



# Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarımı Üzerine Literatür Taraması

Muhammed Turan Arslan<sup>1\*</sup>, Kadir Erkan<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-1846-2927), [mturanarslan@outlook.com](mailto:mturanarslan@outlook.com)

<sup>2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9293-7279), [kerkan@yildiz.edu.tr](mailto:kerkan@yildiz.edu.tr)

(2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences ICEANS 2022, October 15 - 18, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1187350)

**ATIF/REFERENCE:** Arslan, M. T. & Erkan, K. (2022). Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarımı Üzerine Literatür Taraması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (42), 118-125.

## Öz

Günümüzde mobil elektronik cihazların kullanımının yaygınlaşması, kablosuz şarj teknolojisinin de ilerlemesini beraberinde getirmiştir. Kablosuz güç aktarımı ile bu cihazların kolaylıkla şarj edilmesi kullanışlılık açısından kullanıcılara oldukça geniş bir alan sağlamaktadır. Son zamanlarda popüler çalışma alanlarından biri haline gelen kablosuz güç aktarımında enerji iletim verimliliği en önemli parametrelerdendir. Kablodan kaynaklanan sorunların ortadan kalkmasıyla hareket özgürlüğü ve kullanım kolaylığı gibi avantajları getiren bu konu üzerine özellikle son yıllarda farklı tekniklerle birçok çalışma yapılmıştır. Bu tekniklerden orta mesafede yüksek verimle kablosuz güç aktarımının mümkün kılınmasına olanak sağlayan manyetik rezonans kuplaj yöntemi üzerine bir derleme çalışması sunulmuştur. Bu makalenin kablosuz güç aktarımı konusu üzerine çalışma yapacak araştırmacıların ve bu konuya ilgi duyan okuyucuların, ilgili çalışmalara kolayca ulaşabilecekleri bir rehber niteliğinde olması hedeflenmektedir. Çalışmamızda öncelikle kablosuz güç aktarımının tarihçesi verilir, ardından kablosuz güç aktarımı tekniklerinden manyetik rezonans kuplaj yöntemini öne çıkaran hususlara yer verilmiştir. Daha sonra manyetik rezonans kuplaj yönteminin temel prensibi açıklanmış; maksimum güç transferi, maksimum verimlilik, hizalama problemi ve insan sağlığı üzerine etkilerinden bahsedilmiştir. Son olarak kablosuz güç aktarımında çalışmaların en yoğun olduğu uygulama alanı olan elektrikli araçlar ile tüketici elektroniği, biyomedikal implantlar, insansız hava araçları ve robotlar şeklinde uygulama alanları sınıflandırılıp bu alanlarda yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz güç aktarımı, Kablosuz enerji transferi, Manyetik rezonans kuplaj, Kablosuz şarj, Elektrikli araçlar.

## Literature Review on Wireless Power Transmission by Magnetic Resonance Coupling Method

### Abstract

Today, the widespread use of mobile electronic devices has brought about the advancement of wireless charging technology. Easy charging of these devices with wireless power transfer provides a wide area for users in terms of usability. Energy transmission efficiency is one of the most important parameters in wireless power transmission, which has become one of the popular fields of study recently. Especially in recent years, many studies have been carried out with different techniques on this subject, which brings advantages such as freedom of movement and ease of use by eliminating the problems caused by the cable. A review study on the magnetic resonance coupling method, which enables wireless power transmission with high efficiency at medium distance, is presented. It is aimed that this article will serve as a guide for researchers who will study on wireless power transmission and readers who are interested in this subject, where they can easily access related studies. In our study, firstly, the history of wireless power transfer is given, and then the issues that highlight the magnetic resonance coupling method, one of the wireless power transfer techniques, are included. Then, the basic principle of magnetic resonance coupling method is explained; maximum power transfer, maximum efficiency, alignment problem and its effects on human health are mentioned. Finally, electric vehicles and consumer electronics, biomedical implants, unmanned aerial vehicles and robots, which are the most intense application areas in wireless power transmission, are classified and the studies in these areas are included.

**Keywords:** Wireless power transfer, Wireless energy transfer, Magnetic resonance coupling, Wireless charging, Electric vehicles.

\* Sorumlu Yazar: [mturanarslan@outlook.com](mailto:mturanarslan@outlook.com)

## 1. Giriş

Kablosuz güç aktarımı (KGA), elektrik enerjisinin güç kaynağından hedefe herhangi bir fiziksel kablo bağlantısı olmaksızın iletilmesi olayıdır. Bu teknoloji mobil cihazlar, elektrikli araçlar, biyomedikal implantlar başta olmak üzere birçok alanda halihazırda kullanılmaktadır. Kablosuz enerji aktarımı fikri ilk olarak Nikola Tesla tarafından 20. yüzyılın başlarında ortaya atılmıştır. Tesla yaptığı deneysel çalışmalarıyla bunu gerçekleştirebilmiştir; ancak Tesla'nın önerdiği sistemdeki temel sorun enerjinin belli bir yöne değil de birçok yöne aktarılmasından dolayı oluşan verimsizliktir. Şekil 1'de görülmekte olan; kablosuz iletişim ve kablosuz güç iletimi için kullanılması amacıyla Wardencllyffe Kule Tesisi, 1901'de ABD'de kurulmuş; fakat ekonomik ve teknolojik yetersizlikler nedeniyle tesis faaliyete geçememiştir (Garnica vd., 2013).



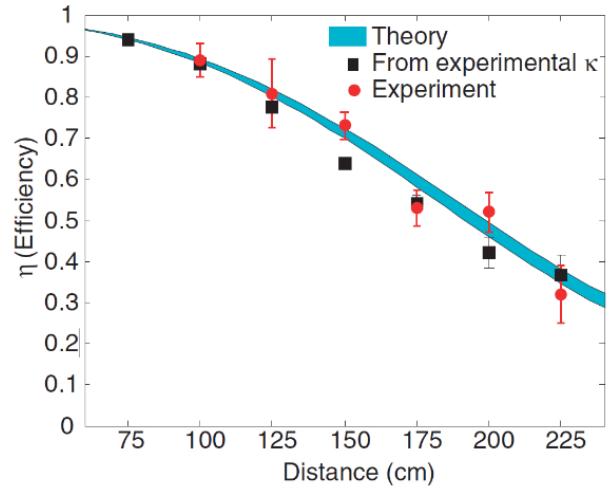
Şekil 1. Wardencllyffe Kule Tesisi (Garnica vd., 2013)

Son yıllarda özellikle elektronik cihazlar, otonom araçlar gibi mobil teknolojilerin hızla gelişmesi ve kullanımının yaygınlaşması kablosuz güç aktarımının önemini daha da arttırmıştır. Günümüzde, orta ve uzun mesafelerde kablosuz enerji aktarımının verimliliğini arttırmak üzere çalışmalar devam etmektedir.

Kablosuz güç aktarımı farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. En popüler kablosuz aktarım teknolojileri; endüktif kuplaj (inductive coupling), manyetik rezonans kuplaj (magnetic resonance coupling), mikrodalga güç aktarımı (microwave power transmission) olarak sıralanabilmektedir. Kablosuz güç transferi teknolojisi üç temel unsuru gerektirmektedir; alıcı ve verici arasındaki hava aralığı, yüksek verim ve yüksek güç miktarı. Manyetik rezonans kuplaj yöntemi bu üç temel unsuru da sağlamaktadır (Imura vd., 2009). Diğer taraftan, endüktif kuplaj yöntemi birkaç milimetrelilik kısa bir menzile sahiptir; mikrodalga güç aktarımı ise 100 kilometreye kadar bir menzile sahipken hem maliyet açısından hem de ısınımı doğası sebebiyle radyasyon yaydığından insan sağlığı açısından dezavantajlıdır (M. El Rayes vd., 2016).

2007 yılında Kurs ve diğerleri 60 watt gücü 2 metreyi aşan mesafede yaklaşık %40 verimle aktardıkları deneyde manyetik

rezonans kuplaj yöntemi ile kablosuz güç aktarımı üzerine ilk çalışmayı ortaya koymuşlardır (Kurs vd., 2007). Bu çalışmada menzilin aktarılan enerjinin verimliliğine etkisi üzerine gerçekleştirilen deneylerin sonucu Şekil 2'deki gibidir.



Şekil 2. Manyetik rezonans kuplaj yöntemiyle yapılan ilk çalışmanın farklı hava aralıklarına göre verim sonuçları (Kurs vd., 2007)

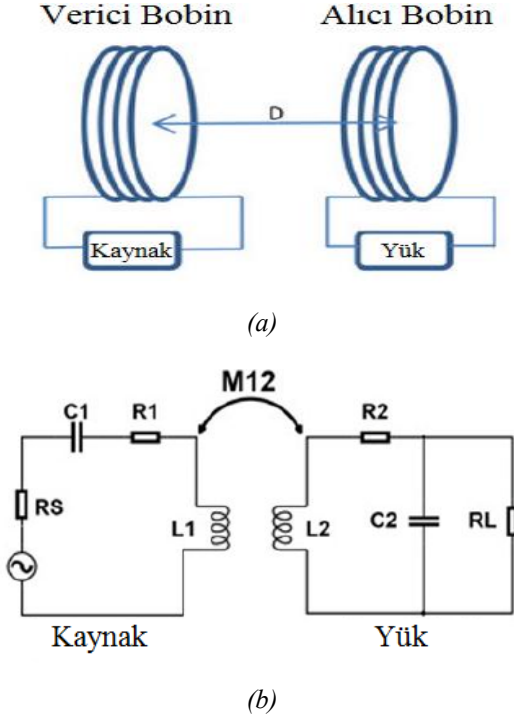
Şekil 2'de görüldüğü gibi 60 Watt enerji 1 metrede yaklaşık %90 ve 2 metrede yaklaşık %40 verimle aktarılabilmektedir. İki rezonanslı anten arasında manyetik kuplaj yoluyla güç aktarımı yapan bu sistem verimli bir orta menzilli (birkaç metre) kablosuz enerji transfer teknolojisidir. İlk sunulan bu çalışmadan sonra bu yöntem üzerine çok sayıda geliştirme çalışması da sunulmuştur.

Son yıllarda manyetik rezonans kuplaj yöntemi ile kablosuz güç aktarımı konusunda çok sayıda çalışma yayımlanmıştır, dolayısıyla bu alanda bir derleme çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Şu ana kadarki yayımlanan literatür taramalarına kıyasla bu çalışmada manyetik rezonans kuplaj yöntemi ile kablosuz enerji transferi daha temel düzeyde ele alınmış ve bu konu hakkında hiç bilgisi olmayanlar için de anlaşılır olacak şekilde incelenmiştir. Çalışmanın bundan sonraki kısmında öncelikle manyetik rezonans kuplaj yönteminin temel prensibi aktarılıp, daha sonra bu konudaki çeşitli çalışmalar alt başlıklar halinde sunulmaktadır.

## 2. Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemi

Rezonans, bir sistemin belirli bir frekansta diğer frekanslara göre daha büyük genlikte titreşim yapma eğilimidir. Bir başka deyişle, doğal karşılık olarak iki objenin birbiri ile tam uyumlu olarak hareket ederken çevredeki diğer etkilere karşı tepkisiz olmasıdır. Örneğin, bir şarkıcı uygun frekansta ses dalgaları yollayarak bir cam bardağı rezonansa sokabilir ve sesiyle bardağı kırabilir veya bir asma köprü, kuvvetli olmayan bir rüzgârın etkisiyle bile rezonansa girebilir ve bu yüzden yıkılabilir.

Manyetik rezonans kuplaj yöntemi ile kablosuz enerji aktarımında, aynı frekansta rezonansa girecek şekilde ayarlanmış alıcı ve verici iki bobin arasında oluşan güçlü manyetik alandan faydalanılarak enerji verimli bir şekilde kaynaktan hedefe temassız olarak aktarılmaktadır (Barman vd., 2015). Bu yöntemin şematik gösterimi ve devre modeli Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Manyetik rezonans kuplaj yönteminin (a) şematik gösterimi ve (b) devre modeli (Mou vd., 2019)

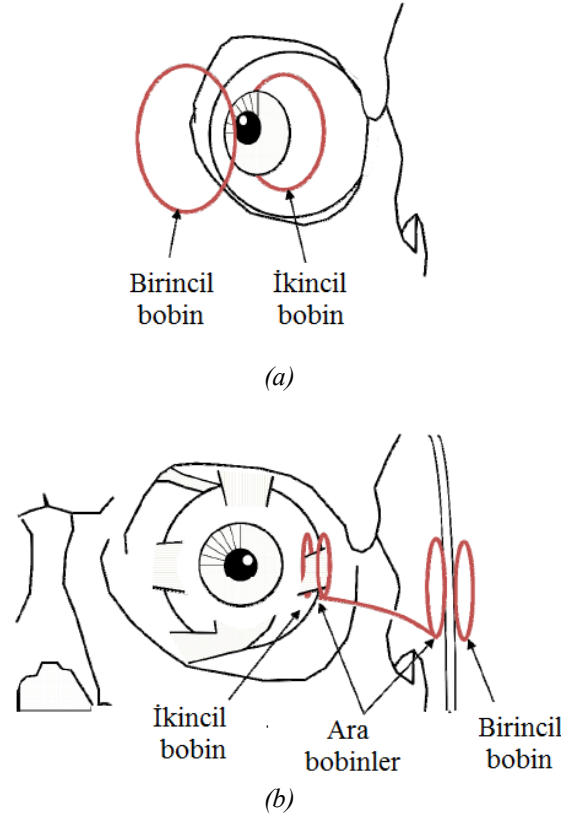
Bu yöntem ilk gösteriminden bu yana tıbbi implantasyon malzemeleri, insansız hava araçları (İHA), robotlar, sensörler, tüketici elektroniği, elektrikli araçlar gibi geniş uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılan bir teknik haline gelmiştir (Kesler, 2013), (Liu vd., 2019). Manyetik rezonans kuplaj yönteminde, güç aktarımı ile ilgili maksimum güç aktarımı ve maksimum enerji verimliliği olmak üzere iki temel ilke bulunmaktadır. Bu ilkelerin seçimi enerji verimliliği ve iletim mesafesi açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle araştırmacıların kendi uygulamalarına uygun yaklaşımı benimsemeleri açısından bu prensipleri anlamaları kritiktir (Barman vd., 2015).

Kablosuz güç aktarımı üzerine daha önce çeşitli literatür çalışmaları yayımlanmıştır (Houran vd., 2018; Zhang vd., 2019; Song vd., 2021; Uddin vd., 2014; Wei et al., 2014); ayrıca elektrikli araçlar için kablosuz şarj uygulamaları özelinde yoğunlaşan birçok derleme çalışması da mevcuttur (Mou vd., 2019; Okasili vd., 2022; Pashaei vd., 2016; Qiu vd., 2013; Ahmad vd., 2017; Patil vd., 2018; Ayisire vd., 2019; Triviño vd., 2021; Thiagarajan & Deepa, 2021; Aydın vd., 2022).

## 2.1. Maksimum Güç Transferi

Bu prensipte önemli olan aktarılan gücün verimliliği değil, miktarıdır. Kablosuz güç transferi sırasında bir miktar güç kaybının tolere edilebildiği durumlarda bu yaklaşım tercih edilir. Örneğin; bir biyomedikal implantın şarj edilmesi için yüksek bir enerji gerekli olmadığından verim düşük de olsa gerekli miktarda gücün aktarılması önemlidir. Ng ve diğerlerinin bir retinal proteze manyetik rezonans kuplaj yöntemiyle kablosuz güç aktarımı deneyinde, Şekil 4'te görüldüğü gibi iki farklı yöntemi kıyaslamışlardır. Şekil 4.a'daki gibi sadece alıcı ve verici bobinden oluşan durumda %8.8 verimle güç aktarılmışken, Şekil 4.b'de olduğu gibi alıcı ve verici bobinler arasında birer bobin daha kullandıklarında %11.5 verim almışlardır (Ng vd., 2011). Bu örnekte olduğu gibi aktarılmak istenen enerji miktarının verimden

daha önemli olduğu düşük güç uygulamalarında, kaybolan enerjinin maliyeti göz ardı edilebilmektedir.

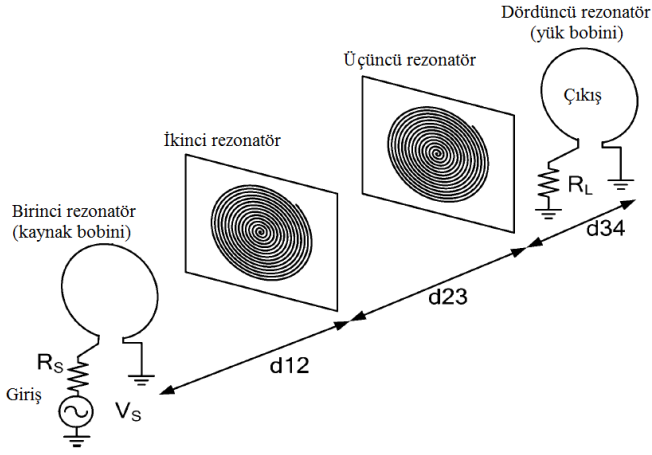


Şekil 4. Retinal protez için kablosuz güç transferi deneyi (a) bir çift bobinle ve (b) iki çift bobinle (Ng vd., 2011)

## 2.2. Maksimum Enerji Verimliliği

Kaynaktaki güç kaybını en aza indirerek, enerji transfer sisteminde daha yüksek verim elde edilmesini amaçlayan prensiptir. Yüksek miktarda güç aktarımı yapılan durumlarda kaybolan enerji miktarının maliyeti önemli olduğu için yüksek verim almaya odaklanılmaktadır. Maksimum enerji verimliliği üzerine literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Chen ve diğerleri, planlanmış miktarda enerjiyi maksimum verimlilikle aktarmak için manyetik olarak eşleşmiş bobinler kullanarak, ışımasız kablosuz güç aktarımı çalışması yapmışlardır. Maksimum güç verimliliği için kuplaj katsayısını ayarlamayı, buna bağlı olarak da indüktans ve kapasitans değerlerini güncellemeyi önermişlerdir; ancak araştırma simülasyon sonuçlarıyla sınırlıdır (C. J. Chen vd., 2010).

Duong ve Lee, rezonans eşleşmeli bir KGA sisteminde yüksek verim elde etmek için dört bobin içeren birleştirme yöntemi önermişlerdir. Şekil 5'te rezonans frekansına ulaşmak için hassas bir şekilde ayarlanan sistemin şematik gösterimi verilmiştir. Birinci rezonatör ile ikinci rezonatör arasındaki mesafe ( $d_{12}$ ) ve üçüncü ile dördüncü rezonatör arasındaki mesafe ( $d_{34}$ ) 1 cm'de sabitlenmiştir. İkinci ile üçüncü rezonatör arasındaki mesafe ( $d_{23}$ ) 15cm'den 100 cm'ye kadar 5'er cm aralıklarla parametrik olarak değiştirilerek enerji verimliliği benzetim çalışmaları yapılmıştır. Deneysel olarak da uygulanan bu teknikte, enerji transfer verimliliği 60 cm ve 100 cm mesafelerde sırasıyla %46,2 ve %29,3 iken, maksimum verim 15 cm hava aralığında hesaplanmış ve %92,5 olarak elde edilmiştir; ancak ne kadar güç aktarıldığı ile ilgili bilgi verilmemiştir (Duong & Lee, 2011).



Şekil 5. Dört rezonatörlü KGA sisteminin şematik gösterimi (Duong & Lee, 2011)

Gao ve diğerleri, kablosuz güç aktarımında bobin parametrelerinin iletim verimliliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Teorik ve analitik analizler sonucunda, bobinin kendi çevresindeki tur sayısının verim üzerine etkisinin olmadığını bildirmişlerdir (Gao vd., 2013).

Diğer taraftan, farklı hava aralıklarında verimlilik analizi çalışmaları (Ağçal vd., 2015), verimliliğin üst düzeye çıkarılması için makine öğrenmesi destekli strateji (Bai vd., 2019), verimliliği yüksek tutmak için seri kapasite kullanımı önerisi (Issi & Kaplan, 2020) gibi yaklaşımlar da bulunmaktadır.

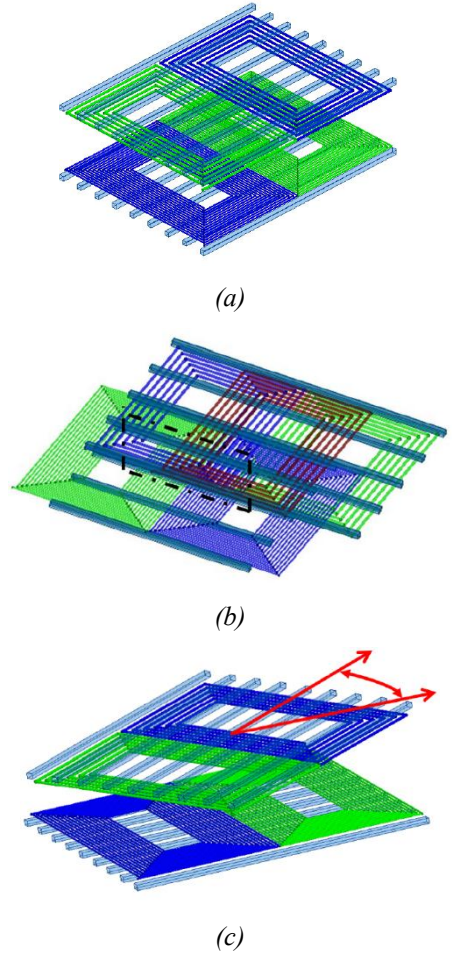
Ayrıca, güç aktarım verimliliğini arttırmak için alıcı ve verici bobin arasına yerleştirilen metamateriyaller konusunda da son zamanlarda birçok çalışma yapılmıştır; Lee ve Yoon bu konuda son gelişmeleri ele aldıkları bir derleme çalışması sunmuşlardır (W. Lee & Yoon, 2020).

### 2.3. Hizalama Problemi

Manyetik rezonans kuplaj ile enerji aktarımında önemli hususlardan biri de alıcı ve verici bobinlerin hizalanmasıdır. Bu yöntemle enerji transferinde en yüksek verim alıcı ve verici bobinin tam olarak karşı karşıya olması durumunda elde edilirken, hizalamadaki bozukluklar enerji kaybına sebep olmaktadır. Gerçek hayat uygulamalarında güç kaynağı ile cihaz veya aracın tam olarak hizalanma durumu her zaman mümkün olmayabilmektedir. Bu yüzden, hizalama sorununun enerji aktarımı verimliliği üzerindeki etkisi yapılan çalışmalarla araştırılmakta ve bu sorundan kaynaklanan enerji kaybının en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Farklı hava aralıklarında alıcı ve verici bobinlerin hizalanmış ve hizalanmamış durumlarının incelendiği bir çalışmada, güç aktarımı verimliliğinin hızlıca düştüğü mesafeler analiz sonuçlarıyla ortaya konulmuştur (Ağçal vd., 2018).

Cannon ve diğerleri, alıcıların kaynak bobine ve birbirlerine göre konumları değiştirildiğinde, yük terminallerindeki toplu kapasitansları ayarlamamanın zorluğuna dikkat çekmişlerdir (Cannon, B.L. vd., 2009). Lee ve Cho ise, iki bobin arası mesafenin artmasıyla ve hizalanma problemiyle verimin düşmesine çözüm olarak çoklu verici bobin yapısını önermişlerdir. Yapılan analitik ve simülasyon çalışmalarıyla da çoklu bobin yapısı, farklı mesafe ve açı varyasyonlarında tek vericili sisteme göre daha yüksek verim göstermiştir (K. Lee & Cho, 2013). Nguyen ve diğerleri, 200 mm hava aralığında ve 300 mm yanlış hizalama toleransına sahip 8 kW kablosuz şarj cihazı prototipi tasarlamış ve test etmiştir. Sistem %95.66 verime sahip

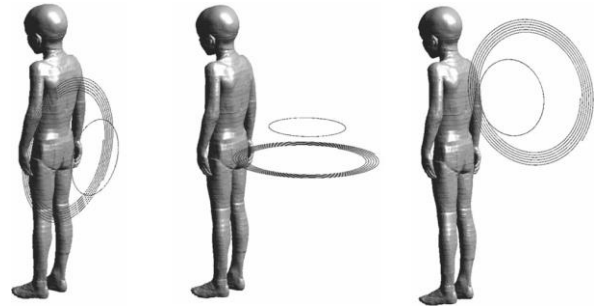
olup, 300 mm yanlış hizalanma durumunda ise %95.39 verimle çalışmıştır (T. D. Nguyen vd., 2014). Araştırmacıların yaptıkları deneylerdeki farklı hizalanma durumları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. (a) Tam hizalanmış, (b) Yanlış hizalanmış ve (c) Farklı açıda yanlış hizalanmış (Nguyen vd., 2014)

### 2.4. İnsan Sağlığına Etkileri

Manyetik rezonans kuplaj yöntemiyle kablosuz güç aktarımında incelenen bir diğer konu ise bu sistemlerin insan sağlığı üzerine etkileri olmuştur. Manyetik rezonans kuplaj temelli endüktif şarj sistemlerinin yakın alanındaki insanlara etkilerinin incelendiği bir çalışmada, tüm insan vücudunun manyetik alana maruz kalmasının ilgili standartlara uygun olduğuna dikkat çekilmiştir (Christ vd., 2013). Farklı cinsiyet, yaş, kilo, boy değerlerine sahip denekler üzerinde yaptıkları deneylerde Şekil 7'de görüldüğü gibi değişik oryantasyonlar incelenmiştir.



Şekil 7. Bobinin insan gövdesine 1 cm mesafede farklı oryantasyonları (Christ vd., 2013)

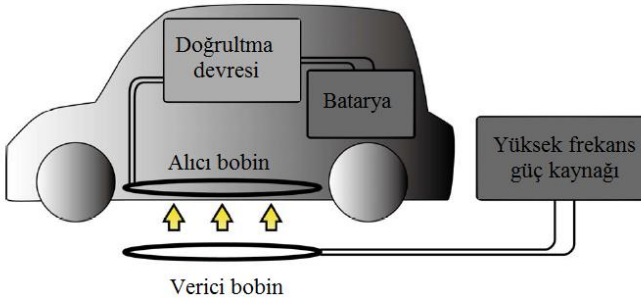
Kesler, manyetik rezonans kuplaj yöntemi üzerine yaptığı çalışmada, insan sağlığına etkilerine dair de detaylı değerlendirmelerde bulunmuştur (Kesler, 2013). Bu çalışmada normal koşullar altında bu sisteme maruz kalınması durumunda vücut ısısında en fazla 1 oC artış olabileceğini belirtmiştir.

### 3. Uygulama Alanları

Manyetik rezonans kuplaj yöntemi kullanılarak elektrikli araçlar, tüketici elektroniği, biyomedikal implantlar, İHA ve robotlar gibi bir çok uygulama alanı üzerinde kablosuz güç aktarımı çalışması yapılmıştır. Bu uygulama alanlarına ait bazı örnek çalışmalar aşağıdaki başlıklarda ayrı ayrı incelenmiştir.

#### 3.1. Elektrikli Araçlar

Kablosuz güç aktarımının en yaygın kullanıldığı uygulama alanı elektrikli araçlar üzerinedir. Fosil yakıtların çevreye zararları, yüksek maliyeti, tedarik problemleri gibi nedenlerden dolayı son yıllarda elektrik kullanımına yönelim hızla artmaktadır. Elektrikli araçların üretimi ve kullanımı da buna paralel olarak çok hızlı artış göstermektedir. Bu nedenle, bu tür araçların kablosuz şarj edilmesine yönelik araştırmalar da yoğunlaşmıştır. Elektrikli araçların kablosuz şarjını statik, dinamik ve yarı dinamik şekilde gerçekleştirmek mümkündür (Mohamed vd., 2022). Elektrikli araçlar için genel KGA konsepti Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Elektrikli araçlar için KGA konsepti (Imura vd., 2009)

Imura ve diğerleri, elektrikli aracın altına yerleştirilebilecek boyutta olan 15 cm çapında alıcı ve verici antenlerle, 15.9 MhZ frekansta 20 cm hava aralığında %96 verimle 100 Watt güç aktarabilmişlerdir (Imura vd., 2009). Ning ve diğerleri, manyetik rezonans eşleşme yöntemiyle 49 kHz frekansta, 270 Volt'luk batarya için tasarlanan ve geliştirilen prototip sistemde yaklaşık 3kW gücü %90 verimle aktarabilmişlerdir (Ning vd., 2013).

Li ve Mi, elektrikli araçlar için statik ve dinamik şarj uygulamalarına yer verdiği çalışmada, manyetik rezonans eşleşme yöntemi ile kablosuz güç aktarımının teorik altyapısını detaylandırmışlardır. Bu alanda yapılan çalışmaları sistemin güvenilirliği, elektrikli aracın şebekeye katkısı, kablosuz haberleşme standartları ve maliyetleri gibi konular açısından tartışmışlardır (Li & Mi, 2015). Wang ve diğerleri ise, bir elektrikli araca 3 kW yük aktarmayı hedefledikleri çalışmada farklı kompanzasyon topolojilerini kıyaslamışlardır ve geliştirdikleri prototip devre ile 20 cm hava aralığında %95 verim alabilmişlerdir (Z. Wang vd., 2016).

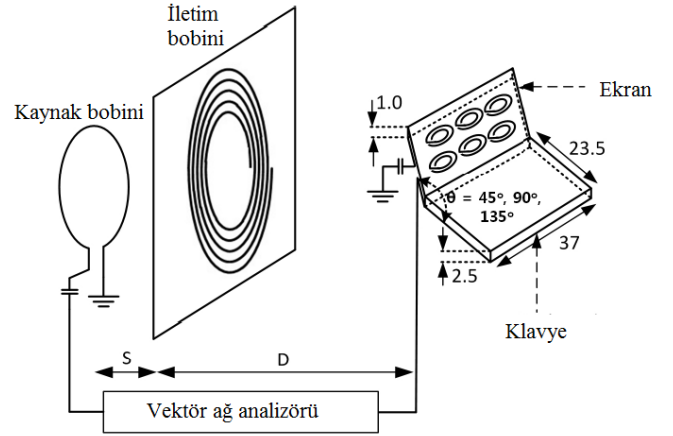
Chen ve diğerleri, elektrikli araçları kablosuz şarj edebilmek için uygun maliyetli bobin tasarlamışlardır. Öncelikle dairesel, dikdörtgen ve altıgen bobinlerin hammadde maliyetine, çıkış gücüne, transfer verimliliğine, yatay kayma hizalama toleransına ve akı yoğunluğuna bağlı etkinlik karşılaştırılması yapılmış, daha

sonra optimal maliyet etkinliği önerisine dayanarak, yeni bir kombine tip bobin önerilmiştir. Geleneksel tip bobinler ile karşılaştırılan kombine tip bobinin hem simülasyon hem de deneysel sonuçlarla daha uygun maliyetli olduğu gösterilmiştir (W. Chen vd., 2016). Lee ve diğerleri, otonom elektrikli araçlar için, 1.5 m ve 5 m uzunluklarında statik ve dinamik şarj hattı kurdukları bu çalışmada; statik şarj için %90.8'in, dinamik şarj içinse %85'in üzerinde maksimum güç verimliliği elde etmişlerdir (C. H. Lee vd., 2020).

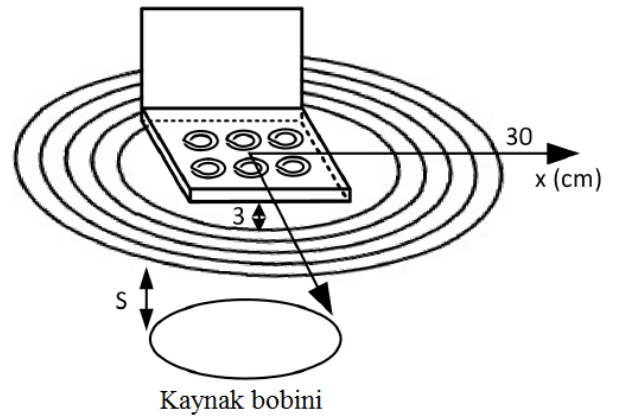
Aydın ve Aydemir, elektrikli araçların bataryalarını kablosuz şarj etmeye yönelik tasarladıkları altıgen bobinli 1 kW'lık KGA sisteminde mükemmel hizalanmış bobinlerle 10 cm hava aralığında %85 verim elde etmişlerdir. Araştırmacılar alıcı bobinin yanlış konumlandırılmasıyla, hizalama performansı da gözlemlemişlerdir. Ayrıca tasarımın uluslararası sağlık standartlarına uygun olması için alıcı bobin üzerine alüminyum tabaka yerleştirilmiş ve bu tabakanın manyetik alan sonuçlarına etkisi simülasyon ile elde edilmiştir. Maksimum manyetik alan yoğunluğu, uluslararası standartlara göre kabul edilebilir bir değer olan 20 µT olarak elde edilmiştir (Aydın & Aydemir, 2021).

#### 3.2. Tüketici Elektroniği

Manyetik rezonanslı KGA sistemlerinin en yaygın uygulama alanlarından biri de tüketici elektroniğidir. Cep telefonları, tabletler, bilgisayarlar, akıllı saatler, kablosuz kulaklıklar ve traş makineleri gibi şarj edilen tüm elektronik cihazlar için bu yöntem uygulanabilmektedir.



Şekil 9. Yük bobininin laptop ekranının arkasına konumlandırıldığı durum (V. T. Nguyen vd., 2015)



Şekil 10. Yük bobininin klavyenin altına konumlandırıldığı durum (V. T. Nguyen vd., 2015)

Nguyen ve diğerleri, dizüstü bilgisayar için düzlemsel alıcılı bir kablosuz güç aktarım sistemi önermektedir. Üç bobinli KGA sisteminde yük bobini açısının ve konumunun transfer verimliliği üzerindeki etkisini incelemek için alıcı kısmı içeren bir dizüstü bilgisayar modeli üretilmiştir. Şekil 9 ve 10'da yük bobinin farklı konumlara yerleştirildiği deneylerin tasarımına yer verilmiştir. Bu çalışmada, mobil elektronik cihazlara uygun ve verimli bir KGA sistemi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir (V. T. Nguyen vd., 2015).

Jadidian ve Katabi, çoklu giriş ve çoklu çıkışlı (MIMO) hüzmeye oluşturma (beamforming) fikrinden yararlanarak MagMIMO adını verdikleri bir sistem tasarlamışlardır. Böylece bir cep telefonunun uzaktan şarj edilebildiğini ve telefon kullanıcının cebinde olmasına rağmen, cihazın konumundan bağımsız olarak sistemin çalışabildiğini göstermişlerdir. Kablosuz iletişim sistemindeki hüzmeye şekillendirmeden farklı olarak bu sistemde, cep telefonuna ve taşınabilir cihazlara yönlendirilebilen, yayılmayan bir manyetik alan geliştirilmiştir. Önerilen MIMO sistemi, 1 MHz'lik tek bir frekansta çalışır ve giriş gücü 20 W olup; farklı mesafelerde ölçülen güç aktarım verimliliği Tablo 1'de gösterilmiştir (Jadidian & Katabi, 2014).

Tablo 1. MagMIMO sisteminin mesafe-verimlilik sonuçları.

Mesafe (cm)	0.5	2	5	10	20	30	40
Verimlilik (%)	89	87	74	53	34	19	11

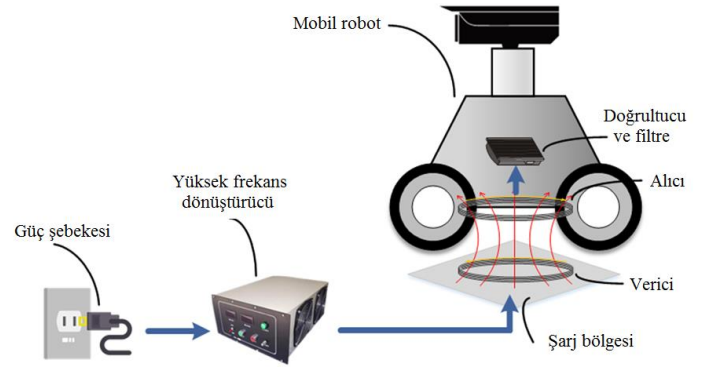
### 3.3. İHA ve Robotlar

Son zamanlarda insansız hava teknolojilerine ve robotiğe olan ilginin hızla artmasıyla birlikte bu araçların şarj edilmesi konusu daha önemli hale gelmiştir. Özellikle otonom araçların kendi kendini şarj edebilme ihtiyacından dolayı kablosuz güç aktarım teknolojisi bu alanda uygulanmaya başlanmıştır. Savunma, lojistik, tarım, imalat, sağlık, turizm gibi birçok alanda kullanılan İHA ve robotlar üzerinde kablosuz güç aktarımı çalışmaları yapılmaktadır.

Mittleider ve diğerleri, İHA'ya monte edilmiş verici bobinle, uzak konumlardaki erişilmesi zor sensörleri şarj etmek için yeni bir yöntem sundu. Rezonanslı bir kablosuz güç aktarım sisteminin yayılan manyetik alanı ölçen konumlandırma stratejisiyle, İHA'nın daha yüksek hassasiyetle yer tespitine imkan sağlamışlardır. Ortalama 15 cm'lik mesafeye konumlanabilen İHA, yaklaşık 4.2 W güç ile sensör pillerini şarj edebilmiştir (Mittleider vd., 2016).

Wang ve diğerleri, kendi kendini şarj edebilen otonom robotlar için manyetik rezonans kuplaj yöntemine dayalı KGA sistemi tasarlamışlardır. Şekil 11'de görülen sistemin prototip tasarımı yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada 58 kHz'lik rezonans frekansında, 10 cm hava aralığında, 50 W güç, %50'nin üzerinde bir verimle aktarılmıştır (J. Wang vd., 2018).

Cheah ve diğerleri, mevcut KGA teknolojilerini incelemiş ve bunların mobil robotlardaki uygulamalarını kıyaslamışlardır. Bu alanda karşılaşılan zorlukları tartışarak, KGA teknolojisinin mobil robotlarda kullanılabileceği uygun senaryoları sunmuşlardır (Cheah vd., 2019).



Şekil 11. Otonom robotun kablosuz şarj sistemi (J. Wang vd., 2018)

### 3.4. Biyomedikal İmplantlar

İnsan vücuduna yerleştirilen biyomedikal implantlarda kablolu şarj imkânı olmadığı için düzenli olarak bataryalarının değişmesi gerekmektedir. Buna alternatif olarak bu bataryaların kablosuz güç aktarımı ile şarj edilmesi mümkündür. Kalp, beyin, göz, kulak implantları, kapsül endoskopi uygulamaları biyomedikal alandaki manyetik kuplaj yöntemi örneklerinden bazılarıdır. Khan ve diğerleri, implante edilebilir tıbbi cihazlarda kablosuz gücü aktarabilmek için uygulanan çeşitli stratejileri inceledikleri kapsamlı bir literatür çalışması sunmuşlardır (Khan vd., 2020).

Na ve diğerleri, biyomedikal cihazların şarjı için çanak şeklindeki bir verici bobin ile iki adet spiral alıcı bobinden oluşan %15,7 verimliliğe sahip manyetik rezonans kablosuz güç aktarım sistemi önermişlerdir (Na vd., 2019). Bir diğer çalışmada manyetik rezonans tekniğinin SBT (sınai, bilimsel ve tıbbi cihaz) frekans bandında çeşitli doku tiplerine verimli bir şekilde güç aktarımı yapılabileceği gösterilmiştir (Jonah & Georgakopoulos, 2012).

### 4. Sonuç

Bu literatür taramasında son zamanlarda yapılmış olan manyetik rezonans kuplaj yöntemiyle kablosuz güç aktarımı üzerine birçok çalışma incelenmiştir. Öncelikle manyetik rezonans yönteminin temel mantığı açıklanmış olup, sonrasında maksimum güç aktarımı prensibi, maksimum verimlilik prensibi, hizalama problemi, insan sağlığına etkileri gibi başlıklar altında yapılan çalışmalar aktarılmıştır. Daha sonra uygulama alanları; elektrikli araçlar, tüketici elektroniği, İHA ve robotlar, biyomedikal implantlar şeklinde sınıflandırılarak bu alanlardaki örnek çalışmalara yer verilmiştir.

Literatürde maksimum güç aktarımına kıyasla maksimum verimlilik üzerine daha çok çalışma yapıldığı görülmüştür. Aktarılan güç miktarının verimlilikten daha önem arz ettiği durumlarda öne çıkan maksimum güç transferi prensibi üzerine daha ileri çalışmalar yapılabilir. Maksimum verimlilik prensibi yaklaşımına dair yapılan çalışmalarda ise uzun mesafelerde hâlâ düşük verim alındığı raporlanmıştır. Manyetik rezonans kuplaj yönteminin özellikle 1 metre ve üzeri mesafelerde daha verimli hale getirilmesi için yeni araştırmalara ihtiyaç vardır. Kablosuz güç aktarımı sırasındaki enerji kaybının en aza indirilmesi bu teknolojinin daha hızlı yaygınlaşmasını sağlayacaktır.

Uygulamalara dair sunulan çalışmalara bakıldığında, daha çok elektrikli araçlar üzerine yoğunlaşıldığı görülmüştür.

Manyetik rezonans kuplaj yöntemi konusunda tüketici elektroniği başta olmak üzere diğer alanlarda da çalışmaların artırılması gerekmektedir. Kabloların ortadan kalkmasının sağladığı pratiklik nedeniyle insanlar günlük hayatlarında bu tür cihazları kullanmayı daha çok tercih edecektir.

Manyetik rezonans kuplaj yöntemiyle kablosuz güç aktarımı yönteminin önümüzdeki yıllarda öneminin artması öngörülmektedir. Bu nedenle bu konuda yapılan çalışmaların derlenmesi, yeni araştırmacılar için oldukça faydalıdır. Bu literatür taramasının da bu alanda yapılacak gelecek çalışmalar için iyi bir kaynak niteliği taşıması beklenmektedir.

## Kaynakça

Ağçal, A., Bekiroglu, N., & Ozcira, S. (2015). Examination of efficiency based on air gap and characteristic impedance variations for magnetic resonance coupling wireless energy transfer. *Journal of Magnetism*, 20(1), 57–61. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2015.20.1.057>

Ağçal, A., Bekiroglu, N., & Özçira, S. (2018). *M anyetik Rezonanslı Kuplaj ile Kablosuz Enerji Transferinde Hizalanmış ve Hizalanmamış Durumların Limitlerinin İncelenmesi*. 30(3), 67–73.

Ahmad, A., Alam, M. S., & Chabaan, R. (2017). A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 38–63. <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2771619>

Aydın, E., & Aydemir, M. T. (2021). *A 1-kW wireless power transfer system for electric vehicle charging with hexagonal flat spiral coil*. 2346–2361. <https://doi.org/10.3906/elk-2012-68>

Aydın, E., Aydemir, M. T., Aksoz, A., Baghdadi, M. El, & Hegazy, O. (2022). Inductive Power Transfer for Electric Vehicle Charging Applications: A Comprehensive Review. *Energies*, 15(14), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en15144962>

Ayisire, E., El-Shahat, A., & Sharaf, A. (2019). Magnetic Resonance Coupling Modelling for Electric Vehicles Wireless Charging. *GHTC 2018 - IEEE Global Humanitarian Technology Conference, Proceedings*, 6–7. <https://doi.org/10.1109/GHTC.2018.8601806>

Bai, T., Mei, B., Zhao, L., & Wang, X. (2019). Machine Learning-Assisted Wireless Power Transfer Based on Magnetic Resonance. *IEEE Access*, 7(M1), 109454–109459. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933679>

Barman, S. Das, Reza, A. W., Kumar, N., Karim, M. E., & Munir, A. B. (2015). Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1525–1552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.031>

Cannon, B.L. Hoburg, J.F. Stancil, D.D. Goldstein, S. C. (2009). Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(7), 1819–1825. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2017195>

Cheah, W. C., Watson, S. A., & Lennox, B. (2019). Limitations of wireless power transfer technologies for mobile robots. *Wireless Power Transfer*, 6(2), 175–189. <https://doi.org/10.1017/wpt.2019.8>

Chen, C. J., Chu, T. H., Lin, C. L., & Jou, Z. C. (2010). A study of loosely coupled coils for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 57(7), 536–540.

<https://doi.org/10.1109/TCSII.2010.2048403>

Chen, W., Liu, C., Lee, C. H. T., & Shan, Z. (2016). Cost-effectiveness comparison of coupler designs of wireless power transfer for electric vehicle dynamic charging. *Energies*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/en9110906>

Christ, A., Douglas, M. G., Roman, J. M., Cooper, E. B., Sample, A. P., Waters, B. H., Smith, J. R., & Kuster, N. (2013). Evaluation of wireless resonant power transfer systems with human electromagnetic exposure limits. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 55(2), 265–274. <https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2219870>

Duong, T. P., & Lee, J. W. (2011). Experimental results of high-efficiency resonant coupling wireless power transfer using a variable coupling method. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 21(8), 442–444. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2011.2160163>

Gao, L., Hu, W., Xie, X., Deng, Q., Wu, Z., Zhou, H., & Jiang, Y. (2013). Optimum design of coil for wireless energy transmission system based on resonant coupling. *IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA*, 0(3), 190–195. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2013.6565157>

Garnica, J., Chinga, R. A., & Lin, J. (2013). Wireless power transmission: From far field to near field. *Proceedings of the IEEE*, 101(6), 1321–1331. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2251411>

Houran, M. A., Yang, X., & Chen, W. (2018). Magnetically coupled resonance wpt: Review of compensation topologies, resonator structures with misalignment, and emi diagnostics. *Electronics (Switzerland)*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/electronics7110296>

Imura, T., Okabe, H., & Hori, Y. (2009). Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for electric vehicles by using magnetic resonant couplings. *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, 936–940. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289747>

Issi, F., & Kaplan, O. (2020). Manyetik Rezonans Kuplajlı Kablosuz Enerji Transfer Sistemi için Empedans Analizi ve Değişken Kapasite Dizisi Uygulaması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, December*. <https://doi.org/10.29109/gujsc.817922>

Jadidian, J., & Katabi, D. (2014). *Magnetic MIMO: How To Charge Your Phone in Your Pocket*. 7(11), 495–506. <https://doi.org/10.1145/2639108.2639130>

Jonah, O., & Georgakopoulos, S. V. (2012). Wireless powering of biomedical device via magnetic resonance. *2012 IEEE 13th Annual Wireless and Microwave Technology Conference, WAMICON 2012*, 16–21. <https://doi.org/10.1109/WAMICON.2012.6208446>

Kesler, M. (2013). Highly resonant power transfer: Safe, Efficient, over Distance. *WiTricity Corporation, Watertown, MA, USA*.

Khan, S. R., Pavuluri, S. K., Cummins, G., & Desmulliez, M. P. Y. (2020). Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review. *Sensors (Switzerland)*, 20(12), 1–58. <https://doi.org/10.3390/s20123487>

Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., & Soljacic, M. (2007). Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science (New York, N.Y.)*, 317, 83–86. <https://doi.org/10.1126/science.1143254>

Lee, C. H., Jung, G., Hosani, K. Al, Song, B., Seo, D. K., & Cho, D. (2020). Wireless power transfer system for an autonomous electric vehicle. In *Proceedings of 2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Seoul, Korea (South), 4, 467–

470. <https://doi.org/10.1109/WPTC48563.2020.9295631>
- Lee, K., & Cho, D. H. (2013). Diversity analysis of multiple transmitters in wireless power transfer system. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(6), 2946–2952. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2234132>
- Lee, W., & Yoon, Y. K. (2020). Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review. *IEEE Access*, 8, 147930–147947. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015176>
- Li, S., & Mi, C. C. (2015). Wireless power transfer for electric vehicle charging. *AIP Conference Proceedings*, 3(1), 4–17. <https://doi.org/10.1063/5.0032383>
- Liu, J., Zhang, X., Yu, J., Xu, Z., & Ju, Z. (2019). Performance Analysis for the Magnetically Coupled Resonant Wireless Energy Transmission System. *Complexity*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6090427>
- M. El Rayes, M., Nagib, G., & G. Ali Abdelaal, W. (2016). A Review on Wireless Power Transfer. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 40(5), 272–280. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v40p244>
- Mittleider, A., Griffin, B., & Detweiler, C. (2016). *Experimental Analysis of a UAV-Based Wireless Power Transfer Localization System* (Vol. 109, pp. 357–371). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23778-7\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23778-7_24)
- Mohamed, A. A. S., Shaier, A. A., Metwally, H., & Selem, S. I. (2022). An Overview of Dynamic Inductive Charging for Electric Vehicles. *Energies*, 15(15), 5613. <https://doi.org/10.3390/en15155613>
- Mou, X., Gladwin, D. T., Zhao, R., & Sun, H. (2019). *Survey on magnetic resonant coupling wireless power transfer technology for electric vehicle charging*. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0529>
- Na, K., Kim, J., & Park, Y. J. (2019). Free-Positioning Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System for Biomedical Devices. *2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference, WPTC 2019*, 497–501. <https://doi.org/10.1109/WPTC45513.2019.9055698>
- Ng, D. C., Will, C. E., Allen, P. J., Bai, S., Boyd, C. S., Halpern, E., & Skafidas, E. (2011). *Wireless power delivery for retinal prostheses*. 8356–8360.
- Nguyen, T. D., Li, S., Li, W., & Mi, C. C. (2014). Feasibility study on bipolar pads for efficient wireless power chargers. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 1676–1682. <https://doi.org/10.1109/APEC.2014.6803531>
- Nguyen, V. T., Kang, S. H., Choi, J. H., & Jung, C. W. (2015). Magnetic resonance wireless power transfer using three-coil system with single planar receiver for laptop applications. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 61(2), 160–166. <https://doi.org/10.1109/TCE.2015.7150569>
- Ning, P., Miller, J. M., Onar, O. C., & White, C. P. (2013). A compact wireless charging system for electric vehicles. *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013*, 3629–3634. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6647179>
- Okasili, I., Elkhateb, A., & Littler, T. (2022). *A Review of Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle Battery Charging with a Focus on Inductive Coupling*.
- 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. (2018). 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>
- Qiu, C., Chau, K. T., Liu, C., & Chan, C. C. (2013). Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging. *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS 27*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/EVS.2013.6914731>
- Song, M., Jayathurathnage, P., Zanganeh, E., Krasikova, M., Smirnov, P., Belov, P., Kapitanova, P., Simovski, C., Tretyakov, S., & Krasnok, A. (2021). Wireless power transfer based on novel physical concepts. *Nature Electronics*, 4(10), 707–716. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00658-x>
- Thiagarajan, K., & Deepa, T. (2021). A Comprehensive Review of High-frequency Transmission Inverters for Magnetic Resonance Inductive Wireless Charging Applications in Electric Vehicles. *IETE Journal of Research*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1905089>
- Triviño, A., González-González, J. M., & Aguado, J. A. (2021). Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: A review. *Energies*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/en14061547>
- Uddin, M. K., Ramasamy, G., Mekhilef, S., Ramar, K., & Lau, Y. (2014). *A Review on High Frequency Resonant Inverter Technologies for Wireless Power Transfer using Magnetic Resonance Coupling*. 412–417.
- Wang, J., Hu, M., Cai, C., Lin, Z., Li, L., & Fang, Z. (2018). Optimization design of wireless charging system for autonomous robots based on magnetic resonance coupling. *AIP Advances*, 8(5). <https://doi.org/10.1063/1.5030445>
- Wang, Z., Wei, X., & Dai, H. (2016). Design and control of a 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles. *Energies*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/en9010010>
- Wei, X., Wang, Z., & Dai, H. (2014). A critical review of wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Energies*, 7(7), 4316–4341. <https://doi.org/10.3390/en7074316>
- Zhang, Z., Pang, H., Georgiadis, A., & Cecati, C. (2019). Wireless Power Transfer - An Overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(2), 1044–1058. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2835378>