



# Kablosuz güç transferi sistemi için Q faktörü etkisinin analizi

## Analysis of Q factor effect for wireless power transfer system

Emrah Aslan<sup>1,\*</sup> , Yıldırım Özüpak<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Dicle Üniversitesi, Silvan Meslek Yüksekokulu, 21000, Diyarbakır, Türkiye

### Öz

Elektrikli Araçların (EA) kablosuz olarak şarj edilmesi için en uygun yöntem, enerjiyi yakın alanda aktaran manyetik rezonans kuplajıdır. Bu çalışmada, kalite faktörünün bir EA'nın kablosuz şarj sistemi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 85 kHz frekans, 20 kW güç ve 150 mm bobinler arası mesafe belirlendikten sonra kalite faktörüne göre Kablosuz Güç Aktarımı (KGA) sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kalite faktörünün verime, kritik hava aralığına ve kapasitörlerdeki gerilime etki ettiği görülmüştür. Kalite faktörü arttıkça kritik hava boşluğu da artar ve daha uzun mesafelere iletim verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ancak bu faktörün artmasına bağlı olarak kapasitörler üzerindeki gerilim stresi de artar. Çalışmada kalite faktörüne göre kritik hava boşluğu belirlenmiştir. Yüksek kalite faktörü, yüksek hava boşluklarında verimliliği arttırsa da hava boşluklarının yakın olduğu uygulamalarda verimliliği düşürmektedir. Aslında endüktansı artırarak kalite faktörünü arttırmak iç direncin artması anlamına gelir ve bu durumun maksimum verimliliği azalttığı görülmüştür. Bu çalışmada Q faktörünün iletim gücü ve iletim verimliliği üzerindeki etkileri deneysel ve benzetim aracılığıyla araştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** KGA, Q faktörü, Verimlilik, EA

### 1 Giriş

Elektrikli araç şarj sistemlerinin gelişimi ve çeşitliliği gerçekten önemli bir konu. Kablosuz Güç Aktarımı (KGA) sistemleri, elektrikli araçların şarj edilmesi için kablosuz iletimi kullanarak birçok avantaj sunar. KGA'nın kablo karmaşasını ortadan kaldırması, şarj işlemi daha kullanıcı dostu hale getirir. Ayrıca, bu sistemler elektrikli araçlar dışında farklı alanlarda da kullanılıyor, özellikle biyomedikal cihazlar, cep telefonları ve insansız hava araçları gibi mobil cihazların kablosuz şarjı için de büyük bir potansiyele sahiptir. Yüksek enerji verimliliği ve düşük karbon ayak izi, elektrikli araçların sürdürülebilirliğini arttırmak için önemli hedeflerdir. Bu bağlamda, kablosuz şarj sistemleri, kullanıcıların elektrikli araçlarını daha kolay ve verimli bir şekilde şarj etmelerine yardımcı olabilir. Elektrik motorları, elektromanyetik alanlar ve kablosuz güç transferi gibi konular arasındaki etkileşimi incelemek, bu alanda önemli bir katkı sağlayabilir [1-3]. Elektrikli aracın aküsü kablolu ve kablosuz olmak üzere iki şekilde şarj edilebilmektedir. KGA sistemleri, şarj sistemini kablolu

### Abstract

The most suitable method for wireless charging of Electric Vehicles (EVs) is magnetic resonance coupling, which transfers energy in the near field. In this study, the effect of quality factor on the wireless charging system of an EV is investigated. After determining 85 kHz frequency, 20 kW power and 150 mm inter-coil distance, the Wireless Power Transfer (WPT) system design was realized according to the quality factor. It was observed that the quality factor affects the efficiency, critical air gap and voltage on capacitors. As the quality factor increases, the critical air gap increases and longer distances can be transmitted efficiently. However, as this factor increases, the voltage stress on the capacitors also increases. In the study, the critical air gap was determined according to the quality factor. Although high quality factor increases efficiency at high air gaps, it decreases efficiency in applications where air gaps are close. In fact, increasing the quality factor by increasing the inductance means increasing the internal resistance and this has been found to reduce the maximum efficiency. In this study, the effects of Q factor on transmission power and transmission efficiency are investigated experimentally and through simulation.

**Keywords:** WPT, Q factor, Efficiency, EV

şarjın neden olduğu kablo karmaşasından kurtarır. Ayrıca kablolu şarja göre daha güvenilir ve pratik bir çözüm sunuyor. KGA sistemleri elektrikli araçların dışında biyomedikal cihazlar, cep telefonları ve insansız hava araçları gibi birçok farklı alanda da kullanılmaktadır [4,5].

KGA ile enerji aktarımı, mikrodalga, kapasitif bağlantı ve endüktif bağlantı gibi birçok yolla sağlanabilir. Yöntemler uygulama alanlarına göre değişmektedir. Elektrikli araçlar için kablosuz şarjın amacı, yakın alanda yüksek gücün verimli bir şekilde aktarılmasıdır. Bu uygulamalar için en uygun yöntem manyetik rezonans kuplajıdır [6].

Manyetik rezonans kuplajı kullanan KGA teknolojisi, fiziksel elektrik bağlantıları olmadan iki bobin arasındaki manyetik bağlantı yoluyla güç aktarımına olanak tanır. Klasik indüksiyon yönteminden farklı olarak verici ve alıcı bobinlere kapasitörler bağlanır. Bu kapasitörler alıcı ve verici sisteminde kompanzasyon sağlar ve böylece enerji verimli bir şekilde aktarılır [7]. Tam telafiyi sağlamak için KGA sisteminin rezonans frekansında çalışması gerekir.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emrah.aslan@dicle.edu.tr (E. Aslan)

Geliş / Received: 06.01.2024 Kabul / Accepted: 17.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1415695

Verimin her koşulda yüksek olması için rezonans frekansının takip edilmesi önemlidir. Ayrıca uygulamalarda rezonans frekansının sabit kalması isteniyorsa kapasitörlerin değeri değiştirilerek rezonans sağlanabilir [8]. Kondansatörlerin bobinlere bağlanma şekline göre çeşitli topolojiler bulunmaktadır. Seri-Seri (SS) topolojisi en verimli ve basit KGA topolojisi olup geniş bir yük aralığında çalışabilmektedir [9].

Manyetik rezonans kuplajı sisteminde enerjinin verimli iletimi, çalışma frekansına, bobin boyutuna, bobinler arasındaki mesafeye ve bobinlerin hizalanmasına bağlıdır [10]. Bobinler arasındaki mesafenin artırılması veya yanlış hizalama, bağlantı faktörünü azaltır ve verimin düşmesine neden olabilir. Alıcı ve vericinin birbirlerine göre konumunun tahmin edilmesi ve hizalamanın sağlanması önemlidir [11]. Frekansın veya bobin boyutunun artırılması, KGA'nın daha yüksek hava boşluklarında ve yanlış hizalamada bile verimli olmasını sağlar [12,13]. Ancak frekansın artırılması cilt ve yakınlık etkisinden dolayı kayıpları da arttırabilmektedir. Bu nedenle Litz teli yüksek frekans uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir [14]. KGA'da koaksiyel kablo yapılarının kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Yüksek kaliteli faktör koaksiyel rezonatör yapısı ile KGA'da yüksek verim elde edilmiştir [15]. KGA uygulamalarında maksimum enerji transferini gerçekleştirmek için birleştirme katsayısı, kalite faktörü ve frekans en önemli parametrelerdir.

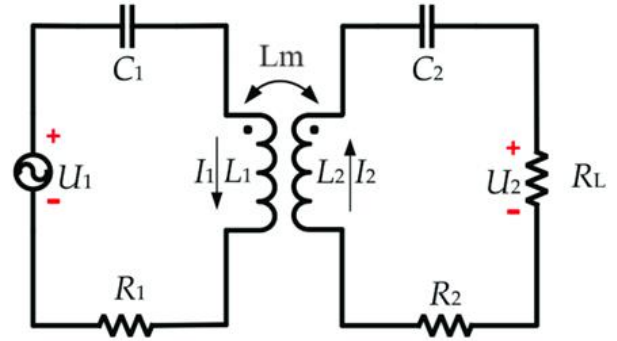
WPT (Kablosuz Güç Aktarımı) sisteminde Q faktörü, rezonans bobinlerinin etkinliğini belirlemek için kullanılan önemli bir parametredir. Önemli parametreleri avantajları arasında yüksek verimlilik, daha uzun menzil, daha az elektromanyetik parazit ve rezonansın daha keskin olmasını sağlar, bu da diğer elektromanyetik parazitlerin sistemi etkileme olasılığını azaltır. Yüksek Q faktörüne sahip bobinler, rezonans frekansına daha hassas hale gelir. Bu, dış etkenlerden (örneğin, ortam sıcaklığı veya bobinler arasındaki mesafe) daha fazla etkilenmelerine neden olabilir ve istenmeyen performans değişikliklerine yol açabilir. MaliyetYüksek Q faktörüne sahip bobinlerin üretimi genellikle daha maliyetlidir. Daha hassas malzemelerin kullanılması veya daha karmaşık üretim süreçlerinin gerekliliği, maliyeti artırabilir. Boyut ve Ağırlık, Yüksek Q faktörüne sahip bobinler genellikle daha büyük boyutlarda olabilir veya daha fazla malzeme gerektirebilir. Bu durum, özellikle taşınabilir uygulamalarda önemli olabilir, çünkü daha büyük boyutlar veya ağırlık, cihazın taşınabilirliğini veya montaj esnekliğini azaltabilir. Genel olarak, yüksek Q faktörü, kablosuz güç aktarım sistemlerinin verimliliğini artırırken, bazı hassasiyet ve maliyet dezavantajlarına yol açabilir. Bu nedenle, tasarım sürecinde dikkatlice dengelemek önemlidir.

Bu çalışmada, kalite faktörünün bir EA'nın kablosuz şarj sistemi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. KGA için optimal parametreler belirlendikten sonra kalite faktörünün verimliliği, kritik hava aralığını ve kapasitörler üzerindeki gerilim stresini etkilediği gösterilmiştir. Kalite faktörünün artırılması, kritik hava boşluğunu iyileştirerek daha uzun mesafelerde daha verimli iletim sağlar. Ancak aynı zamanda kapasitörlerdeki gerilim stresini de artırır. Bu nedenle kalite

faktörünün seçimi, özel uygulama gerekliliklerine bağlı olarak dikkatle değerlendirilmelidir. Bu çalışmada Ansys Maxwell-3D kullanılarak devre modeli, bobin tasarımı ve manyetik analiz yapılmıştır. Bu çalışmanın katkıları, batarya tabanlı bir elektrikli aracın 20 kW kapasite ile şarj edilmesini sağlayan bir alıcı-verici tasarımı, geliştirilen KGA sisteminin batarya şarj koşuluna uygun optimal kompanzasyon topolojisinin seçimi, kompanzasyon topolojisinin optimal tasarım yönteminin oluşturulması ve deneysel olarak doğrulanmasıdır.

## 2 Materyal ve metot

Manyetik indüksiyonlu KGA sistemlerinde enerji, bobinler kullanılarak manyetik bağlantıyla aktarılır. Alıcı ve verici bobin arasındaki karşılıklı endüktans verimliliği doğrudan etkiler. Güçlü bir bağlantı olduğunda verimlilik yüksek olma eğilimindedir. Öte yandan, daha düşük bağlantı genellikle daha düşük verimlilikle sonuçlanır. Bu yapının daha düşük kuplaj faktöründe çalışması için manyetik rezonans kuplajlı KGA sistemleri kullanılmaktadır. Rezonans, bobinlere seri veya paralel bağlanan kapasitörler tarafından sağlanır. SS topolojisi, KGA uygulamalarında sıklıkla kullanılan, basit ve etkili bir yapılandırma. SS topolojisini kullanan KGA devresi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. SS topolojisini kullanan KGA sisteminin eşdeğer devresi

burada  $R_1$  ve  $R_2$  sırasıyla verici ve alıcı sistemlerin iç direncidir.  $V_1$  giriş gerilimi,  $I_1$  giriş akımı ve  $I_2$  çıkış akımıdır.  $L_1$  ve  $L_2$  sırasıyla verici ve alıcı bobinlerin endüktanslarıdır.  $L_m$  karşılıklı endüktanstır ve  $R_L$  yük empedansdır.  $C_1$  ve  $C_2$  sırasıyla verici ve alıcının kapasitanslarıdır. Rezonatörün doğal açıl frekansı Denklem (1)'de gösterilmiş, kalite faktörü ise Denklem (2)'de verilmiştir.

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

$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{R} = \frac{L\omega_0}{R} \quad (2)$$

$L$ ,  $R$ ,  $Q$  ve  $C$  sırasıyla rezonatörün endüktansı, iç direnci, kalite faktörü ve kapasitansdır.  $\omega_0$  doğal açıl frekanstır. Verici ve alıcı bobini arasındaki karşılıklı endüktans,

bağlantı faktörüne ve verici ile alıcının öz endüktansına bağlıdır. Karşılıklı endüktans **Denklem (3)**'te verilmiştir.

$$L_m = k\sqrt{L_1L_2} \quad (3)$$

Bu denklemde k birleştirme katsayısıdır. SS topolojisi için eşdeğer empedans ve verimlilik sırasıyla **Denklem (4)** ve **(5)**'te verilmiştir [16].

$$Z_{Eq} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{L_m^2 \omega^2}{j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + Z_0 + R_2} \quad (4)$$

$$\eta = \left( \frac{j\omega L_m}{j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L + R_2} \right)^2 \times \frac{R_L}{Z_{Eq}} \quad (5)$$

KGA sisteminde karşılıklı endüktans kritik ortak endüktansa kadar azalsa bile verim değişmez. Kritik karşılıklı endüktansın altına düştükten sonra verim hızla düşmeye başlar. Kritik karşılıklı endüktans, doğal açılal frekansa, yük empedansına ve iç dirence bağlıdır. Kritik karşılıklı endüktans **Denklem (6)** ile hesaplanır. **Denklem (7)**'de olduğu gibi  $L_m$  kritik ortak endüktansın altındaysa KGA sisteminin verimliliği düşer. **Denklem (8)**'de olduğu gibi,  $L_m$  kritik karşılıklı endüktansın üzerindeyse KGA'da yüksek verim elde edilir, ancak rezonans frekansı çatallanır.

$$L_{mCritical}^2 = \frac{R_L^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (6)$$

$$L_m < \frac{R_L^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (7)$$

$$L_m > \frac{R_L^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (8)$$

Bobinin iç direnci telin uzunluğuna, kalınlığına ve iletken malzemenin iletkenliğine bağlıdır ve **Denklem (9)** ile hesaplanır.

$$R = \rho \frac{1}{s} \quad (9)$$

burada s iletkenin yüzey alanıdır,  $\rho$  iletkenlik katsayısıdır ve l iletkenin uzunluğudur. Kablosuz güç iletim sistemlerinde önemli kavramlardan biri de liyakat rakamıdır ve **Denklem (10)** ile hesaplanır [16].

$$U = \frac{\omega L_m}{\sqrt{R_1 R_2}} = k\sqrt{Q_1 Q_2} \quad (10)$$

U liyakat (merit) figürüdür.  $Q_1$  ve  $Q_2$  sırasıyla vericinin ve alıcının kalite faktörleridir. Liyakat Rakamı artırılarak verimlilik artırılabilir. Liyakat rakamını arttırmak için kalite faktörünün veya bağlantı faktörünün artırılması gerekir. Liyakat rakamına bağlı olarak optimum verimlilik **Denklem (11)** ile hesaplanır.

$$\eta_{opt} = \frac{U^2}{1 + \sqrt{1 + U^2}} \quad (11)$$

$\eta$  optimum verimliliğdir. **Denklemlerden (2), (10)** ve **(11)** bobinlerin öz ve karşılıklı endüktansının verim üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

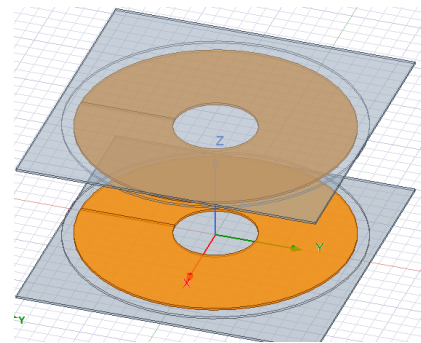
### 2.1 KGA tasarımı

KGA tasarımı, elektrikli araçlar için kablosuz şarj standardı olan SEA J2954 referans alınarak yapılmıştır [17]. Standartta göre frekansın 79 kHz ile 90 kHz arasında olması gerekmektedir ve 85 kHz ortak frekans bandı belirlenmiştir. Kalite faktörünün etkilerini incelemek amacıyla farklı mesafeler için kalite faktöründe KGA sistemi tasarlanmıştır. Bobinin iç dirençleri ve rezonans kapasitörleri hesaplanmıştır. Bu çalışmadaki 20 kW alıcı-verici, IEC tarafından oluşturulan uluslararası standart "IECTS61980-3" analiz edilerek Ansys Maxwell benzetimi ile tasarlanmıştır [18-20]. **Tablo 1**'de KGA3 aşama referansı referans alınarak tahmin edilen ve tasarlanan 20 kW sınıfı alıcı-vericinin tasarım özellikleri sunulmaktadır. **Şekil 3**'te KGA3 seviye referans modeline göre tasarlanan 20 kW sınıfı alıcı-verici modeli sunulmuştur.

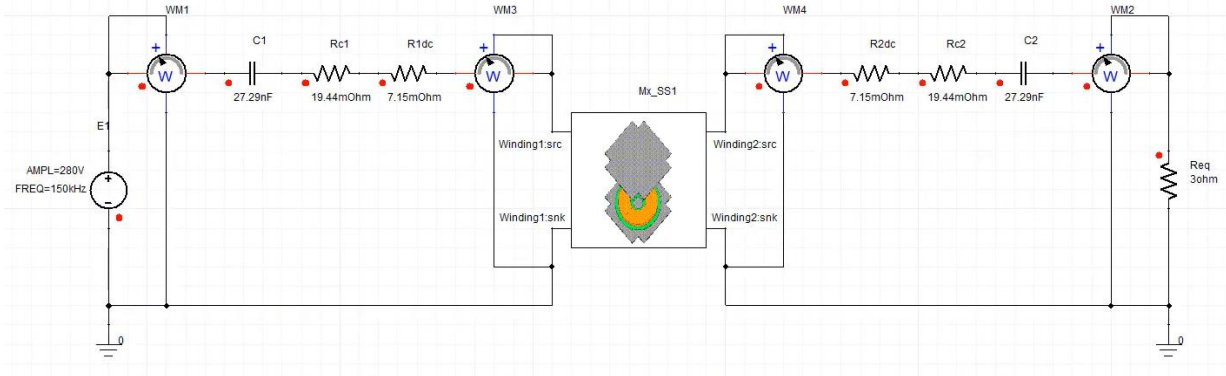
**Tablo 1.** Tasarlanan alıcı-verici parametresi

	Referans Model		20 kW Model	
Nüve	Tx-Verici	Rx-Alıcı	TX-Verici	Rx-Alıcı
	650x510x5 (mm)	284x284x5 (mm)	590x590x5 (mm)	395x395x5 (mm)
Sargı	2 paralel	10 Sarım	2 Paralel	10 Sarım
	8 Sarım		8 Sarım	10 Sarım
			Litz iletkeni	

Ayrıca, alıcı-vericinin sarım sayısı KGA3 aşaması referans tasarım sonucundaki ile aynıdır. Isı direnci ve yalıtım için Kapton litz tel ile tasarlanmıştır. Tasarlanan KGA transformator modeli **Şekil 2**'de verilmiştir.



**Şekil 2.** KGA modeli



Şekil 3. Benzetim devresi

### 3 Bulgular ve tartışma

Tablo 2’de, Tablo 1’e göre üretilen donanımdan elde edilen alıcı-verici parametreleri ve Maxwell modelleme sonuçları listelenmektedir.  $L_p$  ve  $L_s$  verici ve alıcı tarafın öz endüktansları, k kuplaj katsayısı ve  $M$  karşılıklı endüktans değerini ifade etmektedir.

Tablo 2. Alıcı-verici parametre karşılaştırması

Alüminyum Plaka varken	Merkezi hizalama		Yanlış hizalama	
	Ölçüm	Benzetim	Ölçüm	Benzetim
$T_x$ -Öz endüktans- $L_p$	79.82 $\mu H$	78.94 $\mu H$	82.85 $\mu H$	84.22 $\mu H$
$R_x$ -Öz endüktans- $L_s$	78.17 $\mu H$	77.96 $\mu H$	77.31 $\mu H$	78.02 $\mu H$
Karşılıklı endüktans $L_m$	23.01 $\mu H$	24.02 $\mu H$	17.62 $\mu H$	18.94 $\mu H$

Verici ve alıcı tarafın öz endüktansı hizalama koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişmez. Fakat bağlantı katsayısı ve karşılıklı endüktans büyük ölçüde değişir. Kuplaj katsayısı 0.1987-0.3096 aralığına sahiptir. Maxwell modelleme sonuçları ve donanımdan çıkarılan parametreler çok az bir hataya sahiptir. Öz endüktans, hizalama (0, 0) koşulu altında ölçülen değere sabitlenir ve IPT sistem analizi, her hizalama için yalnızca kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktans değişimi dikkate alınarak gerçekleştirilir. Büyük kaçak akı ve elektromanyetik parazite sorununu çözmek için, alıcı-vericiye alüminyum gibi yüksek iletkenliğe ve düşük manyetik geçirgenliğe sahip paramanyetik bir malzeme monte edilmelidir [17]. Bu girişimin nedeni, bir alüminyum plaka manyetik bir akıya maruz kalırsa, alüminyum plakada bir girdap akımı oluşmasıdır. Bu girdap akımı, kaçak manyetik akıyı elimine edecek yönde bir manyetik akı oluşturur. Ancak, toplam manyetik akı azaldığı için  $L_p$ ,  $L_s$ , k ve  $L_m$  değerleri azalır. Tablo 3’te, alüminyum plaka ile donatılmış sistemden elde edilen her hizalama için alıcı-verici parametreleri sunulmuştur. Alüminyum plaka boyutu, KGA1/KGA2/KGA3 referans tasarımının ortak boyutuna göre tasarlanmıştır. Tablo 3,  $L_p$ ,  $L_s$ , k ve  $L_m$  değerlerinin Tablo 2’deki ilgili değerlere kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Alıcı-verici parametresi

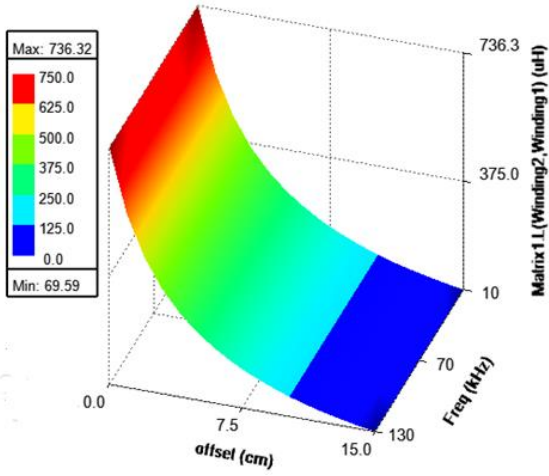
Alüminyum plaka yokken	Merkezi hizalama	Yanlış hizalama
	Ölçüm	Ölçüm
$T_x$ -Öz endüktans- $L_p$	60.93 $\mu H$	62.74 $\mu H$
$R_x$ -Öz endüktans- $L_s$	65.04 $\mu H$	64.43 $\mu H$
Karşılıklı endüktans $L_m$	11.71 $\mu H$	8.95 $\mu H$

#### 3.1 Q faktörü analizi

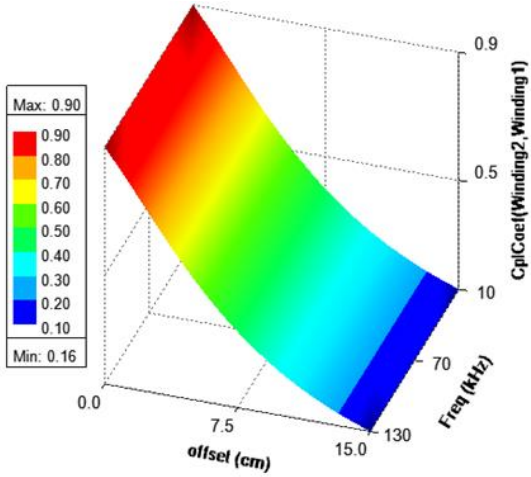
Kablosuz Güç Transferi (KGA) sistemlerinde Q faktörü analizi oldukça önemlidir. Q faktörü, bir rezonans devresinin enerji depolama ve dağıtma yeteneğini ölçen önemli bir parametredir. KGA sistemlerinde bu faktör, verimliliği ve enerji transferinin etkinliğini değerlendirmek için kullanılır. Bu faktörün yüksek olması enerji depolama kapasitesinin yüksek olduğunu ve enerjinin daha uzun mesafelere iletilmesine olanak tanıdığını gösterir. Q faktörünü hesaplanırken, rezonans frekansı ile bant genişliği arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurulmalıdır. İdeal olarak, yüksek bir Q faktörü elde etmek için bant genişliği dar ve rezonans frekansı yüksek olmalıdır. Yüksek bir Q faktörü, enerji transferinin daha verimli olduğu anlamına gelir. Ancak, bu, diğer faktörlerle birlikte düşünülmelidir, çünkü yüksek Q faktörüne sahip bir sistem, frekansta değişikliklerle daha hassas olabilir. Bu nedenle, Kablosuz Güç Transferi sistemlerinde Q faktörü analizi, sistem performansını ve tasarımını optimize etmek için önemli bir adımdır. Bu durum, kablosuz güç transferi sistemlerinin tasarım ve performans optimizasyonu için önemlidir. Bu faktör, bir sistemdeki enerji kaybının ne kadar az olduğunu gösterir. KGA’nın verimliliği, kalite faktörünün artırılmasıyla düşük bağlantı faktörlerinde elde edilir. Rezonatörün kalite faktörü, frekansı sabit tutarken endüktansı artırarak geliştirilebilir. Ancak bu artışın aynı zamanda daha yüksek iç dirence ve dolayısıyla daha düşük maksimum verimliliğe de yol açtığı unutulmamalıdır. Ayrıca kalite faktörünün artırılması kapasitör üzerindeki gerilim stresini artırır. Alıcı ve verici bobinleri arasındaki karşılıklı endüktansın hava boşluğu ve frekansa göre değişimi Şekil 4’te verilmiştir. Bağlaşım faktörü, frekans ve hava aralığı grafiği Şekil 5’te verilmiştir.

Hesaplamalar, kritik karşılıklı endüktansın altındaki düşük karşılıklı endüktansta kalite faktörünün artmasıyla

verimliliğin arttığını ortaya çıkardı. KGA düşük hava aralığında gerçekleştiriliyorsa düşük kalite faktörü tercih edilmelidir.



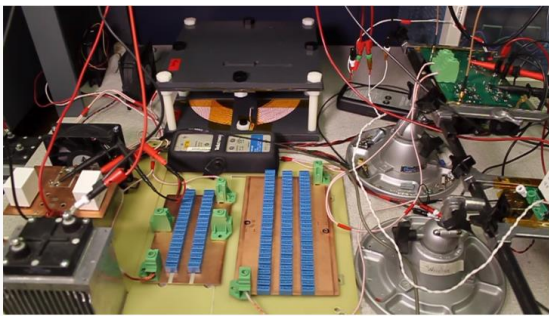
Şekil 4. Karşılıklı endüktansın hava boşluğuna göre değişimi



Şekil 5. Bağlaşım faktörü, frekans ve hava aralığı grafiği

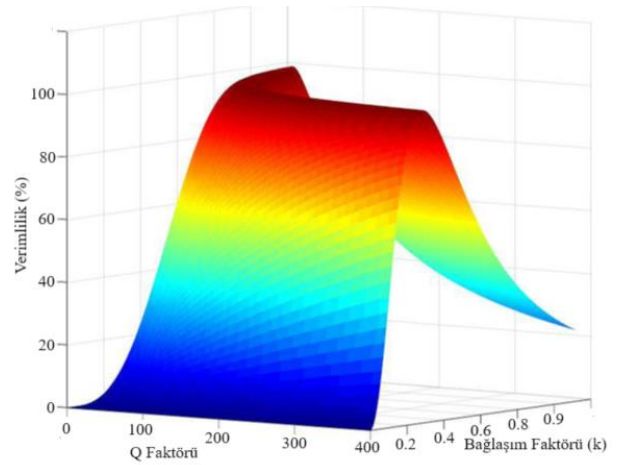
### 3.2 Deneysel sonuçlar

Bu çalışmada deneysel doğrulama için literatürde yapılmış olan deneysel bir veri kullanılmıştır. Deneysel olarak elde edilen verinin benzetim çalışması yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel düzeneği Şekil 6'da gösterilmektedir [20].



Şekil 6. KGA deney düzeneği

Son olarak seçilen KGA sistemi performans doğrulama deneyi, her bir hizalama ve batarya şarj profilinin tüm aralığında gerçekleştirilmiştir. Yük, elektronik yük aracılığıyla simüle edilmiştir. Literatürde verici ve alıcının ölçüm cihazıyla uyumluluğunu sağlamak için LC eşleştirme devreleri sıklıkla kullanılmaktadır. Karakteristik empedans ölçüm cihazlarında devreyi ölçmek için direnç değerlerini birbirine uyarlayan eşleştirme devreleri tasarlanmıştır. Bu çalışmada, eşleştirmenin geniş bantta (düşük Q) olmasını sağlamak için bir eşleştirme devresi kurulmuştur. Kalite faktörü, verimlilik ve bağlaşım katsayısı grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Kalite faktörü, verimlilik ve bağlaşım katsayısı grafiği

KGA sisteminin verimliliği, değişen farklı hava boşluklarında ve frekanslar aralığında değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, kritik hava aralığının altındaki hava boşluklarında rezonans frekansları çatallanmakta ve rezonans frekanslarında maksimum verim alınabilmektedir. Bağlaşım faktörü arttığında yani hava aralığı azaldığında rezonans frekansındaki çatallanmalar doğal açısal frekansa yaklaşır. Frekans çatallanmalarının ortadan kalkması için sınırın kritik hava boşluğu olduğu gözlemlenmiştir. Kritik hava aralığı aşıldığında tek rezonans frekansı oluşmuş ve verim düşmeye başlamıştır. Tablo 4'te deneysel ve benzetim sonuçları tüm durumlar için karşılaştırılmıştır.

Tablo 4. Sonuçların karşılaştırılması

	Deneysel sonuçlar	Benzetim sonuçları
Verimlilik (%)	94.86	95.25
Karşılıklı endüktans ( $\mu H$ )	24.83	24.75
Q faktör değeri		334

Yüksek kaliteli faktör tasarımlarının manyetik alanı, düşük kaliteli faktör tasarımlarına göre daha yüksektir. Grafiklerde tüm tasarımlarda y ekseninde bobin yarıçapından sonra manyetik alan yoğunluğunun daha hızlı azaldığı görülmektedir. Bobin çevresinde oluşan saçılmaların daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Bu manyetik saçılmalar çekirdek ve ekranlama kullanılarak yönlendirilebilir veya

engellenebilir. Bu çalışma, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından belirlenen "IEC TS 61980-3" adlı uluslararası standartı analiz ederek gerçekleştirilmiştir. Maxwell modellemesi, şu anda yürürlükteki uluslararası standartlar arasında en yüksek güç işleme kapasitesine sahip olan KGA3 seviyesi referansı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu, Maxwell benzetim tabanlı modellemenin güvenilirliğini artırmak amacıyla yapılmıştır. Modelleme sonuçları ile KGA3 seviye referans parametrelerinin uyumlu olduğu doğrulanmıştır.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada kablosuz enerji transfer sisteminde kalite faktörünün etkileri incelenmiştir. SAE standardı KGA1 güç sınıfı ve 85 kHz frekans için kalite faktörlü KGA tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda 20 kW bir bataryayı şarj edebilen bir KGA sistemi önerilmiştir. İlk olarak, Ansys Maxwell benzetimi kullanılarak ve uluslararası standartlar göz önünde bulundurularak 20 kW bir alıcı-verici tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Optimum kompanzasyon topolojisi, geliştirilen alıcı-verici ve batarya şarj profiline göre seçilerek ve tasarlanmıştır. Önerilen sisteminin optimum kompanzasyon topolojisi, diğer yapılarla göre daha fazla rezonans elemanına sahiptir. Ayrıca, kompanzasyon devresine uygulanan gerilim ve akım stresinin düşük ve tekdüze olması nedeniyle bu topolojinin diğer topolojilere göre maliyet azaltma ve yüksek verimlilik açısından avantajlı olduğu ortaya çıkmıştır. Önerilen sistemin fizibilitesini doğrulamak için KGA sisteminin performansı deneysel olarak doğrulanmıştır. Ayrıca, geliştirilen sisteminin yüksek verimlilik performansı, %95,25'lük maksimum verimliliğe ulaşılarak doğrulanmıştır. Çalışmanın ihtiyacına göre en optimum kalite faktörünün seçilmesi önemlidir. Düşük hava aralığında çalışacak bir sistem için düşük kalite faktörü, yüksek hava aralığında çalışacak bir sistem için ise yüksek kalite faktörü tercih edilmelidir. Aksi takdirde verim düşmektedir. Bu alanda daha fazla deneysel çalışma yapılarak gerçek zamanlı sonuçlar ile bu faktörün etkileri daha çok tartışılabilir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): % 6**

#### Kaynaklar

- [1] W. Hong, S. Lee and H. Lee, Sensorless control of series-series tuned inductive power transfer system, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70(10), 10578-10587, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3220885>.
- [2] M. Chang, Metamaterial adaptive frequency switch rectifier circuit for wireless power transfer system. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70(10), 10710-10719, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3220908>.
- [3] R. Xue, K. Cheng and M. Je, High-efficiency wireless power transfer for biomedical implants by optimal resonant load transformation. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 60, 4, 2012. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2012.2209297>.
- [4] A. Bharadwaj, A. Sharma and C. R. Chandupatla, A switched modular multi-coil array transmitter pad with coil rectenna sensors to improve lateral misalignment tolerance in wireless power charging of drone systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 24, 2, 2023. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3220793>.
- [5] M. Moghaddami, A. Sundararajan and A. Sarwat, A power frequency controller with resonance frequency tracking capability for inductive power transfer systems. IEEE Trans Ind Appl 54(2), 1773-1783 2018. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2779425>.
- [6] Yang, S, Deng, X, Lu, J, Wu, Z and Du, K, Light-load efficiency optimization for an LCC-parallel compensated inductive power transfer battery charger. Electron (Switz) 9(12), 1-13, 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9122080>
- [7] Z. Yi, M. Li, B. Muneer and Q. Zhu, High-efficiency mid-range inductive power transfer employing alternative-winding coils. IEEE Transactions on Power Electronics, 34(7), 6706-6721, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2872047>.
- [8] Y. Yamada and T. Imura, An efficiency optimization method of static wireless power transfer coreless coils for electric vehicles in the 85 kHz band using numerical analysis. IEEJ, Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 17(10), 1506-1516, 2020. <https://doi.org/10.1002/tee.23661>
- [9] Y. Yamada, K. Sasaki, T. Imura and Y. Hori, Design method of coils for dynamic wireless power transfer considering average transmission power and installation rate. IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), Kigali, Rwanda, 1-8, 2021. <https://doi.org/10.1109/SPEC52827.2021.9709485>.
- [10] I. Fatih ve K. Orhan, Impedance analysis and variable capacity array application for wireless energy-transfer system via coupled magnetic resonances, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 8(4), 1005-1020, .2020.
- [11] N. Rasekh, J. Wang and X. Yuan, In-situ measurement and investigation of winding loss in high-frequency cored transformers under large-signal condition. IEEE Open Journal of Industry Applications, 3, 164-177, 2022, <https://doi.org/10.1109/OJIA.2022.3193584>.
- [12] L. Feng, Wireless power transfer tuning model of electric vehicles with pavement materials as transmission media for energy conservation. Applied Energy, 323, 119631, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119631>
- [13] Y. Özüpak, Analysis of the model designed for magnetic resonance based wireless power transfer using FEM. Journal of Engineering Research, 11, 3, 2023. <https://doi.org/10.36909/jer.17631>
- [14] J. Park, 22 kW high-efficiency IPT system for wireless charging of electric vehicles. Journal of Power Electron, 23, 374-386, 2023. <https://doi.org/10.1007/s43236-022-00569-w>

- [15] H. Wang, A special magnetic coupling structure design for wireless power transfer system. IEEE 20th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 1-2, 2020. <https://doi.org/10.1109/CEFC55061.2022.9940745>.
- [16] I. Hussain and D.K. Woo, Self-inductance calculation of the archimedean spiral coil. *Energies*. 15, 253, 2022 <https://doi.org/10.3390/en15010253>.
- [17] SAE, Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology, standard No: J2954\_202010, 2020. [https://www.sae.org/standards/content/j2954\\_202010/](https://www.sae.org/standards/content/j2954_202010/)
- [18] International commission on non-ionizing radiation protection (ICNIRP), *Health Phys.*, 99(6), 818, 2020. <https://www.icnirp.org/en/activities/news/news-article/rf-guidelines-2020-published.html>
- [19] IEEE, Standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz," in IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019), 4, 1-312, 2019. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8859679>.
- [20] Y. Özüpak, Analysis of the parameters affecting the efficiency of the wireless power transmission system designed for new generation electric vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 24, 1675–1680, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0135-1>

