



## Kablosuz Güç Transferi Yoluyla Bataryaların Şarjı Sırasında Çeşitli Malzeme ve Sensörlerin Transfer Verimine Olan Etkilerinin Araştırılması

Araştırma Makalesi  
10.65520/erciyesfen.1831127

### Künye:

Sayı: 42(1)

Yıl: 2026

Sayfa: 97-122

Mert Yılmaz<sup>a\*</sup>

Erdal Cetkin<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Arş. Gör. Dr., Bursa Teknik  
Üniversitesi,

mrtylmz1007@gmail.com

<sup>b</sup> Prof. Dr., İzmir Yüksek Teknoloji  
Enstitüsü, erdalcetkin@gmail.com

\* Sorumlu Yazar

Geliş Tarihi: 07.11.2025

Kabul Tarihi: 11.02.2026

### Atf:

Mert Yılmaz, Erdal Cetkin, (2026).

Kablosuz Güç Transferi Yoluyla

Bataryaların Şarjı Sırasında Çeşitli

Malzeme ve Sensörlerin Transfer

Verimine Olan Etkilerinin

Araştırılması. *Erciyes University*

*Journal of Institute Of Science and*

*Technology*, 42(1), 97-122.

<https://doi.org/10.65520/erciyesfen.1831127>

### Öz

Elektrikli araçlar kablolu şarj, batarya değiştirme ve kablosuz şarj yöntemleriyle şarj edilmektedirler. İletken şarj, kablo hasarlarına ve olumsuz hava koşullarına karşı dayanıksızdır. Batarya değiştirmede temel sorunlar maliyet ve batarya birikimidir. Kablosuz şarj ise kablo karmaşasını ortadan kaldırırken, sürücülere güvenli ve otonom bir şarj imkânı sağlamaktadır. Buna karşın kablosuz şarj verimi henüz istenen seviyede değildir. Bu çalışmada kablosuz güç transferi veriminin artırılması amaçlanmış ve güç transferinin gerçekleştiği kompanzasyon sistemine yoğunlaşmıştır. Dairesel ve çift-D geometrilerine sahip bobinler tasarlanarak farklı görev döngülerinde ve hava aralıklarında testler yapılmıştır. Kompanzasyon sistemine nüve ve kalkan eklenerek verim incelenmiştir. Daha sonra projeye özgünlüğünü veren malzeme-sensör sistemi kompanzasyon sistemine dahil edilmiştir. Dört farklı malzeme ve iki basınç sensörü kullanılarak transfer verimi üzerine etkiler araştırılmıştır. Deneyler sonucunda maksimum verim daireSEL bobinler arasında yerleştirilen köpük malzemesiyle 55 mm hava aralığında %82.38 olarak elde edilmiştir. Nihai testler lityum iyon batarya paketiyle gerçekleştirilmiştir. Bataryalar 0,2, 0,5 ve 1.0C oranlarında şarj edilmiştir. Bu C oranlarında ortalama verim sırasıyla %82.89, 76.25 ve 61.93 olarak kaydedilmiştir. MATLAB ve Ansys programlarında benzetim çalışmaları yapılmış ve geliştirilen modeller doğrulanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Kablosuz Güç Transferi, Elektrikli Araçlar, Verim, Rezonant Endüktif Kuplaj



## Investigation of Effects of Various Materials and Sensors on Transfer Efficiency during Battery Charging via Wireless Power Transfer

### Abstract

Electric vehicles are charged via wired charging, battery swapping, and wireless charging methods. Wired charging is vulnerable to cable damage and adverse weather conditions. The primary issues with battery swapping are cost and battery accumulation. Wireless charging eliminates cable mess and provides drivers with a safe, autonomous charging opportunity. However, wireless charging efficiency is not yet at the desired level. In this study, the aim is to increase the efficiency of wireless power transfer, with a focus on the compensation system in which the transfer takes place. Coils with circular and double-D geometries were designed, and tests were conducted at different duty cycles and air gaps. The efficiency was examined by adding a core and shield to the compensation system. Subsequently, the material-sensor

Screened by



Except where otherwise noted, content in this article is licensed under a Creative Commons 4.0 International license. Icons by Font Awesome.

system that gave the project its novelty was included in the compensation system. The effects on transfer efficiency were investigated using four different materials and two pressure sensors. As a result of the experiments, a maximum efficiency of 82.38% was achieved with the foam material placed between the circular coils, using an air gap of 55 mm. Final tests were performed with a lithium-ion battery pack. Batteries were charged at 0.2, 0.5, and 1.0C ratios. The average efficiencies at these C ratios were recorded as 82.89%, 76.25%, and 61.93%, respectively. Simulation studies were carried out in MATLAB and Ansys programs, and the developed models were verified.

**Keywords:** Wireless Power Transfer, Electric Vehicles, Efficiency, Resonant Inductive Coupling.



## 1. Giriş

Fosil yakıt kaynaklarının kısıtlı olması ve bu yakıtların kullanımıyla ortaya çıkan ciddi çevre sorunları nedeniyle tüm dünyada elektrikli araçlara olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte elektrikli araçların kabul edilebilirliği sürüş menzili, satın alma maliyeti, şarj altyapısının kullanılabilirliği ve performansı ile yakından ilişkilidir. Ülkemizde özellikle şarj altyapısı henüz istenen seviyede değildir ve hibrid araçlar tercih edilmektedir [1]. Elektrikli araçlar (EA'lar) batarya değiştirme, iletken şarj ve kablosuz şarj olmak üzere üç yöntemle şarj edilmektedir [2]. Batarya değişimi hızlı bir yöntem olsa da uzun vadede batarya sağlığı, maliyeti ve şarj istasyonu pratikliği muammadır [3]. İletken şarj teknolojisi, uygun maliyetli ve kolay uygulanabilir bir çözümdür. Ancak zorlu hava koşullarında ağır kablo yapısı, açık iletkenler ve bir temas anında meydana gelebilecek arklar nedeniyle güvenlik endişesine neden olmaktadır. Şarj için üçüncü seçenek ise EA'ların uzun süreli park hallerinde, sürüş veya geçici duruşları sırasında fiziksel bir bağlantı olmadan şarj edilebilmesine imkân sağlayan kablosuz güç transferi (KGT) teknolojisidir. Bu teknoloji otomatik, kullanışlı, zorlu ortamlarda güvenilir, vandalizme karşı dayanıklıdır. Ek olarak yolda, halka açık ya da özel otoparklarda ve otobüs duraklarında uygulanabilmesi sayesinde KGT teknolojisi EA'ların şarjı için ideal bir çözüm sunmaktadır. KGT, iletken şarjın getirdiği soket tipi bağımlılığına son verdiği gibi soğuk hava koşullarında soketin sıkışması gibi sorunları da ortadan kaldırmaktadır.

EA'ların kablosuz şarjı için statik, yarı-dinamik ve dinamik olmak üzere üç adet çalışma modu tanımlanmıştır [4]. Statik şarjda araç park halindedir ve motoru çalışmıyorken tam olarak şarj olması beklenir. Yarı-dinamik şarjda araç durmaktadır, motoru çalışır vaziyettedir ve aracın kısa süreli şarj olması beklenir. Dinamik şarjda ise araç hareket halindeyken şarj olur.

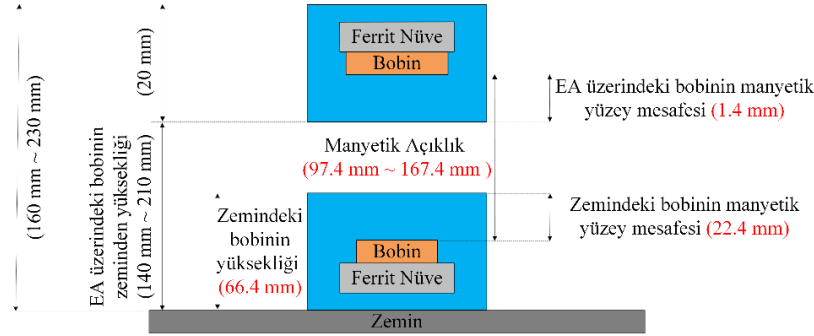
Kablosuz güç transferi teknolojisi, engin bir uygulama alanına sahiptir. Güç aktarımı, geniş bir frekans ölçeğinde ve yüksek hava aralıklarında bu teknoloji sayesinde yapılabilmektedir. Kablosuz şarj teknolojisi uzak alan ve yakın alan olmak üzere ikiye ayrılır. Mikrodalga ve ışık dalgası uzak alan yöntemleridir ve radyasyon yaymaktadırlar. Öte yandan, kapasitif ve endüktif yöntemler yakın mesafede yapılır ve radyasyon yaymazlar. Elektrikli araçların mikrodalga, endüktif ve kapasitif yöntemlerle şarj edildiği bilinmektedir [5]. Mikrodalga ile KGT, yaydığı radyasyon nedeniyle EA kullanıcıları için tehlikeli bir yöntemdir. Kapasitif yöntemin hava aralığı milimetre mertebesinde ve EA'larda pratikte uygulaması zordur. Endüktif yöntem, manyetik rezonans prensibiyle iki metre mesafeye kadar, kilowatt mertebesinde güç nakli olanağı sağlar ve EA'lar için en uygun yöntemdir [6].

Manyetik rezonans ile KGT'nin iki metre mesafeye kadar yapılması, EA'ların karayolu üzerinde yarı-dinamik veya dinamik şarjı için önem arz etmekte birlikte şarj verimi en büyük problemidir. Üniversitelerin araştırma laboratuvarlarında ya da ticari firmaların yaptığı çalışmalarda nihai amaç, menzil problemlerinden dolayı karayolu üzerinde EA'ların dinamik olarak şarjını sağlamaktır. Bu nedenle kablosuz güç transferinin maksimum verimle, araç tipine göre uzak mesafelere yapılması hedeflenmektedir. Statik kablosuz şarjda da aynı amaç benimsenmiştir. Oysaki, SAE J2954 standartlarına bakıldığında verici ve alıcı bobinler arası mesafeye (hava aralığına) dair bir kısıt getirilmemiştir [7]. Zemin mesafesi (ground clearance) olarak farklı araç tipleri düşünülerek tanımlanan ve **Tablo 1**'de görülen Z-sınıfları, EA üzerinde bulunan alıcı bobinin yere olan mesafesini temsil etmektedir. WiTricity firması çalışmalarında, standarda göre en yüksek yerden yükseklik

mesafesi olan 250 mm'yi hava aralığı olarak baz almıştır [8]. Araştırmacılar çalışmalarında, endüktif KGT sistemlerinde değişen hava aralıklarının Z-sınıfına uyumluluğunu tartışmışlardır [9]. Koreli bilim adamlarının, SAE J2954'te önerilen standartları temel alarak yaptıkları Z2 sınıfına göre olan tasarımlarında alıcı bobinin yerden yüksekliği 140 ile 210 mm arasında değişirken, hava aralığı **Şekil 1**'de görüldüğü üzere 97.4 ile 167.4 mm arasında değişmektedir [10].

**Tablo 1.** SAE J2954 standardına göre Z-sınıfı özellikleri [7]

Z-Sınıfı	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>
Yerden yükseklik mesafesi (mm)	100 – 150	140 – 210	170 – 250



**Şekil 1.** SAE J2954 Z2 sınıfına göre KGT sistemi tasarımı [10]

KGT'nin temel amacı gücün maksimum verimle aktarılmasıdır. Verici taraf zemin üzerinde, alıcı taraf ise EA üzerindedir. İki taraf arasında belirli bir hava aralığı bulunur, bu durum maksimum verimin önündeki en büyük engellerden biridir. Literatürdeki güncel KGT sistemleri incelendiğinde değişen güç, frekans, hava aralığı ve kompanzasyon topolojilerine göre verimin değişimi **Tablo 2**'de listelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, hava aralıkları 10 ile 250 mm arasında değişmektedir. Buna karşın sistemin toplam veriminin düşük (10 mm) hava aralıklarında %80 iken hava aralığının artmasıyla (100-150 mm) %95-96 mertebesine ulaştığı görülmektedir. Bu durum, sistem veriminin sadece hava aralığına bağlı olmadığını, sistemin diğer elemanlarına da bağlı olduğunu göstermektedir. Örneğin, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarında yapılan çalışmalarda, ilk etapta verim %80 mertebesindeyken, verim düşüklüğünün aynı boyutta olmayan verici-alıcı bobin yapılarından kaynaklandığı görülmüştür [11]. Aynı zamanda, primer tarafta eviricide ve sekonder tarafta doğrultucuda düşük güç faktöründen kaynaklı oluşan reaktif güç azaltılarak verim iyileştirilmiş ve kümülatif olarak %95 verime ulaşılmıştır. Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü'ndeki araştırmacılar güç elektroniği tasarımlarına ek olarak verici-alıcı bobin yapılarında asimetrik dört bobinli rezonatör kullanarak %96 verimlere ulaşabilmişlerdir [12]. Öte yandan, bahsedilen verimler ideale yakın çalışan devre elemanları ile mümkündür ve bu durum yüksek maliyeti beraberinde getirmektedir.

EA'lara yönelik KGT uygulamalarında, elektromanyetik alan emilimi minimum olduğundan transfer hava ortamında gerçekleşir. Buna karşın, dinamik şarjda primer taraf zeminin altında olduğu için transfer ortamı hava ile genellikle asfalt, düz ve demirli betondan oluşmaktadır [13]. EA uygulamalarına ek olarak biyomedikal implant ve robotik KGT uygulamalarında transfer ortamı değişiklik göstermektedir. Biyomedikal KGT uygulamalarında transfer ortamı hava, insan dokusu ve metalden oluşmaktadır [14]. Birçok çalışmada insan dokusunu taklit etme amaçlı olarak sığır, tavuk ve domuz eti kullanılmaktadır [15]. Su altı robotik KGT uygulamalarında ise transfer ortamı sudur [16].

**Tablo 2.** Elektrikli araçların statik kablosuz şarjına ilişkin çalışmalar

Firma/ Üniversite	Güç (kW)	Frekans (kHz)	Hava Aralığı (mm)	Verim (%)	Kompanzasyon Topolojisi	Manyetik Çekirdek	Kalkan	Yıl	Referans
Auckland Üniversitesi	50	85	160	90.0	Ayarlı LCL-LCL, çift-D bobinler	Var	Var	2023	[17]
Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü	3	20	10	80.0	Seri-Seri, DDD bobinler	Var	Var	2015	[18]
	15	20	180	80.0				2015	[19]
	3.3	90	100	96.0				2016	[12]
Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı	6.6	19.5	100-160	80.0	LCL-LCL, 3 fazlı bobinler	Var	Yok	2014	[20]
	50	88.5	150	95.0				2018	[21]
	200	-	230	90.0				2020	[22]
	100	-	150	91.0				2022	[23]
	270	85	110	95.0				2024	[24]
Wuhan Üniversitesi	35.1	85	200	94.0	Seri-Seri, Dikdörtgensel bobinler	Yok	Yok	2019	[25]
Fuzhou Üniversitesi	1.6	85	100	92.5	LC-LC, Çift-D bobinler	Var	Yok	2024	[26]
Zhejiang Üniversitesi	2.63	85	200	91.1	LC-LC, Çift-D bobinler	Var	Yok	2022	[27]
IRESEN	3.7	85	150-250	90.0	Seri-Seri, Dairesel bobinler	Var	Var	2023	[28]
WiTricity	11	85	100-250	90.0	Dikdörtgensel bobinler	-	-	2019	[8]
INTIS	100	30	200	90.0	-	-	-	2019	[29]
	11	-	200	94.0				2022	[30]
VEDECOM	20	-	175	90.0	-	-	-	2019	[31]

Bu çalışmada, KGT yoluyla bataryaların şarjı sırasında çeşitli malzeme ve sensörlerin verime olan etkilerinin araştırılmıştır. Tasarım ilk etapta birer evirici, kompanzasyon sistemi, doğrultucu, filtre ve yükten oluşmaktadır. Farklı hava aralıklarında yapılan deneyler sonucunda kompanzasyon sistemine ferrit nüveler ve alüminyum kalkanlar eklenmiştir ve daha verimli bir operasyon amaçlanmıştır. EA uygulamalarında transfer ortamı havaya ek olarak asfalt ve betondan oluşabilmektedir. Alıcı ve verici bobinlerin birbirlerine çok yaklaştığı senaryolarda, mesafeyi sabitleyecek ya da aracı elektriksel ve termal açıdan yalıtım için tampon vazifesi görece malzemelerin kullanımı gerekebilir. Bu malzemelerin transfer verimi üzerine olan etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmaya özgünlüğünü veren malzeme-sensör sisteminde termal ve elektriksel yalıtım için transfer ortamı keçe, sünger, kauçuk ve taş yünüyle doldurulmuştur. Belirli hava aralıklarında bu malzemelerin sistemin verimi üzerine olan etkileri incelenmiştir. Son olarak, sistemde bulunan yük dört seri ve iki paralel konfigürasyona sahip batarya paketi ile değiştirilerek batarya paketi farklı C oranlarında şarj edilmiştir.

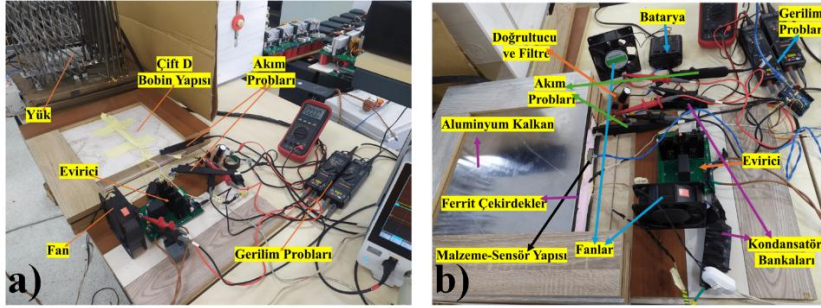
## 2. Materyal ve Metot

Kablosuz güç transferi sistemi tasarımı, birer evirici, kompanzasyon sistemi, doğrultucu, filtre ve rezistif yükten oluşmaktadır. Sisteme enerji sağlamak için 600V, 17A ve 10 kW ratinglere sahip bir programlanabilir güç kaynağı kullanılmıştır. Evirici olarak 3.5 kW güç ve 100 kHz frekansa kadar çalışma özelliğine sahip yüksek frekanslı evirici kullanılmıştır. Eviricide bulunan anahtarlama elemanları ile doğrultucuda bulunan diyotlar birer fan ile zorlanmış konveksiyon yoluyla soğutulmuştur. Kompanzasyon sistemi dairesel ve çift-D geometrisine sahip bobinlerden ve kondansatör bankalarından oluşmaktadır. Hava aralığını ayarlamak için ahşap bloklardan ve köpüklerden faydalanılmıştır. Bir dizi rezistanstan oluşan 4.2Ω değerinde yük kullanılmıştır. Kompanzasyon sisteminin giriş ve çıkışındaki gerilim ve akım değerlerini ölçmek için diferansiyel gerilim ve akım problemleri kullanılmıştır. Osiloskop vasıtasıyla bu akım ve gerilim dalga biçimleri gözlemlenerek kayıt altına alınmıştır. Testler sırasında oluşabilecek sıcaklık artışları termal kamera ile

gözenmiştir. Deneysel düzeneği, kompanseman sisteminin detaylı hali ile sistemdeki bilgilerin ve sinyallerin akış diyagramı sırasıyla Şekil 2, 3, ve 4'te verilmiştir.



Şekil 2. Kapsamlı test düzeneği



Şekil 3. Kompanseman sistemi tasarımları a) İlk tasarım b) Son tasarım

Deneysel düzeneğini oluşturmanın temel amacı, farklı hava aralıkları, bobin geometrileri ve özgün malzeme-sensör yapılarına göre KGT sisteminden en iyi verimi almak için sistemin analizini yapmak ve sistem parametrelerini doğrulamaktır. Bu kapsamda, evirici, kompanseman sistemi ve doğrultucunun verim karakteristiğini incelemek için veriler toplanarak bir dizi test yapılmıştır. Toplanan veriler aracılığıyla sistem verimi için oluşturulan modeller ve kablosuz güç sistemi parametreleri doğrulanacaktır. Tasarlanan sisteme enerji doğru akım (DA) güç kaynağı ile sağlanmaktadır. Buna karşın, KGT'yi gerçekleştirmek için kompanseman sistemine alternatif akım (AA) sağlamak gerekir. Bu alternatif akım DA güç kaynağının beslediği bir tam köprü evirici yardımıyla tedarik edilir. Bu ihtiyaca istinaden TDINV3500P100-KIT model tek fazlı, yüksek frekanslı tam köprü evirici kullanılmıştır. Evirici frekans, sinyal genişlik modülasyonu (PWM) ve ölü zaman (deadtime) olmak üzere üç parametreden sorumludur. Bu parametreler evirici kitinde dahili olarak bulunan F28035 Piccolo kontrol kartı ve Code Composer Studio programı ile sisteme girdi olarak verilmiştir. SAE J2954 standartlarına göre elektrikli araçlar için tasarlanan bir KGT sisteminin nominal çalışma frekansı 85 kHz olarak belirtilmiştir. Bu nedenle, evirici 85 kHz frekansa sahip bir PWM gerilimini kompanseman sistemine sağlamaktadır. Ancak bu gerilim sinüzoidal değil simetrik bir kare dalga şeklindedir. Bu dalga biçimi, görev döngüsü (duty cycle) nedeniyle dahili harmonikler barındırır. İlk harmoniğin genliği en büyüktür ve harmonik indisi arttıkça genlik azalır. Bu harmonikler distorsiyon gücünü artmasına neden olur. Görünür güç normalde reaktif güç ve gerçek güç bileşenlerinden oluşurken, harmoniklerin dahil olmasıyla bu bileşenlere Eşitlik 1.'de olduğu gibi distorsiyon gücü eklenir [32].

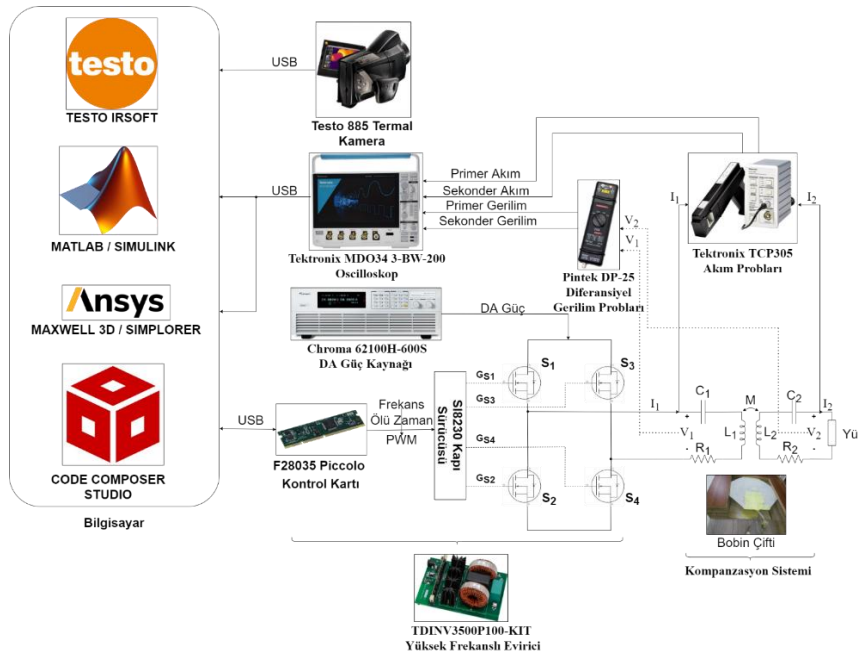
$$S^2[VA] = P^2[W] + Q^2[VAR] + D^2[VAR] \quad (1)$$

Eşitlikte S,P,Q, ve D sırasıyla görünür, gerçek, reaktif ve distorsiyon güçlerini temsil eder. Distorsiyon gücünün artması verimin düşmesine neden olur. Literatürde görev döngüsüne bağlı olarak değişen harmoniklerin verim üzerine etkilerini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır [33]. Buna göre toplam

harmonik bozulmanın görev döngüsü %75 iken minimum olduğu dolayısıyla verimin maksimum olduğu görülmektedir. Öte yandan, görev döngüsü %100 iken transfer edilen güç maksimumdur. Görev döngüsünün verim üzerine etkilerini incelemek için deneyler %75 ve %100 görev döngülerinde gerçekleştirilmiştir.

Harmonikler haricinde, verimi etkileyen bir diğer unsur eviricide meydana gelen kayıplardır. Bu kayıplar iletim, anahtarlama ve diğer kayıplar olmak üzere üçe ayrılır. Evirici yapısında anahtarlama elemanları ile yapılan analizlerde en yüksek kayba diyot iletim kayıplarının yol açtığı görülmüştür. Diyot iletim kayıplarını sırasıyla anahtarlama elemanına ait iletim kayıpları, anahtarlama kayıpları ve diğer kayıplar takip eder.

Eviriciye ait bir diğer önemli parametre ise ölü zamandır. Evirici yapısında bulunan anahtarlama elemanı gruplarının aynı anda çalışmasına engel olmak için ölü zaman üretilmektedir. Aksi takdirde, atış akımı (shoot through current) denilen akım sıçramaları oluşarak eviriciye zarar verir. Bunlara ek olarak, eviriciden maksimum verim alınabilmesi için anahtarlama elemanlarının belirli bir sıcaklık aralığında çalışması gerekmektedir. Sıcaklık arttıkça eviricinin akım kapasitesi azalır, anahtarların iç direnci ( $R_{DS(on)}$ ) direnci artar ve verimi düşer. Bu bilgiler ışığında, anahtarlama elemanlarını soğutmak amacıyla sisteme bir fan eklenmiştir.



Şekil 4. Test düzeneğinin akış diyagramı

KGT sisteminin en kritik kısımlarından biri transferin gerçekleştiği kompanzasyon sistemidir. Kompanzasyon sistemi kondansatörler ve bobinlerden (coil, kuplör) oluşur. Bu devre elemanlarının bağlanma konfigürasyonlarına göre farklı kompanzasyon topolojileri ortaya çıkar. Test düzeneğinde, primer ve sekonder bobinler ile kondansatörler birbirlerine seri olarak bağlanarak seri-seri (SS) kompanzasyon uygulanmıştır. Bu topoloji, uygulaması kolay ve güç kapasitesi yüksek olduğu için benimsenmiştir ve eşdeğer devresi Şekil 4.'te görülmektedir. Devrede  $R_L$ ,  $R_1$  ve  $R_2$  sırasıyla yükü, verici ve alıcı bobinlerin iç dirençlerini temsil etmektedir. Eşdeğer devreye istinaden bobinlerin empedansları Eşitlik 2.'deki gibi yazılır.

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad Z_2 = R_2 + j\omega L_2 \quad (2)$$

Primer ve sekonder taraflardaki çevrim eşitlikleri **Eşitlik 3.** ve **4.**'te verilmiştir.

$$V_1 = I_1 \cdot \left( Z_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) - I_2 \cdot j\omega L_M \quad (3)$$

$$0 = I_2 \cdot \left( Z_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L \right) - I_1 \cdot j\omega L_M \quad (4)$$

**Eşitlik 4.** düzenlendiği zaman sekonder akımı  $I_2$ , primer akımı  $I_1$  cinsinden **Eşitlik 5.**'teki gibi yazılır.

$$I_2 = \frac{j\omega L_M}{Z_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L} \cdot I_1 \quad (5)$$

**Eşitlik 3.** ve **5.** birlikte ele alındığında giriş empedansı **Eşitlik 7.**'deki gibi elde edilir.

$$V_1 = I_1 \cdot \left( Z_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) - I_1 \cdot \left( \frac{j\omega L_M}{Z_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L} \right) \cdot j\omega L_M \quad (6)$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = Z_1 + \left( \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \left( \frac{L_M^2}{Z_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L} \right) \quad (7)$$

Son olarak, seri-seri kompanzasyon devresi verimi **Eşitlik 8.** ile hesaplanır.

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{\Re \{ R_L \cdot I_2^2 \}}{\Re \{ Z_1 \cdot I_1^2 \}} = \left( \frac{j\omega L_M}{Z_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L} \right)^2 \cdot \frac{R_L}{Z_1} \quad (8)$$

Bu çalışmaya özgünlüğünü veren, malzemelerin verici ve alıcı bobinler arasındaki açıklığı doldurmasıyla oluşturulan transfer ortamları kompanzasyon sistemi verimini etkilemektedir. Bu çalışmada, bobinler arası açıklık havaya ek olarak keçe, sünger, kauçuk ve taş yünü gibi dielektrik malzemelerle doldurulmuştur. Bu malzemelerin göreceli geçirgenlik (relative permeability) değerleri 1 olarak kabul edilir. Dolayısıyla ferromanyetik malzemeler gibi manyetik alan yönlendirmesi yapmaları beklenmez ve manyetik alan etkileri ihmal edilmektedir. Öte yandan, yüksek elektriksel geçirgenliğe (permittivity) sahip dielektrik malzemeler daha çok enerji depolar. **Eşitlik 9.**'da görüldüğü gibi kondansatörün kapasitansı bağıl geçirgenliğe bağlı olarak artar. Bobin endüktansı sabit kaldığı için rezonans frekansında kaymalar görülür. Transfer ortamı hava iken rezonans frekansı daha yüksekken, elektriksel geçirgenliği havaya göre farklı olan bir dielektrik malzeme kullanıldığında çalışma frekansı azalır. Bu durumda sıfır faz açısı daha düşük frekansta aranmalıdır. Aynı frekansta güç transferi isteniyorsa bobin yapısı değişimi yerine kapasitans ayarı yapılması gerekmektedir.

$$\begin{aligned} f_r &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \\ C &= \varepsilon_r \cdot C_0 \\ f_r' &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L(\varepsilon_r \cdot C_0)}} \end{aligned} \quad (9)$$

Bir dielektrik ortamdaki yer değiştirme akımı yoğunluğu **Eşitlik 10.**'da verilmiştir. Bağıl elektriksel geçirgenliğin çok yüksek olması manyetik akı yolunun bozulmasına ve transfer veriminin azalmasına neden olabilir.

$$J_d = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{dE}{dt} \quad (10)$$

Eşitlikte  $J_d$ ,  $\frac{dE}{dt}$ ,  $\varepsilon_r$  ve  $\varepsilon_0$  sırasıyla yer değiştirme akımı yoğunluğu, elektrik alanın değişim hızı, bağıl geçirgenlik ve boşluğun geçirgenliğidir. Transfer veriminin azalmasına neden olabilecek bir diğer

parametre dielektrik kayıplarıdır. Verici ve alıcı bobinler arası dielektrik malzeme ile doldurulduğu zaman bu malzeme elektromanyetik enerjinin bir kısmını absorbe ederek ısı enerjisine çevirir [34].

$$P_d = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot E^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan\delta \quad (11)$$

**Eşitlik 11.**'de  $f$ ,  $\tan\delta$ , ve  $E$  sırasıyla frekansı, kayıp tanjantını ve elektrik alan gücünü temsil eder. Düşük kayıplı dielektrik malzeme  $\tan\delta = 0$  seçilerek transfer verimindeki düşüş önlenebilir. Deneylerde kullanılan dielektrik malzemelerin Ansys kütüphanesinde yer alan manyetik özellikleri **Tablo 3.**'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Transfer ortamı olarak kullanılan malzemelerin manyetik özellikleri

Malzeme	Ansys Malzeme	Bağlı Permittivite	Bağlı Permeabilite	Kitle İletkenliği (Siemens/m)	Dielektrik Kayıp Tanjantı
Keçe	Plastik, PLA	4.47	1	2.9E-10	0.10614
Sünger	Poliüretan	1.08	1	9.9E-12	0.00018
Kauçuk	Plastik, EVA	3.12	1	1.8E-14	0.03098
Taş Yünü	Plastik, PP, fiber	3.35	1	5.0E-17	0.00245

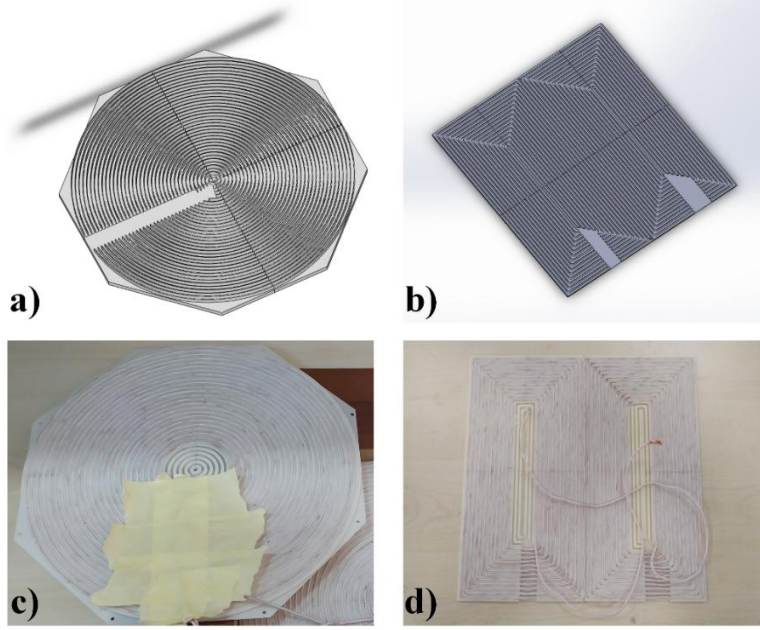
Kompanzasyon sisteminde kullanılacak olan bobin ve kondansatörlerin belirlenmesi için birtakım seçimler ve hesaplar yapmak gerekmektedir. SAE J2954 standardına göre sistemin çalışma frekansı 85 kHz olarak belirlenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda kW mertebesinde güç aktarımı için bobin boyutları 545 mm ile 890 mm arasında değişmektedir [17,23,25]. Dolayısıyla, gelecek çalışmalar düşünülerek kW mertebesinde kablosuz güç transferi yapmak için çalışma alanı 300x300 mm olarak belirlenmiştir. Seçimi yapılması gereken bir diğer parametre ise kalite faktörüdür. Elektrikli araç kablosuz güç transferi uygulamalarında kalite faktörü 100'den düşük olmamalıdır ve genellikle 100 ile 800 arasında değişmektedir [35]. Verimli bir operasyon için kalite faktörü 120 olarak seçilmiştir. Bu kapsamda, bobinlerin iç dirençleri  $0.4\Omega$  varsayılmıştır. Bobinlerin indüktans değeri Eşitlik 1.'deki gibi kalite faktörü ( $Q$ ), bobin iç direnci ( $R_{Li}$ ) ve çalışma frekansına ( $f$ ) bağlıdır. Kondansatörlerin değeri ise **Eşitlik 13.**'te verilen rezonans formülüne göre belirlenir.

$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{R_{Li}} = \frac{\omega_0 \cdot L}{R_{Li}} \Rightarrow L = \frac{Q \cdot R_{Li}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{120 \cdot 0.4}{2 \cdot \pi \cdot 85000} = 89.88 \mu H \quad (12)$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \Rightarrow C = \frac{1}{L \cdot \omega^2} = \frac{1}{89.88 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 85000)^2} = 39.01 nF \quad (13)$$

Test düzeneğinde, farklı geometrilere göre tasarlanan bobinlerin verime olan etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, Litz teli kullanılmıştır ve bobinler dairesel ve çift-D (DD) geometrilerinde tasarlanmıştır. Litz telinin başlıca avantajları deri ve yakınlık etkilerini azaltması, yüksek frekanslarda çalışabilmesidir. Bu özelliklere göre Litz teli, KGT uygulamalarında genellikle tercih edilir. Kullanılan Litz teli 50-100 kHz bandında, 38 AWG (0.1 mm) 300 bükümlü tel (strand) yapısında olup çapı 2.4 mm'dir. Literatürde yer alan çalışmalardaki kuplör boyutlarından ve kW mertebesinde güç transferi için çalışma alanının 300x300 mm olarak belirlendiğinden bahsedilmiştir. Bu kapsamda, dairesel bobinin çapı 300 mm olarak tasarlanmıştır. Eşitlik 1.'de yapılan endüktans hesabına istinaden dairesel bobin tasarımı için spiral bobin hesaplayıcısı kullanılmıştır [36]. Buna göre bobin iç çapı ( $D_i$ ) tur sayısı ( $N$ ), kablo çapı ( $w$ ) ve turlar arasındaki boşluk ( $s$ ) değerleri girdi olarak alınmıştır. Bu girdilere göre endüktans ( $L$ ), dış çap ( $D_{out}$ ) ve kablo uzunluğu ( $W$ ) değerleri çıktı olarak alınmıştır. Elimizde kablo çapı, indüktans ve dış çap bilgileri bulunmaktadır. Diğer parametreler ise deneme-yanılma yöntemiyle belirlenerek mevcut bilgilere uygun tasarımlar ortaya çıkartılmıştır. Dairesel Litz teli için gerekli tasarım gereksinimlerine göre iç çap 60 mm, tur sayısı 24, kablo çapı 2.4 mm ve turlar arasındaki boşluk 2.6 mm olarak belirlenmiştir. Buna göre hesaplayıcının çıktıları; endüktans 90.041  $\mu H$ , dış çap 300 mm ve kablo uzunluğu 13.57 metredir. Tur sayısı 24 olarak tasarım gerçekleştirildiği için DD bobin tasarımında da tur sayısı 24 olarak referans alınmıştır ve bobin boyutları 300x300 mm olarak belirlenmiştir.

Bobinler arasında geometrik olarak tasarım farkı olmaması için bobin yataklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, tasarım gereksinimlerine göre Solidworks programında bobin yatak tasarımları yapılmıştır. Tasarlanan yataklar 3D yazıcıdan çıktı alınarak dairesel ve DD formlarında oluşturulmuştur. Bobin yatakları ile bu yataklara istinaden oluşturulan dairesel ve DD geometrilerle sahip tasarımlar **Şekil 5.**'te görülmektedir. KGT sırasında kondansatör üzerinde gerilim stresi oluşmaktadır. Bu stresi azaltmak için her iki tarafta da tek bir kondansatör yerine kondansatör bankaları kullanılmıştır. Kompanzasyon sistemine ait değerler **Tablo 4.**'te verilmiştir. Kompanzasyon sistemi elemanları 85 kHz frekansta çalışacağı için ölçümler LCR metre ile 100 kHz frekansta gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.** Solidworks programında tasarlanan bobin yatakları ve tasarımları

a) Dairesel yatak b) DD yatak c) Dairesel bobin tasarımı d) DD bobin tasarımı

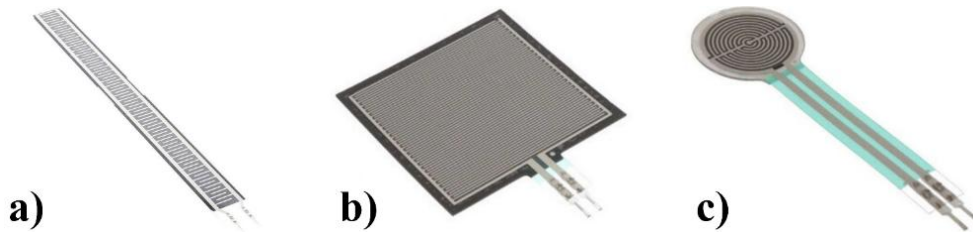
**Tablo 4.** Kompanzasyon sistemi elemanlarına ait değerler

<i>Parametreler / Bobin Geometrisi</i>	<i>Dairesel</i>	<i>DD</i>
$R_{L1}$ ( $\Omega$ )	0.1900	0.3270
$R_{L2}$ ( $\Omega$ )	0.1462	0.2970
$L_1$ ( $\mu H$ )	88.38	65.09
$L_2$ ( $\mu H$ )	88.85	66.21
$C_1$ (nF)	39.53	53.34
$C_2$ (nF)	39.92	52.37

KGT deneyleri her iki geometriye sahip bobin için aynı hava aralıklarında yapılmıştır. Deney sonuçlarının daha tutarlı olması için hizalama hatalarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Bunun için bobin tepsilerini çevreleyen tahta bloklar kullanılmıştır. Tahta blokların altına ise pleksi levhalar monte edilerek bobin tepsileri sabitlenmiştir. Bu bloklar ile bobinler arasında 20 mm'den 101 mm'ye kadar 10 mm farklarla hava aralıkları oluşturulmuştur. Bu hava aralıkları her iki geometri çeşidi için birebir aynıdır ve sırasıyla 19.1, 30.1, 40.1, 50.1, 60.1, 70.1, 81.1, 91.1, ve 101.1 mm'dir. Verilen hava aralıklarında yapılan deneyler sonucunda, sistemin verimini arttırmak için ferrit nüve ve alüminyum kalkanlar kompanzasyon sistemine dahil edilmiştir. İlk deneylerde dokuz olan hava aralığı sayısı EA çalışma frekansı göz önünde bulundurularak ikiye indirilmiştir. Daha sonra kompanzasyon sistemine

malzeme-sensör yapısı ilave edilmiş ve deneyler malzeme kalınlıklarına göre iki farklı hava aralığında gerçekleştirilmiştir.

Kompanzasyon sistemi tasarımı literatürüne katkıda bulunan bir kısım da malzeme-sensör yapısıdır. EA'ların kablosuz şarj uygulamalarında transfer ortamı havadır. Bu durum mekanik ve elektriksel olarak değerlendirilerek verici ve alıcı bobinler arasındaki boşluk koruma ve yalıtım için çeşitli malzemelerle doldurulmuştur. Seçilecek malzeme en başta yalıtkan olmalı ve kablosuz şarj sırasında yükselen sıcaklık göz önüne alınarak malzemenin sıcaklık dayanımı da iyi olmalıdır. Ayrıca malzemenin rijitliği ya da esnekliği, kullanılacak sensör yapısının düzgün çalışması adına kiriktir. Bu kriterlere göre deneylerde çalışma ortamı olarak kullanılmak üzere seçilen malzemeler keçe, sünger, kauçuk ve taş yünüdür. Malzemelerin ortak özelliği iletken olmamaları ve bu nedenle şarj sırasında yabancı cisim gibi davranmamalarıdır. Malzemelere ek olarak **Şekil 6.**'da görülen basınç sensörleri kullanılmıştır. Oluşturulan malzeme-sensör sistemi bir kavram kanıtı çalışmasıdır. Malzemeler güvenlik ve yalıtım amacıyla kullanılırken sensörler ise bobinler arasındaki mesafenin en aza indiğini doğrulamak amacıyla kullanılmıştır. Temel amaç hava aralığını en aza indirmek olduğu için sensörün z-eksen uzunluğu olabildiğince kısa ve yerleştirileceği konum itibarıyla en az açıklığa sebep olmalıdır. Sensörlerin yapısında bulunan bileşenler, KGT sırasında bobinler arasında oluşacak manyetik alana elektromanyetik girişim yapabileceği için verim kaybı olmaması adına uygun sensör yapısı titizlikle araştırılmış ve rijit (0295 ve 0296) ve esnek (0293) malzemelere uygun olarak çalışan sensörler belirlenmiştir. Sensörlerin z-eksen uzunlukları (kalınlıkları) 0.35 mm ile 0.45 mm arasında değişmekte olup çalışma sıcaklıkları  $-40^{\circ}\text{C}$  ile  $+85^{\circ}\text{C}$  arasındadır. Sensörler 20g ve 6 kg ağırlığındaki cisimlerin uyguladığı basıncı ölçme kabiliyetine sahip olup yanıt süreleri 10 milisaniyeden azdır. Sensörlerin üst kısmında basınca duyarlı katman, alt kısmında ise ince film ve iletken devre bulunur. Aktif alana basınç uygulandığında alt katman devreye girerek basınç dirence dönüşür. Basınç arttıkça çıkış direnci azalır ve uygulanan basınca göre doğrusal olarak çalışır. Sensörler malzeme çeşidine göre **Şekil 3b)**'deki gibi malzemelerin arasına yerleştirilerek verici ve alıcı bobin arasının tamamen malzemeye dolu olduğu ve aralığın sabit olduğu bilgisini verir.



**Şekil 6.** Basınç sensörleri a) SEN0293 b) SEN0295 c) SEN0296

Sistemi oluşturan evirici, kompanzasyon sistemi, doğrultucu, filtre ve yük bilgileri benzetim modellerine aktarılmıştır. Benzetim modelleri için MATLAB/Simulink, Ansys/Maxwell 3D Design arayüzleri kullanılmıştır. Sistemin ölçümlerle elde edilen elektriksel değerleri MATLAB dosyasına aracılığıyla kaydedilerek Simulink arayüzünde deney sonuçları ve sistem parametreleri doğrulanmıştır. ANSYS Maxwell 3D Design arayüzünde dairesel ve DD geometrisine sahip bobinler tasarlanmıştır. Verici ve alıcı bobinlerin öz ve karşıt endüktansları ile manyetik kuplaj katsayısının hava aralıklarına bağlı olarak değişimi simüle edilmiştir. Tasarlanan modellerin doğrulanması için ortalama kök ortalama kare hatasına (RMSE) ölçütüne ihtiyaç vardır. Böylece, deney sonuçları ile tahmin edilen model sonuçları arasındaki farkların **Eşitlik 14.**'e göre ikinci dereceden ortalaması alınarak gerçekçi bir doğrulama yapılır. Eşitlikte,  $E_i$  ve  $S_i$  deney ve simülasyon sonuçlarını,  $n$  ise örneklem büyüklüğünü temsil eder.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - S_i)^2}{n}} \quad (14)$$

### 3. Bulgular ve Tartışma

KGT deneyleri dört aşamada yapılmıştır. Bu aşamalardaki farklılıklar kompanzasyon sisteminden ve KGT sistemi çıkışından kaynaklanmaktadır. Birinci aşamada verici ve alıcı bobinler arasında çeşitli hava aralıkları oluşturularak deneyler yapılmıştır. İkinci aşamada kompanzasyon sistemine ferrit nüveler ve alüminyum kalkanlar eklenmiştir. Üçüncü aşamada ise hava aralığı malzeme-sensör sistemi ile doldurulmuştur. İlk üç aşamada sistem çıkışında rezistif bir yük kullanılmıştır. Son aşamada ise rezistif yük yerini dört seri-iki paralel bağlantı şekline sahip lityum-iyon batarya takımına bırakmıştır. İlk üç aşamada dairesel ve DD geometrisine sahip bobinlerle ayrı deneyler yapılmıştır. Son aşamada ise ilk üç aşamadaki sonuçlara istinaden batarya paketi dairesel bobinler kullanılarak şarj edilmiştir. Tüm aşamalar için MATLAB ve Ansys programlarında benzetim çalışmaları yapılmıştır. KGT sistemi modelleri deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Benzetim çalışmalarındaki yanılma oranları ortalama kare hatası yöntemine göre bu kısımda paylaşılmıştır. Tüm testlerde kompanzasyon sisteminin giriş gücü 360 W mertebesine göre ayarlanmıştır.

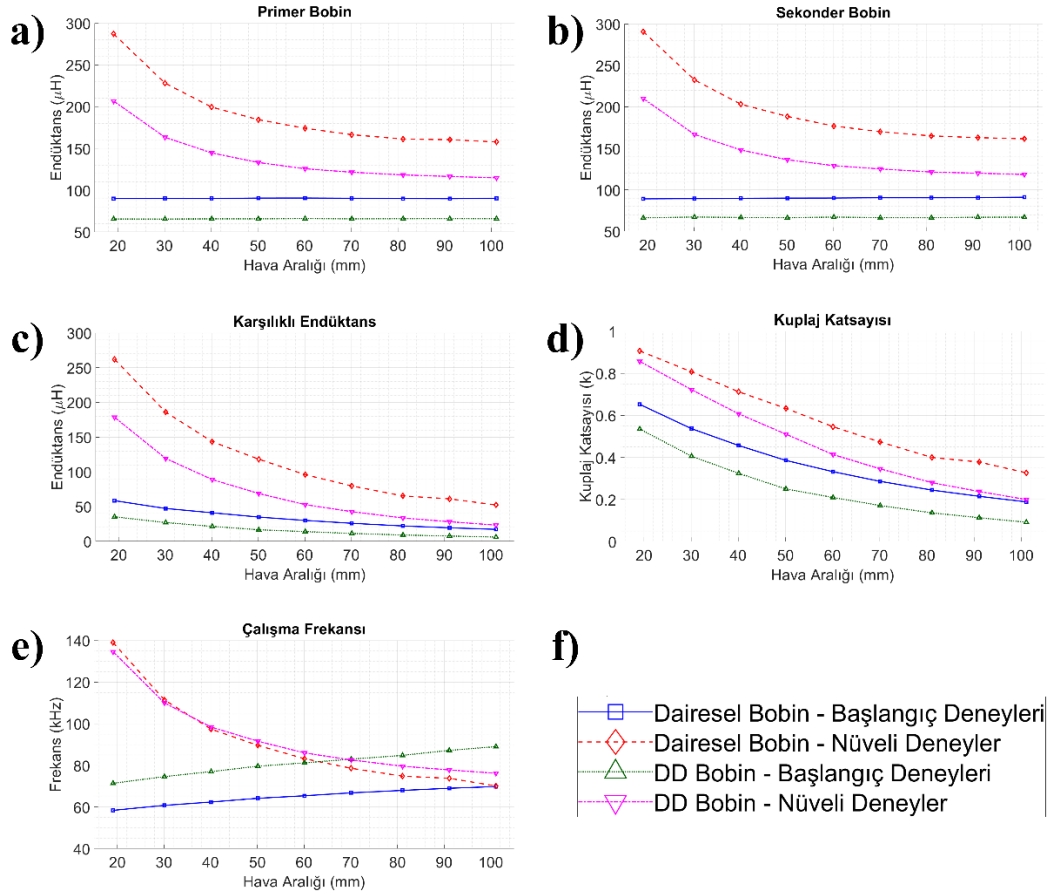
Her aşamada farklı değişkenler sisteme eklendiği için bobinlerin karşılıklı endüktansı ya da bobinler arasındaki manyetik kuplaj miktarı değişmektedir. Bu nedenle her deneyden önce verici ve alıcı bobinlerin öz endüktansları LCR metre ile 100 kHz frekansta ölçülmüştür. Bu ölçümlere göre karşılıklı endüktans ( $L_K$ ) değeri **Eşitlik 15.**'te olduğu gibi yüksek ( $L_{K_Y}$ ) ve düşük ( $L_{K_D}$ ) endüktans ölçümlerine göre hesaplanarak benzetim çalışmalarında kullanılmıştır. Her ölçüm, ilgili aşamalarda çizelgeler halinde paylaşılmıştır.

$$L_{K_Y} = L_1 + L_2 + 2 \cdot L_K \quad \wedge \quad L_{K_D} = L_1 + L_2 - 2 \cdot L_K \quad \Rightarrow \quad L_K = (L_{K_Y} - L_{K_D})/4 \quad (15)$$

#### 3.1. Başlangıç Deneyleri

İlk aşamada evirici, kompanzasyon sistemi, doğrultucu ve yükten oluşan bir KGT sistemi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. 19.10 milimetreden 101.10 milimetreye kadar hava aralıkları kademeli olarak arttırılmıştır. Hava aralığı ölçeğinin bu kadar geniş tutulmasının sebebi verimin en yüksek olduğu bölgeyi saptamaktır. İlgili hava aralıklarında öz ve karşılıklı endüktans ile manyetik kuplaj değerleri dairesel ve DD geometriye sahip bobinler için LCR metre ile 100 kHz frekansta ölçülmüştür. Başlangıç deneyleri ve nüveli deneylerden önce yapılan ölçümler ile ilgili hava aralıkları için çalışma frekansları daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek adına **Şekil 7.**'de karşılaştırmalı olarak birlikte verilmiştir. Ortalama  $L_1$  ve  $L_2$  değerleri dairesel Litz teli için sırasıyla 90.26 ve 90.18  $\mu\text{H}$  iken bu değerler DD Litz teli için 65.67 ve 66.76  $\mu\text{H}$  olarak ölçülmüştür. Kompanzasyon sistemine nüve dahil edildiğinde, dairesel bobin öz endüktansları 101.10 mm hava aralığında 157.82-161.60  $\mu\text{H}$  mertebesine yükselirken hava aralığının en az olduğu 19.1 mm'de 287.10-290.70  $\mu\text{H}$  bandında ölçülmüşlerdir. DD bobin öz endüktansları ise 101.10 mm'de 114.83-118.51  $\mu\text{H}$  bandındayken 19.1 mm'de 206.70-210.00  $\mu\text{H}$  mertebesinde ölçülmüşlerdir. Aynı tur sayısında olmalarına rağmen dairesel bobinlerin öz endüktansları DD bobinlere göre daha yüksektir. Bu durum karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısı ölçüm sonuçları için de geçerlidir. Karşılıklı endüktans değerleri ilgili hava aralıklarında dairesel bobinler için 52.25 ve 261.94  $\mu\text{H}$  arasında değişirken, bu değerler DD bobinler için 23.32 ve 178.53  $\mu\text{H}$  arasında değişmektedir. Dairesel bobin çiftlerinde kuplaj katsayısı 0.3272 ve 0.9067 arasındadır. DD bobin çiftlerinde ise kuplaj katsayısı 0.1998 ve 0.8569 arasında değişmektedir. Kuplaj katsayısı ve kalite faktörü çarpımı (kQ) yüksekliğinin transfer verimini olumlu etkilediği göz önüne alındığında kuplaj katsayısı sonuçlarından kompanzasyon sistemi veriminin dairesel bobin için daha yüksek olacağı peşinen söylenebilir. İki bobin geometrisi için aynı hava aralıklarında çalışma frekansları açısından da farklılıklar bulunmaktadır. Başlangıç deneylerinde dairesel bobinlerde çalışma frekansı 58.40 ile 69.80 kHz arasında değişmektedir. 81.10 mm hava aralığından sonra çalışma frekansı 69 kHz civarındadır. Bu değerler SAE standartlarına göre EA kablosuz şarjı için uygun değildir. DD bobinlerde ise operasyonlar 71.40 ile 89.00 kHz arasındadır. 70.10 mm ile 101.10 mm hava aralıkları arasında çalışma frekansı EA kablosuz şarjı için uygundur. Verimi arttırmak için sisteme nüve eklendiğinde ise her iki bobin geometrisi için ikişer rezonans frekansı ortaya çıkmıştır. Düşük olan çalışma frekansları EA kablosuz şarjı için uygun olmadığından yüksek rezonans frekansları benimsenmiştir. Yüksek frekansları arasında da 50.10 ve 60.10 mm hava aralıklarındaki çalışma frekansları SAE standartlarına uygundur. Bu nedenle, daha sonraki deneylerde hava aralığı ölçeği

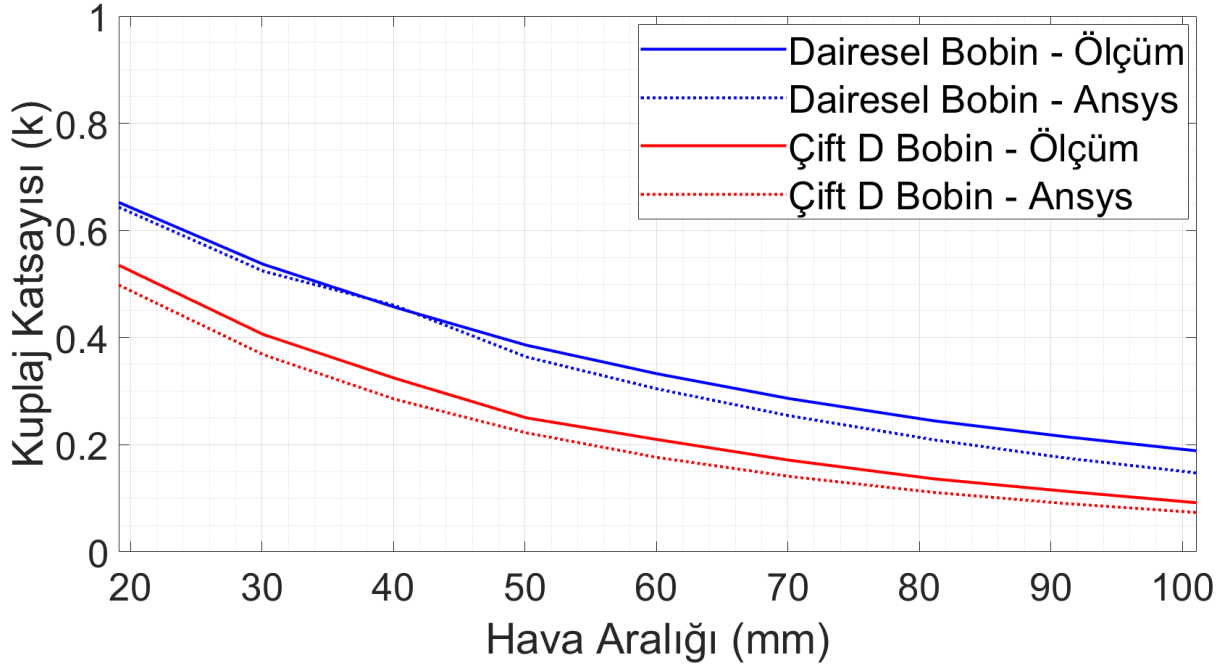
daraltılmıştır.



**Şekil 7.** Başlangıç deneyleri ve nüveli deneylerin karşılaştırılması

a) Primer bobin b) Sekonder bobin c) Karşılıklı endüktans d) Kuplaj katsayısı e) Çalışma frekansı f) Lejant

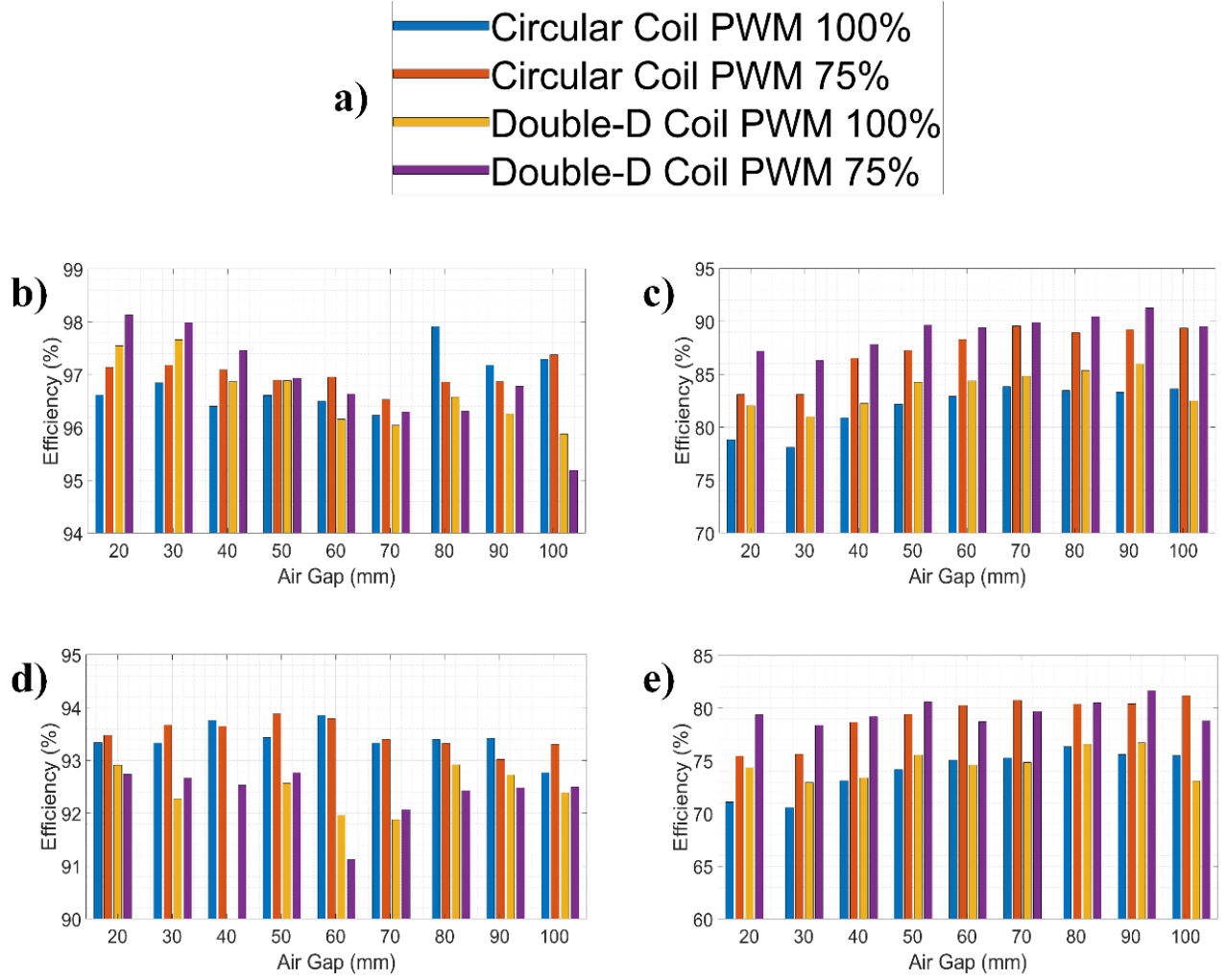
Verici ve alıcı bobinler arası hava aralığı arttıkça manyetik kuplajın azalması beklenmektedir. Bu durum deney sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Başlangıç deneylerinde dairesel bobinlere ait kuplaj katsayılarının DD bobinlere yüksek olduğu ölçümlerle sabittir. Deneyler ve Ansys benzetim sonuçlarına göre bobin geometrilerinin karşılaştırması **Şekil 8.**'de görülmektedir. Ansys modellerinde, dairesel ve DD geometrilerine ait sonuçlarda sırasıyla 0.029 ve 0.031'lik farklar elde edilmiştir. Bu farklara göre hava aralığının düşük olduğu durumlarda benzetim modeli daha doğru sonuçlar vermektedir.



**Şekil 8.** Deney ve benzetim çalışmalarına göre dairesel ve DD bobinlerin kuplaj katsayılarının karşılaştırılması

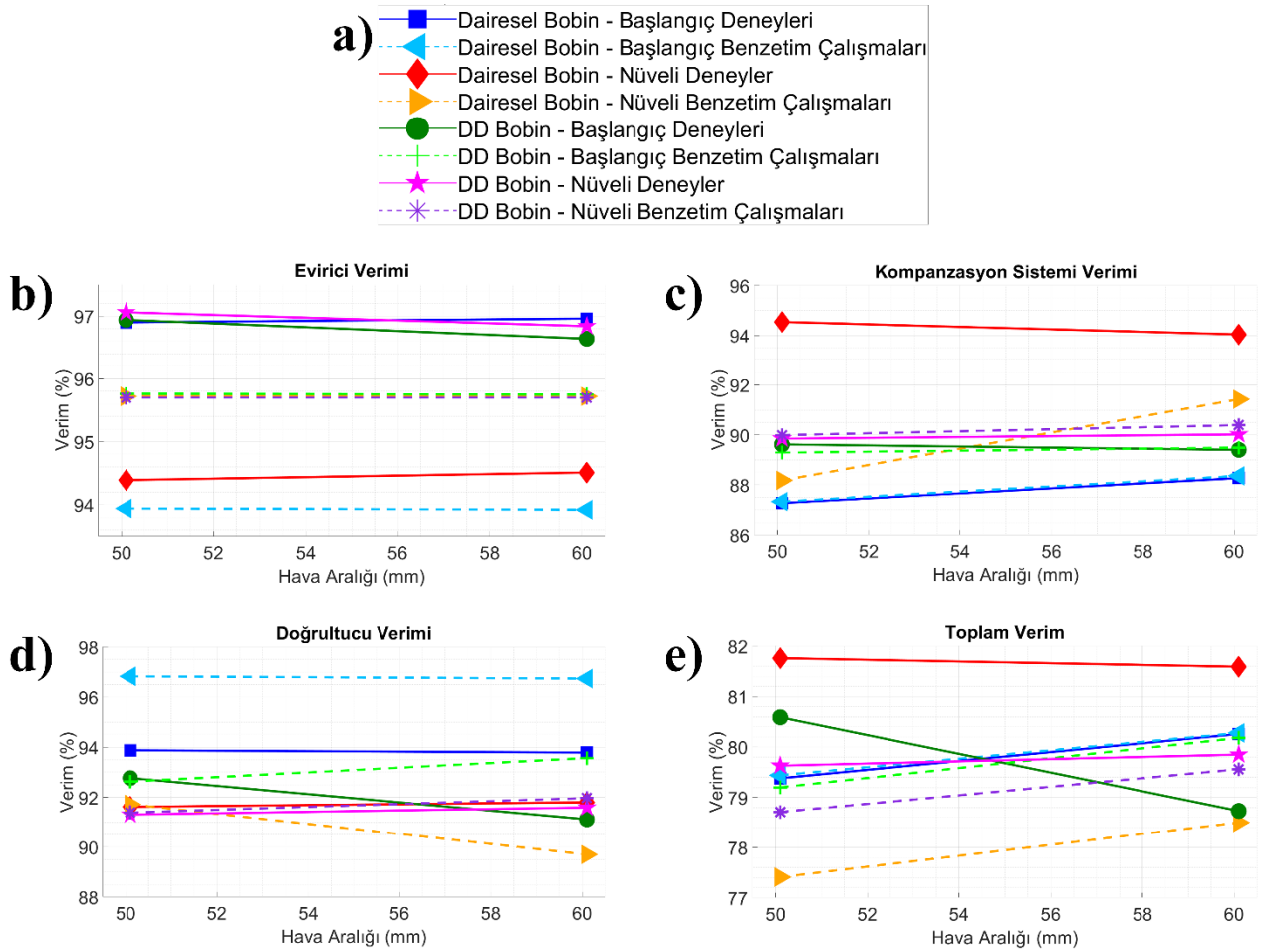
Başlangıç deneyleri geniş hava aralığı ölçeğinde yapılmıştır. Bu sayede en yüksek verime sahip hava aralıkları belirlenmiş ve ilerleyen deneylerde hava aralığı sayısı azaltılmıştır. Bu aşamada, her iki geometri için de aynı hava aralığında PWM %100 ve %75 olmak üzere iki deney yapılmıştır. Bunun nedeni toplam harmonik bozulmanın verim üzerindeki etkilerini göstermektir. Dairesel ve DD bobinler ile oluşturulan KGT sistemine ait verim sonuçları **Şekil 9.**'de paylaşılmıştır. Beklendiği gibi, kompanzasyon sistemi verimi PWM %75 iken %100'e göre daha yüksektir. Ek olarak, her alt sistem ve sistemin toplam verimi bobin geometrisine göre incelenmiştir. Buna göre, evirici verimleri dairesel bobin için %96.23 ile %97.91 arasında, DD bobin için %95.19 ile %98.13 arasında; kompanzasyon sistemi verimleri dairesel bobin için %78.10 ile %89.57 arasında, DD bobin için %80.98 ile %91.24 arasında; doğrultucu verimleri dairesel bobin için %92.77 ile %93.88 arasında, DD bobin için %91.12 ile %92.92 arasında; sistemin toplam verimi ise dairesel bobin için %70.59 ile %81.18 arasında, DD bobin için %72.97 ile %81.66 arasında değişmektedir.

Deneyler, her alt sistemin verimliliğinin ilk deneylerde %90'ın üzerinde olmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu hedef, evirici ve doğrultucu sonuçlarında elde edilmiş olsa da kompanzasyon sistemi sonuçlarında hedefe yalnızca çift d bobin için iki hava boşluğunda ulaşılmıştır. Dairesel bobin testlerinde, kompanzasyon sisteminin verimliliği maksimum %89.57 olmuştur.



**Şekil 9.** Deneysel verim sonuçları a) Lejant b) Evirici c) Kompanzasyon d) Doğrultucu e) Toplam

Her iki bobin geometrisinin sonuçları incelendiğinde 50.10, 60.10 ve 101.10 mm hava aralıklarında KGT sistemi veriminin en yüksek mertebeye olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu hava aralıklarına yoğunlaşarak, benzetim modelleri ile doğrulamalar 50.10 ve 60.10 mm hava aralıklarında yapılmıştır. Dairesel ve DD bobinler ile başlangıç deneyleri ve nüveli deneyler için yapılan benzetim çalışmalarına ait sonuçlar daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek adına **Şekil 10.**'da paylaşılmıştır. Başlangıç deneyleri için deney ve benzetim sonuçları arasındaki farklar kök ortalama kare hatasına (RMSE) göre değerlendirildiğinde dairesel bobin sonuçlarındaki hatalar %1.7 ile %2.12 arasında değişirken DD bobin sonuçlarında hatalar %0.80 ile %1.49 arasında değişmektedir.

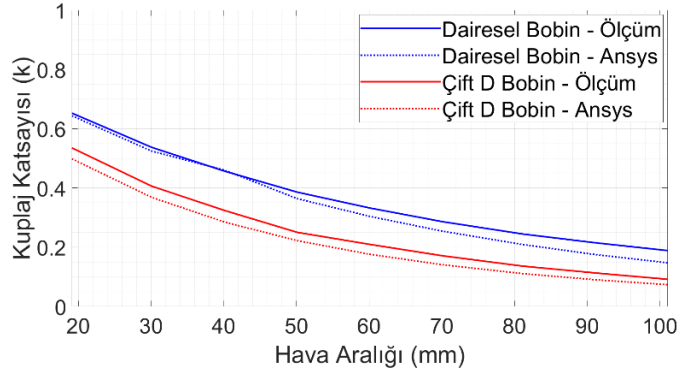


**Şekil 10.** Başlangıç deneyleri ve nüveli deneylerin verimlerinin benzetim çalışmaları ile karşılaştırılması

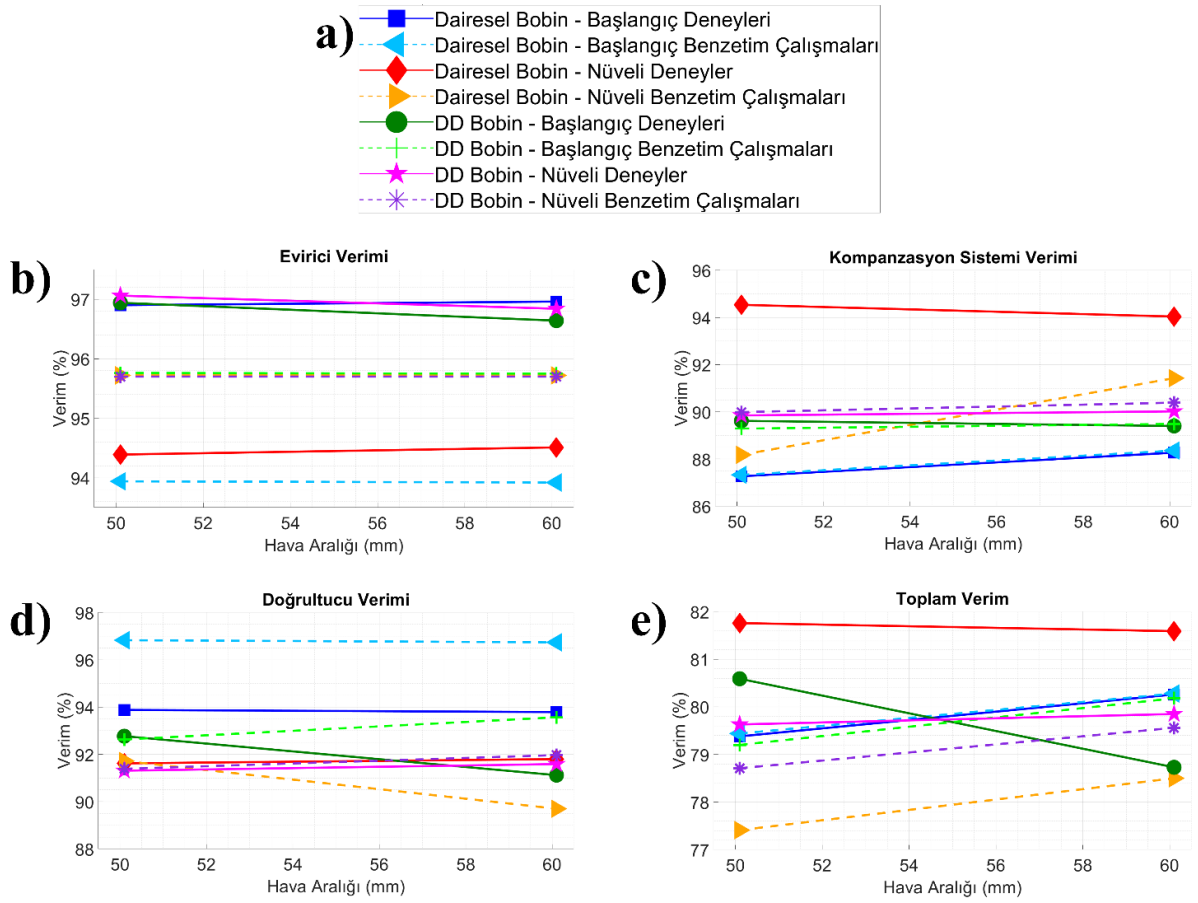
a) Lejant b) Evirici verimi c) Kompanzasyon sistemi verimi d) Doğrultucu verimi e) Toplam verim

### 3.2. Ferrit Nüve ve Alüminyum Kalkanlı Deneyler

Başlangıç deneylerinde kompanzasyon sistemi verimi üç hava aralığında %90'ın üzerine çıkmıştır. Kompanzasyon sistemi verimini iyileştirmek adına bu aşamada verici ve alıncı bobinlere ferrit nüve ve alüminyum kalkan eklenmiştir. Deneyler nüvelerin eklendiği senaryoda tüm hava aralıklarında, nüveye ek olarak alüminyum kalkanların eklendiği senaryoda ise 50.10 ve 60.10 mm hava aralıklarında gerçekleştirilmiştir. LCR metre ölçümlerine göre ilgili hava aralıklarındaki öz ve karşılıklı endüktans ile manyetik kuplaj değerleri dairesel ve DD geometrileri için başlangıç deneyleri ve sadece nüvenin olduğu durumlarda daha iyi karşılaştırma adına **Şekil 7.**'de paylaşılmıştır. Nüve etkisiyle öz endüktans, karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısı değerlerinde belirgin artışlar gözlenmiştir. Başlangıç deneylerinde olduğu gibi bobinlerin manyetik kuplaj katsayıları arasında farklılıklar bulunmaktadır. Kuplaj katsayılarındaki farklılıklar benzetim sonuçlarına **Şekil 11.**'daki gibi yansımıştır. Benzetim modellerinde, dairesel ve DD geometrilerine ait sonuçlarda sırasıyla 0.020 ve 0.064'lük RMSE farkları elde edilmiştir.



**Şekil 11.** Deney ve benzetim çalışmalarına göre dairesele ve DD bobinlere ferrit nüve eklenmesi durumunda kuplaj katsayısı karşılaştırması

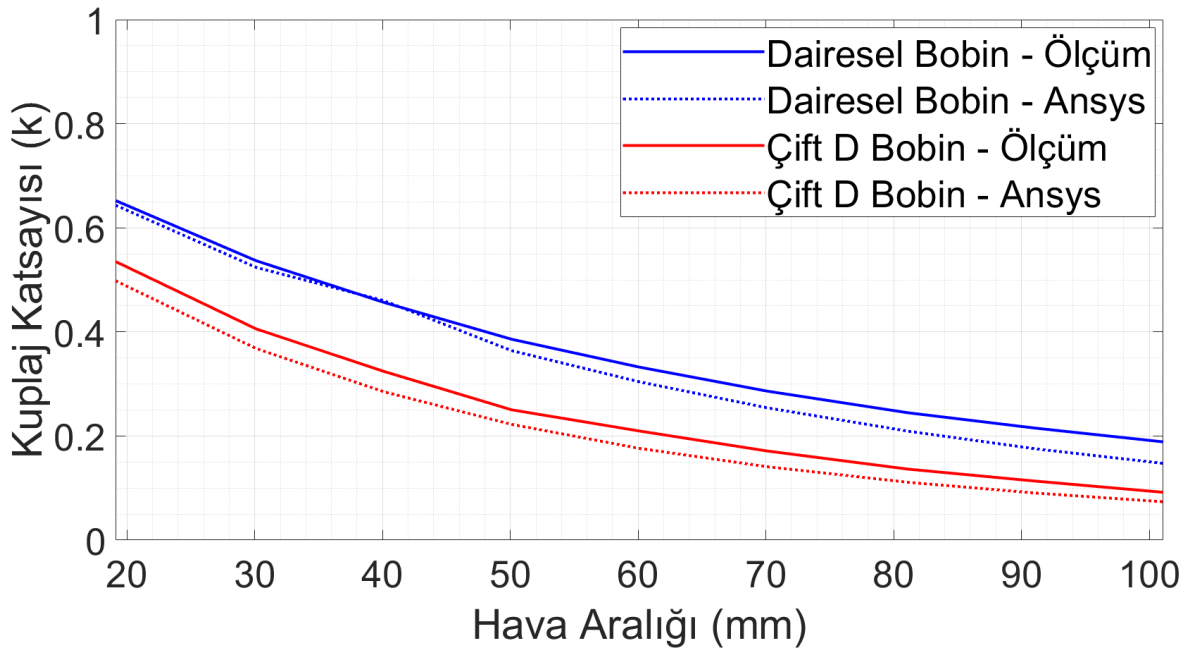


**Şekil 10.** Başlangıç deneyleri ve nüveli deneylerin verimlerinin benzetim çalışmaları ile karşılaştırılması

a) Lejant b) Evirici verimi c) Kompanzasyon sistemi verimi d) Doğrultucu verimi e) Toplam verim

### 3.2. Ferrit Nüve ve Alüminyum Kalkanlı Deneyler

Başlangıç deneylerinde kompanzasyon sistemi verimi üç hava aralığında %90'ın üzerine çıkmıştır. Kompanzasyon sistemi verimini iyileştirmek adına bu aşamada verici ve alıncı bobinlere ferrit nüve ve alüminyum kalkan eklenmiştir. Deneyler nüvelerin eklendiği senaryoda tüm hava aralıklarında, nüveye ek olarak alüminyum kalkanların eklendiği senaryoda ise 50.10 ve 60.10 mm hava aralıklarında gerçekleştirilmiştir. LCR metre ölçümlerine göre ilgili hava aralıklarındaki öz ve karşılıklı endüktans ile manyetik kuplaj değerleri dairesel ve DD geometrileri için başlangıç deneyleri ve sadece nüvenin olduğu durumlarda daha iyi karşılaştırma adına **Şekil 7.**'de paylaşılmıştır. Nüve etkisiyle öz endüktans, karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısı değerlerinde belirgin artışlar gözlenmiştir. Başlangıç deneylerinde olduğu gibi bobinlerin manyetik kuplaj katsayıları arasında farklılıklar bulunmaktadır. Kuplaj katsayılarındaki farklılıklar benzetim sonuçlarına **Şekil 11.**'daki gibi yansımıştır. Benzetim modellerinde, dairesel ve DD geometrilerine ait sonuçlarda sırasıyla 0.020 ve 0.064'lük RMSE farkları elde edilmiştir.



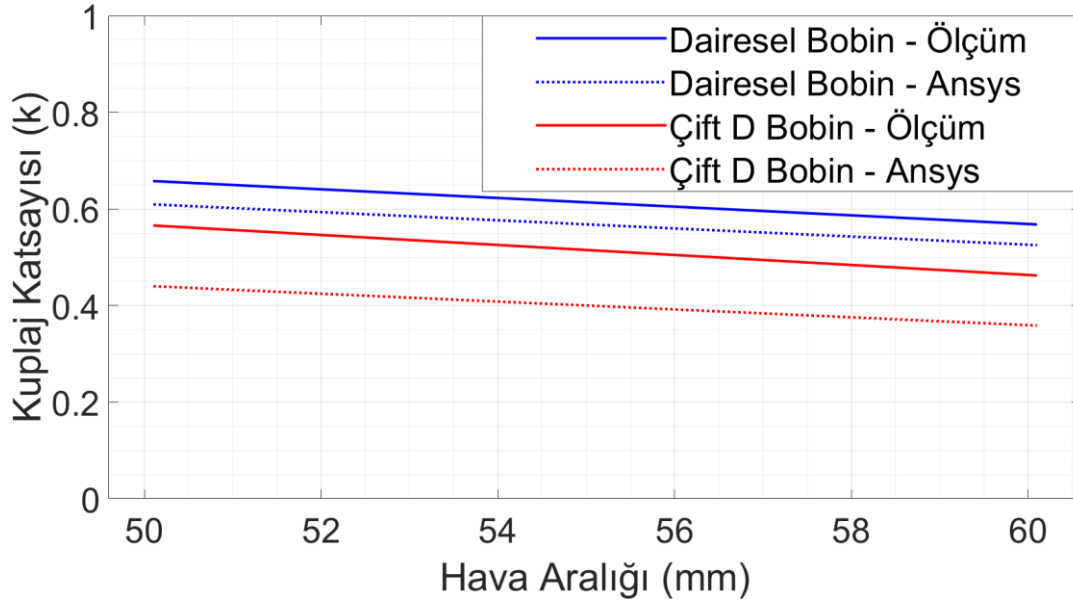
**Şekil 11.** Deney ve benzetim çalışmalarına göre dairesel ve DD bobinlere ferrit nüve eklenmesi durumunda kuplaj katsayısı karşılaştırması

**Tablo 5.** Ferrit nüve ve alüminyum kalkanın dairesel bobin kuplaj katsayısı üzerine etkileri

Hava Aralığı (mm)	$L_1$ ( $\mu\text{H}$ )	$L_2$ ( $\mu\text{H}$ )	$L_{KD}$ ( $\mu\text{H}$ )	$L_{KY}$ ( $\mu\text{H}$ )	$L_K$ ( $\mu\text{H}$ )	Kuplaj Katsayısı (k)	Frekans (kHz)	
50.10	193.45	196.18	132.38	644.90	128.13	0.6577	41.10	90.70
60.10	180.18	182.34	155.48	567.20	102.93	0.5679	43.90	83.90

**Tablo 6.** Ferrit nüve ve alüminyum kalkanın DD bobin kuplaj katsayısı üzerine etkileri

Hava Aralığı (mm)	$L_1$ ( $\mu\text{H}$ )	$L_2$ ( $\mu\text{H}$ )	$L_{KD}$ ( $\mu\text{H}$ )	$L_{KY}$ ( $\mu\text{H}$ )	$L_K$ ( $\mu\text{H}$ )	Kuplaj Katsayısı (k)	Frekans (kHz)	
50.10	145.06	150.51	126.76	461.20	83.61	0.5658	48.60	93.10
60.10	134.12	139.54	145.68	398.70	63.26	0.4623	52.30	86.60



**Şekil 13.** Deney ve benzetim çalışmalarına göre dairesel ve DD bobinlere ferrit nüve ve alüminyum kalkan eklenmesi durumunda kuplaj katsayısı karşılaştırması

Nüveli ve alüminyum kalkanlı deneylerde her iki geometri için de aynı hava aralığında sadece PWM %75 deneyleri yapılmıştır. **Tablo 7.** ve **8.**'de dairesel ve DD bobinlerine ek olarak nüveler ve kalkanlar ile oluşturulan KGT sistemlerinin verim sonuçları paylaşılmıştır.

**Tablo 7.** Ferrit nüveli ve alüminyum kalkanlı dairesel bobin deney sonuçları

Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Frekans (kHz)	Verim Değerleri (%)			
			Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
50.10	75	41.10	98.73	82.17	92.29	74.87
		90.70	96.26	92.11	92.47	81.98
60.10		43.90	96.47	88.73	92.70	79.35
		83.90	95.89	92.94	92.85	82.75

**Tablo 8.** Ferrit nüveli ve alüminyum kalkanlı DD bobin deney sonuçları

Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Frekans (kHz)	Verim Değerleri (%)			
			Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
50.10	75	48.60	94.84	89.09	92.21	77.91
		93.10	95.64	90.52	91.95	79.60
60.10		52.30	94.68	90.72	92.09	79.10
		86.80	96.17	90.10	91.96	79.68

KGT sisteminin toplam verimi dairesel bobin için %74.87 ve %82.75 arasında değişmektedir. Verimler çift DD bobin için %77.91 ile %79.68 arasındadır. Bu aşamada hedef her bir alt sistem veriminin %90, toplam verimin ise %80'in üzerinde olmasıdır. Bu hedef nüveli ve kalkanlı dairesel bobin deneylerinde gerçekleşmiştir. Buna karşın, çift D bobin deneylerinde alt sistem verim hedefleri tutsa da KGT sistemi genel verimi %80'in üzerine çıkamamıştır.

Dairesel ve çift D bobin için nüveli ve alüminyum kalkanlı deney ve benzetim çalışmaları sonuçları **Tablo 9.** ve **10.**'de paylaşılmıştır. Deney ve benzetim sonuçları arasındaki farklar kök ortalama kare hatasına (RMSE) göre değerlendirildiğinde dairesel bobin sonuçlarındaki hatalar %1.53 ile %2.08 arasında değişirken DD bobin sonuçlarında hatalar %0.65 ile %0.82 arasında değişmektedir.

**Tablo 9.** Ferrit nüveli ve alüminyum kalkanlı dairesel bobin deney ve benzetim verim sonuçlarının karşılaştırması

Çalışma	Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Verim Değerleri (%)			
			Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
Deney	50.10	75	96.26	92.11	92.47	81.98
Simulink			95.74	90.54	90.68	78.60
Deney	60.10		95.89	92.94	92.85	82.75
Simulink			95.75	91.31	95.37	83.38

**Tablo 10.** Ferrit nüveli ve alüminyum kalkanlı DD bobin deney ve benzetim verim sonuçlarının karşılaştırması

Çalışma	Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Verim Değerleri (%)			
			Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
Deney	50.10	75	97.06	89.85	91.31	79.63
Simulink			95.70	89.99	91.39	78.71
Deney	60.10		96.84	90.02	91.59	79.85
Simulink			95.70	90.39	91.97	79.56

### 3.3 Malzeme-Sensör Yapısı Deneyleri

Bu aşamada, kompanzasyon sisteminde yer alan nüve ve alüminyum kalkanlara ek olarak hava aralığı farklı malzeme ve sensör yapılarıyla doldurulmuştur. Kullanılan malzemeler köpük, keçe, kauçuk ve taş yünüdür. LCR metre ölçümlerine göre ilgili hava aralıklarındaki öz ve karşılıklı endüktans ile manyetik kuplaj değerleri dairesel ve DD geometrileri için nüve, alüminyum kalkan ve malzeme-sensör sisteminin olduğu durumlarda sırasıyla **Tablo 11.** ve **12.**'de paylaşılmıştır. Malzeme-sensör sisteminin karşılıklı endüktans ve manyetik kuplaj katsayısı değerlerinde neden olduğu farklılıklar tablolara yansımıştır. Dairesel bobinlerde manyetik kuplaj katsayısı 0.4864 ile 0.5688 arasında değişirken DD bobinlerde değişim 0.3724 ile 0.4636 arasındadır.

**Tablo 11.** Malzeme-sensör yapısının dairesel bobin kuplaj katsayısı üzerine etkileri

Malzeme Çeşidi	Hava Aralığı (mm)	$L_1$ ( $\mu H$ )	$L_2$ ( $\mu H$ )	$L_{KD}$ ( $\mu H$ )	$L_{KY}$ ( $\mu H$ )	$L_K$ ( $\mu H$ )	Kuplaj Katsayısı ( $k$ )	Frekans (kHz)
Keçe	55.10	178.76	181.34	162.88	554.60	97.93	0.5439	44.40
Sünger		182.47	184.84	153.08	570.90	104.46	0.5688	43.50
Kauçuk		175.83	178.59	168.61	537.30	92.17	0.5201	45.15
Taş yünü	60.10	172.70	175.00	177.16	515.40	84.56	0.4864	46.10

**Tablo 12.** Malzeme-sensör yapısının DD bobin kuplaj katsayısı üzerine etkileri

Malzeme Çeşidi	Hava Aralığı (mm)	$L_1$ ( $\mu H$ )	$L_2$ ( $\mu H$ )	$L_{KD}$ ( $\mu H$ )	$L_{KY}$ ( $\mu H$ )	$L_K$ ( $\mu H$ )	Kuplaj Katsayısı ( $k$ )	Frekans (kHz)
Keçe	55.10	133.72	135.72	151.88	383.10	57.81	0.4291	53.50
Sünger		137.69	137.61	145.11	400.39	63.82	0.4636	52.20
Kauçuk		132.49	135.77	155.97	368.10	53.03	0.3954	54.60
Taş yünü	60.10	129.99	133.17	163.10	359.10	49.00	0.3724	55.30

Malzeme-sensör sistemli deneylerde her iki geometri için de 55.10 ve 60.10 hava aralıklarında sadece PWM %75 deneyleri yapılmıştır. **Tablo 13.** ve **14.**'te dairesel ve DD bobinle oluşturulan KGT sistemlerinin verim sonuçları paylaşılmıştır. Dairesel bobinde %75 iken KGT sisteminin toplam verimi %80.35 ile %82.38 arasında değişmektedir. Bu değerler DD bobinde %79.91 ile %81.02 arasında

değişmektedir. Bu aşamada hedef her bir alt sistem veriminin %90, ve KGT sistemi toplam veriminin %80 üzerinde olmasıdır. Dairesel bobinle yapılan malzeme-sensör sistemli deneylerde bu hedef gerçekleştirilmiştir. DD bobin deneylerinde ise alt sistem verim hedefleri gerçekleştirilse de KGT sistemi toplam verimi %80'in üzerine bir durum haricinde çıkmıştır. Tüm deneylere göre en verimli senaryo dairesel bobin ile nüve ve alüminyum kalkana ek olarak hava aralığının köpük ile doldurulduğu senaryodur. Sistemin toplam verimi %82.38 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara istinaden batarya şarj deneylerinde malzeme olarak köpük kullanılmıştır.

**Tablo 13.** Ferrit nüve, alüminyum kalkan ve malzeme-sensör yapısı ile dairesel bobin verim sonuçları

Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Malzeme Çeşidi	Frekans (kHz)	Verim Değerleri (%)			
				Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
55.10	75	Sünger	43.50	94.16	87.59	92.95	76.65
			84.40	96.62	91.96	92.72	82.38
		Keçe	44.40	94.49	87.59	92.69	76.71
			81.80	95.27	92.55	92.66	81.70
60.10		Kauçuk	45.15	94.58	82.78	92.39	72.33
			80.60	95.73	92.58	92.49	81.97
		Taş yünü	46.10	94.67	88.25	92.22	77.05
			78.40	96.00	92.25	92.77	82.16

**Tablo 14.** Ferrit nüve, alüminyum kalkan ve malzeme-sensör yapısı ile DD bobin verim sonuçları

Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Malzeme Çeşidi	Frekans (kHz)	Verim Değerleri (%)			
				Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
55.10	75	Sünger	52.20	94.92	89.05	92.51	78.20
			86.60	95.88	90.63	93.24	81.02
		Keçe	53.50	97.31	87.48	93.21	79.35
			84.90	94.95	91.22	92.83	80.40
60.10		Kauçuk	54.60	96.67	88.42	93.14	79.61
			83.60	95.10	91.28	92.77	80.53
		Taş yünü	55.30	95.06	91.11	92.15	79.82
			81.60	95.18	91.07	92.60	80.26

Dairesel ve DD bobin için nüveli, alüminyum kalkanlı ve malzeme-sensör sistemli deney ve benzetim çalışmaları sonuçları **Tablo 15.** ve **16.**'da paylaşılmıştır. Deney ve benzetim sonuçları arasındaki farklar ortalama kök ortalama kare hatasına (RMSE) göre değerlendirildiğinde dairesel bobin sonuçlarındaki hatalar %0.33 ile %1.31 arasında değişirken DD bobin sonuçlarında hatalar %0.26 ile %0.66 arasında değişmektedir.

**Tablo 13.** Ferrit nüve, alüminyum kalkan ve malzeme-sensör yapısı ile dairesel bobin verim sonuçları

Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Malzeme Çeşidi	Frekans (kHz)	Verim Değerleri (%)			
				Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
55.10	75	Sünger	43.50	94.16	87.59	92.95	76.65
			84.40	96.62	91.96	92.72	82.38
		Keçe	44.40	94.49	87.59	92.69	76.71
			81.80	95.27	92.55	92.66	81.70
60.10		Kauçuk	45.15	94.58	82.78	92.39	72.33
			80.60	95.73	92.58	92.49	81.97
		Taş yünü	46.10	94.67	88.25	92.22	77.05
			78.40	96.00	92.25	92.77	82.16

**Tablo 14.** Ferrit nüve, alüminyum kalkan ve malzeme-sensör yapısı ile DD bobin verim sonuçları

Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Malzeme Çeşidi	Frekans (kHz)	Verim Değerleri (%)			
				Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
55.10	75	Sünger	52.20	94.92	89.05	92.51	78.20
			86.60	95.88	90.63	93.24	81.02
		Keçe	53.50	97.31	87.48	93.21	79.35
			84.90	94.95	91.22	92.83	80.40
60.10		Kauçuk	54.60	96.67	88.42	93.14	79.61
			83.60	95.10	91.28	92.77	80.53
		Taş yünü	55.30	95.06	91.11	92.15	79.82
			81.60	95.18	91.07	92.60	80.26

Dairesel ve DD bobin için nüveli, alüminyum kalkanlı ve malzeme-sensör sistemli deney ve benzetim çalışmaları sonuçları **Tablo 15.** ve **16.**'da paylaşılmıştır. Deney ve benzetim sonuçları arasındaki farklar ortalama kök ortalama kare hatasına (RMSE) göre değerlendirildiğinde dairese bobin sonuçlarındaki hatalar %0.33 ile %1.31 arasında değişirken DD bobin sonuçlarında hatalar %0.26 ile %0.66 arasında değişmektedir.

**Tablo 15.** Ferrit nüve, alüminyum kalkan ve malzeme-sensör yapısı ile dairese bobin deney ve benzetim çalışmaları karşılaştırması

Çalışma	Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Malzeme Çeşidi	Verim Değerleri (%)			
				Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
Deney	55.10	75	Sünger	96.62	91.96	92.72	82.38
Simulink				95.79	91.00	93.57	81.57
Deney			Keçe	95.27	92.55	92.66	81.70
Simulink				95.77	90.37	92.83	80.35
Deney	60.10		Kauçuk	95.73	92.58	92.49	81.97
Simulink				95.76	91.59	92.76	81.35
Deney			Taş yünü	96.00	92.25	92.77	82.16
Simulink				95.78	91.91	92.74	81.64

**Tablo 16.** Ferrit nüve, alüminyum kalkan ve malzeme-sensör yapısı ile DD bobin deney ve benzetim çalışmaları karşılaştırması

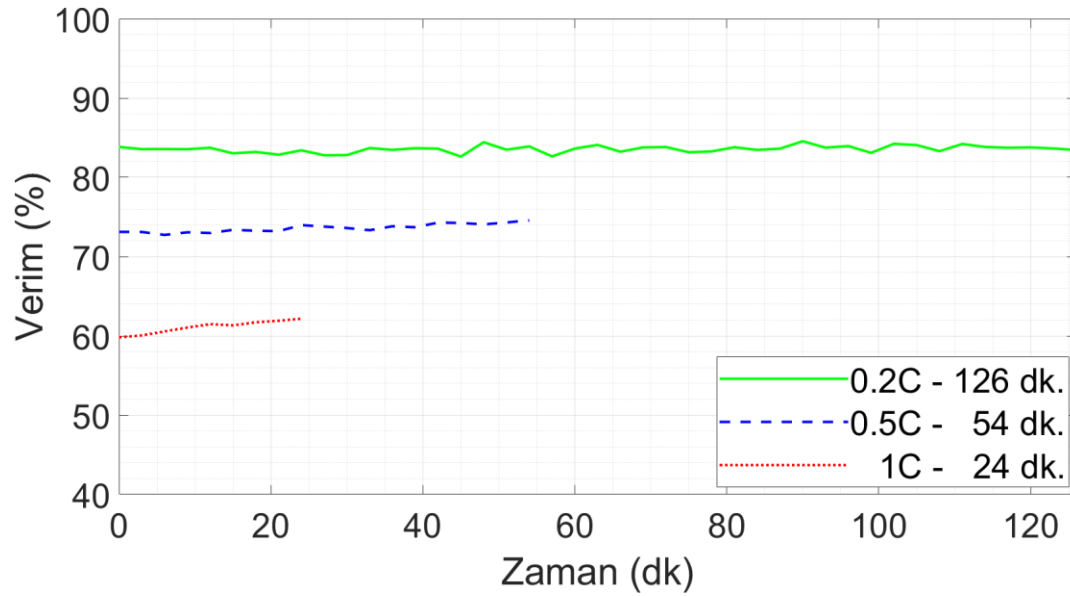
Çalışma	Hava Aralığı (mm)	PWM (%)	Malzeme Çeşidi	Verim Değerleri (%)			
				Evirici	Kompanzasyon	Doğrultucu	Toplam
Deney	55.10	75	Sünger	95.88	90.63	93.24	81.02
Simulink				95.84	91.00	92.88	81.01
Deney			Keçe	94.95	91.22	92.83	80.40
Simulink				95.72	90.41	92.34	79.91
Deney	60.10		Kauçuk	95.10	91.28	92.77	80.53
Simulink				95.72	91.48	92.26	80.79
Deney			Taş yünü	95.18	91.07	92.60	80.26
Simulink				95.72	90.88	92.39	80.37

### 3.4 Batarya Paketi Kablosuz Şarj Deneyleri

Bu aşamaya kadar yapılan deneylerde en yüksek verim nüve, alüminyum kalkan ve hava aralığının köpikle doldurulduğu senaryoda elde edilmiştir. Bu nedenle batarya şarj deneyleri bu sistem ile yapılmıştır. Malzeme-sensör yapısı **Şekil 3b)**'de görülmektedir. Deneylerde **Şekil 6.**'da görülen dokunmatik sensörler kullanılmıştır. Dört seri ve iki paralel bağlantı konfigürasyonuna sahip

batarya paketi 0.2C, 0.5C ve 1.0C oranlarında şarj edilmiştir.

Sabit akım rejiminde batarya paketinin DA-DA şarj sonuçları **Şekil 14.**'deki gibidir. Şarjın başlangıcında ve sonunda batarya paketinin voltaj seviyeleri aynıdır, ancak şarj akımları, başka bir deyişle C oranları farklıdır. 0.2C oranı testi 126 dakika sürerken, en yüksek şarj verimliliği %82.89 olarak elde edilmiştir. 0.5C oranı testi 54 dakika sürmüştür ve şarj verimi %76.25 civarındadır. 1.0C oranına sahip testte, şarj verimi %62'nin altında kalmış ve test 24 dakika sürmüştür. 0.2C oranı test verimliliği sonuçları, önceki bölümlerde gerçekleştirilen yük testleriyle benzerlik göstermektedir.



**Şekil 14.** Batarya paketinin farklı C oranlarında DA-DA verim sonuçlarının ve şarj sürelerinin karşılaştırılması

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında bir kablosuz güç transferi sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem evirici, kompanzasyon sistemi, doğrultucu-filtre ile rezistif bir yükten oluşmaktadır. Her bir alt sistem için bir verim eşiği belirlenmiştir. Bu eşik ilk deneylerde alt sistemler için %90, KGT sisteminin toplam verimi için ise %73'tür. Bu koşullar dairesel bobinle yapılan deneylerde PWM %75'e çekilerek ve dolayısıyla toplam harmonik bozulma azaltılarak birkaç hava aralığı için sağlanmıştır. İlk aşamada deneyler geniş bir hava aralığı ölçeğinde yapılarak KGT sisteminin verim davranışı gözlenmiştir. Bu aşamada evirici ve doğrultucu sistem verimlerinde bir problem görülmediği için kompanzasyon sistemine yoğunlaşmıştır. Önce ferrit nüveler sonra alüminyum kalkanlar eklenerek kompanzasyon sistemi verimi arttırılmaya çalışılmıştır. Hava aralığı daha da daraltılarak deneyler 50.10 ve 60.10 mm hava aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak dairesel bobin ile tüm senaryolarda %90 verim hedefi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise kompanzasyon sistemine çalışmaya özgünlüğü veren malzeme-sensör yapısı eklenmiştir. Malzeme olarak köpük, keçe, kauçuk ve taş yünü kullanılırken sensör olarak iki farklı dokunmatik sensör kullanılmıştır. Deneyler sonucunda maksimum verim dairesel bobinler arasına yerleştirilen köpük malzemesiyle 55 mm hava aralığında %82,38 olarak elde edilmiştir. Nihai testler ise dört seri-iki paralel bağlantıya sahip lityum-iyon bataryalarla gerçekleştirilmiştir. Bataryalar 0.2, 0.5 ve 1.0C oranlarında şarj edilmiştir. Bu C değerleri için kablosuz şarj ortalama verimleri sırasıyla %82.89, %76.25 ve %61.93 olarak kaydedilmiştir. Yapılan tüm çalışmalar için MATLAB/Simulink ve Ansys/Maxwell 3D Design programlarında benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçlar ortalama kök ortalama kare hatasına göre minimum %0.26 ve maksimum %3.91 oranında doğrulanmıştır.

Elektrikli araçların kablosuz şarjı son yılların popüler konularından biridir ve geleceğin şarj

teknolojisi olarak değerlendirilmektedir. Ancak bu teknolojinin maliyeti hayli fazladır. Kablosuz güç transferi konusunda üniversitelerin araştırma gruplarında ve şirketlerde yüksek bütçeli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada ise geleneksel tasarımların dışına çıkılarak özgün bir kompanzasyon sistemi tasarımına gidilmiştir. Yapılan bir dizi deneyde kompanzasyon sistemi verimi en yüksek %94.54 olarak ölçülürken, sistemin toplam verimi en yüksek %82.89 olarak ölçülmüştür. Kompanzasyon sistemi verimini yükseltmek için en yüksek güçten feragat edilerek deneyler PWM%75 iken, yani harmonik bozulma en az iken gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kuplaj katsayısını arttırmak ve manyetik akı çizgilerini yönlendirmek için 300x300x8 mm boyutlarında ferrit nüveler kullanılmıştır verim en iyileştirilmiştir. Sistemin toplam verimi evirici, kompanzasyon sistemi ve doğrultucu verimlerine bağlıdır. Bu çalışmada kompanzasyon sistemi tasarımına yoğunlaşıldığı için evirici modülü ve doğrultucu üzerinde en iyileştirmeye gidilmemiştir. Bu sistemlerin verimini iyileştirmek için ideale yakın çalışan bileşenler kullanmak gerekmektedir ki bu durum maliyeti beraberinde getirecektir.

Bu çalışmada, elektrikli araç kablosuz şarj kablosuz şarj uygulamalarında verici ve alıcı bobinler arasında sıklıkla yer alan hava ortamı yerine dielektrik malzemelerden oluşan transfer ortamları incelenmiştir. Bu ortamlar elektriksel ve termal olarak yalıtım amaçlı kullanılmış ve mekanik açıdan tampon vazifesi görmüştür. Ayrıca, yapılan deneyler sonucunda, hava ortamına kıyasla kablosuz güç transferi verimini olumsuz etkilemediği saptanmıştır. Bu haliyle sistemin pratikte uygulanmasının önünde bir engel bulunmamaktadır. Buna karşın, çalışmada verici ve alıcı bobin olarak dairesel ve DD geometriler kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda farklı bobin geometrileri eklenmesi planlanmaktadır. Ek olarak, Ansys simülasyonlarında sadece bobin karakteristikleri ve kuplaj katsayısı incelenmiştir. KGT'nin insan sağlığı üzerine etkilerinin benzetim çalışmaları ile, pratikte karşılaşılabilecek kısıtlar için fikir verecektir. İlerleyen çalışmalarda incelenecek bir diğer durum ise hava ve malzemelerin hibrid bir şekilde oluşturdukları transfer ortamının KGT verimi üzerine olan etkileridir.



**Hakem:** Dış, Bağımsız.

**Teşekkür:**

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123E104 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

**Beyanname:**

**1. Özgünlük Beyanı:**

Bu çalışma, Prof. Dr. Erdal Çetkin danışmanlığında 12.12.2024 tarihinde tamamlanılan "Investigation of a wireless battery charging system for electric vehicles" başlıklı doktora tezi esas alınarak hazırlanmıştır. Çalışmanın tüm aşamalarında bilimsel etik ve akademik kurallara uygun davranıldığını yazarlar beyan eder.

**2. Yazar Katkıları:**

**Fikir:** MY,EÇ; **Kavramsallaştırma:** MY,EÇ; **Literatür Taraması:** MY; **Veri Toplama:** MY; **Veri İşleme:** MY; **Analiz:** MY; **Yazma – orijinal taslak:** MY; **Yazma – inceleme ve düzenleme:** EÇ.

**3. Etik Kurul İzni:**

Etik Kurul İzni gerekmemektedir.

**4. Finansman/Destek:**

Bu çalışma TÜBİTAK-ARDEB 1002 – A Hızlı Destek Modülü tarafından desteklenmiştir.

**5. Çıkar Çatışması:**

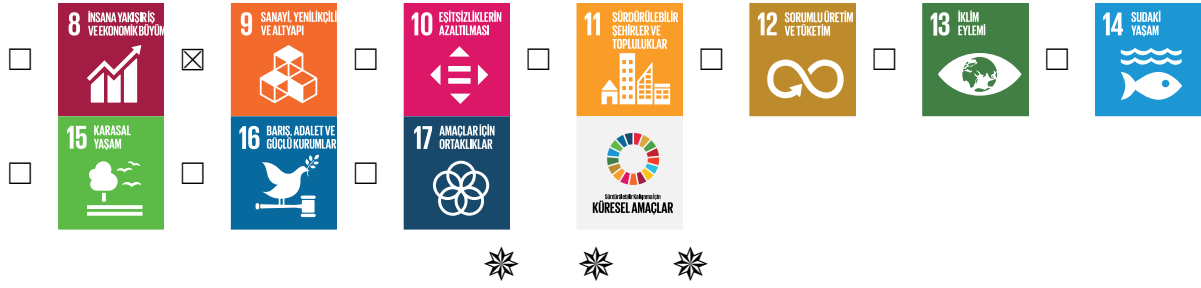
Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

**6. Üretken Yapay Zeka Beyanı:**

Çalışmanın hiçbir safhasında yapay zeka araçlarından faydalanılmamıştır.

**7. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları:**





## KAYNAKÇA

- [1] Dörtköşe, S., Yazgan, H. R., Cömert, S. E. 2022. Elektrikli Araç Şarj İstasyon Yerlerinin Akış Yakıt İkmal Yer Modeli Kullanılarak Belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 38(2), 371-382.
- [2] Karapınar, F., Daldaban, F. 2022. Elektrikli Araçların Şarj Yöntemleri ve Şarj İstasyon Tipleri. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 38(3), 549-556.
- [3] Zheng, Y., Dong, Z. Y., Xu, Y., Meng, K., Zhao, J. H., Qui, J. 2014. Electric Vehicle Batter Charging/Swap Stations in Distribution Systems: Comparison Study and Optimal Planning. IEEE Transactions on Power Systems, 29, 221-229.
- [4] Trivino-Cabrera, A., Gonzalez, J. M., Aguado, J. A. 2020. Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach. 1st, edition. Springer Cham, 175s.
- [5] Samanchuen, T., Jirasereeamornkul, K. Ekkaravarodome, C., Singhavilai, T. 2019. A Review of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Technologies and Standards. 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference, December 11-13, Bangkok, Thailand, 1-5.
- [6] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., Soljacic, M. 2007. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. Science, 317(5834), 83-86.
- [7] SAE. 2019. Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology. [https://www.sae.org/standards/content/j2954\\_201605/](https://www.sae.org/standards/content/j2954_201605/) (Erişim Tarihi: 25.11.2025).
- [8] WiTricity. 2019. Drive 11 evaluation system: Wireless charging for EV & PHEV platforms. Teknik sunum. [https://7144078.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7144078/media/DRIVE\\_11\\_20170221-1.pdf](https://7144078.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7144078/media/DRIVE_11_20170221-1.pdf) (Erişim Tarihi: 25.11.2025).
- [9] Zhang, Y., Mei, Y., Zhu, C., Wang, Y., Zheng, S., Lu F. 2024. Challenges in the Z-Class Compatible Inductive Power Transfer System Considering the Wide Varying Range of the Coupling Coefficient, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 20-24, Phoenix, Arizona, USA, 1155-1158.
- [10] Kim, D., Kim, H., Huang, A., He, Q., Zhang, H., Ahn, S., Zhu, Y., Fan, J. 2019. Analysis and Introduction of Effective Permeability with Additional Air-Gaps on Wireless Power Transfer Coils for Electric Vehicle Based on SAE J2954 Recommended Practice. Energies, 12(24), 4797.
- [11] Chinthavali ,M., Onar, O. C. 2016. Tutorial on wireless power transfer systems, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), June 27-29, Dearborn, MI, USA, 1-142.
- [12] Moon, S., Moon, G. W. 2016. Wireless Power Transfer System With an Asymmetric Four-Coil Resonator for Electric Vehicle Battery Chargers. IEEE Transactions on Power Electronics, 31, 6844-6854.

- [13] Cheah, W., Watson, S. A., Lennox, B. 2019. Limitations of wireless power transfer technologies for mobile robots. *Wireless Power Transfer*, 6(2), 175-189.
- [14] Sun, T., Xie, X., Wang, Z. 2013. *Wireless Power Transfer for Medical Microsystems*. 1st, edition, Springer New York, 183s.
- [15] Yang, C-L., Chang, C-K., Lee, S-Y., Chang, S-J., Chiou, L-Y. 2017. Efficient four-coil wireless power transfer for deep brain stimulation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(7), 2496–2507.
- [16] Wang, D., Zhang, J., Cui, S., Bie, Z., Chen, F., Zhu, C. 2024. The state-of-the-arts of underwater wireless power transfer: A comprehensive review and new perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113910.
- [17] Lawton, D., Patrick, A. J., Lin, F. J., Covic G. A., Thrimawithana, D. J. 2023. A wireless synchronization controller for high-power stationary and semidynamic wireless charging of electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(11), 13341–13352.
- [18] Jang Y. J., Yeo, J. 2015. Stochastic Systems Modeling for Wireless Charging Electric Vehicle, [https://smmso.org/SMMSO2017/downloads/S2.1/Wireless%20Charging%20EV%20\(KAIST-JANG\).pdf](https://smmso.org/SMMSO2017/downloads/S2.1/Wireless%20Charging%20EV%20(KAIST-JANG).pdf) (Erişim Tarihi: 25.11.2025)
- [19] Li, S., Mi, C. C. 2015. Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3, 4-17.
- [20] Society News, 2014. Wireless Charging Research Activities Around the World. *IEEE Power Electronics Magazine*, 1, 30-38.
- [21] Pries, J., Galigekere, V. P. N., Onar, O. C., Su, G. J. 2020. A 50-kW Three-Phase Wireless Power Transfer System Using Bipolar Windings and Series Resonant Networks for Rotating Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35, 4500-4517.
- [22] Galigekere, V., Ozpineci, B. 2021. High power and dynamic wireless charging of electric vehicles (evs). [https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/elt197\\_galigekere\\_2021\\_o\\_5-18\\_505pm\\_LR\\_TM.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/elt197_galigekere_2021_o_5-18_505pm_LR_TM.pdf) (Erişim Tarihi: 25.11.2025).
- [23] Onar, O. C., Su, G-J., Mohammad, M., Galigekere, V. P., Seiber, L., White, C., Wilkins, J., Wiles, R. 2022. A 100-kw wireless power transfer system development using polyphase electromagnetic couplers. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, June 15-17, Anaheim, California, USA, 273–278.
- [24] Erdem, A., Onar, O. C. 2024. Crada final report: High-power oak ridge converter (orc) for extreme fast charging applications. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub209690.pdf> (Erişim Tarihi: 25.11.2025).
- [25] Deng, Q., Sun, P., Hu, W., Czarkowski, D., Kazimierczuk, M. K., Zhou, H. 2019. Modular parallel multi-inverter system for high-power inductive power transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(10), 9422–9434.
- [26] Wenbin, P., Liu, C., Tang, H., Zhuang, Y., Zhang, Y. 2024. An interoperable electric vehicle wireless charging system based on mutually spliced double-d coil. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(3), 3864–3872.
- [27] Jia, L., Liu, Z., Su, H. 2022. Passivity-based pi control for receiver side of dynamic wireless charging system in electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(1), 783–794.
- [28] Bouanou, T., Fadil, H. E., Lassioui, A., Bentalhik, I., Koundi, M., Jeilani, S. E. 2023. Design methodology and circuit analysis of wireless power transfer systems applied to electric vehicles

- wireless chargers. World Electric Vehicle Journal, 14(5).
- [29] INTIS. 2023. Intis inductive energy transfer systems at a glance.
- [30] Rother, F. W. 2024. Intis sieht induktives laden kurz vor der marktreife. <https://edison.media/verkehr/intis-sieht-induktives-laden-kurz-vor-der-marktreife/25251519> (Erişim Tarihi: 25.11.2025).
- [31] Laporte, S., Coquery, G., Deniau, V., Bernardinis, A. D., Hautière, N. 2019. Dynamic wireless power transfer charging infrastructure for future evs: From experimental track to real circulated roads demonstrations. World Electric Vehicle Journal 10(4).
- [32] Wakileh, G. J. 2001. Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design. 1st, edition, Springer Berlin, Heidelberg, 517s.
- [33] Yılmaz, M., Çetkin, E., Akça, H. 2025. Investigation of the effects of various parameters on wireless power transfer efficiency. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 193, 155723.
- [34] Kasap, S. O. 2018. Principles of Electronic Materials and Devices. 4th, edition, McGraw Hill, 992s.
- [35] Nakutis, Z., Lukocius, R., Girdenis, V., Kroics, K. 2023. A Measurement Method of Power Transferred to an Electric Vehicle Using Wireless Charging. Sensors, 23, 9636.
- [36] Circuits. 2025. Flat spiral coil inductor calculator. [https://www.circuits.dk/calculator\\_flat\\_spiral\\_coil\\_inductor.htm](https://www.circuits.dk/calculator_flat_spiral_coil_inductor.htm) (Erişim Tarihi: 25.11.2025).

