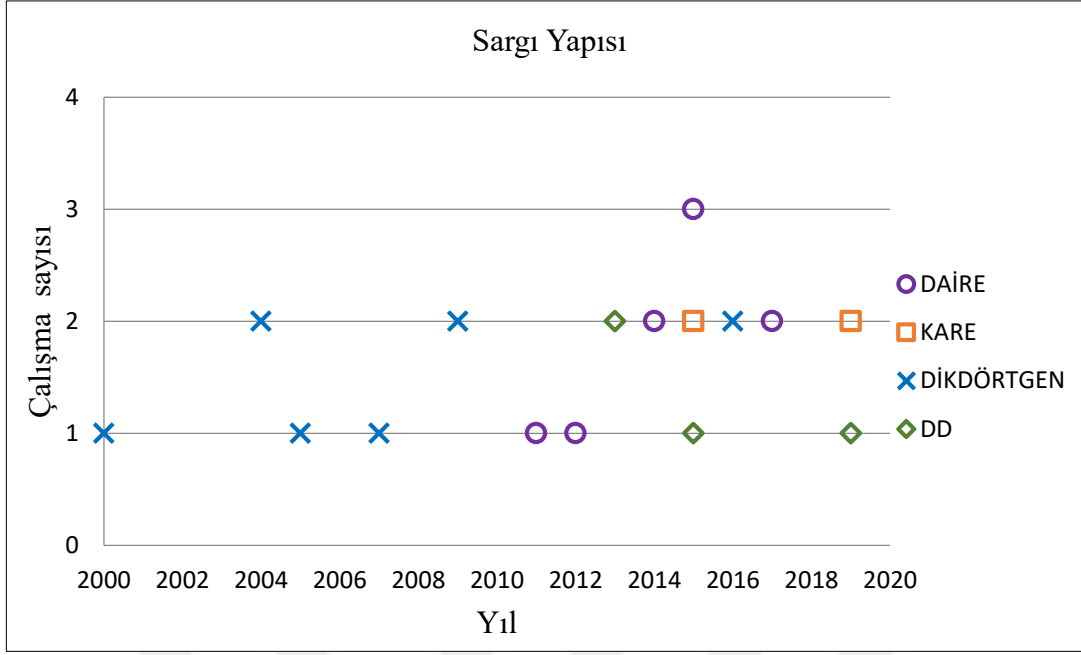
Çalışma	Frekans (Khz)	Mesafe (mm)	Güç (kW)	Nüve	Sargı şekli	Topoloji	Verim (%)
(Boys ve diğerleri, 2000)	10,2	70	0,6	Var	BY	BY	BY
(Wang ve diğerleri, 2000)	20	BY	20	BY	BY	BY	BY
(Wang ve diğerleri, 2001)	19,7	45	30	Var	Dikdörtgen	BY	BY
(Wang ve diğerleri, 2004a)	20	45	30	Yok	Dikdörtgen	PP	BY
(Wang ve diğerleri, 2004b)	20,9	45	30	Yok	Dikdörtgen	LCL-P	85,8
(Wang ve diğerleri, 2005)	20	45	30	Yok	Dikdörtgen	LCL-P	BY
(Villa ve diğerleri, 2012)	14,9	200	5	Yok	Dikdörtgen	SS	89,8
(Sallan ve diğerleri, 2009)	20,1	150	2	Yok	Dikdörtgen	SS	82
(Lee ve diğerleri, 2010)	20	170	3	BY	BY	BY	72
(Chopra ve Bauer, 2011)	105	50	0,1	Yok	Kare	SS	83,2
(Budhia ve diğerleri, 2011)	20	100	2	Var	Daire	PP	85
(Wu ve diğerleri, 2012)	20	255	5	Var	Daire	LCL	90
(Xuan ve diğerleri, 2012)	30	BY	6,8	BY	BY	SS	BY
(Ilmura ve diğerleri, 2012)	20,4	80	BY	Yok	Daire	SP	BY
(Budhia ve diğerleri, 2013)	20	200	2	Var	DD, DDQ	PP	BY
(Sahraneshin ve diğerleri, 2013)	20	BY	BY	Yok	Daire	SS	BY
(Bac ve diğerleri, 2014)	50	120	0,3	Yok	Daire	SS	85
(Huang ve diğerleri, 2014)	165	150	4	Yok	Daire	SS	BY
(Chen ve diğerleri, 2014)	96	40	4	Var	Daire	SS	BY
(Rahnamace ve diğerleri, 2014)	20	BY	20	BY	BY	LCL	88
(Schumann ve diğerleri, 2014)	85	BY	22	BY	BY	SS	BY
(Lin ve diğerleri, 2014)	20	120	BY	Var	DD	BY	BY
(Asa ve diğerleri, 2015)	160	203	1	Yok	Kare	SS	93,7
(Ibrahim ve diğerleri, 2015)	30	150	2	Var	Daire	SS	89,15
(Diekhans ve diğerleri, 2015)	35	135	3	Var	Daire	SS	94,2
(Moon ve Moon, 2015)	90	200	3,3	Yok	Kare+2 sargı	SS	96,56
(Deng ve diğerleri, 2015)	95	150	5,6	Var	DD	LCC	95,36
(Lee ve diğerleri, 2015)	20,3	120	6,6	Yok	Daire	SS	88,1
(Kalwar ve diğerleri, 2016)	33	300	1	Yok	Dikdörtgen+4sargı	SS	80
(Kan ve diğerleri, 2016)	85	150	3	Var	Dikdörtgen	LCC	95,5
(Kim ve diğerleri, 2016)	20,15	185	1	Var	Daire	SS	96
(Jayathurathnage ve diğerleri, 2016)	248	150	BY	Yok	Daire+3 sargı	SS	BY
(Mai ve diğerleri, 2018)	200	100	0,3	Yok	Daire+1 sargı	S-LCL	92,89
(Tran ve diğerleri, 2018)	59,5	200	3,7	Yok	Daire+2 sargı	SS	97,08
(Kan ve diğerleri, 2018)	85	150	3,09	Var	Kare+2 sargı	LCC	95
(Lu ve diğerleri, 2019)	62	300	3	Var	Kare	SS	90,9
(Pearce ve diğerleri, 2019)	85	175	3,4	Var	DD	PP	89



İncelenen akademik çalışmalar ışığında; istenilen sistem gereksinimlerine uygun frekans seçimi en kritik noktalardan biridir. Şekil 1.1’de literatürde karşılaşılan çalışma frekansları ve elde edilen başarımlar görülmektedir. Kullanılan çalışma frekans aralıkları iki bantta yoğunlaşmaktadır. Çalışmaların büyük çoğunluğunda, 19.7-20.9 kHz aralığında bir çalışma frekansı seçilmiştir. Karşılaşılan ikinci tercih aralığı ise özellikle son yıllarda yoğunlaşan 85-96 kHz aralığıdır. Frekans seçimi, kullanılacak sargı boyutlarını ve sarım sayısını belirlemektedir. Frekans arttıkça primer ve sekonderde kullanılacak sarım sayısı azalmaktadır. Ancak güç elektroniğinde karşılaşılabilecek anahtarlama kayıplarının artması ve yarı iletken seçimleri gibi kısıtlar ve araç içi diğer donanımlarla olan etkileşim de dikkate alınmalıdır. İncelenen literatür çalışmalarında; sargı şekilleri ile ilgili olarak, frekans seçimlerindeki gibi net bir tercih yoktur. Daha çok dairesel ve kare-dikdörtgen sargı yapısı tercih edilmiştir. Hizalanma problemi ve daha uzak mesafelere güç aktarımı amacıyla DD-DDQ, çoklu sargı kullanımı gibi özgün tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.2’de daha net görülebilmesi için incelenen akademik çalışmalarda kullanılan sargı yapıları verilmiştir.



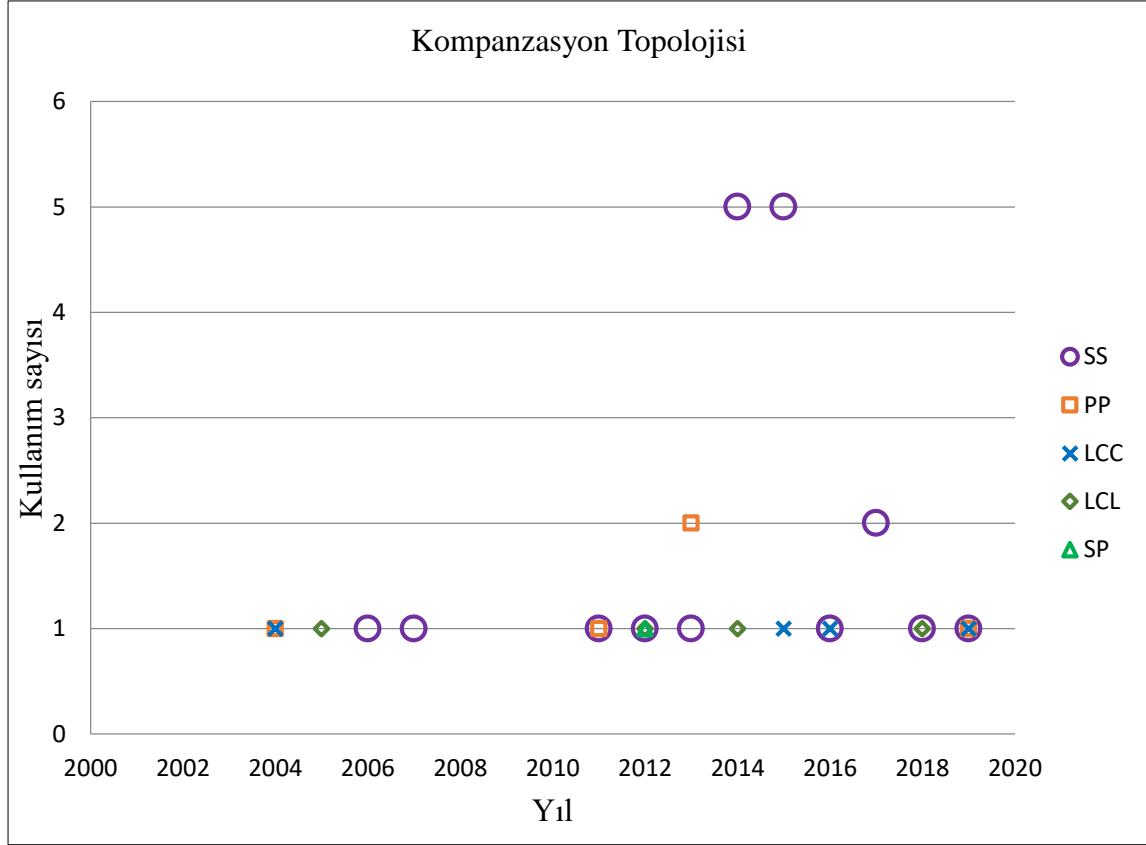
Şekil 1.1. Akademik çalışmalarda kullanılan frekanslar ve verim başarımlarının yıllara göre dağılımı



Şekil 1.2. Akademik çalışmalarda kullanılan sargı şekillerinin yıllara göre dağılımı

Şekil 1.2’de görüldüğü üzere daha çok daire ve dikdörtgen sargı yapıları tercih edilmiştir. Bu temel yapıların dışında ise DD sargı yapısı ön plana çıkmaktadır. Sargı tasarımı ve temel karşılaştırmalarına yönelik çalışmalar tezin ikinci bölümünde detaylı olarak incelenecektir.

Diğer bir kritik seçim kriteri olan kompanzasyon topolojisi ile ilgili incelenen çalışmaların yıllara göre kullanım sayılarını gösteren grafik Şekil 1.3’te verilmiştir. Yakın güç aralığı ve aktarım mesafesi kullanan çalışmalarda kompanzasyon topolojileri incelendiğinde yaygın kullanılan topolojilerin Seri-Seri (SS), Paralel-Paralel (PP), LCC, LCL ve Seri-Paralel (SP) topolojilerinin olduğu ve bunlar arasında yirmi ayrı çalışma ile SS topolojisinin öne çıktığı görülmektedir. Aynı çalışmalarda sargı şekilleri incelendiğinde net bir yığılma görülmemektedir. Çünkü istenilen öz ve ortak endüktans değerlerini her sargı şekli sağlayabilmektedir. Bu nedenle seçilen sargı yapısı ile kullanılan kompanzasyon topolojisi arasında doğrudan bir ilişki olmadığı çıkarılabilir. Kullanım sayıları karşılaştırıldığında incelenen çalışmalar içerisinde yirmi kullanım sayısı ile SS topolojisi en çok tercih edilen topoloji olmuştur. Özellikle son yıllarda LCC ve LCL gibi hibrit kompanzasyon topolojileri de tercih edilmekte olduğu görülmektedir.



Şekil 1.3. Akademik çalışmalarda kullanılan kompanzasyon topolojilerinin yıllara göre dağılımı

Tez kapsamında geliştirilecek olan 1 kW gücündeki KGA sisteminde sargı boyutlarını ön tasarımda belirleyebilmek için yine literatürdeki çalışmalar dikkate alınmıştır. Çizelge 1.2’de akademik çalışmalarda tercih edilen sargı şekli ve boyutları görülmektedir.

Çizelge 1.2. Akademik çalışmalarda kullanılan sargı boyut ve kapladığı alanlar [1-5 kW]

Sargı şekli	Boyutlar (mm)		Sargı Alanları (m <sup>2</sup> )	
	Primer	Sekonder	Primer	Sekonder
Kare (Aydın ve diğerleri, 2019)	500×500	400×400	0,25	0,16
Dikdörtgen (Sallan ve diğerleri, 2009)	400×800	400×400	0,32	0,16
Daire (Wu ve diğerleri, 2012)	r <sub>1</sub> =389	r <sub>2</sub> =389	0,47	0,47
Daire (Huang ve diğerleri, 2014)	r <sub>1</sub> =250	r <sub>1</sub> =250	0,196	0,196
Dikdörtgen (Kan ve diğerleri, 2016)	600×450	400×300	0,27	0,12
Dikdörtgen (Kalwar ve diğerleri, 2016)	300×300	300×300	0,09	0,09

### Ticari çalışmalar

Gelişen teknoloji ile birlikte ihtiyaçlara yönelik ürünlerin üretimi elektrikli araçların batarya şarj yöntemlerinde de karşımıza çıkmaktadır. Elektrikli araç bataryalarının kablosuz olarak şarj edilebilmesine imkân sağlayan ticari ürünler, son yıllarda hızla yaygınlaşmakta ve bu alana olan ilgi büyük şirketlerinde dikkatini bu teknolojiye çekmektedir. Piyasada farklı güç ve uygulama gereksinimlerine yönelik birçok ürün mevcut olup bu ürünlere ait teknik bilgilerin sadece bir kısmına ulaşılabilmektedir. Çizelge 1.3'te ticari ürünlere ait ulaşılabilen sınırlı bilgiler gösterilmiştir.

Çizelge 1.3. Piyasada bulunan ticari KGA sistem ürünlerinin firma adına ve özelliklerine göre gösterimi (Pashaei ve diğerleri, 2016)

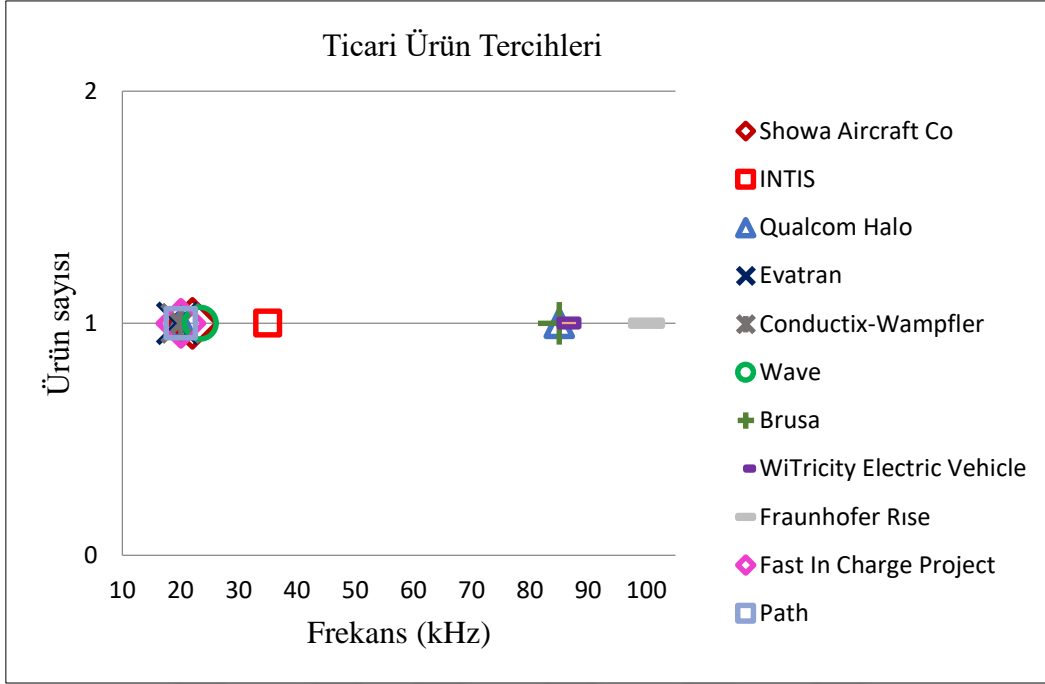
Firma Adı	Yıl	Frekans (kHz)	Mesafe (mm)	Güç (kW)	Verim
Bombardie	2003	BY	0	22	BY
Showa Aircraft Co	2009	22	150	30	92
INTIS	2011	35	150	30	90
Qualcom Halo	2012	20	150	3,3	89
Evatran	2012	19,5	10	3,3	89
Conductix-Wampfler	2013	20	40	120	90
Momentum Dyn.	2013	BY	610	3,3	92
Wave	2014	23,4	178	50	92
Brusa	2014	85	130	3,7	90
WiTricity EV	2015	85	180	3,3	90
Fraunhofer Iwes	2015	BY	200	3,6	94
Fraunhofer Rise	2015	100	130	22	97,4
Fast In Charge Project	2015	20	90	35	92
Path	2016	20	75	60	60

Yukarıda frekans seçiminin önemli olduğu ve bu konuda yapılan kabul görmüş akademik çalışmalarda kullanılan frekanslar gösterilmiştir. Çizelge 1.3'te incelenen ticari ürün bilgilerine bakıldığında; akademik çalışmalara paralel olarak, burada da iki frekans bant aralığı öne çıkmaktadır. Bunlardan daha yoğun olan bant 19-22 kHz'dir. Ticari ürünlerde tercih edilen bir diğer çalışma frekans ise 85 kHz olarak Şekil 1.4'te görülmektedir. Ticari ürünlerde de 20 kHz çalışma frekansı en çok tercih edilen frekans olmakla birlikte, son yıllarda birçok firmanın 20 kHz çalışma frekansına sahip ürün grubunun yanında 85 kHz çalışma frekansına sahip ürünleri de piyasaya sürdüğü görülmektedir. Çizelge 1.4'te

bilinen otomobil üreticilerinin hibrit ve elektrik araçlar için kullanmakta oldukları KGA sistemlerin özellikleri ve şarj olma özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.4. Piyasada bulunan ticari otomobil firmalarına ait ürün ve özellikleri (Ahmad ve diğerleri, 2018)

Model	Bir saatlik şarjla gidilebilen mesafe	Araç Tipi	Şarj Türü	Tam Şarj Olma Süresi	Güç (kW)
Porsche Panamera	10	PHEV	Seviye 1/Seviye 2	10sa/2.5sa	3
Audi A3 e-tron	11	PHEV	Seviye 1/Seviye 2	8sa/2.5sa	3,3
Cadillac ELR	11	PHEV	Seviye 1/Seviye 2	12.5-18sa/5sa	3,3
Chevy Spark EV	11	100% Elektrik	Seviye 1/Seviye 2/DC hızlı Şarj	20sa/7sa/20dk	3,3
Chevy Volt	11	PHEV	Seviye 1/Seviye 2	13sa/4.5sa	3,3
Ford C-Max Energi	11	PHEV	Seviye 2	2.5sa	3,3
Ford Fusion Energi	11	PHEV	Seviye 1/Seviye 2	7sa/2.5sa	3,3
Mercedes S550	11	PHEV	Seviye 1/Seviye 2	2sa/4-5sa	3,3
Mercedes C350	11	PHEV	Seviye 2	2sa	3,3
Smart Electric Drive	11	100% Elektrik	Seviye 2	2.5sa	7,2
Toyota Prius	11	PHEV	Seviye 1/Seviye 2	5.5sa/2sa	3,3
Mitsubishi i-Mi EV	11	100% Elektrik	Seviye 1/Seviye 3	8sa/30dk	3,6/2,4/1,92
Nissan LEAF	11/22	100% Elektrik	Seviye 1/Seviye 2/Seviye 3	22sa/8sa/30dk	3,3/6,6
Porsch Cayenne S	12/24	PHEV	Seviye 2	3sa/90dk	3,3/7,2
Wolkswagen e-Golf	12/24	100% Elektrik	Seviye 1/Seviye 2/DC hızlı şarj	24sa/9sa/30dk (%80)	3,3/7,2
Ford Focus Electric	22	100% Elektrik	Seviye 1/Seviye 2	20sa/3sa	6,6
Fiat 500e	22	100% Elektrik	Seviye 2	4sa	6,6
Kia Soul EV	22	100% Elektrik	Seviye 1/Seviye 2/Seviye 3	24sa/4sa/43dk	6,6
Honda Accord	22	PHEV	Seviye 2	3sa	6,6
BMW i3	25	100% Elektrik	Seviye 1/Seviye 2/DC hızlı şarj	22sa/8sa/30dk	7,4
Tesla Model S	29/58/255	100% Elektrik	Seviye 1/Seviye 2/Süper Şarj	BY	11,5/17,2/120



Şekil 1.4. Ticari ürünlerde tercih edilen çalışma frekansları

#### Çalışmanın özgün değeri

İncelenen akademik ve ticari çalışmalar neticesinde, literatürde sıkça kullanılan temel sargı yapılarının yanında birçok özgün sargı yapısının da önerildiği görülmüştür. Bunlardan biri olan altıgen sargı yapısı yüksek bağlaşım katsayısı, uygulama kolaylığı ve özellikle çoklu sargı yapılarında efektif alan kullanımı nedeniyle özellikle küçük güçlü uygulamalarda sıkça kullanılmıştır. Ancak bu sargı yapısının öz ve ortak endüktans değerlerinin hesaplanabilmesine yönelik kısıtlı çalışmalar mevcuttur. Öte yandan elektrikli araç bataryalarının şarjı gibi yüksek güçlü uygulamalarda ise kullanımına ilişkin çalışmalar yok denecek kadar azdır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak için, öncelikle altıgen bir sargının öz ve ortak endüktans hesaplamalarında akı dağılımlarının elde edilebilmesi için Biot-Savart yasası temel alınarak tek bir temel manyetik akı yoğunluğu denklemi kullanılmış ve geliştirilen algoritma yardımıyla en az hata ile endüktans hesaplamalarının yapılabilmesi için yeni bir nümerik yöntem önerilmiştir.

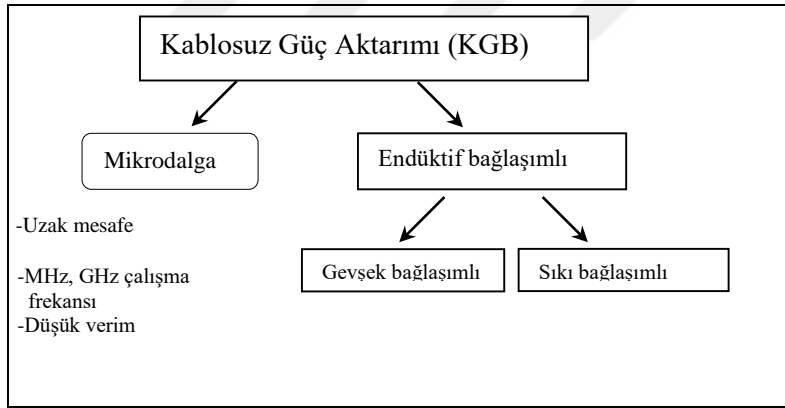
Önerilen nümerik yöntem sonuçları mevcut yöntemler, benzetim çalışmaları ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak doğruluğu gösterilmiştir. Elde edilen endüktans formülleri kullanılarak 1 kW gücünde bir KGA sistem tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu tasarım benzetim ve uygulama sonuçları ile doğrulanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde KGA sistemlerinin temellerini oluşturan yapılar detaylı bir şekilde incelenmiş ve her bir başlık altında bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde, önerilen sargı yapısının öz ve ortak endüktans değerlerinin hesaplamasına yönelik önerilen yöntemin detayları ve analitik denklemlerin çıkarımları anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen endüktans denklemleri kullanılarak 1 kW gücünde bir KGA sisteminin tasarım parametreleri bulunduğundan sonra benzetim ve uygulama çalışmalarıyla tasarımın doğrulanması gerçekleştirilmiştir.



## 2. KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ

Bu bölümde öncelikle KGA sistemlerinin temel özellikleri, çalışma mantığı ve kullanılan farklı yapıların incelenmesi ile tasarıma yönelik alt yapının oluşturulması amaçlanmıştır. KGA sistemler manyetik bağlaşım ve mikrodalga yayılımı ile güç aktarımının gerçekleşebildiği iki ana başlık altında toplanabilir. Mikrodalga daha çok uzak mesafelerde yüksek frekanslar kullanılarak düşük verimlerle güç aktarımının gerçekleştiği uygulamalardır. Endüktif bağlaşımli sistemler ise daha düşük frekanslarda (kHz) manyetik akı dağılımından faydalanarak gerçekleşen güç aktarım sistemleridir. Bu sistemler, sargılar arasındaki mesafenin kısa ve uzak olmasına göre iki ana gruba ayrılır. Gevşek bağlaşımli sistemlerde sargılar arasındaki mesafe fazla olmasından dolayı kaçak akı miktarı fazladır ve bu nedenle bu şekilde isimlendirilir. Özellikle elektrikli araç şarj uygulamaları bu sınıfta değerlendirilmektedir. Sıkı bağlaşımli sistemlerde ise sargılar arasındaki mesafe daha kısadır ve nüve kullanılarak kaçak akılar azaltılmış ve bağlaşım artırılmıştır. Şekil 2.1’de KGA sistemlerinin temel sınıflandırmasına ait şema verilmiştir.

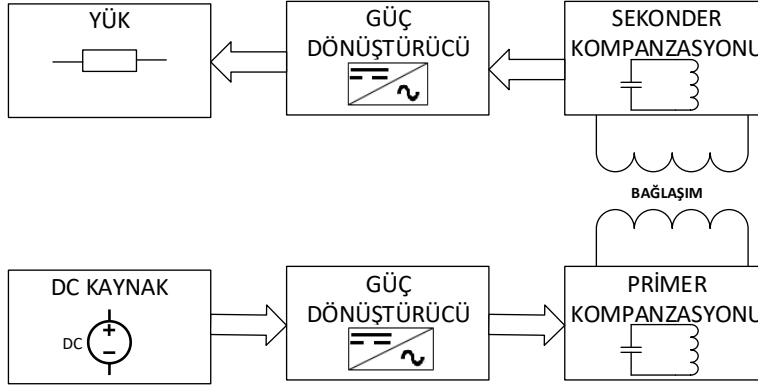


Şekil 2.1. KGA sınıflandırması

### 2.1. Genel Şema ve Çalışma Prensibi

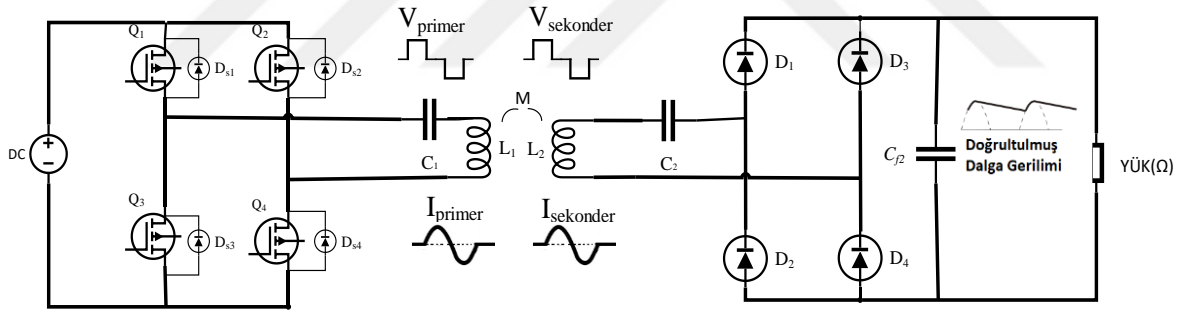
Bir KGA sistemin tüm bileşenlerini ve bileşenler arasını gösterir blok diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir.





Şekil 2.2. Tüm sistemi gösterir blok diyagramı

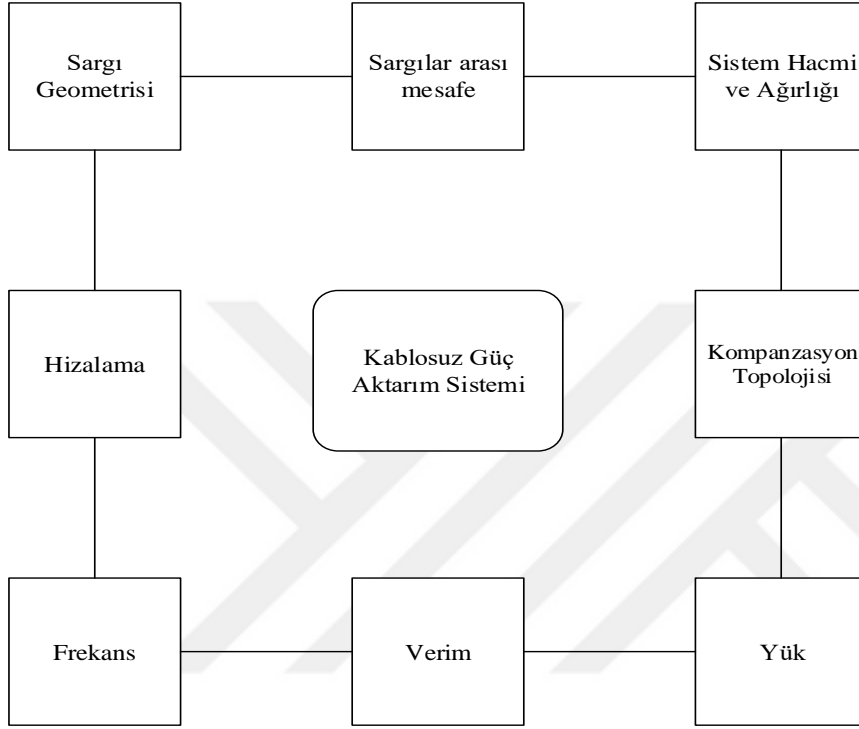
- 1- Giriş Kaynağı (DA)
- 2- Giriş Güç Dönüştürücü (DA-AA)
- 3- Primer-Sekonder Sargılar
- 4- Çıkış Güç Dönüştürücü (AA-DA):
- 5- Yük



Şekil 2.3. Genel devre şeması

Şekil 2.3'te tüm sisteme ait genel devre şeması gösterilmektedir.  $Q_1$ - $Q_4$  eviriciye ait yarı iletken anahtarlama elemanlarını,  $C_1$  ve  $C_2$  primer ve sekonder kompanseman kapasitörlerini,  $L_1$  ve  $L_2$  primer ve sekonder sargı endüktanslarını,  $M$  ortak endüktans değerini,  $D_1$ - $D_4$  ise tam köprü doğrultucu anahtarlama elemanlarını göstermektedir. Doğru akım güç kaynağından beslenen sistemde zamanla değişen bir manyetik alan oluşturmak amacıyla doğru gerilimin alternatif gerilime dönüştürülmesi gerekir. Tam köprü evirici kullanılarak yüksek frekanslı bir kare dalga elde edilir. Primer sargıdan akmaya başlayan akım oluşturduğu zamanla değişen manyetik alan sayesinde sekonder sargısında bir gerilim indüklenir. Tam köprü doğrultucu yardımıyla bu gerilim doğrultulur ve yükten akım akar.

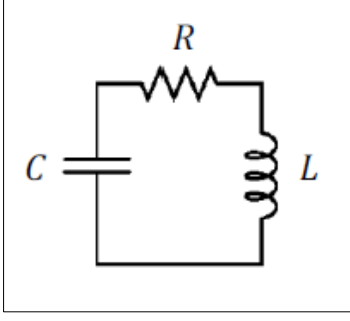
Yüksek verimli bir KGA sisteminin gerçekleştirilmesi için en uygun tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve hedeflenen sistem için en uygun yapıların seçilmesi gerekmektedir. Şekil 2.4'te yüksek verimli bir KGA sistem tasarımında göz önünde bulundurulması gereken ve seçilimi kritik rol oynayan parametreler gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Yüksek verimli bir KGA sistemini etkileyen faktörler

## 2.2. Yüksek Rezonanslı Sistemler ve Kompanzasyon Yapıları

Güç aktarımının daha uzak mesafelere ve daha yüksek verimlerle aktarılabilmesi düşüncesi, yüksek rezonanslı (highly resonant) sistemlerin geliştirilmesi fikrini doğurmuştur. MIT'te bir grup araştırmacının 2 metre gibi uzun bir mesafeden ışımsız (non-radiative) manyetik bağlaşımla 60W gücünde bir lambanın yakılması ile yüksek rezonanslı güç aktarımının mümkün olduğu kanıtlanmıştır. Düşük bağlaşım katsayısına rağmen, sekonder sargıya pozisyon serbestisi kazandırması ve yüksek verimli güç aktarımının gerçekleştirilmesi önemli avantajlardır (Morris, 2017). Şekil 2.5'te verilen devrenin rezonans frekansının hesaplanması ve kalite faktörünün hesaplanması aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.5. Elektromanyetik rezonatöre ait eşdeğer devre şeması devreye ait rezonans frekansı  $\omega_0$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

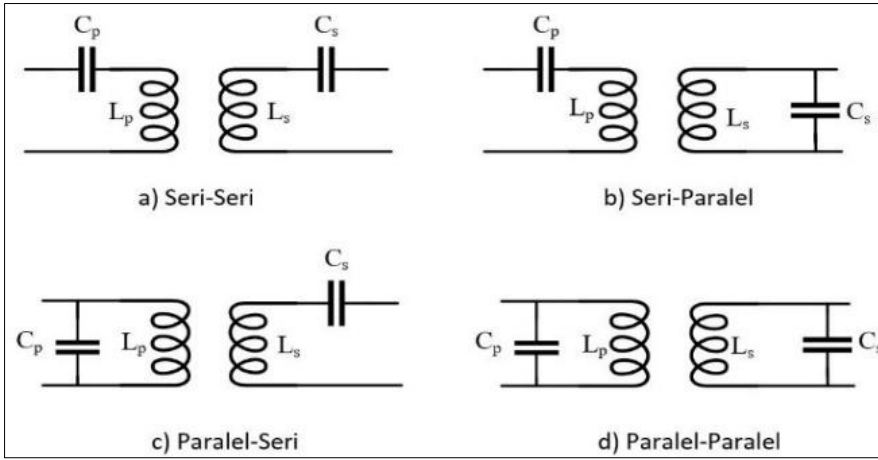
kalite faktörü ise,

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (2.2)$$

Eşitlikleri ile bulunabilirler. Yüksek rezonanslı sistemlerde kalite faktörünün oldukça yüksek olması beklenir. Bu değer elektrikli araçlar gibi kW seviyelerindeki güçlerde yaygın olarak kullanılan 20-85 kHz frekans değerlerinde genellikle 1-10 arası değerler alınırken, 15W ve daha düşük güç değerlerinde kullanılan MHz ve daha yüksek frekanslı uygulamalarda  $Q > 200$  olması beklenmektedir. Kalite faktörünün yüksek olması önemli bir avantaj gibi görünse de, çok yüksek alınması rezonans frekans değerinin toleransının azalması ile sistemin stabil çalışmamasına yol açmaktadır. Böylece küçük frekans değişimlerinin sistem verimine ve çalışmasına etkisinin azaltılması için kalite faktörü değerinin seçimi oldukça önemlidir.

KGA sistemlerde yeterli bir manyetik alan üretilebilmesi için primer ve/veya sekonder tarafta sargı endüktans değerlerine uygun rezonans kapasitörleri eklenerek çekilen toplam reaktif gücün azaltılması amaçlanmaktadır. Temel olarak, primer taraftaki kompanzasyonun amacı girişteki görünür gücün azaltılmasıyken, sekonder tarafa eklenen kompanzasyon kapasitörü ile sekonder endüktansı elimine edilerek maksimum güç transferi sağlanmaktadır. Aynı zamanda, batarya şarjı esnasında sargılar arasındaki mesafenin veya çıkış yük değerinin değişmesi ile sistemin kontrol edilmesi zorlaşır ve bu durumda kompanzasyon yardımı ile kontrolün kolaylaşması sağlanır. Netice olarak yüksek verimli KGA sistemlerin tasarımında bağlaşım katsayısı ve sargı kalite faktörü önemli

olduğu kadar uygun kompanzasyon yapısına da ihtiyaç duyulmaktadır (Zhang ve Mi, 2016). Sonuç olarak alıcı ve verici sargılara kompanzasyon kapasitörleri eklenerek sistemin rezonansta çalışması sağlanır. Uygun kompanzasyon topolojisinin seçimi uygulamanın gereksinimlerine bağlı olup oldukça farklı topolojiler mevcuttur. Kompanzasyon yapıları dört temel yapıdan ve bu temel yapıların farklı kombinasyonlarını içeren hibrit topolojilerden olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Dört temel yapı Seri-Seri (SS), Seri-Paralel (SP), Paralel-Seri (PS) ve Paralel-Paralel (PP) olarak sıralanabilir. Şekilde 2.6'da bu yapılara ait görsel verilmiştir.



Şekil 2.6. Temel kompanzasyon yapıları

Yaygın olarak kullanılan yapıların dışında farklı uygulamalar için yeni kompanzasyon topolojileri önerilmiş, avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir. Örneğin elektrikli araç batarya şarj sistemlerinde daha çok SS yapısı kullanılmaktadır. SS topolojide, sekonder sargının yansıyan empedansı primer sargıda imajiner kısmı oluşturmamaktadır. Diğer bir avantajı ise sekonder sargı kompanzasyonunun rezistif yükten ve ortak endüktanstan bağımsız olmasıdır. Bu avantajı sayesinde hizalanma problemlerine daha az hassasiyet gösterir. Ancak sekonder sargının olmaması durumunda primer sargı enerjisini aktaramayacağından devreye zarar verecektir. Primer ve sekonder sargılar mükemmel hizalı olmadıkları durumda, ortak endüktans değeri azalır ve dolayısıyla bağlaşım katsayısı düşer. Aşağıda verilen kaynak tarafından görülen empedans eşitlikleri incelendiğinde, SS ve SP topolojilerinde toplam empedans ortak endüktansa bağlı olarak azalırken sekonder tarafta yükün dolayısıyla da girişte kaynak tarafından çekilen akımın artmasına neden olur. PS ve PP topolojilerde ise toplam empedans artarken kaynaktan çekilen ve yükün çektiği akımlar ciddi oranda azalır (Sallan ve diğerleri, 2009).

$$Z_{T\_SS} = \left( R_1 + j \left( L_1 \omega_0 - \frac{1}{C_1 \omega_0} \right) \right) + \frac{\omega_0^2 M^2}{\left( R_2 + R + j \left( L_2 \omega_0 - \frac{1}{C_2 \omega_0} \right) \right)} \quad (2.3)$$

$$Z_{T\_SP} = \left( R_1 + j \left( L_1 \omega_0 - \frac{1}{C_1 \omega_0} \right) \right) + \frac{\omega_0^2 M^2}{\left( R_2 + j L_2 \omega_0 + \frac{R_{yük}}{1 + j R_{yük} C_2 \omega_0} \right)} \quad (2.4)$$

$$Z_{T\_PS} = \frac{1}{\left( R_1 + j L_1 \omega_0 \right) + \frac{\omega_0^2 M^2}{\left( R_2 + R_{yük} + j \left( L_2 \omega_0 - \frac{1}{C_2 \omega_0} \right) \right)} + j C_1 \omega_0} \quad (2.5)$$

$$Z_{T\_PP} = \frac{1}{\frac{1}{\left( R_1 + j L_1 \omega_0 \right) + \frac{\omega_0^2 M^2 (1 + j R_{yük} C_2 \omega_0)}{\left( R_{yük} + (R_2 + j L_2 \omega_0) (1 + j R_{yük} C_2 \omega_0) \right)}} + j C_1 \omega_0} \quad (2.6)$$

SP yapı bağlaşım katsayısına oldukça bağlıdır ve daha büyük değerli bir primer kapasitörüne ihtiyaç duymaktadır. SS ve SP topolojilerde sekonder kapasitörü aynı formülle hesaplanır. PP ve PS yapılarında primer kapasitörünü hesaplamak için daha karmaşık denklem takımlarına ihtiyaç duyulur, aynı zamanda kapasitör değeri bağlaşım katsayısı ve yük değerinin değişimlerinden etkilenir. PP ve PS yapıların verimlerini arttırmak ve daha kolay bir evirici akım kontrolü sağlamak için topolojiye ekstra endüktans eklemek gerekir. Diğer bir dezavantajı ise, anlık gerilim değişimlerinden etkilenmemek için girişte bir akım kaynağına ihtiyaç duyulmasıdır. İletken kesitlerinin küçük olduğu düşük güç uygulamalarında PP ve PS topolojileri aynı çalışma frekansında sargılar arasındaki hava aralığının biraz daha fazla olmasına izin vermektedir. Bu da fazladan maliyet ve daha büyük bir yapı demek olur. Büyük giriş empedansı, karmaşık denklem takımları, yük ve bağlaşım katsayısına bağımlılık gibi dezavantajlardan dolayı primer tarafta paralel kapasitör kullanımı oldukça nadirdir. Dört temel topoloji için yansıyan empedans, primer kapasitörü ve kalite faktörlerine ait elde edilen denklemler Çizelge 2.1'de rezonans frekansında ( $\omega_0$ ) çalışma için verilmiştir (Wang ve diğerleri, 2004).

Çizelge 2.1. Rezonans frekansında parametrelerin hesaplanması (Wang ve diğerleri, 2004)

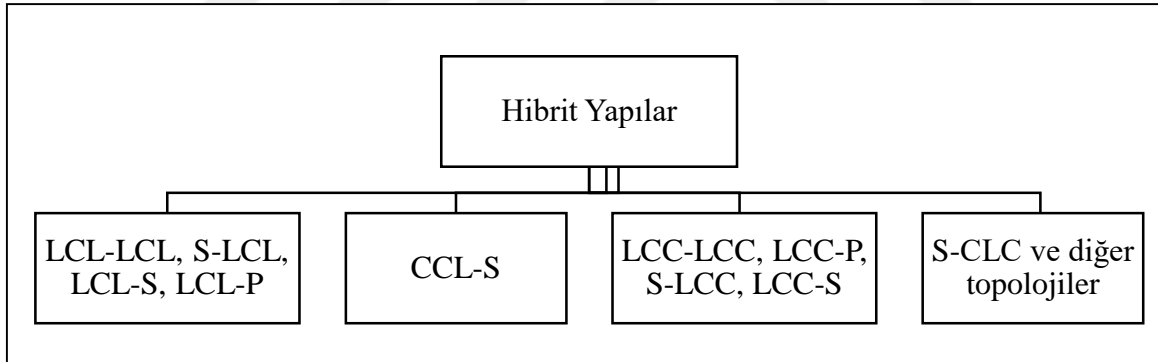
Yansıyan Direnç ve empedans değerleri		
Seri sekonder	$\text{Re } Z_{r0} = \frac{\omega_0^2 M^2}{R_{yük}}$	$\text{Im } Z_{r0} = 0$
Paralel sekonder	$\text{Re } Z_{r0} = \frac{M^2 R_{yük}}{L_2^2}$	$\text{Im } Z_{r0} = -\frac{\omega_0 M^2}{L_2}$
Primer kompanzasyon kapasitörü		
SS	$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1}$	
SP	$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 \left( L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)}$	
PP	$C_1 = \frac{L_1 - \frac{M^2}{L_2}}{\left( \frac{M^2 R_{yük}}{L_2^2} \right)^2 + \omega_0^2 \left( L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)^2}$	
PS	$C_1 = \frac{L_1}{\left( \frac{\omega_0^2 M^2}{R_{yük}} \right)^2 + \omega_0^2 L_1^2}$	
Primer ve sekonder kalite faktörleri		
Seri sekonder	$Q_P = \frac{L_1 R_{yük}}{\omega_0 M^2}$	$Q_S = \frac{\omega_0 L_2}{R_{yük}}$
Paralel sekonder	$Q_P = \frac{\omega_0 L_1 L_2^2}{M^2 R_{yük}}$	$Q_S = \frac{R_{yük}}{\omega_0 L_2}$

200 kW gücünde bir tasarımın incelendiği bir çalışmada aynı güç değeri için bakır kullanım gereksinimleri karşılaştırılmıştır. SS topolojisinin daha az bakır kullanım gerektirdiği, SS topolojiye göre, SP yapının %4.6, PS yapının %30 ve PP yapının ise %24 daha fazla bakır kullanımı gerektirdiği belirtilmiştir (Sallan ve diğerleri, 2009). SP topolojisi SS yapıya göre daha az sekonder sargı endüktansına ihtiyaç duymaktadır. İki topoloji için primer endüktansları eşit değerlere sahiptirler. SP yapı biyomedikal implantlar gibi küçük ve orta ölçekli güç uygulamaları için önerilmektedir. Çizelge 2.2’de temel topolojilerin basit bir karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.2. Temel kompanzasyon yapılarının karşılaştırılması (Kalwar ve diğerleri,2006)

Topoloji	Uzak mesafelerde Güç Faktörü	Rezonans durumunda toplam empedans	Uygun güç aralığı	Hızalanmaya karşı hassasiyet
SS	Oldukça yüksek	Düşük	Yüksek Güç	Düşük
SP	Yüksek	Düşük	Yüksek Güç	Düşük
PS	Orta	Yüksek	Düşük Güç	Hassas
PP	Orta	Yüksek	Düşük Güç	Çok Hassas

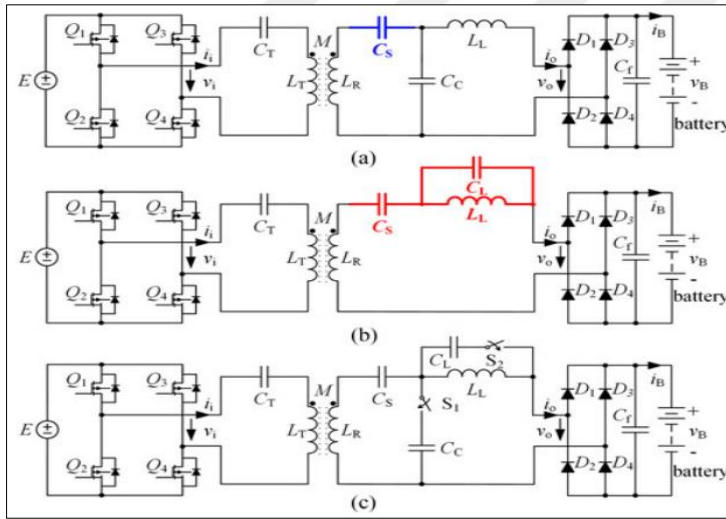
Hibrit kompanzasyon topolojileri temel topolojilerin uygulama alanına göre seçilen farklı kombinasyonlarından oluşmaktadır ve en yaygın kullanıma sahip olanlar Şekil 2.7’de verilmiştir (Houran ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.7. Hibrit kompanzasyon yapıları

Hibrit topolojilerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin CCL-S yapısı, primer tarafta seri bağlı ekstra bir kapasitöre sahip olup bu kapasitör sayesinde LC-S yapısına göre daha düşük anahtarlama kayıplarının oluşmasını sağlamaktadır. SS, S-LCL, S-CLC, ve SP topolojilerinin çıkış akım ve gerilim değerleri ortak endüktans değeri ile ters orantılı olup çıkış gücü ortak endüktansın karesi ile ters orantılıdır. LCL-LCL, LCC-LCC, LCL-S, LCL-P, PS ve PP topolojilerinde çıkış akım ve gerilimi ortak endüktans ile doğru orantılı iken çıkış gücü ortak endüktansın karesi ile orantılı olarak artmaktadır. Yüksek frekanslı uygulamalarda devre elemanlarının rezistif

davranışları azalmakta olup maksimum güç aktarımının gerçekleştirilebilmesi için empedans uyumlandırma (impedance-matching) devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrikli bisikletlerin batarya şarj işleminde kullanılacak anahtarlamalı bir kompanzasyon topolojisi verilmiştir (Mai ve diğerleri, 2017). Yapılan çalışmalarda yük olarak basit bir direnç kullanılmakta ve batarya davranışı göz önünde bulundurulmamaktadır. Ancak beslenmesi gereken yük bir batarya olduğunda sabit akım ve sabit gerilim çalışma modları göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 2.8'de sırasıyla sabit gerilim, sabit akım ve bu iki mod arasında geçiş sağlanabilen bir yapıya ait görsel verilmiştir. Şekil 2.8 (c)'de sabit akım modu için CC kapasitörü gerekli olmadığından S1 seri olarak bağlanmıştır. Aynı şekilde sabit gerilim modu için CL kapasitörüne ihtiyaç olmamasından dolayı buna seri bağlı bir S2 anahtarı bağlanmıştır. S1 anahtarı kapalı ve S2 anahtarı açık iken sistem sabit akım modunda, S1 anahtarı açık ve S2 anahtarı kapalı olduğu durumda ise sistem sabit gerilim modunda çalışabilmektedir. Şekil 2.8'de bataryanın çalışma moduna göre değişen bu anahtarlamalı yapı gösterilmektedir.



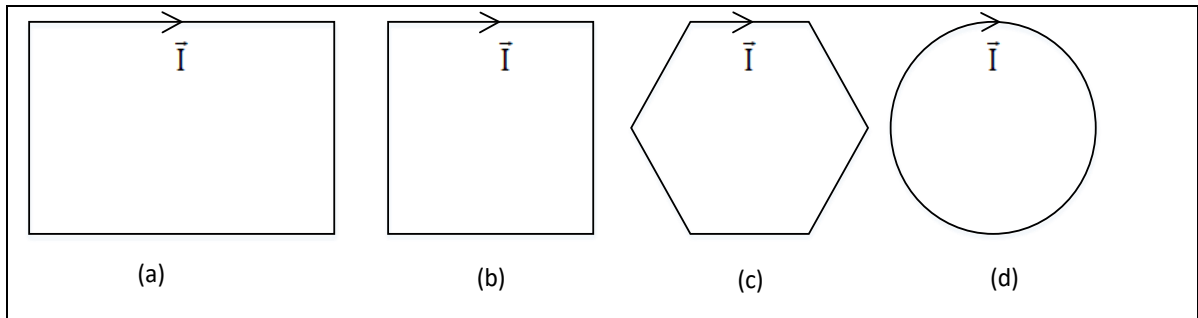
Şekil 2.8. a) Sabit gerilim modu için topoloji, b) Sabit akım modu için topoloji, c) Sabit gerilim ve sabit akım modlarında çalışabilecek hibrit topoloji (Mai ve diğerleri, 2017)

Özet olarak günümüze kadar yapılan ve özellikle kW seviyesinde güç aktarımının gerçekleştirildiği çalışmalar incelendiğinde SS kompanzasyon topolojisinin kullanım sayısı diğer topolojilere göre oldukça fazladır ve kullanım sayılarına ait karşılaştırma grafiği tezin giriş bölümünde verilmiştir.



### 2.3. Sargı Tasarımı

KGA sistemlerde en önemli ve kritik tasarım parametrelerinden biri de sargı tasarımıdır. Uygulama alanına ve ihtiyaçlara göre farklı sargı şekilleri ile istenilen güç değerlerinin aktarılabilmesi mümkündür. Genelde primer sargı boyut ve şekilleri için kısıtlamalar bulunmazken, sekonder sargılar için özellikle boyut konusunda sınırlamalar mevcuttur. Bu durumun temel sebebi sekonder sargının şarj edilmek istenen ürün üzerinde bulunması ve mümkün olduğunca kompakt bir yapıda olmasının istenmesidir. Örneğin elektrikli araçların sekonder sargıları araç şasesi altında bulunduğundan sekonder sargı en fazla bu bölüm için ayrılan boyutlarda olabilmektedir. İncelenen akademik çalışmalarda daha çok daire ve dikdörtgen-kare yapılarının kullanıldığı görülmektedir. Güç aktarım veriminin önemli bir belirleyicisi olan bağlaşım katsayısının olabildiğince yüksek değerlerde olması istenmektedir. Temel sargı yapılarının bağlaşım katsayılarının karşılaştırılması amacıyla eş sargı alanı, kesit ve sarım sayısına sahip modellerin SEA ile analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 2.4'te verilmiştir. Primer ve sekonder sargılar eş sargılar olup  $N=1$ ,  $r_w=0.5$  mm and  $A_{sargı} = 450$  cm<sup>2</sup> seçilmiştir ve  $N$ ,  $r_w$  ve  $A_{sargı}$  sırasıyla sarım sayısı, iletken yarıçapı ve sargı alanını göstermektedir. Sargılar arasındaki mesafe tüm yapılar için eşit ve  $g = 60$ mm olarak alınmıştır. Şekil 2.9'da sargı şekilleri, Çizelge 2.3'te ise sargı özellikleri ve boyutlandırma gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Sargı yapıları a) dikdörtgen b) kare c) altıgen d) daire

Çizelge 2.3. Sargı boyutları

Sargı Yapısı	Parametre	Boyutlar (mm)
Dikdörtgen	Uzunluk×Genişlik	150×300
Kare	Bir kenar uzunluğu	212
Altıgen	Bir kenar uzunluğu	132
Daire	Yarıçap	120

SEA sonuçları incelendiğinde mükemmel hizalı durumda dairesel sargı yapısının en iyi bağlaşıma sahip olduğu görülmektedir. Dikdörtgen ve kare sargı şekillerinin bağlaşım katsayılarının da dairesel yapıya oldukça yakın olup tercih edilebilir yapılardır. Literatür de sargı yapısı seçimi konusunda bir standart olmamakla birlikte daha çok uygulamaya yönelik tercihler kullanılmaktadır. Diğer önemli bir kriter ise bu sargı yapılarının hizalanma toleranslarının karşılaştırılmasıdır. Bu amaçla Şekil 2.9’da verilen sargı çeşitlerinin hizalanma tolerans performansları SEA yöntemiyle analiz edilmiştir. Hizalanma performanslarının belirlenebilmesi için primer sargı sabit tutularak, sekonder sargının x ve y eksenlerinde merkezden 40 ve 80 mm kaydırılması ile sonuçlar elde edilmiştir. Karşılaştırma kriteri olarak sargı alanlarının eşit alınmasından dolayı her sargının x ve y eksenlerindeki uzunlukları farklıdır. Bu durumda daha adil bir karşılaştırma amacıyla sekonder sargının merkez noktadan x ve y eksenlerinde aynı anda kaydırılmasıyla oluşan pozisyonlar için bağlaşım katsayısının değişimi gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.4. Hizalanma probleminin bağlaşım katsayısı üzerindeki % etkisi

Hizalanma (mm)	Dikdörtgen	Kare	Altıgen	Daire
x=0 and y =0 Mesafe=40	0,1803	0,1930	0,2033	0,21
x=0 and y =0 Mesafe=60	0,1299	0,1370	0,1451	0,1501
x=0 and y =0 Mesafe=80	0,0931	0,1014	0,1078	0,1115
x=0 and y =0 Mesafe=100	0,0725	0,0773	0,0824	0,0851
x=40 and y =40 Mesafe=60	0,0974	0,1055	0,1139	0,1179
x=80 and y =80 Mesafe=60	0,045	0,0546	0,0633	0,0684
Yüzde değişim (%)	65	60	56	54

Çizelge 2.4’te verilen hizalanma toleransı sonuçları incelendiğinde, karesel sargı yapısında x ve y eksenlerinde 80 mm kayma olduğunda bağlaşım katsayısı 0.0546 olmakta ve bu da %60 kadar bir değişim olduğunu göstermektedir. Aynı şartlarda altıgen sargı yapısı incelendiğinde bu düşüş 56 olmaktadır ve %4 kadar daha iyi sonuç vermektedir. Bu

karşılaştırmada her ne kadar x ve y eksenlerinde aynı anda kayma yapılarak adil bir karşılaştırma sağlanmaya çalışılsa da, sargılarda kullanılan bakır miktarları hesaba katıldığında altıgen sargıda kullanılan sargı miktarı kare sargıdan daha az olmaktadır. Dolayısıyla sarım sayısının fazla olduğu uygulamalarda, daha adil bir karşılaştırma yapabilmek adına sargı alanları eşit alınırken kullanılan bakır miktarları da eşit alınmalıdır.

Tez kapsamında belirlenen 1 kW güç değerinde ve elektrikli araç uygulamalarında literatürde daha çok dikdörtgen-kare yapılarının kullanıldığı görülmektedir. Altıgen sargı yapısı dairesel sargı yapısından küçük bir miktar daha düşük bağlaşım katsayısına sahipken kare yapısına göre daha yüksek bağlaşım katsayısına sahiptir ve elektrikli araç uygulaması için daha önce kullanılmamıştır. Hem daha iyi bir bağlaşım katsayısına sahip olması hem de hizalanma problemlerine daha az hassas olması nedeniyle önemli avantajlara sahiptir. Literatürde elektrikli araç uygulamaları gibi yüksek güçlü uygulamalarda bu yapının kullanılmadığı ve avantajlı bir yapı olması nedeniyle bu sargı yapısının kullanımına karar verilmiştir. Kullanılacak sargı boyutları ile ilgili herhangi bir kısıtlama veya standart bulunmadığından ve ticari ürünlerde de bu konuda bilgi pek verilmediği için akademik çalışmalar bu konuda bilgi kaynağı olmaktadır. Tezin giriş bölümünde bu konuda detaylı incelemeler verilmiştir.

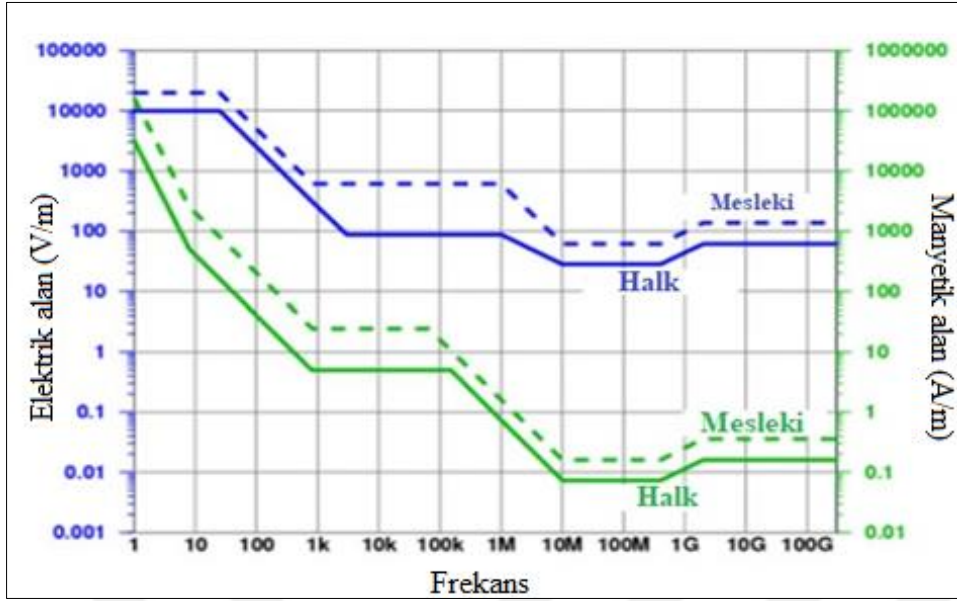
#### **2.4. KGA Sistemlerde Uygulanan Uluslararası Sağlık Standartları**

KGA sistemlerin tasarımında hedeflenen sistemin insan sağlığına etkileri ve diğer cihazlarla etkileşiminin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu konuyla ilgili çeşitli kuruluşların hazırlamış oldukları ve sürekli olarak güncelledikleri standartlar mevcuttur. Bunlardan en önemlileri;

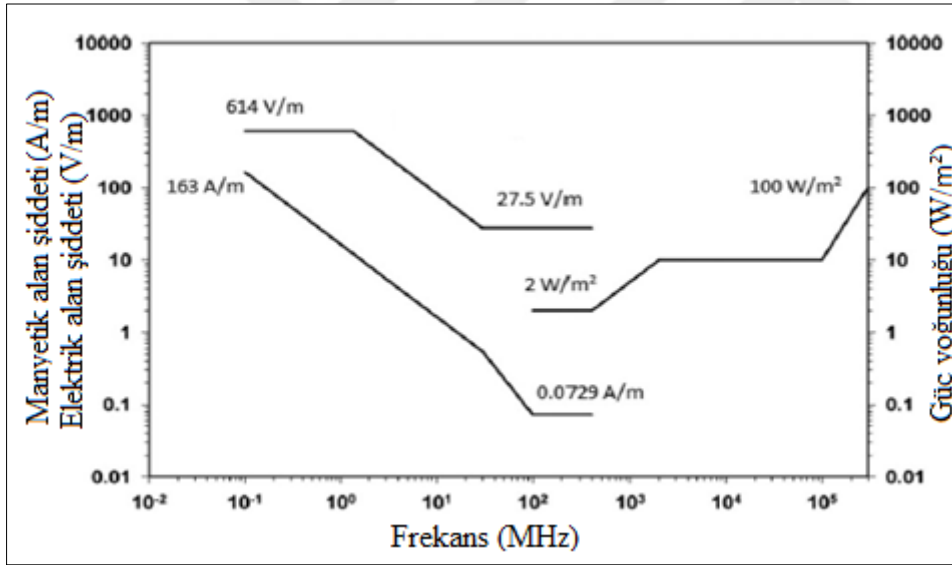
- İnsanların radyo frekans elektromanyetik alanlara maruziyet seviyelerinin belirlenmesi için IEEE standardı, Özellikleri: Frekans aralığı, 3 kHz ile 300 GHz (2005-2019 versiyonları mevcut)
- Zamanla değişen elektrik ve manyetik alana maruz kalınma limitleri için ICNIRP Rehberi, Özellikleri: Frekans aralığı, 1 HZ – 100 kHz (Düşük frekanslı uygulamalar için)
- Zamanla değişen elektrik ve manyetik alana maruz kalınma limitleri için ICNIRP Rehberi, Özellikleri: Frekans aralığı, 100 kHz - 300 GHz (Yüksek frekanslı uygulamalar için)

- Kanada Sağlık Bilimleri Müdürlüğü Sağlıklı Ortamlar ve Tüketici Güvenliği Şubesinin tüketici ve çalışanların radyasyondan korunması için hazırlanan standartlar, Özellikleri: Frekans aralığı, 3 KHZ - 300 GHz (2015)
- SAE (Society of Automotive Engineers) J2954 standardı 3.7 kW ile 22 kW güç aralıklarında Elektrikli araçlar ve Plug in Hibrit Elektrikli araçlar için sürekli olarak güncellenen bir standarttır.
- Qi standardı Wireless Power Consortium tarafından ilk olarak 2008 yılında Hong Kong'ta gerçekleştirilen toplantıda açıklanmıştır. Bu tarihten itibaren hızla büyümüş ve sürekli güncel standartlar yayınlamaktadırlar. Düşük güçlü (0-5 Watt) ve orta ölçekli güçte (120 Watt'a kadar) uygulamalar için 40mm'ye kadar hava aralığından güç aktarımı gerçekleştirilen tasarımlarda uygulanabilir standartları mevcuttur. Cep telefonları için piyasada bulunan ürünlerin bu standarda sahip olması gerekmektedir.
- Japonya kablosuz sistemler topluluğu tarafından hazırlanan KGA sistemleri rehberi
- 2009 yılında bir grup araştırmacının oluşturduğu konsorsiyumun son olarak 2013 yılında hazırlayıp yayınladıkları ve 10 kHz ile 10 MHz frekans aralığında çalışan uygulamalar için kullanılabilir standarttır.

Bu standartlardan en yaygın kullanıma sahip olanlar, IEEE, ICNIRP, Qi ve SAE olup bu standartların güncel sürümleri ücretli olarak temin edilebilmektedir. Aşağıda eski sürümlerine erişimi hala ücretsiz olan IEEE ve ICNIRP standartlarının yıllara göre karşılaştırılması ve değerlendirilmesine yer verilmiştir. Standartlarda özellikle manyetik ve elektrik alan değerlerinin bu ürünlerin hizmet grubunda çalışanların ve halk sağlığına olan etkilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla eşik değerler belirtilmiştir.

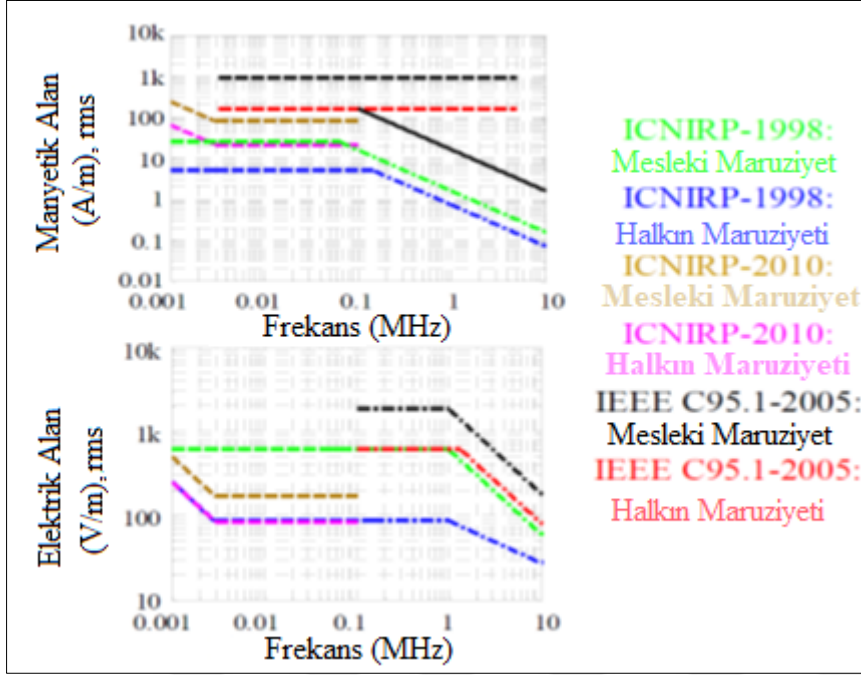


Şekil 2.10. ICNIRP standardına ait referans değerler (Hui ve diğerleri, 2014)



Şekil 2.11. IEEE standardına ait referans değerler (IEEE standart, 2005)

Şekil 2.10 ve 2.11'de sırasıyla ICNIRP ve IEEE standartlarına göre izin verilen elektrik alan ve manyetik alan değerleri gösterilmektedir. Şekil 2.12'de yaygın kullanılan iki standardın bu alanda çalışan hizmet sektörü elemanlarının ve halkın maruz kalabileceği eşik değerlerin yıllara göre karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.12. ICNIRP ve IEEE standartlarının yıllara göre değişimi (Zhu ve Lorenz, 2017)

ICNIRP standardına göre izin verilen elektrik alan ve manyetik alan yoğunluğu eşik değerleri diğer standartlara göre nispeten daha düşüktür. Standartlar oluşturulurken frekans değerleri düşük ve yüksek frekans olarak kabaca ikiye ayrılmıştır. 1 Hz - 100 kHz düşük frekans bölgesi olarak değerlendirilirken, 100 kHz - 300 GHz ve üzeri değerler yüksek frekans bölgesi olarak değerlendirilmekte ve standartlarda bu ayrıma göre yayınlanmaktadır. 100 kHz sınır bir değer olarak görülmekte ve bu değer üzerinde çalışıldığında ısınma etkilerinin de etkisi göz önünde bulundurulmalıdır ve Specific Absorption Rate (SAR) değerinin hesaplanması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda insan vücudunun 10 MHz'ten birkaç GHz frekans değerlerine maruz kalınması durumunda vücut sıcaklığının 1-2 °C artacağı gösterilmiştir. Ayrıca uzun süreli maruz kalınması durumunda özellikle çocukluk dönemi lösemi ve çeşitli kanser türlerinde artış olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur. Ancak yapılan çalışmalardaki denek sayısının az olması ve ortaya çıkan sorunların temelinde maruz kalınmış olmasının olup olmadığı ile ilgili kesin bir yargıya varmak mümkün olmamaktadır. Çizelge 2.5'te ICNIRP (2010) standardına göre farklı frekans aralıkları için tüm vücutun, baş, gövde ve bacakların maruz kalabileceği eşik değerler gösterilmiştir. Bu değerler incelendiğinde tüm vücut referans alınarak 100 kHz'e kadar SAR (W/kg) değerine ait bir eşik değer belirlenmesine ihtiyaç duyulmadığı görülmektedir.

Çizelge 2.5. Zamanla değişen manyetik ve elektrik alanların 10 GHz değerine kadar izin verilen SAR değerleri (ICNIRP standart, 2010)

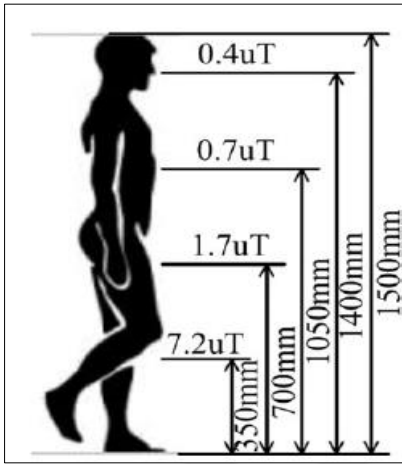
Maruz kalınma türü	Frekans aralığı	Baş ve gövde için akım yoğunluğu(mA m <sup>-2</sup> ) (rms)	Tüm vücut için ortalama SAR(W kg <sup>-1</sup> )	Bölgesel SAR (baş ve gövde) (W kg <sup>-1</sup> )	Bölgesel SAR (uzuvlar) (W kg <sup>-1</sup> )
Mesleki etkisi	1 Hz'e kadar	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz – 1 kHz	10	-	-	-
	1-100 kHz	f/100	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/100	0,4	10	20
	10 MHz-10 GHz	-	0,4	10	20
Halka etkisi	1 Hz'e kadar	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz – 1 kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/500	0,08	2	4
	10 MHz-10 GHz	-	0,08	2	4

Kas hücreleri sinir hücrelerine oranla maruz kalınan elektrik alana daha hassastırlar. Ayrıca hayati önem taşıması nedeniyle kalp kaslarına yönelik inceleme daha detaylı olmalıdır. Maruz kalınan elektrik alan neticesinde vücut yüzeyinde bir enerji birikimi olur ve bu enerji vücuttan bir akımın akmasına neden olur. Çizelge 2.5'te baş ve gövde için izin verilen akım yoğunlukları farklı frekans değerleri için belirtilmiştir. Vücutta biriken enerji değeri, manyetik alanın tüm ortamlarda aynı şekilde yayılmasına rağmen elektrik alan için aynı değildir. Tüm bölgelerin iletkenliği (conductivity) birbirinden farklıdır. Çizelge 2.6'da 100 kHz çalışma frekansında iletkenlik değerleri (S/m) ve enerji tutabilme kapasitesini belirleyen geçirgenlik (permittivity - F/m) değerleri verilmiştir (Cheikh ve diğerleri, 2016).

Çizelge 2.6. 100 kHz çalışma frekansı için iletkenlik ve enerji tutabilme kapasitesi değerleri (Cheikh ve diğerleri, 2016)

Doku türü	İletkenlik (S/m)	Enerji kapasitesi (F/m)
Kas	0,36	7800
Kan	0,70348	5102,7
Yağ	0,025066	66,295
Sinir	0,082344	4726

Elektrikli araç uygulamalarında yaygın olarak kullanılan frekans aralığı olan 20 kHz çalışma frekansına ve 200 mm mesafeden 2 kW gücünde bir aktarımın yapıldığı uygulamanın insan sağlığı açısından güvenilirliğinin test edildiği çalışma örnek bir çalışma olarak gösterilebilir (Budhia ve diğerleri, 2011). Şekil 2.13'te 150 mm boyunda bir bayanın sekonder sargının yüzeyinden 170 mm uzakta olduğu durumda yapılan ölçüm değerleri gösterilmiştir. Sargı yüzeyinde ekranlama (shielding) elemanı olarak alüminyum malzeme kullanılmıştır.



Şekil 2.13. Sargı yüzeyinden 170 mm uzakta bulunan bir insanın vücudu boyunca ölçülen manyetik akı yoğunluğu değerleri (Budhia ve diğerleri, 2011)

ICNIRP standardında 0.8-150 kHz çalışma frekansı aralığında, insan vücudunun maruz kaldığı ortalama manyetik akı yoğunluğu değerinin  $6.25 \mu\text{T}$ 'dan büyük olmaması gerekmektedir. Ayrıca noktasal ölçümlerde, üst eşik değerinin  $\sqrt{20}$  katı yani  $27.3 \mu\text{T}$  değerine kadar izin verilmektedir. Dolayısıyla ölçülen değerlerin izin verilen aralıklarda olduğu ve insan sağlığı açısından bir tehlike olmadığı gösterilmiştir.

İzin verilen eşik değerlerin aşılmaması için literatürde buna benzer birçok yöntem önerilmiş ve çalışmalarla desteklenmiştir. Bu kapsamda UW Madison üniversitesinde yapılan bir çalışmada kW seviyelerindeki güçlerde hava aralığındaki elektrik alan ve manyetik alan yoğunluğu değerlerinin düşük olması amaçlanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda iki sargı arasındaki merkez noktalarda manyetik alan yoğunluğunun değerinin 1mT ve üzeri olduğu bununda insan sağlığı için IEEE C95,1-2005 standardında izin verilen aralığın yaklaşık dört katı kadardır. IEEE C95,1-2005 standardına göre 3kHz-5MHz aralığında izin verilen aralık manyetik alan yoğunluğu 0.205 mT (rms), elektrik alan



yoğunluğu ise 614 V/m (rms)'dir. Altı basamaklı bir tasarım aşaması ile düşük akı yoğunluğuna sahip yapı oluşturulmuştur. En uygun bakır iletken kesiti, ortak ve öz endüktans değerleri ile AA direnç değerlerinin farklı sarım sayılarında ve 0.1 MHz giriş frekansında değerleri, sargıdan sargıya transfer verimi, hava aralığı merkez akı ve elektrik alan yoğunlukları analitik ve SEA ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen uygun verilere göre son olarak farklı sarım sayıları ve farklı frekanslarda çalışılarak en uygun tasarım verileri elde edilmiştir. 600 mm çapında üçer sarım sayısına sahip, 30 cm hava aralığından 0.1 MHz çalışma frekansı ile 3 kW güç aktarımı %90 üzerinde bir verimle deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Hava aralığı merkezinde B: 243.94  $\mu$ T ve E: 415.77 V/m olarak tepe değerleri ölçülmüştür (Zhu ve Lorenz, 2017). Diğer bir çalışmada 30 cm mesafeden 220W gücün %95 verimle aktarımının gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Sistemin eşdeğer devresi oluşturulmuş, kayıplar incelenmiştir. Yüksek frekanslarda (birkaç MHz) çalışıldığı için yakınlık (proximity) ve deri (skin) etkisi nedeniyle kayıplar artmaktadır. Bu kayıpları azaltmak için farklı kesitlerin performansları incelenmiş ve yeni bir sargı kesit şekli önerilmiştir (Lee ve Lorenz, 2010).

Geleneksel KGA sistemlerinde akı çizgileri verici sargının bir yüzeyinden çıkarak alıcı sargı üzerinden geçer ve yolunu verici sargının diğer yüzünden girerek tamamlar. KGA sistemlerinin insan sağlığı üzerine etkilerinin incelenmesi ve azaltılması amacıyla yapılan çalışmalarda alüminyum ekranlama tercih edilmiştir ve optimum alüminyum ekranlama elemanının kalınlık ve sargıya uzaklığı ile ilgili optimizasyon çalışmaları mevcuttur. Verici sargının arka yüzeyinde kalan ve aktif olmayan bölge olarak tanımlanan alanın güç aktarımına katkısı yoktur. Aynı zamanda ekranlama elemanı üzerinde girdap akımlarının oluşmasına ve elektrikli araçlarda insan sağlığında olumsuz etkilere neden olur. Bu etkileri ortadan kaldırarak ana sargıya ek olarak yardımcı sargılar eklenmiş ve manyetik alanın aktif bölgede yoğunlaşması sağlanarak verim artırılmıştır. Ayrıca girdap akımları ve EMG'nin (Elektromanyetik Girişim) azaltılmasında da oldukça etkili olmuştur (Chiang, 2013).

### Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde KGA sistemlerinin temelleri, alt birimlerinin ayrı ayrı incelenmesi ile okuyucuya sistemin tanıtılması ve çalışma prensibinin anlatımı amaçlanmıştır.

- KGA sistemleri sınıflandırılmış ve elektrikli araçların kablosuz enerjilendirilmesinin bu sistemler içinde konumlandırılmasına yer verilmiştir.
- KGA sistemlerin genel devre şemaları ve çalışma prensibi anlatılmıştır.
- Yüksek rezonanslı sistemlerin çalışma prensipleri ve bu sistemlerin kullanılması gereksinimleri belirtilmiştir.
- Reaktif güç değerinin ortadan kaldırılması için kompanzasyon sistemlerinin gerekliliği anlatılmış ve kullanılmakta olan farklı kompanzasyon topolojileri detayları ve karşılaştırılmalarıyla verilmiştir.
- Sargı tasarımın önemi anlatıldıktan sonra, temel geometrik şekillerden oluşan, birer sarımlı ve 0.5 mm'lik yarıçapa sahip iletkenler kullanılarak oluşturulan eş sargı alanına sahip sargıların bağlaşım katsayısı değerleri ve hizalanma problemi durumundaki performansları SEA yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu analiz neticesinde altıgen sargı yapısının getireceği avantajlar belirtilmiştir.
- KGA sistemlerinin insan sağlığı üzerinde oluşturacağı etkilerin incelenmesi amacıyla yayımlanan uluslararası sağlık standartları incelenmiş ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik gerçekleştirilen önemli akademik çalışmalardan bahsedilmiştir.

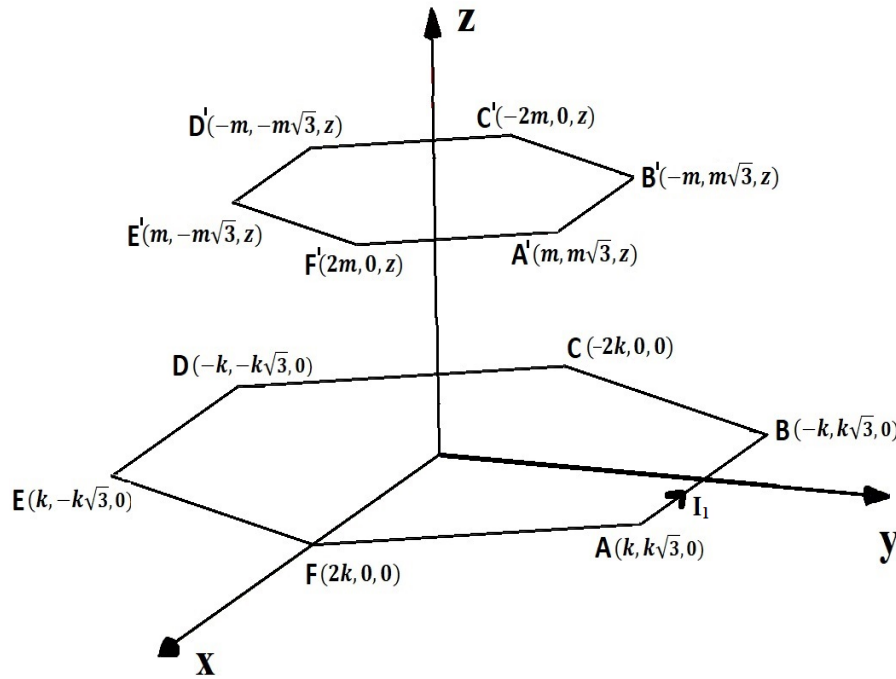


### 3. ALTIGEN SARGI YAPISI İÇİN ÖZ VE ORTAK ENDÜKTANS HESABI

Bu bölümde tez kapsamında incelenen altıgen sargı yapısının öz ve ortak endüktans hesabı için önerilen yeni bir yaklaşım yöntemi detaylarıyla birlikte verilmiştir. Önerilen analitik çözüm yöntemin farklı sargı boyut ve sargılar arasındaki mesafelerde elde edilen sonuçlar, SEA yöntemi, literatür de kabul görmüş endüktans hesaplama yöntemleri ve laboratuvar ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak verilmiştir.

#### 3.1. Ortak Endüktans Hesabı

Ortak endüktansı hesap etmek için birinci bobinin akım yönündeki birim çizgi vektörünün ikinci bobinin her hangi bir noktasında oluşturduğu manyetik alan hesaplanmalıdır. Birim çizgi vektörünün yönü X veya Y ekseninde olmasına göre manyetik alan ayrı ayrı hesaplanmalıdır.



Şekil 3.1. Altıgen sargı yapısının xyz koordinat sistemi üzerinde gösterimi

Biot-Savart kanununa göre manyetik alan

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (3.1)$$

Primer sargıya ait kenar uzunluğu  $2k$ , sekonder sargıya ait kenar uzunluğu ise  $2m$  kadar olan altıgen sargıya ait görsel Şekil 3.1’de verilmiştir. Sarım sayısı birden fazla olan sargılar için endüktans hesaplamalarında sargının dış kenar uzunluğunu ( $k_{dış}$  veya  $m_{dış}$ ) almak hesaplama hatasının büyük olmasına neden olacaktır. Bu nedenle ortalama kenar uzunluğunun hesaplanması ve çok sarımlı sargı endüktansı hesaplamalarında  $k$  ve  $m$  değerleri için bu değer kullanılmalıdır. Örneğin, primer sargı ortalama kenar uzunluğu ( $2k_{ort}$ ) basit trigonometrik denklemler kullanılarak Eş. 3.2’de verilmiştir. Aynı yöntemle sekonder sargı ortalama kenar uzunluğu ( $2m_{ort}$ ) bulunabilir.

$$2k_{ort} = \frac{2k_{dış} - [Nw + (N-1)g]}{2\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

$N$  sarım sayısını,  $w$  iletken çapını,  $g$  ise iletkenler arasındaki mesafeyi göstermektedir. Endüktans hesaplamalarının yapılabilmesi için, öncelikle primer sargının bir kenarının sekonder sargı alanı içerisinde herhangi bir noktada oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu denklemi Biot-Savart denklemine göre elde edilmiştir.

AB uzunluğu için manyetik akı yoğunluğu denkleminin elde edilmesi

İletken üzerinde akım yönündeki birim uzunluk vektörü

$$d\vec{l} = dx \cdot \hat{i} \quad (3.3)$$

Birinci bobinin merkezinden çalışma noktası olan ikinci bobin üzerindeki  $P(x_1, y_1, z_1)$  noktasına olan birim uzaklık vektörü

$$\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2 \quad (3.4)$$

$$\vec{r}_1 = x_1 \cdot \hat{i} + y_1 \cdot \hat{j} + z_1 \cdot \hat{k} \quad (3.5)$$

$$\vec{r}_2 = x \cdot \hat{i} + b \cdot \hat{j} \quad (3.6)$$

$$\vec{r} = (x_1 - k) \cdot \hat{i} + (y_1 - k\sqrt{3}) \cdot \hat{j} + z_1 \cdot \hat{k} \quad (3.7)$$

$$r = \sqrt{((x_1 - k)^2 + (y_1 - k\sqrt{3})^2 + z_1^2)} \quad (3.8)$$

Birim vektörleri tanımlanarak manyetik alan denkleminde yerine yazılırsa

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{(dx \cdot \hat{i}) \times [(x_1 - k) \cdot \hat{i} + (y_1 - k\sqrt{3}) \cdot \hat{j} + z_1 \cdot \hat{k}]}{[(x_1 - k) \cdot \hat{i} + (y_1 - k\sqrt{3}) \cdot \hat{j} + z_1 \cdot \hat{k}]^{3/2}} \quad (3.9)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{(y_1 - k\sqrt{3}) \cdot dx \cdot \hat{k}}{[(x_1 - k) \cdot \hat{i} + (y_1 - k\sqrt{3}) \cdot \hat{j} + z_1 \cdot \hat{k}]^{3/2}} - \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{z_1 \cdot dx \cdot \hat{j}}{[(x_1 - k) \cdot \hat{i} + (y_1 - k\sqrt{3}) \cdot \hat{j} + z_1 \cdot \hat{k}]^{3/2}} \quad (3.10)$$

İkinci bobinin yüzey alanına dik olan bileşen alınır dolayısıyla ikinci terim sıfır olur.

Birinci bobinin AB parçası boyunca x, +k ile -k arasında değer alacağından integral sınırları aşağıdaki gibi alınır.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-k}^k \frac{(y_1 - k\sqrt{3}) \cdot dx}{[(x_1 - k) \cdot \hat{i} + (y_1 - k\sqrt{3}) \cdot \hat{j} + z_1 \cdot \hat{k}]^{3/2}} \cdot \hat{k} \quad (3.11)$$

$x_1 - k = U$  ve  $-dx = dU$  değişken değiştirme yapılır ve integral alınırsa,

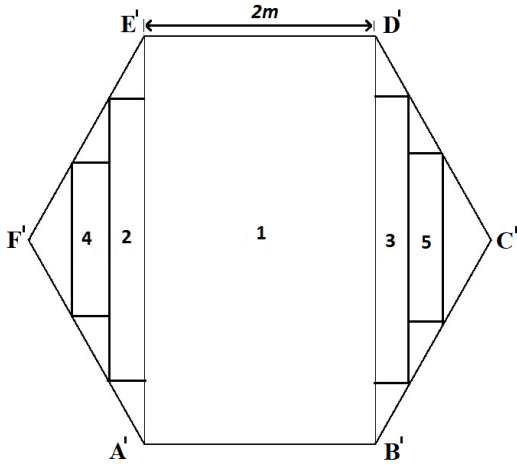
$$\int \frac{1}{(U^2 + a)^{3/2}} \cdot dU = \frac{U}{a\sqrt{U^2 + a}} + C \quad (3.12)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot (y_1 - k\sqrt{3}) \cdot \frac{(x_1 - k)}{[(y_1 - k\sqrt{3})^2 + z_1^2] \cdot \sqrt{((x_1 - k)^2 + (y_1 - k\sqrt{3})^2 + z_1^2)}} \Big|_{-k}^k \cdot \hat{k} \quad (3.13)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{(y_1 - k\sqrt{3})}{[(y_1 - k\sqrt{3})^2 + z_1^2]} \cdot \left[ \frac{x_1 - k}{\sqrt{((x_1 - k)^2 + (y_1 - k\sqrt{3})^2 + z_1^2)}} - \frac{x_1 + k}{\sqrt{((x_1 + k)^2 + (y_1 - k\sqrt{3})^2 + z_1^2)}} \right] \cdot \hat{k} \quad (3.14)$$

Sonuç olarak manyetik alan denklemimiz

$$\vec{B}(k, k\sqrt{3}, 0) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{(k\sqrt{3} - y_1)}{[(k\sqrt{3} - y_1)^2 + z_1^2]} \cdot \left[ \frac{k - x_1}{\sqrt{((k - x_1)^2 + (k\sqrt{3} - y_1)^2 + z_1^2)}} + \frac{k + x_1}{\sqrt{((k + x_1)^2 + (k\sqrt{3} - y_1)^2 + z_1^2)}} \right] \cdot \hat{k} \quad (3.15)$$



Şekil 3.2. Dikdörtgen alanlara bölünmüş altıgen sargı yapısının gösterimi

Bir yüzey alanından geçen toplam akı denklemi

$$\varphi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3.16)$$

Bu yüzeye ait birim yüzey alan vektörü

$$d\vec{s} = dx_1 \cdot dy_1 \cdot \hat{k} \quad (3.17)$$

$$\varphi = \int B \cdot \hat{k} \cdot dx_1 \cdot dy_1 \cdot \hat{k} \quad (3.18)$$

$$\varphi = \int B \cdot d\vec{s} \quad (3.19)$$

$$\varphi = \iint B \cdot dx_1 \cdot dy_1 \quad (3.20)$$

Bu çıkarımdan yola çıkarak, AB uzunluğunun 1'den 5 numaralı bölgeye kadar olan alanların toplanması ile sekonder sargı içerisinde kalan toplam akı miktarı hesaplanabilir. AB iletken parçasının 2,3 ve 4,5 alanlarında oluşturduğu toplam akı miktarı birbirine eşittir. Bu nedenle 1,2 ve 4 numaralı alanların toplamı bulunarak ortak endüktans hesabı yapılabilir. Oluşan ikizkenar üçgenin yüksekliği eş parçalara bölünür ve bunların toplam sayısı n olursa, bir üçgen i adet dikdörtgene bölünmüş olur. Bu durumda i birden başlayıp n-i'ye kadar olan dikdörtgenlerin alanları toplamı bize üçgen bölgenin yaklaşık alanını vermektedir. Böylece genel akı denklemimiz ve integral sınırları aşağıdaki gibi olur.

$$\varphi = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)} \int_{m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)}^{m\left(\frac{n+i}{n}\right)} \frac{(k\sqrt{3}-y_1)}{[(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2]} \left[ \frac{k+x_1}{\sqrt{((k+x_1)^2+(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2)}} + \frac{k-x_1}{\sqrt{((k-x_1)^2+(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2)}} \right] dx_1 \cdot dy_1 \quad (3.21)$$

Değişken değiştirme uygulanarak integral alınacak olursa

$$U = ((k+x_1)^2 + (k\sqrt{3}-y_1)^2 + z_1^2) \quad (3.22)$$

$$2(k+x_1) \cdot dx_1 = dU \quad (3.23)$$

$$T = ((k-x_1)^2 + (k\sqrt{3}-y_1)^2 + z_1^2) \quad (3.24)$$

$$-2(k-x_1) \cdot dx_1 = dT \quad (3.25)$$

$$\varphi_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)} \frac{(k\sqrt{3}-y_1)}{[(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2]} \left[ \int \frac{1}{2\sqrt{U}} \cdot dU - \int \frac{1}{2\sqrt{T}} \cdot dT \right] \cdot dy_1 \quad (3.26)$$

$$\varphi_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{(k\sqrt{3}-y_1)}{[(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2]} \cdot (\sqrt{U} - \sqrt{T}) \Big|_{m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)}^{m\left(\frac{n+i}{n}\right)} \cdot dy_1 \quad (3.27)$$

$$\varphi_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{(k\sqrt{3}-y_1)}{[(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2]} \cdot \left[ \sqrt{((k+x_1)^2+(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2)} - \sqrt{((k-x_1)^2+(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2)} \right] \Big|_{m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)}^{m\left(\frac{n+i}{n}\right)} \cdot dy_1 \quad (3.28)$$

$$\varphi_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)} \frac{(k\sqrt{3}-y_1)}{[(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2]} \left[ \sqrt{\left(k+m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2+(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2} - \sqrt{\left(k-m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2+(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2} \right. \\ \left. - \sqrt{\left(k+m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2+(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2} + \sqrt{\left(k-m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2+(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2} \right] \cdot dy_1 \quad (3.29)$$

$k\sqrt{3}-y_1 = A$  eşitliği ile değişken değiştirme uygulanır ve aynı zamanda sınır şartları da değişir. Her iki tarafın türevi alınırsa,  $-dy_1 = dA$  olur.

$$\int \frac{A}{A^2+Z^2} \sqrt{A^2+Z^2+M^2} dA = \sqrt{A^2+Z^2+M^2} - M \arctan h \frac{M}{\sqrt{A^2+Z^2+M^2}} \quad (3.30)$$

Yeni sınır şartlarımız,

$k\sqrt{3}$  ve  $k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)$  olur.

$\varphi_{AB}$  integrali farklı üçgen alanlarının hesaplanabilmesi için gerekli sınır şartları yazıldıktan sonra dört parçaya ayırarak çözebilir. Bu kısımlar  $S_1, S_2, S_3$  ve  $S_4$  olarak isimlendirilirse,

$$\varphi_{AB, \text{Üçgen}_1} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (S_1 - S_2 - S_3 + S_4) \text{ ilk üçgenin denklemini elde edilir.}$$



$$\varphi_{AB,S_1} = \sqrt{A^2 + Z^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2} - \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right) \arctan h \frac{\left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)}{\sqrt{A^2 + Z^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2}} \quad (3.31)$$

$$S_1 = \left[ \sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2} - \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right) \arctan h \frac{\left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)}{\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2}} \right. \\ \left. - \sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2} + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right) \arctan h \frac{\left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2}} \right] \quad (3.32)$$

$$S_2 = \left[ \sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2} - \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right) \arctan h \frac{\left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)}{\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2}} \right. \\ \left. - \sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2} + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right) \arctan h \frac{\left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2}} \right] \quad (3.33)$$

$$S_3 = \left[ \sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)^2} - \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right) \arctan h \frac{\left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)}{\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)^2}} \right. \\ \left. - \sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)^2} + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right) \arctan h \frac{\left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)^2}} \right] \quad (3.34)$$

$$S_4 = \left[ \sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2} - \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right) \arctan h \frac{\left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)}{\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2}} \right. \\ \left. - \sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2} + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right) \arctan h \frac{\left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2}} \right] \quad (3.35)$$

Altta kalan Üçgenin alanın hesabı için ise;

$$S_1 = \left[ \sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2} - \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right) \arctan h \frac{\left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2}} \right]$$

$$\left. -\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2} + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right) \arctan h \frac{\left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)}{\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i}{n}\right) + k\right)^2}} \right] \quad (3.36)$$

$$S_2' = \left[ \sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2} - \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right) \arctan h \frac{\left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2}} \right. \\ \left. -\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2} + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right) \arctan h \frac{\left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)}{\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i}{n}\right)\right)^2}} \right] \quad (3.37)$$

$$S_3' = \left[ \sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)^2} - \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right) \arctan h \frac{\left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)^2}} \right. \\ \left. -\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)^2} + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right) \arctan h \frac{\left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)}{\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(m\left(\frac{n+i-1}{n}\right) + k\right)^2}} \right] \quad (3.38)$$

$$S_4' = \left[ \sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2} - \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right) \arctan h \frac{\left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)\right)^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2}} \right. \\ \left. -\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2} + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right) \arctan h \frac{\left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)}{\sqrt{3k^2 + z_1^2 + \left(k - m\left(\frac{n+i-1}{n}\right)\right)^2}} \right] \quad (3.39)$$

$\varphi_{AB, \text{Üçgen}_2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (S_1' - S_2' - S_3' + S_4')$  denklemi ile elde edilir.

Büyük dikdörtgenin, yani 1 numaralı alanın hesabı ise,

$$\varphi_{AB, D_5} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ \sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\right)^2 + Z^2 + (m+k)^2} - (m+k) \cdot \arctan h \frac{(m+k)}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\right)^2 + Z^2 + ((m+k))^2}} \right. \\ \left. -\sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\right)^2 + Z^2 + (-m+k)^2} + (-m+k) \cdot \arctan h \frac{-m+k}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} - m\sqrt{3}\right)^2 + Z^2 + (-m+k)^2}} \right. \\ \left. -\sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\right)^2 + Z^2 + (m+k)^2} + (m+k) \cdot \arctan h \frac{m+k}{\sqrt{\left(k\sqrt{3} + m\sqrt{3}\right)^2 + Z^2 + (m+k)^2}} \right]$$

$$\left. + \sqrt{(k\sqrt{3} + m\sqrt{3})^2 + Z^2 + (-m+k)^2} - (-m+k) \cdot \arctan h \frac{-m+k}{\sqrt{(k\sqrt{3} + m\sqrt{3})^2 + Z^2 + (-m+k)^2}} \right] \quad (3.40)$$

denklemleri ile hesaplanabilir.

Bir kenarın oluşturduğu toplam akı denklemi,

$$\varphi_{AB} = (2\varphi_{AB,Üçgen_1} + 2\varphi_{AB,Üçgen_2} + \varphi_{AB,D_5}) \quad (3.41)$$

Altıgenin her bir kenarının eşit olması nedeniyle, toplam akı miktarı  $6 \varphi_{AB}$  kadar olur.

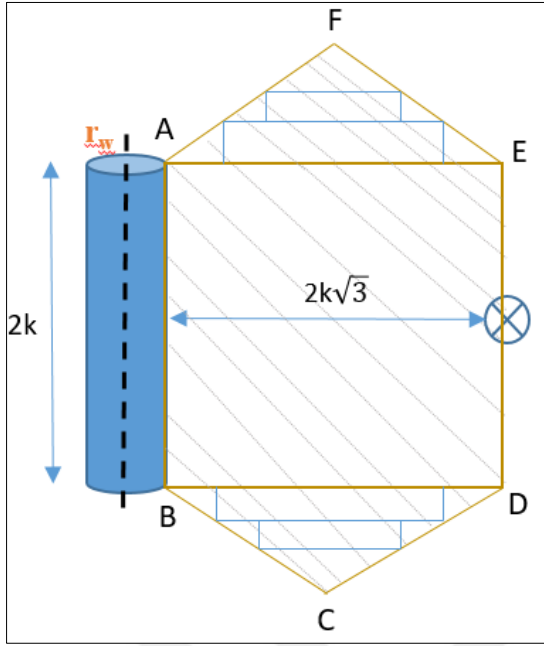
$N_1$  ve  $N_2$  sarım sayılarına sahip ve birbirinden  $z$  kadar uzakta olan iki altıgen sargının ortak endüktans formülü,

$$M = \frac{6N_1N_2 (2\varphi_{AB,Üçgen_1} + 2\varphi_{AB,Üçgen_2} + \varphi_{AB,D_5})}{I} \quad (3.42)$$

olarak elde edilir.

### 3.2. Öz Endüktans Hesabı

Altıgen sargı yapısının öz endüktans değerinin hesaplanması için ortak endüktans hesaplamalarında kullanılan çözüm yöntemi kullanılmış ancak denklemler Kartezyen koordinat sistemi yerine silindirik koordinat sisteminde yazılmıştır. Altıgen, iki adet üçgen ve bir adet büyük dikdörtgen olmak üzere toplam 3 alana ayrılarak çözüm gerçekleştirilmiştir. Üçgen alanların çözümünün kolaylaştırılması için üçgenler dikdörtgenlere ayrılmıştır. Şekil 3.3'te bir kenar uzunluğu  $2k$  ve iletken yarıçapı  $r_w$  olan altıgen sargı yapısı gösterilmektedir. AB iletkeninin altıgenin tüm bölgelerinde oluşturduğu toplam akı miktarı hesaplanarak öz endüktans değeri elde edilir.



Şekil 3.3. Öz endüktans hesabı için altıgen sargı yapısının gösterimi

$$d\vec{l} = dz \cdot \hat{k} \quad (3.43)$$

$$\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2 \quad (3.44)$$

$$\vec{r}_1 = z \cdot \hat{k} \quad (3.45)$$

$$\vec{r}_2 = r \cdot \hat{r} \quad (3.46)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{(dz \cdot \hat{k}) \times (z \cdot \hat{k} + r \cdot \hat{r})}{(z^2 + r^2)^{3/2}}$$

(3.47)

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{r \cdot dz \cdot \hat{\phi}}{(z^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot r \cdot \frac{z}{r^2 \sqrt{z^2 + r^2}} \Big|_{z-k}^{z+k} \quad (3.48)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{1}{r} \cdot \left[ \frac{z+k}{\sqrt{(z+k)^2 + r^2}} - \frac{z-k}{\sqrt{(z-k)^2 + r^2}} \right] \cdot \hat{\phi} \quad (3.49)$$

Taralı yüzey alan vektörü  $dz \cdot dr \cdot \Phi$  olur. Manyetik akı denklemi ise aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\varphi_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\frac{k\sqrt{3i}}{n}}^{\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}} \int_{\frac{k(n+i-1)}{n}}^{\frac{k(n+i-1)}{n}} B \cdot dz \cdot dr = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\frac{k\sqrt{3i}}{n}}^{\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}} \int_{\frac{k(n+i-1)}{n}}^{\frac{k(n+i-1)}{n}} \frac{z+k}{\sqrt{(z+k)^2 + r^2}} - \frac{z-k}{\sqrt{(z-k)^2 + r^2}} \cdot dz \cdot dr \quad (3.50)$$

$$\varphi_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{1}{r} \cdot \left[ \sqrt{(z+k)^2 + r^2} - \sqrt{(z-k)^2 + r^2} \right] \Big|_{\frac{k(n+i-1)}{n}}^{\frac{k(n+i-1)}{n}} \cdot dr \quad (3.51)$$

$$\varphi_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\frac{k\sqrt{3i}}{n}}^{\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}} \frac{1}{r} \cdot \left[ \sqrt{\left(\frac{k(2n+i)}{n}\right)^2 + r^2} - \sqrt{\left(\frac{ki}{n}\right)^2 + r^2} - \sqrt{\left(\frac{k(2n+i-1)}{n}\right)^2 + r^2} + \sqrt{\left(\frac{k(i-1)}{n}\right)^2 + r^2} \right] \cdot dr \quad (3.52)$$

Elde ettiğimiz bu denklemin çözülebilmesi için dört ayrı parçaya ayırarak integrali alınır ve sonuç akı denklemimiz aşağıdaki gibi olur.

$$\varphi_{AB, \text{Üçgen}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (D_1 - D_2 - D_3 + D_4) \quad (3.53)$$

$$D_1 = \sqrt{\left(\frac{k(2n+i)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}\right)^2} - k \left(\frac{2n+i}{n}\right) \ln \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{k(2n+i)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}\right)^2} + \left(\frac{k(2n+i)}{n}\right)}{\left(\frac{k(2n+i)}{n}\right)} \right] - \sqrt{\left(\frac{k(2n+i)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3i}}{n}\right)^2} + k \left(\frac{2n+i}{n}\right) \ln \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{k(2n+i)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3i}}{n}\right)^2} + \left(\frac{k(2n+i)}{n}\right)}{\left(\frac{k(2n+i)}{n}\right)} \right] \quad (3.54)$$

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{ki}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}\right)^2} - \frac{ki}{n} \ln \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{ki}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}\right)^2} + \frac{ki}{n}}{\frac{ki}{n}} \right] - \sqrt{\left(\frac{ki}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3i}}{n}\right)^2} + \frac{ki}{n} \ln \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{ki}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3i}}{n}\right)^2} + \frac{ki}{n}}{\frac{ki}{n}} \right] \quad (3.55)$$

$$D_3 = \sqrt{\left(\frac{k(2n+i-1)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}\right)^2} - k \left(\frac{2n+i-1}{n}\right) \ln \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{k(2n+i-1)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}\right)^2} + \left(\frac{k(2n+i-1)}{n}\right)}{\left(\frac{k(2n+i-1)}{n}\right)} \right]$$

$$-\sqrt{\left(\frac{k(2n+i-1)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}i}{n}\right)^2} + k\left(\frac{2n+i-1}{n}\right) \ln \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{k(2n+i-1)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}i}{n}\right)^2} + \left(\frac{k(2n+i-1)}{n}\right)}{\left(\frac{k(2n+i-1)}{n}\right)} \right] \quad (3.56)$$

$$D_4 = \sqrt{\left(\frac{k(i-1)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}\right)^2} - \frac{k(i-1)}{n} \ln \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{k(i-1)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}(2n-i)}{n}\right)^2} + \frac{k(i-1)}{n}}{\frac{k(i-1)}{n}} \right] \quad (3.57)$$

$$-\sqrt{\left(\frac{k(i-1)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}i}{n}\right)^2} + \frac{k(i-1)}{n} \ln \left[ \frac{\sqrt{\left(\frac{k(i-1)}{n}\right)^2 + \left(\frac{k\sqrt{3}i}{n}\right)^2} + \frac{k(i-1)}{n}}{\frac{k(i-1)}{n}} \right]$$

Altıgen alanı içerisinde toplam iki adet simetrik üçgen alanı olduğundan dolayı AB uzunluğunun bir üçgen için oluşturduğu toplam akı miktarının iki katı üçgen alanlarının toplamına eşit olur. Böylece üçgen alanlarının toplam akı miktarı denklemi,

$$\varphi_{T,AB,\text{Üçgen}} = 2 \frac{\mu_0 I}{4\pi} (D_1 - D_2 - D_3 + D_4) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} (D_1 - D_2 - D_3 + D_4) \quad (3.58)$$

Son olarak büyük dikdörtgen alanın hesaplanması gerekmektedir. Benzer yaklaşımla toplam akı denklemi  $\varphi$ , integral sınırları yeniden belirlenerek yazılacak olursa,

$$\varphi_{AB,\text{Dikdörtgen}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{r_w}^{2k\sqrt{3}-r_w} \int_{-k}^k B \cdot dz \cdot dr \hat{\phi} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{r_w}^{2k\sqrt{3}-r_w} \frac{1}{r} \cdot \left[ \int_{-k}^k \frac{z+k}{\sqrt{(z+k)^2 + r^2}} \cdot dz - \int_{-k}^k \frac{z-k}{\sqrt{(z-k)^2 + r^2}} \cdot dz \right] \cdot dr \quad (3.59)$$

$$\varphi_{AB,\text{Dikdörtgen}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{r_w}^{2k\sqrt{3}-r_w} \frac{1}{r} \left[ \sqrt{(z+k)^2 + r^2} - \sqrt{(z-k)^2 + r^2} \right] \Big|_{-k}^k = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{r_w}^{2k\sqrt{3}-r_w} \frac{1}{r} \left[ \sqrt{(4k)^2 + r^2} - r \right] \cdot dr$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ 2k \ln \left( \frac{(2k + \sqrt{4k^2 + r_w^2})(2k\sqrt{3} - r_w)}{r_w (2k + \sqrt{4k^2 + (2k\sqrt{3} - r_w)^2})} \right) + \sqrt{4k^2 + (2k\sqrt{3} - r_w)^2} - \sqrt{4k^2 + r_w^2} - 2k\sqrt{3} + 2r_w \right] \quad (3.60)$$

Tüm alanlar hesaplandıktan sonra altıgen yapı içerisinde oluşan toplam akı miktarı denklemi,

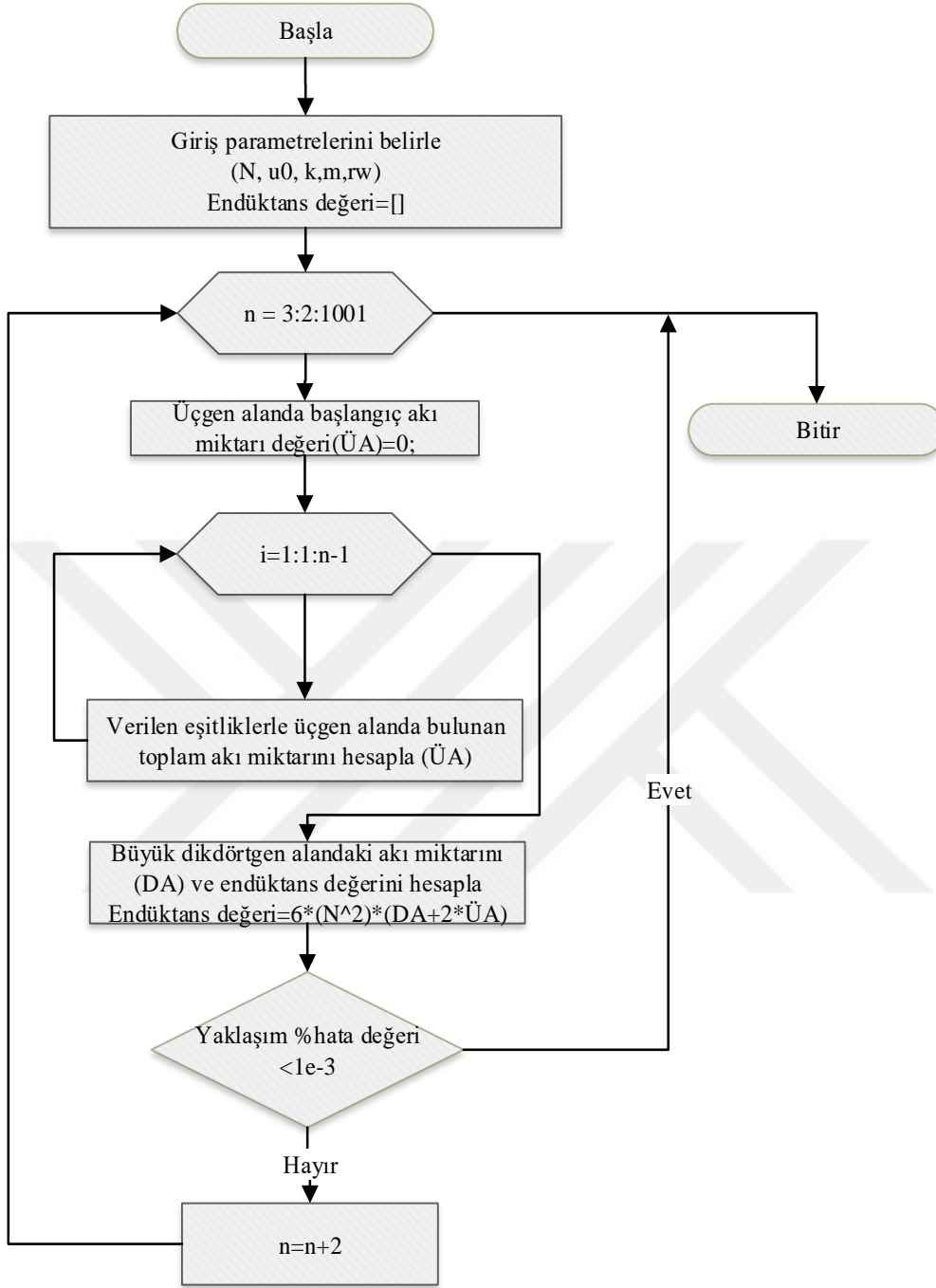
$$\varphi_{AB,\text{öçendük tan s}} = 6 \left( 2\varphi_{AB,\text{Üçgen}} + \varphi_{AB,\text{Dikdörtgen}} \right) \quad (3.61)$$

Olarak elde edilir. Bu denklem kullanılarak  $N$  sarımlı ve  $I$  akımının geçtiği bir altıgen sargı yapısının öz endüktans değeri,

$$L_{altıgen} = \frac{6N^2 (2\varphi_{AB,Üçgen} + \varphi_{AB,Dikdörtgen})}{I} \quad (3.62)$$

Denklemleri ile bulunabilir.

Altıgen yapının Şekil 21’de gösterildiği gibi alanlara bölünmesi ile ortaya çıkan üçgen alanı hesaplayabilmek için dikdörtgenlere bölmüştük. Ancak dikdörtgenlere bölünmesi ile kenar kısımlarda ortaya çıkan ve hesaplamalarda ihmal edilen küçük üçgen alanlar oluşmaktadır. Daha doğru bir endüktans hesabı yapabilmek için, üçgen alanları oluşturan dikdörtgenlerin sayısının artırılmasıyla ihmal edilen alanlar azaltılabilmektedir. Bu amaçla, Şekil 3.4’te gösterilen akış şeması oluşturulmuş ve bu akış şeması Matlab ortamında koda dönüştürülerek koşturulmuştur. Akış şemasında, öncelikle giriş parametreleri olan sarım sayısı ( $N$ ), havanın bağıl manyetik geçirgenlik değeri ( $\mu_0$ ), primer ve sekonder sargıların bir kenar uzunluklarının yarısı ( $k, m$ ) ve iletken yarıçapı  $r_w$  girilir. İkizkenar üçgene ait yükseklik  $n$  kadar bölünerek  $i$  adet dikdörtgen oluşur. İlk iterasyonda  $n=3$ ,  $i=1$  ve  $i=2$  değerleri için akı hesabı yapılır ve büyük dikdörtgen olan 1 numaralı alan ile toplanarak ilk endüktans değeri elde edilir. İkinci iterasyon da  $n=5$  ve  $i=n-1$  değerine kadar artırılarak üçgen alanlar için yeni akı miktarı bulunarak 1 numaralı alan ile toplanır ve yeni endüktans değeri elde edilir. Bu şekilde iterasyon devam eder ve son bulunan endüktans değeri bir öncekinden çıkarılarak yüzde hatasına bakılır ve %0.001 yaklaşım hata oranına azaltılana kadar işleme devam edilir. Belirlenen hata oranına ulaşıldığında yeteri kadar alan bölme işlemi gerçekleştirilmiş olup en az hata ile endüktans hesabına yaklaşılmış olur.



Şekil 3.4. Endüktans hesabı akış şeması

### 3.3. Endüktans Hesaplamalarının Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması

Bu bölümde geliştirilen yaklaşım metodunun sonuçları literatürde kabul edilmiş ve sıklıkla kullanılan farklı yöntemlerle karşılaştırılmıştır ve hesaplama yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen nümerik yaklaşım, hem öz hem de ortak endüktansın belirlenmesinde kullanılabilir. Altıgen sargı yapısı daha çok petek



sargı yapısının özellikle alandan kazanım avantajından dolayı küçük güçlü uygulamalarda kullanılmıştır (Jow ve Ghovanloo, 2013). Altıgen yapının ortak endüktans denklemlerinin elde edilmesine yönelik yapılan çalışmada altıgen yapı, üçgenlere ve dikdörtgen alana bölünerek hesaplanmıştır (Tavakkoli ve diğerleri, 2016). Ancak üçgen alanların integrallerinin doğrudan alınması nedeniyle karmaşık integral çözümleri ve birçok katsayı kullanımı gerekli olmuştur. Altıgen sargı yapısının hizalanmaya karşılık ortak endüktans formüllerinin elde edilmesine yönelik diğer bir çalışmada Biot Savart yöntemi ile denklem takımları elde edilmiş ancak çözüm detayları ve öz endüktans hesabına yönelik bir çalışma içermemektedir (Tan ve diğerleri, 2018). Öz endüktans hesaplamalarında kare, dairesel, altıgen ve sekizgen yapıdaki sargıların öz endüktanslarının hesaplamasında önerilen üç basit yaklaşım aşağıda verilmiştir (Mohan ve diğerleri, 1999). Mohan ve arkadaşları eşitlik (38)'te Wheeler'in öz endüktans formülünü düzenleyerek daha doğru sonuçlar elde etmeyi amaçlamışlardır. Burada  $\rho$  doluluk oranı,  $n$  sarım sayısını ve  $d_{avg}$  ortalama çapı simgelemektedir. Bir diğer basit yaklaşımda ise; polygonal bir sargıda spiral sargının her bir kenarı, aynı akım yoğunluğunda tek bir akım levhası olarak düşünülür. Birbirine dik olan akım levhalarının ortak endüktansları sıfırdır. Yani toplam endüktans, öz endüktans ve birbirine paralel veya belirli açıyla gelen akım levhalarının ortak endüktansları olur. Öz ve ortak endüktanslar da Geometrik Ortalama Fark (GMD), Aritmetik Ortalama Fark (AMD) ve Aritmetik Ortalama Karesel Fark (AMSD) ile belirlenir. Eşitlik (15)'te verilen denklemin doğruluğu spiral sarımlar arasındaki mesafe ( $s$ ) ve iletkenlerin kalınlığına ( $w$ ) bağlıdır. Ancak pratikte sarımlar arasındaki mesafe çok küçük olduğundan denklem oldukça yakın doğrulukta çalışmaktadır. Eşitlik (40)'da verilen denklem ise veri uydurma tekniği kullanılarak geliştirilmiştir ve mevcut veri kütüphanesi kullanarak çözüme gittiğinden yeni tasarımlar için doğru sonuçlar vermeyebilir.

$$L_{mw} = K_1 \mu_0 \frac{n^2 d_{avg}}{1 + K_2 \rho} \quad (3.63)$$

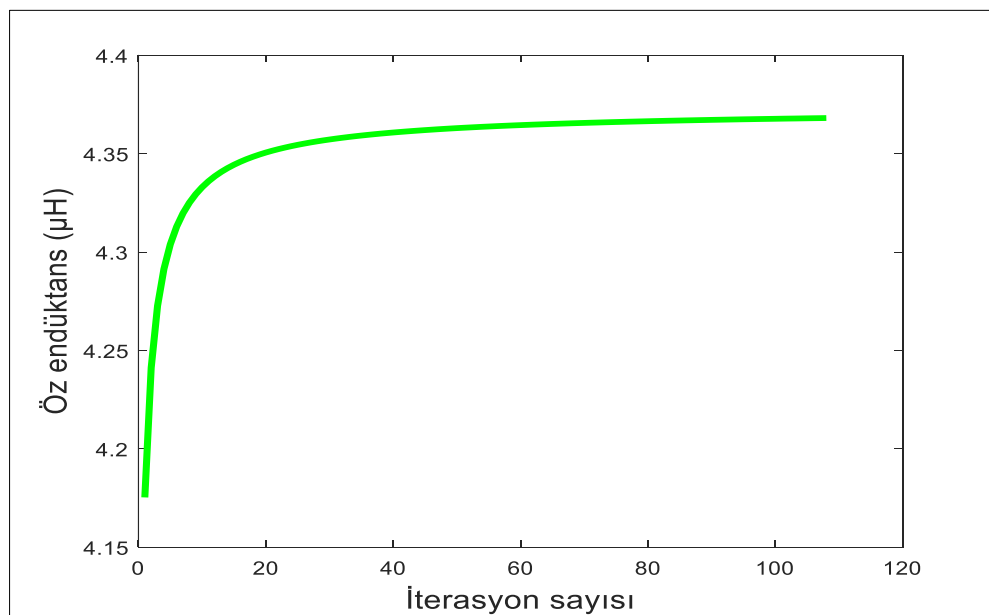
$$L_{gmd} = \frac{\mu n^2 d_{avg} c_1}{2} \left( \ln(c_2 / \rho) + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right) \quad (3.64)$$

$$L_{mon} = \beta d_{out}^{\alpha_1} w^{\alpha_2} d_{avg}^{\alpha_3} n^{\alpha_4} s^{\alpha_5} \quad (3.65)$$

Bu tez kapsamında önerilen yeni nümerik hesaplama yönteminin doğruluğunun tespit edilmesi için, öz ve ortak endüktans hesaplama sonuçları literatür de kabul görmüş hesaplama yöntemleri ve laboratuvar ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Öncelikle öz endüktans değerinin hesaplanması ve karşılaştırılması için primer ve sekonder sargılar eş boyut ve sarım sayısına sahip olacak şekilde,  $1.78 \text{ mm}^2$  kesitli litz telinden 3 sarım olarak sarılmıştır. Ayrıca, farklı sargı boyutları için önerilen nümerik yöntemin doğruluğunun test edilebilmesi için dış kenar uzunlukları 10 cm ve 20 cm olan altıgen sargılar için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hesaplanan değerler ve karşılaştırma sonuçları Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Önerilen yöntemin diğer yöntemler ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması

Yöntem (Dış kenar uzunluğu)	Öz Endüktans Değeri ( $\mu\text{H}$ )	
	( $2k_{dış}=10 \text{ cm}$ )	( $2k_{dış}=20 \text{ cm}$ )
Data Fitted Monomial Exp.	4,93	12,01
Current Sheet Exp.	4,47	10,57
Modified Wheeler Exp.	3,98	8,51
Önerilen Yöntem	4,37	10,37
Ölçüm	4,64	10,67

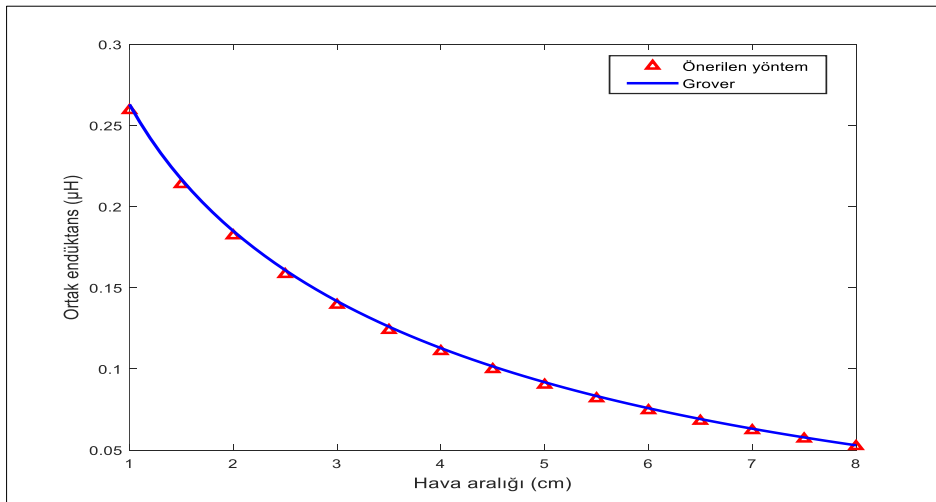


Şekil 3.5. Öz endüktans değerinin iterasyon sayısı ile değişimi

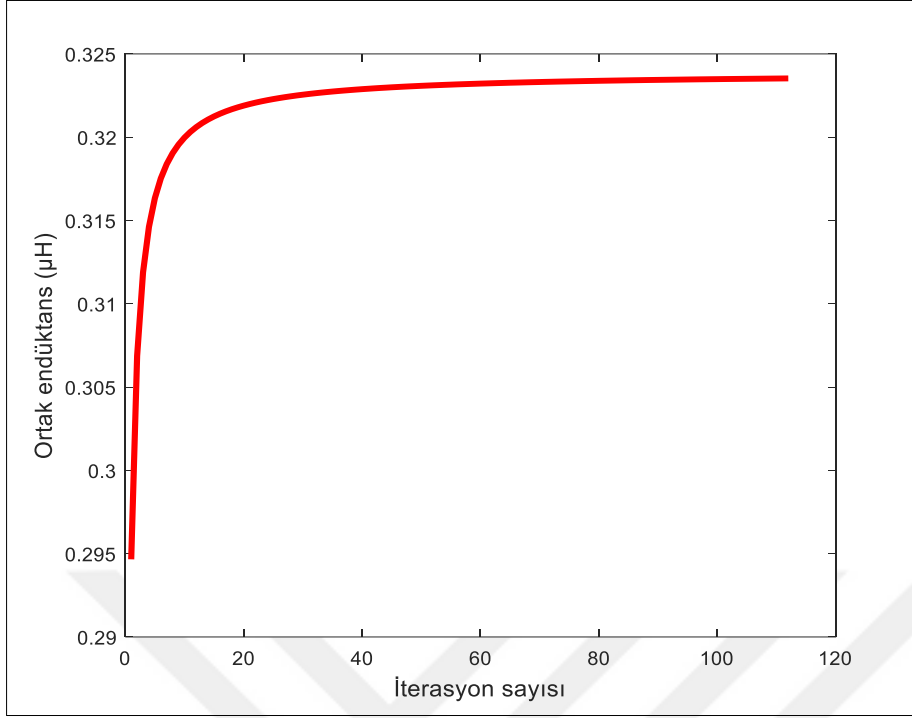
Dış kenar uzunluğu 10 cm olan altıgen sargının öz endüktans değeri, yaklaşım hata oranının %0,001 olması için 108 iterasyon sonucunda elde edilmiştir ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Grover'ın radyo devreleri için özdeş çokgen sargıların ortak endüktans hesabı için önerdiği analitik formül ve tablolar günümüzde önemini korumaktadır. Geometrik ve aritmetik ortalama farklar kullanılarak geliştirilen bu ayrıntılı formüller, primer ve sekonder sargı boyutlarının eşit olmadığı ve geniş hava aralıklarının olduğu çokgen sargıların endüktansının hesaplamasında kompleks denklem ve katsayıların kullanımına ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, farklı çokgenler için farklı formüllerin uygulanması gerekmektedir. Eşitlik (17)'de Grover'ın özdeş altıgen şeklindeki iki sargının ortak endüktans hesabı için formülü görülmektedir. Burada  $s$  ve  $d$  sırasıyla santimetre cinsinden kenar uzunluğu ve sargılar arasındaki uzaklığı simgelemektedir (Grover, 1922).

$$M = 0.012s \left[ \log\left(\frac{s}{d}\right) - 0.151524 + \frac{d}{s} \left(1 - \frac{\pi\sqrt{3}}{9}\right) + \frac{d^2}{s^2} \left(\frac{2\sqrt{3}-3}{4}\right) - \frac{d^4}{s^4} \left(\frac{33\sqrt{3}-46}{216} + \dots\right) \right] \quad (3.66)$$

Grover yöntemi özdeş sargılar arasındaki ortak endüktansın hesabında kullanıldığından, önerilen nümerik yöntem, aralarında 2cm'den 10 cm'ye kadar değişen mesafeler bulunan ve dış kenar uzunluğu 20 cm olan özdeş boyutlardaki iki altıgen sargı için uygulanmıştır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi Grover ve önerilen yöntem sonuçları oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca 10 cm hava aralığına sahip ve dış kenar uzunlukları 10 cm olan altıgen sargılar arasındaki ortak endüktans hesaplamasında belirlenen hata oranına 112 iterasyon neticesinde ulaşılmıştır ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



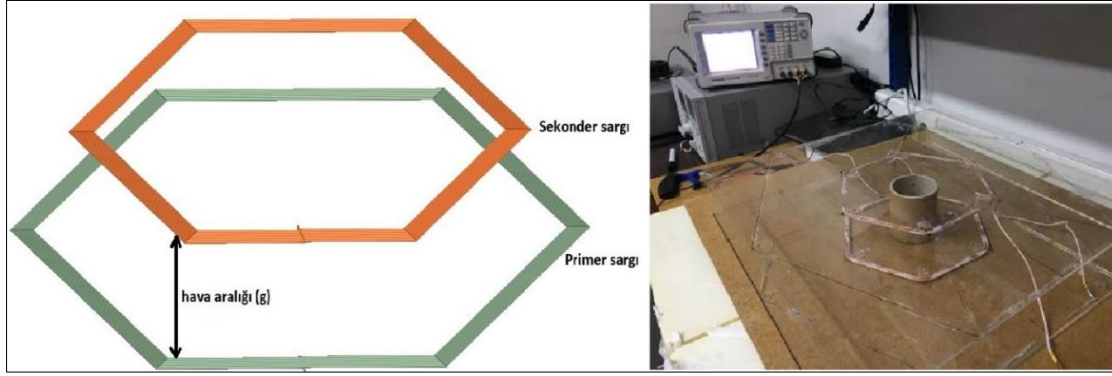
Şekil 3.6. Ortak endüktans değerinin Grover yöntemi ile karşılaştırılması



Şekil 3.7. Ortak endüktans değerinin iterasyon sayısı ile değişimi

### 3.4. Endüktans Hesaplamalarının Ölçüm ve Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması

Endüktans hesaplamalarında kullanılan benzer yöntemlerle, bu tez kapsamında önerilen nümerik hesaplama yönteminin karşılaştırılması ile doğru sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir. Bu bölümde nümerik hesaplama yönteminin sonuçları SEA ve üretilen sargıların endüktans değerlerine ait ölçümlerle karşılaştırılması verilmiştir. Bu amaçla 10 cm ve 20 cm dış kenar uzunluğuna sahip sargılar  $1.78 \text{ mm}^2$  iletken kesitli litz teli kullanılarak üretilmiştir. Primer ve sekonder sargılar özdeş olup sarım sayısı  $N=3$ 'tür. Üretilen ve ANSYS Maxwell programı ile üç boyutlu çizimleri yapılarak analizleri yapılan sargılara ait görsel Şekil 3.8'de verilmiştir. Çizelge 3.2, farklı boyutlardaki sargıların LCR metre kullanılarak ölçülen ve SEA yöntemiyle elde edilen öz endüktans değerlerinin önerilen nümerik yöntem sonuçlarıyla karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 3.8. Üretilen ve üç boyutlu SEA modelleri oluşturulan sargılar

Çizelge 3.2. Öz endüktans değerlerinin önerilen yöntemle elde edilen sonuçlarının SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması

Yöntem (Dış kenar uzunluğu)	Öz Endüktans Değeri ( $\mu\text{H}$ )	
	( $2k_{dış}=10\text{ cm}$ )	( $2k_{dış}=20\text{ cm}$ )
Ölçüm	4,64	10,67
SEA	4,51	10,54
Önerilen Yöntem	4,37	10,37
Hata (%)	5,8	2,8

Çizelge 3.2’de elde edilen sonuçlar incelendiğinde verilen boyutlarda sargı yapılarının öz endüktans değerlerinin FEA ile hesaplanabilmesi için uzun süreler gerekirken, önerilen yaklaşımımızda sırasıyla %2,8 ve %5,8 gibi küçük hata oranları ile öz endüktans değerleri hesaplanabilmektedir. Bu sonuçlar ve bölüm 3.3’te diğer çalışmalar ile karşılaştırılmalar da göz önünde bulundurulduğunda küçük hata oranları ile hesaplamalara ulaşabilmesi ve kullanılan denklemlerin basit çözümlere sahip olması nedeniyle önerilen yaklaşımın literatür de önemli bir yere sahip olacağı düşünülmektedir. Aynı yaklaşımla elde edilen ortak endüktans denklemlerinin doğrulanabilmesi amacıyla özdeş sargılar arasındaki mesafe 2 cm’den 12 cm’ye kadar değiştirilerek ölçümleri alınmış, SEA sonuçları ve önerilen yaklaşım sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca her bir uzaklık için önceden belirlenmiş hata oranında sonuçların elde edilmesi için gerekli iterasyon sayıları da bu karşılaştırmalar ile birlikte Çizelge 3.3 ve 3.4’te verilmiştir. Yüzde hata değeri yaklaşım sonuçlarının gerçek ölçümler ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen sonuçları göstermektedir.

Çizelge 3.3. Öz endüktans değerlerinin önerilen yöntemle elde edilen sonuçlarının SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması ( $2k_{dış}=10$  cm)

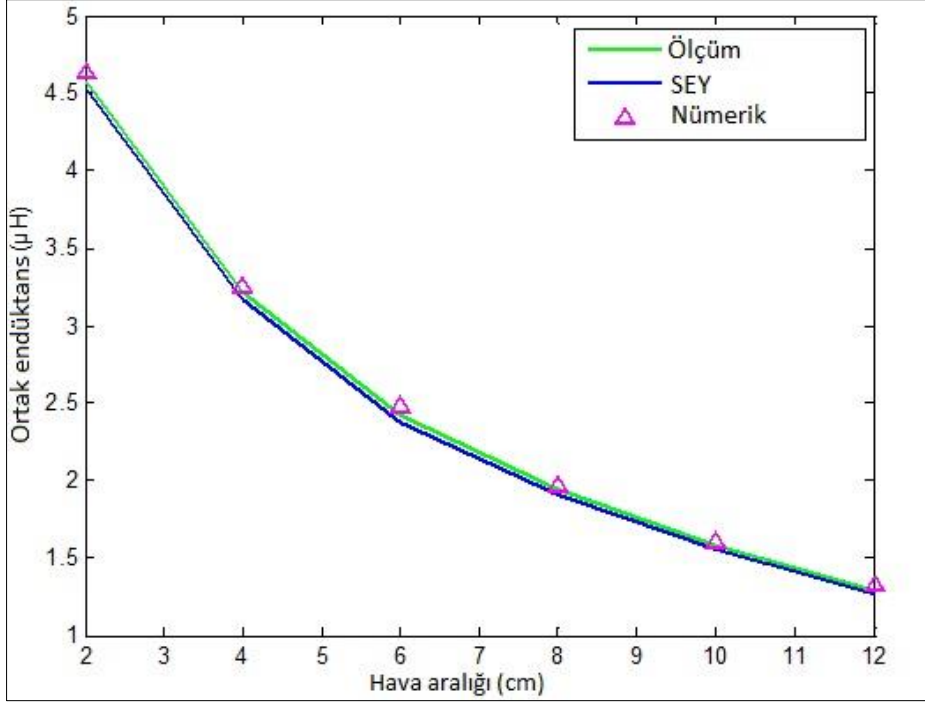
Hava Aralığı (cm)	Ortak Endüktans Değeri ( $\mu$ H)			İterasyon Sayısı	Hata (%)
	Ölçüm	SEA	Nümerik		
2	1.55	1.53	1.58	94	1.9
4	0.94	0.93	0.96	100	2.08
6	0.62	0.61	0.64	104	3.22
8	0.42	0.41	0.44	108	4.76
10	0.3	0.29	0.32	112	6.67
12	0.21	0.2	0.23	114	9.5

Çizelge 3.4. Öz endüktans değerlerinin önerilen yöntemle elde edilen sonuçlarının SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması ( $2k_{dış}=20$  cm)

Hava Aralığı (cm)	Ortak Endüktans Değeri ( $\mu$ H)			İterasyon Sayısı	Hata (%)
	Ölçüm	SEA	Nümerik		
2	4.61	4.6	4.63	91	3.50
4	3.22	3.2	3.25	94	3.63
6	2.42	2.41	2.48	97	4.13
8	1.93	1.89	1.97	100	5.31
10	1.54	1.51	1.6	102	5.84
12	1.27	1.25	1.32	104	6.29

Çizelge 3.3 ve 3.4'te elde edilen sonuçlar incelendiğinde yeni yaklaşımla elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçları ile önemli oranda örtüşmektedir. Elektrikli araç uygulamalarında genellikle hava aralığının 10 cm olduğu düşünülecek olursa, bu hava aralığında kenar uzunluğu 20 cm olan altıgen sargı için hesaplanan ortak endüktans değerinin ölçüm değerine oranla hatası % 5.84'tür. İterasyon sayıları incelendiğinde ise küçük boyutlu sargılarda aynı hata oranının elde edilebilmesi için daha yüksek iterasyon sayılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun nedeni ise ihmal edilen alan değerinin toplam alana olan oranının bu durumlarda çok daha önemli bir değere sahip olmasıdır. Sargılar arasındaki mesafe arttıkça hata oranının artması ise mesafe ile kaçak akı miktarının da artması gösterilebilir. Şekil 3.9'da ise bir kenarı 20 cm olan altıgen sargının ölçülen, SEA ve yeni yaklaşımın

sonuçlarının değişen mesafeler için grafiksel olarak karşılaştırılması verilmiştir. Ölçüm koşullarının mükemmel olamaması, sarım sayısının birden fazla olması ve konnektörlerden kaynaklanan parazitik hatalar göz önünde bulundurulduğunda yeni yaklaşım yöntemi ile küçük hatalar ile sonuç elde edilebilmektedir.



Şekil 3.9. Üretilen ve üç boyutlu SEA modelleri oluşturulan sargılar

### Bölüm Değerlendirmesi

İstenilen güç değerindeki bir KGA sisteminin tasarlanabilmesi için temel eşitliklerde bulunan öz ve ortak endüktans değerlerinin hesaplanabilmesi gerekmektedir. Bu bölümde KGA sistemleri için önerilen altıgen sargı yapısının öz ve ortak endüktans değerlerinin temel akı denklemleri kullanılarak hesaplanmasına yönelik çalışmalara yer verilmiştir.

- Endüktans değerinin hesaplanabilmesi için altıgen sargılar koordinat düzlemine oturtulmuş ve koordinat noktaları uzaklıklar ve sargı kenar uzunlukları göz önüne alınarak belirlenmiştir.
- Ortak endüktans denkleminin elde edilebilmesi için Biot Savart kuralına göre, primer sargının her bir kenarından geçen akımın sekonder sargı alanı içerisinde kalan alanın herhangi bir noktasında oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu denklemi elde edilmiştir.

Daha sonra sargı alanı dikdörtgenlere bölünerek integral eşitlikleri çözümlenmiş ve bu alanlar toplanarak ortak endüktans denklemi elde edilmiştir.

- Aynı yaklaşım kullanılarak sargının kendi alanı içerisinde oluşturduğu toplam akı miktarı bulunarak öz endüktans denklemi elde edilmiştir.
- Elde edilen eşitlikler kullanılarak geliştirilen algoritma yardımıyla öz ve ortak endüktans değerleri hesaplanabilmektedir. Önerilen yaklaşımın doğrulanabilmesi için, üçer sarımlı ve  $1.78 \text{ mm}^2$  iletken kullanılarak oluşturulan primer ve sekonder sargıların öz ve ortak endüktans değerleri önerilen yaklaşımla hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler, literatürde kabul görmüş endüktans eşitlikleri, SEA sonuçları ve gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre hem öz hem de ortak endüktans değerleri önerilen yöntemle hızlı ve doğru sonuçlar vermektedir.





#### 4. ALTIGEN SARGI YAPISI İLE 1 kW GÜCÜNDE BİR KGA SİSTEMİNİN TASARIM, BENZETİM VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Bu bölümde bir önceki üçüncü bölümde elde edilen öz ve ortak endüktans denklemleri kullanılarak, altigen sargı yapısına sahip 1 kW değerinde bir KGA sisteminin tasarım, benzetim ve gerçekleştirilmesi verilecektir. Çizelge 4.1’de tasarımı gerçekleştirilmek istenen sisteme ait parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.1. Hedeflenen sistem tasarımı

Parametre	Değer
Giriş Gerilimi (V)	72
Çıkış Gücü (W)	1000
Hava aralığı (cm)	10
Çalışma frekansı (kHz)	20

Tasarımı hedeflenen 1 kW gücündeki KGA sisteminin genel şeması ilk bölümde Şekil 3.3’te verilen devre ile aynı şemaya sahiptir. Kompanzasyon topolojisi olarak ikinci bölümde detaylı olarak anlatılan ve elektrikli araçlarda en fazla tercih edilen SS topoloji tercih edilmiştir. İstenen güç değerinde bir KGA sistemine ait tasarım parametrelerinin belirlenmesi için öncelikle tercih edilen kompanzasyon topolojisine ait matematiksel eşitliklerin çıkarılması gerekmektedir. Çizelge 4.2’de SS kompanzasyon topolojine ait eşitlikler verilmiştir.

Çizelge 4.2. SS kompanzasyon topolojisine ait eşitlikler (Sallan ve diğerleri, 2009)

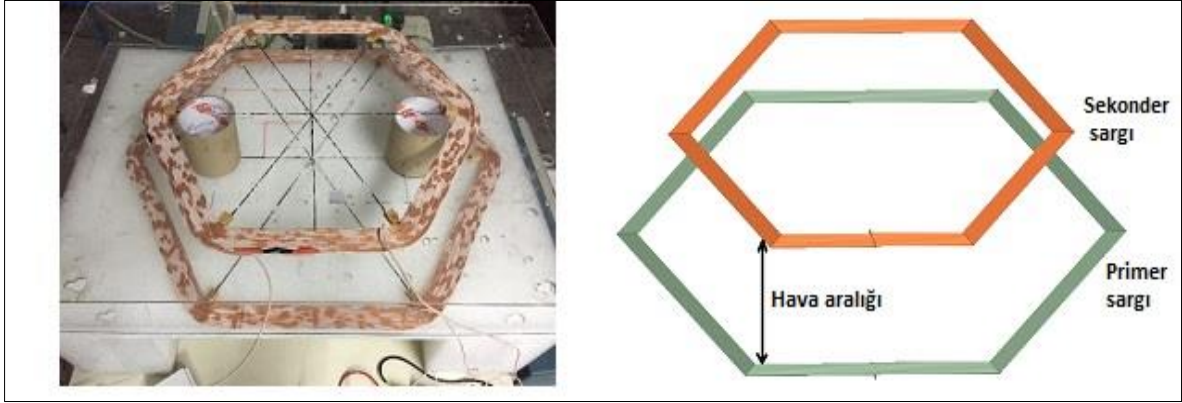
Parametre	Eşitlik
Eşdeğer empedans	$Z_T = \left( R_1 + j \left( L_1 \omega_0 - \frac{1}{C_1 \omega_0} \right) \right) + \frac{\omega_0^2 M^2}{\left( R_2 + R_L + j \left( L_2 \omega_0 - \frac{1}{C_2 \omega_0} \right) \right)}$
Primer akımı	$I_1 = \frac{V_1}{Z_T}$
Sekonder akımı	$I_2 = \frac{j \omega_0 M I_1}{R_2 + R_L + j \left( L_2 \omega_0 - \frac{1}{C_2 \omega_0} \right)}$
Primer kompanzasyon kapasitörü	$C_1 = \frac{1}{\omega_0 L_1}$
Sekonder kompanzasyon kapasitörü	$C_2 = \frac{1}{\omega_0 L_2}$
Primer kalite faktörü	$Q_1 = \frac{L_1 R_L}{\omega_0 M^2}$
Sekonder kalite faktörü	$Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_L}$
Yüke aktarılan güç	$P_T = \frac{\omega_0 M^2 Q_2 I_1^2}{L_2}$

Çizelge 4.2’de  $\omega_0$ ,  $V_1$ ,  $R_L$ ,  $R_1$ - $R_2$  ve  $Q_2$  sırasıyla rezonans frekansını, giriş geriliminin ana harmoniğinin efektif değerini, yük direncini, primer ve sekonder sargı dirençlerini ve kalite faktörlerini göstermektedir. Bu çizelgede bulunan ve üçüncü bölümde elde edilen endüktans eşitlikleri verilen tasarım algoritmasında (Sallan ve diğerleri, 2009) kullanılarak hedeflenen güç aktarımının gerçekleştirilmesini sağlayacak en uygun tasarım parametreleri yazılan MATLAB kodu ile elde edilmiştir. Sargı dış boyutları primer sargı için 310 mm, sekonder sargı için ise 248 mm olarak seçilmiştir. Bu değerler birinci bölümde incelenen makalelerde kullanılan sargı boyutları göz önünde bulundurularak 1 kW güç değeri için belirlenmiştir. Çizelge 4.1’de verilen değerler kullanılarak 1 kW gücünde ve altıgen sargı yapısına ait bir KGA sisteminin tasarım parametreleri elde edilmiş ve Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Sistem tasarım sonuçları

Parametre	Hesaplanan Değer
C <sub>1</sub> (nF)	411,92
C <sub>2</sub> (nF)	460,97
L <sub>1</sub> (μH)	155,82
L <sub>2</sub> (μH)	139,24
M (μH)	29,73
N <sub>1</sub>	10
N <sub>2</sub>	11
f (kHz)	19.86
Q <sub>p</sub>	5,24
Q <sub>s</sub>	4,67
R <sub>1</sub> (Ω)	0,1
R <sub>2</sub> (Ω)	0,09
S <sub>1</sub> (mm <sup>2</sup> )	2,98
S <sub>2</sub> (mm <sup>2</sup> )	2,88
I <sub>1</sub> (A)	17,42
I <sub>2</sub> (A)	16,95
V <sub>L</sub> (V)	71,08
Z <sub>T</sub> (Ω)	3,71
Verim (%)	94,62

Çizelge 4.3'te verilen tasarım parametreleri kullanılarak, sistemin manyetik yapısını oluşturan sargılar ANSYS Maxwell programında üç boyutlu olarak çizilip analizleri yapılmış ve endüktans hesaplamalarının doğruluğu test edilmiştir. Ayrıca, sistemin genel çalışmasının doğrulanması amacıyla ANSYS Simplorer programı ile tüm sisteme ait devre şeması oluşturulmuş ve tasarım performansı incelenmiştir. Şekil 4.1'de sargılara ait üç boyutlu çizimler ve laboratuvarında üretilmiş sargılar gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Üretilen ve üç boyutlu SEA modelleri oluşturulan sargılar

Sargıların sarımında, temin edilebilen ve iletken kesiti  $2.5 \text{ mm}^2$  olan AWG 33 litz teli kullanılmıştır. Üretilen sargıların öz ve ortak endüktans değerleri LCR metre ile ölçülmüş, SEA ve nümerik yöntemle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

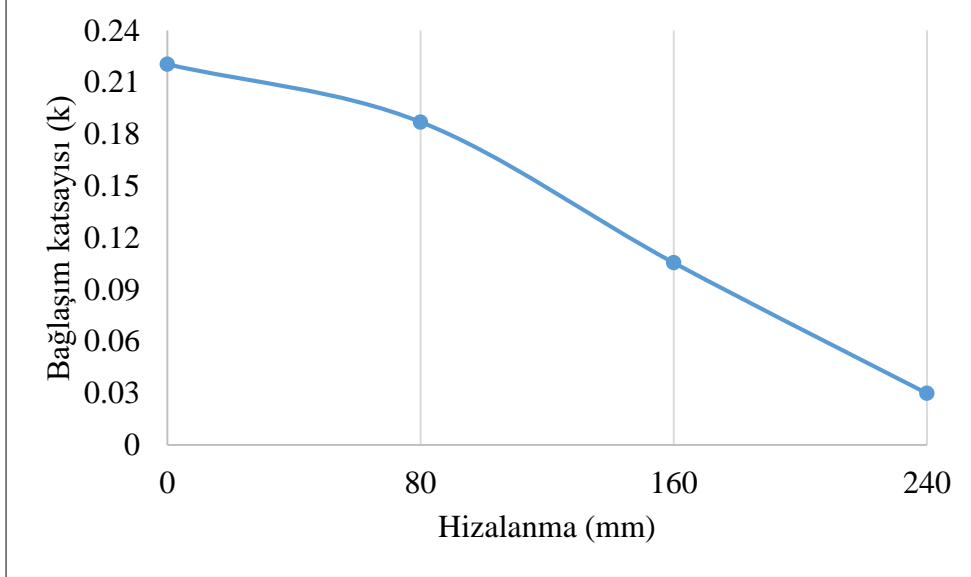
Çizelge 4.4. Öz ve ortak endüktans değerlerinin önerilen yöntemle elde edilen sonuçlarının SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması

Yöntem	Öz Endüktans ( $\mu\text{H}$ )		Ortak Endüktans ( $\mu\text{H}$ )
	Primer	Sekonder	
Ölçüm	147,48	132,51	31,57
SEA	145,62	127,82	30,09
Önerilen Yöntem	155,82	139,24	29,73
Hata (%)	5,6	5	5,8

Çizelge 4.4'te verilen karşılaştırmada hata oranı ölçüm sonuçlarının en doğru olduğu varsayılarak nümerik yöntemle kıyaslanarak elde edilmiştir. Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde, primer sargı öz endüktansı % 5,6 hata ile hesaplanabilirken sekonder sargı öz endüktansının hata oranı ise % 5'dir. Ortak endüktans değerinin ise ölçüm sonuçları ile büyük oranda örtüştüğü ve sadece % 5,8 hata oranı ile hesaplanabildiği görülmektedir.

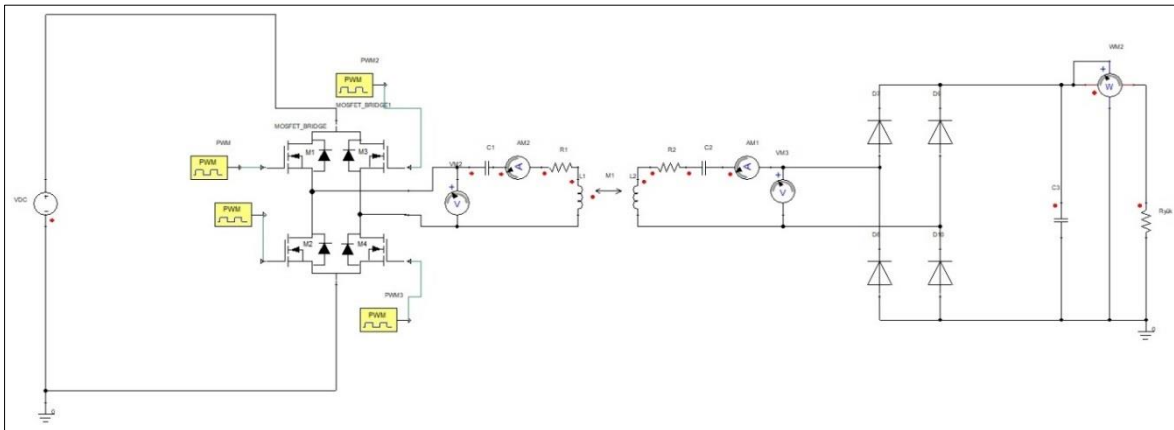
Tasarımı yapılan sargıların SEA sonuçlarına göre mükemmel hizalı durumda bağlaşım katsayısı 0,22 olarak hesaplanmaktadır. Sekonder sargının x ve y eksenlerinde aynı anda

kaydırılmasıyla oluşan sargı pozisyonlarına göre bağlaşım katsayısının değişim grafiği ise Şekil 4.2’de verilmiştir.



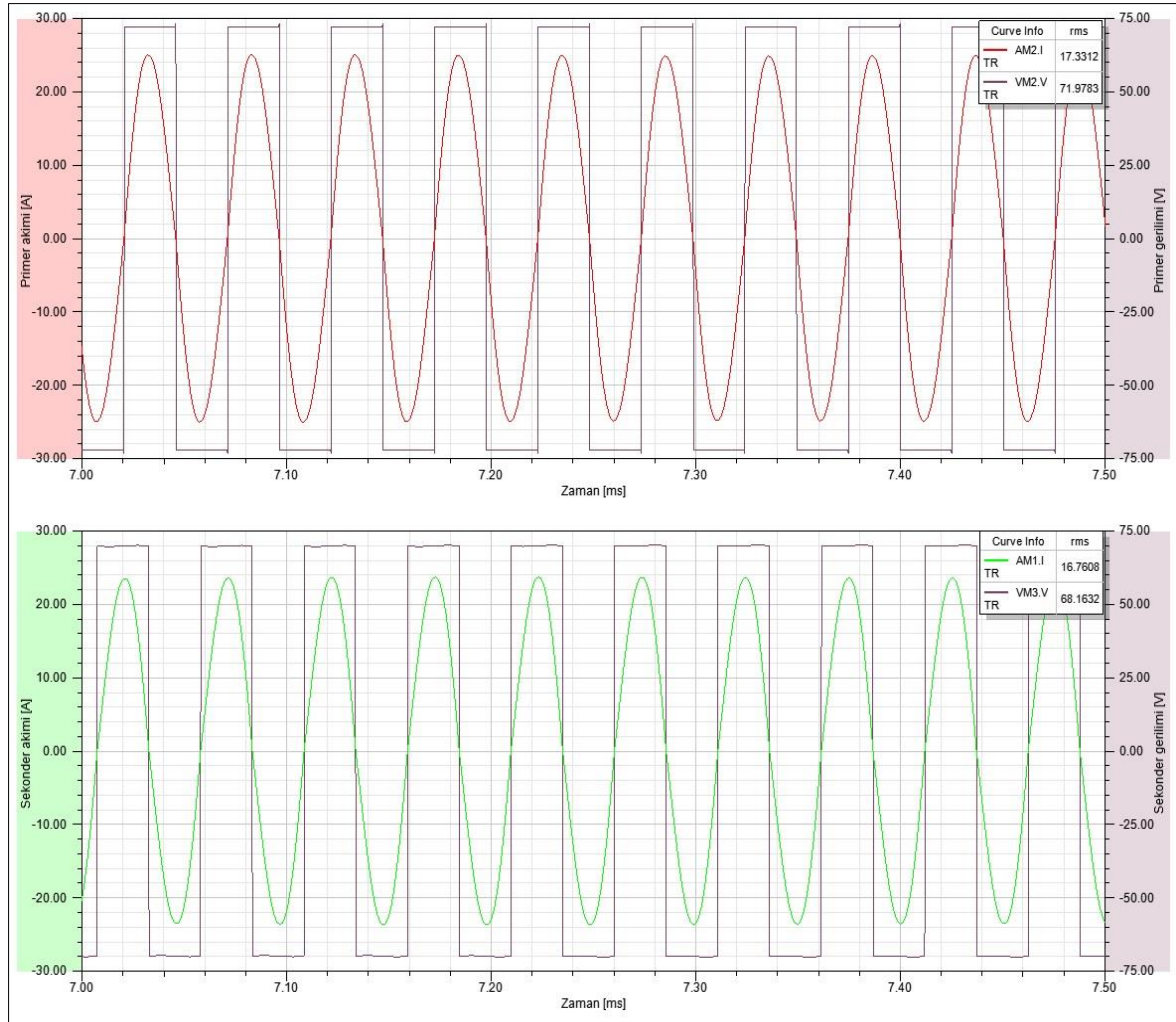
Şekil 4.2. Bağlaşım katsayısının hizalanmaya bağlı olarak değişimi

Sargı eksen uzunluğunun yaklaşık % 50’si kadar uzunluğun merkez noktasından kaydığı durum olan 240 mm’de bağlaşım katsayısı 0,03 değerine kadar düşmektedir. SS topolojide bağlaşımın sıfır noktasında çalışma, ciddi riskler oluşturacağından dolayı buna yönelik kontrol devreleri yardımıyla kapalı çevrim bir sistemde çalışılmalıdır. Çizelge 4.3’te elde edilen verilerle, sistemin çalışma performansının doğrulanması ve benzetim çalışmalarının yapılabilmesi için ANSYS Simplorer programı yardımıyla devre tasarımı gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Benzetim devre modeli

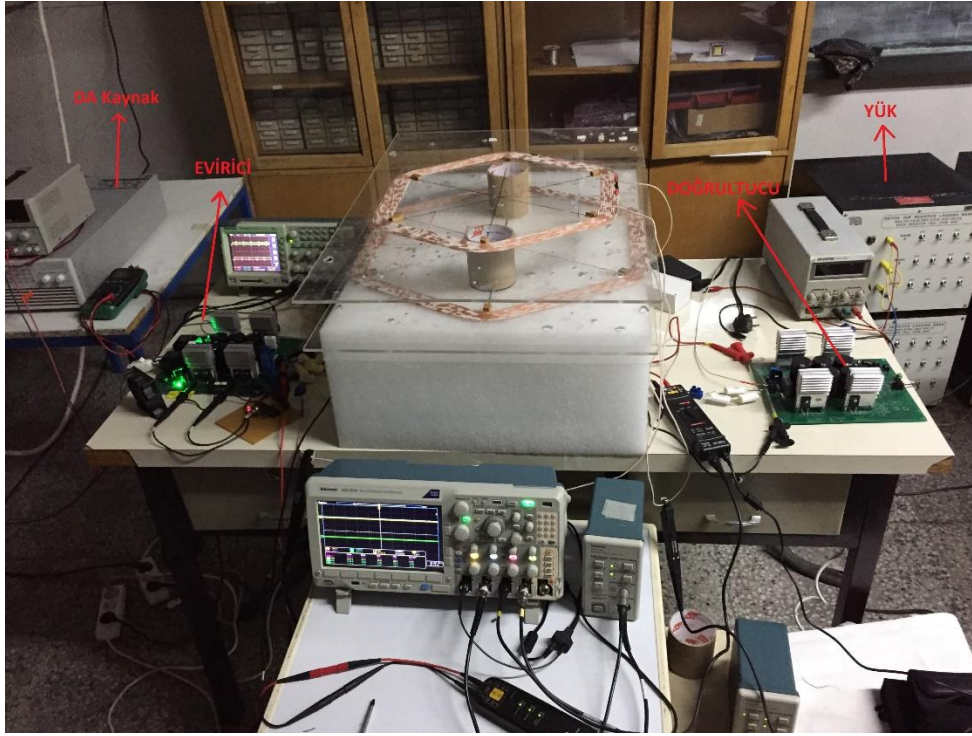
DA besleme gerilimi 72 V olarak belirlenmiştir ve primer devresi rezonans frekansında kare dalga üreten tam dalga köprü tipi bir evirici ile sürülmüştür. Primer sargıdan akan yüksek frekanslı akım sayesinde zamanla değişen bir manyetik alan üretilir ve bu manyetik alan neticesinde sekonder sargıda bir gerilim endüklenir. Alıcı sargı çıkışına da yine yüksek frekansta anahtarlanabilen tam dalga doğrultucu bağlanmıştır. Doğrultucu çıkışına ise akü grubunu sembolize eden bir direnç bağlanmıştır. Doğrultucu çıkışındaki yük değeri  $R_d/R_{ac}=1.23$  oranından  $4.56 \Omega$  olarak belirlenmiştir. Benzetim programı koşturulduğunda, devrenin primer ve sekonder taraflarına ait akım ve gerilim dalga şekilleri elde edilmiş ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Primer ve sekonder taraflara ait akım ve gerilim dalga formları

Sargıdan sargıya verim elde edilen dalga şekilleri ile hesaplanabilir. Primer tarafta hesaplanan güç 1122 W iken, sekonder tarafta hesaplanan güç 1028 W'tır. Bu durumda

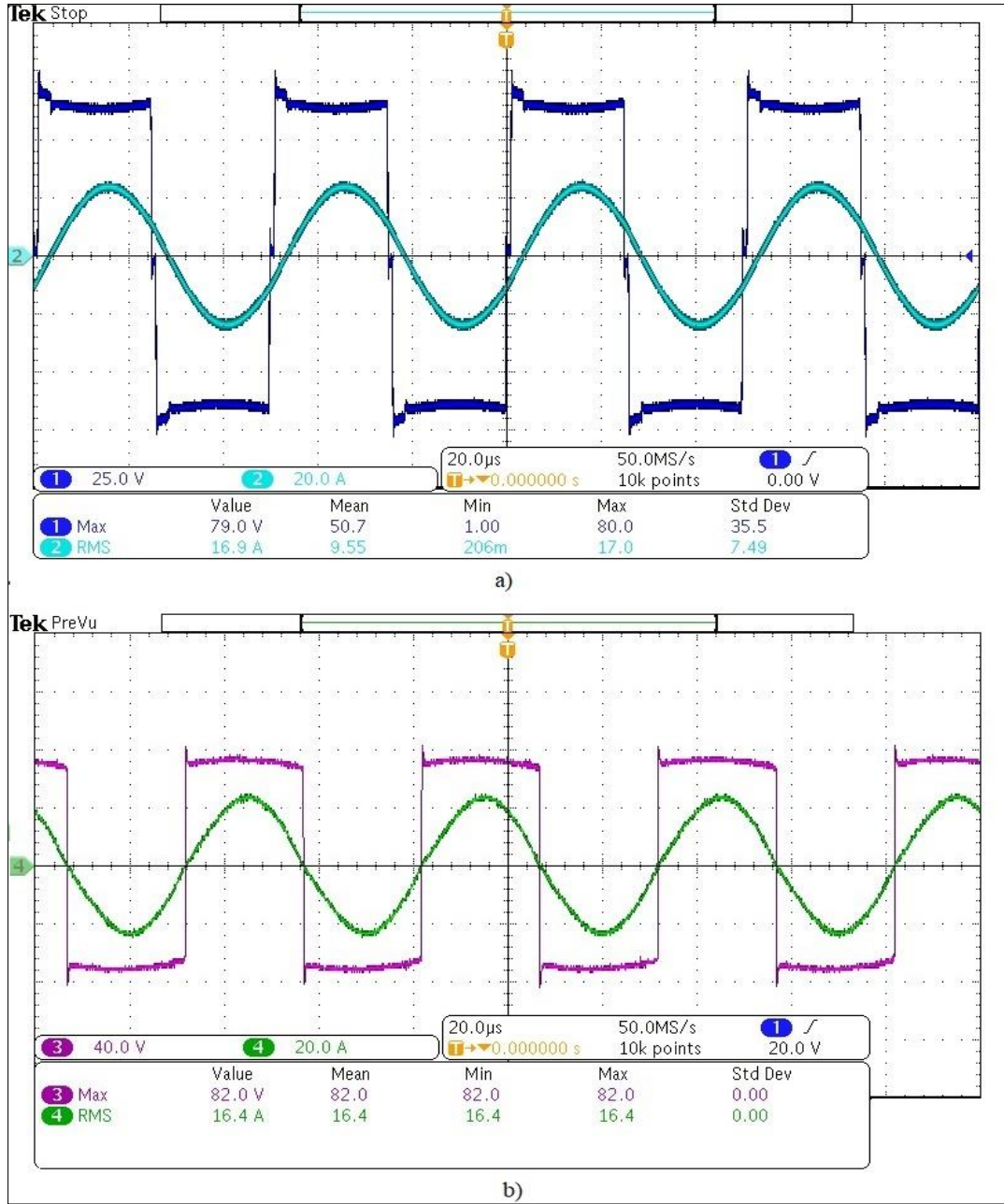
sargıdan sargıya verim % 91.6 olarak hesaplanır. Yüke aktarılan güç ise 992.8 W olarak elde edilmiştir. Girişten çıkışa verim hesaplandığında ise % 88 olarak elde edilmiştir. Benzetim sonuçları değerlendirildiğinde beklenen sonuçların elde edilebileceği ve laboratuvar ortamında sistem performansının bu parametrelerle gözlemlenebileceği sonucuna varılabilir. Bu amaçla, üretilen sargılar güç elektroniği devresi ile birleştirilmiş ve sistem gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'te deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Laboratuvar ortamında kurulu test düzeneğinin gösterimi

DA kaynağı olarak Chroma 62024-P 80V/60A olarak kullanılmıştır ve tam köprü eviriciyi beslemektedir. Tam köprü evirici çıkışında yüksek frekanslı kare dalga gerilimi üretmek için yarı iletken anahtarlama elemanı olarak IXYS üretici firmasının IXA33IF1200HB model ve koduna sahip IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)'ler kullanılmıştır. Çizelge 4.3'te hesaplanan kapasitör değerlerine en yakın ve laboratuvar koşullarında temin edilebilen rezonans kapasitörleri değerleri primer ve sekonder taraf için sırasıyla  $C_1= 415$  nF ve  $C_2= 475$  nF olarak LCR metre ile ölçülmüştür. Sistemin çalışma frekansı 19.9 kHz olarak ayarlanmış ve bu çalışma frekansında elde edilen primer ve sekonder akım ve gerilim dalga formlarına ait osiloskop ekran görüntüleri Şekil 4.5'te verilmiştir.





Şekil 4.6. a) Primer ve b) Sekonder taraflara ait akım ve gerilim dalga formlarına ait osiloskop ekran görüntüsü

19.9 kHz çalışma frekansında elde edilen akım ve gerilim grafikleri incelendiğinde, primer tarafta bir miktar faz farkı olduğu görülmektedir. Bu faz farkı, endüktans ve kapasitör değerlerinin ölçüm sonuçlarının hesaplanan değerlere göre bir miktar farklı olmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Akım ve gerilim değerlerinin hesaplanan değerlerle ve benzetim sonuçları ile büyük ölçüde örtüştüğü ve beklenen sonuçların elde edildiği gösterilmiştir. Yük üzerinde ampermetre ve voltmetre kullanılarak ölçülen akım ve gerilim değerleri ile

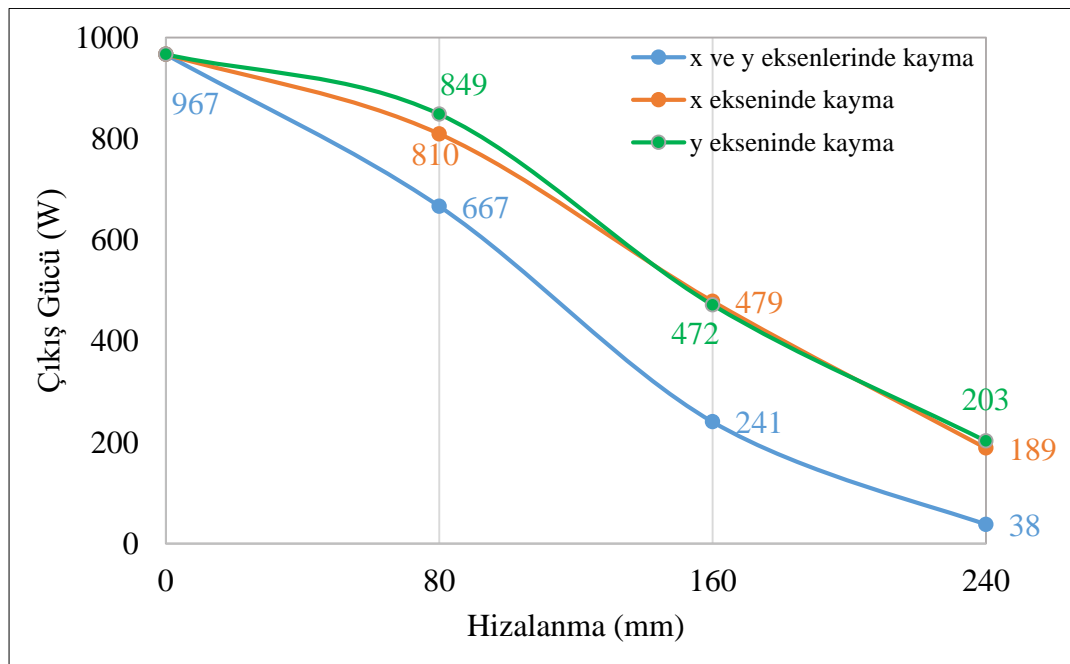
sistemi besleyen DA gerilim kaynağından okunan akım ve gerilim değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.5. Giriş ve çıkışta ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri

	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç (W)
Giriş	72	15,8	1137
Çıkış	63,2	15,3	967

Devrenin giriş-çıkış arasındaki verimi Çizelge 4.5’teki güç değerleri ile hesaplandığında %85 olduğu görülmektedir. Anahtarlama kayıpları, primer tarafta faz kaymasından kaynaklanan kayıplar ve sargı direncinden kaynaklanan bakır kayıpları devrenin giriş ve çıkıştaki güç değerlerinin farkını oluşturmaktadır.

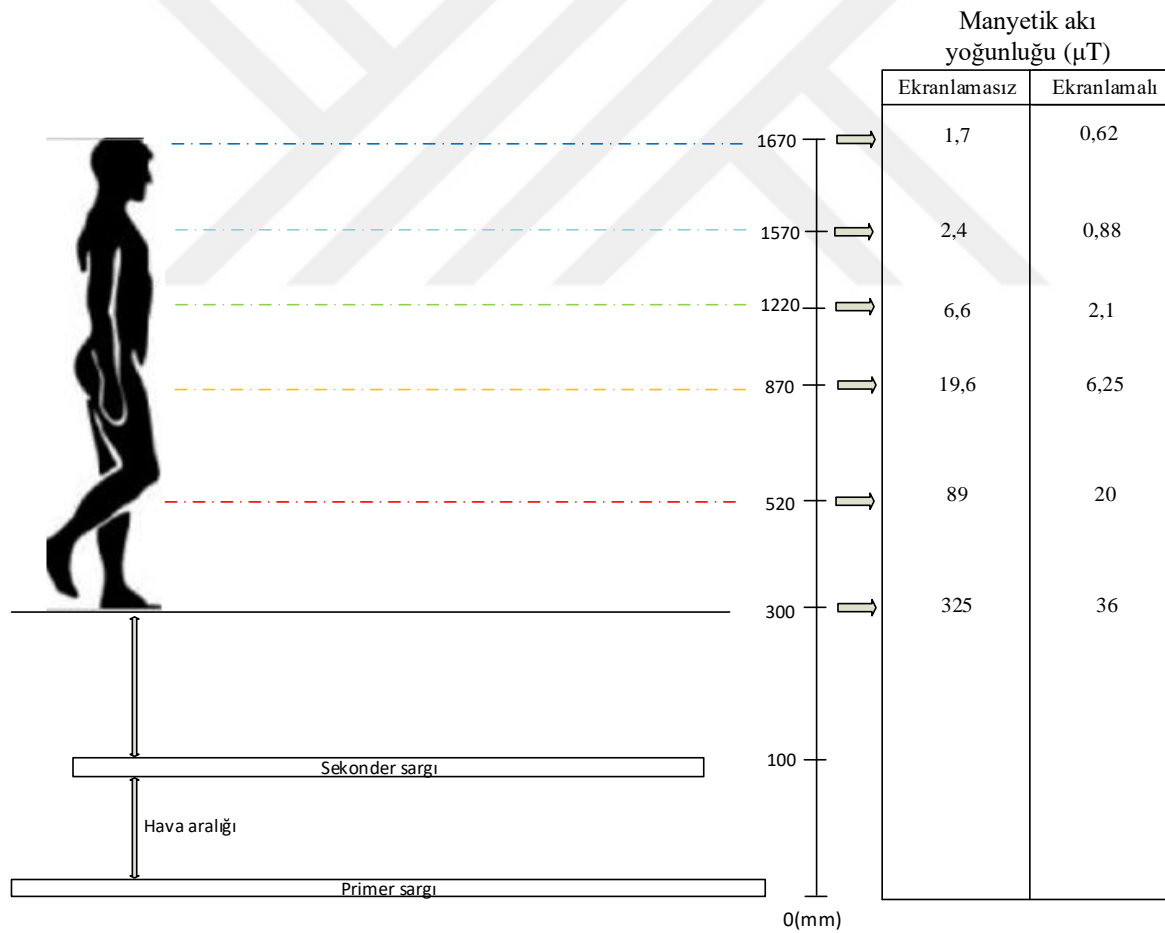
Çıkış gücünün, x ve y eksenlerinde sargılar arasındaki hizalanma durumlarına göre değişiminin incelenmesi amacıyla sekonder sargı hem x hem de y eksenlerinde sırasıyla 80, 160 ve 240 mm kaydırılmıştır. Çıkış gücünün hizalanmaya karşı grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Çıkış gücünün hizalanmaya bağlı olarak değişimi

Her iki ekseninde 240 mm kayma durumunda çıkış gücünün neredeyse sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Sonuç olarak nüve kullanılmadan mükemmel hizalanma durumunda elde edilen %85 verim değeri benzer akademik çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli bir başarımlar olarak değerlendirilebilir.

Gerçekleştirilen tasarımın Bölüm 2.4'te verilen sağlık standartları ve eşik değerlerine uygunluğunun belirlenebilmesi için SEA programında benzetim çalışmaları yapılarak sekonder sargıdan sırasıyla 300, 520, 870, 1220, 1570 ve 1670 mm kadar uzaklık değerlerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu B ( $\mu\text{T}$ ) değerleri elde edilmiştir. Ekranlama elemanı olarak 430x500 mm boyutlarında alüminyum levha kullanılmış ve sekonder sargının üzerine konumlandırılmıştır. Sargılar ve ölçüm yapılan değerleri gösteren görsel Şekil 4.8'te verilmiştir.



Şekil 4.8. Sistemin insan sağlığı üzerine etkisinin incelenmesi

Elde edilen benzetim sonuçları incelendiğinde, ekranlama kullanımının maruz kalınan manyetik alan değerini büyük oranda düşürdüğü görülmektedir. ICNIRP standardına göre

maruz kalınan manyetik akı yoğunluğu değerinin  $6.25 \mu\text{T}$  değerinin üzerinde olmamalı ve noktasal olarak da bu değer  $\sqrt{20}$  katı yani  $27.3 \mu\text{T}$  değerini aşmamalıdır. Ekranlama kullanmadan yapılan analizlerde Şekil 4.8'te verilen insan modelinde dizden itibaren oluşan akı yoğunluğu değerlerinin bu eşik değerin altında olduğu, daha alt kısımlarda ise üzerinde olduğu görülmektedir. Bu olumsuz durumun ortadan kaldırılması için ekranlama kullanımı ile insan vücudunun ilk başladığı ayak bölümden başa kadar tüm değerlerin izin verilen eşik değerlerin altında olduğu ve başarılı bir ekranlama yapılabildiği değerlendirilebilir. Ekranlama kullanılarak yapılan analiz sonucunda insan vücudun Şekil 4.8'te maruz kaldığı en yüksek değer  $20 \mu\text{T}$ 'dan biraz büyük iken baş bölümünde görülen manyetik akı yoğunluğu değeri sadece  $0,62 \mu\text{T}$ 'dir.

### Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde, elde edilen endüktans eşitlikleri ve SS kompanzasyon yapısına ait eşitlikler kullanılarak 1 kW güç değerine sahip bir KGA sistem tasarım, analiz ve gerçekleştirilmesi verilmiştir.

- Benzetim sonuçlarına göre 10 cm hava aralığından %88 verimle, ölçüm sonuçlarına göre ise %85 verimle yaklaşık 1 kW güç aktarımı kablosuz olarak sağlanmıştır.
- Ayrıca tasarlanan sistemin hizalanma problemine karşılık performansı hem benzetim hem de ölçüm sonuçları ile değerlendirilmiştir.
- Son olarak tasarlanan sistemin insan sağlığı üzerine etkisinin incelenebilmesi için SEA yöntemi kullanılarak farklı noktalardaki manyetik akı yoğunluğu değerleri ekranlamanın olduğu ve olmadığı durumlar için elde edilmiş ve uluslararası standartlara uygunluğu gösterilmiştir.



## 5. ALTIGEN SARGI YAPISI KULLANILARAK ÇİFT PRİMER SARGI YAPISI ÖNERİSİ

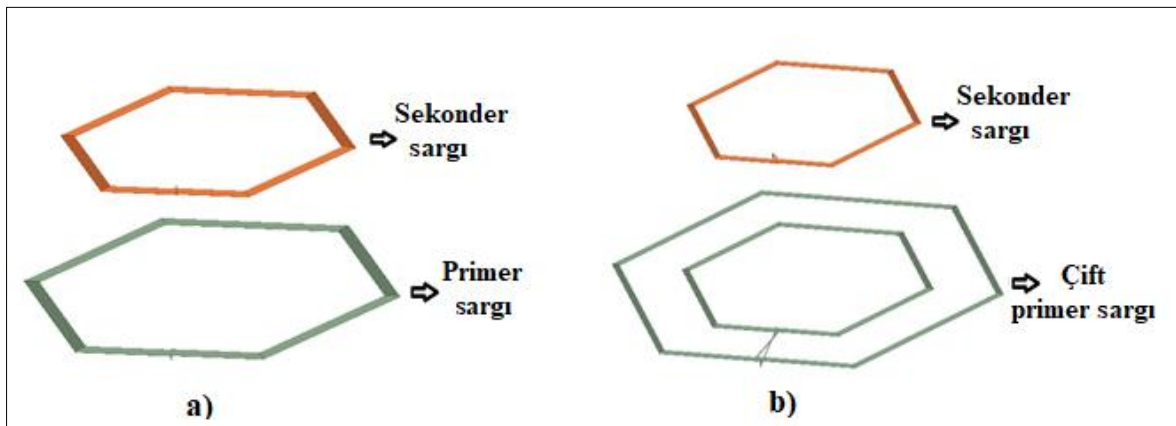
Bu bölümde önerilen altıgen sargı yapısının primer tarafında çift sargı yapısı kullanılarak bağlaşım katsayısının arttırılması amaçlanmıştır. Çıkış gücü eşitliği dördüncü bölümde Çizelge 4.1’de verilmişti. Bağlaşım katsayısının çıkış gücüne etkisinin gösterilmesi amacıyla bu eşitlik yeniden yazılacak olursa,

$$P_{\text{çıkış}} = \frac{\omega I_1^2 M^2 Q_2}{L_2} = \omega L_1 I_1^2 k^2 Q_2 \quad (5.1)$$

eşitliği elde edilir. Bağlaşım katsayısı ise,

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (5.2)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Dolayısıyla bağlaşım katsayısının artması ile elde edilen çıkış gücü artacaktır. Bu amaçla, primer sargı dış kenar boyutları değiştirilmeden toplam sargı miktarının bir kısmı seri bir bağlantı ile sargı alanı içerisinde kalacak şekilde toplam sarım sayısı sabit kalarak iki parçaya ayrılmıştır. Bu yapı ile primer sargı ile sekonder sargı arasında kaçak akı miktarının azaltılarak akının odaklanması amaçlanmıştır. Klasik yapı ile önerilen yapının gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. a) Klasik primer sargı yapısı ve b) çift primer sargı yapısı

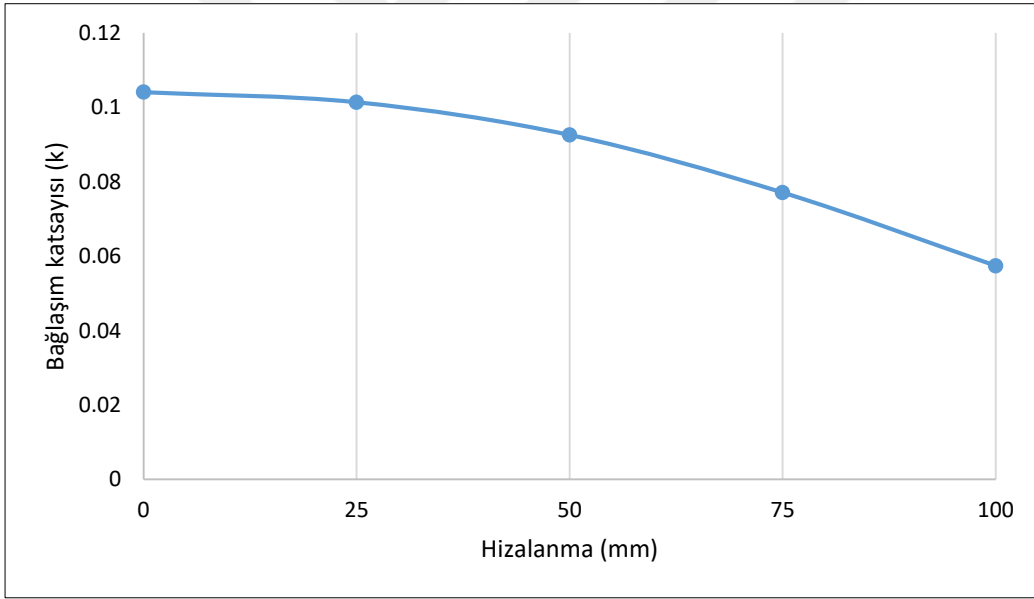
Şekil 5.1’de verilen 3B modeller ANSYS Maxwell programında oluşturularak manyetostatik analizleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan klasik primer sargı yapısına sahip

modelin boyut, sarım sayısı ve kullanılan iletken kesit değerine ait bilgiler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Sargı özellikleri

Sargı	Dış kenar uzunluğu (mm)	Sarım sayısı	İletken Kesiti (mm <sup>2</sup> )
Primer sargı	200	12	0.78
Sekonder sargı	120	6	0.78

Öncelikle klasik yapının mükemmel hizalı ve x,y eksenlerinde kayma durumundaki performansının elde edilmesi için Maxwell programında analizi gerçekleştirilmiştir. Sargılar arasındaki mesafe 10 cm’dir ve Şekil 5.2’de benzetim sonuçları verilmiştir.



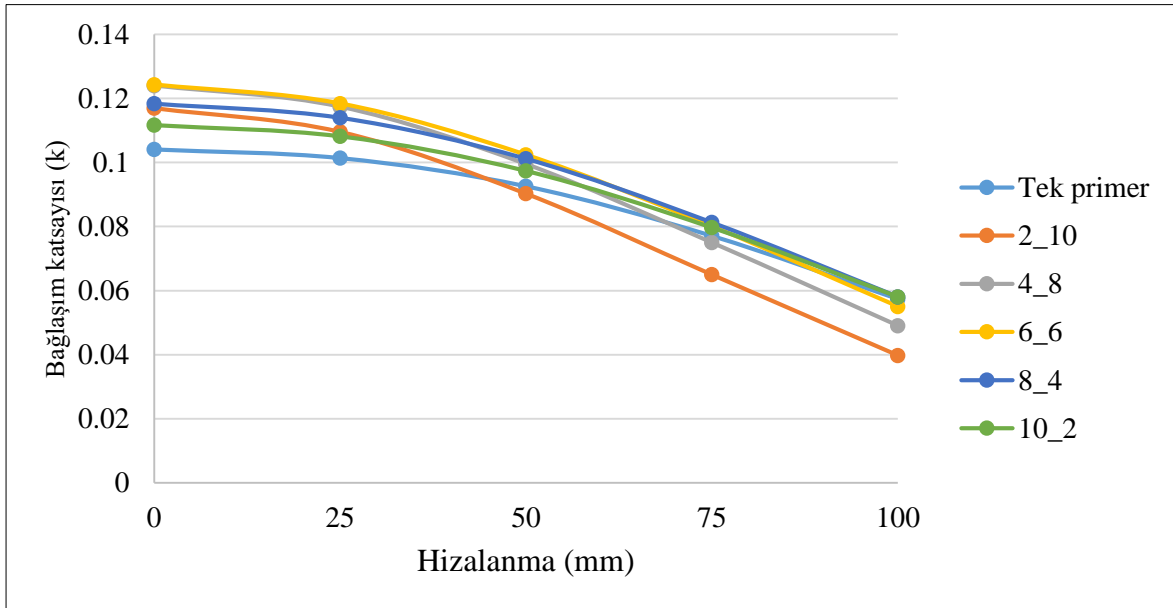
Şekil 5.2. Klasik sargı yapısının x ve y eksenlerindeki kayma miktarına göre bağlaşım katsayısının değişimi

Şekil 5.2’den görüldüğü üzere klasik sargı yapısında mükemmel hizalanma durumunda bağlaşım katsayısı 0,1041 iken en kötü durum olan sekonder sargının x ve y eksenlerinde aynı anda 100 mm kaydırılması durumunda 0,0574 değerini almıştır. Çift primer sargı yapısının bağlaşım katsayısına etkisinin incelenmesi için, öncelikle iç sargı boyutu sabit ve sekonder sargı ile eş boyutlarda alınmış ve sarım sayısı değiştirilmiştir. Sarım sayısının değiştirilmesi ile elde edilen bağlaşım katsayısı değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Çizelge de primer sargının dış sarımı  $N_{dp}$ , iç sarımı ise  $N_{ip}$  ile gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Sarım sayısının bağlaşım katsayısına etkisi

Dış sarım sayısı ( $N_{dp}$ )	İç sarım sayısı ( $N_{ip}$ )	Bağlaşım katsayısı (k)
2	10	0.1170
4	8	0.1240
6	6	0.1243
8	4	0.1184
10	2	0.1117
12	0	0.1041

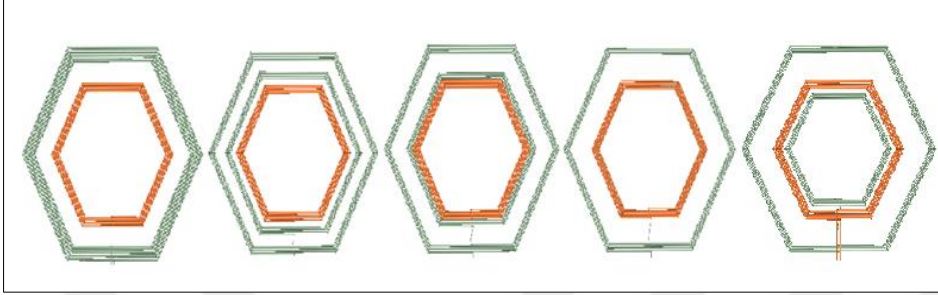
Sonuçlar incelendiğinde bağlaşım katsayısı değeri iç içe sargı yapısı ile artmış ve en yüksek değeri iç ve dış sarım sayılarının birbirlerine eşit olduğu durumda aldığı görülmektedir. Klasik yapıda elde edilen değerden %19,4 daha yüksek bir bağlaşım katsayısı elde edilmiştir. Ayrıca kullanılan bakır miktarları karşılaştırıldığında, klasik yapının primer sargısı için  $10962 \text{ mm}^3$  bakır kullanılırken, iç içe yapıda primer sargı için  $8990 \text{ mm}^3$  bakır kullanılmıştır. Kullanılan bakır miktarının azalması avantajının yanında sargı direnci de azalacaktır. Sarım sayısı değişiminin hizalanma performansı üzerine etkisinin incelenmesi için sekonder sargı x ve y eksenlerinde aynı anda 0'dan 100 mm'ye kadar kaydırılarak bağlaşım katsayısı sonuçları elde edilmiş ve Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Klasik sargı yapısının ve farklı iç sargı sarım sayılarının kayma miktarına göre bağlaşım katsayısına etkisi



Sarım sayısının etkisi incelendikten sonra içte kalan sargının boyutlarının bağlaşım katsayısına etkisinin incelenmesi amacıyla parametrik olarak değiştirilmiş ve en uygun değerinin bulunması amaçlanmıştır. Sekonder sargıdan daha büyük ve daha küçük olacak şekilde değiştirilmiş ve örnek gösterimi Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Çift primer sargı yapısının farklı iç sargı boyutları kullanılarak tasarımı

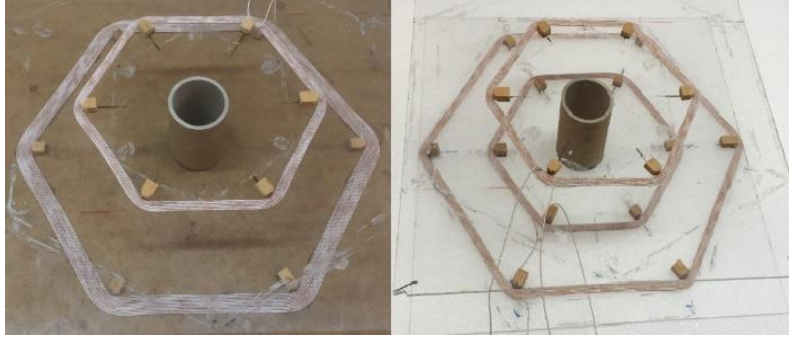
İç sargı yapısının bir kenar uzunluğu 60 mm'den başlanarak 180 mm'ye kadar değiştirilmiş ve her durum için bağlaşım katsayısının değeri SEA ile elde edilmiştir. Farklı boyutlar için elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Primer iç sargısının kenar uzunluğunun bağlaşım katsayısına etkisi

Primer iç sargısının kenar uzunlukları (mm)	Bağlaşım katsayısı (k)
60	0.0958
80	0.1037
100	0.1115
120	0.1243
140	0.1236
160	0.1224
180	0.1140

Analizlerde iç sarım sayısı ( $N_{ip}$ ) sabit ve altı olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde iç sargı kenar uzunluğunun sekonder sargı boyutları ile eş olduğu durumda en yüksek bağlaşım katsayısına sahip olduğu ve 0,1243 değerini aldığı görülmektedir. Sarım sayısı ve kenar uzunluğunun bağlaşım katsayısına etkisinin incelenmesi ile elde

edilen sonuçların deneysel olarak doğrulanması amacıyla  $0.78 \text{ mm}^2$  iletken kesitine sahip litz teli kullanılarak sargılar üretilmiştir ve Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Klasik primer ve çift primer sargı yapısına sahip üretilmiş sargılar

Yukarıda elde edilen optimum koşullarda üretilen çift primer sargı yapısı ile klasik primer sargı yapısına sahip sargıların bağlaşım katsayıları endüktans ölçümleri LCR metre ile yapılarak hesaplanmıştır. Ayrıca önerilen çift primer sargı yapısının hızlanma performansının gözlemlenebilmesi için sekonder sargı x ve y eksenlerinde 0'dan 100 mm'ye kadar kaydırılarak ölçümler yapılmıştır. Ölçüm sonuçları neticesinde hesaplanan bağlaşım katsayısı değerleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Primer iç sargı kenar uzunluğunun bağlaşım katsayısına etkisi

x ve y eksenlerinde kayma miktarı (mm)	Bağlaşım katsayısı (k)	
	Tek primer yapısı	Çift primer yapısı
0	0,1197	0,1485
25	0,1182	0,1427
50	0,1083	0,1271
75	0,0914	0,0991
100	0,0715	0,0746

Ölçüm sonuçlarına göre, mükemmel hizalanma durumunda çift primer sargı yapısı için hesaplanan bağlaşım katsayısı değeri 0,1485 iken tek primer sargı yapısında bu değer 0,1197 olmaktadır. Dolayısıyla çift primer sargı yapısı bağlaşım katsayısı değeri tek primer sargı yapısına göre %24 daha fazladır. Hizalanma performansları incelendiğinde ise, en kötü durum olan her iki ekseninde 100 mm kayma durumunda çift primer sargı yapısı 0,0746

bağlaşım katsayısı değeri ile daha fazla değere sahiptir. Ancak mükemmel hizalanma durumuna göre karşılaştırma yapıldığında, çift primer sargı yapısında %49'luk bir değişim yaşanırken tek primer sargı yapısında %40'lık bir azalma görülmektedir.

### Bölüm Değerlendirmesi

Boyut ve sarım optimizasyonu gerçekleştirilen çift primer sargı yapısının klasik yapıya göre oldukça avantajlı bir yapı olduğu görülmektedir. Bu yapı kullanılarak daha verimli KGA sistemlerinin geliştirilmesi mümkündür.

Bu bölümde KGA sistem tasarımında en önemli parametrelerden biri olan bağlaşım katsayısının artırılması amacıyla önerilen çift primer sargı yapısına sahip sargının performansı incelenmiştir.

- Tek primer ve çift primer sargıya sahip sargı çiftlerinin bağlaşım katsayılarının karşılaştırılabilmesi için SEA programı yardımıyla elde edilen benzetim sonuçları elde edilmiştir.
- Çift primer sargı yapısında içte kalan sargının farklı boyut ve sarım sayısına sahip modelleri oluşturularak en uygun tasarıma sahip sargı modeli belirlenmiştir.
- Belirlenen tasarımın mükemmel hizalı ve sekonder sargının farklı pozisyonları için bağlaşım katsayısının değişimi incelenmiştir. Mükemmel hizalı durumda çift primer sargı yapısının, tekli primer sargı yapısından %19,4 kadar daha yüksek bir bağlaşım katsayısına sahip olduğu benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan bakır miktarı azaldığından, bu yapı kullanılarak gerçekleştirilecek KGA sistemlerinde kayıpların önemli oranda azalacağı öngörülmektedir.
- Benzetim sonuçlarının doğrulanabilmesi için litz teli kullanılarak üretilen sargılar arasındaki bağlaşım katsayısı endüktans ölçüm sonuçları ile hesaplanarak elde edilmiş ve ölçüm sonuçlarına göre önerilen yapının geleneksel yapıya göre %24 daha yüksek bir bağlaşım katsayısına sahip olduğu görülmüştür.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tüm dünyada ve ülkemizde de gittikçe popüler bir teknoloji haline gelmekte olan kablosuz güç aktarım yöntemine ait detaylı bilgiler verilmiştir. Bu teknoloji fikrinin doğduğu günden bugüne kadar önemli akademik çalışmalar ve günümüzde ürüne dönüşmüş ticari sistemler detaylı olarak incelenmiştir. Bu sistemlerde kullanılan güç elektroniği yapıları genellikle standart olup, özgün çalışma ve fikirler daha çok manyetik yapının tasarımını oluşturan sargı yapıları üzerine geliştirilmektedir. Ferrite nüve kullanımının getirdiği ekstra maliyet, çekirdek kayıpları ve büyük kütleli yapılardan dolayı çekirdeksiz yapılara yönelik çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu gereksinimler ve amaçlar doğrultusunda, daha çok küçük güçlü ve çoklu sargı yapılarında tercih edilen ve sınırlı uygulama sayısına sahip altıgen sargı yapısının elektrikli araç uygulamalarında kullanılabilmesi amacıyla bu sargı yapısı detaylı olarak incelenmiştir.

Bir KGA sistem tasarımının temelini oluşturan sargı yapısının gerçekleştirilebilmesi için, SEA yöntemlerinde çok uzun çözümleme zamanları ile elde edilebilen öz ve ortak endüktans değerlerinin hızlıca elde edilebilmesi için nümerik çözüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, bu tez kapsamında altıgen sargı yapısı için öz ve ortak endüktans hesaplamalarında kullanılacak basit manyetik akı dağılımı formülleri kullanılarak yeni bir çözüm yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin doğruluğunun kanıtlanabilmesi için elde edilen sonuçlar deneysel, sonlu elemanlar ve farklı çözüm yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Elektrikli araç uygulamalarında sargılar arasındaki hava aralığının 10 cm olduğu durum için öz endüktans değeri deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında %4, ortak endüktans değeri ise %5.84 hata oranı ile hesaplanabilmektedir. Bu uygulamalarda sargı boyutlarının büyük olması nedeniyle endüktans değerlerinin de büyük olduğu düşünülürse, bu hata oranlarının sarım sayısında önemli bir değişiklik oluşturmayacağı öngörülmektedir. Basit ve kabul edilebilir hata oranlarına sahip olması nedeniyle önerilen yöntem endüktans hesaplamasında kullanılacak önemli bir yaklaşım olmaya adaydır. Ayrıca aynı yöntem tüm çokgenlerin endüktans hesaplamaları için kullanılabilir bir yöntem olması nedeniyle gelecek çalışmalar için de kullanılabilir.

Altıgen sargı yapısının daha çok küçük güçlü ve petek sargı uygulamalarında ön plana çıktığı detaylı literatür araştırmasında görülmüştür. Bu nedenle elde edilen ve doğruluğu test edilmiş olan endüktans denklemleri kullanılarak elektrikli araç uygulamalarına örnek teşkil edebilecek 1 kW gücünde ve 10 cm hava aralığına sahip bir tasarım gerçekleştirilmiştir. En uygun tasarım parametrelerinin elde edilmesinden sonra tasarımı düşünülen yapı benzetim çalışmalarıyla koşturulmuş ve tasarım doğrulanmıştır. Daha sonra laboratuvarında altıgen sargılar üretilerek, güç elektroniği devresi ile birleştirilmiş ve deney düzeneğinde test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre girişten çıkışa (DA-DA) verim %85 olarak hesaplanmıştır. KGA sistemlerin insan sağlığı üzerine etkilerine yönelik izin verilen eşik değerlerin belirlendiği standartlar detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, tasarımı yapılan 1 kW gücündeki KGA sisteminin insan sağlığına etkisinin incelenmesi amacıyla benzetim çalışmaları yapılmış ve maruz kalınan manyetik akı yoğunluğu değerleri verilmiştir. Bu değerlerin bir kısmının izin verilen eşik değer üzerinde olması nedeniyle ekranlama olarak alüminyum levha kullanılmış ve yeni elde edilen değerler 20  $\mu$ T ile 0,62  $\mu$ T aralığında olup, bu değerlerin izin verilen eşik değerler aralığında olduğu görülmüştür. Ayrıca tezin beşinci bölümünde manyetik akının odaklanmasına yönelik çift primer sargı yapısına sahip yeni bir yapı önerilmiş ve laboratuvar ölçüm sonuçlarına göre, klasik primer yapıyla karşılaştırıldığında daha az bakır kullanımı avantajının yanında %24 daha fazla bağlaşım katsayısı değerine sahip olduğu görülmektedir.

### Gelecek çalışmalar

Yapılan çalışmalardan elde edilen tecrübelerle, farklı geometriye sahip sargı yapılarının endüktans hesaplamaları bu tezde kullanılan yaklaşım ile hesaplanabilir ve tasarımları gerçekleştirilebilir. Sadece elektrikli araçlar için değil, günlük hayatımızda kullandığımız neredeyse tüm elektronik cihazların yakın bir gelecekte kablosuz olarak enerjilendirileceği ön görülmektedir. Bu nedenle daha küçük ve daha büyük güç seviyelerinde bu uygulamaların geliştirilmesi ve çalışmasına ihtiyaç vardır. Ayrıca ürüne yönelik düşünüldüğünde, tez kapsamında değinilen sağlık standartlarını karşılaması gerekliliği nedeniyle buna yönelik gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında elde edilen değerlerin ekranlama kullanımı öncesi ve sonrası ölçüm değerlerinin ve manyetik alan analizörü ile yapılacak gerçek ölçümler ile karşılaştırılmalıdır. Kullanılacak ekranlamanın boyutları ve konumlandırılması ile ilgili bir optimizasyon çalışması da yeni bir çalışma olarak

değerlendirilebilir. Yeni önerilen çift primer sargı yapısı ile manyetik akı yolu uzunluğu artırılarak daha uzak mesafelere güç aktarımı gerçekleştirilebilir.





## KAYNAKLAR

- A. Esser, (1995). Contactless charging and communication for electric vehicles. *IEEE Industry Applications Magazine*, 1(6), 4-11.
- Abel, E., Third, S. (1984). Contactless power transfer-an exercise in topology. *IEEE Transactions on Magnetics*, 20(5), 1813-1815.
- Ahmad, A., Alam, M. S., and Chabaan, R. (2018). A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 38-63.
- Ahn, D., and Hong, S. (2013). A Study on Magnetic Field Repeater in Wireless Power Transfer, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(1), 360-371.
- Akyel, C., Babic, S., and Kincic, S. (2002). New and fast procedures for calculating the mutual inductance of coaxial circular coils. *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(5) 2367-2369.
- Asa, E., Colak, K., Bojarski, M., and Czarkowski, D. (2015). *A novel multi-level phase-controlled resonant inverter with common mode capacitor for wireless EV chargers*. Paper presented at the IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Dearborn, MI, 1 – 6.
- Babic, S. I., and Akyel, C. (2006). New analytic-numerical solutions for the mutual inductance of two coaxial circular coils with rectangular cross section in air. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(6), 1661-1669.
- Bac, N. X., Vilathgamuwa, D.M., and Madawala, U. K. (2014). A SiC-Based Matrix Converter Topology for Inductive Power Transfer System. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 29(8), 4029-4038.
- Bosshard, R., Kolar, J. W., and Wunsch, B. (2014). *Accurate finite-element modeling and experimental verification of inductive power transfer coil design*. Paper presented at the IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Fort Worth, TX, 1648-1653.
- Bosshard, R., Mühlethaler, J., Kolar, J. W., and Stevanović, I. (2013). *Optimized magnetic design for inductive power transfer coils*. Paper presented at the 28th Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 1812-1819.
- Boys, J. T., Covic, G. A., and Green, A. W. (2000). Stability and control of inductively coupled power transfer systems. *IEE Electronics Power Appl.*, 147(1), 37–43.
- Budhia, M., Boys, J.T., Covic, G.A., and Huang, C.Y. (2013). Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(1), 318-328.
- Budhia, M., Covic, G. A., and Boys, J. T. (2011). Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(11), 3096-3108.



- Cheikh, M., Guillaume, V., and Alexandru, T. (2016). *Compliance Assessment of Human Body Exposure to Wireless Power Systems*. Paper presented at the World Congress on EEC and Science, Budapest, Hungary.
- Chen, R., Zheng, C., Zahid, Z.U., Faraci, E., Yu, W., Lai, J. S., Senesky, M., Anderson, D., and Lisi, G. (2014). *Analysis and parameters optimization of a contactless IPT system for EV charger*. Paper presented at the 29th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Fort Worth, TX, 1654-1661.
- Chiang, C. (2013). *Wireless charging system with magnetic field shaping for electric vehicles*. Paper presented at the World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Barcelona, 1-5.
- Choi, S. Y., Huh, J., Lee, W. Y., and Rim, C. T. (2014). Asymmetric Coil Sets for Wireless Stationary EV Chargers with Large Lateral Tolerance by Dominant Field Analysis, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(12), 6406-6420.
- Chopra, S., Bauer, P. (2011). *Analysis and design considerations for a contactless power transfer system*. Paper presented at the IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference, Amsterdam, NL.
- Delmas, A., Omeich, M., and Rioux, C. (1989). *High efficiency inductive energy transfer*. Paper presented at the 7th Pulsed Power Conference, Monterey, CA, 598-601.
- Deng, J., Li, W., Nguyen, T.D., Li, S., and Mi, C.C. (2015). Compact and Efficient Bipolar Coupler for Wireless Power Chargers: Design and Analysis, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(11), 6130 – 6140.
- Diekhans, T., and De Doncker, R.W. (2015). A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(11), 6320 – 6328.
- Eghtesadi, M. (1990). *Inductive power transfer to an electric vehicle-analytical model*. Paper presented at the 40th IEEE Conference on Vehicular Technology, Orlando, FL, 100-104.
- Elliott, G. A. J., Boys, J. T., and Green, A. W. (1995). *Magnetically coupled systems for power transfer to electric vehicles*. Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 95), 1995, pp. 797-801 vol.2.
- Grover, F. W, “Formulas and tables for the calculation of the inductance of coils of polygonal form”, Scientific Papers of the Bureau of Standards, vol. 18, pp.737-762, Aug. 1922.
- Hatchavanich, N., Sangswang, A., and Konghirun, M. (2019). *Effects of Intermediate Coil Position in a Triple-Coil Series-Series Compensation in Wireless Power Transfer*. Paper presented at the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, Japan, 1-5.

- Hatchavanich, N., Sangswang, A., and Konghirun, M. (2019). *Operational Region of Novel Multi-Coil Series-Series Compensation in Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Applications*. Paper presented at the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, Japan, 1-5.
- Houran, A.M., Yang, X., Chen, W. (2018). Magnetically Coupled Resonance WPT: Review of Compensation Topologies, Resonator Structures with Misalignment, and EMI Diagnostics. *Electronics*, 11, 22.
- Huang, C., Boys, J. T., Covic G. A., and Budhia, M. (2009). *Practical considerations for designing IPT system for EV battery charging*. Paper presented at the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, MI, 402-407.
- Huang, Z., Wong, S. C., and Tse, C.K. (2014). *Design methodology of a series-series inductive power transfer system for electric vehicle battery charger application*. Paper presented at the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, 1778-1782.
- Hui, S. Y. R., Zhong, W. X., and Lee, C. K. (2014). A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(9), 4500-4511.
- Hutin, M., Leblanc, M. (1894). Transformer system for electric railways. *US patent 527 857*.
- Ibrahim, M., Pichon, L., Bernard, L., Razek, A., Houivet, J., and Cayol, O. (2015). Advanced Modeling of a 2-kW Series–Series Resonating Inductive Charger for Real Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(2), 421–430.
- IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz Amendment. (2005). *IEEE Std C95*, 1-9.
- Iimura, K., Hoshi, N., and Haruna, J. (2012). *Experimental discussion on inductive type contactless power transfer system with boost or buck converter connected to rectifier*. Paper presented at the 7th IEEE International Conference on Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), Harbin, China, 2652-2657.
- Jayathurathnage, P. K. S., Alphones, A., and Vilathgamuwa, D. M. (2017). Optimization of a Wireless Power Transfer System with a Repeater Against Load Variations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(10), 7800-7809.
- Jow, U. and Ghovanloo, M. (2007). Design and Optimization of Printed Spiral Coils for Efficient Transcutaneous Inductive Power Transmission. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 1(3), 193-202.
- Jow, U., and Ghovanloo, M. (2013). Geometrical Design of a Scalable Overlapping Planar Spiral Coil Array to Generate a Homogeneous Magnetic Field. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(6), 49(6), 2933-2945.

- Joy, E. R., Dalal, A., and Kumar, P. (2014). Accurate Computation of Mutual Inductance of Two Air Core Square Coils with Lateral and Angular Misalignments in a Flat Planar Surface. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(1), 1-9.
- Kalwar, K.A., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., and Horan, B. (2016). Coil Design for High Misalignment Tolerant Inductive Power Transfer System for EV Charging, *Energies*, 9(11), 937.
- Kan, T., Lu, F., Nguyen, T., Mercier, P. P., and Mi, C. C. (2018) "Integrated Coil Design for EV Wireless Charging Systems Using LCC Compensation Topology," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(11), 9231-9241.
- Kan, T., Nguyen, T. D., Wjite, J. C., Malhan, R. K., and Mi, C. (2017). A New Integration Method for an Electric Vehicle Wireless Charging System Using LCC Compensation Topology. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 3(2), 1638-1650.
- Kim, H., Song, C., Kim, D., Jung, D. H., Kim, I., Kim, Y., Kim, J., Ahn, S., and Kim, J. (2016). Coil Design and Measurements of Automotive Magnetic Resonant Wireless Charging System for High-Efficiency and Low Magnetic Field Leakage. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(2), 383-400.
- Kim, J., Son, H., Kim, K., and Park, Y. (2011). Efficiency Analysis of Magnetic Resonance Wireless Power Transfer with Intermediate Resonant Coil, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10, 389-392.
- Kosesoy, Y., Aydin, E., Yildiriz, E., and Aydemir, M. T. (2019). *Design and Implementation of a 1-kW Wireless Power Transfer System for EV Charging*. Paper presented at the IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Sonderborg, Denmark.
- Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., and Soljacic, M. (2007). Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science*, 317(5834), 83-86.
- Lee, C. K., Zhong, W. X., and Hui, S. Y. R. (2012). Effects of Magnetic Coupling of Nonadjacent Resonators on Wireless Power Domino-Resonator Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(4), 1905-1916.
- Lee, J. Y., and Han, B. M. (2015). A Bidirectional Wireless Power Transfer EV Charger Using Self-Resonant PWM. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(4), 1784 – 1787.
- Lee, S., and Lorenz, R. D. (2010). *Development and validation of model for 95% efficiency, 220 W wireless power transfer over a 30cm air-gap*. Paper presented at the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA.
- Lee, S., Huh, J., Park, C., Choi, N. S., Cho, G. H., Rim, C. T. (2010). *On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system*. Paper presented at the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Atlanta, GA, 1598-1601.

- Lin, F. Y., Zaheer, A., Budhia, M., and Covic, G. A. (2014). *Reducing leakage flux in IPT systems by modifying pad ferrite structures*. Paper presented at the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, 1770-1777.
- Lu, W., Dong, Y., Shen, J., and Chen, X. (2019) *Implementation of High-Power & Low-Frequency Resonant Wireless Power Transfer Charging System for Electric Vehicles*. Paper presented at the IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Xi'an, China.
- Mai, R., Zhang, Y., Dai, R., Chen, Y., and He, Z. (2018). A Three-Coil Inductively Power Transfer System with Constant Voltage Output. *Energies*, 11, 673.
- Mohan, S. S., Hershenson, M. del Mar, Boyd, S. P., and Lee, T. H. (1999). Simple accurate expressions for planar spiral inductances. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 34(10), 1419-1424.
- Moon, S., and Moon, G. W. (2015). Wireless Power Transfer System with an Asymmetric Four-Coil Resonator for Electric Vehicle Battery Chargers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(10), 6844-6854.
- Moon, S., Kim, B., Cho, S., Ahn, C., and Moon, G. (2014). Analysis and Design of a Wireless Power Transfer System with an Intermediate Coil for High Efficiency. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 5861-5870.
- Morris, K., "Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance", Witricity Co., 2017.
- Nagendra, G. R., Covic, G. A., and Boys, J. T. (2014). Determining the Physical Size of Inductive Couplers for IPT EV Systems, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3), 571-583.
- Noda, T., Nagashima, T., and Sekiya, H. (2015). *A design of inductively coupled wireless power transfer system with coupling coil optimization*. Paper presented at the IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Osaka, 1-6.
- Noda, T., Nagashima, T., Wei, X., Kazimierczuk, M. K., and Sekiya, H. (2016). *Design procedure for wireless power transfer system with inductive coupling-coil optimizations using PSO*. Paper presented at the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Montreal, QC, 646-649.
- Pashaei, A., Aydin, E., Polat, M., Yıldırım, E., and Aydemir, M. T. (2016). Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri, *EMO Bilimsel Dergi*, 6(11), 1-12.
- Pearce, M. G. S., Covic, G. A., and Boys, J. T. (2019). Robust Ferrite-Less Double D Topology for Roadway IPT Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(7), 6062-6075.
- Rahnamaee, H. R., Madawala, U. K., and Thrimawithana, D. J. (2014). *A multi-level converter for high power-high frequency IPT systems*. Paper presented at the IEEE

5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Galway, 1-6.

- Sahraneshin, S., Ameri, M. H., and Varjani, A. Y. (2013). *A single to three-phase AC/AC cycloconverter for Inductive Power Transfer*. Paper presented at the 4th IEEE International Conference on Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), Tehran, Iran, 389-393.
- Sallan, J., Villa, J. L., Llombart, A., and Sanz, J. F. (2009). Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 56(6), 2140-2149.
- Schumann, P., Blum, O., Eckhardt, J., and Henkel, A. (2014). *High efficient, compact vehicle power electronics for 22kW inductive charging*. Paper presented at the IEEE 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 1-5.
- Sis, S. A., Orta, E. (2018). A Cross-Shape Coil Structure for Use in Wireless Power Applications. *Energies*, 11, 1094.
- Tan, P., Yi, F., Liu, C., and Guo, Y. (2018). *Modeling of Mutual Inductance for Hexagonal Coils with Horizontal Misalignment in Wireless Power Transfer*. Paper presented at the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA.
- Tavakkoli, H., Abbaspour-Sani, E., Khalilzadegan, A., Rezazadeh, G., and Khoei, A. (2016). Analytical study of mutual inductance of hexagonal and octagonal spiral planer coils. *Sensors & Actuators A Physical*, 247, 53-64.
- Tran, D. H., Vu, V. B., and Choi, W. (2018). Design of a High-Efficiency Wireless Power Transfer System with Intermediate Coils for the On-Board Chargers of Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(1), 175-187.
- Umenei, A. E., Schwannecke, J., Velpula, S., and Baarman, D. (2012). Novel Method for Selective Nonlinear Flux Guide Switching for Contactless Inductive Power Transfer. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(7), 2192-2195.
- Villa, J. L., Sallan, J., SanzOsorio J. F., and Llombart, A. (2012). High-Misalignment Tolerant Compensation Topology for ICPT Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2), 945-951.
- Wang, C. S., Covic, G.A. and Stielau, O.H. (2004). Investigating an LCL load resonant inverter for inductive power transfer applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(4), 995-1002.
- Wang, C. S., Stielau, O. H., and Covic, G. A. (2000). *Load models and their application in the design of loosely coupled Inductive power transfer systems*. Paper presented at the IEEE International Conference on Power System Technology, Perth, WA, 1053-1058.

- Wang, C. S., Stielau, O.H., and Covic, G.A. (2005). Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(5), 1308-1314.
- Wang, C.S., Covic, G. A., and Stielau, O. H. (2001). *General stability criterions for zero phase angle controlled loosely coupled inductive power transfer systems*. Paper presented at the IEEE Annual Conf. of the Industrial Electronics Society, Denver, CO, 1049-1054.
- Wang, C.S., Covic, G. A., and Stielau, O. H. (2004). Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 51(1), 148–157.
- Wang, Y., Yao, Y., Liu, X., Xu, D., and Cai, L. (2018). An LC/S Compensation Topology and Coil Design Technique for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(3), 2007-2025.
- Wu, H.H., Gilchrist, A., Sealy, K.D., and Bronson, D. (2012). A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(3), 585-595.
- Xuan, B. N., Vilathgamuwa, D. M., and Madawala, U. K. (2012). *A matrix converter based inductive power transfer system*. Paper presented at the IEEE International Conference on Power Energy (IPEC), Ho Chi City, Vietnam, 509–514.
- Zaheer, A., Kacprzak, D., and Covic, G. A. (2012). *A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications*. Paper presented at the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, 283-290.
- Zhang, W., and Mi, C. C. (2016). Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6), 4768-4778.
- Zheng, C., Ma, H., Lai J. S., and Zhang, L. (2015). Design Considerations to Reduce Gap Variation and Misalignment Effects for the Inductive Power Transfer System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(11), 6108-6119.
- Zhu, G., and Lorenz, R. D. (2017). *Achieving low magnetic flux density and low electric field intensity for an inductive wireless power transfer system*. Paper presented at the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AYDIN, Emrullah  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 09.02.1986, Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (312) 582 33 10  
 e-mail : emrullahaydin@gazi.edu.tr



Eğitim Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi /Elektrik-Elektronik	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Elektrik-Elektronik	2014
Lisans	Fırat Üniversitesi /Elektrik-Elektronik	2009
Lise	İzmir Anadolu Öğretmen Lisesi	2004

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010-2011	Bartın Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Kosesoy, Y., Aydın, E., Yildiriz, E., and Aydemir, M. T. (2019). *Design and Implementation of a 1-kW Wireless Power Transfer System for EV Charging*. Paper presented at the IEEE 13th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Sonderborg, Denmark.

Aydın, E., Kosesoy, Y., Yildiriz, E., and Aydemir, M. T. (2018). *Comparison of Hexagonal and Square Coils for Use in Wireless Charging of Electric Vehicle*



*Battery*. Paper presented at the IEEE 2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, Romania.

Aydın, E., Pashaei, A., Yıldırım, E., Aydemir, M. T. (2018). Elektrikli araçlar için 2.2 kW gücünde bir kablosuz güç aktarım sisteminin tasarımı. *Fırat Üniv. Fen Bilimleri Dergisi*, 30(3), 1-6.

Aydın, E., Celik, M. E., and Aydemir, M. T. (2017). *Investigation the effect of misalignment and distance between the coils for wireless power transfer in retinal implants*. Paper presented at the IEEE 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey.

Pashaei, A., Aydın, E., Polat, M., Yıldırım, E., ve Aydemir, M. T. (2016). Elektrikli araçlar için temassız güç aktarım sistemleri. *EMO Bilimsel Dergi*, 6(11), 1-12.

Aydın, E., Kim, J. H., E. Yildirim, Aydemir, M. T., and Sarlioglu, B. (2016). *A Hybrid-Excited Transverse Flux Permanent Magnet Machine*. Paper presented at the Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI.

Aydın, E., Li, Y., Aydın, I., Aydemir, M. T., and Sarlioglu, B. (2015). *Minimization of torque ripples of interior permanent magnet synchronous motors by particle swarm optimization technique*. Paper presented at the Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Dearborn, MI.

### **Hobiler**

Müzik, seyahat etmek



*GAZİ GELECEKTİR..*