



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ
GÜÇ TRANSFER SARGILARININ
TASARLANMASI VE ANALİZ EDİLMESİ**

Yasin AKÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Eylül-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Yasin AKÜN tarafından hazırlanan “ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER SARGILARININ TASARLANMASI VE ANALİZ EDİLMESİ” adlı tez çalışması 27/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

.....

Danışman

Doç. Dr. Abdülsamed TABAK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Okan UYAR

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Yasin AKÜN

Tarih: 27.09.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER SARGILARININ TASARLANMASI VE ANALİZ EDİLMESİ

Yasin AKÜN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdülsamed TABAK

2024, 69 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Abdülsamed TABAK

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

Dr. Öğr. Üyesi Okan UYAR

Sürdürülebilir bir ulaşım yöntemi olan elektrikli araçlara olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır ve kullanımları yaygınlaşmaktadır. Bu yaygınlaşma araçların zahmetli kablolu şarj istasyonlarında pratikliğe gidilerek fiziksel bağlantı olmadan, kablosuz şarj edebilmeye olan ilgiyi de artırmıştır. Bu durum kablosuz şarj istasyonlarına yönelik çalışma ihtiyacına sebep olmuştur. Kablosuz güç aktarımı birincil taraf ve ikincil taraf olmak üzere iki kısımdan oluşur. Bunlardan birincil kısım sistemin elektrik beslemesinden başlayıp zeminde bulunan sargılara kadar olan kısımdır. İkincil kısım ise aracın altındaki sargılardan başlayarak yükün olduğu kısmı kapsar. Güç aktarımı zeminde bulunan birincil sargı ve aracın altında bulunan ikincil sargı arasındaki elektromanyetik alan sayesinde gerçekleşir. Bu çalışmada 7,3 kW gücünde sistemin birincil ve ikincil sargıları Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı Ansys Electronics programına ait olan Maxwell 3D aracı kullanılarak tasarlanmıştır. Tez kapsamında sargıların iç uzunluklarındaki değişimin güç aktarımında verimi etkileyen faktörlerden birisi olan kuplaj katsayısına etkisi analiz edilmiştir. Sabit tur sayısında sargıların iç uzunluğunu değiştirerek kuplaj katsayısındaki değişimler analiz edilmiştir. Ayrıca sargıların iç uzunluklarının artıp kablo uzunluğu sabit kaldığı durumdaki tur sayılarıyla tasarımlar oluşturularak kuplaj katsayısındaki değişim incelenmiştir. Ek olarak sargı topolojilerindeki değişim, birincil ve ikincil sargı arasındaki mesafe değişiminin kuplaj katsayısına etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlara göre sabit tur sayısında sargıların iç uzunluklarının artması kuplaj katsayısının artmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: elektrikli araç şarjı, kablosuz güç aktarımı, kuplaj katsayısı, sargı tasarımı.

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGN AND ANALYSIS OF WIRELESS POWER TRANSFER WINDINGS FOR ELECTRIC VEHICLES

Yasin AKÜN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHATRONICS ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdülsamed TABAK

2024, 69 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Abdülsamed TABAK

Assoc. Prof. Dr. Barış GÖKÇE

Asst. Prof. Okan UYAR

The interest in electric vehicles, which are a sustainable transportation method, is increasing day by day and their use is becoming widespread. This widespread use has also increased the interest in wireless charging without a physical connection, by going to practicality in difficult wired charging stations of vehicles. This situation has caused the need for work on wireless charging stations. Wireless power transfer consists of two parts, the primary side and the secondary side. The primary part of these is the part starting from the electrical supply of the system to the windings on the ground. The secondary part covers the part where the load is, starting from the windings under the vehicle. Power transfer occurs thanks to the electromagnetic field between the primary winding on the ground and the secondary winding under the vehicle. In this study, the primary and secondary windings of the 7.3 kW system were designed using the Maxwell 3D tool belonging to the Finite Element Method (FEM) based Ansys Electronics program. Within the scope of the thesis, the effect of the change in the internal length of the windings on the coupling coefficient, which is one of the factors affecting the efficiency in power transfer, was analyzed. The changes in the coupling coefficient were analyzed by changing the internal length of the windings at a fixed number of turns. In addition, the changes in the coupling coefficient were examined by creating designs with the number of turns in the case where the internal length of the windings increased and the cable length remained constant. In addition, the effects of the changes in winding topologies and the distance between the primary and secondary windings on the coupling coefficient were analyzed. According to the results, the increase in the internal length of the windings at a fixed number of turns provided an increase in the coupling coefficient.

Keywords: coupling coefficient, electric vehicle charging, winding design, wireless power transfer.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans, hayatımın en önemli tecrübesi haline gelerek pes etmemeyi, özgüveni ve uzunca emek sarf edilen yolculuk sonunda ulaşılan bir durak hissiyatı şeklinde tarif edebilirim. Eğitimde amaç bir durağa varmak değil yolculuğun tam olarak kendisidir. Yolculuk boyunca geçirilen vakitte kazanılan tecrübe ve yaşanan duygu durumları insan hayatına değer katıyor, farklılaştırıyor. Varılan noktayı değerli kılan kazanılan araştırma zevki, bilimsel bilgi birikimi kadar yolculukta yaşanan sevinç, kaygı, mutluluk, belirsizlik, başarı, hayal kırıklığı ve güven gibi hisler insanı bir demir ustasının demiri döverek şekil vermesi gibi manevi bir şekil katıyor olmasıdır. Bu yolculukta başından sonuna hiçbir zaman yardımını esirgemeyen, kıymetli tez fikrini veren ve engin bilgileriyle beni hoşgörüyü karşılayıp her takıldığımda yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. Abdülsamed TABAK'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Ayrıca sadece bu yolculukta değil hayat boyu beni yalnız hissettirmeyen, yaşım ne olursa olsun karşılık beklemeden desteklerini hep arkamda hissettiğim ve yüksek lisans boyunca umutsuzluğa kapıldığımda beni motive ederek tezimi bitirebileceğime ikna eden Ailem'in her bir ferdine teşekkürü bir borç biliyorum. Bu durağın yeni, sağlıklı ve hayırlı bir başka yolculuğa imkan vermesini ümit ediyorum.

Yasin AKÜN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Otomobil Tarihi	1
1.2. Elektrikli Araç Türleri	7
1.2.1. Tam elektrikli araçlar.....	8
1.2.2. Plug-in hibrit elektrikli araçlar.....	8
1.2.3. Hibrit elektrikli araçlar.....	8
1.2.4. Yakıt hücreli elektrikli araçlar	8
1.3. Elektrikli Araçların Şarj Edilme Şekilleri.....	8
1.3.1. Batarya değiştirme	9
1.3.2. Kablolü şarj	9
1.3.3. Kablosuz şarj.....	10
1.4. Kablosuz Şarjın Tarihi	10
1.5. Kablosuz Şarjın Kullanım Alanları.....	12
1.5.1. Tüketici elektroniği.....	12
1.5.2. Tıp sektörü	12
1.5.3. Otomotiv sektörü	12
1.5.4. Endüstriyel uygulamalar	13
1.5.5. Savunma sanayi	13
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	14
2.1. Kablosuz Güç Aktarımında Standartlar	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1. KGA Sistemi ve Materyalleri	19
3.1.1. Litz teli.....	20
3.1.2. Ferrit.....	20
3.1.3. Plaka.....	21
3.2. KGA Türleri.....	22
3.2.1. Statik kablosuz güç aktarımı.....	22
3.2.2. Dinamik kablosuz güç aktarımı	22
3.3. KGA Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	23
3.3.1. Kapasitif kuplaj	23
3.3.2. Endüktif kuplaj	24

3.3.3. Rezonans endüktif kuplaj.....	24
3.3.4. Ultrasonik.....	24
3.3.5. Lazer	25
3.3.6. Radyo frekansı	26
3.3.7. Mikrodalga.....	26
3.4. Basit Kompanzasyon Topolojileri	27
3.4.1. Seri-Seri kompanzasyon topolojisi	28
3.4.2. Seri-Parelel kompanzasyon topolojisi	29
3.4.3. Paralel-Seri kompanzasyon topolojisi	29
3.4.4. Paralel-Paralel kompanzasyon topolojisi.....	29
3.5. Kuplaj Katsayısı.....	29
3.6. Sargı Topolojileri	30
3.6.1. Dairesel sargı topolojisi	30
3.6.2. Kare sargı topolojisi.....	31
3.7. KGA Sistem Tasarım Hesaplamaları.....	31
3.7.1. Sargı uzunluk hesaplamaları	31
3.7.2. Öz endüktansın hesaplanması	33
3.7.3. Karşılıklı endüktansın hesaplanması	33
3.7.4. Eşdeğer yük direncinin hesaplanması.....	34
3.7.5. Optimum rezonans frekansın hesaplanması (f_0)	34
3.7.6. Birincil kapasitans C_1 ve ikincil kapasitans C_2 hesaplanması.....	34
3.7.7. Eşdeğer devrenin toplam empedansı Z_1 'in hesaplanması	34
3.7.8. Birincil kapasitans voltajı V_{C1} ve ikincil kapasitans voltajı V_{C2} 'nin hesaplanması	35
3.7.9. Birincil sargı Q_p ve ikincil sargı Q_s 'nin kalite faktörünün hesaplanması....	35
3.8. Ansys Maxwell	35
3.8.1. Sargı tasarımı	36
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	41
4.1. Dairesel Sargı Analizleri.....	45
4.2. Kare Sargı Analizleri	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	64
5.1 Sonuçlar	64
5.2 Öneriler	64
6. KAYNAKLAR	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- M** : Ortak Endüktans
k : Kuplaj (Bağlantı) Katsayısı

Kısaltmalar

- EV** : Electric Vehicle
HEV : Hybrid Electric Vehicles
BEV : Battery Electric Vehicles
PHEV : Plug-in Hybrid Electric Vehicles
FCEV : Fuel Cell Electric Vehicles
CCS : Combined Charging System
KGA : Kablosuz Güç Aktarımı
SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi
WPC : Wireless Power Consortium
AFA : AirFuel Alliance
SAE : Society of Automotive Engineers
ISO : International Organization for Standardization
JASO : Japanese Automotive Standards Organization
Qi : Endüktif Güç Standartı
RF : Radyo Frekansı
EMI : Elektromanyetik Girişim
DC : Direct Current
AC : Alternating Current

1. GİRİŞ

1.1. Otomobil Tarihi

Otomobil, Fransızca'da auto (kendiliğinden) ve mobile (hareketli) kelimelerinin birleştirilmesiyle oluşturulan automobile sözcüğünün Türkçeye çevrilmiş halidir. Çoğu bilim insanına göre Da Vinci'nin kendi kendine hareket eden vagonu ilk otomobil olarak kabul edilsede bazı bilim insanları düşünce aşamasında kalması, yayı geren gücün insan veya hayvan gücü olması gibi birtakım sebeplerden dolayı kabul etmemektedir. Gücünü insan veya hayvan dışındaki enerji kaynaklarından elde ederek tekerleri üzerinde ilerleyen her kara ulaşım aracı otomobil olarak tanımlanır. Otomobillere hareket kabiliyeti kazandıran ana bileşen olan motorların elektrikli yada içten yanmalı olmasının rekabeti otomobillerin ilk ortaya çıkış yıllarına dayanmaktadır. İlk elektrikli araba 1834'de Thomas Davenport tarafından yapılmıştır. Fardier, Otto ve diğerleri tarafından çeşitli buharla çalışan otomobil motorları geliştirip içten yanmalı motorlara öncülük etsede benzinle çalışan içten yanmalı motora sahip ilk otomobil 1885'de Karl Benz tarafından yapılmıştır. Daha sonra Daimler ve Maybach daha büyük ve daha verimli modern motorların habercisi 4 zamanlı motor tasarlamışlardır. Bu gelişmelere rağmen 1900 yılına gelindiğinde elektrik motorlu otomobillerin sayısı diğer tip motora sahip otomobillerin sayısından fazla durumda olduğu belirtilmiştir. Ancak iki tip motor arasındaki farkı açan en önemli gelişme 1908'de Şekil 1.1'de gösterilen ilk seri üretim otomobili Ford Model T ile olmuştur.



Şekil 1.1. 1908'de üretilen Ford Model T.

Ford seri üretim otomobillerinde içten yanmalı motorları kullanmayı tercih etmiştir. Ford'un fabrikası 1913'te günde 1000 otomobil üretme kapasitesinde olduğu belirtilmiştir. Bu kapasiteyle üretilen içten yanmalı motora sahip otomobiller hızla dünya geneline yayılarak üne kavuşmuştur. Öbür taraftan Baker, Bailey ve Detroit gibi elektrikli arabalar üretilmiş olsa da henüz o yıllarda batarya teknolojisinin gelişmiş olmamasından dolayı bataryaların enerji depolama kapasiteleri düşük durumdaydı. Dolayısıyla elektrikli otomobiller için düşük menzil dezavantajı söz konusuydu. Şekil 1.2'de Baker'in elektrikli aracı gösterilmiştir.



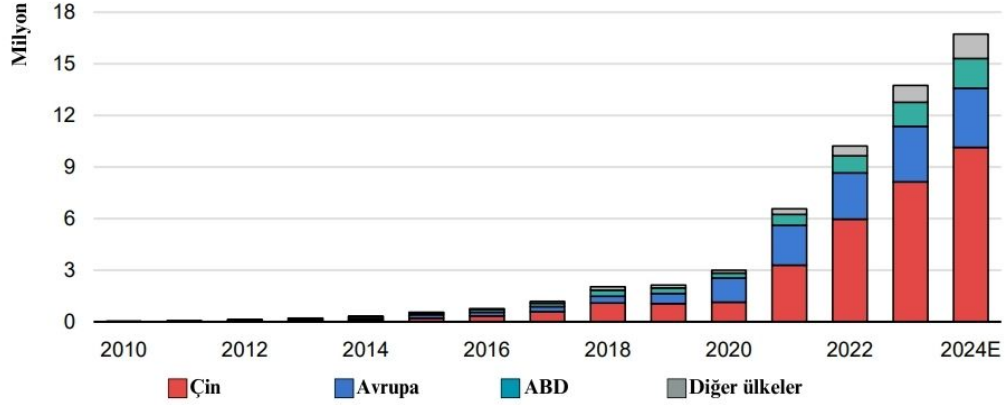
Şekil 1.2. 1912 model Baker elektrikli otomobil.

Her ne kadar elektrik tahrikli motora sahip otomobiller önceleri daha yaygın olsa da içten yanmalı motor teknolojisindeki ilerlemeler ve fosil yakıt kullanan araçların ucuz seri üretimi doğrultusunda iki motor tipi arasında fosil yakıtlı içten yanmalı motora sahip otomobiller elektrikli motora sahip otomobillerin yerini almıştır. O zamandan günümüze akaryakıt tüketen içten yanmalı motorlara sahip otomobillerin sayısı giderek artmıştır. Bu otomobiller çevreye karbon bileşenleri bakımında yüksek gazların salınımı yaparak atmosferde sera etkisine sebep olmaktadır. Bu durum da dünyamızın en ehemmiyet teşkil eden problemi olan küresel ısınmayı artırmaktadır. Elektrikli otomobiller içten yanmalı motora sahip otomobillere göre daha çevrecidir. Her ne kadar elektrik üretimi kömür gibi fosil enerji kaynaklarından gerçekleştiği takdirde karbon salınımı meydana gelse de küresel çapta elektrik üretiminde meyil temiz enerji kaynaklarına doğru yönelmiştir. 2021'de tüm temiz enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi dünya elektriğinin %38'ini karşılayarak %36'sına denk gelen kömürü geçmiştir (Özbektaş et al., 2023). Ülkemizde 2024 yılı Ocak ayı sonu itibariyle elektrik enerjisi üretiminde kurulu güç bir

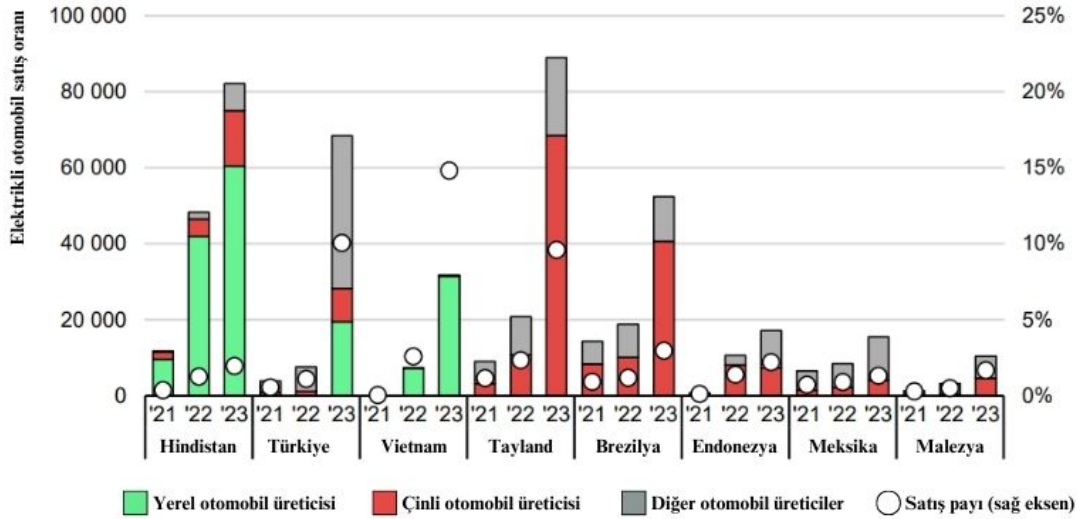
önceki yıla göre %3,11 artarak 107.270 MW'a ulaşmakla beraber kurulu gücün kaynaklara göre dağılımında yenilenebilir kaynak türüne sahip kurulu güçte %5,79'luk artış yaşanmış, kömür kaynağına ait kurulu güçte değişme yaşanmamıştır. Elektrik üretimimizdeyse toplam yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisi bir önceki yıla göre %80,12 artış göstermiştir (EPDK, 2024). Görüldüğü gibi elektrik üretiminde ülkemizde ve Dünya genelinde temiz kaynaklara yönelinmiştir. Son yıllarda uluslararası camiada devletlerin, Paris Anlaşması gibi Avrupa'da ve Dünya genelinde ortaya koyduğu çevreyi korumaya yönelik politika ve anlaşmalar minvalinde, koyulan hedeflere ulaşmada elektrikli araçların önemli bir rol alacağı, yapılan vergi indirimleri, çeşitli muafiyetler ve avantajlı teşviklerden anlaşılmaktadır (Gündüz & Yakar, 2020). Yapılan çalışmalarda bilinen rezervler göz önüne alındığında Dünyadaki petrol rezervlerinin 50 yıl sonra tükeneceği öngörülmüştür (Közkurt et al., 2020). Azalan rezervlerse akaryakıt fiyatlarını artırarak ulaşımdaki birim maliyeti artırmaktadır. Fosil yakıtların kısıtlı olduğu ve bir gün tükeneceği gerçeği elektrikli otomobillerle alakalı yapılan çalışmaları değerli kılmaktadır. Diğer taraftan içten yanmalı motorlar elektrik motorlarına kıyasla verimsiz ve bakım gereksinimleri fazladır (Gürbüz & Kulaksız, 2016). İçten yanmalı motorlarda gerçekleşen yanma faaliyetinden kaynaklı, mekaniksel parçaların hareketleri esnasındaki sürtünmeden kaynaklı ve egzoz aksesuarı gibi aksesuarlardan kaynaklı insanın yaşam kalitesini düşürecek gürültü kirliliği meydana gelir (Raşidova, 2003; Sarıdemir et al., 2016). Tam aksine elektrikli ve hibrid araçların neredeyse sessiz çalışmasından dolayı ABD'de yayaların, bisikletlilerin ve diğer yol kullanıcılarının EV ve HEV'lerin düşük hızlarda seyrederken fark edebilmesini kolaylaştırmak amacıyla araçların karşılaması gereken minimum ses seviyesi zorunluluğu getirilmiştir (Federal Register, 2018). Elektrikli otomobil üreticileriye bu ses seviyelerini karşılamak için yapay ses kullanmaktadır (Bazilinsky et al., 2023; Villegas, 2023).

2000'li yılların ortalarından itibaren batarya ve güç yönetimi teknolojilerindeki ilerlemeler, değişken petrol fiyatları ve sera gazı azaltma gereksinimi elektrikli otomobilleri yeniden gündeme getirerek elektrikli araçlar için üretici ve alıcı arasında artan arz-talep ilişkisini oluşturmuştur. 2022 yılında Çin'deki elektrikli araç satışları bir önceki yıla göre %82 arttığı belirtilmiştir (Ellerbeck, 2023). 2023'te küresel çapta elektrikli otomobil satışı 14 milyona yaklaşarak satılan tüm otomobillerin %18'ine ulaştı (IEA, 2024). 2024'ün ilk çeyreğinde elektrikli otomobil satışları, 2023'ün ilk çeyreğine göre yaklaşık %25 arttı (IEA, 2024). 2023 yılında tüm dünyadaki elektrikli otomobil

satışlarının %60'ı Çin'de, %25'i Avrupa'da, %10'u ABD'de gerçekleşmiştir (IEA, 2024). Şekil 1.3 ve şekil 1.4'de elektrikli otomobil satışlarıyla alakalı bilgiler verilmiştir.



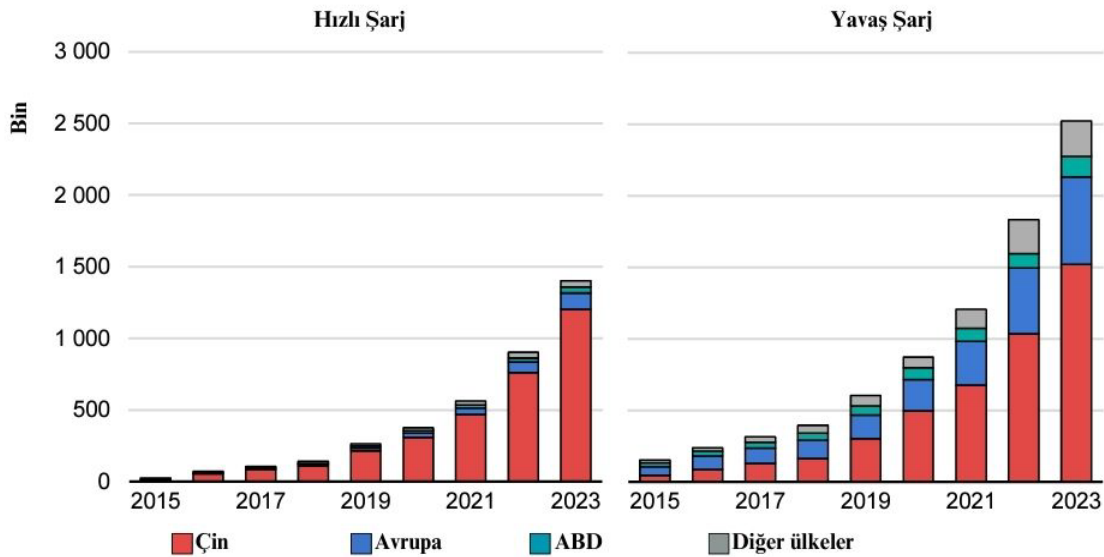
Şekil 1.3. Ülkelerin yıllara göre elektrik otomobil satış grafiğidir. 2024 yılı ilk çeyreğindeki verilere dikkate alınarak yapılmıştır (IEA, 2024).



Şekil 1.4. 2021-2023 yılları arasında elektrikli otomobil üreticisine göre bazı ülkelerdeki satışlar(IEA, 2024).

Ernst&Young ve Eurelectric işbirliğiyle hazırlanan raporda teknolojiye yaşanacak gelişmeler, üretim sayısındaki artış ve ikinci el elektrikli otomobiller müşteriler için daha hesaplı hale geleceğinden elektrikli otomobillere ilginin artacağı ve 2030 yılında Avrupa'da yaklaşık 75 milyon elektrikli aracın yollarda olacağı tahmin ediliyor (EY and Eurelectric, 2024). Zero Carbon Academy'nin yaptığı Global Electric Vehicles & Charging Infrastructure Insights araştırma raporu, 2028'e kadar yollarda 100 milyon ek elektrikli araç olmasının beklendiğini ancak 40 milyon yeni şarj istasyonu kurulacağı ve

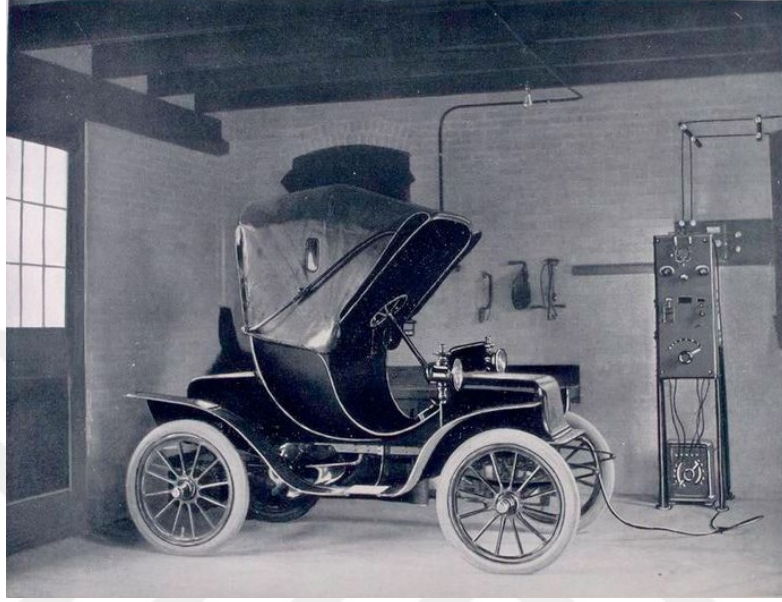
bunların toplamda sadece 16 milyon kamuya açık şarj istasyonunun işletimde olacağını, üçte ikisinden fazlasının ev tipi şarj istasyonu olacağı belirtilmektedir. Ayrıca raporda elektrikli otomobil satışları artmaya devam edecek olsa da, kamuya açık alanda şarj istasyonlarının düşük sayıda seyredecek olmasının halkın şarj istasyonlarına ulaşımının zor olacağı apartman dairelerinin yoğun olduğu bölgelerde elektrikli araçların benimseme oranının düşük olacağı savunulmaktadır (*Electric Vehicles & Charging Infrastructure*, 2024). Kamuya açık şarj noktalarının sayısının artırılması, kullanımlarının kolay olması, fiyatlandırılmasının uygun ve şeffaf olması, elektrikli araç sahiplerinin günlük yaşamlarını kolaylaştırırken, daha fazla insanın elektrikli araçlara geçişini teşvik edecektir. Elektrikli araç satışının en yoğun olduğu Çin’de kamuya açık şarj stoğu %45 ile kamuya açık şarjın en yoğun kullanıldığı ve evde şarjın erişiminin en sınırlı olduğu yerdir (IEA, 2024). Şekil 1.5’te bazı ülkelerin kurulu şarj istasyon seviyeleri verilmiştir.



Şekil 1.5. 2015-2023 yılları arasında güç derecesine ve bölgelere göre kurulu şarj istasyonu (IEA, 2024)

Devletler kamusal şarj istasyonlarındaki eksikliğin giderilmesi adına peşi sıra yatırımlarını açıklamaktadırlar. ABD’de hükümet kamusal şarj alanlarındaki açığı kapatmak için sunulan 50 milyon dolarlık projelerle 2030 yılına kadar 500.000 yeni şarj istasyonu kurmayı hedefliyor. Birleşik Krallık, 2030 yılına kadar en az 300.000 kamuya açık şarj cihazının kurulmasını bekliyor. Japonya 2030’a kadar 150.000 şarj noktası ilave etmeyi amaçlamaktadır. Aynı zamanda, şarj altyapısının sürdürülebilir ve erişilebilir olması bununla beraber hızlı şarj istasyonlarının yaygınlaşması elektrikli araçların yaygınlaşmasını destekleyen kritik bir faktördür. Kurulan şarj istasyonlarının kullanım kolaylığı daha fazla insanın elektrikli araçlara geçişini teşvik edecektir. Günümüzde

elektrikli otomobiller şarj istasyonlarındaki enerji aktarım kablolarının soketleri otomobillerin soket girişlerine bağlanmasıyla şarj edilmektedir. Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’de elektrikli bir aracın şarj istasyonundan araca kablonun ucunda bulunan soket kısmının elektrikli aracın soket girişine bağlanmış durumu gösterilmektedir.



Şekil 1.6. 20. yüzyıla ait fotoğrafta elektrikli aracın kablolu şarj edilişi gösterilmektedir.

Şekillerden yola çıkarak geçen bir yüzyıla ve yaşanan birçok teknolojik gelişmeye rağmen her ne kadar teknik altyapısında değişiklikler olsa da elektrikli araçların şarj ediliş biçimleri kabloyla sınırlı kaldığı ve bu konuda aşama kaydedilemediği görülmektedir.



Şekil 1.7. 21. yüzyıla ait fotoğrafta elektrikli aracın kablolu şarj edilişi gösterilmektedir.

Kablosuz şarj istasyonları, elektrikli otomobil kullanıcılarının araçlarını şarj etmeleri için pratik ve kolay bir yöntemdir. Elektrikli otomobil sahipleri, sadece araçlarını şarj bölgesine park etmeleri aracın şarj edilmesi için yeterli olup herhangi bir fiziksel bağlantı kurmalarına gerek kalmamaktadır. Şekil 1.8’de de gösterildiği gibi kabloların takılması veya çıkarılması gibi işlemleri yapmadan şarj işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Yerde bulunan birincil sargıdan otomobilin alt kısmında bulunan ikincil sargıya güç aktarımı temassız gerçekleşerek batarya şarj olabilecektir. Sistemin her iki tarafında da gücü belirli formatlarda çevirecek elektronik bileşenler bulunacak olsa da son kullanıcı açısından bakıldığında ek bir efor sarf etmeden otomobilini şarj edebilir durumda olacaktır. Kablosuz şarj istasyonları kullanıcılar açısından elektrikli otomobilin kullanımını kolaylaştıracak ve bu durum daha fazla insanın elektrikli otomobile yöneltecektir.



Şekil 1.8. Elektrikli bir aracın kablosuz şarj işleminin gerçekleşmesi gösterilmektedir.

Bu teknoloji sadece otomotiv sektöründe değil aynı zamanda tüketici elektroniğinde, sağlık sektöründe ve savunma sanayinde de kullanım alanları vardır.

1.2. Elektrikli Araç Türleri

Elektrikli araçlar, çevre dostu bir ulaşım seçeneği sunarak, fosil yakıtların kullanımını azaltmaya ve karbon salınımını düşürmeye yönelik önemli bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Elektrikli araçlar, güç kaynaklarına göre sınıflandırıldıklarında birkaç temel kategoriye ayrılabilir.

1.2.1. Tam elektrikli araçlar

Bu araçlar tamamen elektrikle çalışır ve enerji kaynağı olarak yalnızca büyük kapasiteli lityum-iyon veya benzeri bataryalar kullanır. BEV'ler, içten yanmalı motorlara sahip olmadığından egzoz emisyonları üretmezler. En bilinen örnekleri TOGG T10X, Tesla, Nissan Leaf ve BMW i3 gibi modellerdir.

1.2.2. Plug-in hibrit elektrikli araçlar

PHEV'ler, hem bir elektrikli motor hem de bir içten yanmalı motor içerir. Araç, bataryası tamamen elektrikle şarj edildiğinde belirli bir mesafeye kadar elektrikle çalışabilir; batarya boşaldığında ise içten yanmalı motor devreye girer. PHEV'ler, bataryaları şarj edilebilen hibrit araçlar olarak konvansiyonel hibrit araçlardan ayrılırlar. Örnek olarak Mitsubishi Outlander PHEV verilebilir.

1.2.3. Hibrit elektrikli araçlar

HEV'ler, içten yanmalı motoru ve elektrik motorunu birlikte kullanır, ancak bataryalarını harici bir kaynaktan şarj edemezler. HEV'ler frenleme sırasında enerji geri kazanım sistemi (rejeneratif frenleme) ile bataryayı şarj eder ve yakıt verimliliğini artırır. Toyota Prius, HEV'lere bir örnektir.

1.2.4. Yakıt hücreli elektrikli araçlar

FCEV'ler, hidrojen yakıt hücrelerini kullanarak elektrik üretir ve bu elektrik, elektrik motorunu çalıştırır. Bu araçlar, egzoz gazı olarak yalnızca su buharı yayar. FCEV'ler, BEV'lere göre daha uzun menzile sahip olabilir ve hidrojen dolun istasyonlarının yaygınlığı ile avantaj sağlar. Toyota Mirai ve Hyundai Nexo bu kategoriye örnek olarak gösterilebilir.

1.3. Elektrikli Araçların Şarj Edilme Şekilleri

Elektrikli araçların şarj edilmesi, enerji depolayan bataryaların çeşitli şarj yöntemleriyle doldurulmasını ifade eder. Elektrikli araçların şarj edilme yöntemleri

araçların verimli ve güvenli bir şekilde enerji depolamasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Elektrikli araçların şarj edilme yöntemleri, temelde üç ana kategoriye ayrılmaktadır: batarya değiştirme (QuickDrop), kablosuz (endüktif) şarj ve kablolu şarj.

1.3.1. Batarya değiştirme

Batarya değiştirme yöntemi, boş bataryanın dolu bir batarya ile değiştirilmesi esasına dayanır. Bu yöntem, özellikle zaman tasarrufu sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Örneğin, NIO markası, Çin’de bu yöntemi kullanarak batarya değişim istasyonları kurmuştur.

1.3.2. Kablolu şarj

Kablolu şarj, en yaygın kullanılan şarj yöntemidir ve Seviye 1 (AC Yavaş Şarj), Seviye 2 (AC Orta Hızlı Şarj) ve Seviye 3 (DC Hızlı Şarj) olmak üzere üç farklı seviyede gerçekleştirilir. Her bir şarj yöntemi, farklı hız, maliyet ve kullanım senaryolarına göre avantaj ve dezavantajlar sunar.

Seviye 1, standart ev prizleri kullanılarak yapılan bu şarj yöntemi, düşük güçte (120V) çalışır ve genellikle uzun süreli park durumlarında tercih edilir. Seviye 2, özel şarj istasyonları kullanılarak yapılan bu yöntem, 240V güç sağlar ve daha hızlı şarj imkanı sunar. Örneğin, Tesla’nın ev tipi Wall Connector cihazı bu kategoriye girer. Seviye 3, yüksek güçlü DC hızlı şarj istasyonları kullanılarak yapılan bu yöntem, kısa sürede yüksek miktarda enerji sağlar. CHAdeMO ve CCS bu tür şarj için yaygın olarak kullanılan standartlardır. Kablolu şarj edilme şeklinde irdelenmesi gereken bir başka konuya konnektör türleridir. Elektrikli araçların şarj edilmesinde kullanılan konnektörler, şarj istasyonları ile araçlar arasında bağlantı sağlanması için kullanılmaktadır.

Tip 1 (SAE J1772), Kuzey Amerika ve Japonya’da yaygın olarak kullanılan bu konnektör, genellikle Seviye 1 ve Seviye 2 şarj için uygundur. Nissan Leaf, bu konnektörü kullanan araçlara örnek olarak verilebilir.

Tip 2 (Mennekes), Avrupa’da standart olarak kabul edilen Type 2 konnektör, hem AC hem de DC şarj için kullanılabilir ve birçok kamuya açık şarj istasyonunda bulunur. TOGG T10X, BMW i3 ve Renault Zoe gibi araçlar bu konnektörü kullanır.

CHAdEMO, Japonya merkezli olarak geliştirilen CHAdEMO konnektörü, hızlı şarj desteği sunar ve genellikle DC kullanarak şarj yapar. Bu konnektör, Nissan Leaf ve Mitsubishi i-MiEV gibi araçlarda kullanılır. CHAdEMO, yüksek şarj hızlarıyla özellikle kamuya açık hızlı şarj istasyonlarında tercih edilir.

CCS, Hem AC hem de DC şarjı destekleyen bu konnektör, Avrupa ve Kuzey Amerika'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Volkswagen ID.4 ve BMW i3 gibi araçlar bu konnektörü kullanır.

Tesla Supercharger, Teslanın kendi elektrikli araçları için özel olarak tasarladığı ağa sahiptir. Bu sistem, Tesla araçlarına özgü bir konnektör kullanarak yüksek hızlı DC şarj sağlar. Ancak Tesla, Avrupa'daki modelleri için Tip 2 ve CCS konnektörlerine de uyumluluk sağlamaktadır.

1.3.3. Kablosuz şarj

Kablosuz şarj, aracın zemin üzerine yerleştirilmiş endüktif bir elektrik alanına park edilmesiyle gerçekleşir. Bu yöntem, şarj kablosu taşıma ihtiyacını ortadan kaldırır ve kullanıcıya büyük kolaylık sağlar. Örneğin, Qualcomm'un Halo sistemi, bu teknolojiyi kullanarak araçların kablosuz şarj edilmesini mümkün kılmaktadır.

1.4. Kablosuz Şarjın Tarihi

Kablosuz şarj teknolojisi, elektromanyetik indüksiyon ilkesine dayanarak enerjiyi kablo kullanmadan aktarma fikri ile geliştirilmiş bir teknolojidir. Elektrikli araçlarda da bu teknoloji, araçların kablosuz olarak şarj edilebilmesi için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Kablosuz şarjın tarihçesi, 19. yüzyıldan günümüze kadar uzanan önemli gelişmelerle şekillenmiştir. Kablosuz enerji transferinin temeli, Michael Faraday'ın 1831'de yaptığı elektromanyetik indüksiyon keşfiyle atılmıştır. Faraday, bir manyetik alan değişiminin elektrik akımı üretebileceğini göstermiştir. Bu keşif, modern elektrik ve elektromanyetik teknolojilerin temel taşlarından biri haline gelmiştir. Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasası, elektrikli motorların ve jeneratörlerin temel prensiplerini oluşturmuş, aynı zamanda kablosuz enerji aktarımı teorisinin de öncüsü olmuştur. Nikola Tesla, 1891 yılında New York'taki Columbia Üniversitesi'nde gerçekleştirdiği deneyler ile kablosuz enerji transferi konusunda önemli adımlar atmıştır. Tesla, radyo dalgalarını kullanarak enerji transfer edilebileceğini öne sürmüştü ve Tesla bu

fikri pratiğe dökmüştür. Tesla'nın vizyonu, kablosuz elektrik dağıtımı ile dünya çapında enerji sağlayabilmektir. Ancak o dönemdeki teknik sınırlamalar nedeniyle bu fikir yaygınlaşmamıştır. Tesla'nın Long Island'da kurduğu Wardencllyffe Kulesi, atmosferde enerji transferi yapmayı hedefleyen bir projeydi. Ancak mali sorunlar ve teknolojik sınırlamalar nedeniyle bu proje başarıya ulaşmamıştır. 1960'lı yıllardan itibaren kablosuz enerji transferi, özellikle uzay teknolojileri alanında araştırılmaya başlanmıştır. Bu dönemde, elektromanyetik indüksiyon ve manyetik rezonans kullanılarak düşük güçlü cihazların kablosuz şarj edilmesi mümkün hale gelmiştir. Kablosuz şarj teknolojisi, ilk olarak küçük elektronik cihazlarda, özellikle cep telefonlarında uygulanmaya başlamıştır. 2000'li yılların başında, Qi standardı ile bu teknoloji yaygınlaşmıştır. 2008 yılında WPC, Qi standardını tanıtarak, kablosuz şarj cihazları için ortak bir protokol oluşturmuştur. Bu standart, cep telefonları, tabletler ve diğer küçük elektronik cihazlar için yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir.

2010'lu yıllarda, kablosuz şarj teknolojisi elektrikli araçlar için geliştirilmeye başlanmıştır. Bu dönemde, araçların park edildikleri alanlarda kablosuz şarj olabilmeleri için elektromanyetik indüksiyon ve manyetik rezonans teknolojileri üzerinde önemli çalışmalar yapılmıştır. Plugless Power ve WiTricity gibi şirketler, elektrikli araçlar için kablosuz şarj sistemleri geliştirerek bu teknolojinin yaygınlaşmasına katkı sağlamıştır. 2014 yılında BMW ve Mercedes-Benz, elektrikli araç modelleri için kablosuz şarj teknolojisi geliştirmek adına çeşitli prototipler sunmuş ve bu sistemleri araçlarına entegre etmiştir. Hyundai Kona Electric ve Mercedes-Benz S560e gibi modeller, kablosuz şarj teknolojisiyle donatılan ilk araçlardan bazılarıdır. 2020'li yıllarla birlikte, kablosuz şarj teknolojisi ticari olarak kullanılmasının denemeleri başlamıştır. Elektrikli araçların kablosuz şarj edilebilmesi, özellikle şehir içi kullanımda büyük avantajlar sunmaktadır. Otoparklarda ve özel alanlarda kablosuz şarj pedlerinin yerleştirilmesi ile sürücüler, araçlarını park ederken şarj edebilme imkanına sahip olmuştur. Bu teknoloji, gelecekte otonom araçlarla birleştirilerek tam otomatik şarj sistemlerine dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Kablosuz şarj teknolojisi, tarih boyunca çeşitli evrelerden geçerek günümüzde elektrikli araçlar gibi büyük enerji ihtiyaçlarına sahip sistemlerde kullanılabilir seviyeye gelmiştir. Hem teorik hem de teknolojik olarak büyük ilerlemeler kaydedilmiş, özellikle otonom araçlar ve şehir içi kullanımda büyük kolaylık sağlayacak çözümler sunulmuştur.

1.5. Kablosuz Şarjın Kullanım Alanları

Kablosuz şarj teknolojisi, elektrikli cihazların kablo kullanmadan enerji transferini sağlayan bir sistemdir. Temel olarak elektromanyetik indüksiyon prensibine dayanır ve son yıllarda çeşitli elektronik cihazlarda kullanım bulmuştur. Bu teknoloji, hem kullanıcı deneyimini iyileştirmek hem de cihazların şarj edilme şeklini değiştirmek amacıyla gelişmiş ve yaygınlaşmıştır.

1.5.1. Tüketici elektroniği

Mobil cihazlar, kablosuz şarj teknolojisinin en yaygın kullanım alanlarından biridir. Akıllı telefonlar, tabletler ve akıllı saatler gibi cihazlar, kablosuz şarj sayesinde kullanıcılarına büyük bir kolaylık sağlar. Bu teknoloji, kullanıcıların cihazlarını kabloya ihtiyaç duymadan şarj etmelerine olanak tanır. Özellikle Qi standardı, birçok üretici tarafından benimsenmiş ve cihazların geniş bir yelpazede uyumlu olmasını sağlamıştır. Bu, kullanıcılar için cihaz şarjını kolaylaştıran bir çözüm sunmakta ve aynı zamanda şarj cihazı karmaşasını da azaltmaktadır.

1.5.2. Tıp sektörü

Kablosuz şarj, medikal cihazlar için de önemli bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle kalp pilleri gibi implante edilebilir cihazlar ve taşınabilir medikal ekipmanlar, kablosuz şarj sayesinde daha güvenli ve kullanışlı hale gelir. Bu teknoloji, cihazların steril kalmasını sağlar ve enfeksiyon riskini azaltır. Kablosuz şarjın tıp alanında kullanılması cerrahi müdahalelere olan ihtiyacı azaltarak hasta konforunu artırır ve yaşam kalitesini iyileştirir. Ayrıca, hastanelerde kullanılan taşınabilir tıbbi ekipmanlar da kablosuz şarj teknolojisinden faydalanarak sürekli kullanılabilir durumda olmasını sağlayacaktır.

1.5.3. Otomotiv sektörü

Elektrikli araçların artan popülaritesi ile kablosuz şarj teknolojisi otomotiv sektöründe de önemli bir yer edinmiştir. Kablosuz araç şarj sistemleri, araçların doğrudan bir kablo bağlantısına ihtiyaç duymadan şarj edilebilmesini sağlar. Bu teknoloji, park alanlarına entegre edilerek araç sahiplerine daha fazla esneklik sunar. Ayrıca, kablosuz

şarj sistemlerinin gelişimiyle birlikte, araçların sadece durağan şekilde değil hareket halinde de şarj edilebileceği yapılan çalışmalarda gösterilmiş ve örnek uygulamalar hayata geçirilmiştir. Bu durum şehir içi ulaşım ağları ve otonom araçlar için önemli bir gelişim alanıdır.

1.5.4. Endüstriyel uygulamalar

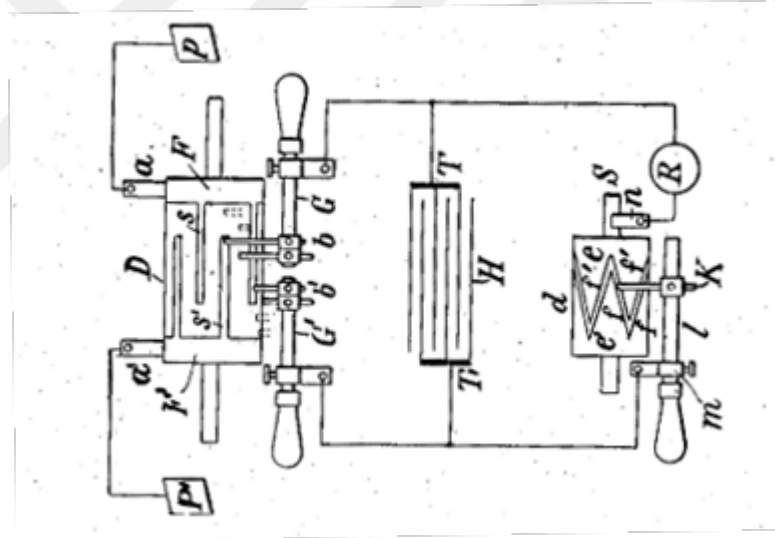
Endüstriyel otomasyon ve robotik sistemlerde kablosuz şarj, operasyonel verimliliği artırır. Örneğin, fabrika robotları ve otomatik yönlendirmeli araçlar, kablosuz şarj yolları sayesinde kesintisiz çalışabilecektir. Bu durum üretim süreçlerinde duraksamaları minimize eder.

1.5.5. Savunma sanayi

İnsansız hava araçları, görev sürelerini uzatmak ve operasyonel verimliliği artırmak için kablosuz şarj teknolojisinden faydalanabilir. İnsansız hava araçları belirli noktalarda kablosuz şarj istasyonlarına inerek hızlı bir şekilde şarj olabilecek ve böylece görevlerini daha verimli icra edebileceklerdir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kablosuz güç aktarımı, elektrik enerjisini iki iletken arasında birbirine fiziksel bir temas olmadan hava vb. bir boşluk üzerinden iletilmesidir. Elektrik gücünü kablosuz olarak aktarma fikri gündelik yaşantımıza son yıllarda girmeye başlamış olsada tarihçesi geçtiğimiz yüzyıllara dayanmaktadır. İlk olarak konuyla alakalı Maxwell 1873'te elektromanyetik enerjinin boş uzayda iletimi için denklemler önermiştir. 1885 ile 1889 yılları arasında Hertz, Maxwell'in tahminlerini ve elektromanyetik radyasyonun varlığını doğrulamak için bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Nikola Tesla tarafından 19. Yüzyılın sonlarında mikrodalga sinyallerini 48 kilometrelik bir mesafeye iletti. Ayrıca şekil 2.1'de gösterildiği gibi Tesla iki metal plakayı birbirine yakın konumlandırarak bu iki plaka arasında yüksek frekanslı Alternatif Akım geçirmiş ve ampüle yük aktarmayı başarmıştır (Tesla, 1905).



Şekil 2.1. Tesla'nın kablosuz güç aktarma sisteminin gösterimidir.

1970'lerde Glaser tarafından güneş ışığı enerjisini güneş pilleri vasıtasıyla toplayarak Dünya'ya mikrodalgalarla gönderen güneş enerjisi uydusu konseptini ortaya koymuştur. Colorado'da kablosuz şarj için kayda değer gelişim noktası, ünlü Amerikan üniversitesi MIT ile işbirliği içinde olan WiTricity araştırma grubudur. 2007 yılında, şekil 2.2'de gösterildiği gibi, 60 W'lık bir ampülü 2 metre mesafeden manyetik rezonans yöntemiyle %40 verimlilikle aktardı. 2015 yılında Dr. Rim ve ekibi endüktif güç

aktarımıyla 3,4 ve 5 metre mesafeler için sırasıyla %29, %16, %8 verimlilikle gerçekleştirmiştir.



Şekil 2.2. MIT’de WiTricity ekibi tarafından 2007 yılında yapılan çalışmanın görselidir.

Joannopoulos ve Karalis'in yaptığı çalışmada 60W’lık enerjiyi yaklaşık %40 verimle 2 metreyi aşan mesafeye manyetik rezonans yöntemiyle aktarmışlardır (Kurs et al., 2007). 2009’da Kore’de bir araştırma ekibi tarafından yapılan çalışmada 3 kW’lık enerji 10 mm hava boşluğundan %80 verimle aktarmışlardır. Kablosuz güç aktarımında verimin yüksek olması için k ve Q önemli olduğu Li ve Mi’nin yaptıkları çalışmada belirtilmiştir (Li et al., 2015). Çeşitli frekans aralıklarında kablosuz güç aktarımın çalışması yapan Wen ve ekibi çalışmalarını birbirinden farklı manyetik materyallerle denemişlerdir. Bu çalışmalarda en iyi performansın ferrite materyalinin verdiği sonucuna ulaşmışlardır (Wen & Zhang, 2015). İndüktif güç aktarımında, girdap akım kaybının sebep olduğu manyetik alan, çevresindeki metal iletkenlerin ısınmasına ve yangın riskine neden olmaktadır (Lis et al., 2024). Birincil ve ikincil sargılar arası uzaklık arttığında ve sargıların karşılıklı gelmemesi durumunda kuplaj katsayısının azaldığı sonucunu Wageningen ve Staring yaptıkları çalışmada belirtmişlerdir (Wageningen & Staring, 2010). Değişen hizalama durumu, mesafe ve frekansta Sample ve arkadaşları sistem verimliliğini analiz etmişlerdir (Sample et al., 2011). WiTricity, Qualcomm, Conductix-Wampfler, Momentum Dynamics ve Bombardier şirketleri kablosuz güç aktarımı yapan statik şarj istasyonları üzerine çalışmalar yapmaktadır. Kablosuz güç aktarımında dairesel sargının daha iyi kuplaja sahip olsada kare veya dikdörtgen sargıların yanlış hizalamaya daha yüksek toleransının olduğunu belirtilmiştir (Sallán et al., 2009).

Kablosuz güç aktarımında birincil ve ikincil sargılar oldukça önemlidir. Sargı tipleri kuplaj ve yanlış hizalama toleransına sahip olma durumuna göre güç aktarımını etkileyebilmektedir. Yakın mesafe güç aktarımında birden fazla sargı tekniği

kullanılabilmektedir. Sargı teknikleri sağladıkları avantajlarla tablo 2.1’de sunulmuştur (Mahesh et al., 2021).

Tablo 2.1. Farklı sargı topolojilerinin kıyaslanması.

Sargı Topolojisi	Kuplaj Katsayısı	Yanlış Hizalama Toleransı	Manyetik Akış Yönü
Dairesel	Düşük	Düşük	Tek taraflı
Kare	Orta	Orta	Tek taraflı
DD	Yüksek	Orta	Çift taraflı
DD-Q	Yüksek	Yüksek	Çift taraflı
Bipolar	Yüksek	Orta	Çift taraflı
Tripolar	Yüksek	Yüksek	Tek taraflı

Literatürde genelde sarım ve bobinler arası mesafenin çalışıldığı, sargıların iç uzunluk değişimlerinin kuplaj katsayısına etkisiyle ilgili az çalışmanın olduğu görülerek tezde literatürdeki bu açığın kapatılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında sargıların iç uzunluklarındaki değişimin güç aktarımında verimi etkileyen faktörlerden birisi olan kuplaj katsayısına etkisi analiz edilmiştir. Sabit tur sayısında sargıların iç uzunluğunu değiştirerek kuplaj katsayısındaki değişimler analiz edilmiştir. Geçmişden günümüze statik kablosuz güç aktarımında yapılan çalışmalar tablo 2.2’de verilmiştir (Mahesh et al., 2021).

Tablo 2.2. Literatürde yapılan kablosuz güç aktarım çalışmaları.

Kurum/Araştırma Merkezi	Frequency(kHz)	Efficiency	Power(kW)	Air gap (mm)	Year
ETH Zurich	85	96.50%	50	52	2015
Bombardier Primov	-	-	-	10TO 30	2015-17
Conductix-Wampler WC Torino,Italy	20	90%	60	400	2013
Momentum Dynamics	-	>90%	3.3-10	24	2015-17
HEVO power	85	90%	10	300	2017-18
Toshiba	85	-	44	100	2017
INTIS	-	-	30	110-130	2013-18
ORNL	-	95%	50	15	2018
ORNL	-	97%	120	5	2018
WAVE	-	-	50-250	TBA	2012-19
WiTricity Corporation	>85	>90%	3.6-11	100-200	2009-19
Toshiba	-	-	7	160	2014
Fraunhofer Institute in Germany	100	97%	22	135	2015
KAIST University	90	95%	3.3	200	2016
KAIST University	20	72-80%	3	100	2010-14
KAIST University	20	74-83%	15	120-200	2010-14

2.1. Kablosuz Güç Aktarımında Standartlar

Standartlar aynı amaç için üretilen ürünlerin eş değer yapıda olmalarını sağlar. Böylelikle aynı üreticiden veya farklı farklı üreticilerden çıkan ürünlerin arasındaki gereksiz farklılıklar giderilmektedir. Aynı zamanda standartlar ürünlerin veya hizmetlerin kalitesini artırdığı kadar güvenliğinde artırır ve ürünün uyması gereken sınırlarını belirler. KGA sistemlerinde düşük güçlü tüketici elektroniği için gelişimi tamamlanmış standartlar mevcuttur. Bu standartlar arasında uluslararası alanda en kabul görmüş standard 300'ün üzerinde firmanın üyesi olduğu WPC tarafından 2010'da sunulan Qi-standardıdır (N.Hu, 2010). Bir diğeryse AFA tarafından geliştirilen AirFuel Resonant standardıdır (*AirFuel Resonant*, n.d.). Ancak elektrikli araçlar için KGA sistemlerinin standartları tanımlanmaya devam ediyor. Şuana kadar araçlar için uluslararası en kabul görmüş KGA standardı halen önerilen uygulama aşamasında olan SAE J2954'tür. Standard taslağında frekans aralığı, güç seviyesi sınıfları, mesafe sınırları, farklı sargı modelleri, tasarım gereksinimleri ve ilkeleri tanımlanmıştır. Bu standardın son olarak 11 kW'a kadar güce sahip elektrikli araçlar için KGA kriterlerini belirten üçüncü versiyonu yayınlanmıştır (Schneider et al., 2019). J2954 tarafından açıklanan bir diğer önemli kriterde iletişim protokolüdür. KGA sisteminin iletişim gerekliliklerini tanımlamak için J2836/6, J2847/6 ve J2931/6'ı temel alır. Bu iletişimden kasıt hem araç ile şarj istasyonunun eşleşmesi için gereken rehberliğin sağlanması hemde araçtaki batarya yönetim sistemi ile iletişime geçerek batarya ölçüm sonucuna göre birincil tarafla iletişime geçilip şarj etme işleminin ihtiyaç doğrultusunda uygun değerlerde regüle edilmesidir. SAE J2954'ün standardının yanı sıra otobüs, kamyon ve demiryolu için KGA sistemlerini baz alacak SAE J2954/2 olarak isimlendirilen standardında geliştirme faaliyetleri yürütülmektedir. İçerik olarak SAE J2954 ve SAE J2954/2 birçok kısmı benzer olsada SAE J2954/2 standardının hitap ettiği araçların yerden daha yüksek olması daha fazla hava boşluğu içermesine, daha fazla güç seviyeleri gerektirmesine dolayısıyla daha fazla elektromanyetik alan oluşması sistem metodolojileriyle alakalı ek güvenlik uygulamaları gerektirir. SAE J2954'de olduğu gibi J2954/2'inde ilk olarak teknik bir rapor olarak hazırlanması ardından uygulama önerisi olarak sunulması ve son olarakda standard haline gelmesi bekleniyor.

İleri çalışmalar dinamik kablosuz şarj sistemlerinde standartların geliştirilmesi (statik ve dinamik güç aktarımında araç tarafındaki sistemin aynı sistem olması için

önemlidir). Hafif elektrikli araçlar için önerilen uygulama aşamasında olan SAE J2954 olsada 22 kVA nın üzerindeki değere sahip araçlar için henüz standard tanımlanmamıştır.

Elektrikli araçların kablosuz şarj edilmesi durumunda insan vücudunun araba içerisinde maruz kalacağı elektromanyetik alan test yöntemlerini içeren JASO TP-13002 2013 yılında yayınlanmıştır (JSAE, 2013).

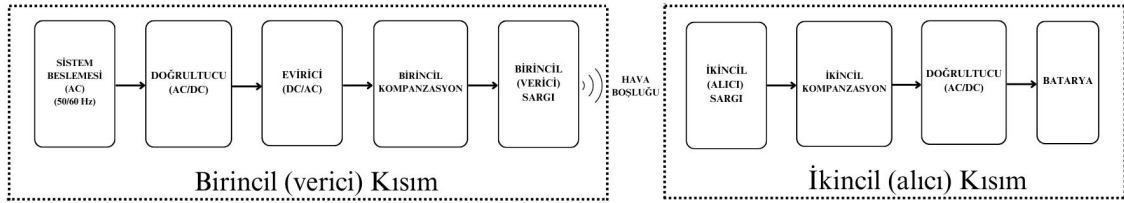
Uluslararası Standardizasyon Örgütü, paylaşılan standartlara dayanarak 2020 yılında elektrikle çalışan karayolu araçlarının manyetik alanlı kablosuz güç aktarımında güvenli ve birlikte çalışabilirliğin gereklilikleri olan ISO 19363'ü yayınlayarak elektrikli araçların kablosuz şarj edilmesinin küresel çapta tanıtımını teşvik etmiştir (International Organization for Standardization, 2020).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

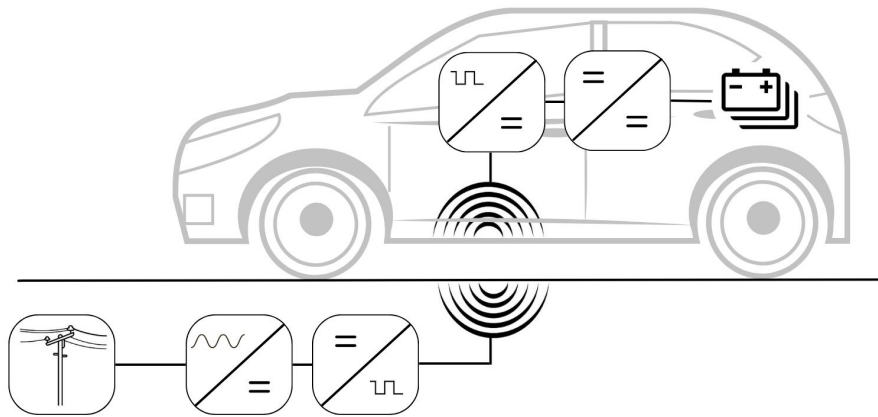
3.1. KGA Sistemi ve Materyalleri

Şekil 3.1’de diyagramlar halinde KGA sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. KGA sisteminin yapısının basit şema gösterilişidir.

KGA sistemleri genelde şehir şebekesinden 230V 50 Hz frekanslı AC güç tarafından beslenir. İlk olarak doğrultulan AC gerilim, inverter tarafından istenilen değerdeki voltaj ve yüksek frekanslı (20-400 kHz) AC gerilime evrilir. Bu adım, sistemin verimliliğini artırmak için gereklidir. Ayrıca frekansın yükselmesi devredeki komponentlerin boyutunun düşürülmesinde önemli bir durumdur. VA derecesini en aza indirmeye, kuplaj ve güç aktarım kapasitesini iyileştirmeye ve yüksek verimlilik elde edebilmek için birincil sargıdan önce ve ikincil sargıdan sonra kompanzasyon gerçekleştirilir. Birincil bobinde oluşan manyetik alan sayesinde ikincil bobine voltaj indüklenmesidir. İkincil taraftaki indüklenen AC gerilim doğrultularak batarya şarj edilir. Batarya güç seviyesine göre ikincil tarafta DC/DC çevirici kullanılabilir.



Şekil 3.2. Elektrikli araçlar için örnek statik KGA sisteminin gösterilişidir(Pashaei et al., 2016).

Kablosuz şarj sistemleri, verici ve alıcı olmak üzere iki temel bileşenden oluşur ve bu bileşenlerin üretiminde kullanılan malzemeler sistemin performansını doğrudan etkiler. Verici, elektromanyetik alan yaratan bakır bir sargı, bu alanı yoğunlaştıran bir ferrit çekirdek ve genellikle alüminyum bir kasadan oluşur. Alıcı ise elektromanyetik alanı elektrik akımına dönüştüren bir sargı, ferrit çekirdekten oluşur ve aracın alt kısmında yer alır. Kullanılan malzemelerin ısı direnci, dayanıklılığı ve sistemin çalışma frekansı da performansı etkileyen önemli faktörlerdir.

3.1.1. Litz teli

Litz teli, elektromanyetik dalgaların kullanıldığı ve yüksek frekans gerektiren uygulamalarda kullanımı yaygın olan belirli bir düzende örülmüş çok sayıda ince telden oluşan özel bir iletken türüdür. "Litz" terimi, Almanca "Litzendraht" kelimesinden türetilmiştir ve "örgülü tel" anlamına gelir. Litz teli genellikle bakırdan yapılır. Bakır, yüksek elektriksel iletkenliği nedeniyle tercih edilir. Ancak, bazı durumlarda alüminyum veya gümüş kaplı bakır gibi başka malzemeler de kullanılabilir. Yüksek frekanslarda, akım bir iletkenin yüzeyinde yoğunlaşma eğilimindedir, bu da etkili direncin artmasına neden olur. Litz teli, akımın tüm tellere eşit şekilde dağılmasını sağlayarak deri etkisini azaltır. Şekil 3.3'te makara haldeki litz teli gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Makara haldeki izolesiz litz teli gösterilmektedir.

3.1.2. Ferrit

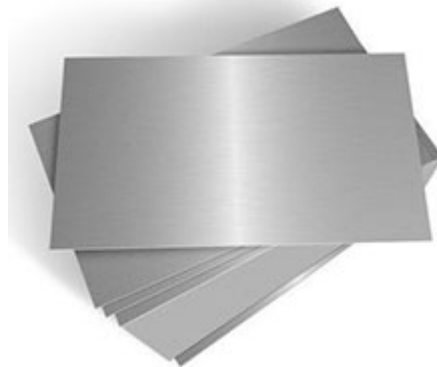
Demir oksit ve diğ er metalik oksitlerin karışımı olan ferromanyetik bir materyaldir. Elektromanyetik alanı yoğunlaştırarak alıcı sargı daha verimli bir şekilde iletilmesini sağlar. Enerji kaybını azaltır ve ş arj mesafesini artırır. Ş ekil 3.4’de çeş itli kalıplarda üretilmiş ferritler gösterilmiştir.



Ş ekil 3.4. Çeş itli ferritler gösterilmektedir.

3.1.3. Plaka

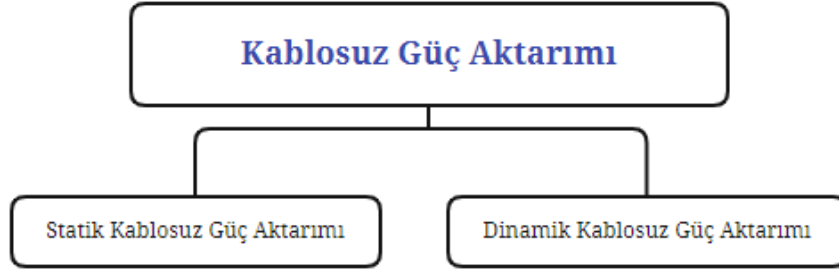
KGA sistemlerinde hafifliğı göz önüne alınarak genellikle plastik plaka kullanılır, ancak bazı üst düzey modellerde alüminyum veya camda uygulanabilmektedir. Isı dağılımını iyileştirmek ve estetik bir görünüm sağlamak için tasarlanır. Ayrıca, elektromanyetik paraziti azaltmak için EMI koruması içerebilir. Tasarlanan KGA sisteminin kompakt bir yapıda durmasını ve dış çevresel etkenlerden korunmasını sağlar. Ş ekil 3.5’te alüminyum plaka gösterilmektedir.



Ş ekil 3.5. Alüminyum plaka gösterilmektedir.

3.2. KGA Türleri

Şekil 3.6’de kablosuz güç aktarımı gücün yüke aktarımı sırasında yükün hareketli veya durağan olmasına göre iki farklı şekilde gerçekleştiği gösterilmiştir. Kablosuz güç aktarımı, statik ve dinamik olmak üzere iki türe ayrılabilir. İkisi arasındaki fark, esas olarak güç alıcısının konumlandırmasındaki hareket kabiliyetine bağlıdır.



Şekil 3.6. Kablosuz güç aktarım sistemlerinin şarj ediliş tipine göre sınıflandırılması.

3.2.1. Statik kablosuz güç aktarımı

Statik kablosuz güç aktarımı, verici ve alıcı sargıları sabit bir konumda kaldığında gerçekleşir. Güç aktarımı, alıcının belirli bir konumlandırılmasını ve vericiden sınırlı bir mesafede kalmasını gerektirir. Statik KGA sistemlerinin uygulanması genellikle daha basit ve anlaşılması daha kolaydır. Sınırlı hareketli parça veya karmaşık elektronik gereksinimleri nedeniyle uygulaması dinamik KGA'den daha ekonomiktir. Alıcı, vericiye göre sabitlenmiştir, bu nedenle hareket özgürlüğü yoktur. Güç, verici ve alıcı arasındaki kısa mesafelerde iletilebilir ve etkinliği etkiler. Verici ve alıcı sargılar hizalanmadığında verimlilik önemli ölçüde düşebilir.

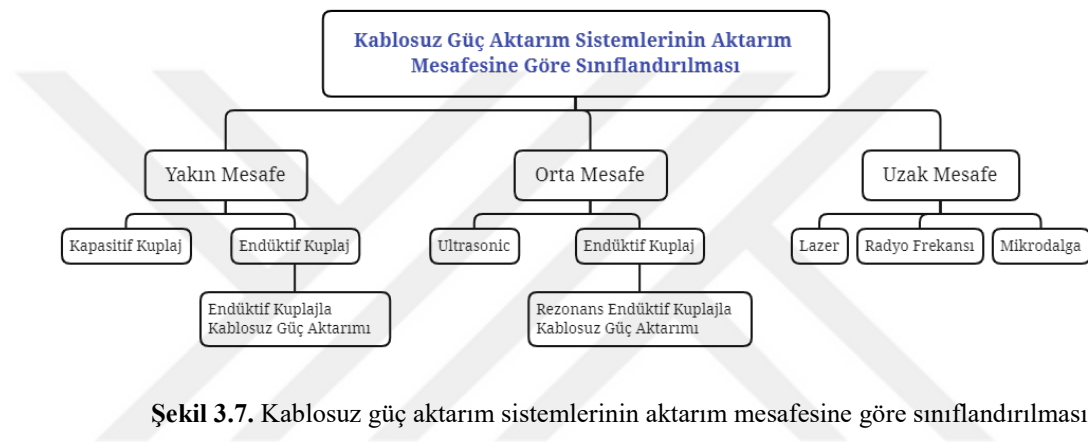
3.2.2. Dinamik kablosuz güç aktarımı

Dinamik kablosuz güç aktarımı, alıcının şarj olurken hareket etmesini sağlar. Bu teknoloji, alıcının konumunu izlemek ve güç aktarımını buna göre ayarlamak için gelişmiş teknikler kullanır. Alıcı, şarj olurken belirli bir aralıkta hareket edebilir, rahatlık ve esneklik sağlar. Otoyollarda uygulanması durumunda araçların durmadan, park etmeden kablosuz bir şekilde şarj olmasını sağlar. Ancak dinamik KGA sistemleri, konum izleme ve dinamik ayarlama için daha karmaşık elektronik ve kontrol

algoritmaları gerektirir. Diğer taraftan alıcı hareket halindeyken verimliliğin stabil olmasını sağlamak güçtür.

3.3. KGA Sistemlerinin Sınıflandırılması

KGA sistemleri, iletim mesafesine veya taşıyıcı alana göre sınıflandırılabilir. KGA sistemlerinde iletim mesafesi genellikle en önemli faktör olduğundan mesafeye göre sınıflandırma çalışmanın oluşumunda önemlidir. Kablosuz güç aktarım sistemlerinin iletim mesafesine göre sınıflandırılması Şekil 3.7’de gösterilmiştir (Çiçek et al., 2023).



Şekil 3.7. Kablosuz güç aktarım sistemlerinin aktarım mesafesine göre sınıflandırılması.

3.3.1. Kapasitif kuplaj

Kapasitif kuplajla kablosuz güç aktarımı, elektrik enerjisinin iki iletken plaka veya elektrot arasındaki elektrik alan kullanılarak iletilmesi yöntemidir. Sistem, bir verici elektrot (enerji kaynağına bağlı) ve bir alıcı elektrot (enerjiyi alan cihazda) olmak üzere iki elektrottan oluşur. Bu elektrotlar, genellikle metal plakalar veya iletken yüzeylerdir. Elektrotlar birbirlerine yakın yerleştirildiğinde, aralarında bir elektrik alanı oluşur. Bu alana kapasitif alan denir. Verici elektroda bir alternatif akım uygulandığında, kapasitif alanda bir elektriksel osilasyon oluşur. Bu osilasyon, alıcı elektroda enerji aktarır. Alıcı elektrottaki osilasyon, bir diyot veya diğer elektronik bileşenler kullanılarak doğrudan akıma dönüştürülür. Bu yöntem, diğer yöntemlere kıyasla daha düşük güç seviyesi gerektiren KGA uygulamalarında kullanılır. Diğer aktarım yöntemlerine göre daha küçük boyutlarda tasarlanabil olması, yüksek frekanslı uygulamalarda daha verimli çalışabilir olması, manyetik indüksiyon tabanlı KGA sistemlerine göre daha düşük elektromanyetik alan üretmesi, düşük güç seviyelerinde çalışmasıyla daha güvenli olması kapasitif

kuplajla KGA'nın avantajlarıdır. Buna karşı olarak, manyetik indüksiyon tabanlı KGA yöntemlerine göre daha kısa menzilde çalışması, menzil arttıkça verimliliğin düşecek olması ve elektrotların çevresel faktörlerden gelecek etkilerde aktarımda olumsuzlar yaşanabilecek olması kapasitif kuplaj yönteminin dezavantajlarıdır. Kapasitif kuplaj, özellikle düşük güç gerektiren küçük taşınabilir elektronik cihazlarda ve tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, bir kablosuz kulaklık şarj kutusu, kulaklıkları kapasitif kuplaj kullanarak şarj edebilir. Ayrıca implante edilebilir tıbbi cihazlar olan kalp pili, sinir uyarıcıları vücut dışından kapasit kuplaj yöntemiyle şarj edilebilir.

3.3.2. Endüktif kuplaj

Endüktif kuplajla yönteminde, birincil sargı içinden geçen alternatif akım, manyetik bir alan oluşturur. Bu alan, yakınında bulunan başka bir ikincil sargı üzerinde bir elektrik akımı indükler ve böylece enerji aktarımı gerçekleşir. Basit tasarımları, düşük maliyetleri avantaj sağlarken düşük verimli ve kısa menzilli olmaları dezavantajlarıdır. Endüktif kuplaj, kısa menzilli ve düşük güç uygulamaları için uygun bir çözümdür.

3.3.3. Rezonans endüktif kuplaj

Rezonans endüktif kuplaj yönteminde birincil ve ikincil sargılar belirli bir rezonans frekansındadır. Rezonans, enerjinin verici sargıdan alıcı sargıya verimli bir şekilde aktarılmasına yardımcı olur. Rezonans, daha uzun menzillerde ve daha düşük güç kayıplarıyla enerji transferine olanak tanır. Endüktif güç aktarımına göre daha uzun menzilde daha az güç kaybıyla aktarıma fırsat verir. Ancak endüktif kuplaj yöntemine göre daha karmaşık tasarım gerektirir ve yüksek maliyetlidir. Rezonans endüktif kuplaj, daha yüksek verimlilik, daha uzun menzil ve daha yüksek güç aktarımı gerektiren uygulamalar için tercih edilir.

3.3.4. Ultrasonik

Ultrasonik KGA, yüksek frekanslı ses dalgaları (ultrasonik dalgalar) kullanarak elektrik enerjisini kablosuz olarak aktarma yöntemidir. Bu teknoloji, endüktif kuplaj veya kapasitif kuplaj gibi geleneksel KGA yöntemlerine göre bazı avantajlar sunmaktadır. Bir

piezoelektrik dönüştürücü, elektrik enerjisini ultrasonik dalgalara dönüştürür. Bu dalgalar, havada veya sıvıda yayılabilir. Ultrasonik dalgalar, alıcıya doğru yayılır ve bir başka piezoelektrik dönüştürücü tarafından algılanır. Alıcı dönüştürücü, ultrasonik dalgaları tekrar elektrik enerjisine dönüştürür. Ultrasonik dalgaların havada veya sıvıda daha az kayıp yaşamasından dolayı, elektromanyetik indüksiyon veya kapasitif kuplaj yöntemlerine göre daha yüksek verimlilik sunabilir. Ultrasonik dalgalar, elektromanyetik dalgalara göre daha uzun mesafelere ulaşabilir, bu da daha büyük alanlar için enerji aktarımı olanağı sağlar. Ultrasonik dalgalar, elektromanyetik dalgalar kadar diğer elektronik cihazlarla etkileşime girmez, bu da parazit riskini azaltır. Ultrasonik dönüştürücüler, elektromanyetik indüksiyon veya kapasitif kuplaj sistemlerinden daha pahalı olabilir. Şu anda ultrasonik KGA, elektromanyetik indüksiyon veya kapasitif kuplaj sistemlerinden daha düşük güç seviyelerinde çalışabilir. Ultrasonik dalgalar, hava akımları veya engeller tarafından etkilenebilir, bu da verimliliği azaltabilir.

3.3.5. Lazer

Lazerle kablosuz güç aktarımı, lazer ışınları aracılığıyla elektrik enerjisini uzak mesafelere kablosuz olarak aktaran bir teknolojidir. Bu yöntem, endüktif kuplaj veya kapasitif kuplaj gibi geleneksel KGA yöntemlerinden farklı olarak, elektromanyetik dalgalar yerine ışık kullanır. Güçlü bir lazer, elektrik enerjisini dar bir ışık huzmesine dönüştürür. Lazer ışını, hedeflenen alıcıya doğru yönlendirilir ve odaklanır. Hedeflenen alıcı, lazer ışığını tekrar elektrik enerjisine dönüştürmek için bir fotovoltaik hücre veya benzer bir cihaz kullanır. Lazer ışınları, elektromanyetik dalgalara göre çok daha uzun mesafelere ulaşabilir. Bu, uzay keşfi, dronlar, iletişim kulesi ve enerji iletimi gibi uygulamalar için uygundur. Lazer ışınları, hava veya su gibi ortamlardan geçerken daha az enerji kaybeder. Bu, daha yüksek verimli enerji aktarımı olanağı sağlar. Lazer ışınları, hedeflenen alıcıya doğru odaklanabilir, bu da enerji kaybını azaltır ve enerji israfını önler. Yüksek güçlü lazerler, göz hasarına neden olabilir. Bu nedenle, lazerle kablosuz güç aktarımı sistemlerinin güvenliği çok önemlidir. Sis, yağmur veya bulutlu hava koşulları, lazer ışınının verimliliğini azaltabilir. Lazer ışını, hedeflenen alıcıya doğru hassas bir şekilde yönlendirilmelidir. Aksi takdirde, enerji kaybı olabilir veya başka yerlere ulaşabilir. Lazerle kablosuz güç aktarımı, gelecekte çeşitli alanlarda kullanılma potansiyeline sahip umut vadeden bir teknolojidir. Ancak, güvenlik, maliyet ve hava koşulları gibi zorlukların üstesinden gelinmesi gerekmektedir.

3.3.6. Radyo frekansı

Radyo frekansıyla KGA, elektromanyetik radyasyon kullanarak enerjiyi kablosuz olarak ileten bir yöntemdir. Bu yöntem, elektromanyetik indüksiyon gibi yakın alanlı enerji aktarımı yöntemlerinden farklı olarak, radyo dalgaları yoluyla daha uzun mesafelere enerji transferini mümkün kılar. Bir verici anten, bir radyo frekansı osilatör tarafından üretilen alternatif akımı radyo dalgalarına dönüştürür. RF dalgaları, çevreye yayılır ve havada veya boşlukta hareket eder. Alıcı anten, RF dalgalarını yakalar ve onları tekrar alternatif akıma dönüştürür. RF dalgaları, endüktif kuplaj veya kapasitif kuplaj gibi yöntemlere göre daha uzun mesafelere ulaşabilir. RF dalgaları, çoklu alıcı antenleri tarafından alınabilir, bu da geniş bir alanda enerji dağıtımını sağlar. RF dalgaları, duvarlar, cam veya su gibi ortamlardan geçebilir, bu da engellerin enerji aktarımını etkilemesini azaltır. RF dalgaları, havada yayılırken enerji kaybeder, bu da verimliliği azaltır. RF dalgaları, diğer elektronik cihazlarla etkileşime girebilir ve parazit yaratabilir. Yüksek güç seviyelerinde çalışan RF KGA sistemleri, insan sağlığına zararlı olabilir. RF KGA, kablosuz sensör ağları, hava araçları gibi çeşitli uygulamalar için umut vadeden bir teknolojidir. Ancak, bu teknoloji verimlilik ve insan sağlığına etkileri üzerine kaygılardan kullanılması zor hale getirmektedir.

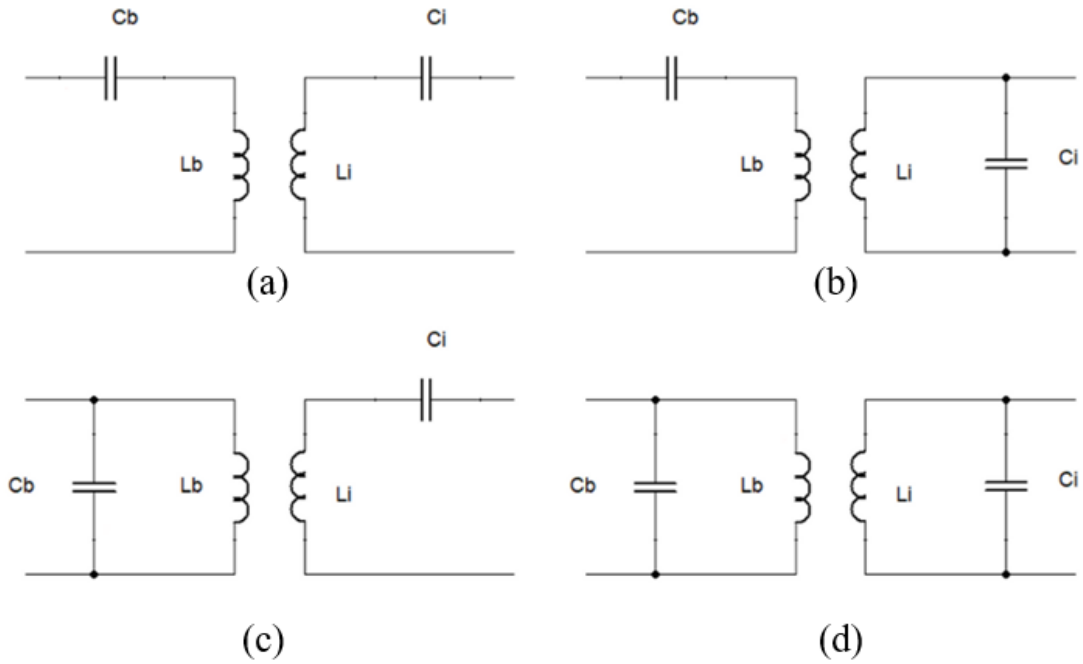
3.3.7. Mikrodalga

Mikrodalga yöntemiyle KGA, mikrodalga radyasyon kullanarak elektrik enerjisini kablosuz olarak ileten bir teknolojidir. Bu yöntem, endüktif kuplaj, kapasitif kuplaj veya RF KGA gibi diğer yöntemlere göre daha uzun mesafelere enerji transferini mümkün kılar. Bir mikrodalga verici, elektrik enerjisini mikrodalga radyasyonuna dönüştürerek mikrodalga üretimini sağlar. Mikrodalga dalgaları, verici anten tarafından odaklanmış bir şekilde yayılır. Bir alıcı anten, mikrodalga dalgalarını yakalar ve onları tekrar elektrik enerjisine dönüştürür. Mikrodalga dalgaları, RF dalgalarına göre daha uzun mesafelerde yayılabilir. Mikrodalga yöntemiyle KGA, daha yüksek güç seviyelerinde enerji aktarımı sağlayabilir. Mikrodalga dalgaları, duvarlar ve diğer yapı malzemeleri gibi engellerden geçebilir. Ancak, Mikrodalga dalgaları, havada yayılırken enerji kaybeder, bu da verimliliği azaltır. Yüksek güç seviyelerinde çalışan mikrodalga KGA sistemleri, insan sağlığına zararlı olabilir. Mikrodalga dalgaları, diğer elektronik cihazlarla

etkileşime girebilir ve parazit yaratabilir, bu yüzden mikrodalga ışını, hedeflenen alıcıya doğru hassas bir şekilde yönlendirilmelidir. Mikrodalga KGA, şu anda çeşitli alanlarda araştırma ve geliştirme aşamasındadır. Uzay araçlarını ve uyduları kablosuz olarak bataryalarının şarj edilmesi gibi uzayda enerji iletimi için kullanılabilir. Uzak bölgeleri ve erişilemeyen alanları elektrik enerjisiyle beslemek için kullanılabilir. İHA'lar ve diğer askeri araçları kablosuz olarak bataryalarının şarj olması için savunma sanayiinde kullanılabilir. Mikrodalga KGA, gelecekte çeşitli alanlarda önemli bir rol oynama potansiyeline sahiptir.

3.4. Basit Kompanzasyon Topolojileri

KGA sistemlerinde sistemin kompanzasyonun yapılmasının birden fazla sebebi olmakla beraber oldukça önem teşkil eder. Kompanzasyon topolojileri, ikincil tarafa aktarılan gücü en üst seviyede olmasını sağlayarak sistem verimliliğini artırır. Sistemdeki endüktans kaçaklarını tolere ederek birincil ve ikincil sargıların benzer rezonans frekansında çalışmasını sağlamak için kullanılır. Sistemin kompanze edilmesi aktarılan gücü artırmak, güç kaynağının VA derecesini en aza indirmek, yapılacak çalışmaya bağlı olarak sabit voltaj veya sabit akım çıkışı sağlamak için önemlidir. Bataryaların sabit bir besleme yapılabilmesi içinde KGA sistemlerinde kompanzasyon önemlidir. Bu topolojiler, genellikle kapasitör ve indüktörlerin uygun kombinasyonlarıyla gerçekleştirilir (Patil et al., 2017). Şekil 3.8, kapasitörlerin devreye nasıl eklendiğine bağlı olarak dört temel topolojiyi göstermektedir: seri-seri, seri-paralel, paralel-seri ve paralel-paralel. Araştırmalar bu yöntemlerden en idealinin seri-seri olduğunu göstermektedir (Yılmaz & Kızıldağ, 2021).



Şekil 3.8. Temel kompanzasyon topolojileri. (a) seri-seri. (b) seri-paralel. (c) paralel-seri. (d) paralel-paralel.

Birincil devrede kapasitör sargı paralel bağlandığında bir akım jeneratörü görevi görür, sargı seri eklendiğindeyse voltaj jeneratörü haline gelir. Birincil devredeki kapasitör C_1 , Tablo 3.1'deki gibi hesaplanabilir (Choudhori & Dolara, 2019).

Tablo 3.1. Farklı kompanzasyon topolojilerine göre matematiksel denklemler.

Kompanzasyon Topolojisi	Birincil Kapasitans
Seri-Seri	$\frac{C_2 L_2}{L_1}$
Seri-Paralel	$\frac{C_2 L_2^2}{L_1 L_2 - M^2}$
Paralel-Seri	$\frac{C_2 L_2}{\frac{M^4}{L_1 C_2 L_2 R_L} + L_1}$
Paralel-Paralel	$\frac{(L_1 L_2 - M^2) C_2 L_2^2}{\frac{M^4 C_2 R_L}{L_2} + (L_1 L_2 - M^2)^2}$

3.4.1. Seri-Seri kompanzasyon topolojisi

KGGA'nda seri-seri kompanzasyon topolojisi, verici ve alıcı sargılarının rezonans frekansını eşleştirmek ve böylece enerji transfer verimliliğini artırmak için kullanılan bir yöntemdir. Hem verici devresinde hem de alıcı devresinde birer seri kapasitör bulunur.

3.4.2. Seri-Paralel kompanzasyon topolojisi

Verici devresinde seri kapasitör, alıcı devresinde ise paralel kapasitör bulunur.

3.4.3. Paralel-Seri kompanzasyon topolojisi

Verici devresinde paralel kapasitör, alıcı devresinde ise seri kapasitör bulunur.

3.4.4. Paralel-Paralel kompanzasyon topolojisi

Hem verici hem de alıcı devresinde paralel kapasitör bulunur.

3.5. Kuplaj Katsayısı

Kablosuz güç aktarımında kuplaj katsayısı, iki sargı arasında enerji aktarım verimliliğini etkileyen önemli bir faktördür. Bu, iki sargı arasındaki manyetik akı eşleşmesinin bir ölçüsüdür. İki sargı arasındaki kuplaj katsayısı k ile gösterilir, 0 ile 1 arasında bir değer alır ve aşağıdaki gibi tanımlanır. (Uzun, 2012). Burada, M iki sargı arasındaki karşılıklı endüktansdır. L_b ilk sargının endüktansdır. L_i ikinci sargının endüktansdır.

$$k = \sqrt{\frac{M_{12}M_{21}}{L_bL_i}} \quad (1.1)$$

Denklem (1.1) ifadesinde $M_{12} = M_{21} = M$ olduğundan denklem yeniden düzenlenirse k Denklem (1.2) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_bL_i}} \quad (1.2)$$

Kuplaj katsayısının 1'e yakın olması iki sargı arasında güçlü bir manyetik akı eşleşmesi vardır, bu da daha yüksek enerji aktarım verimliliği anlamına gelir. Kuplaj katsayısının 0'a yakın olması iki sargı arasında zayıf bir manyetik akı eşleşmesi vardır, bu da daha düşük enerji aktarım verimliliği anlamına gelir. KGA sargıları birbirine ne kadar yakınsa, kuplaj katsayısı o kadar yüksek olur. Sargıların eksenleri birbirine eşksenel olduğunda kuplaj katsayısı en yüksektir. Sargıların şekli ve boyutu kuplaj katsayısını etkileyebilir. Sargıların dış kısmına yakın konumlandırılan demir gibi manyetik malzemeler, sargıların arasındaki manyetik alanı konsantre ederek kuplaj katsayısını artırabilir. Kuplaj katsayısı, kablosuz güç aktarımında elde edilebilecek maksimum güç ve verimlilik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek kuplaj katsayısı daha yüksek verimlilik ve daha yüksek güç aktarımını mümkün kılar.

3.6. Sargı Topolojileri

KGA'da literatürde birçok sargı topolojisi olsada tez kapsamında dairesel ve kare topolojilere yönelik çalışmalarda bulunulmuştur.

3.6.1. Dairesel sargı topolojisi

KGA'da dairesel sargı tasarımı en yaygın kullanılan sargı yapısıdır. KGA'da dairesel sargı tasarımının diğer sargı tasarımlarına göre birçok avantajı vardır. Bu avantajlar hem verimlilik, hem maliyet, hem de pratik uygulama açısından önemli katkılar sağlar. Dairesel sargılar, kablosuz güç transferinde yüksek verimlilik sağlar. Manyetik alanın homojen dağılımı sayesinde enerji transferi daha etkili olur ve enerji kayıpları minimum seviyeye iner. Dairesel sargılar, diğer karmaşık geometrilere göre üretim açısından daha basit ve ekonomiktir. Standart üretim süreçleri ve malzemelerle kolayca üretilebilirler. Bu da kablosuz şarj sistemlerinin daha düşük maliyetle üretilebilmesini sağlar, özellikle büyük ölçekli üretimlerde maliyet avantajı sunar. Bu, kullanıcılar için daha rahat bir şarj deneyimi sunar. Dairesel sargı tasarımı, manyetik alanın daha dengeli ve simetrik bir şekilde yayılmasını sağlar. Bu, verici ve alıcı arasındaki enerji transferini daha kararlı hale getirir. Diğer sargı geometrileri, örneğin düzensiz şekiller, manyetik alanın düzensiz dağılmasına neden olabilir ve bu da enerji kayıplarına yol açabilir. Dairesel sargılar, farklı boyut ve güç gereksinimlerine göre

kolayca ölçeklenebilir. Bu esneklik, farklı araç modelleri veya farklı güç kapasitelerine sahip şarj sistemleri için optimize edilebilir tasarımlar yapmayı kolaylaştırır. Aynı zamanda farklı uygulamalar (düşük güçlü cihazlar, yüksek güçlü araç şarjı) için de uygun hale getirilebilir. Dairesel sargı tasarımı, genellikle ısının daha iyi dağıtılmasına katkı sağlar. Bu, sargıların aşırı ısınmasını önleyerek sistemin daha uzun ömürlü ve güvenli olmasını sağlar.

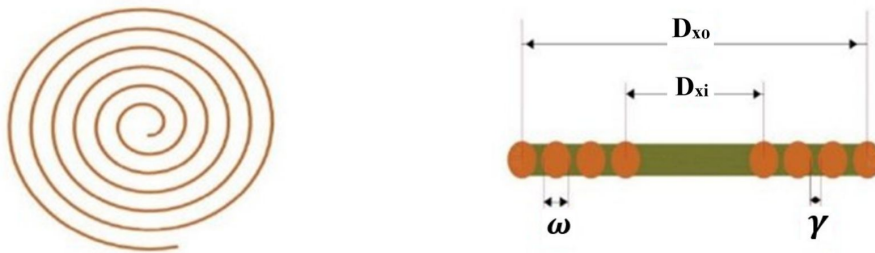
3.6.2. Kare sargı topolojisi

Kare sargı tasarımı, kablosuz güç transfer sistemlerinde geniş yüzey alanı ve fiziksel uyum gerektiren uygulamalarda önemli avantajlar sunar. Kare sargılar, diğer sargı tasarımlarına göre daha geniş bir yüzey alanını kaplar. Bu özellik, enerji transferinde verici ve alıcı sargıların hizalanmasının her zaman mükemmel olmadığını uygulamalarda kullanışlıdır. Kare şeklinin yüzey alanı, verici ve alıcı arasında daha geniş bir kapsama alanı oluşturarak enerji transferini daha kararlı hale getirir. Bu, özellikle büyük elektrikli araçların şarj sistemlerinde avantaj sağlar.

3.7. KGA Sistem Tasarım Hesaplamaları

3.7.1. Sargı uzunluk hesaplamaları

Şekil 3.9’de gösterilen dairesel sargıda d_{xo} (m) sargı dış uzunluğu, d_{xi} (m) sargının iç uzunluğu, N sargı sarım sayısını, ω sargının kablo çapı, γ (m) ardışık dönüşler arasındaki boşluğu ifade etmektedir. β büküm faktörü katsayısını ifade etmektedir. Sargıda kullanılan kablonun uzunluğu l_{top} (m) ile ifade edilir ve Denklem (1.3), Denklem (1.4), Denklem (1.5) kullanılarak hesaplanabilir (Çiçek et al., 2023).



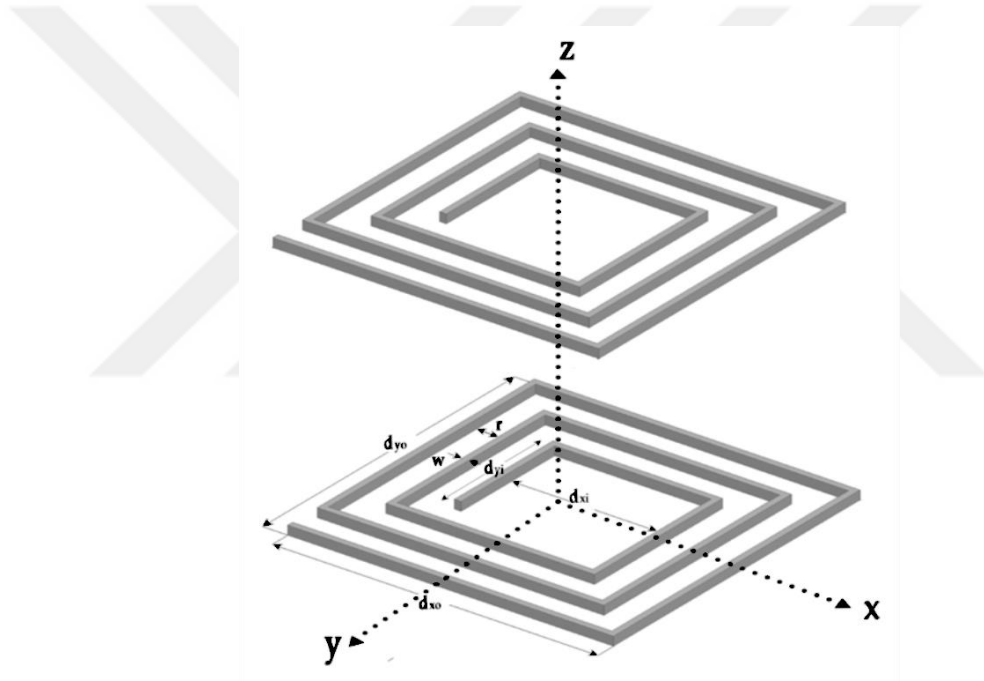
Şekil 3.9. Dairesel sargının örnek gösterilişidir.

$$A = \frac{d_{xi} + N(\omega + \gamma) - \gamma}{2}; L = \frac{N^2 \times A^2}{30 \times A - 11 \times d_{xi}} (\mu H) \quad (1.3)$$

$$d_{xo} = [d_{xi} + 2N(\omega + \gamma) - 2\gamma] \quad (1.4)$$

$$l_{top} = \beta \frac{\pi}{2} N(d_{xi} + d_{xo}) \quad (1.5)$$

Şekil 3.10’de gösterilen kare sargıda d_{xo} sargının dış tarafını, d_{xi} sargının iç tarafını, N sargı sarım sayısını, ω sargının kesit genişliği, γ ardışık dönüşler arasındaki boşluğu ifade etmektedir.



Şekil 3.10. Birincil ve ikincil kare sargıların örnek gösterilişidir.

Sargının dış kenarı olarak belirtilen d_{xo} sargının diğer verilerinden Denklem (1.6)’de belirtildiği gibi hesaplanır.

$$d_{xo} = d_{xi} + 2 \times [N \times \omega + (N - 1) \times \gamma] \quad (1.6)$$

Sargıda kullanılan kablonun metraj hesabı l_{top} Denklem (1.7)’de belirtildiği gibi hesaplanır(Sallán et al., 2009).

$$l_{top} = 2 \times N \times [d_{xo} - (\omega + \gamma) \times (N - 1)] + 2 \times N \times d_{yo} - (\omega + \gamma) \times (N - 1) \quad (1.7)$$

3.7.2. Öz endüktansın hesaplanması

Sargının direncinin R_i , sargının kesit alanının S_i , sargının eşdeğer yarıçapının r_i olduğu durumda her sargıya ait öz endüktans Denklem (1.8), Denklem (1.9), Denklem (1.10) ile hesaplanır. Birincil taraf sargı için $i = 1$, ikincil taraf sargı için $i = 2$ ve $\rho = 1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ alınmalıdır.

$$L_i = \frac{\mu_0}{\pi} N_i^2 \left[\begin{aligned} & d_{xoi} \times \ln \frac{2d_{xoi}d_{yoi}}{r_i \left(d_{xoi} + \sqrt{d_{xoi}^2 + d_{yoi}^2} \right)} \\ & + d_{yoi} \times \ln \frac{2d_{xoi}d_{yoi}}{r_i \left(d_{yoi} + \sqrt{d_{xoi}^2 + d_{yoi}^2} \right)} \\ & - 2 \left(d_{xoi} + d_{yoi} - \sqrt{d_{xoi}^2 + d_{yoi}^2} \right) + 0.25(d_{xoi} + d_{yoi}) \end{aligned} \right] \quad (1.8)$$

$$r_i = \sqrt{\frac{N_i \times S_i}{\pi}} \quad (1.9)$$

$$R_i = \rho \times N_i \times \frac{2 \times (d_{xoi} + d_{yoi})}{S_i} \quad (1.10)$$

3.7.3. Karşılıklı endüktansın hesaplanması

N_1 ve N_2 tur sayısına sahip sargının karşılıklı endüktansı olan M , bu sargıların eşdeğer yarıçapı için Neumann formülü kullanılarak hesaplanır. Denklem (1.11)'de gösterildiği üzere, manyetik olarak birbirleri arasında k kuplaj katsayısı bulunan iki sargının karşılıklı endüktansı M ve iki sargıya ait öz endüktans değerleri olan L_1 ve L_2 'nin oranı üzerinden tanımlanır

$$M = k\sqrt{L_1 \times L_2} \quad (1.11)$$

3.7.4. Eşdeğer yük direncinin hesaplanması

Batarya voltajı V_{bat} ve batarya şarj gücü P_{bat} olduğu durumda eşdeğer yük direnci R_L Denklem (1.12) ve Denklem (1.13) ile hesaplanır.

$$R_b = \frac{V_{bat}^2}{P_{bat}} \quad (1.12)$$

$$R_L = \frac{8}{\pi^2} \times R_b \quad (1.13)$$

3.7.5. Optimum rezonans frekansın hesaplanması (f_0)

f_0 'ın rezonans frekansı, R_1 'in birincil sargı direnci ve R_2 'in ikincil sargı direnci olduğu durumda rezonans frekansı Denklem (1.14) ve Denklem (1.15) ile hesaplanır.

$$\omega_0 = K_\omega \times \frac{\sqrt{R_1 \times (R_2 + R_L)}}{M} \quad (1.14)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (1.15)$$

3.7.6. Birincil kapasitans C_1 ve ikincil kapasitans C_2 hesaplanması

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 \times L_1} \quad (1.16)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 \times L_2} \quad (1.17)$$

3.7.7. Eşdeğer devrenin toplam empedansı Z_1 'in hesaplanması

$$Z_1 = R_1 + \frac{\omega_0^2 \times M^2}{R_2 + R_L} \quad (1.18)$$

3.7.8. Birincil kapasitans voltajı V_{C1} ve ikincil kapasitans voltajı V_{C2} 'nin hesaplanması

$$V_{C1} = I_1 \times \frac{1}{\omega_0 \times C_1} \quad (1.19)$$

$$V_{C2} = I_2 \times \frac{1}{\omega_0 \times C_2} \quad (1.20)$$

3.7.9. Birincil sargı Q_p ve ikincil sargı Q_s 'nin kalite faktörünün hesaplanması

$$Q_p = \frac{L_1 R_L}{\omega_0 M^2} \quad (1.21)$$

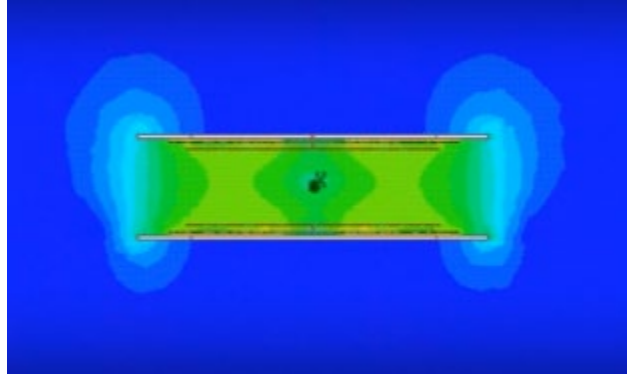
$$Q_s = \frac{\omega_0 L_2}{R_L} \quad (1.22)$$

3.8. Ansys Maxwell

Analiz çalışmalarında kullanılan Ansys Electronics Desktop 2022 R1 versiyonlu yazılımın bir aracı olan Ansys Maxwell, elektrikli makinaların, sensörlerin, aktüatörlerin, transformatörlerin ve diğer elektromanyetik ve elektromekanik cihazların tasarımı ve analizi için kullanılan elektromanyetik alan simülasyon yazılımıdır. Yazılım, 2 boyutlu ve 3 boyutlu modelleme yetenekleri ile birlikte çeşitli simülasyon türleri sunar. Bu sayede karmaşık elektromanyetik problemleri çözmek mümkün hale gelmektedir.

Verimli ve güvenilir kablosuz şarj cihazı tasarımları geliştirmek, birincil ve ikincil sargıların elektromanyetik ve termal performansını modelleme becerisine ayrıca güç elektroniğinin entegrasyonuna bağlıdır. Ansys Maxwell yazılımı aracılığıyla 2 boyutlu ve 3 boyutlu KGA sargılarının tasarımları yapabilmekte ve sargıların analizleri gerçekleştirilebilmektedir.

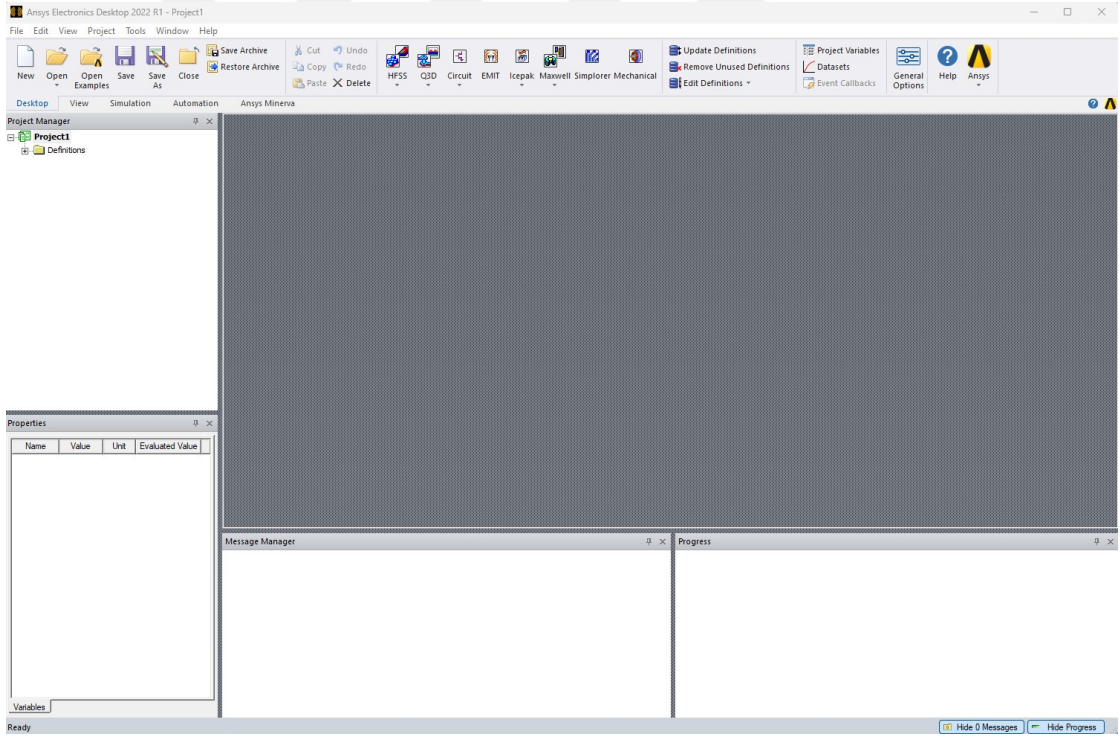
Ansys çözümleri, elektrikli araçlar, tüketici elektroniği ve tıbbi cihazlar için optimum kablosuz şarj cihazları geliştirmek amacıyla manyetik, termal ve elektrik sistemi performansını hesaba katar.



Şekil 3.11. Örnek bir Ansys Maxwell KGA çalışması.

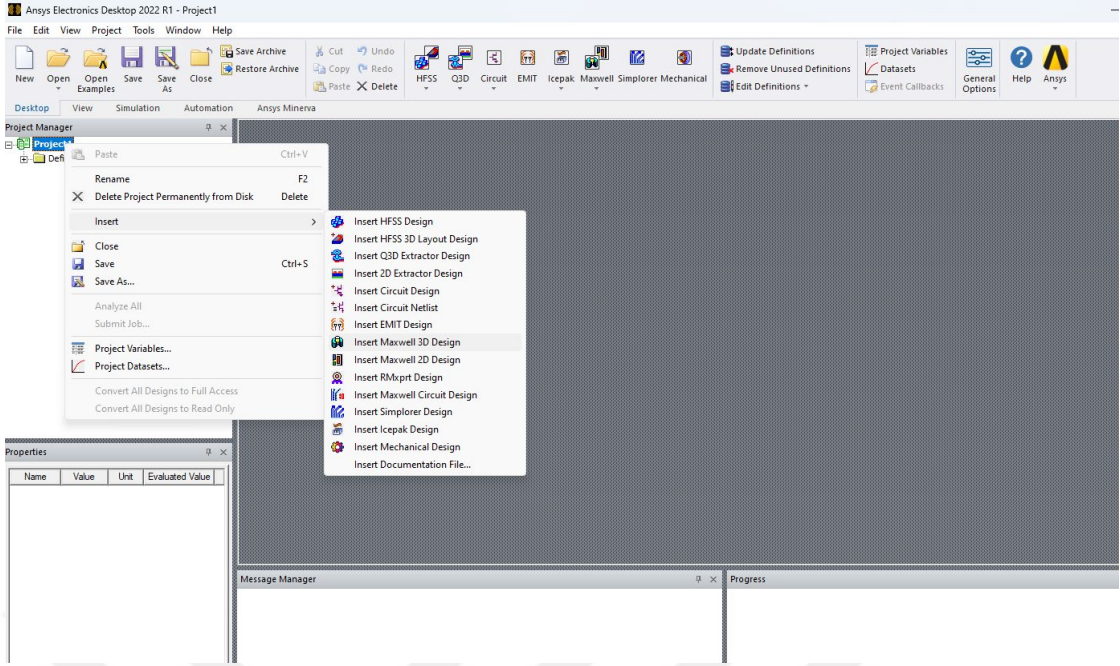
3.8.1. Sargı tasarımı

ANSYS Electronics Desktop 2022 R1 yazılımını çalıştırdıktan sonra kendisi yeni bir proje (Proje-1) başlatır. Yazılımın genel görünümü Şekil 3.12’te gösterilmiştir.



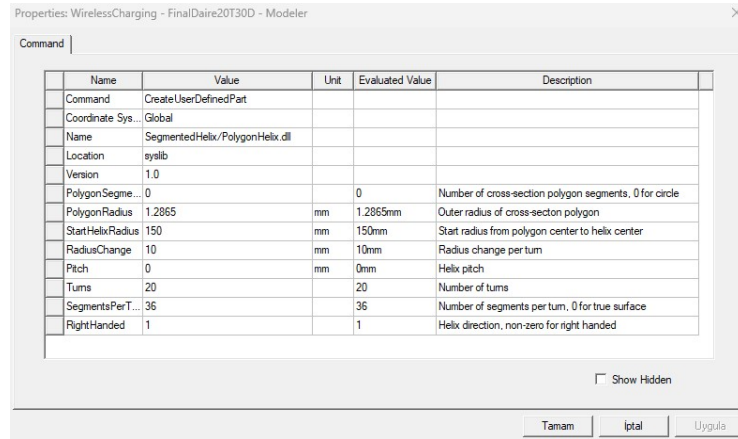
Şekil 3.12. Ansys Maxwell yazılımına genel bakış.

Daha sonra oluşturulan projeye sağ tıklandığında Şekil 3.13’de gösterilen ek seçenekler açılacaktır. Projeye sağ tıklanıp ek seçeneklerde “Insert Maxwell 3D Design” yolu izlenerek yeni bir 3 boyutlu Maxwell projesi açılır.

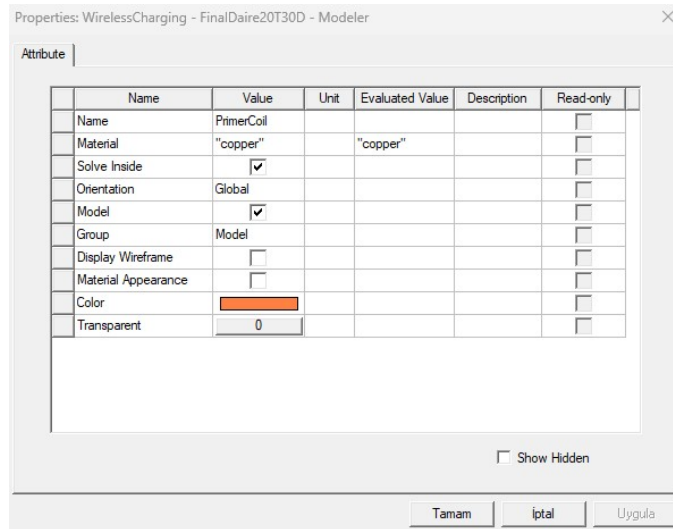


Şekil 3.13. Maxwell 3D projesi oluşturma.

Sonraki adım olarak üst kısımdaki menüde yer alan “Draw” seçeneğine tıklanıldığında farklı tipteki sargıları tasarlanmasına olanak veren seçenekler çıkacaktır. Dairesel tipteki tasarımı oluşturmak için “PolygonHelix” seçilir. Sargıyı oluşturma seçenekleri Şekil 3.14’te gösterilen “CreateUserDefinedPart” seçilerek açılan pencereden gerçekleştirilmektedir. Sargıya ait yeniden isimlendirme, renk seçimi, materyal türü ve görünüşü düzenlemeleri “PolygonHelix” tıklanıldığında açılan Şekil 3.15’de gösterilen pencereden gerçekleştirilmektedir.

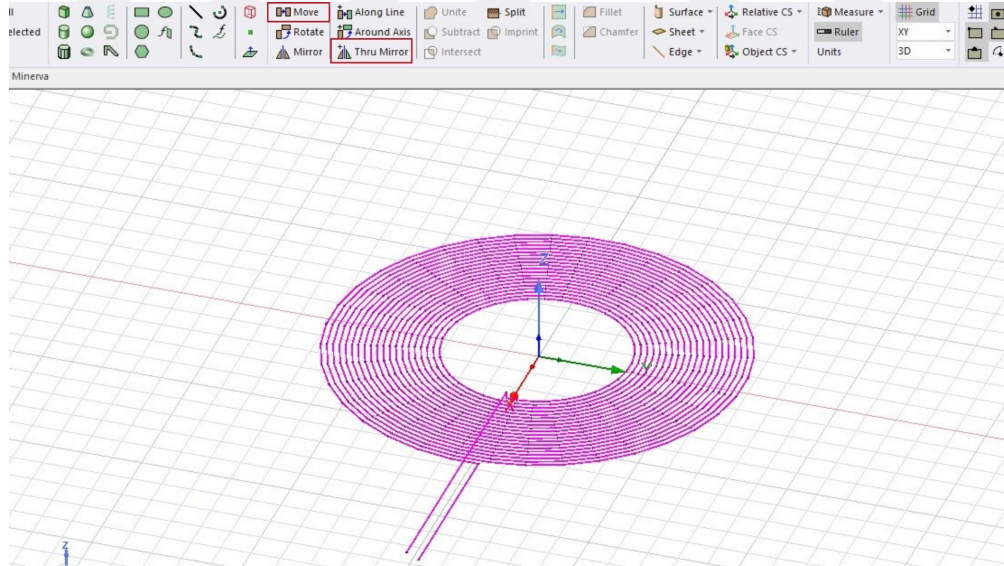


Şekil 3.14. Sargı oluşturma seçenekleri.



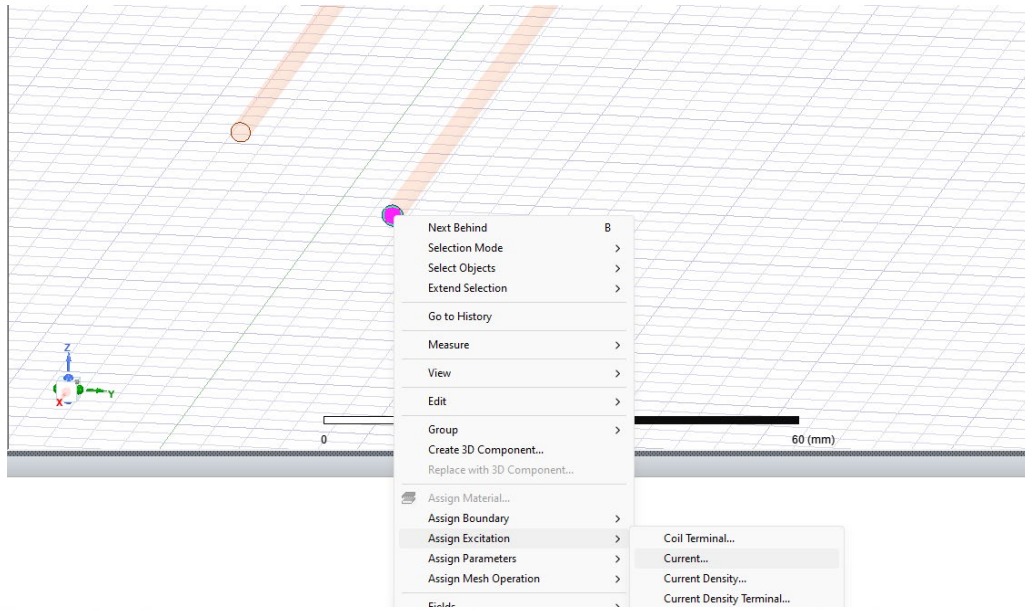
Şekil 3.15. Sargının materyal türü seçimi, isimlendirmesi ve renklendirme seçenekleri.

Oluşturulan birincil sargı Şekil 3.16’de gösterilen “Thru Mirror” tıklandığında objeyi aynalar ve çoğaltır. Böylelikle birincil sargıyla eş ikincil sargı oluşturulmuş olur. Ayrıca obje seçildikten sonra “Move” seçilerek objeler taşınabilmektedir. Böylelikle ikincil sargıyla birincil sargı arasındaki mesafe belirlenebilmektedir.



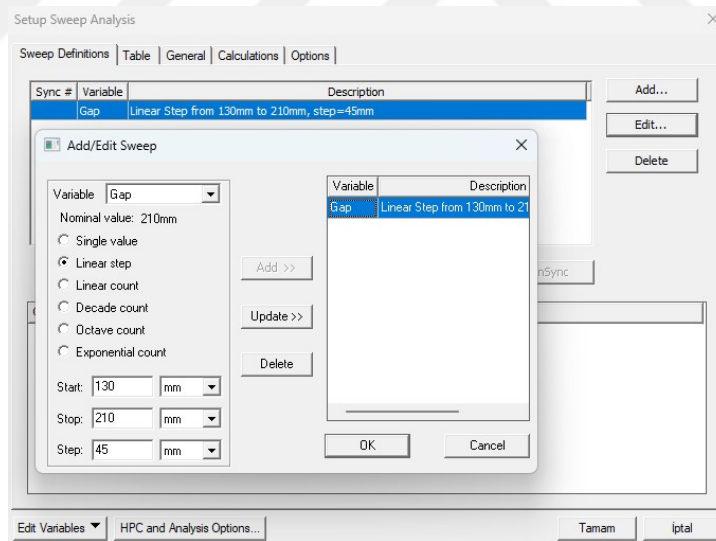
Şekil 3.16. Sargının aynalayanarak çoğaltılması ve taşınması.

Sargılar oluşturulduktan sonra Şekil 3.17’de gösterildiği gibi sargıların giriş ve çıkış uçlarının yüzeyleri seçilip sağ tıklandıktan sonra “Assign Excitation” seçeneğinden “Current” seçilerek elektrik tahrik tanımlamaları yapılabilmektedir.



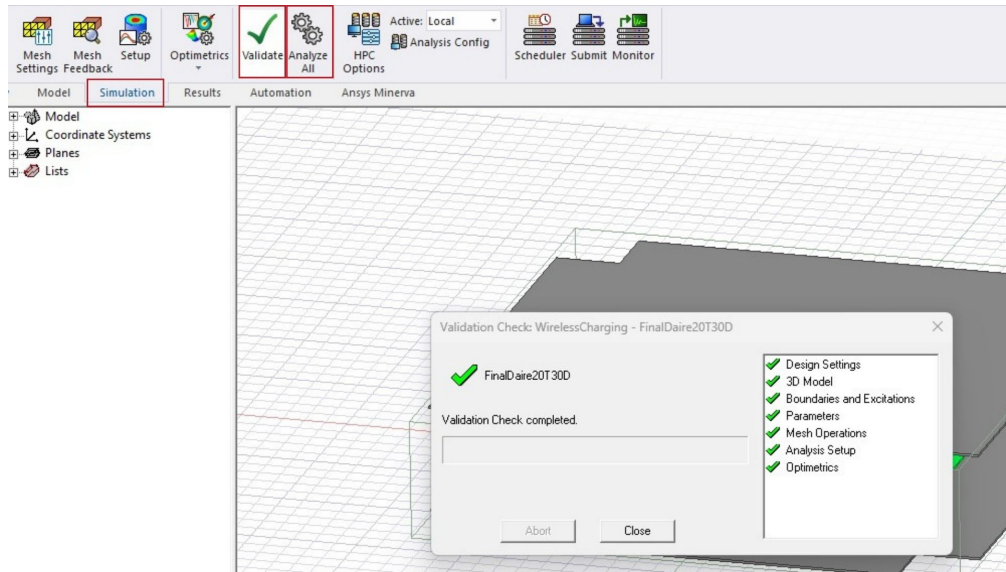
Şekil 3.17. Sargının elektrik tahrik tanımlamasının yapılması.

Simülasyon koşullarını, başlangıç ve bitiş noktaları belirleyebilmek için “Optimetrics” seçeneğinden Şekil 3.18’de gösterilen pencereden parametreler ayarlanır.



Şekil 3.18. Analiz parametrelerinin ayarlanması.

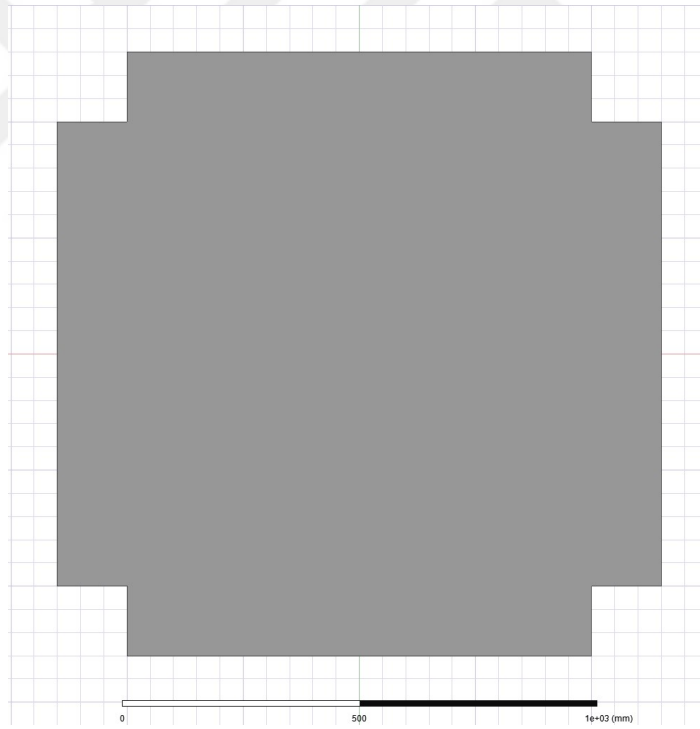
Tasarımın gerçekleştirilmesi ve gerekli tüm ayarlamaların ardından Şekil 3.19’da gösterildiği gibi Simulation üst menüsünden “Validate” seçilerek doğrulama yapılır. Hata gelmediği takdirde “Analyze All” seçilerek analiz işlemi gerçekleştirilir. Analiz sonuçlarına “Results” bölümünden oluşturulan veri tablosu veya grafikleriyle ulaşılabilmektedir.



Şekil 3.19. Doğrulama yapılarak analizin gerçekleştirilmesi.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez kapsamında Ansys Electronics programının Maxwell 3D aracı kullanılarak kablosuz güç aktarımının gerçekleşmesi için gerekli olan birincil ve ikincil sargıların tasarımları yapıp gerekli elektriksel parametreler tanımlanarak çeşitli koşullar altında SEY kullanılarak kuplaj katsayısının analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştiren kablosuz güç aktarım sisteminde güç, şarj istasyonuna sabitlenen bir birincil taraftan, araç üzerinde bulunan ikincil tarafa rezonans endüktif kuplaj yoluyla iletilmektedir. Her iki bileşende de sargıların endüktansını arttırmak için ferrit, akı sızıntısını önlemek için ise alüminyum plakalar kullanılmıştır. Analiz için oluşturulan tasarımların hepsinde özdeş ferrit ve alüminyum plaka kullanılmıştır. Şekil 4.1’de tasarımı gerçekleştirilen plaka gösterilmiştir. Ansys analizlerinde kullanılan plakanın özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.



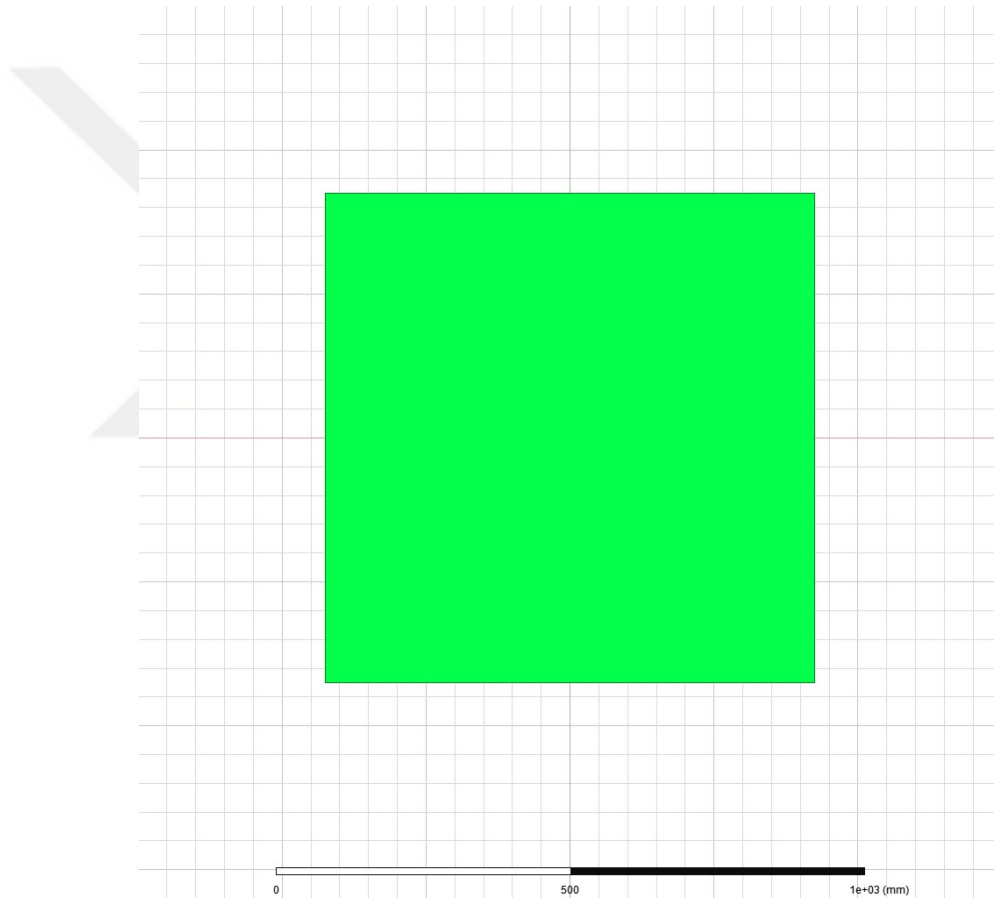
Şekil 4.1. Alüminyum plaka tasarımı.

Tablo 4.1. Ansys'te tasarlanan plakanın özellikleri.

Materyal Türü	Alüminyum
Materyal Rengi	Gri
Yükseklik	5 mm

Geniřlik	1300 mm
Uzunluk	1300 mm
Göreceli Geçirgenlik	1
Bağıl Geçirgenlik	1.000021
Elektriksel İletkenlik	38000000 siemens/m
Kütle Yoğunluğu	2689 kg/m ³

Şekil 4.2’de tasarımı gerçekleştirilen ferrit gösterilmiştir. Ansys analizlerinde kullanılan ferrit özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.



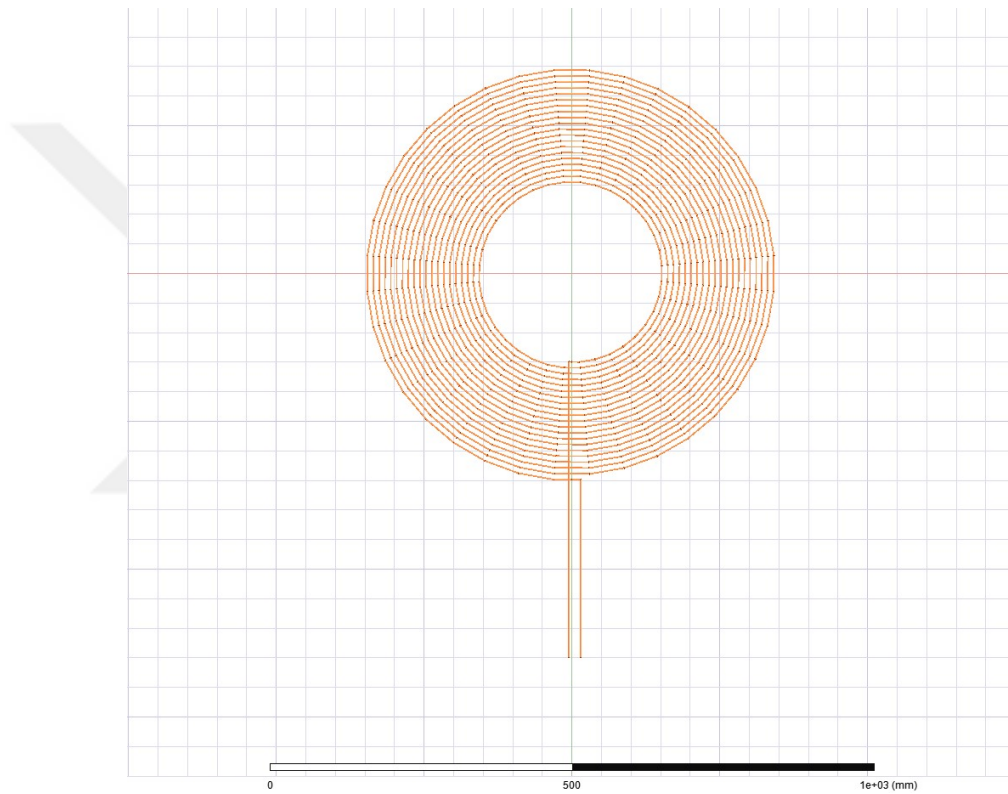
Şekil 4.2. Ferrit tasarımı.

Tablo 4.2. Ansys’te tasarlanan ferrit özellikleri.

Materyal Türü	FDK6H40
Materyal Rengi	Yeşil
Yükseklik	4 mm
Geniřlik	850 mm

Uzunluk	850 mm
Göreceli Geçirgenlik	1
Bağıl Geçirgenlik	2400
Elektriksel İletkenlik	0 siemens/m

Şekil 4.3’de tasarımı gerçekleştirilen sargı gösterilmiştir. Ansys analizlerinde kullanılan sargının özellikleri Tablo 4.3’de verilmiştir. Tur sayısı ve sargı iç uzunluğu analize göre değişiklik gösterdiği için tabloda yer verilmemiştir.



Şekil 4.3. Dairesel sargı tasarımı.

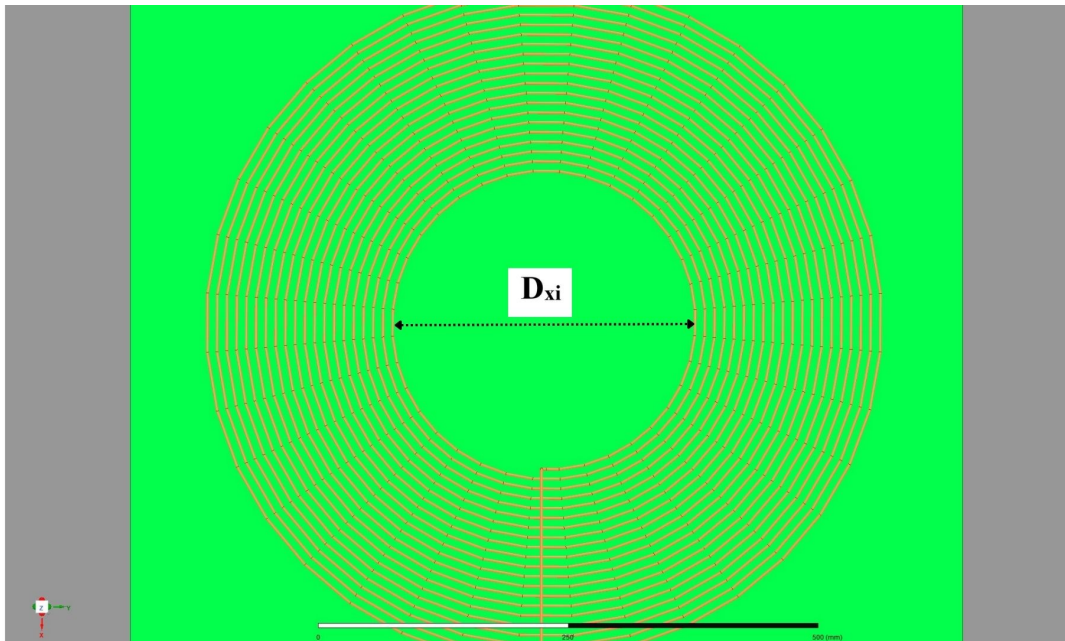
Tablo 4.3. Ansys'te tasarlanan sargının özellikleri.

Materyal Türü	Bakır
Materyal Rengi	Turuncu
Kablo Türü	Örgülü
Kesit Alanı	5,2 mm ²
Tur Başına Yarıçapdaki Değişim	10 mm
Uzunluk	1300 mm

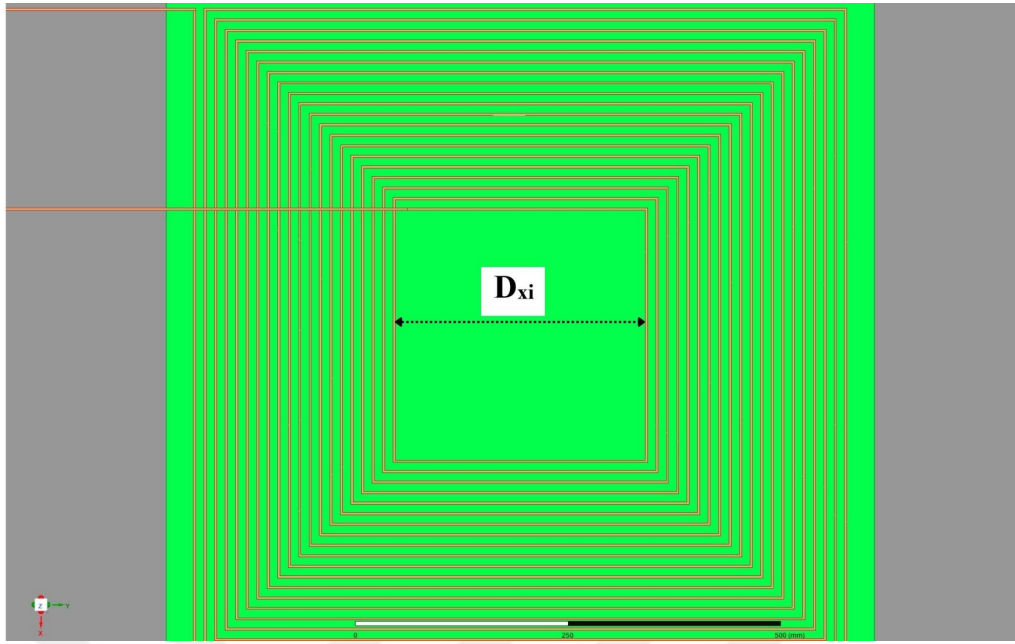
Göreceli Geçirgenlik	1
Bağıl Geçirgenlik	0.999991
Elektriksel İletkenlik	58000000 siemens/m
Kütle Yoğunluğu	8933 kg/m ³
Bir Damardaki İletken Sayısı	96
Tanımlanan Akım Tahriği	31.73 A

Birincil ve ikincil sargılar birbiriyle aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Kuplaj katsayısının analizleri iki aynı sargının birbirine aynalanması ve aralarına daha önceden belirlenen mesafelerde konumlandırılarak oluşturulmuştur. Daha önceden yapılan çalışmalarda kuplaj katsayısının tur sayısının artmasıyla arttığı gösterilmiştir (Akün & Tabak, 2023). Tez kapsamında tur sayısı değişkeninin yanı sıra sargı topolojilerindeki değişim, sargıların D_{xi} uzunluğunun değişimi, birincil ve ikincil sargıların birbirlerine olan uzaklıklarındaki değişim ve sargıların l_{top} uzunluklarıyla olan ilişkisi göz önüne alınarak kuplaj katsayısının analizleri yapılmıştır.

D_{xi} sargıların iç uzunluk değişkeni olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te dairesel ve kare sargı topolojisine sahip örneklerde D_{xi} gösterilmiştir. D_{xi} 'nin değişiminin kuplaj katsayılarına etkisi analiz edilerek iç uzunluğundaki değişimin kuplaj katsayısına etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.4. D_{xi} iç uzunluğuna sahip dairesel topolojiye sahip sargı.

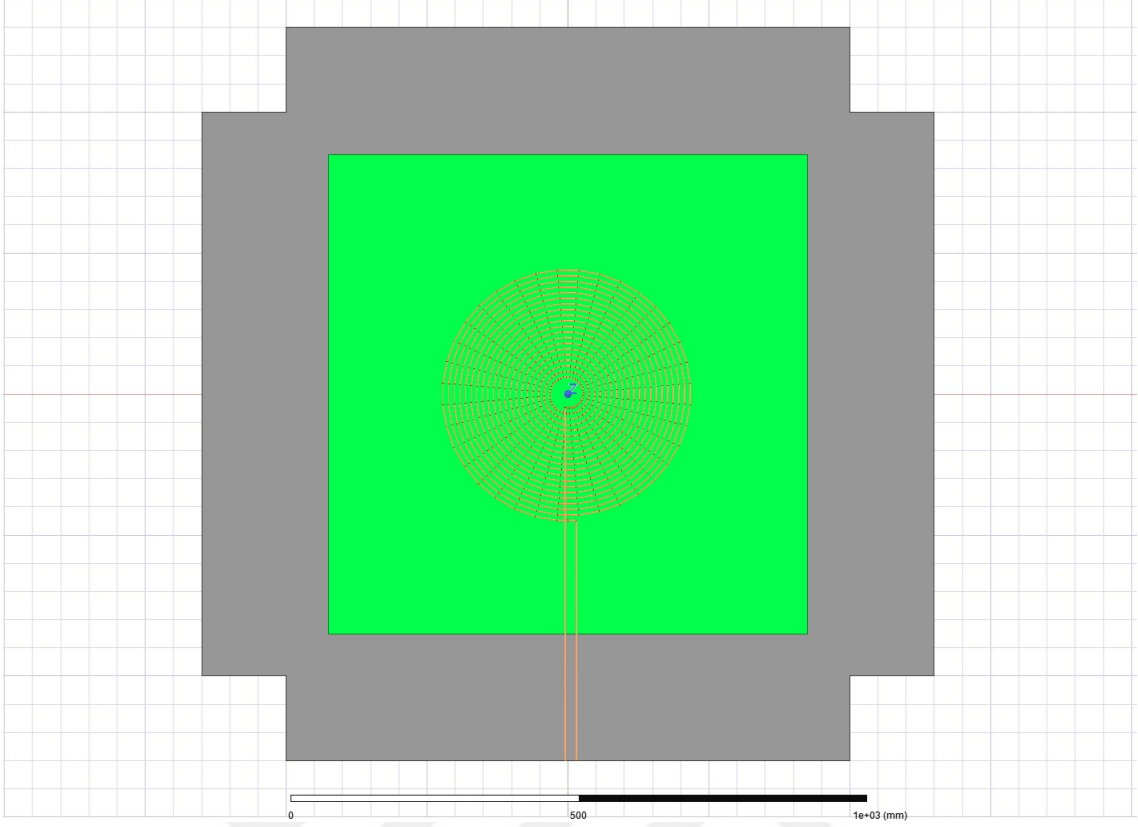


Şekil 4.5. D_{xi} iç uzunluğuna sahip kare topolojiye sahip sargı.

İkinci olarak sargı topolojilerinin kuplaj katsayısına etkisini analiz etmek amacıyla iki farklı sargı topolojisi olan kare sargı topolojisi ve dairesel sargı topolojisi ele alınmıştır. Bu iki farklı topolojide diğer parametrelerin değişimine göre en iyi kuplaj katsayısının sonuç verdiği topoloji belirlenmiştir. Her iki topolojide de ilk olarak sargılar $D_{xi}=50$ mm iç uzunluk ve 20 tur belirlenerek başlanmıştır. D_{xi} değeri 100 mm, 150 mm ve 300 mm şeklinde değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Bir diğer değişken olan tur sayıları, bakır sargıların eşit l_{top} uzunluğuna sahip olacak şekilde her D_{xi} değeri için belirlenmiştir ve analizler bu tur sayıları tanımlanarak gerçekleştirilmiştir.

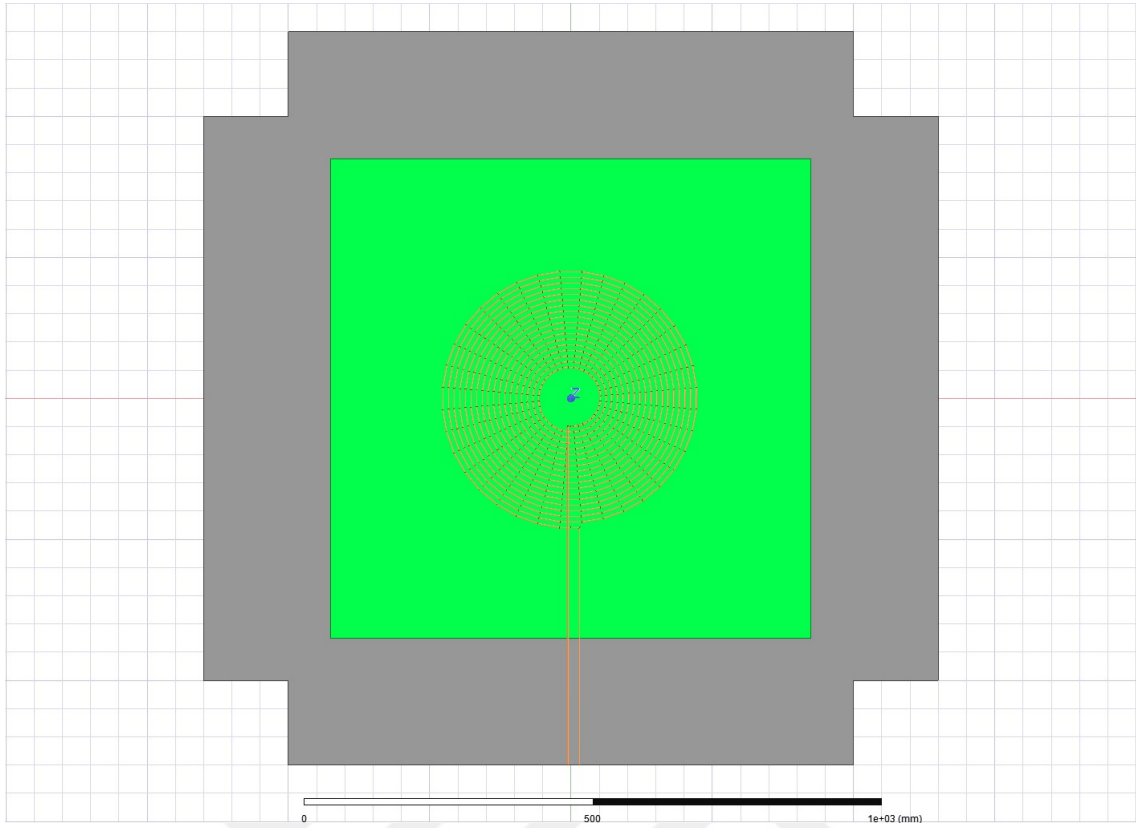
4.1. Dairesel Sargı Analizleri

Analizleri gerçekleştirmek üzere ilk olarak birincil ve ikincil tarafı eşit olan dört farklı dairesel sargı tasarımı yapılmıştır. Tasarımlarda D_{xi} uzunlukları sırasıyla 50 mm, 100 mm, 150 mm, 300 mm sahip olarak tasarlanmıştır. Sargıların tur sayıları, sargıların l_{top} uzunluklarının eşit olabilmesi için D_{xi} uzunluğunun 50 mm olduğu tasarımda 20 tur, D_{xi} uzunluğunun 100 mm olduğu tasarım 18 tur, D_{xi} uzunluğunun 150 mm olduğu tasarım 16 tur olarak belirlenmiştir.



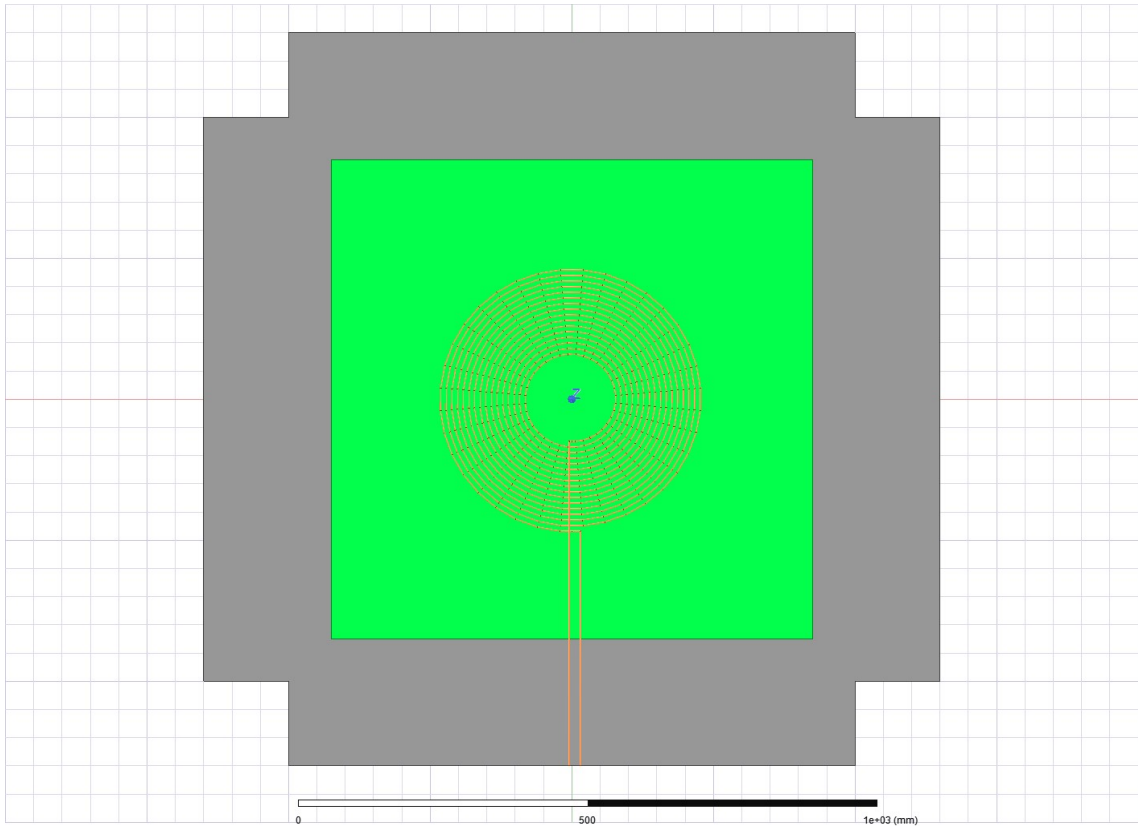
Şekil 4.6. $D_{xi}=50$ mm iç uzunluğu ve 20 tura sahip dairesel birincil taraf sargısı.

Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’de tasarımı gerçekleştirilen sargıların birincil taraflı sargıların üstten görünümü verilmiştir. İkincil taraf sargılar birincil taraf sargılar ile özdeş tutulmuştur.

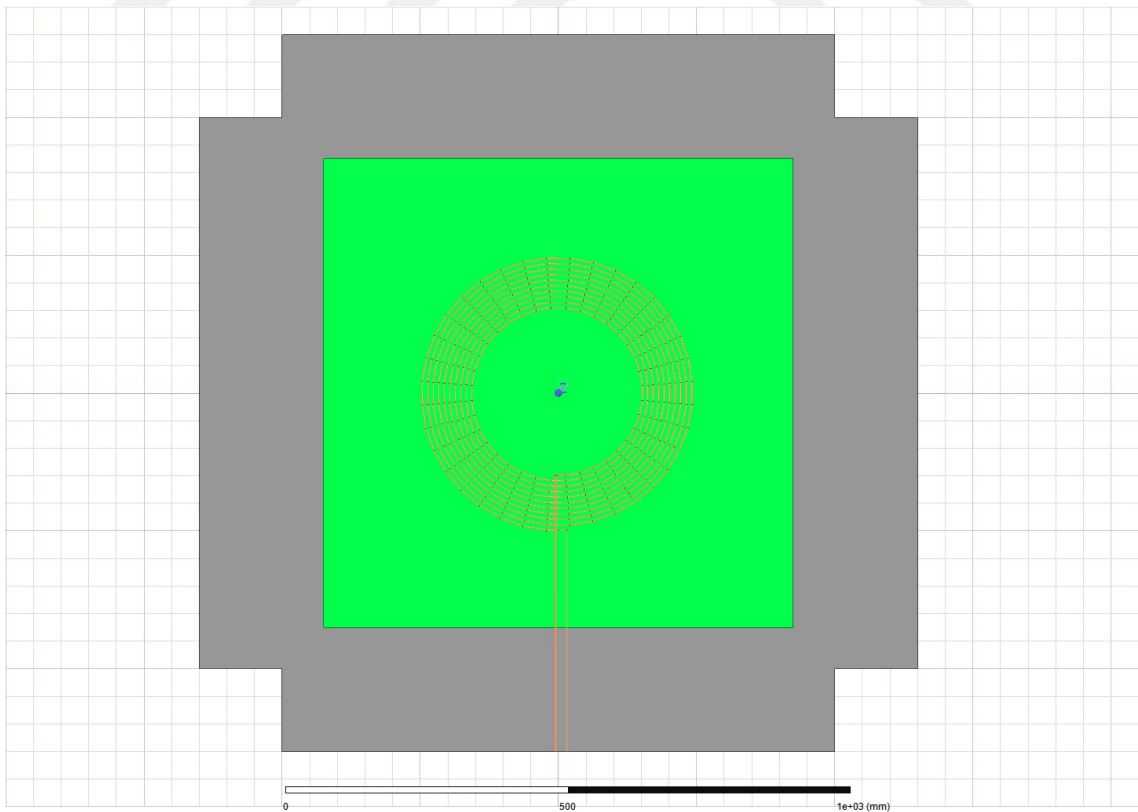


Şekil 4.7. $D_{xi}=100$ mm iç uzunluğu ve 18 tura sahip dairesel birincil taraf sargısı.

Bu şekillerde gri renklendirilmiş materyal alüminyum, yeşil renklendirilmiş materyale ferrit, turuncu renklendirilmiş materyal bakır özellikleri uygulanmıştır.

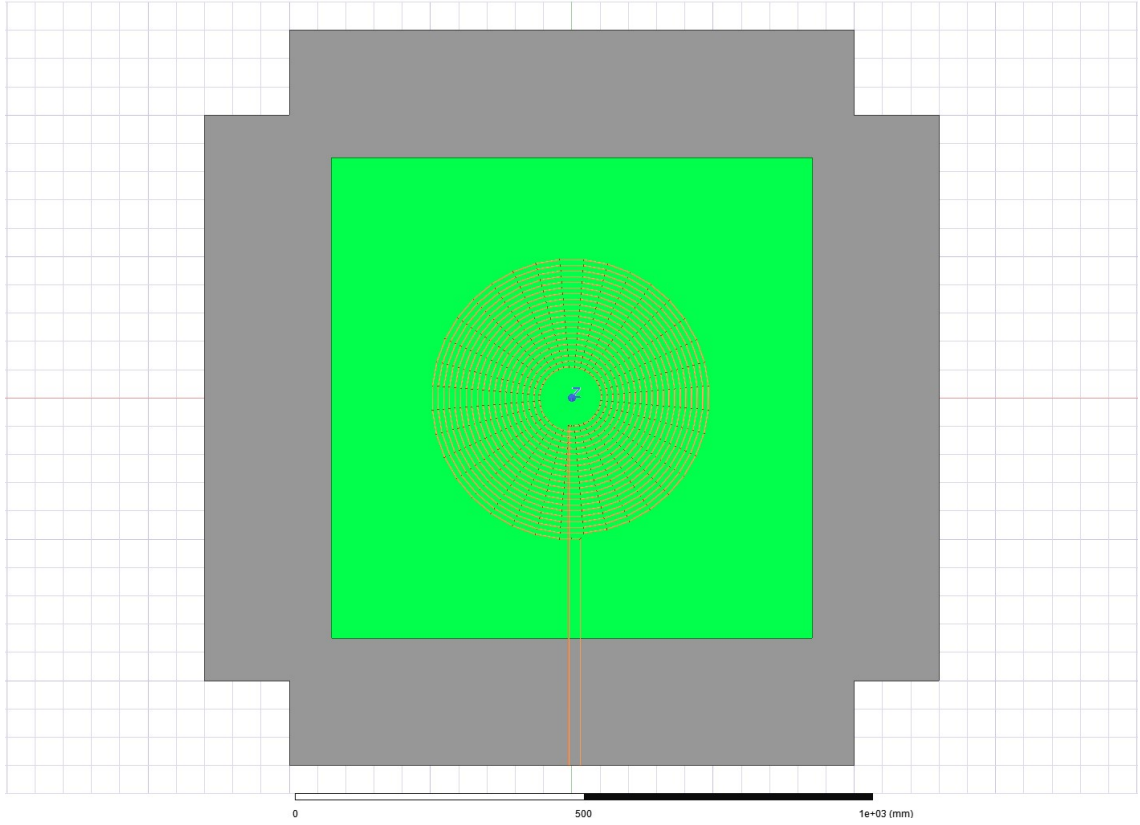


Şekil 4.8. $D_{xi}=150$ mm iç uzunluğu ve 16 tura sahip dairesel birincil taraf sargısı.



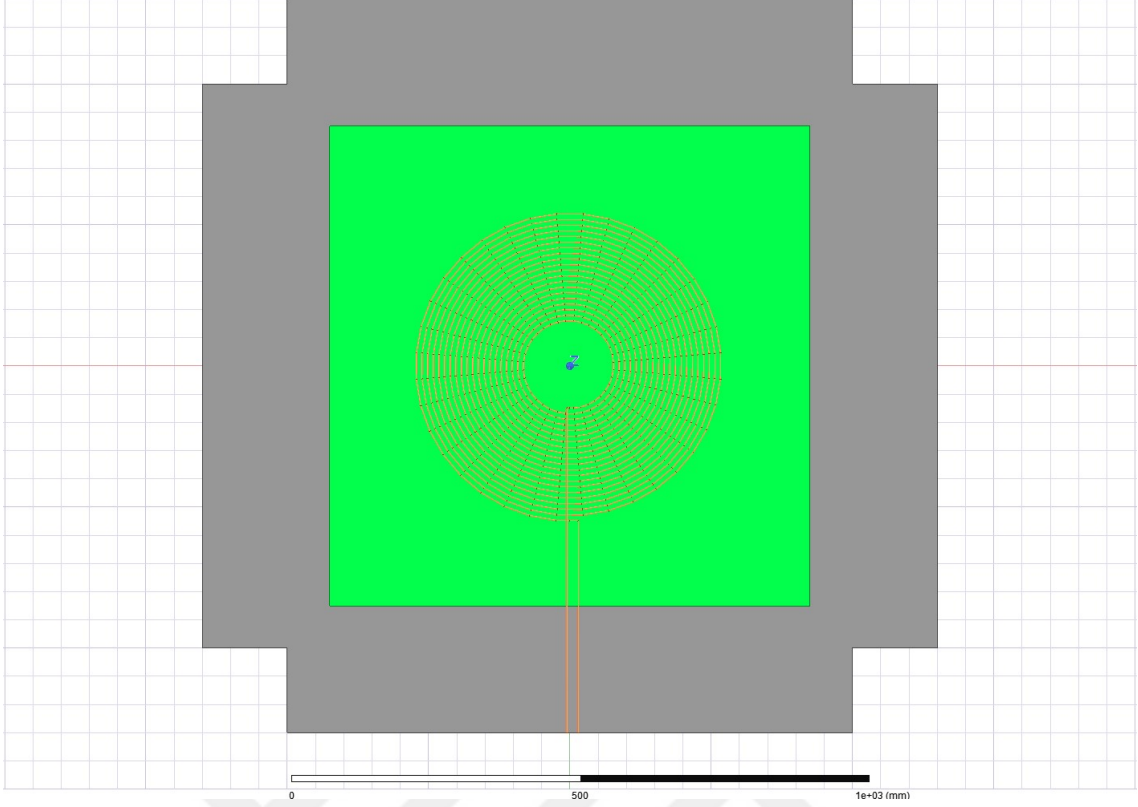
Şekil 4.9. $D_{xi}=300$ mm iç uzunluğu ve 10 tura sahip dairesel birincil taraf sargısı.

Belirtilen tasarımların yanı sıra Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gösterilen tasarımlarda sargı tur sayısı sabit tutulup D_{xi} uzunlukları büyütülerek tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Böylelikle sargıların D_{xi} uzunluklarındaki artışın kuplaj katsayısına etkisinin analizi gerçekleştirilmiştir.

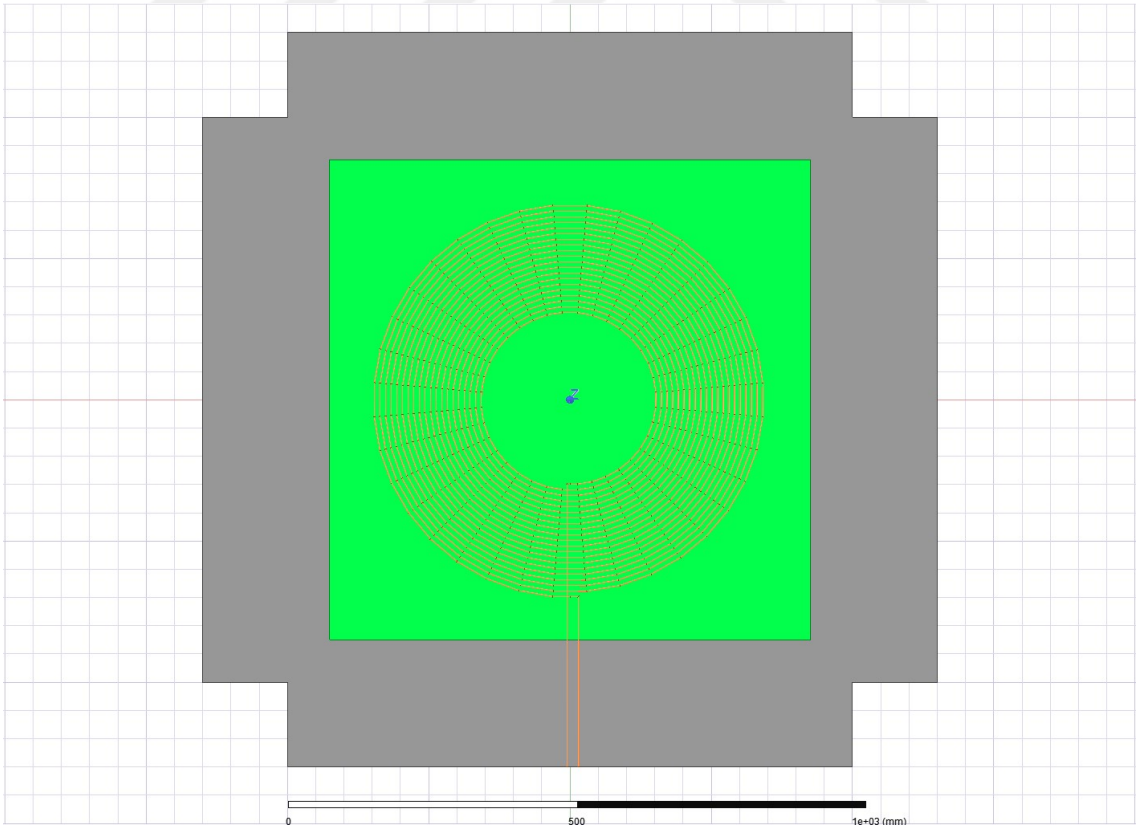


Şekil 4.10. $D_{xi}=100$ mm iç uzunluğu ve 20 tura sahip dairesel birincil taraf sargısı.

Sargıların sabit tutulan tur sayısı olarak 20 tur belirlenmiştir ve D_{xi} uzunlukları olarak 100 mm, 150 mm, 300 mm belirlenmiştir. Böylelikle bir üst analizle birleştirildiğinde genel bir tabloda tüm analiz sonuçları gösterilmiştir.

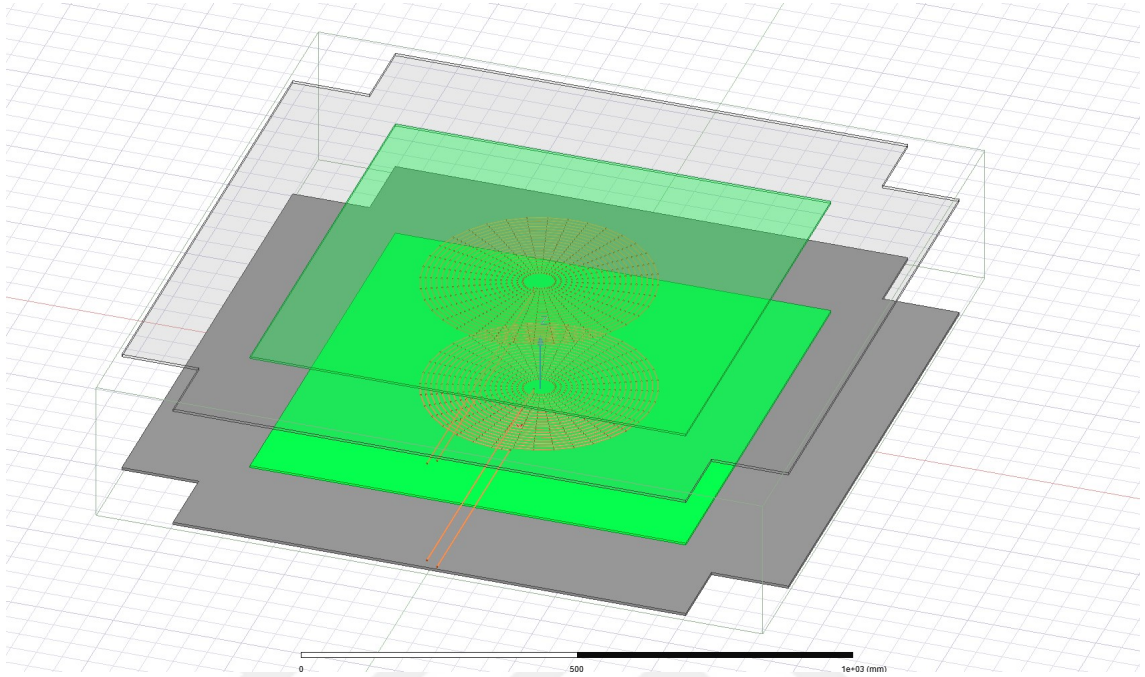


Şekil 4.11. $D_{xi}=150$ mm iç uzunluğu ve 20 tura sahip dairesel birincil taraf sargısı.



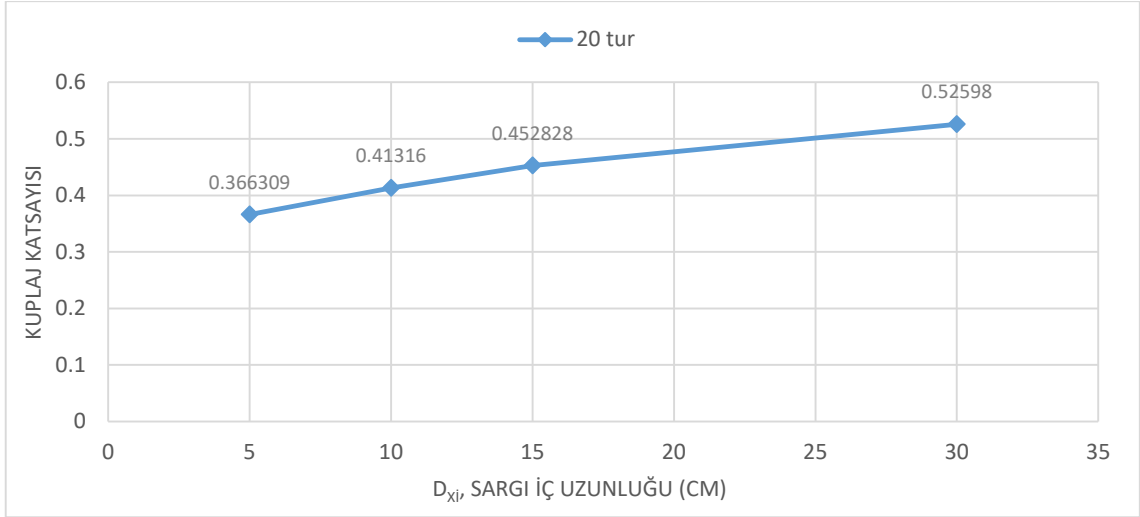
Şekil 4.12. $D_{xi}=300$ mm iç uzunluğu ve 20 tura sahip dairesel birincil taraf sargısı.

Şekil 4.13'te aralarında 130 mm mesafe bulunan birincil ve ikincil sargılarının tasarımı beraber gösterilmiştir.



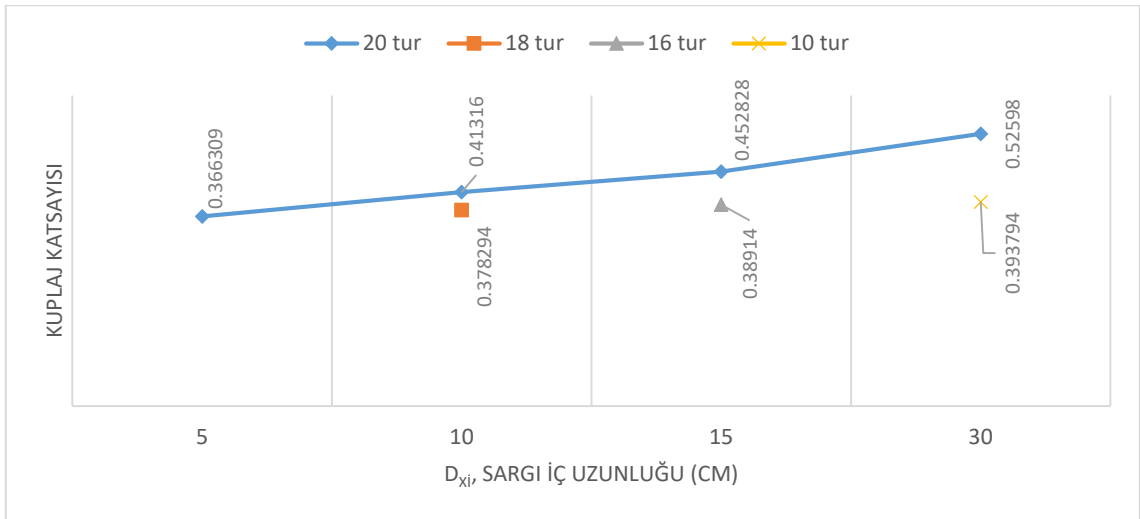
Şekil 4.13. Dairesel sargı topolojisine sahip, birincil ve ikincil sargılar arasında 130 mm boşluk olan tasarım.

Gerekli parametrelerin tanımlanmasının ardından ilk olarak dairesel sargıların D_{xi} uzunlukları artırıldığında kuplaj katsayısındaki değişimi analiz edilmiştir. Şekil 4.14'de 20 tur sayısına sahip dairesel sargının D_{xi} uzunluğu 50 mm'den 100 mm'ye, 100 mm'den 150 mm'ye ve 150 mm'den 300 mm'ye çıkarıldı durum analiz edilerek D_{xi} uzunluğunun arttığı durumda kuplaj katsayısının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 4.14'te verilen analiz sonucunda birincil ve ikincil sargı arasındaki mesafe 130 mm'de sabit olduğu durum göz önüne alınarak analiz gerçekleştirilmiştir.

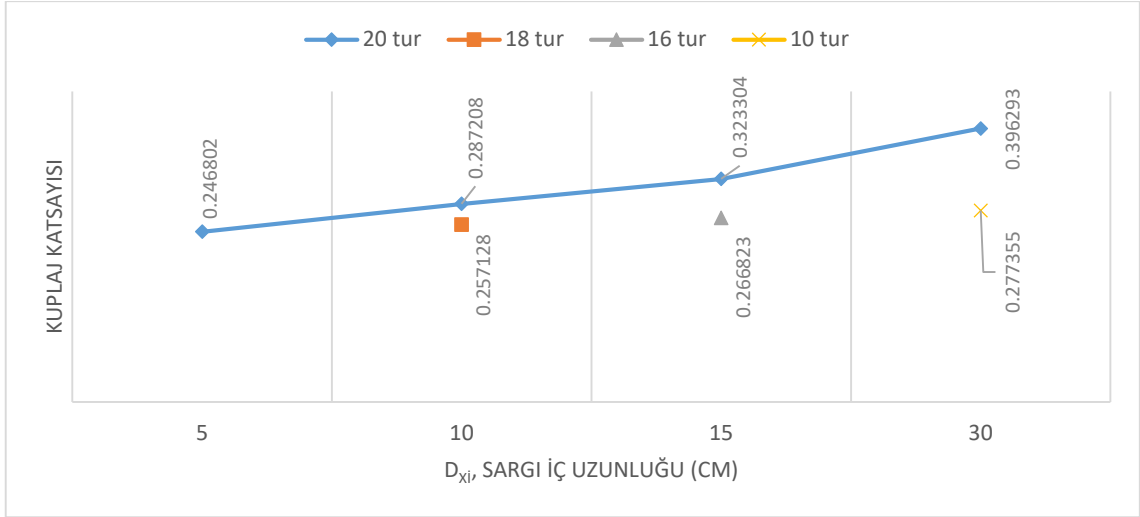


Şekil 4.14. 20 tura sahip dairesel sargıların D_{xi} değişimine göre kuplaj katsayısındaki değişim.

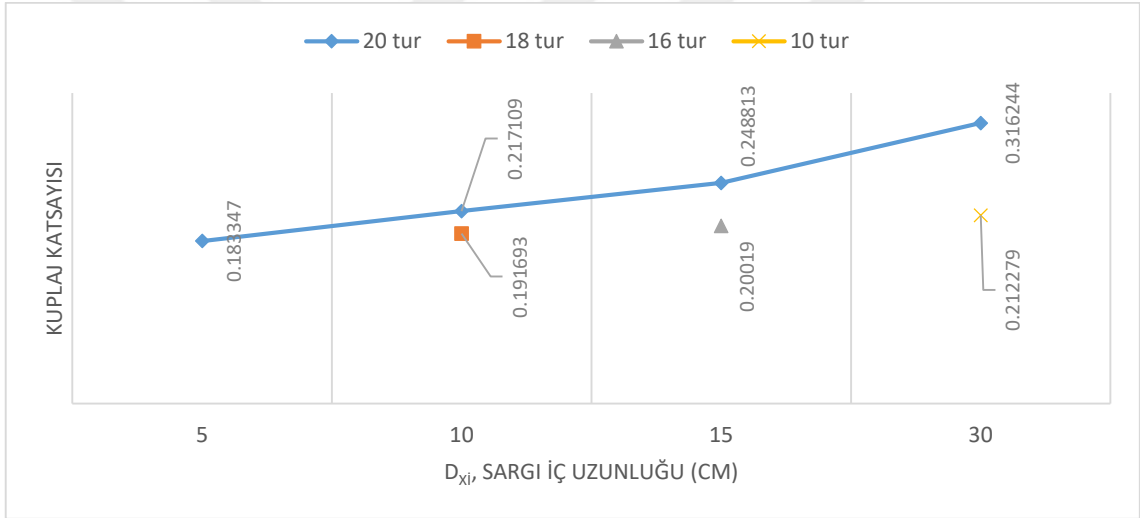
Şekil 4.14'te verilen analiz sonucunu genişletmek için birincil ve ikincil dairesel sargıların arasındaki mesafenin ve tur sayılarının değiştiği durumlarda bir değişken olarak ele alıp analizler yeniden yapılmıştır. Böylelikle birincil ve ikincil sargılar arasındaki mesafenin değişiminin kuplaj katsayısına olan etkisi analiz edilmiştir. Şekil 4.15'te birincil ve ikincil sargıların arasındaki mesafenin 130 mm olduğu, şekil 4.16'de birincil ve ikincil sargıların arasındaki mesafenin 175 mm olduğu, şekil 4.17'de birincil ve ikincil sargıların arasındaki mesafenin 210 mm olduğu analizin sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Aralarında 130 mm boşluk bulunan dairesel sargıların l_{top} uzunluğu sabit tutulduğunda D_{xi} değişimine göre kuplaj katsayısındaki değişim.



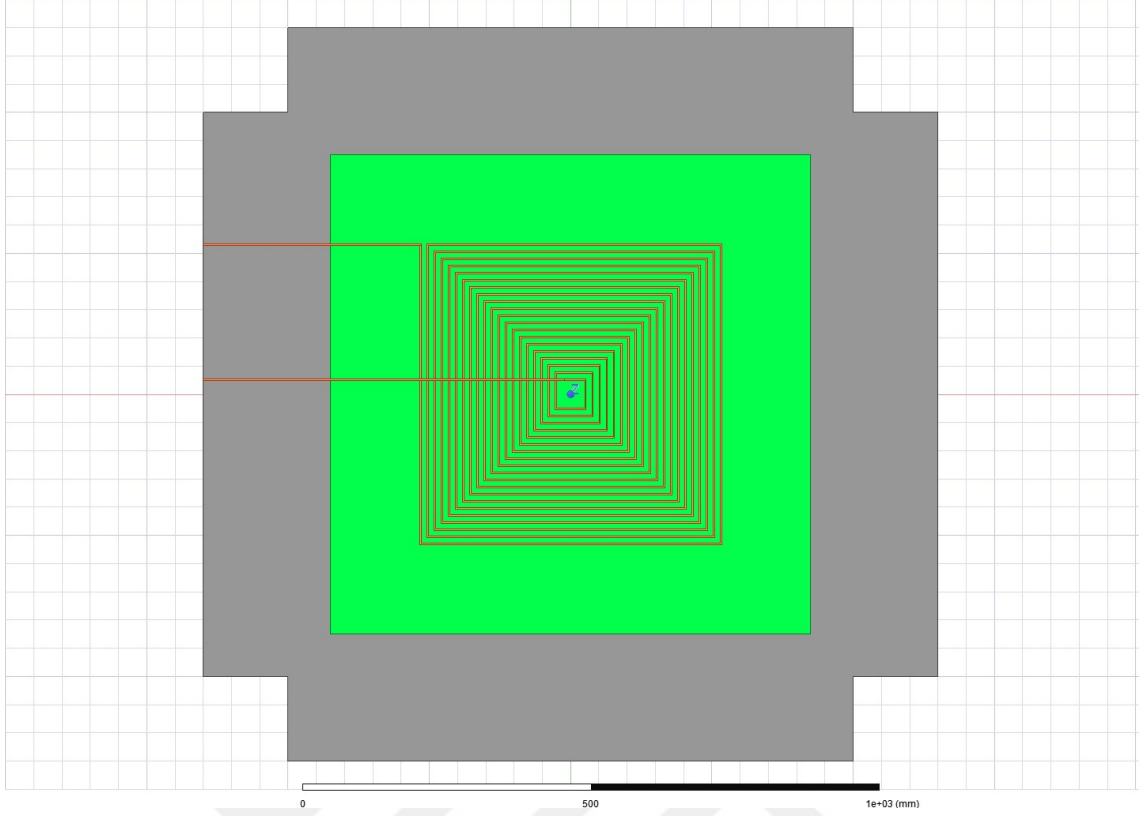
Şekil 4.16. Aralarında 175 mm boşluk bulunan dairesel sargıların l_{top} uzunluğu sabit tutulduğunda D_{xi} değişimine göre kuplaj katsayısındaki değişim.



Şekil 4.17. Aralarında 210 mm boşluk bulunan dairesel sargıların l_{top} uzunluğu sabit tutulduğunda D_{xi} değişimine göre kuplaj katsayısındaki değişim.

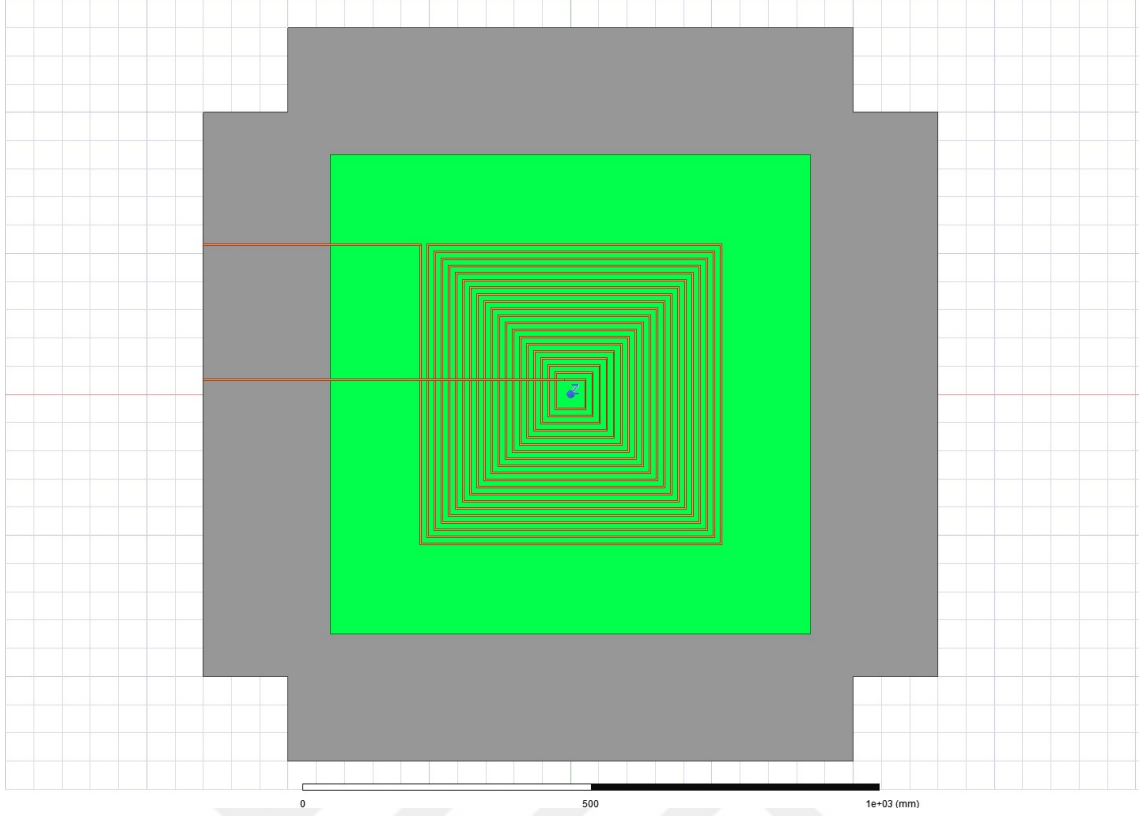
4.2. Kare Sargı Analizleri

Birincil ve ikincil kare sargılar dairesel sargı topolojisiyle tutarlı karşılaştırma yapılabilmesi için D_{xi} 50 mm, 100 mm, 150 mm, 300 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Sargıların tur sayıları, sargıların l_{top} uzunluklarının eşit olabilmesi için D_{xi} 'nin 50 mm uzunluğa sahip olduğu tasarım 20 tur, D_{xi} 'in 100 mm uzunluğa sahip tasarım 18 tur, D_{xi} 'in 150 mm uzunluğa sahip tasarım 16 tur olarak belirlenmiştir.



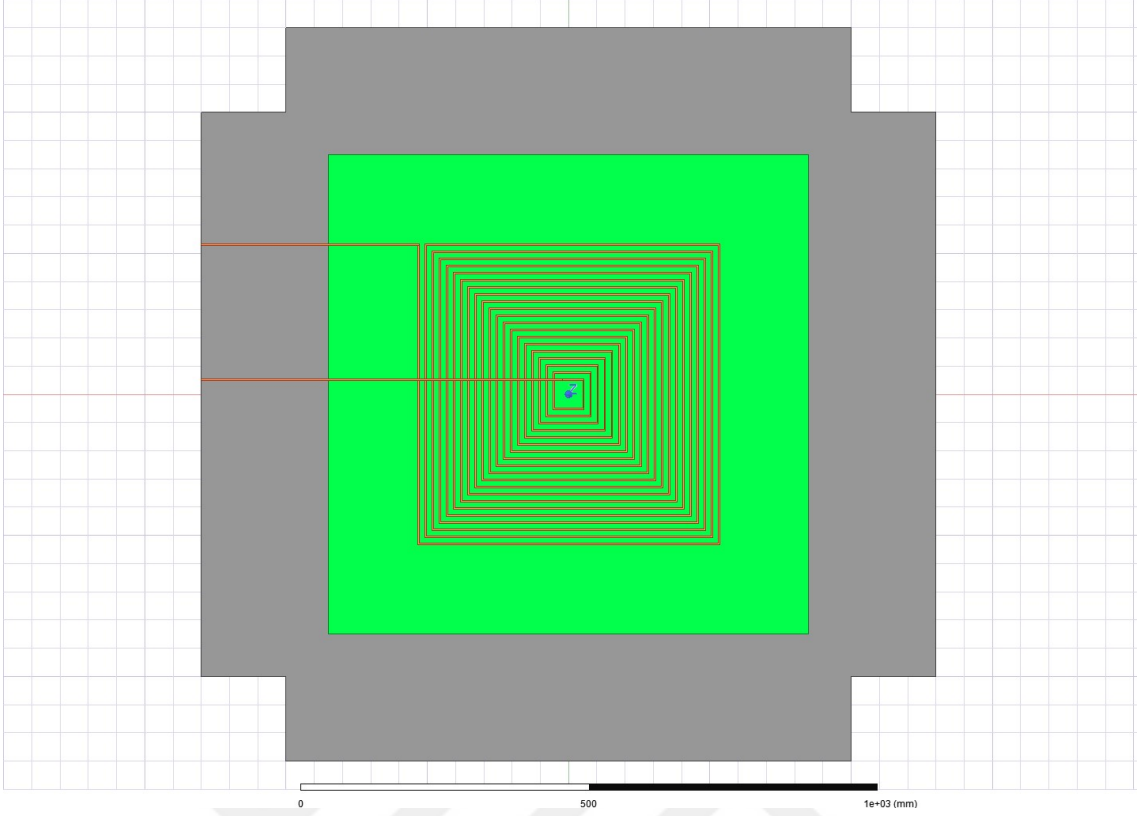
Şekil 4.18. $D_{xi}=50$ mm iç uzunluğa ve 20 tura sahip kare birincil taraf sargısı.

Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de tasarımı gerçekleştirilen sargıların birincil taraflı sargıların üstten görünümü verilmiştir. İkincil taraf sargılar birincil taraf sargılar ile özdeş tutulmuştur.

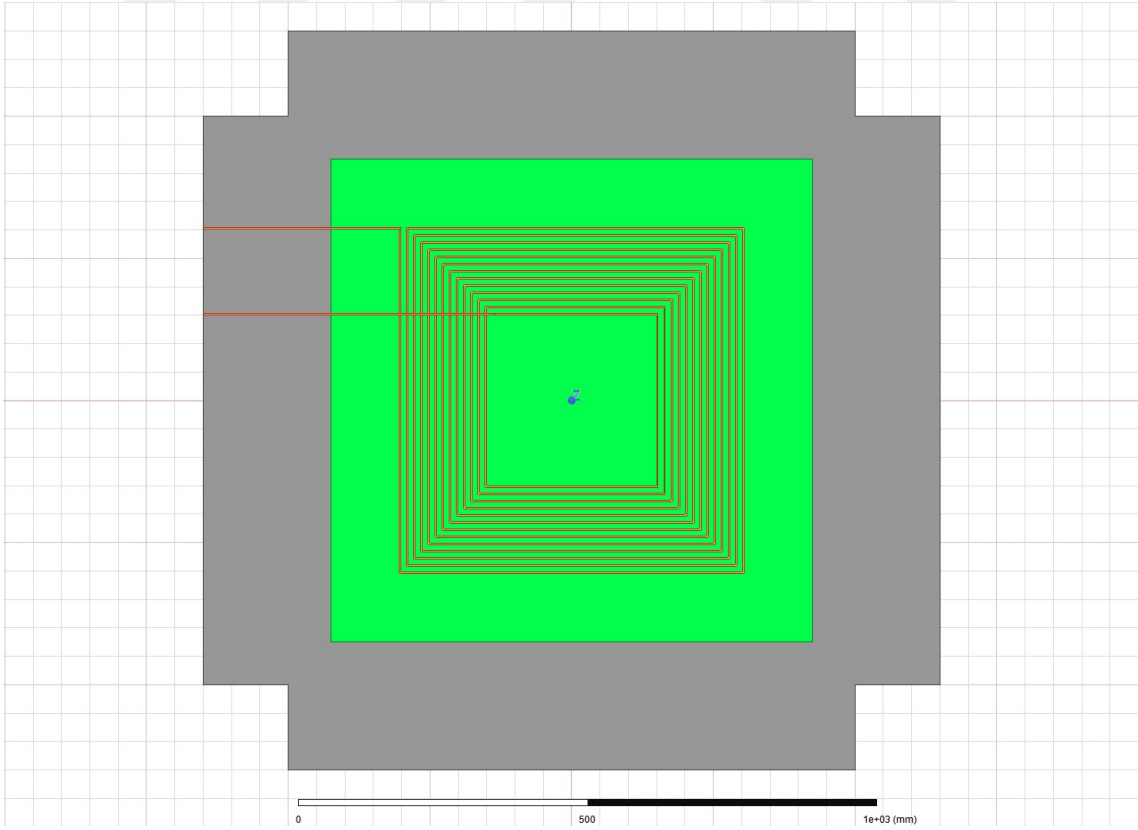


Şekil 4.19. $D_{xi}=100$ mm iç uzunluğa ve 18 tura sahip kare birincil taraf sargısı.

Kare topolojiye sahip tasarımlarda da dairesel topolojide olduğu gibi gri renklendirilmiş materyal alüminyum, yeşil renklendirilmiş materyale ferrit, turuncu renklendirilmiş materyal bakır özellikleri uygulanmıştır.

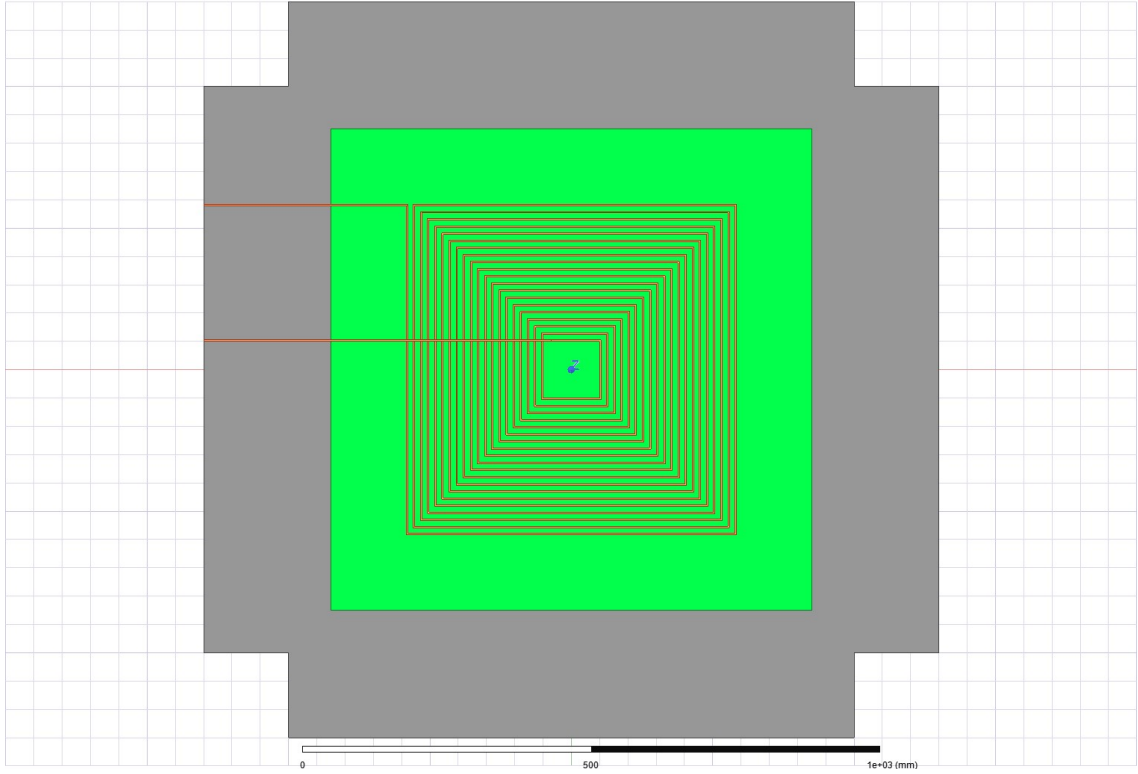


Şekil 4.20. $D_{xi}=150$ mm iç uzunluğa ve 16 tura sahip kare birincil taraf sargısı.



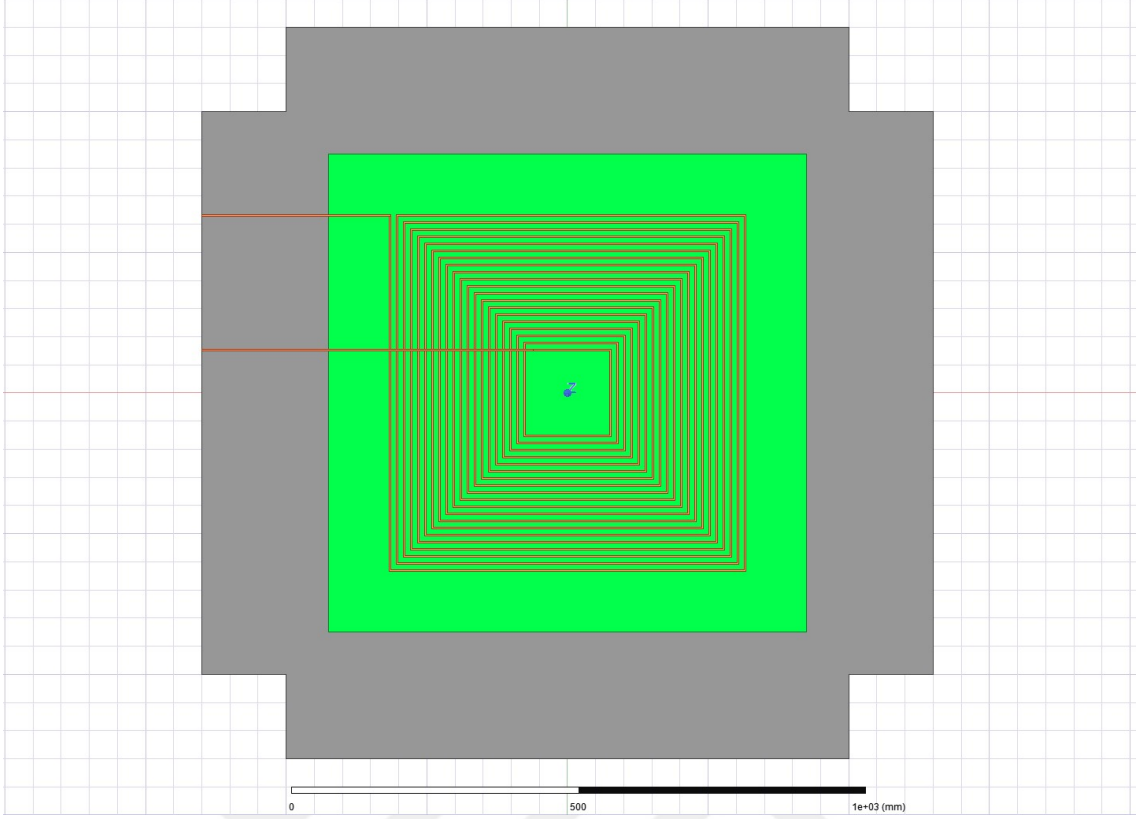
Şekil 4.21. $D_{xi}=300$ mm iç uzunluğa ve 13 tura sahip kare birincil taraf sargısı.

Belirtilen tasarımların yanı sıra Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te gösterilen tasarımlarda sargı tur sayısı sabit tutulup D_{xi} artırarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Böylelikle sargıların D_{xi} uzunluklarındaki artışın kuplaj katsayısına etkisinin analizi gerçekleştirilmiştir.

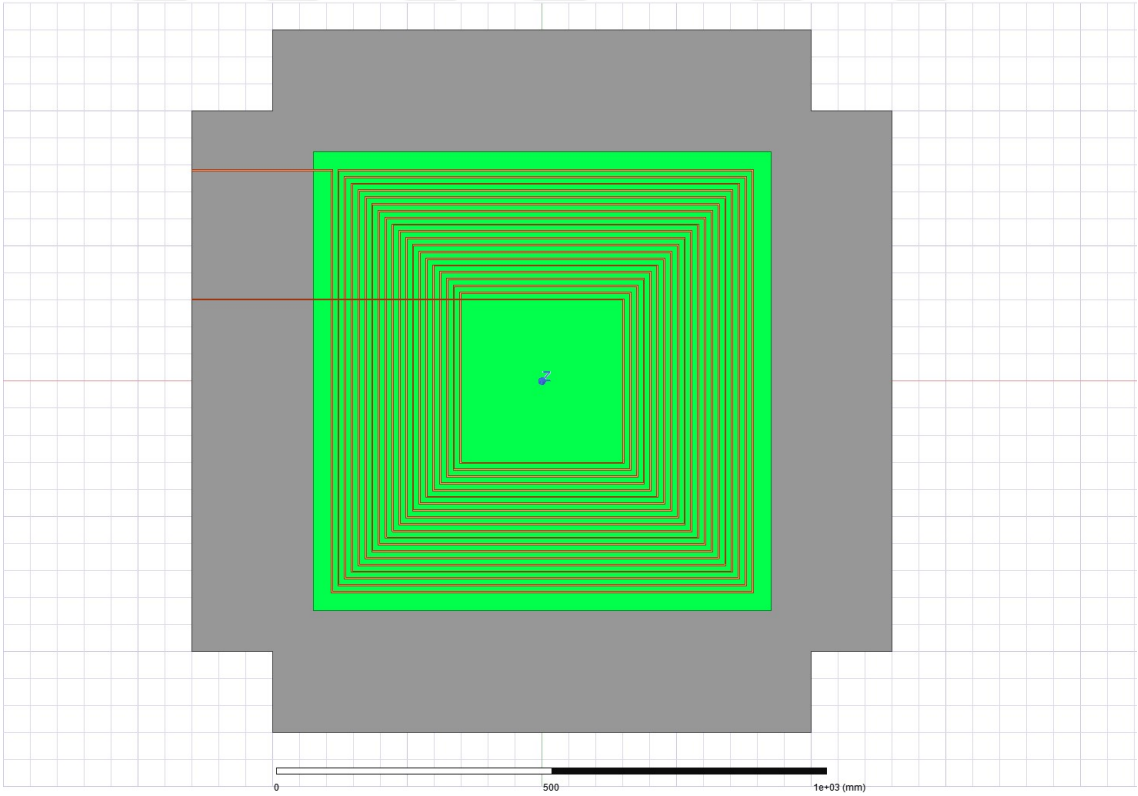


Şekil 4.22. $D_{xi}=100$ mm uzunluğa ve 20 tura sahip kare birincil taraf sargısı.

Sargıların sabit tutulan tur sayısı olarak 20 tur belirlenmiştir ve iç uzunluk değişkenleri olarak $D_{xi}=100$ mm, $D_{xi}=150$ mm, $D_{xi}=300$ mm belirlenmiştir. Böylelikle bir üst analizle birleştirildiğinde genel bir tabloda tüm analiz sonuçları gösterilmiştir.

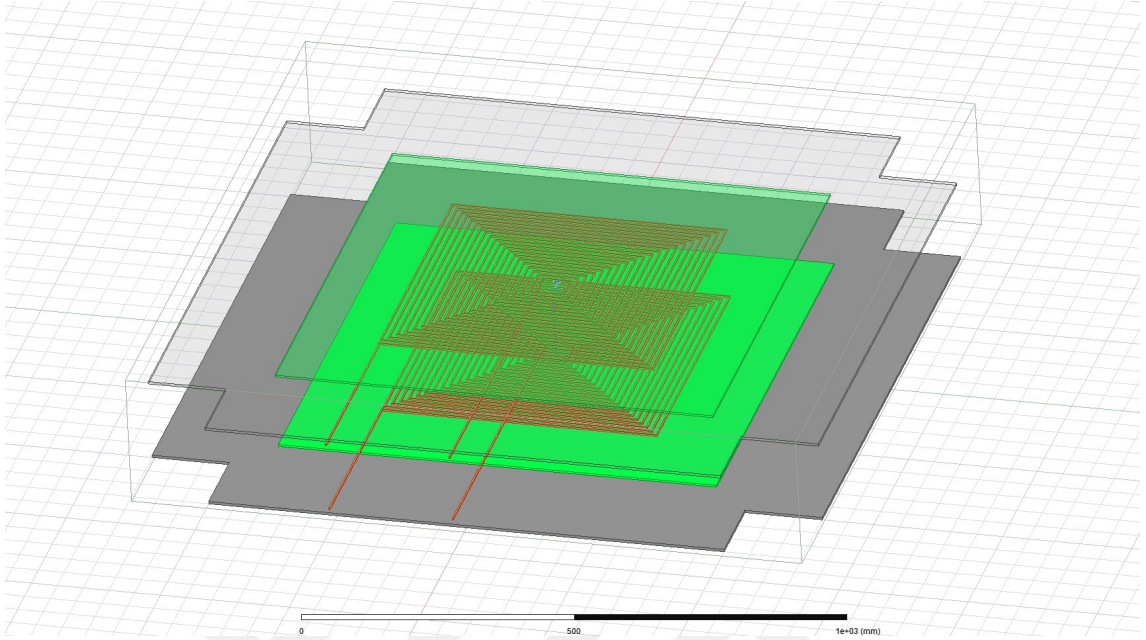


Şekil 4.23. $D_{xi}=150$ mm iç uzunluğa ve 20 tura sahip kare birincil taraf sargısı.



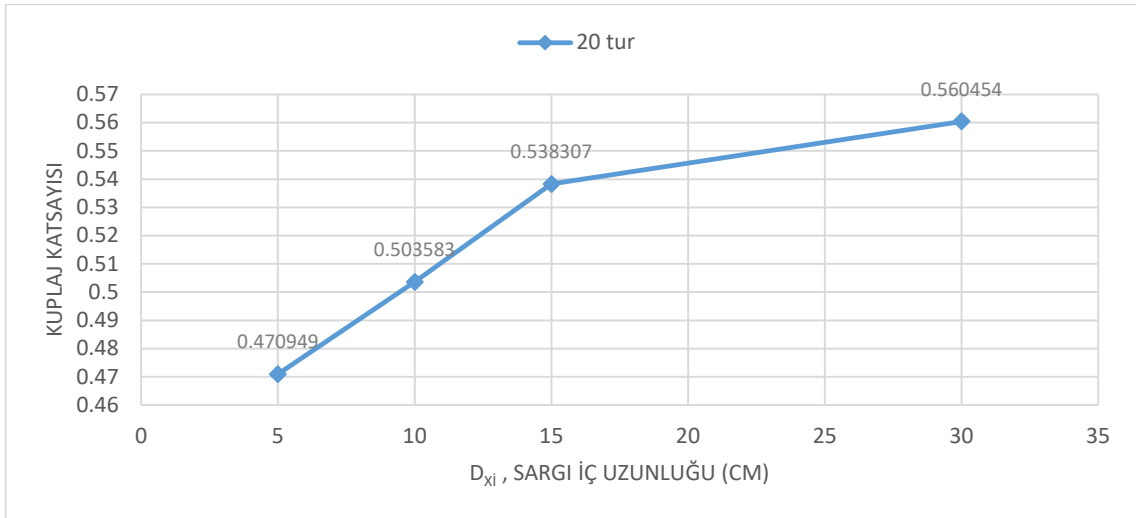
Şekil 4.24. $D_{xi}=300$ mm iç uzunluğa ve 20 tura sahip kare birincil taraf sargısı.

Şekil 4.25’de aralarında 130 mm mesafe bulunan birincil ve ikincil sargıların tasarımı gösterilmiştir.



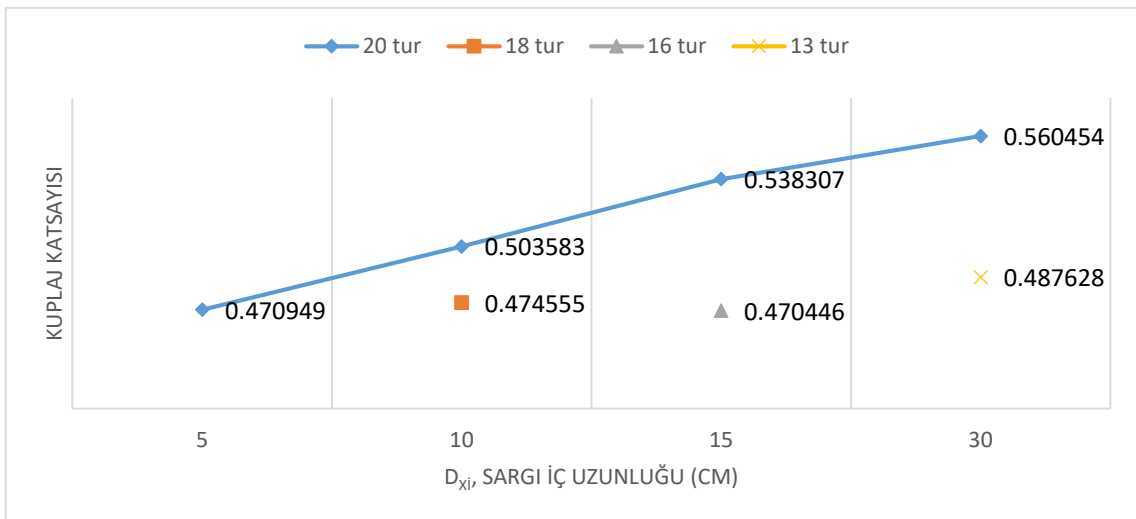
Şekil 4.25. Kare sargı topolojisine sahip, birincil ve ikincil sargılar arasında 130 mm boşluk olan tasarım.

Dairesel topolojide olduğu gibi kare topolojide de sargıların D_{xi} uzunlukları artırıldığında kuplaj katsayısındaki değişim analiz edilmiştir. Şekil 4.26’de 20 tur sayısına sahip dairesel sargının iç uzunluğu olan D_{xi} ’nin 50 mm’den 100 mm’ye, 100 mm’den 150 mm’ye ve 150 mm’den 300 mm’ye çıkarıldığı durum analiz edilerek D_{xi} ’nin arttığı durumda kuplaj katsayısının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 4.26’de verilen analiz sonucunda birincil ve ikincil sargı arasındaki mesafe 130 mm’de sabit olduğu durum göz önüne alınarak analiz gerçekleştirilmiştir.

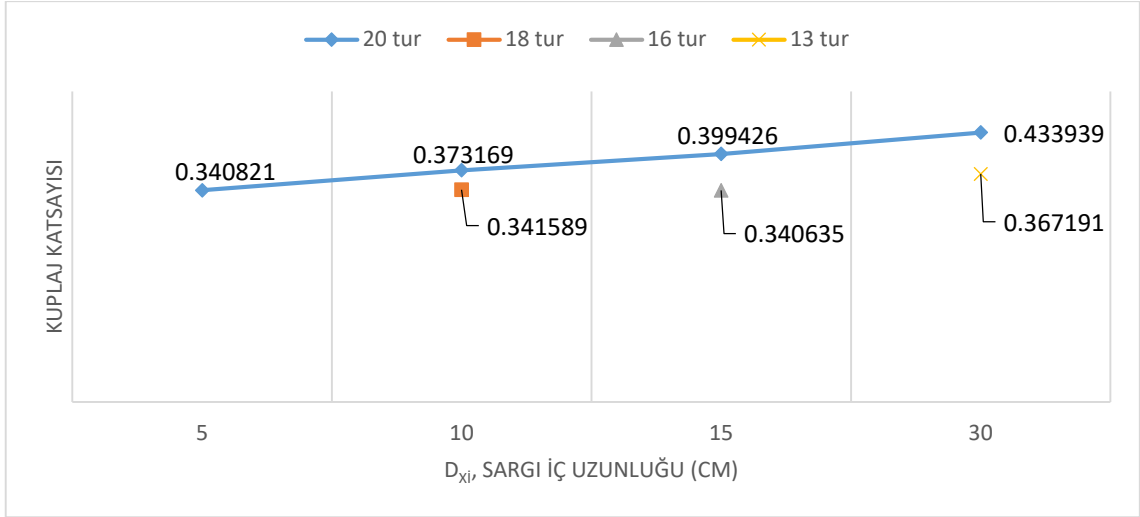


Şekil 4.26. 20 tura sahip kare sargıların D_{xi} değişimine göre kuplaj katsayısındaki değişim.

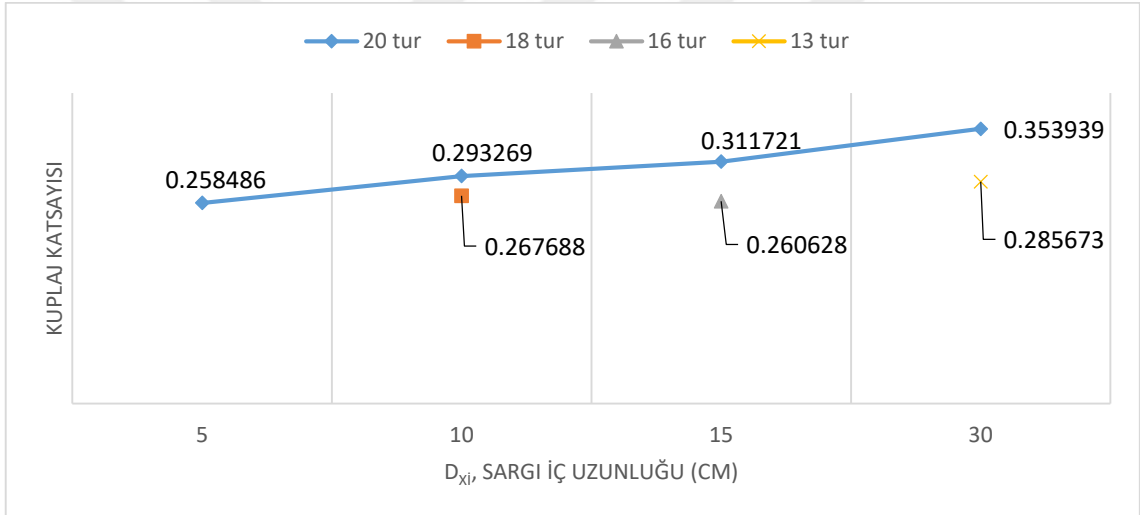
Şekil 4.26’da verilen analiz sonucunu genişletmek için birincil ve ikincil kare sargıların arasındaki mesafenin ve tur sayılarının değiştiği durumlarda bir değişken olarak ele alıp analizler yeniden yapılmıştır. Böylelikle birincil ve ikincil sargılar arasındaki mesafenin değişiminin kuplaj katsayısına olan etkisi analiz edilmiştir. Şekil 4.27’de birincil ve ikincil sargıların arasındaki mesafenin 130 mm olduğu, şekil 4.28’de birincil ve ikincil sargıların arasındaki mesafenin 175 mm olduğu, şekil 4.29’de birincil ve ikincil sargıların arasındaki mesafenin 210 mm olduğu analizin sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Aralarında 130 mm boşluk bulunan kare sargıların l_{top} uzunluğu sabit tutulduğunda D_{xi} değişimine göre kuplaj katsayısındaki değişim

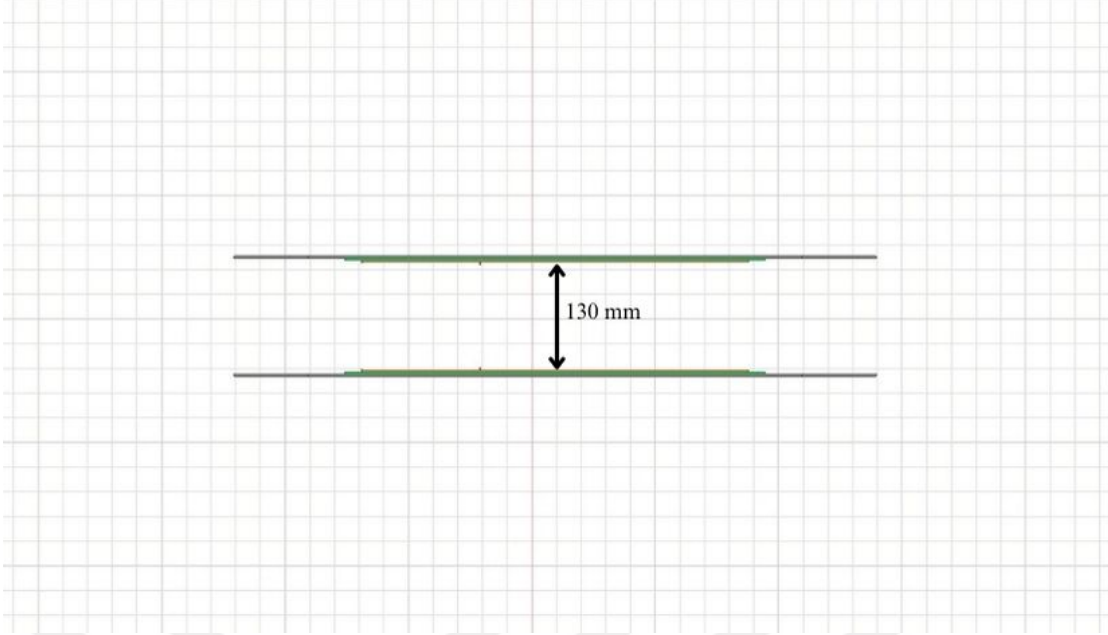


Şekil 4.28. Aralarında 175 mm boşluk bulunan kare sargıların l_{top} uzunluğu sabit tutulduğunda D_{xi} değişimine göre kuplaj katsayısındaki değişim

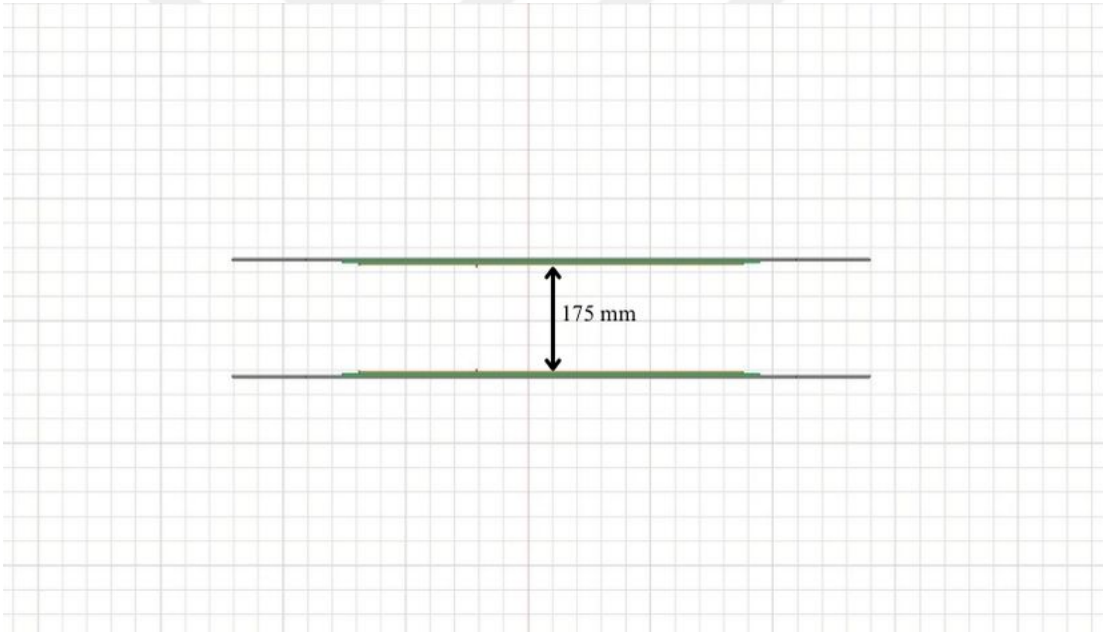


Şekil 4.29. Aralarında 210 mm boşluk bulunan kare sargıların l_{top} uzunluğu sabit tutulduğunda D_{xi} değişimine göre kuplaj katsayısındaki değişim

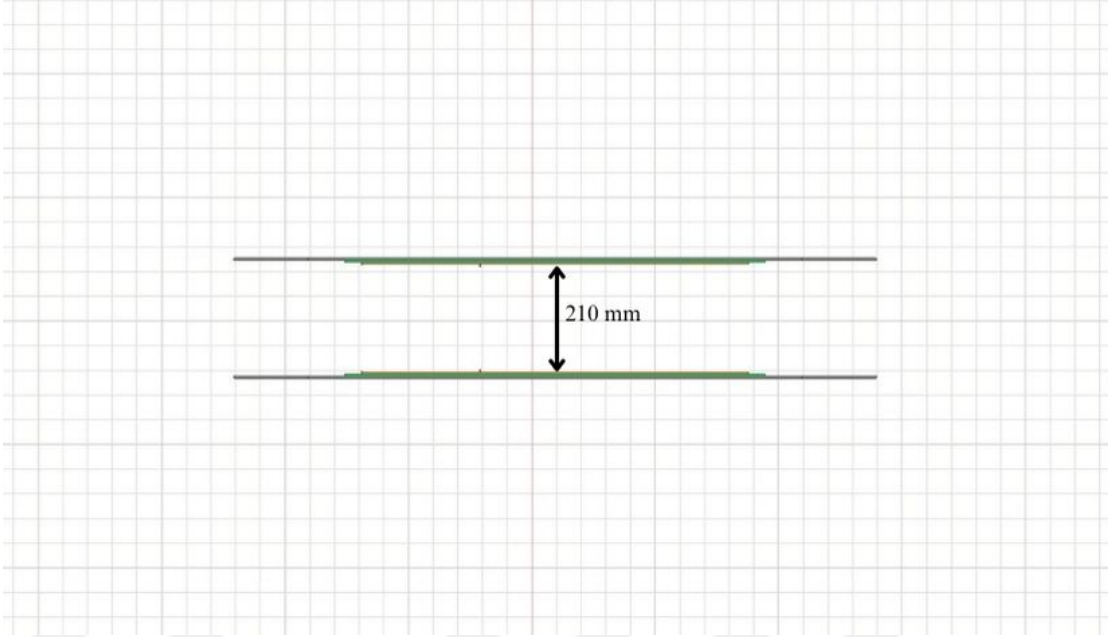
Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de kare topolojiye sahip birincil ve ikincil sargılar arasında sırasıyla 130 mm, 175 mm, 210 mm mesafe olan tasarımlar gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Aralarında 130 mm boşluk bulunan birincil ve ikincil tasarımın yandan görünüşüdür.



Şekil 4.31. Aralarında 175 mm boşluk bulunan birincil ve ikincil tasarımın yandan görünüşüdür.



Şekil 4.32. Aralarında 210 mm boşluk bulunan birincil ve ikincil tasarımın yandan görünüşüdür.

Tablo 4.4'te 7,3 kW KGA sistemi için gerçekleştirilen kare sargı ve SS kompanzasyon topolojisinin sahip sistemin parametreleri verilmiştir.

Tablo 4.4. 7,3 kW KGA sistemi için SS kompanzasyon topolojisinin parametreleri.

Rezonans frekansı (f_0)	85kHz
Güç Seviyesi	7,3kW
Besleme Voltajı	230V
Yük Direnci (R_l)	5,87ohm
Sargı direnci (R_i)	0,14ohm
Birincil Sargı Metraj	43.088m
İkincil Sargı Metraj	43.088m
Sargılar Arası Mesafe	130mm
Sargı Tur Sayısı $N_{1,2}$	20
Birincil Endüktans (L_1)	339,10 μ H
İkincil Endüktans (L_2)	339,10 μ H
Kuplaj Katsayısı	0,56
Karşılıklı Endüktans (M)	189.89 μ H

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tez kapsamında rezonans endüktif kuplaj yöntemiyle çalışan dairesel ve kare topolojisine sahip KGA sistemlerinde güç aktarımını gerçekleştiren sargıların güç aktarma seviyesini etkileyen kuplaj katsayısında etkin olan parametreler ve bunların değişmesi durumunda kuplaj katsayısındaki pozitif ve negatif değişimler SEY yöntemiyle analiz edilmiştir. Literatürde genelde sargılar arası mesafenin çalışıldığı görülsede sargıların iç uzunluk değişimlerinin ve bunun tur sayısı ile ilişkisinin kuplaj katsayısına etkisiyle ilgili az çalışmanın olduğu görülerek tezde bu açığın kapatılmasına yönelik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kuplaj katsayısını etkileyen tur sayısı değişkeninin yanı sıra sargı topolojilerindeki değişim, birincil ve ikincil sargıların birbirlerine olan uzaklıklarındaki değişim ve sargıların kablo uzunluklarıyla olan ilişkisi göz önüne alınarak kuplaj katsayısının analizleri yapılmıştır.

Sonuç olarak hem dairesel topolojiye sahip hem kare topolojiye sahip tasarımlarda KGA sargılarının tur sayısı sabitken sargıların iç uzunlukları artarsa kuplaj katsayısının artacağına ulaşılmıştır. Sargının iç uzunluğu arttıkça kuplaj katsayısının artmasından dolayı gerçek tasarımda fiziksel sınırlar düşünülmelidir. Fiziksel sınırlara göre maksimum seviyede iç uzunluk ayarlanması gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ek olarak güç aktarım sargıları arasındaki mesafenin azaldıkça kuplaj katsayısının artacağına ulaşılmıştır. Sargı topolojileri arasında kare sargının dairesel sargıyla eşit parametrelerde analiz edildiğinde kare sargı topolojisine sahip analizde daha yüksek kuplaj katsayısına ulaşılmıştır.

Tez kapsamında 7,3 kW gücünde tasarımı yapılan KGA sistemi için her iki topolojiye sahip tasarımların analizleri sonucunda en yüksek kuplaj katsayısı 0,56 bulunmuş olup bu sonuca birincil ve ikincil sargılar arasında 130 mm mesafe bulunan kare topoloji, 20 tur, 300 mm iç uzunluğa sahip tasarımda ulaşılmıştır.

5.2 Öneriler

Kablosuz güç aktarımıyla alakalı literatürde birçok çalışma olsada elektrikli araçlar için tasarlanacak sistemlere daha çok çalışma yapılmaya ihtiyaç vardır. Özellikle üretim maliyetlerini düşürebilmek için kullanılacak en az malzemeyle en yüksek verime yönelik çalışmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca kısa vadede sistemde bilgi akış kontrolüne, elektrikli araçların KGA sistemi için devre tasarım konusuna ve iki sargının

optimum eşleşmenin sağlanmasına yönelik kontrol sistemlerine yönelik çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır. Diğer taraftan bir sonraki adım olarak dinamik kablosuz güç aktarımına yönelik çalışma yapılması önerilmektedir.



6. KAYNAKLAR

- AirFuel Resonant*. (n.d.). Retrieved May 29, 2024, from <https://airfuel.org/airfuel-resonant/>
- Akün, Y., & Tabak, A. (2023). Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Güç Transfer Sargılarının Tasarlanması Ve Değişen Sistem Parametrelerine Bağlı Olarak Kuplaj Katsayısının Analiz Edilmesi. *15th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, and Applied Sciences*.
- Bazilinsky, P., Merino-Martínez, R., Özcan, E., Dodou, D., & de Winter, J. (2023). Exterior sounds for electric and automated vehicles: Loud is effective. *Applied Acoustics*, 214, 109673. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109673>
- Choudhori, S. P., & Dolara, A. (2019). *Design of wireless power transfer coil useful in high power charging of electric vehicle* [Politecnico di Milano]. <https://hdl.handle.net/10589/149519>
- Çiçek, M., Balcı, S., & Sabancı, K. (2023). A Comparative Performance Analysis of Wireless Power Transfer with Parametric Simulation Approach. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, 9(1), 17–32. <https://doi.org/10.55385/kastamonujes.1298700>
- Electric Vehicles & Charging Infrastructure*. (2024). <https://doi.org/5955211>
- Ellerbeck, S. (2023). *Electric vehicle sales leapt 55% in 2022 - here's where that growth was strongest*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2023/05/electric-vehicles-ev-sales-growth-2022/>
- EPDK. (2024). *ELEKTRİK PİYASASI SEKTÖR RAPORU*.
- EY and Eurelectric. (2024). *How do we solve the challenge of data interoperability in e-mobility?*
- Federal Register. (2018). *Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 141, Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles* (Vol. 81). <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2018-02-26/pdf/2018-03721.pdf>
- Gündüz, İ. O., & Yakar, S. (2020). Avrupa Birliği ve Türkiye’de Elektrikli Otomobillere Yönelik Vergi Teşviklerinin Değerlendirilmesi. *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 29(4), 204–222.
- Gürbüz, Y., & Kulaksız, A. A. (2016). Elektrikli Araçlar ile Klasik İçten Yanmalı Motorlu Araçların Çeşitli Yönlerden Karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 117. <https://doi.org/10.17714/gufbed.2016.06.011>
- IEA. (2024). *Global EV Outlook 2024*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>

- International Organization for Standardization. (2020). Electrically propelled road vehicles — Magnetic field wireless power transfer — Safety and interoperability requirements. *ISO 19363*, 39. <https://www.iso.org/standard/73547.html>
- JSAE. (2013). Measurement methods for electromagnetic field of vehicles with regards to human exposure. *Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE), JASO TP-13*, 37.
- Közkurt, C., Özbay, H., Dalcalı, A., & Tektaş, M. (2020). Geleceğin Ulaşım Tercihi: Elektrikli Araçlar. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(1), 34–50. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jitsa/issue/53369/712337>
- Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., & Soljačić, M. (2007). Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 317(5834), 83–86. <https://doi.org/10.1126/science.1143254>
- Li, S., Li, W., Deng, J., Nguyen, T. D., & Mi, C. C. (2015). A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(6), 2261–2273. <https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2347006>
- Lis, M., Kobierski, M., & Chmiel, M. (2024). Induction heating as a process of converting eddy current losses into thermal energy in the Ansys Coupling software environment. *Przeglad Elektrotechniczny*, 7, 15–18. <https://doi.org/10.15199/48.2024.07.04>
- Mahesh, A., Chokkalingam, B., & Mihet-Popa, L. (2021). Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles-A Review. *IEEE Access*, 9, 137667–137713. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116678>
- N.Hu. (2010). System Description Wireless Power Transfer. *October, I*(October), Volume I: Low power, Part 1: Interface definition,. http://www.yadagio.com/public/committees/iec_tc100_aggs/meetings/29/100ags438.pdf
- Özbektaş, S., Şenel, M. C., & Sungur, B. (2023). Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri. *Mühendis ve Makina*, 64(711), 317–351.
- Pashaei, A., Aydın, E., Polat, M., Yıldırım, E., & Aydemir, M. T. (2016). Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri. *EMO Bilimsel Dergi*, 1–12.
- Patil, D., McDonough, M. K., Miller, J. M., Fahimi, B., & Balsara, P. T. (2017). Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 3–37. <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2780627>
- Raşidova, A. (2003). *Vibe Foksiyonu Kullanılarak Dizel Motorlarında Yanma Hızının Gürültü Emisyonuna Etkisinin İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Sallán, J., Villa, J. L., Llombart, A., & Sanz, J. F. (2009). Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge. *IEEE Transactions on Industrial*

- Electronics*, 56(6), 2140–2149. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015359>
- Sample, A. P., Meyer, D. A., & Smith, J. R. (2011). Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(2), 544–554. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2046002>
- Sarıdemir, S., Polat, F., & Kılınçel, M. (2016). Motor Devir ve Yükünün Titreşim ve Gürültü Emisyonuna Olan Etkisinin İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(3). <https://doi.org/10.31202/ecjse.258573>
- Schneider, J., Carlson, R., Sirota, J., Sutton, R., Taha, E., Kesler, M., Kamichi, K., Teerlinck, I., Abeta, H., Minagawa, Y., Yazaki, S., Yoon, U., Kawashima, K., Muskett, S., Bohn, T., Mathar, S., Mikat, D., Guag, J., Seidman, S., & Reitan, R. (2019). Validation of Wireless Power Transfer up to 11kW Based on SAE J2954 with Bench and Vehicle Testing. *WCX SAE World Congress Experience*, 18. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0868>
- Tesla, N. (1905). *Art of Transmitting electrical energy through the natural mediums. 1*, 1–3.
- Uzun, G. (2012). *Kablosuz Enerji İletimi*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Villegas, D. R. G. (2023). *Study and application of the AVAS to electric vehicles for pedestrian safety*. [Polytechnic University of Catalonia]. <http://hdl.handle.net/2117/396315>
- Wageningen, D. van, & Staring, T. (2010). The Qi wireless power standard. *Proceedings of EPE-PEMC 2010 - 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, S15-25-S15-32. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2010.5606673>
- Wen, H., & Zhang, C. (2015). Investigation on transmission efficiency for magnetic materials in a wireless power transfer system. *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2015-Augus(June)*, 249–253. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2015.7203423>
- Yilmaz, A. S., & Kızıldağ, U. (2021). Wireless Charging Systems In Electric Vehicles and A Sample System Investigation. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8, 209–224.