

Manyetik Rezonanslı Kuplaj ile Kablosuz Enerji Transferinde Hizalanmış ve Hizalanmamış Durumların Limitlerinin İncelenmesi

Ali AĞÇAL, Nur BEKİROĞLU, Selin ÖZÇİRA

Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
aliagcal1989@gmail.com

(Geliş/Received: 23.03.2018; Kabul/Accepted: 03.09.2018)

Özet

Bu çalışmada; manyetik rezonanslı kuplaj teorisi kullanılarak kablosuz enerji transferi (KET) sistemi alıcı ve verici bobinlerinin konumsal ve açısal olarak hizalanmış ve hizalanmamış durumları incelenmiştir. Eşdeğer devrenin bazı parametreleri ANSYS® Maxwell 3D programı ile hesaplanmıştır. Hizalanmış ve hizalanmamış durumlar için yüksek verimin hangi hava aralığı limitlerine kadar ulaşabildiği gösterilmiştir. Devrenin analitik çözümü MATLAB programında sistemin matematiksel modeli yazılarak yapılmıştır. Sistemin nümerik çözümü ise bir devre simülasyon programı olan PSIM ile yapılmıştır. Ayrıca ANSYS® Maxwell 3D programı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak üç boyutlu sistemin geçici hal analizi yapılmıştır. Verici sinüsoidal gerilim kaynağı ile beslenerek alıcı akım ve gerilimi gözlenmiştir. Giriş ve çıkış güçleri hesaplanarak sistemin verimi 3 farklı programda hesaplanarak karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlar, hizalanmış ve hizalanmamış durumlarda belirli mesafelere kadar verimli bir şekilde güç aktarıldığını göstermiş, verimin düşmeye başladığı noktalar ise tasarlanan KET sisteminin hava aralığı ve açısal limitlerinin belirlenmesini sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz enerji transferi, Manyetik rezonanslı kuplaj, Sistem verimi

Examination of Limitations of Aligned and Unaligned Positions for Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer Systems

Abstract

In this paper, the conditions for both the angular aligned and unaligned positions of the receiver and transmitter coils of wireless power transfer (WPT) systems are examined by using the theory of magnetic resonance coupling. Some parameters of the equivalent circuit were calculated with ANSYS® Maxwell 3D software. Air gap limits have been calculated for aligned and unaligned conditions in order to obtain high efficiency. The analytical solution for the circuit was calculated in MATLAB program through the composition of the system's mathematical modeling. The numerical solution of the system, however, was calculated using PSIM, which is circuit simulation software. In addition, with the use of the finite element method (FEM) in ANSYS® Maxwell 3D software, transient analysis of the three-dimensional system was performed. While the transmitter was fed with sinusoidal voltage source, the current and voltage of the receiver were observed. The efficiency of the system was estimated through the calculation of input and output power. The results were compared with one another in three software that were previously mentioned above. These outcomes demonstrated that power was efficiently transmitted to a certain extent in aligned and unaligned positions and the points where the efficiency began to decrease yield the air gap limits and angular limits of the WPT system that was designed.

Keywords: Wireless power transfer, Magnetic resonant coupling, System efficiency

1. Giriş

Enerjinin kablosuz olarak aktarılması 200 yıla aşkın bir süredir üzerinde çalışılan bir konu olmasına rağmen, çözümünün elektrik-elektronik mühendisliği kültüründe etkin olarak yaşama geçirilememesi konu ile ilgili en önemli sorunlardan biridir. Nikola Tesla ile başlayan bu serüven, teknolojinin çok disiplinli bir alan

olarak yol almasıyla önemini giderek artırmış, kablosuz enerji transferini farklı disiplinlerin ortak bir çalışma alanı haline gelmiştir. Dahası ilerde hayatta daha sık kullanılacak elektrikli araçlar, ev elektroniği ve medikal uygulamalar gibi birtakım önerilerin hayata geçirilmesinde kablosuz enerji transferi önemli rol oynamaktadır.

Kablosuz enerji transferi bugüne kadar elektromanyetik radyasyonla, mikrodalgayla, lazerle, elektromanyetik endüksiyonla ve en son manyetik rezonanslı kuplaj ile gerçekleştirilmiştir.

İlk kablosuz enerji transferi çalışmaları Nicola Tesla ile elektromanyetik radyasyon üzerine elektrik enerjisini kablosuz olarak tüm dünyaya iletme amacıyla başlamış, ancak sponsorların projeden desteğini çekmesi üzerine bu proje tamamlanamamıştır [1-3].

Mikrodalga ile kablosuz enerji transferi fikri, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra yüksek güçlü mikrodalga vericilerinin gelişimiyle ortaya çıkmıştır. Mikrodalga güç transferi öncülerinden William Brown, 1964'te bütün uçuş gücünü mikrodalga ışınlarından alan model helikopter tasarlamıştır [4].

Sahai ve Graham, yüksek mesafelerde düşük verimde çalışan, bir çeşit kablosuz enerji olan lazerle enerji transferini gerçekleştirmişlerdir. Daha çok uzay uygulamalarında uygun olan bu tip enerji aktarımında kullanılan lazer radyasyonu oldukça zararlı olmakla birlikte, düşük güçlerde bile insanı kör edebilmekte, yüksek güçlerde canlıları kısmi ısınmayla öldürebilmektedir [5].

Zaho, etkin çalışma mesafesi yalnızca birkaç cm olan elektromanyetik endüksiyon teknolojisi üzerine çalışmalar yapmış ve yüksek verimler elde etmiştir. Ancak mesafenin çok yakın oluşu ve bu yakınlıktan dolayı sekonder bobinin primer bobine hizalanmasının zor oluşu bu yöntemin dezavantajlarından [6].

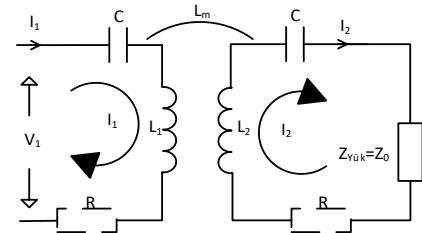
Manyetik rezonanslı kuplaj teorisi, 2007 yılında MIT'den bilim insanlarının kablosuz enerji transferi teknolojisinde devrim yaratan ve adını Witricity koydukları buluşla başlamıştır. Kullandıkları bu manyetik rezonanslı kuplaj teorisiyle, 60 W'lık bir lamba 2 metreden daha uzak bir mesafede, %40 civarında bir verimle kablosuz olarak yakılabilmektedir. Böylece orta mesafe elektrik güç aktarımı gerçekleştirilmiştir. Witricity sisteminde enerji, manyetik rezonanslı kuplaj ile transfer edilir. Primer rezonans bobinindeki enerji, ideal çalışmada sekonder rezonans bobini tarafından tamamen çekilir. Dolayısıyla bu teoride aktarılan enerji, verimli bir şekilde rezonanslı nesnelere arasında; ayrıca zayıf şekilde de olsa rezonanslı olmayan nesnelere arasında paylaşılabilir [7,8].

Son yıllarda literatürde manyetik endüksiyon teorisine dayanan endüktif güç transferi ile yapılan çalışmalar düşük verimli olması nedeniyle popülerliğini yitirmiş, yerini manyetik rezonanslı kuplaj çalışmalarına bırakmıştır.

Bu çalışmada, konumsal ve açısal olarak hizalanmış ve hizalanmamış durumlarda farklı hava aralıkları ve farklı açılar için verimin değişimi gösterilmiştir. Ayrıca hizalanmış ve hizalanmamış durumlardaki hava aralığı ve açı limitleri, karşıt endüktansın değişimi, rezonans frekansının değişimi, giriş ile çıkış akımlarındaki değişimler gösterilmiştir. Manyetik rezonanslı kuplaj sisteminin eşdeğer devre simülasyonu PSIM ile yapılmıştır. Ayrıca ANSYS® Maxwell 3D programı kullanılarak alıcı ve verici endüktanslar tasarlanmıştır. ANSYS® Maxwell Circuit Editör (MCE) Programında manyetik rezonanslı kuplaj sistemin eşdeğer devresi kurulmuştur. ANSYS® Maxwell 3D programındaki alıcı ve verici bobinler ile MCE programındaki devreyi kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle KET sisteminin geçici durum analizi yapılmıştır.

2. Manyetik Rezonanslı Kuplaj Eşdeğer Devresi ile Verim ve Eşdeğer Empedans Hesabı

Bu bölümde eşdeğer devrenin basit teorisi açıklanacaktır. Giriş empedansını, aktarılan gücü ve verimi analitik olarak ifade edebilmek için Şekil 1'de gösterilen kablosuz enerji sisteminin basitleştirilmiş eşdeğer devresi kullanılacaktır [9,10].



Şekil 1. Kablosuz güç aktarım sisteminin eşdeğer devresi

Bu eşdeğer devrede I_1 giriş akımını (verici akımını), I_2 çıkış akımını (alıcı akımını), V_1 giriş gerilimini, R verici ve alıcı sistemlerin ayrı ayrı iç dirençlerini, C alıcı ve verici rezonans kondansatörlerini, L_1 verici bobini, L_2 alıcı

bobini, L_m karşıt endüktansı ve $Z_{yük}$ (Z_0) yük empedansını (karakteristik empedansı) gösterir.

Denklem (1) verici kısmın çevre denklemini göstermektedir. Denklem (2) ise alıcı kısmın çevre denklemini göstermektedir.

$$V_1 = I_1 \left(R + jL_1\omega + \left(\frac{1}{j\omega C_1} \right) \right) - I_2 \cdot (jL_m\omega) \quad (1)$$

$$0 = I_2 \left(jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C_2} \right) + R + Z_0 \right) - I_1 \cdot (jL_m\omega) \quad (2)$$

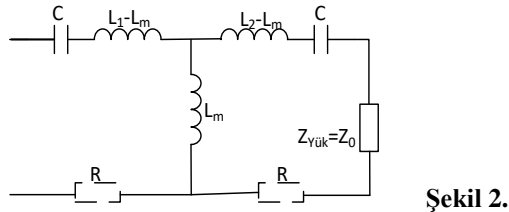
Denklem (1) ve Denklem (2)'den yararlanılarak alıcı ve verici bobinlerin akımları arasındaki ilişki Denklem (3)'teki gibi elde edilir.

$$I_2 = I_1 \left(\frac{jL_m\omega}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C_2} \right) + R + Z_0} \right) \quad (3)$$

Denklem (1)'in içine Denklem (3)'ü yerleştirerek ve oluşan gerilim denklemini giriş akımına bölerek, eşdeğer empedans (giriş empedansı) Denklem (4)'teki gibi elde edilir.

$$Z_{eq} = R + \frac{1}{j\omega C_1} + j(L_1 - L_m)\omega + \left(\frac{1}{jL_m\omega} + \frac{1}{j(L_2 - L_m)\omega + (1/j\omega C_2) + Z_0 + R} \right)^{-1} \quad (4)$$

Şekil 1'deki eşdeğer devre aynı zamanda Şekil 2'deki gibi T tipi eşdeğer devre ile gösterilebilir [11].



Şekil 2. KET sistemi T tipi eşdeğer devresi

Bu sistemin verimi Denklem (5)'teki şekilde ifade edilir.

$$\eta = \frac{P_{çıkış}}{P_{giriş}} = \frac{I_{çıkış}^2 Z_{çıkış}}{I_{giriş}^2 Z_{giriş}} \quad (5)$$

Burada $I_{çıkış}$ akımı alıcıdan geçen akıma I_2 'ye eşit, $I_{giriş}$ akımı vericiden geçen akıma I_1 'e eşit, $Z_{çıkış}$ empedansı $Z_{yük}$ empedansına eşittir. Denklem (3)'ü çıkış akımının giriş akımına oranı şeklinde yazarsak denklem (6) elde edilir.

$$\frac{I_{çıkış}}{I_{giriş}} = \frac{jL_m\omega}{jL_2\omega + \left(\frac{1}{j\omega C_2} \right) + R + Z_0} \quad (6)$$

Denklem (5)'in içine Denklem (6) ve Denklem (4) yerleştiğinde verim denklemini Denklem (7)'deki gibi elde edilir.

$$\eta = \left[\frac{jL_m\omega}{jL_2\omega + \frac{1}{j\omega C} + Z_0 + R_2} \right]^2 \times \frac{Z_0}{(R + jL_1\omega + \frac{1}{j\omega C} + \frac{L_m^2\omega^2}{jL_2\omega + \frac{1}{j\omega C} + Z_0 + R_2})} \quad (7)$$

Denklem (7); maksimum verim için L_m karşıt endüktans, L alıcı ve verici endüktans, Z_0 karakteristik empedans ve R iç direnç koşullarını tanımlar. Denklem (9) koşulunda sistem çift rezonans frekansına sahiptir. Denklem (10) koşulunda ise sistem düşük bir verimle tek rezonans frekansına sahiptir [11]. Aslında denklem (10) yardımıyla hava aralığının yüksek olduğu yerlerde tek rezonans frekansını ve denklem (9) yardımıyla hava aralığının düşük olduğu yerlerde çift rezonans frekansının olduğu, denklem (8) yardımıyla ise bu sistemin çift veya tek rezonans frekansını oluşma limiti gösterilmiştir.

$$I_m^2 = \frac{Z_0^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (8)$$

$$I_m^2 > \frac{Z_0^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (9)$$

$$I_m^2 < \frac{Z_0^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (10)$$

3. KET Sisteminin Eşdeğer Devresi Kurularak Parametrelerin Analitik Olarak ve SEY ile Hesaplanması

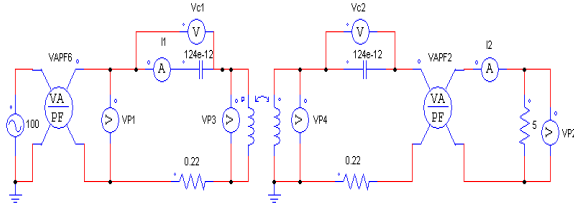
Bu bölümde analitik devre çözümü için MATLAB programı [12], eşdeğer devre çözümü

için PSIM programı [13] ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm için ANSYS® Maxwell 3D programı kullanılmıştır [14]. Devrenin parametreleri ANSYS® Maxwell 3D ile hesaplanmıştır.

3.1. Konumsal Olarak Hizalanmış ve Hizalanmamış Durumların Karşılaştırması

Sistemde L parametresi, sistemi akımına bağlı değişen lineer olmayan bir parametredir. Hizalanmış durum için her bir sistem parametresi Tablo 1'deki gibi hesaplanmıştır. Hizalanmamış durum için her bir sistem parametresi ise Tablo 2'deki gibi hesaplanmıştır.

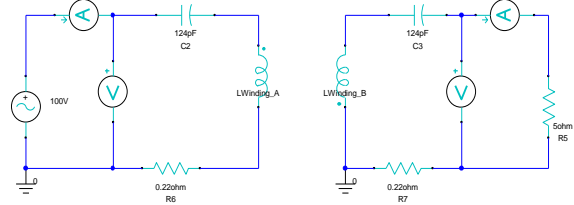
Devre simülasyonunda KET sistemi tepe gerilimi 100 V olan sinüsoidal gerilim kaynağı ile Şekil 3'te gösterilen şekilde beslenmiştir. Şekil 3'te gösterilen model PSIM devre simülasyon programında oluşturulmuştur.



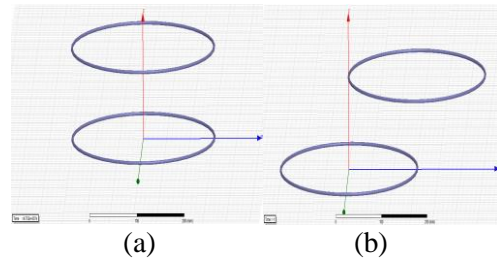
Şekil 3. PSIM manyetik rezonanslı kuplaj eşdeğer devresi

Belirtilen her bir hava aralığı için rezonans frekansı 13-14 MHz arasında tespit edilerek gerçekleştirilen magnetik rezonans kuplajlı KET sisteminde farklı hava aralıkları için hizalanmış ve hizalanmamış durumlarda tespit edilen verim değerleri Tablo 3'te 3 ayrı program için verilmiştir. Ayrıca hava aralığına göre verimin değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Yine aynı devre ANSYS® Maxwell Circuit

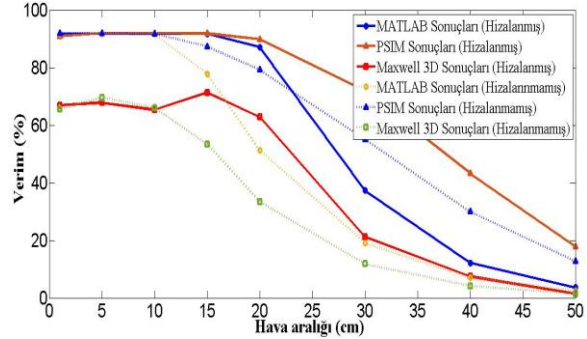
Editor (MCE) programında Şekil 4'teki gibi modellenerek, alıcı ve verici sargıların devreleri oluşturulmuştur. ANSYS® Maxwell 3D programında ise alıcı ve verici bobinler Şekil 5'teki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4. ANSYS® Maxwell Circuit Editör modeli



Şekil 5. Konumsal olarak (a) hizalanmış ve (b) hizalanmamış alıcı ve verici ANSYS® Maxwell 3D modeli



Şekil 6. Konumsal olarak hizalanmış ve hizalanmamış durumlar için farklı hava aralıklarına göre verim grafiği

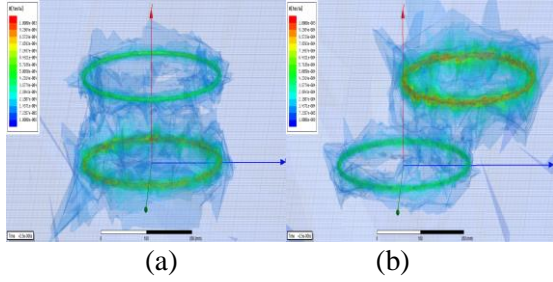
Tablo 1. Hizalanmış durum için ANSYS® Maxwell 3D kullanılarak ölçülen eşdeğer devre parametreleri

Parametre/Hava aralığı	1cm	5cm	10cm	15cm	20cm	30cm	40cm	50cm
L [nH]	981,9	982,4	983,8	1010,5	991	994	1014,8	1011,1
M [nH]	548,5	241,8	128,3	80,5	46,4	20,9	11,1	5,9
C [pF]	124	124	124	124	124	124	124	124

Tablo 2. Hizalanmamış durum için ANSYS® Maxwell 3D kullanılarak ölçülen eşdeğer devre parametreleri

Parametre/Hava aralığı	1cm	5cm	10cm	15cm	20cm	30cm	40cm	50cm
L [nH]	1040	1000,8	996,5	988,8	1020,1	996,6	993,5	1009,1
M [nH]	118	81,6	56,3	38,3	26,3	14	8,2	4,8
C [pF]	124	124	124	124	124	124	124	124

ANSYS® Maxwell 3D ile manyetik akı dağılımları Şekil 7'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 7. Konumsal olarak (a) hizalanmış ve (b) hizalanmamış durumlar için manyetik akı yoğunluğu dağılımları

ANSYS® Maxwell 3D ile sistemin giriş ve çıkış akımları, alıcı ve verici rezonans kapasitelerinin maruz kaldığı tepe gerilimleri, giriş ve çıkış gerilimleri, giriş ve çıkış güçleri her bir hava aralığı ve konumsal olarak hizalanmış ve hizalanmamış durum için Tablo 4'te verilmiştir.

3.2. Açısal Olarak Hizalanmış ve Hizalanmamış Durumların Karşılaştırması

Seçilen 10 cm hava aralığı için açısal olarak hizalanmış ve farklı açılarda hizalanmamış durumlar için verim değerleri verilmiştir. Hava aralığının 10 cm seçilmesinin sebebi 10 cm'den daha düşük hava aralıklarında sistemin hizalanma açıları değiştirildiğinde alıcı ve vericinin iç içe girmesidir.

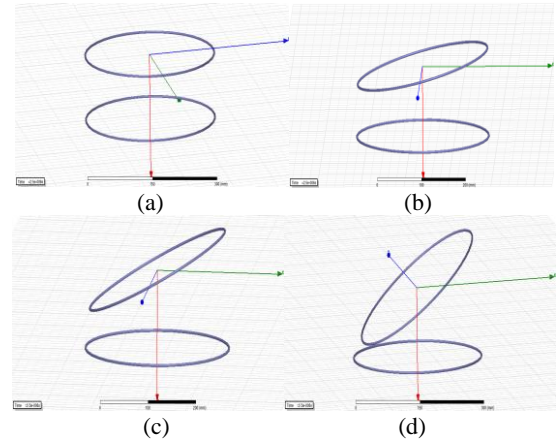
Sistemde L parametresi sistemin akımına bağlı değişen ve lineer olmayan bir parametredir. Açısal olarak hizalanmış ve hizalanmamış durum için her bir sistem parametresi Tablo 5'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 5. 10 cm hava aralığı için farklı açılarda hizalanmış KET sistemin ANSYS® Maxwell 3D kullanılarak ölçülen eşdeğer devre parametreleri

Parametre/Derece	0°	10°	20°	30°
L [nH]	983,8	1023,2	1000,3	984,5
M [nH]	128,3	6,8	2,7	1,5
C [pF]	124	124	124	124

Devre simülasyonunda KET sistemi, tepe gerilimi 100 V olan sinüsoidal gerilim kaynağı ile Şekil 3'te gösterilen şekilde beslenmiştir. Şekil 3'te gösterilen çalışma PSIM devre simülasyonu programında yapılmıştır.

Yine aynı devre ANSYS® Maxwell Circuit Editor (MCE) programında Şekil 4'teki gibi modellenmiştir. ANSYS® Maxwell 3D programında ise alıcı ve verici bobinler Şekil 8'deki gibi oluşturulmuş ve MCE programı ile alıcı ve verici sargıların devreleri oluşturulmuştur.



Şekil 8. (a) Hizalanmış, (b) 10° hizalanmamış, (c) 20° hizalanmamış ve (d) 30° hizalanmamış alıcı ve verici ANSYS® Maxwell 3D modeli

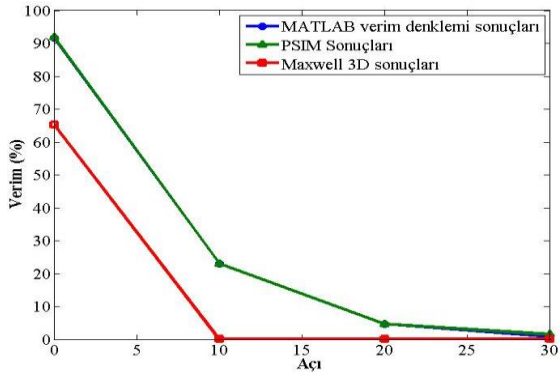
Tablo 3. Hizalanmış ve hizalanmamış durumlar için farklı hava aralıklarına göre verim tablosu

Hızalanmış	Hava aralığı							
	1 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
Programlar								
MATLAB verim denklemi sonuçları	%91.75	%91.75	%91.75	%91.75	%87.15	%37.29	%12.21	%3.63
PSIM sonuçları	%90.94	%91.93	%91.93	%91.80	%89.80	%72.01	%43.22	%17.77
Maxwell 3D sonuçları	%66.89	%67.79	%65.29	%71.30	%62.76	%21.07	%7.38	%1.42
Hızalanmamış	Hava aralığı							
	1 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
Programlar								
MATLAB verim denklemi sonuçları	%91.75	%91.75	%91.66	%77.88	%51.21	%19.13	%7.00	%2.45
PSIM sonuçları	%91.90	%91.90	%91.71	%87.3	%79.23	%55.07	%29.91	%12.71
Maxwell 3D sonuçları	%65.49	%69.67	%66.05	%53.45	%33.44	%11.87	%4.19	%1.42

Magnetik rezonans kuplajlı KET sisteminin farklı hizalanma açılara göre 3 ayrı program sonucunda elde edilen verimleri Tablo 6'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca açığa bağlı verimin değişimi Şekil 9'da gösterilmiştir.

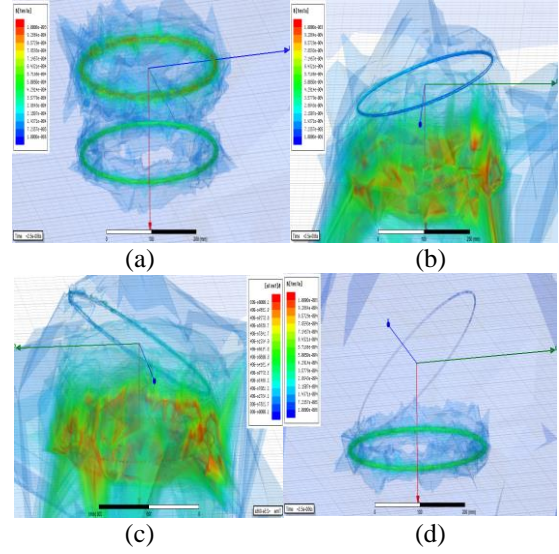
Tablo 6. Açısal olarak hizalanmış ve hizalanmamış durumlar için verim tablosu

10 cm hava aralığı	Açı			
Programlar	0°	10°	20°	30°
MATLAB verim denklemi sonuçları	%91.75	%23.07	%4.66	%0.756
PSIM sonuçları	%91.93	%23.07	%4.64	%1.5153
ANSYS® Maxwell 3D sonuçları	%65.29	%0.014	%0.0026	%0.0007



Şekil 9. Farklı hizalanma açılarına bağlı olarak verimin değişimi

ANSYS® Maxwell 3D ile farklı hizalanma açılarında göre manyetik akı dağılımları Şekil 10'daki gibi gösterilmiştir.



Şekil 10. Açısal olarak (a) Hizalanmış, (b) 10° hizalanmamış, (c) 20° hizalanmamış ve (d) 30° hizalanmamış manyetik akı yoğunluğu dağılımları

ANSYS® Maxwell 3D ile sistemin giriş ve çıkış akımları, alıcı ve verici rezonans kapasitelerinin maruz kaldığı tepe gerilimleri, giriş ve çıkış gerilimleri, girişten verilen güç ile çıkıştan alınan güçler hizalanmış durum ve hizalanmamış durumda farklı açılar için Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 4. Hizalanmış ve hizalanmamış durumlar için farklı hava aralıklarına göre giriş ile çıkış akım, gerilim ve güç tablosu

Hizalanmış	Hava aralığı							
	1 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
Maxwell 3D								
Verici Akımı (A)	8.89	10.15	10.69	8.90	18.05	40.19	45.99	48.34
Alıcı Akımı (A)	8.48	9.87	9.75	9.43	12.63	10.97	6.87	3.45
Giriş Gerilimi (V)	70.71	70.71	70.71	70.71	70.71	70.71	70.71	70.71
Cihaz Gerilimi (V)	42.42	49.35	48.75	47.14	63.14	54.83	34.35	17.24
Giriş Gücü (W)	579	715.25	730.5	623.45	1274.5	2853.5	3251.5	3417.5
Aktarılan Güç (W)	360	487	476.8	444.5	797.5	601.5	240	60.5
Hizalanmamış	Hava aralığı							
Maxwell 3D								
Verici Akımı (A)	12.08	10.56	13.81	24.26	34.54	44.34	47.59	48.53
Alıcı Akımı (A)	10.52	10.17	11.3	13.52	12.72	8.65	5.33	3.12
Giriş Gerilimi (V)	70.71	70.71	70.71	70.71	70.71	70.71	70.71	70.71
Cihaz Gerilimi (V)	52.59	50.86	56.51	67.62	63.62	43.26	26.65	15.62
Giriş Gücü (W)	844.5	742.5	967	1711	2442.5	3152	3386	3430.5
Aktarılan güç (W)	553	517.5	638.5	914.5	817	374	142	48.5

Tablo 7. Açısal olarak hizalanmış durumda ve farklı açılardaki hizalanmamış durumlarda giriş ile çıkış akımı, gerilim ve güç tablosu

10 cm hava aralığı için	Açı			
	0°	10°	20°	30°
ANSYS® Maxwell 3D				
Verici Akımı (A)	10.69	48.96	49.24	49.44
Alıcı Akımı (A)	9.75	0.33	0.19	0.1
Giriş Gerilimi (V)	70.71	70.71	70.71	70.71
Cihaz Gerilimi (V)	48.75	1.63	0,935	0,525
Giriş Gücü (W)	730.5	3462	3482	3520
Aktarılan Güç (W)	476.8	0.5	0.09	0.025

4. Sonuçlar

Bu çalışmada; manyetik rezonanslı kuplaj ile çalışan KET sistemi için konumsal olarak ve açısal olarak hizalanmış ve hizalanmamış durumların verime bağlı olarak limitleri incelenmiştir. Yapılan simülasyonlarda hizalanmış durum için; 15-20 cm kadar yüksek verimle güç aktarıldığı, 20 cm'den sonraki hava aralıklarında ise verimin hızlı bir şekilde düştüğü görülmüştür. Konumsal olarak hizalanmamış durum için ise 10 cm hava aralığına kadar yüksek verimle kablosuz enerji transferinin yapıldığı, 10 cm'den sonraki hava aralıklarında ise verimin hızlı bir şekilde düştüğü gösterilmiştir.

Ayrıca yine bu çalışmada açısal olarak hizalanmış ve hizalanmamış durumlar ele alınmıştır. Hizalanmamış durumda karşıt endüktans çok fazla düştüğünden buna bağlı olarak verimin de çok büyük oranda düştüğü ancak belirli hava aralığı değerlerine kadar hizalanmamış şekilde de yüksek verimli kablosuz enerji transferinin yapılabileceği görülmüştür.

Farklı yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına bakıldığında, analitik çözümün yapıldığı MATLAB sonuçları ile nümerik çözümün yapıldığı PSIM sonuçlarında, ANSYS® Maxwell 3D yazılımına göre verimin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi; MATLAB ve PSIM sonuçlarında kablosuz enerji aktarım sisteminin alıcı ve verici bobinlerdeki deri etkisi ve yakınlık etkisi ihmal edilmişken, ANSYS® Maxwell 3D yazılımında bu etkilerin göz önüne alınmış olmasıdır. Bu tasarımda tek sarım kablo kullanılması ve Litz kablo kullanılmaması sebebiyle deri etkisi ve yakınlık etkisi verimi oldukça düşürmüştür. İlerleyen

çalışmalarda, Litz kablo kullanılarak KET sistemi tasarlanması planlanmaktadır.

5. Kaynakça

1. Tesla, N., (1900). Apparatus for Transmission of Electrical Energy, U.S. Patent No. 649,621.
2. Tesla, N., (1901). Means for Increasing the Intensity of Electrical Oscillations, U.S. Patent No. 685,012.
3. Tesla, N., (1905). Art of Transmitting Electrical Energy through Natural Mediums, U.S. Patent No. 787,412.
4. Brown, W. C., (1965). Experimental Airborne Microwave Supported Platform, Raytheon Co Burlington, MA Microwave and Power Tube Div.
5. Sahai, A. and Graham, D., (2001). Optical wireless power transmission at long wavelengths, IEEE Int. Conf. on Space Optical Sys&App. (ICSOS), 164-170.
6. Zaho, J., (2012). A Contrastive Studies between Magnetic Coupling Resonance and Electromagnetic Induction in Wireless Energy Transmission, Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF),1-4.
7. Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., ve Soljacic, M., (2007). Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, Science, **317**, 83-86.
8. Karalis, A., Joannopoulos, J. D., ve Soljacic, M., (2008). Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer, Ann. Phys., **323**, 34-48.
9. Agcal, A., Bekiroglu, N., and Ozcira, S., (2015). Examination of Efficiency Based on Air Gap and Characteristic Impedance Variations for Magnetic Resonance Coupling Wireless Energy Transfer, Journal of Magnetism, vol. **20**, 57-61.
10. Agcal, A., (2014). Kablosuz Enerji Transferinde Farklı Hava Aralıkları ve Karakteristik Empedanslara Göre Verim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ FBE.
11. Imura, T., ve Hori, Y., (2011). Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula, IEEE Trans. Ind. Electron., **58**, 4746-4752.
12. The MathWorks, Simulink SimPowerSystems Toolbox , The MathWorks, Inc., 2009.
13. PSIM Help, PSIM User Manual, Powersim Inc.
14. ANSYS® Maxwell v.17 User Guide, Ansoft.