

**KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİNDE
VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI**

Aşkın Erdem GÜNDOĞDU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2011

ANKARA

Aşkın Erdem GÜNDOĞDU tarafından hazırlanan “KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİNDE VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Erkan AFACAN

.....

Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Erdem YAZGAN

.....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, H.Ü.

Doç. Dr. Erkan AFACAN

.....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Nursel AKÇAM

.....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 15/06/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Aşkın Erdem GÜNDOĞDU

**KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİNDE
VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Aşkın Erdem GÜNDOĞDU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2011

ÖZET

Bu tez çalışmasında son zamanlarda popüler olmaya başlayan kablosuz enerji transfer sistemi incelenmiştir. Laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda gönderici ve alıcı antenlerin merkezleri aynı dikey ekseninde olacak şekilde hizalanmıştı, fakat bu çalışmada eksenler aynı yatay düzlemde hizalanmıştır. Antenler her zaman istenilen şekilde hizalanamayacağı için bu tür yerleşim seçilmiştir. Bu tür yerleşimde manyetik alan çizgilerinin daha az kesişmesi sebebiyle sistem veriminin düştüğü gözlenmiştir fakat enerji transferi yine de mümkündür. Deneylerde sistemin tepkisi, yük değerlerinin değişiminin transfere etkisi, antenlerin yerleşiminin etkisi ile birden fazla gönderici ve alıcı olması durumları incelenmiştir. Kablosuz enerji transferinde verimi artırmak için neler yapılabileceği konusunda daha önce yapılan çalışmalarda bulunmamış yeni sonuçlar elde edilmiş ve bunlar üzerine yeni öneriler sunulmuştur.

Bilim Kodu : 905.1.034
Anahtar Kelimeler : Witricity, kablosuz enerji transferi, kablosuz elektrik
Sayfa Adedi : 45
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Erkan AFACAN

**INCREASING THE EFFICIENCY OF
WIRELESS ENERGY TRANSFER**

(M.Sc. Thesis)

Aşkın Erdem GÜNDOĞDU

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2011

ABSTRACT

Wireless power transfer system which has begun to be popular recently is investigated in this work. Experimental studies are done in laboratory environment. In the previous works, centers of transmitter and receiver antennas were aligned on the same vertical axis but in this work the centers are aligned on the same horizontal axis. This kind of layout is chosen, because these antennas cannot always be aligned as desired. It is observed that the efficiency of this system is lower due to less interception of magnetic field lines in this layout but it is possible to transfer energy though. In the experiments, the response of the system and the affect of the change of load values and the affect of the positions and the number of transmitter and receiver on the efficiency are investigated. New results about the efficiency increase in wireless power transmission which are not found in the previous works are obtained and new suggestions are presented.

Science Code : 905.1.034

Key Words : Witricity, wireless power transmission, wireless electricity

Page Number : 45

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Erkan AFACAN

TEŞEKKÜR

Çocukluk zamanlarımdan bu yana hayalim olan kablosuz enerji transferi üzerine çalışmalarımı gerçekleştirmemde değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Doç. Dr. Erkan AFACAN'a, laboratuvar ortamını sağlayan Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na ve laboratuardan sorumlu Araştırma Görevlisi Mustafa ÖZDEN'e, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan annem Seycan KARA'ya teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ..	1
2. MANYETİK REZONANT KUPLAJ İLE ELEKTRİK İLETİMİ	3
2.1. Kuplajlı Mod Teorisi.....	3
2.2. Manyetik Rezonant Kuplaj Teorisi	13
2.3. Manyetik Rezonant Kuplaj Frekans Karakteristiği.....	15
2.4. Kablosuz Enerji Transferinde Röle Etkisi.....	16
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	17
3.1. Sabit Frekans için Direnç Değişimine Bağlı Verim Değerleri.....	19
3.2. Frekansa Bağlı Enerji Transfer Oranları	22
3.3. Bobinler Yan Yana ve Üst Üsteyken Yapılan Ölçümler	37
3.4. Tek Kaynak, Çift Alıcı Varken Yapılan Ölçümler	38
3.5. Tek Kaynak, Tek Alıcı Varken Araya Başka Bir Bobin Yerleştirilince Yapılan Ölçüm	39
3.6. Çift Kaynak ve Tek Alıcı Durumunda Yapılan Ölçüm	39

	Sayfa
3.7. Faz Kayması.....	41
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	42
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	45

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. İlgili frekanslar için teorik hesaplama sonucunda B, C ve D rezonatörleri için bulunan teorik kapasitör değerleri ile deneyde kullanılan kapasitör değerleri.....	18
Çizelge 3.2. Sinüs, kare ve üçgen dalga için 923 KHz rezonans frekansında gönderici ve alıcı bobinlerdeki yük dirençlerinin değişimine bağlı verim değerleri	20
Çizelge 3.3. 500 KHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları.....	23
Çizelge 3.4. 1 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları.....	25
Çizelge 3.5. 1,5 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları.....	27
Çizelge 3.6. 2 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları.....	29
Çizelge 3.7. 2,5 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları.....	31
Çizelge 3.8. 3 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları.....	33
Çizelge 3.9. 3,5 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları.....	35

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Zamanın fonksiyonu olarak 1 ve 2 modlarında enerji.....	12
Şekil 2.2. Manyetik rezonans kuplaj eşdeğer devresi.....	14
Şekil 3.1. Sabit frekans ve sinüs dalgada gönderici taraftaki direnç değerlerine karşılık alıcı taraftaki direncin değişimine bağlı verim grafiği.....	21
Şekil 3.2 Gönderici tarafta sabit direnç var iken sinyal dalga tipinin değişimine ve alıcı tarafta direnç değişimine bağlı verim grafiği.....	22
Şekil 3.3. 500 KHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği....	24
Şekil 3.4. 1 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği.....	26
Şekil 3.5. 1,5 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği....	28
Şekil 3.6. 2 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği.....	30
Şekil 3.7. 2,5 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği....	32
Şekil 3.8. 3 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği.....	34
Şekil 3.9. 3,5 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği....	36
Şekil 3.10. Frekansa bağlı verimlilik grafiği.....	37

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Deneylede kullanılan B, C, D adlı bobinler.....	17
Resim 3.2. B, C ve D bobinlerinin eşkenar üçgen oluşturacak şekildeki konumları	38
Resim 3.3. 3,5 MHz teorik rezonans frekansı için yapılan deneyde gönderici ve alıcı devrelerde görülen 180 derecelik faz kayması.....	41

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
<i>a</i>	Rezonatör genliği
d	Sargı çapı
<i>e</i>	Euler sayısı
f	Frekans
j	Karmaşık sayı
<i>k</i>	Kuplajlaşma katsayısı
KHz	Kilohertz
<i>l</i>	Sargı uzunluğu
L	Endüktans
L_m	Karşılıklı endüktans
M	Karşılıklı endüktans
MHz	Megahertz
mV	Milivolt
mW	Miliwatt
n	Sarım sayısı
pF	Pikofarad
RMS	Kare ortalama karekök
S	Dalga yansıma oranı
<i>t</i>	Zaman
Z₀	Giriş empedansı
Z_{load}	Yük empedansı
Z_{source}	Karakteristik empedans
Γ	Devrelerdeki kayıp oranı
ω	Açısal frekans

Simgeler**Açıklama** Ω

Direnç birimi ohm

 η

Güç yansıma oranı

 μH

Mikrohenry

1. GİRİŞ

Elektriğin keşfinden bu yana iletim ve dağıtım için kablolar tercih edilmiştir. Kabloların döşenmesi, bakımı gibi durumlar kimi zaman elektriğin uzak bölgelere ulaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Nikola Tesla tarafından elektriğin güvenli biçimde kablosuz iletimi amacıyla çalışmalar yapılmıştır fakat bu çalışmaların tam bir başarı ile sonuçlandırıldığına dair kesin bulgular yoktur [1].

2007 yılında Massachusetts Institute of Technology bünyesinde yapılan çalışmalar sonucunda elektriğin rezonant kuplaj yöntemi ile iletilebileceğine dair sonuçlar yayınlanmıştır [2]. Bu yayının ardından çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bakır şeritler ve bunların arasına yerleştirilmiş izolatör ile oluşturulan kapasitör ve indüktör ile tıbbi cihazlarda enerji transferinin mümkün kılınabileceği bulunmuştur [3]. Canlı dokular içerisinde bulunan rezonatöre nasıl enerji transferi yapılacağı yayınlanmıştır [4]. Bir canlı içerisinde bulunan rezonatöre değişken frekanslarda nasıl enerji verileceği anlatılmıştır [5]. Tıbbi alanda enerji ile birlikte veri transferinin farklı boyut ve özelliklerdeki rezonatörlerle gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir [6]. Vücut etrafında birden fazla alıcı rezonatör olması durumunda enerji transferinin sağlanabileceği belirtilmiştir [7]. Bu yöntemi kullanarak vücuttaki rezonatörlere enerji transferi sağlanırken rezonatörlerin tam hizalanmadığı durumlarda bile enerji transferinin bu durumdan fazla etkilenmediği açıklanmıştır [8]. Bu tez çalışmasında da benzeri yapılmış olan araya başka bir rezonatör girmesi durumunda transferin nasıl etkilendiği yayınlanmıştır [9]. Rezonatörlerin karakteristik empedans değerleri ile rezonatörler arasındaki mesafeye göre verim sonuçları açıklanmıştır [10]. Ulaşım sisteminde bu yöntemin nasıl kullanılabileceği belirtilmiştir [11]. Birden fazla rezonatör ile kablosuz sensör ağlarının nasıl kurulabileceği üzerine açıklamalarda bulunulmuştur [12].

Bu teknolojiyi isimlendirmek için İngilizce Wireless (Kablosuz) ve Electricity (Elektrik) kelimelerinin birleşiminden oluşturulan *Witricity* kelimesi kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında rezonant kuplaj yöntemini kullanarak kablosuz elektrik iletiminde verimi artırma ve antenlerin konumuna bağlı olarak verimlilik konularında literatür taraması yapılmıştır. Tarama sonucunda varılan sonuçlar neticesinde laboratuvar ortamında deneysel araştırmalar yapılmıştır. Deneylede gönderici ve alıcı antenlerin merkezi daha önce yapılan birçok çalışmanın aksine dikey düzlemde değil, yatay düzlemde hizalanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçlar neticesinde yatay düzlemde hizalama yapıldığında verim düşmekle birlikte yine de kablosuz enerji transferi yapılabileceği gösterilmiştir. Daha önce yapılan çalışmaların bir kısmı tekrarlanmış, daha önce yapılmamış incelemelerde bulunulmuş ve sonuçlar üzerinden öneriler sunulmuştur.

2. MANYETİK REZONANT KUPLAJ İLE ELEKTRİK İLETİMİ

Bu yöntemle enerji transferi en basit haliyle RLC rezonans devrelerinin oluşturulmasına dayanır. Karşılıklı reaktansları eşit ve en az iki rezonans devresinden oluşan sistem enerji transferi yapmaya eğilimlidir. Detaylı açıklamalar alt başlıklarda verilmiştir.

2.1. Kuplajlı Mod Teorisi

Kablosuz enerji transfer sistemini fiziksel olarak açıklamada kullanılabilecek teoridir. Kuplajlı mod teorisi şu şekilde açıklanabilir [2, 8, 13, 14]:

Kablosuz enerji transferi alıcı ve gönderici olarak iki kısımdan oluşur. Alıcı ve gönderici rezonatörler endüktif kuplajlıdır ve gönderici tarafta enerji salınımlı olarak verilmektedir.

Faraday Yasası'na dayanan manyetik endüksiyon metodu (trafolarda olduğu gibi) uzak mesafelere enerji transferi için verimsizdir. Çünkü birinci ve ikinci sargılarda hızlı manyetik kuplaj düşümü yaşanır. Kablosuz enerji transferi tasarımında gönderici rezonatörden alıcı rezonatöre doğru transfer verimini önemli ölçüde artıran “tünelleyci” manyetik alanlar, güçlü kuplajlı manyetik rezonansa kullanılmıştır. Tünelleme etkisi klasik fizik ile açıklanamayan bir olaydır ve kuantum fiziği ile açıklanabilir. Tünelleme etkisi kısaca klasik fizikte önündeki engeli aşmaya yeterli gücü olmayan parçacığın kuantum mekaniği kurallarına uyarak bu engeli aşması şeklinde açıklanabilir [13]. Bu tünelleme etkisine bağlı olarak iletim mesafesi artabilmektedir. Bu işlemin arkasındaki fiziksel operasyonda iki rezonatörün yakın alanları (sönümlü dalgalar) birbiriyle güçlü kuplajlaşmaya girer ve belli rezonans frekansında enerji transferine imkan tanınır. Dalgalı enerji transferinin tepki süresi, sistem kayıplarının zaman sabitlerinden çok daha küçük olacak şekilde tasarlandığı için sistemde kayıpların oluşması öncesinde transfer gerçekleşebilmektedir. Elektromanyetik dalgaların oluşturduğu rezonant dalga boyu, bu tür çalışmalarda kullanılan rezonatörlerin çapından daha büyük olduğu için kuplajlı manyetik alanlar

etkin biçimde rezonant olmayan nesnelere atlayarak enerji transfer yolunda ilerler. Dolayısıyla bu orta ölçekli (1-3 metre) enerji transfer şeklinde göndericinin ve alıcının birbirini doğrudan görmesi şart değildir. *Witricity* sistemi elektromanyetik enerji transfer sistemlerinden daha güvenlidir çünkü bu sistem enerji transferinde canlı organizmalarla zayıf etkileşimde bulunan manyetik alan kullanmaktadır.

Kayıpların dikkate alınmadığı kuplajsız rezonatörlerin ω_1 ve ω_2 doğal frekansları için frekans genlikleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{da_1(t)}{dt} = j\omega_1 a_1(t) \quad (2.1)$$

$$\frac{da_2(t)}{dt} = j\omega_2 a_2(t) \quad (2.2)$$

Kuplajlaşma sebebiyle her iki rezonatörde yansıma etkileri oluşacaktır. Bu durumda iki rezonatör arasındaki basit formülleştirmede doğal frekansları ω_1 ve ω_2 olan kuplajlı iki kayıpsız rezonatörün frekans genlikleri $a_1(t)$ ve $a_2(t)$ 'yi aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$\frac{da_1(t)}{dt} = j\omega_1 a_1(t) + k_{12} a_2(t) \quad (2.3)$$

$$\frac{da_2(t)}{dt} = j\omega_2 a_2(t) + k_{21} a_1(t) \quad (2.4)$$

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (2.5)$$

Burada k_{12} ve k_{21} iki mod (gönderici ve alıcı) arasındaki kuplajlaşma katsayısıdır ve operatörden ziyade karmaşık sayı olarak ele alınabilir. Eş. 2.5 karşılıklı endüktansı belirtmektedir. Karşılıklı endüktansın yüksek olması rezonatörler arası transferin daha verimli olması anlamına gelmektedir. Eş. 2.5'te de görülebileceği gibi transferde karşı tarafa enerjiyi daha verimli iletmek için k kuplajlaşma katsayısının yüksek olması gerekmektedir. k kuplajlaşma katsayısı kullanılan manyetik malzemenin cinsine ve endüktansa bağlı olarak değişmektedir. Kuplajlaşma katsayısı

artırılıp endüktans üzerinde enerji depolanma durumu minimize edilip karşı tarafa transfer iyileştirilebilir. Bu durumda kuplajlaşma katsayısı “1”e yaklaşacak ve güçlü kuplajlaşma oluşacaktır. Enerjinin Korunumu Kanunu’na göre k_{12} ve k_{21} üzerinde bir sınırlama uygulanmalıdır. Enerjinin Korunumu Kanunu’na göre bir sistemde toplam enerji değişmez. Dolayısıyla enerji kaybının hiç olmadığı sistemin toplam enerjisinin zamana göre değişimi sıfır olmalıdır.

Genlikleri belirtilen rezonatörlerin enerjileri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{d}{dt}(|a_1|^2) = \frac{d}{dt}[a_1(t)a_1^*(t)] = a_1^*(t) \frac{da_1(t)}{dt} + a_1(t) \frac{da_1^*(t)}{dt} \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{dt}(|a_2|^2) = \frac{d}{dt}[a_2(t)a_2^*(t)] = a_2^*(t) \frac{da_2(t)}{dt} + a_2(t) \frac{da_2^*(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Rezonatörlerin zamana göre toplam enerji değişimi ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{d}{dt}(|a_1|^2 + |a_2|^2) = a_1(t) \frac{da_1^*(t)}{dt} + a_1^*(t) \frac{da_1(t)}{dt} + a_2(t) \frac{da_2^*(t)}{dt} + a_2^*(t) \frac{da_2(t)}{dt} = 0 \quad (2.8)$$

Eş. 2.3 ve Eş. 2.4’ün eşlenik ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{da_1^*(t)}{dt} = -j\omega_1 a_1^*(t) + k_{12}^* a_2^*(t) \quad (2.9)$$

$$\frac{da_2^*(t)}{dt} = -j\omega_2 a_2^*(t) + k_{21}^* a_1^*(t) \quad (2.10)$$

Eş. 2.6 ve Eş. 2.7’nin açık ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d}{dt}(|a_1|^2) = -j\omega_1 a_1(t)a_1^*(t) + k_{12}^* a_1(t)a_2^*(t) + j\omega_1 a_1(t)a_1^*(t) + k_{12} a_2(t)a_1^*(t) \quad (2.11)$$

$$\frac{d}{dt}(|a_2|^2) = -j\omega_2 a_2(t)a_2^*(t) + k_{21}^* a_2(t)a_1^*(t) + j\omega_2 a_2(t)a_2^*(t) + k_{21} a_1(t)a_2^*(t) \quad (2.12)$$

Eş. 2.11 ve Eş. 2.12 taraf tarafa toplandığında sistemin toplam enerjisini aşağıda gösterilen Eş. 2.13 ile verebiliriz.

$$a_1(t)k_{12}^*a_2^*(t) + a_1^*(t)k_{12}a_2(t) + a_2(t)k_{21}^*a_1^*(t) + a_2^*(t)k_{21}a_1(t) = 0 \quad (2.13)$$

Eş. 2.13 düzenlendiğinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$a_1^*(t)a_2(t)(k_{12} + k_{21}^*) + a_1(t)a_2^*(t)(k_{21} + k_{12}^*) = 0 \quad (2.14)$$

$a_1(t)$ ve $a_2(t)$, keyfi başlangıç genliklerine ve faza sahip olabileceğinden kuplajlaşma katsayıları

$$k_{12} + k_{21}^* = 0 \quad (2.15)$$

durumunu sağlar. Kuplajlı sistemin doğal frekansları için çözüm yapılırken Eş. 2.3 ve Eş. 2.4'ten $a_1(t)$ ve $a_2(t)$ genlikleri için iki tane homojen eşitlik elde edebiliriz. Eş. 2.3 ve Eş. 2.4'ten $a_1(t) = A_1.e^{j\omega t}$ ve $a_2(t) = A_2.e^{j\omega t}$ olarak

$$\frac{da_1(t)}{dt} = A_1.j\omega e^{j\omega t} \quad (2.16)$$

$$\frac{da_2(t)}{dt} = A_2.j\omega e^{j\omega t} \quad (2.17)$$

sonuçlarını buluruz. Eş. 2.16, Eş. 2.17, $a_1(t)$ ve $a_2(t)$ ifadelerini Eş. 2.3 ve Eş. 2.4'te yerine koyup denklem sistemini çözdüğümüzde

$$A_1 = \frac{k_{12}A_2}{j(\omega - \omega_1)} \quad (2.18)$$

$$A_2 = \frac{k_{21}A_1}{j(\omega - \omega_2)} \quad (2.19)$$

ifadelerini buluruz. Eş. 2.18 ve Eş. 2.19'u çözdüğümüzde Eş. 2.20'yi elde ederiz.

$$\omega^2 - (\omega_1 + \omega_2)\omega + (\omega_1\omega_2 + k_{12}k_{21}) = 0 \quad (2.20)$$

Eş. 2.15'i kullanarak $k_{12}k_{21}$ çarpımını $(-k_{21}^*)k_{21}$ ve $-|k_{21}|^2$ şeklinde ifade edebiliriz. Aynı şekilde Eş. 2.15'i tekrar düzenlediğimizde $k_{12}k_{21}$ çarpımını $(-k_{12}^*)k_{12}$ ve $-|k_{12}|^2$ şeklinde ifade edebiliriz.

Bulunan ifadeler Eş. 2.20'de yerine konulup denklemin kökleri de ikinci derece denklem çözüm formülü yardımıyla

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right)^2 + |k_{12}|^2} \equiv \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \pm \Omega_0 \quad (2.21)$$

şeklinde bulunur. Eş. 2.21 kuplajlı sistemin iki frekansının Ω_0 kadar ayrıldığını gösterir. Kısmen $\omega_1 = \omega_2$ iken kuplajlı modların iki doğal frekansının farkı $2\Omega_0$ (veya $2|k_{12}|$)'dır.

Genlikleri verilen rezonatörlere ait sistemin çözümünü başka bir yoldan da gösterebiliriz.

Eş. 2.3 ve Eş. 2.4'te $a_1(t)$ 'yi x , $a_2(t)$ 'yi y , $j\omega_1$ 'i a_1 , k_{12} 'yi b_1 , $j\omega_2$ 'yi b_2 ve k_{21} 'i a_2 olarak gösterelim. Bu durumda

$$\frac{dx}{dt} = a_1x + b_1y \quad (2.22)$$

$$\frac{dy}{dt} = a_2x + b_2y \quad (2.23)$$

eşitlikleri elde edilir. Eş. 2.22'nin türevi

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a_1 \frac{dx}{dt} + b_1 \frac{dy}{dt} \quad (2.24)$$

olarak bulunur. Eş. 2.23'ü Eş. 2.24'te yerine koyduğumuzda

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a_1 \frac{dx}{dt} + b_1(a_2x + b_2y) \quad (2.25)$$

eşitliğini yazabiliriz. Eş. 2.25'i düzenlediğimizde

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a_1 \frac{dx}{dt} + b_1a_2x + b_2b_1y \quad (2.26)$$

eşitliğini elde edebiliriz. Eş. 2.22'de bulunan b_1y ifadesini çekip Eş. 2.26'da yerine koyup denklem sistemini düzenlediğimizde

$$\frac{d^2x}{dt^2} - (a_1 + b_2) \frac{dx}{dt} + (a_1b_2 - b_1a_2)x = 0 \quad (2.27)$$

eşitliğini buluruz. Bu ikinci derece diferansiyel denklemi çözmek için x yerine $Ae^{\lambda t}$ yazılabilir. Bu durumda

$$\frac{dx}{dt} = A\lambda e^{\lambda t} \quad (2.28)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A\lambda^2 e^{\lambda t} \quad (2.29)$$

eşitliklerini yazabiliriz. Eş. 2.27'yi tekrar yazdığımızda

$$\lambda^2 Ae^{\lambda t} - \lambda(a_1 + b_2)Ae^{\lambda t} + (a_1b_2 - b_1a_2)Ae^{\lambda t} = 0 \quad (2.30)$$

denklemimizi elde edip düzenlediğimizde

$$\lambda^2 - (a_1 + b_2)\lambda + (a_1b_2 - b_1a_2) = 0 \quad (2.31)$$

eşitliğini elde ederiz. Eş. 2.31 ile verilen ikinci derece bir bilinmeyenli denklemin köklerini ikinci derece denklem kök hesaplama formülü olan

$$\lambda_{1,2} = \frac{(a_1 + b_2) \mp \sqrt{(a_1 + b_2)^2 - 4(a_1b_2 - b_1a_2)}}{2} \quad (2.32)$$

yardımı ile bulabiliriz. Aynı zamanda a_1 , a_2 , b_1 ve b_2 ifadelerini köklerin hesaplanmasında yerine koyup düzenleme yaptığımızda

$$\lambda_1 = j\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right) + j\sqrt{\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right)^2 + |k_{21}|^2} \quad (2.33)$$

$$\lambda_2 = j\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right) - j\sqrt{\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right)^2 + |k_{21}|^2} \quad (2.34)$$

köklerini buluruz. Bu sonuç Eş. 2.21 ile aynıdır. İşlem kolaylığı açısından Eş. 2.33 ve Eş. 2.34'ü aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\lambda_1 = jp + jq \quad (2.35)$$

$$\lambda_2 = jp - jq \quad (2.36)$$

Sabit katsayılı homojen lineer denklem sistemlerinin çözümünün $y = (c_1 + c_2x + \dots + c_k x^{k-1})e^{\lambda x} + c_{k+1}e^{\lambda_{k+1}x} + \dots + c_n e^{\lambda_n x}$ şeklinde ifade edilebileceğini biliyoruz. Bu durumu kendi denklem sistemimize uyguladığımızda

$$x = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} \quad (2.37)$$

eşitliğini yazabiliriz. Eş. 2.35 ve Eş. 2.36'yı Eş. 2.37'de yerine koyup düzenlediğimizde

$$x = e^{jpt} (A_1 e^{jqt} + A_2 e^{-jqt}) \quad (2.38)$$

eşitliğini elde edip tekrar düzenlediğimizde

$$x = e^{jpt} [(A_1 + A_2) \cos qt + j(A_1 - A_2) \sin qt] \quad (2.39)$$

eşitliğini buluruz. Burada $(A_1 + A_2)$ 'yi c_1 , $j(A_1 - A_2)$ 'yi c_2 olarak Eş. 2.39'u aşağıdaki gibi gösterebiliriz.

$$x = e^{jpt} (c_1 \cos qt + c_2 \sin qt) \quad (2.40)$$

Eş. 2.3'ün $t=0$ anı için türevini aldığımızda

$$\left. \frac{da_1}{dt} \right|_{t=0} = j\omega_1 a_1(0) + k_{12} a_2(0) \quad (2.41)$$

sonucunu buluruz. Eş. 2.40'ın $t=0$ anı için türevini aldığımızda

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = jpc_1 + c_2 q \quad (2.42)$$

sonucunu buluruz. $a_1(t)$ 'yi

$$a_1(t) = e^{jpt} (c_1 \cos qt + c_2 \sin qt) \quad (2.43)$$

şeklinde yazabiliriz. Eş. 2.43'ün $t=0$ anı için değeri

$$a_1(0) = c_1 \quad (2.44)$$

olarak bulunur. Elimizde bulunan p , q ve c_1 değerlerini Eş. 2.40 ve Eş. 2.41'de yerine koyup bu eşitlikleri aşağıdaki gibi birbirine eşitleyip çözebiliriz.

$$j\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right)a_1(0) + c_2\Omega_0 = j\omega_1 a_1(0) + k_{12}a_2(0) \quad (2.45)$$

Eş. 2.45'i düzenlediğimizde c_2 'yi aşağıdaki gibi buluruz.

$$c_2 = ja_1(0)\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2\Omega_0}\right) + \frac{k_{12}}{\Omega_0}a_2(0) \quad (2.46)$$

Bilinen p , q , c_1 , c_2 değerlerini Eş. 2.43'te yerine koyduğumuzda $t=0$ anı için $a_1(t)$ 'yi aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$a_1(t) = \left[a_1(0)(\cos \Omega_0 t - j \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\Omega_0} \sin \Omega_0 t) + \frac{k_{12}}{\Omega_0} a_2(0) \sin \Omega_0 t \right] e^{j[(\omega_1 + \omega_2)/2]t} \quad (2.47)$$

Aynı yöntemle $t=0$ anı için $a_2(t)$ 'yi de aşağıdaki gibi buluruz.

$$a_2(t) = \left[\frac{k_{21}}{\Omega_0} a_1(0) \sin \Omega_0 t + a_2(0)(\cos \Omega_0 t - j \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\Omega_0} \sin \Omega_0 t) \right] e^{j[(\omega_1 + \omega_2)/2]t} \quad (2.48)$$

Böylece başlangıç değerleri belli rezonatörlerin genliklerini Eş. 2.47 ve Eş. 2.48'deki gibi ifade edebiliriz.

Sistemdeki toplam enerjinin sabit olduğu, kayıpları göz önüne almadığımız durumda $a_1(0) = 1$, $a_2(0) = 0$ ve $\omega_1 = \omega_2$ iken

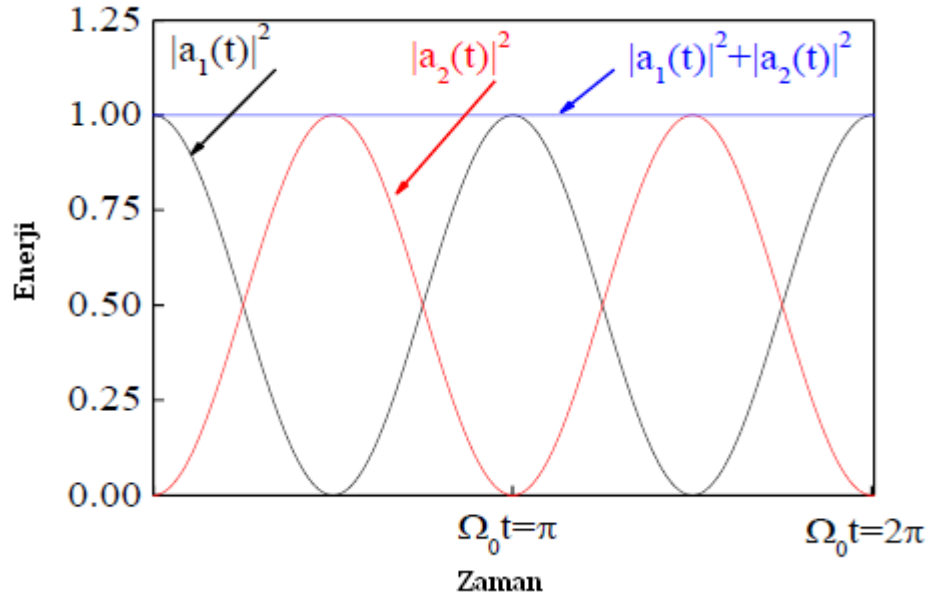
$$a_1(t) = \cos \Omega_0 t e^{j[(\omega_1 + \omega_2)/2]t} \quad (2.49)$$

$$a_2(t) = \sin \Omega_0 t e^{j[(\omega_1 + \omega_2)/2]t} \quad (2.50)$$

elde edilir.

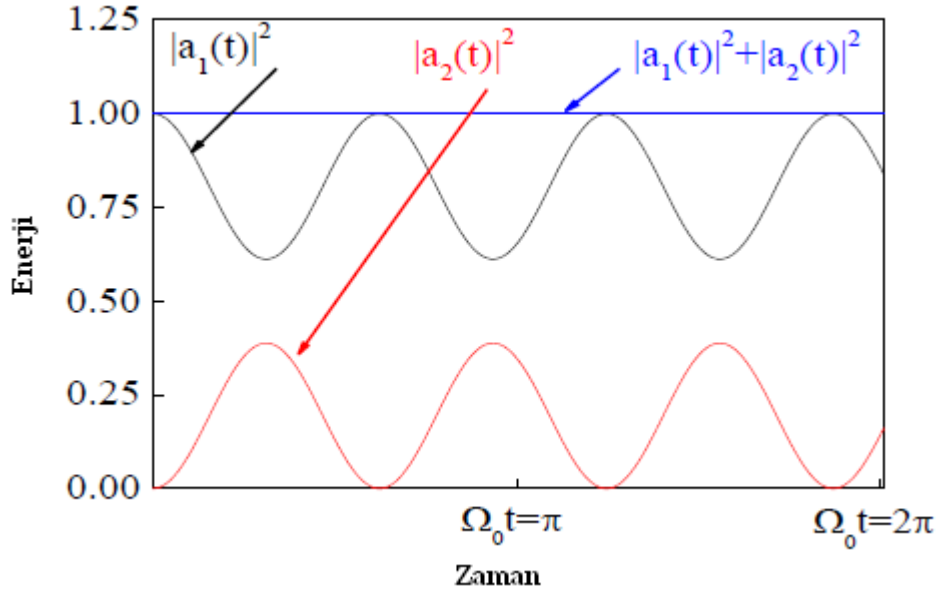
Gönderici rezonatörü mod 1, alıcı rezonatörü mod 2 olarak ifade edelim. Mod 1, $t=0$ anında tamamen uyarılır fakat $\Omega_0 t = \pi/2$ 'de tüm uyarılma mod 2'dedir. $\Omega_0 t = \pi$ 'de uyarılma mod 1'e döner ve mod 2 uyarılmamış hale geçer. Bu işlem kendisini tekrar eder. Enerji ileri ve geri yönde kuplajlaşma ile belirlenen $2\Omega_0$ (veya $2|k_{12}|$) frekans aralığıyla transfer olur. Bu transferin temeli yine kuantum mekaniğine dayanmaktadır [13].

Şekil 2.1 mod 1 ve mod 2 için zamanın fonksiyonu olarak enerjiyi gösterir [8]. Şekil 2.1 a) rezonant enerji değişiminin (*Witricity* sisteminde $\omega_1 = \omega_2$ iken) mod 1 ve 2 için tamamen sağlandığını ve bunun en etkin sistem performansına karşılık geldiğini gösterir.



a) Simetrik rezonans durumu

Şekil 2.1. Zamanın fonksiyonu olarak 1 ve 2 modlarında enerji [8]



b) Genel durum

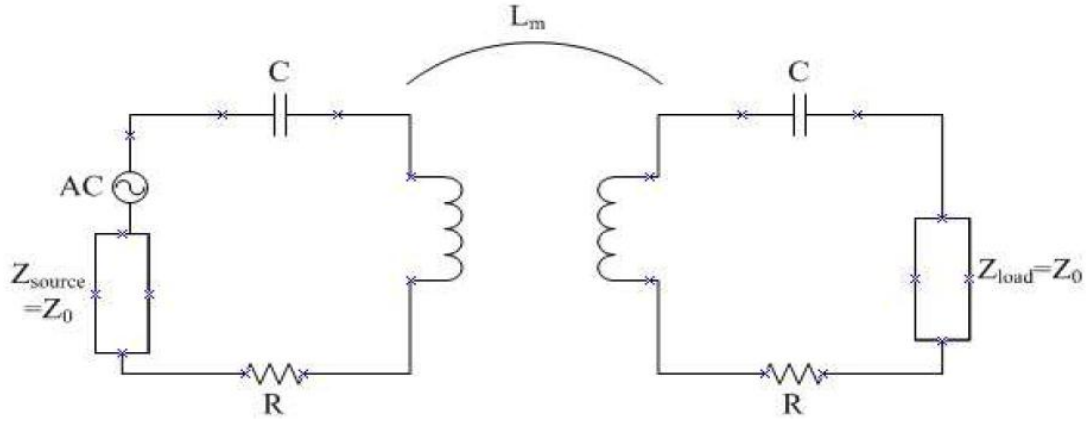
Şekil 2.1. (Devam) Zamanın fonksiyonu olarak 1 ve 2 modlarında enerji [8]

Aynı zamanda $\omega_1 \neq \omega_2$ iken mod 1'den mod 2'ye transfer Şekil 2.1 b)'de gösterildiği gibi sınırlı olur, verimsiz olur ve tamamlanamaz.

2.2. Manyetik Rezonant Kuplaj Teorisi

Bu teori, deneysel çalışmada izlenen yöntemleri açıklama açısından yol gösterici olmaktadır. Bu teori şu şekilde açıklanabilir [15]:

Manyetik rezonant kuplajlı RLC rezonans devresinin kurulup enerjinin elektromanyetik kuplajlaşma ile iletilmesine dayanır. Manyetik kuplajlaşma Şekil 2.2'deki gibi L_m karşılıklı endüktansı ile ifade edilebilir [15].



Şekil 2.2. Manyetik rezonans kuplaj eşdeğer devresi [15]

Z_{source} karakteristik empedansı, Z_{load} ise yük tarafındaki empedansı belirtmektedir. Z_0 empedansı yüksek frekanslı çoğu sistemde 50Ω olarak kabul görmektedir. Dirençsel kayıplar ve antenler tarafından oluşturulan ışıma kayıpları R ile gösterilmiştir. Rezonans frekansı eşdeğer devreden hesaplanabilir. Rezonansın sağlanması için Eş. 2.51’de gösterildiği gibi reaktansın sıfır olması gerekmektedir. Rezonatörler için yazılabilen çevre denklemleriyle oluşturulan Eş. 2.52 ve Eş. 2.53’ü kullanarak Eş. 2.54’ü elde edip kuplajlaşma katsayısı k ’yı hesaplayabiliriz. Eşitliklerdeki “ m ” alt indisi düşük rezonans frekansını, “ e ” alt indisi de yüksek rezonans frekansını göstermektedir.

$$\frac{1}{\omega L_m} + \frac{2}{\omega(L - L_m) - \frac{1}{\omega C}} = 0 \quad (2.51)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_0}{\sqrt{(1+k)}} = \frac{1}{\sqrt{(L + L_m)C}} \quad (2.52)$$

$$\omega_e = \frac{\omega_0}{\sqrt{(1-k)}} = \frac{1}{\sqrt{(L - L_m)C}} \quad (2.53)$$

$$k = \frac{L_m}{L} = \frac{\omega_e^2 - \omega_m^2}{\omega_e^2 + \omega_m^2} \quad (2.54)$$

Güç iletim verimi yine aynı devre kullanılarak türetilir. Güç yansıma oranı η_{11} ve iletim oranı η_{21} , Eş. 2.55 ve Eş. 2.56 ile tanımlanabilir. Burada S_{11} yansıyan dalga

oranı; S_{21} ise iletilen dalga oranıdır. Hesaplamaları basitleştirmek için R sıfır (0) Ω olarak alınırsa S_{21} Eş. 2.57 ile ifade edilebilir.

$$\eta_{11} = S_{11}^2 \times 100[\%] \quad (2.55)$$

$$\eta_{21} = S_{21}^2 \times 100[\%] \quad (2.56)$$

$$S_{21} = \frac{2jL_m Z_0 \omega}{L_M^2 \omega^2 - (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2 + 2jZ_0 (\omega L - \frac{1}{\omega C}) + Z_0^2} \quad (2.57)$$

2.3. Manyetik Rezonant Kuplaj Frekans Karakteristiği

Bu teorideki frekans karakteristiği aşağıdaki gibi açıklanabilir [16]:

Yapılan çalışmada giriş empedansının reel kısmında 11,4 MHz ve 12,3 MHz olarak iki rezonans frekansı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca giriş empedansının sanal kısmının sargılar göz önüne alınmadığında da aynı frekansları gösterdiği görülmüştür. Bu da sargı tarafından oluşturulan reaktif empedansın bu frekanslarda sıfır olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla elektromanyetik rezonans bu frekanslarda oluşmaktadır. Bu frekanslar arasındaki ayırım sargıların kuplajlaşma gücüne göre değişmektedir [2]. Bu iki frekans tek ve çift mod olarak adlandırılmıştır. Yük dağılımının asimetrik olduğu mod tek mod; simetrik olduğu mod ise çift moddur.

Yapılan çalışmada tek mod için manyetik alan şiddetinin iki sargı arasında büyük olduğu belirtilmiştir. Çift modda ise tam tersine manyetik alan şiddetinin minimum olduğu belirtilmiştir.

Kablosuz güç transferinde uzak alan yayılımı güç kaybı olarak görülür. Çift mod durumunda alıcı ve gönderici antenlerdeki akımların zıt yönleri olduğu için bu antenler tarafından oluşturulan uzak alan etkisi karşılıklı olarak yok edilir. Bu çalışma sonucunda da çift mod rezonansı (yüksek frekans) daha iyi sonuç vermiştir.

Her iki anten arasındaki mesafe arttıkça antenler arası kuplajlaşmanın azaldığı ve kuplajlaşma katsayısının düşmektedir [15]. Dolayısıyla devrenin empedansı, güç transfer verimi ile rezonans frekansını etkileyerek değişecektir. Antenler arası mesafe arttıkça her iki rezonans frekansı birbirine yaklaşacak ve sonunda tek bir frekansa ulaşacaktır. Aradaki mesafe daha da artar ise maksimum verim düşecektir.

2.4. Kablosuz Enerji Transferinde Röle Etkisi

Alıcı ve gönderici rezonans devreleri arasına aynı özelliklere ve rezonans frekansına sahip bir rezonans devresi daha yerleştirilmiştir [9]. Bu devre ile birlikte Kuplajlı Mod Teorisi aşağıdaki denklemlerle yeniden ifade edilebilir.

$$\frac{da_S(t)}{dt} = (j\omega_S - \Gamma_S)a_S(t) + jk_{SD}a_D(t) + jk_{SR}a_R(t) \quad (2.58)$$

$$\frac{da_R(t)}{dt} = (j\omega_R - \Gamma_R)a_R(t) + jk_{RS}a_S(t) + jk_{RD}a_D(t) \quad (2.59)$$

$$\frac{da_D(t)}{dt} = (j\omega_D - \Gamma_D)a_D(t) + jk_{DS}a_S(t) + jk_{DR}a_R(t) \quad (2.60)$$

Eşitliklerdeki “ Γ ” ifadesi devrelerdeki kayıp oranı, “S” alt indisi kaynak (source), “R” alt indisi röle (relay), “D” alt indisi alıcı cihaz (device) anlamına gelmektedir. Bu eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalarda enerji değişiminin tek alıcı ve tek verici durumuna göre daha verimli ve daha çabuk olduğu görülmüştür. Tek alıcı ve tek verici durumunda 30 cm’lik mesafede %10’luk verim elde edilirken arada röle olduğu durumda verimin %46 olduğu tespit edilmiştir. Buna ilaveten iletim yönünün düz bir yola ek olarak kıvrımlı bir şekilde yönlendirilebileceği de çalışmada belirtilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Kablosuz enerji transferinde verimi artırma yollarını araştırma amacıyla laboratuvar ortamında deneyler yapılmıştır. Deneyde kullanılan bobinler el yapımıdır. Resim 3.1’de sırayla gösterilen B, C ve D adlı 3 adet bobin kullanılmıştır.



Resim 3.1. Deneylerde kullanılan B, C, D adlı bobinler

B bobini 54 sarımlı, 6,4 cm yüksekliğinde, 32 cm çevreye; C bobini 56 sarımlı, 6,7 cm yüksekliğinde 31,5 cm çevreye; D bobini ise 58 sarımlı, 6,7 cm yüksekliğinde 32 cm çevreye sahiptir. Bobinler, cam şişelerin etrafına 1 mm kalınlığında üzeri emaye kaplı bakır tellerin sarılmasıyla oluşturulmuştur. Bobinlerin endüktans değerini hesaplamada

$$L = \frac{d^2 n^2}{l + 0,45d} \quad (3.1)$$

formülü kullanılmıştır. Burada “d” bir sargının çapını, “n” sarım sayısını, “l” sargı uzunluğunu göstermektedir. Bu formül ile yapılan hesaplamada B bobininin endüktansı 271 μH , C bobininin endüktansı 277 μH , D bobininin endüktansı ise 297 μH olarak hesaplanmıştır. Bobinlerin aynı frekansta rezonansa geçebilmesi için ilgili kapasitör değerleri ise

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

rezonans frekansı hesaplama formülü yardımıyla hesaplanmıştır. Deneyde kullanılan sinyal jeneratörü maksimum 3 MHz büyüklüğünde frekans üretebildiği için teorik frekanslar 500 KHz, 1 MHz, 1,5 MHz, 2 MHz, 2,5 MHz, 3 MHz ve 3,5 MHz olarak seçilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Bu teorik frekanslar için Eş. 3.2 kullanılarak teorik kapasitans değerleri hesaplanmış; deneyde ise bu değerlere en yakın kapasitansı verecek kapasitörler malzeme listesinden seçilmiştir. Teorik olarak hesaplanan kapasitör değerleri ile deneyde kullanılan kapasitör değerleri Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. İlgili frekanslar için teorik hesaplama sonucunda B, C ve D rezonatörleri için bulunan teorik kapasitör değerleri ile deneyde kullanılan kapasitör değerleri

	500 KHz	1 MHz	1,5 MHz	2 MHz	2,5 MHz	3 MHz	3,5 MHz
B (Teorik)	373,8pF	93,47pF	41,54 pF	23,37 pF	14,95 pF	10,38 pF	7,63 pF
B (Deney)	373pF	94 pF	41,2 pF	23,2 pF	15 pF	10,2 pF	7,5 pF
C (Teorik)	365,78pF	91,45 pF	40,64 pF	22,86 pF	14,63 pF	10,16 pF	7,46 pF
C (Deney)	365,2pF	91 pF	40 pF	23 pF	14,7 pF	10 pF	7,5 pF
D (Teorik)	-	85,28 pF	-	-	-	-	-
D (Deney)	-	85 pF	-	-	-	-	-

Deneyleerde teorik hesaplanan rezonans frekans değerleri ile deneyleerde ölçülen geręek rezonans frekans değerleri farklı çıkmıştır. Deneyleerde kullanılan malzemelerin ideal olmadığı ve çevre şartlarından deney setinin etkilendiği göz önüne alındığında bu farklılıklar ortaya çıkabilmektedir.

3.1. Sabit Frekans için Direnç Değişimine Bağlı Verim Değerleri

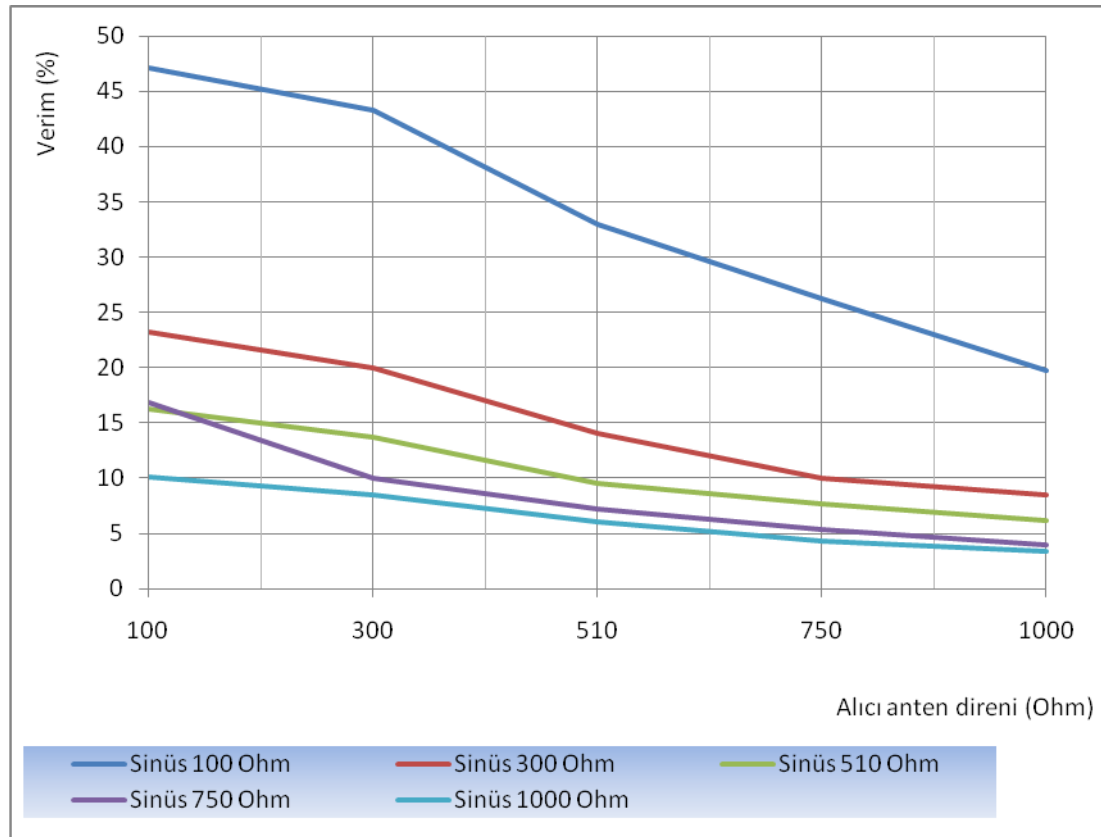
Bu deneyde gönderici ve alıcı bobinler maksimum enerji transferinin yaşandığı rezonans frekansı olan 923 KHz'te iken gönderici ve alıcı bobinlerde dirençler değiştirilmiştir. Direnç değişimine bağlı olarak sistemde enerji transfer oranları ölçölmüştür. Ölçüm sırasında iki bobin arasındaki mesafe 3 mm olarak sabit tutulmuştur. Ölçümlerde 100, 300, 510, 750 ve 1000 Ω 'luk dirençler kullanılmıştır. Sinüs, kare ve üçgen dalga verilirken sinyal jeneratörü farklı genlik değerleri üretmiştir. Ölçüm yapılırken dirençler üzerindeki RMS voltaj değerleri okunup güç değerleri hesaplanmıştır. İlgili sonuçlar Çizelge 3.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.2. Sinüs, kare ve üçgen dalga için 923 KHz rezonans frekansında gönderici ve alıcı bobinlerdeki yük dirençlerinin değişimine bağlı verim değerleri

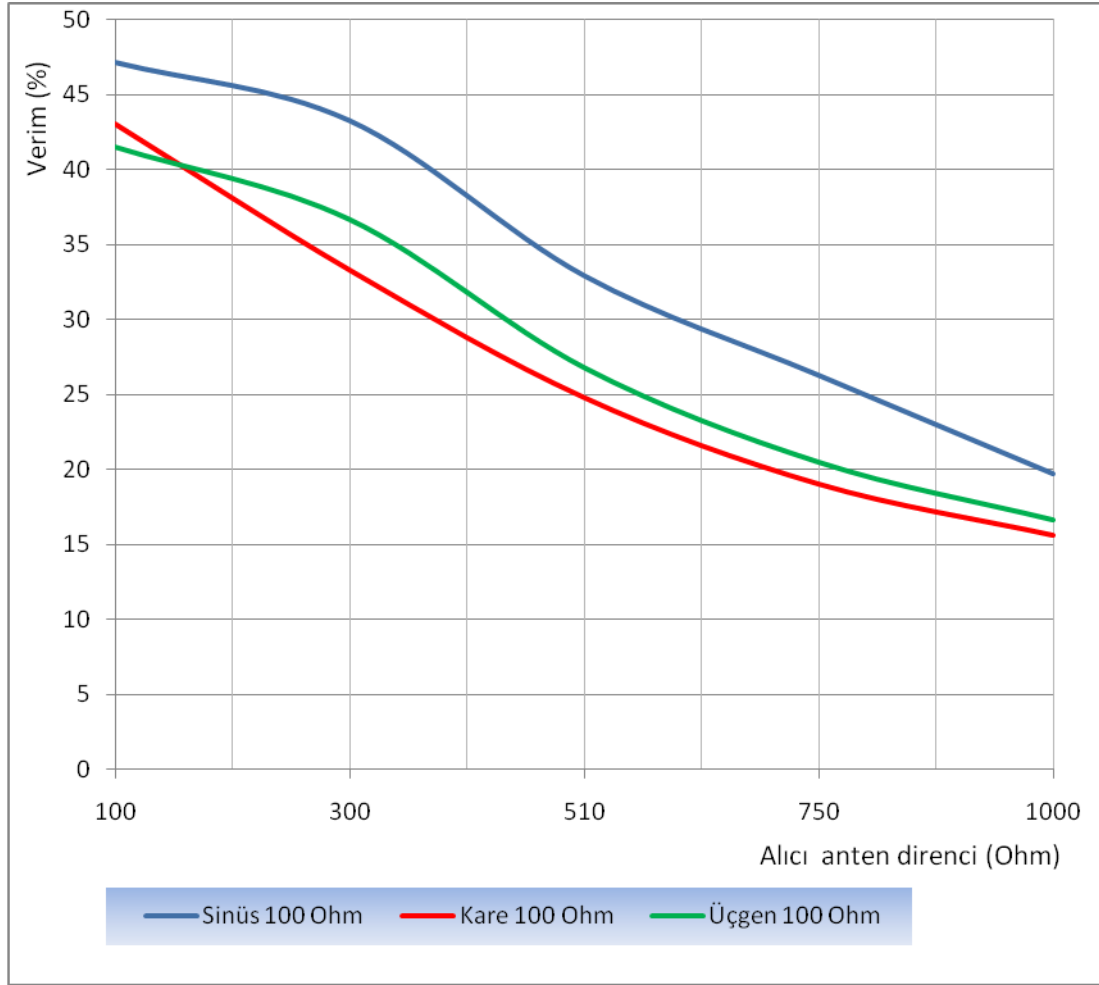
Dalga tipi	Gönderici			Alıcı			Verim (%)
	Direnç (Ω)	Volt (V)	Güç (mW)	Direnç (Ω)	Volt (V)	Güç (mW)	
Sinüs	100	4,53	205,21	100	3,11	96,72	47,13
		4,53	205,21	300	5,16	88,75	43,25
		4,53	205,21	510	5,87	67,56	32,92
		4,53	205,21	750	6,36	53,93	26,28
		4,53	205,21	1000	6,36	40,45	19,71
Sinüs	300	6,36	134,83	100	1,77	31,33	23,24
		6,36	134,83	300	2,83	26,97	20
		6,36	134,83	510	3,11	18,96	14,06
		6,36	134,83	750	3,18	13,48	10
		6,36	134,83	1000	3,39	11,49	8,52
Sinüs	510	6,72	88,55	100	1,20	14,4	16,26
		6,72	88,55	300	1,91	12,16	13,73
		6,72	88,55	510	2,12	8,81	9,5
		6,72	88,55	750	2,26	6,81	7,69
		6,72	88,55	1000	2,33	5,43	6,13
Sinüs	750	7,07	66,65	100	1,06	11,24	16,86
		7,07	66,65	300	1,41	6,63	9,95
		7,07	66,65	510	1,56	4,77	7,16
		7,07	66,65	750	1,63	3,54	5,31
		7,07	66,65	1000	1,63	2,66	3,99
Sinüs	1000	7,07	49,98	100	0,71	5,04	10,08
		7,07	49,98	300	1,13	4,26	8,52
		7,07	49,98	510	1,24	3,01	6,02
		7,07	49,98	750	1,27	2,15	4,3
		7,07	49,98	1000	1,31	1,72	3,44
Kare	100	6,4	409,6	100	4,2	176,4	43,07
		6,4	409,6	300	6,4	136,53	33,33
		6,4	409,6	510	7,2	101,65	24,82
		6,4	409,6	750	7,65	78,03	19,05
		6,4	409,6	1000	8	64	15,63
Üçgen	100	2,42	58,56	100	1,56	24,33	41,55
		2,42	58,56	300	2,54	21,5	36,71
		2,42	58,56	510	2,83	15,7	26,81
		2,42	58,56	750	3	12	20,49
		2,42	58,56	1000	3,12	9,74	16,63

Çizelge 3.2'deki sonuçlar incelendiğinde dirençler ve frekans sabitken en iyi verimin sinüs dalgada elde edildiği, en kötü verimin ise kare dalgada elde edildiği gözlenmiştir. Sinüs dalgası yapısı gereği Faraday Yasası uyarınca diğer dalga türlerine oranla bobin üzerinde daha fazla akı oluşmasına neden olmaktadır. Deneysel sonuçlar da bu durumu doğrulamaktadır.

Sinüs dalgada ise en iyi verimin gönderici ve alıcı tarafta direnç değerleri minimum tutulduğunda (100Ω) elde edildiği; direnç değeri arttıkça elde edilen verimin düştüğü gözlenmiştir. Daha anlaşılır olması açısından Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 incelenebilir. Daha önce yapılan çalışmalarda karakteristik empedans değerinin artmasına karşılık verimin de arttığı belirtilmiştir [10]. Bu tez kapsamında yapılan deneydeki farkın rezonant antenlerin yerleşiminden kaynaklanması muhtemel görünmektedir.



Şekil 3.1. Sabit frekans ve sinüs dalgada gönderici taraftaki direnç değerlerine karşılık alıcı taraftaki direncin değişimine bağlı verim grafiği



Şekil 3.2. Gönderici tarafta sabit direnç var iken sinyal dalga tipinin değişimine ve alıcı tarafta direnç değişimine bağlı verim grafiği

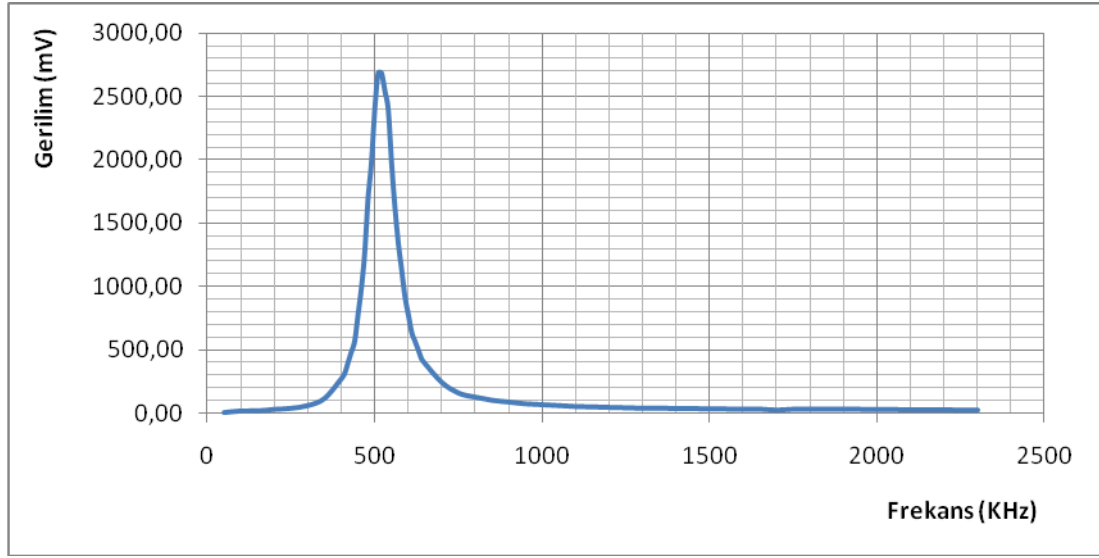
3.2. Frekansa Bağlı Enerji Transfer Oranları

Bu deneyde frekans değerleri arttıkça rezonans sisteminde elde edilen enerji transfer verimliliği ölçülmüştür. B ve C adlı bobinler bu deneyde kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de verilen kapasitör değerleri de ilgili bobinlere seri devre oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Alıcı ve gönderici rezonans devrelerinde yük olarak 100 Ω ’luk dirençler kullanılmıştır. Dirençler ve bobinler sabit iken sadece ilgili frekanslar için kapasitörler değiştirilmiştir. Bu deneyde iki bobin arası mesafe 3 mm tutulmuştur. Enerji transferinin maksimum olduğu frekanslarda bobinler arası mesafeler artırılarak maksimum enerji transfer mesafesi imkânlar dâhilinde ölçülmüştür.

Deneyde ölçülen frekanslar ve karşılığında okunan RMS voltaj değerleri her frekans değeri için oluşturulmuş çizelgelerde belirtilmiştir ve buna bağlı grafikler çizilmiştir.

Çizelge 3.3. 500 KHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları

Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)	Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)
1	50	1,41	34	700	240,42
2	100	14,14	35	750	155,56
3	150	14,14	36	800	123,74
4	200	26,87	37	850	98,99
5	250	35,36	38	900	84,85
6	300	56,57	39	950	70,71
7	350	113,14	40	1000	63,64
8	400	268,70	41	1050	56,57
9	410	311,13	42	1100	49,50
10	420	395,98	43	1150	45,96
11	430	480,83	44	1200	42,43
12	440	565,69	45	1250	38,89
13	450	777,82	46	1300	35,36
14	460	989,95	47	1350	35,36
15	470	1272,79	48	1400	33,94
16	480	1697,06	49	1450	32,53
17	490	1979,90	50	1500	31,11
18	500	2404,16	51	1550	29,70
19	510	2687,01	52	1600	28,28
20	520	2687,01	53	1650	28,28
21	530	2545,58	54	1700	21,21
22	540	2404,16	55	1750	28,28
23	550	1979,90	56	1800	28,28
24	560	1626,35	57	1850	26,87
25	570	1343,50	58	1900	26,87
26	580	1131,37	59	1950	26,87
27	590	919,24	60	2000	25,46
28	600	777,82	61	2050	25,46
29	610	636,40	62	2100	22,63
30	620	565,69	63	2150	22,63
31	630	494,97	64	2200	22,63
32	640	424,26	65	2250	21,21
33	650	388,91	66	2300	21,21

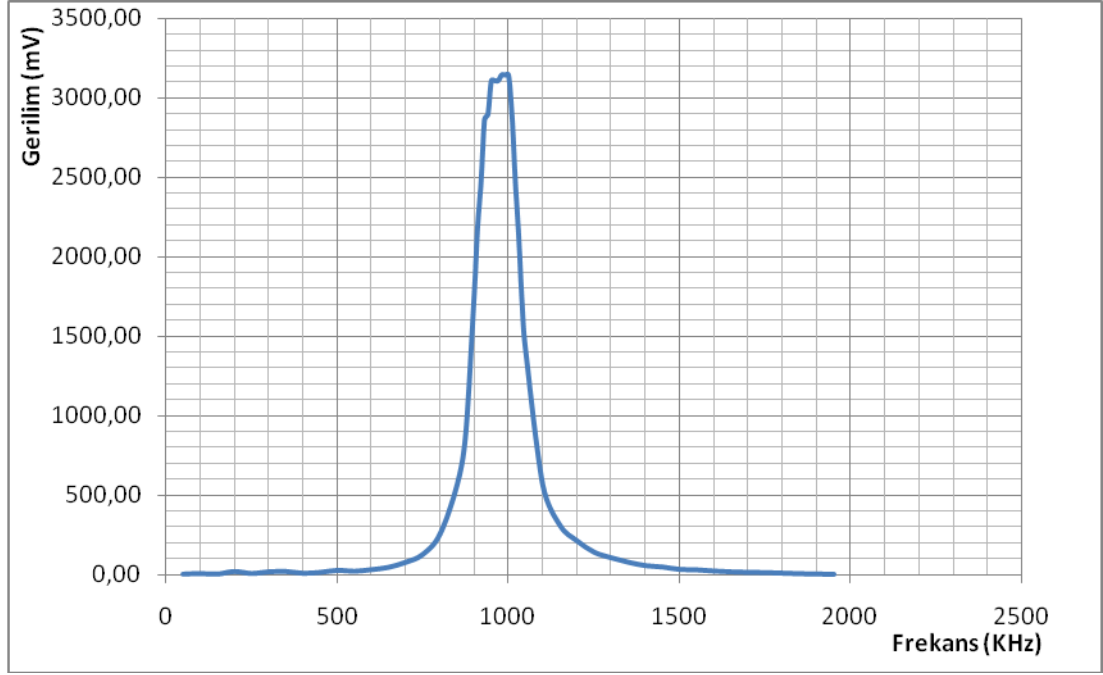


Şekil 3.3. 500 KHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği

500 KHz teorik frekans için enerji transferinin en üst seviyede olduğu 510-520 KHz aralığında deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de iken alıcı tarafında 22 mV ölçülmüştür.

Çizelge 3.4. 1 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları

Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)	Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)
1	50	2,83	27	980	3146,63
2	100	7,07	28	990	3146,63
3	150	2,83	29	1000	3146,63
4	200	19,80	30	1010	2899,14
5	250	7,07	31	1020	2474,87
6	300	17,68	32	1030	2121,32
7	350	19,80	33	1040	1697,06
8	400	8,49	34	1050	1414,21
9	450	14,14	35	1100	565,69
10	500	26,87	36	1150	311,13
11	550	21,21	37	1200	212,13
12	600	31,11	38	1250	141,42
13	650	45,96	39	1300	106,07
14	700	77,78	40	1350	77,78
15	750	127,28	41	1400	56,57
16	800	254,56	42	1450	48,08
17	850	565,69	43	1500	32,53
18	875	883,88	44	1550	29,70
19	900	1767,77	45	1600	22,63
20	910	2192,03	46	1650	17,68
21	920	2474,87	47	1700	14,14
22	930	2863,78	48	1750	12,73
23	940	2899,14	49	1800	9,19
24	950	3111,27	50	1850	5,66
25	960	3111,27	51	1900	3,54
26	970	3111,27	52	1950	2,12

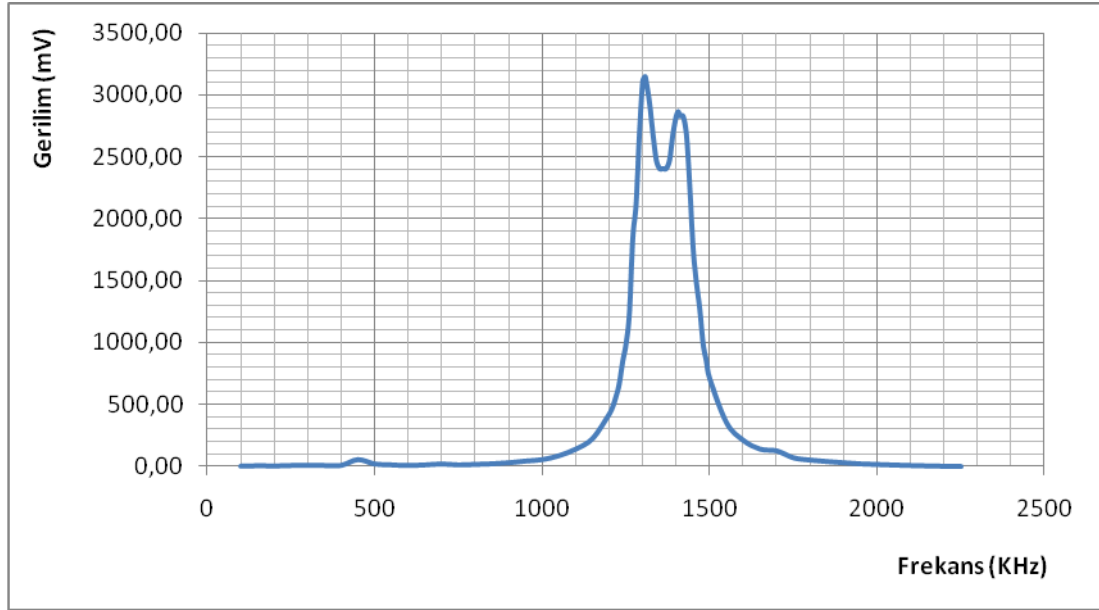


Şekil 3.4. 1 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği

1 MHz için iletimin en üst seviyede olduğu 980-1000 KHz arasında bobinler arası mesafe 64,4 cm iken enerji transferinin kesildiği gözlenmiştir.

Çizelge 3.5. 1,5 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları

Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)	Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)
1	100	3,54	36	1320	2934,49
2	150	7,07	37	1330	2687,01
3	200	4,95	38	1340	2474,87
4	250	8,49	39	1350	2404,16
5	300	8,49	40	1360	2404,16
6	350	8,49	41	1370	2404,16
7	400	9,90	42	1380	2474,87
8	450	56,57	43	1390	2687,01
9	500	21,21	44	1400	2828,43
10	550	14,14	45	1406	2863,78
11	600	8,49	46	1410	2828,43
12	650	14,14	47	1420	2828,43
13	700	21,21	48	1430	2687,01
14	750	14,14	49	1440	2262,74
15	800	17,68	50	1450	1767,77
16	850	22,63	51	1460	1484,92
17	900	31,11	52	1470	1272,79
18	950	45,25	53	1480	989,95
19	1000	56,57	54	1490	848,53
20	1050	88,39	55	1500	707,11
21	1100	141,42	56	1550	353,55
22	1150	226,27	57	1600	212,13
23	1200	424,26	58	1650	141,42
24	1210	480,83	59	1700	127,28
25	1220	565,69	60	1750	70,71
26	1230	671,75	61	1800	53,03
27	1240	848,53	62	1850	41,01
28	1250	989,95	63	1900	31,11
29	1260	1237,44	64	1950	22,63
30	1270	1838,48	65	2000	16,97
31	1280	2121,32	66	2050	12,73
32	1290	2687,01	67	2100	8,49
33	1300	3111,27	68	2150	5,66
34	1307	3146,63	69	2200	2,83
35	1310	3111,27	70	2250	0,71



Şekil 3.5. 1,5 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği

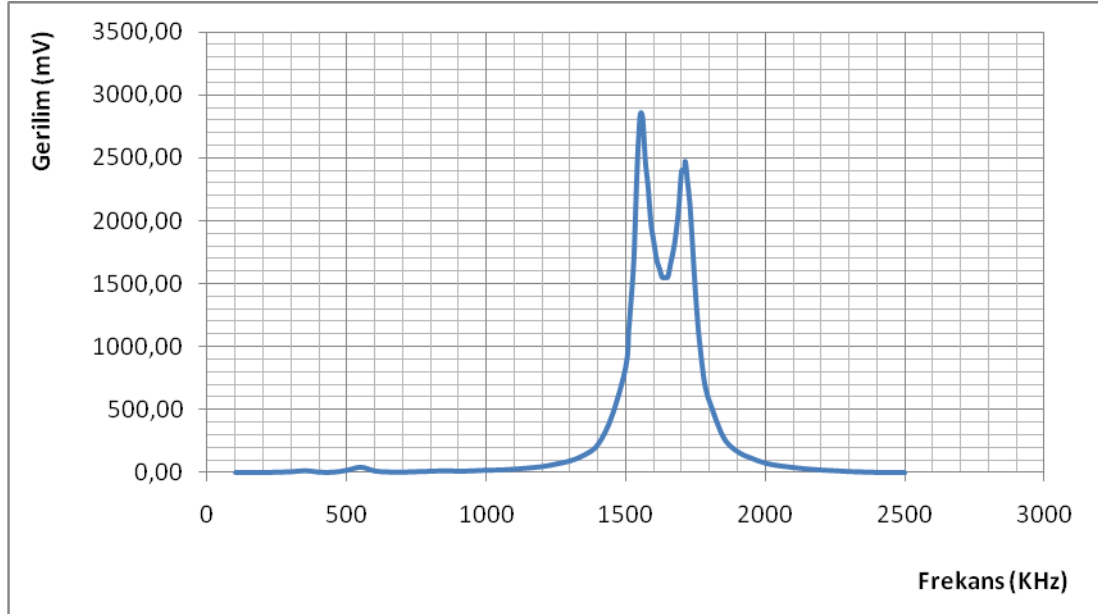
1,5 MHz teorik frekans için iletimin en üst seviyede olduğu 1307 KHz'te bobinler arası mesafe 99 cm iken enerji transferinin olmadığı gözlenmiştir. İkinci en iyi iletim frekansı olan 1406 KHz'te deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de alıcı tarafında 175 mV ölçülmüştür.

Çizelge 3.6. 2 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları

Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)	Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)
1	100	2,12	38	1590	1979,90
2	150	2,83	39	1600	1838,48
3	200	2,83	40	1610	1697,06
4	250	4,95	41	1620	1626,35
5	300	8,49	42	1630	1555,63
6	350	17,68	43	1640	1555,63
7	400	5,66	44	1650	1555,63
8	450	4,95	45	1660	1661,70
9	500	21,21	46	1670	1767,77
10	550	45,25	47	1680	1909,19
11	600	14,14	48	1690	2121,32
12	650	7,07	49	1700	2404,16
13	700	5,66	50	1710	2404,16
14	750	9,19	51	1713	2474,87
15	800	12,73	52	1720	2333,45
16	850	16,97	53	1730	2121,32
17	900	12,73	54	1740	1767,77
18	950	15,56	55	1750	1414,21
19	1000	21,21	56	1760	1131,37
20	1050	22,63	57	1770	919,24
21	1100	29,70	58	1780	742,46
22	1150	38,89	59	1790	636,40
23	1200	49,50	60	1800	565,69
24	1250	70,71	61	1850	282,84
25	1300	95,46	62	1900	169,71
26	1350	141,42	63	1950	116,67
27	1400	226,27	64	2000	77,78
28	1450	452,55	65	2050	56,57
29	1500	848,53	66	2100	42,43
30	1510	1131,37	67	2150	31,11
31	1520	1414,21	68	2200	22,63
32	1530	1767,77	69	2250	16,97
33	1540	2404,16	70	2300	10,61
34	1550	2828,43	71	2350	7,07
35	1554	2863,78	72	2400	3,54
36	1560	2828,43	73	2450	2,12

Çizelge 3.6. (Devam) 2 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları

37	1570	2474,87	74	2500	1,41
38	1580	2262,74			

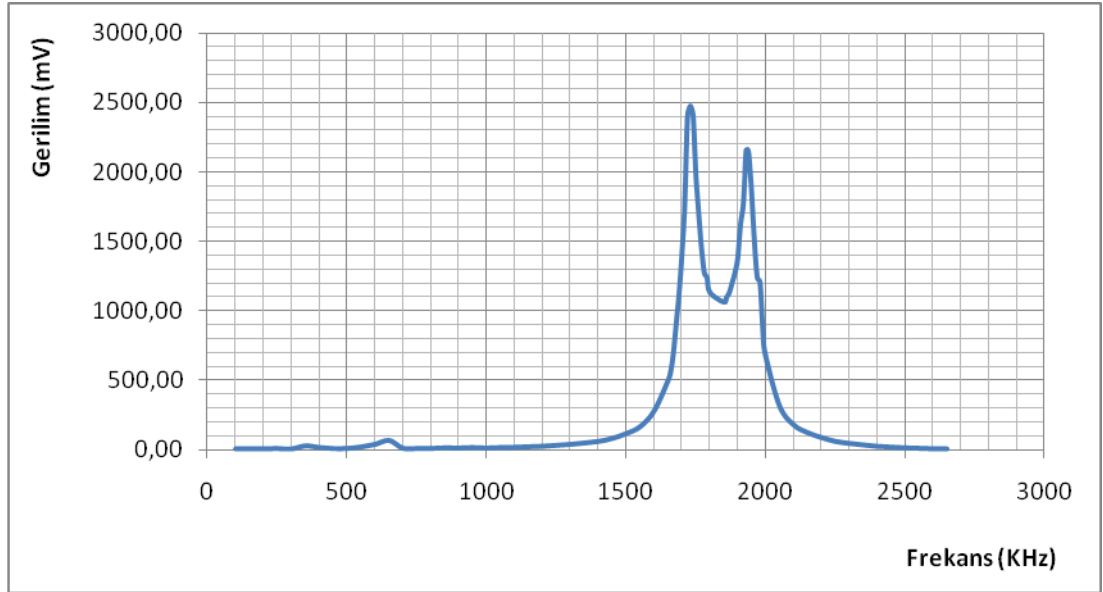


Şekil 3.6. 2 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği

2 MHz teorik frekans için iletimin en üst seviyede olduğu 1554 KHz'te deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de alıcı tarafında 30 mV ölçülmüştür. İkinci en iyi iletim frekansı olan 1713 KHz'te deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de alıcı tarafında 170 mV ölçülmüştür.

Çizelge 3.7. 2,5 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları

Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)	Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)
1	100	2,12	40	1730	2474,87
2	150	2,12	41	1740	2404,16
3	200	3,54	42	1750	1979,90
4	250	4,95	43	1760	1697,06
5	300	2,12	44	1770	1449,57
6	350	24,04	45	1780	1272,79
7	400	12,73	46	1790	1237,44
8	450	4,95	47	1800	1131,37
9	500	5,66	48	1850	1060,66
10	550	16,97	49	1860	1096,02
11	600	35,36	50	1870	1131,37
12	650	63,64	51	1880	1202,08
13	700	7,07	52	1890	1272,79
14	750	5,66	53	1900	1378,86
15	800	5,66	54	1910	1626,35
16	850	10,61	55	1920	1767,77
17	900	8,49	56	1930	2156,68
18	950	12,73	57	1936	2160,21
19	1000	8,49	58	1940	2121,32
20	1050	12,73	59	1950	1838,48
21	1100	14,14	60	1960	1484,92
22	1150	17,68	61	1970	1237,44
23	1200	21,21	62	1980	1202,08
24	1250	28,28	63	1990	848,53
25	1300	35,36	64	2000	671,75
26	1350	45,25	65	2050	311,13
27	1400	56,57	66	2100	176,78
28	1450	77,78	67	2150	120,21
29	1500	113,14	68	2200	84,85
30	1550	162,63	69	2250	56,57
31	1600	275,77	70	2300	42,43
32	1650	494,97	71	2350	31,11
33	1660	565,69	72	2400	21,21
34	1670	707,11	73	2450	15,56
35	1680	919,24	74	2500	10,61
36	1690	1131,37	75	2550	7,07
37	1700	1414,21	76	2600	3,54
38	1710	1767,77	77	2650	2,12
39	1720	2404,16			

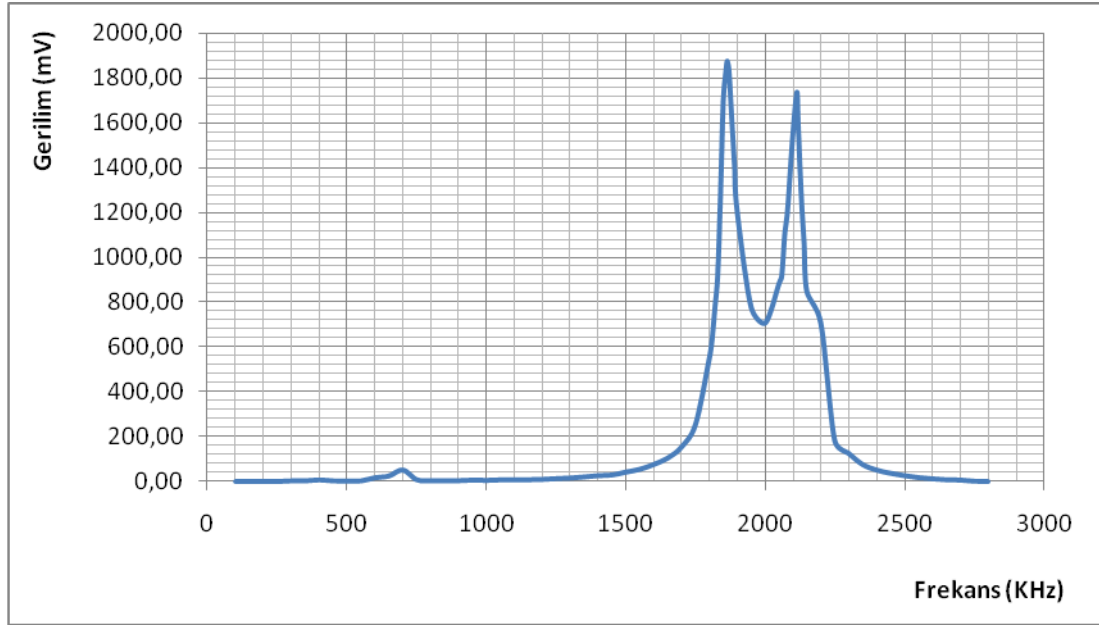


Şekil 3.7. 2,5 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği

2,5 MHz teorik frekans için iletimin en üst seviyede olduğu 1730 KHz'te deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de alıcı tarafında 26 mV ölçülmüştür. İkinci en iyi iletim frekansı olan 1936 KHz'te deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de alıcı tarafında 25 mV ölçülmüştür.

Çizelge 3.8. 3 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları

Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)	Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)
1	100	2,12	38	1830	919,24
2	150	2,12	39	1840	1272,79
3	200	2,12	40	1850	1697,06
4	250	2,12	41	1860	1838,48
5	300	4,95	42	1864	1873,83
6	350	4,95	43	1870	1838,48
7	400	9,19	44	1880	1626,35
8	450	4,95	45	1890	1414,21
9	500	3,54	46	1900	1202,08
10	550	4,95	47	1950	777,82
11	600	19,09	48	2000	707,11
12	650	26,87	49	2050	883,88
13	700	53,03	50	2060	919,24
14	750	9,90	51	2070	1096,02
15	800	5,66	52	2080	1202,08
16	850	5,66	53	2090	1378,86
17	900	5,66	54	2100	1555,63
18	950	8,49	55	2110	1697,06
19	1000	7,07	56	2115	1732,41
20	1050	9,19	57	2120	1555,63
21	1100	9,19	58	2130	1272,79
22	1150	9,90	59	2140	1060,66
23	1200	11,31	60	2150	848,53
24	1250	14,85	61	2200	707,11
25	1300	17,68	62	2250	183,85
26	1350	22,63	63	2300	127,28
27	1400	28,28	64	2350	77,78
28	1450	31,11	65	2400	53,03
29	1500	43,84	66	2450	38,89
30	1550	56,57	67	2500	28,28
31	1600	77,78	68	2550	19,80
32	1650	106,07	69	2600	14,14
33	1700	155,56	70	2650	9,90
34	1750	254,56	71	2700	8,49
35	1800	551,54	72	2750	3,54
36	1810	636,40	73	2800	2,12
37	1820	777,82			

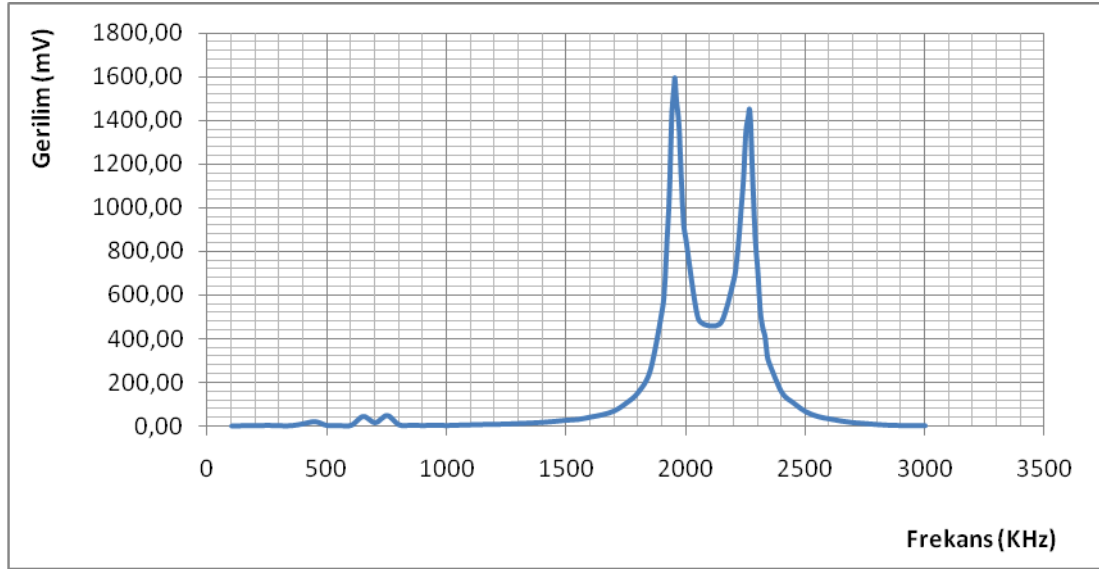


Şekil 3.8. 3 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği

3 MHz teorik frekans için iletimin en üst seviyede olduğu 1864 KHz'te deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de alıcı tarafında 8 mV ölçülmüştür. İkinci en iyi iletim frekansı olan 2115 KHz'te deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de alıcı tarafında 55 mV ölçülmüştür.

Çizelge 3.9. 3,5 MHz teorik rezonans frekans değeri için ölçüm sonuçları

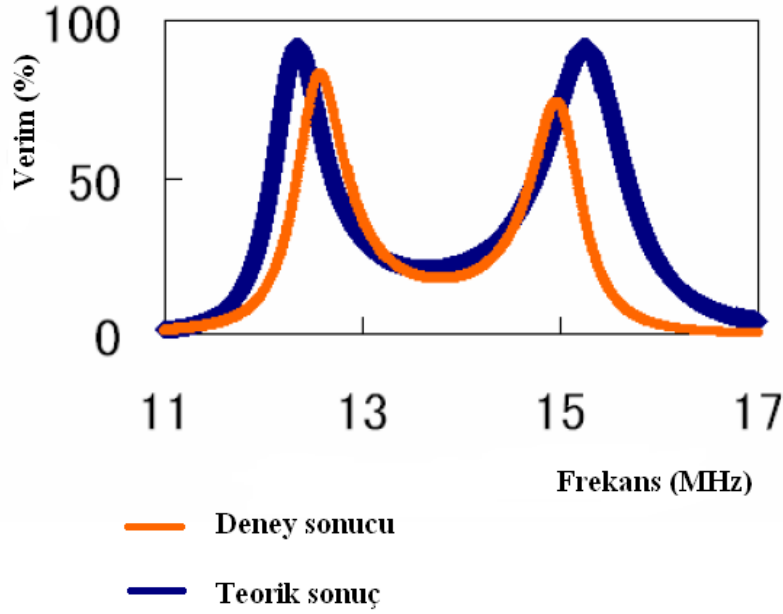
Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)	Ölçüm No	Frekans (KHz)	Gerilim (mV)
1	100	1,41	42	1950	1555,63
2	150	2,83	43	1953	1590,99
3	200	2,83	44	1960	1484,92
4	250	4,24	45	1970	1378,86
5	300	2,83	46	1980	1131,37
6	350	2,83	47	1990	919,24
7	400	12,02	48	2000	848,53
8	450	21,21	49	2050	494,97
9	500	3,54	50	2100	459,62
10	550	3,54	51	2150	480,83
11	600	4,95	52	2200	671,75
12	650	45,25	53	2210	742,46
13	700	16,97	54	2220	848,53
14	750	49,50	55	2230	989,95
15	800	7,07	56	2240	1131,37
16	850	4,95	57	2250	1343,50
17	900	3,54	58	2260	1414,21
18	950	5,66	59	2265	1449,57
19	1000	3,54	60	2270	1378,86
20	1050	5,66	61	2280	1096,02
21	1100	7,07	62	2290	848,53
22	1150	8,49	63	2300	707,11
23	1200	9,19	64	2310	530,33
24	1250	10,61	65	2320	452,55
25	1300	12,73	66	2330	410,12
26	1350	15,56	67	2340	318,20
27	1400	18,38	68	2350	282,84
28	1450	22,63	69	2400	155,56
29	1500	28,28	70	2450	106,07
30	1550	31,82	71	2500	67,18
31	1600	42,43	72	2550	45,25
32	1650	53,03	73	2600	33,94
33	1700	70,71	74	2650	24,04
34	1750	106,07	75	2700	16,97
35	1800	155,56	76	2750	12,73
36	1850	254,56	77	2800	8,49
37	1900	530,33	78	2850	4,95
38	1910	636,40	79	2900	3,54
39	1920	848,53	80	2950	3,54
40	1930	1060,66	81	3000	2,83
41	1940	1414,21			



Şekil 3.9. 3,5 MHz teorik rezonans frekansı için frekans-gerilim değişim grafiği

3,5 MHz teorik frekans için iletimin en üst seviyede olduğu 1953 KHz'te deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de alıcı tarafında 12 mV ölçülmüştür. İkinci en iyi iletim frekansı olan 2265 KHz'te deney setinin bobinler arası izin verdiği maksimum mesafe olan 112,3 cm'de alıcı tarafında 240 mV ölçülmüştür.

Bu ölçümlerde 1,5 MHz teorik rezonans frekansından itibaren iki tane rezonans frekansı olduğu görülmüştür. Bu frekansların oluşma sebebi rezonatörlerin birbirlerine oldukça yakın mesafede bulunmasıdır [15]. Mesafe arttıkça bu iki tepe noktası yaklaşır ve tek bir frekansta görülecektir. Daha önce yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bu iki tepe noktasından birincisinin daha yüksek verim değerine ulaştığı açıklanmış ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir [10]. Bu tez çalışmasında da aynı sonuç görülmüştür. Aynı zamanda bu iki tepe noktasının mesafeye bağlı olarak yaklaşır ve tek bir rezonans frekansına geldiği daha önce açıklanmıştır [10]. Bu noktada elde edilen verim ile iki tepe noktası var iken en yüksek verimin elde edildiği tepe noktasındaki verimlerin aynı olduğu belirtilmiştir ve tez kapsamında yapılan deneylerde de benzer sonuçlar görülmüştür.



Şekil 3.10. Frekansa bağlı verimlilik grafiği [10]

Bu deneylerde yaklaşık olarak 500 KHz ile 800 KHz aralığında ufak dalgalanmalar görülmüştür. Frekans değerleri arttıkça elde edilen verimde azalma olduğu gözlenmiştir.

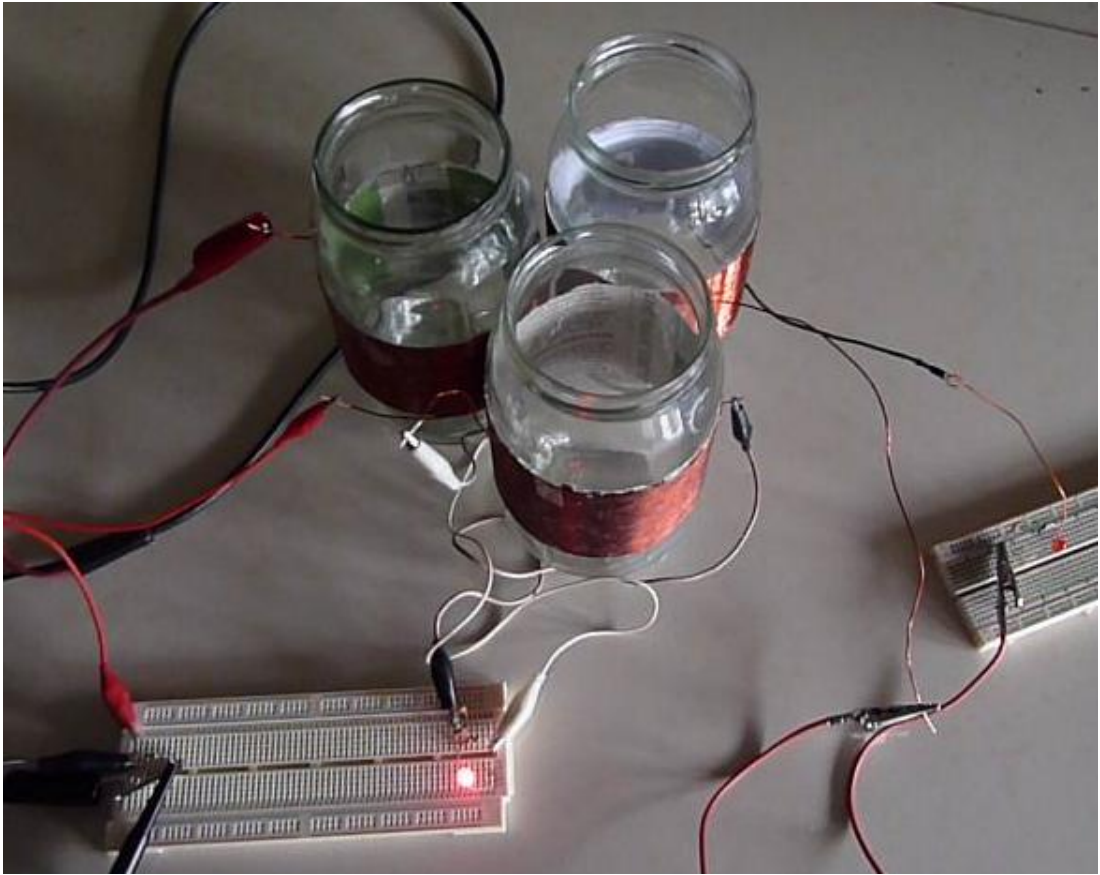
3.3. Bobinler Yan Yana ve Üst Üsteyken Yapılan Ölçümler

B ve C bobinleri yan yana iken ve aradaki mesafe 11,7 cm iken alıcı C tarafında 0,28 V okunmuştur. Bobinler üst üste konduğunda mesafe yine 11,7 cm iken C tarafında 2,47 V okunmuştur. Bu deneyde alıcı ve vericide dirençler 100 Ω , rezonans frekansı ise 965 KHz seçilmiştir. Bobinler üst üste iken 11,7 cm'lik mesafe bir şişedeki sargının bitiş noktası ile diğer şişedeki sargının başladığı nokta arası mesafedir.

Bobinler dikey ekseninde üst üste iken elde edilen verimin, yatay düzlemde aynı mesafedeki konumlarına göre daha fazla olduğu ölçülmüştür.

3.4. Tek Kaynak, Çift Alıcı Varken Yapılan Ölçümler

Bu deneyde D adında 58 sarımlı $297 \mu\text{H}$ değerine sahip üçüncü bir bobin kullanılmıştır. B, C ve D bobinleri Resim 3.2'deki gibi eşkenar üçgen konumunda ve her birinin aralarındaki mesafe 3 mm iken B bobini verici, C ve D alıcı bobin olarak kullanılmıştır. Bu yapı kurulmadan önce B verici, D alıcı ve bobinler arası mesafe 3 mm iken D üzerinde $1,69 \text{ V}$ ölçülmüştür.



Resim 3.2. B, C ve D bobinlerinin eşkenar üçgen oluşturacak şekildeki konumları

B verici, C ve D alıcı konumunda, üçü de birbirinden 3 mm mesafede eşkenar üçgen konumunda rezonans devreleri kurulu iken gönderici B bobininde $4,53 \text{ V}$, alıcı bobinler C'de $2,9 \text{ V}$, D'de $0,63 \text{ V}$ ölçülmüştür.

Sistem eşkenar üçgen konumunda iken D'ye ait devrenin rezonansı oluşturan devre kablo bağlantısı kesilince C üzerinde 3,04 V ölçülmüştür. D'nin bağlantısı kesik iken D; B ve C'den uzaklaştırılınca C üzerinde 3,11 V ölçülmüştür.

Sistem eşkenar üçgen konumunda iken C'ye ait devrenin rezonansı oluşturan devre kablo bağlantısı kesilince D üzerinde 1,55 V ölçülmüştür. C'nin bağlantısı kesik iken C; B ve D'den uzaklaştırılınca D üzerinde 1,69 V ölçülmüştür.

Bu deney sonucunda aynı rezonans frekansında bulunan rezonant devrelerde her ne kadar devre başına elde edilen verim azalsa da sistemin toplam veriminin tek alıcılı sisteme göre daha verimli olduğu gözlenmiştir.

3.5. Tek Kaynak, Tek Alıcı Varken Araya Başka Bir Bobin Yerleştirilince Yapılan Ölçüm

B gönderici bobini ve D alıcı bobini arası mesafe 12,8 cm iken D üzerinde 70,7 mV ölçülmüştür. Bu iki bobinin tam ortasına rezonans devre bağlantısı kurulmamış C bobini konunca D üzerinde 116,67 mV ölçülmüştür.

B ve C arası 12,8 cm iken C üzerinde 212,13 mV ölçülmüştür. Bu iki bobinin tam ortasına rezonans devresi kurulmamış D bobini konunca C üzerinde 268,7 mV ölçülmüştür.

Bu deneyde rezonans durumundaki iki devrenin arasına rezonansta olmayan başka bir bobin konduğunda iletim veriminin arttığı gözlenmiştir. Bu durum daha önceki çalışmalarla uyusmaktadır [9].

3.6. Çift Kaynak ve Tek Alıcı Durumunda Yapılan Ölçüm

Bu deneyde B ve C bobinlerine iki farklı sinyal jeneratörü tarafından 965 KHz rezonans frekansında her bir sinyal jeneratörü tarafından 4,53 V enerji verilmiş durumda iken B, C ve D bobinleri üzerinde tek tek ölçüm yapılmıştır. D bobini ise

sadece alıcı bobin olarak görev yapmıştır. Tüm bobinler rezonansı oluşturan devrelerine bağlı olarak tutulmuştur.

B ve C bobinlerinin rezonant enerji transferine girmemiş iken 100Ω 'luk dirençleri üzerinde 4,53 V gerilim olduğu görülmüştür.

Her üç bobin de eşkenar üçgen konumunda birbirinden 3 mm mesafede ve B ile C bobinlerine enerji verili iken B'de 2,96 V, C'de 4,53 V, D'de 1,98 V ölçülmüştür.

Dizilim sabit iken B'ye gelen enerji kesildiğinde sadece C bobini gönderici durumunda ve B ile D alıcı konumunda iken B'de 1,55 V, C'de 3,39 V; D'de 1,06 V ölçülmüştür.

Dizilim sabit iken C'ye gelen enerji kesildiğinde sadece B bobini gönderici durumunda ve C ile D alıcı konumunda iken B'de 2,33 V, C'de 2,19 V; D'de 0,99 V ölçülmüştür.

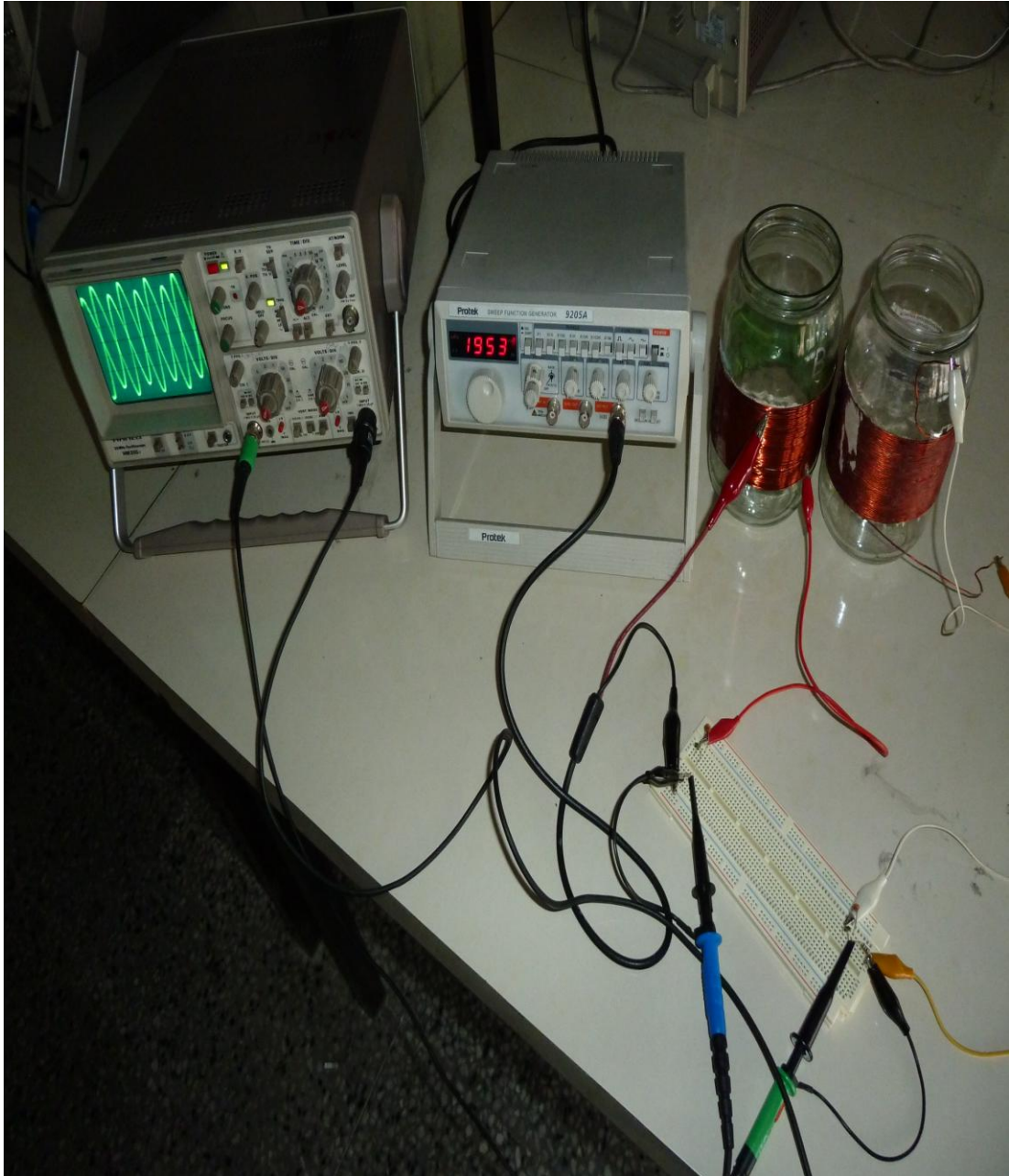
D bobini ortamdaki uzaklaştırılıp aynı anda enerji verilen B ve C bobinleri arası 3 mm iken B ve C üzerinde 4,8 V gerilim ölçülmüştür.

Aynı anda enerji verili durumda olan B ve C bobinleri arası 3 mm iken D bobini B ve C bobinlerinin tam orta noktasından 141 cm'lik mesafeye gelecek şekilde yerleştirilmiş ve bu mesafede ölçülen gerilim 5,65 mV olarak bulunmuştur. Deney düzeneğinin sınırları nedeniyle daha uzak mesafeye çıkılamamıştır.

Bu deney sonucunda alıcı olan D devresinin her bir kaynaktan birebir konumda iken aldığı enerji toplamının iki kaynaktan birden aynı anda beslenirken aldığı toplam enerji miktarı ile hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca ortamda alıcı yok iken iki kaynağın da birbirlerini karşılıklı olarak beslemesi sebebiyle normal şartlarda verdikleri enerjiden fazla enerjiyi üstlerinde barındırdıkları görülmüştür. Her iki kaynaktaki faz farkı sebebiyle kaynaklar birbirlerini besleyip üzerlerinde daha fazla enerji barındırmaktadır.

3.7. Faz Kayması

Bütün frekanslarda alıcı devre ile verici devre arasında faz kayması incelendiğinde 180 derece faz kayması olduğu gözlenmiştir. 3,5 MHz için yapılan deneyde çekilen fotoğraf Resim 3.3'teki gibidir.



Resim 3.3. 3,5 MHz teorik rezonans frekansı için yapılan deneyde gönderici ve alıcı devrelerde görülen 180 derecelik faz kayması

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda yapılan çalışmalar neticesinde kablosuz enerji transferi günlük hayatımıza yavaş yavaş girmeye başlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, üretilebilecek cihazların nasıl daha verimli hale getirilebileceği ve cihazların yerleşiminin transfer üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Laboratuar ortamında yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar beklendiği gibi bu tez çalışmasından önce yapılan diğer çalışmalara göre daha düşük verimli olmuştur. Sebebi ise antenlerin merkezlerinin dikey düzlem yerine yatay düzlemde hizalanması sonucu manyetik alan çizgilerin kesişim noktalarının azalması ile daha az enerji transferi sağlanmasıdır. Deneyde de gönderici ve alıcı devreler dikey ekseninde aynı hizada iken yatay eksene göre daha iyi transfer sağlandığı gözlenmiştir. Antenler her zaman istenilen şekilde hizalanamayacağı için böyle bir yerleşim seçilmiştir. Karakteristik empedansın artımına karşılık verimin arttığı daha önce belirtilmişti fakat deneylerimizde elde edilen sonuç bunun tam tersidir [10]. En iyi verimin gönderici ve alıcı antenlerdeki karakteristik empedansın en düşük olduğu yerde sağlandığı gözlemlenmiştir. Deney düzeneğinin yapısı itibarıyla beklenenden daha düşük verim elde edilmesi dışında antenlerin davranışının farklı olmadığı tespit edilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi gönderici ve alıcı arasına başka bir bobin yerleştirilince verimin ve dolayısıyla maksimum transfer mesafesinin arttığı sonucuna varılmıştır [9]. Eğer sistemde iki tane gönderici devre var ise alıcı devre her iki kaynağın sağladığı enerjinin tamamını üstüne alabilmektedir.

Deneylerde elde edilen sonuçlar ele alındığında en iyi verimi elde etmek için gönderici ve alıcı taraflarda yük konumundaki dirençlerin olabildiğince küçük tutulması gerektiği saptanmıştır. Daha uzak mesafeye transfer yapmak için iki anten arasına başka bir anten daha konulabileceği görülmüştür. Birden fazla gönderici varken alıcının tüm göndericilerden enerjiyi tamamen alması sebebiyle her zaman aynı şekilde hizalanamayan gönderici ve alıcının bu tür tasarımla daha iyi transfere olanak sağlayabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Tesla, N., "Apparatus for transmitting electrical energy", *United States Patent Office (1119732), United States of America* (1914).
2. Karalis, A., Joannopoulos, J.D., Soljacic, M., "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Annals of Physics*, 323: 34-48 (2008).
3. Liu, X., Zhang, F., Hackworth, S.A., Sclabassi, R.J., Sun, M., "Modeling and Simulation of a Thin Film Power Transfer Cell for Medical Devices and Implants", *Circuits and Systems, 2009. ISCAS 2009. IEEE International Symposium*, Taipei, 3086-3089 (2009).
4. Zhang, F., Liu, X., Hackworth, S.A., Sclabassi, R.J., Sun, M., "In Vitro and In Vivo Studies on Wireless Powering of Medical Sensors and Implantable Devices", *Life Science Systems and Applications Workshop, 2009. LISSA 2009. IEEE/NIH*, Bethesda, 84-87 (2009).
5. Zhang, F., Hackworth, S.A., Liu, X., Chen, H., Sclabassi, R.J., Sun, M., "Wireless Energy Transfer Platform for Medical Sensors and Implantable Devices", *Engineering in Medicine and Biology Society, 2009. EMBC. Annual International Conference of the IEEE*, Minneapolis, 1045-1048 (2009).
6. Zhang, F., Liu, X., Hackworth, S.A., Sclabassi, R.J., Sun, M., "Wireless Energy Delivery and Data Communication for Biomedical Sensors and Implantable devices", *Bioengineering Conference, 2009 IEEE 35th Annual Northeast*, Boston, 1-2 (2009).
7. Liu, X., Zhang, F., Hackworth, S.A., Sclabassi, R.J., Sun, M., "Wireless Power Transfer System Design for Implanted and Worn Devices", *Bioengineering Conference, 2009 IEEE 35th Annual Northeast*, Boston, 1-2 (2009).
8. Zhang, F., Hackworth, S.A., Liu, X., Li, C., Sun, M., "Wireless Power Delivery for Wearable Sensors and Implants in Body Sensor Networks", *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*, Buenos Aires, Argentina, 692-695 (2010).
9. Zhang, F., Hackworth, S.A., Fu, W., Sun, M., "The Relay Effect on Wireless Power Transfer Using Witricity", *Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2010 14th Biennial IEEE Conference*, Chicago, 1 (2010).
10. Imura, T., Hori, Y., "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and

- Neumann Formula”, *Industrial Electronics, IEEE Transaction*, 99: 1 (2011).
11. Xian, Z., Qingxin, Y., Haiyan, C., Yang, L., Zhuo, Y., “The Application of Non-contact Power Transmission Technology (NPT) in the Modern Transport System”, *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Xi’an, 345-349 (2010).
 12. Watfa, M.K., Al-Hassanieh, H., Salmen, S., “The Road to Immortal Sensor Nodes”, *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2008. ISSNIP 2008. International Conference*, Sydney, 523-528 (2008).
 13. Razavy, M., “Quantum Theory of Tunneling”, *World Scientific*, Singapore, 1-5, 9-20 (2003).
 14. Haus, H.A., “Coupling of Modes-Resonators and Couplers”, *Waves and Fields in Optoelectronics, Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, New Jersey, 197-234 (1984).
 15. Internet: Hori-Fujimoto Laboratory “Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonant Coupling at Restricted Frequency Range” http://www.hori.k.u-tokyo.ac.jp/paper_2010/papers/beh/D_bumon2010Beh.pdf (2010).
 16. Hirayama, H., Ozawa, T., Hiraiwa, Y., Kikuma, N., Sakakibara, K., “A consideration of electro-magnetic-resonant coupling mode in wireless power transmission”, *IEICE Electronic Express*, 6(19): 1421-1425 (2009).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÜNDOĞDU, Aşkın Erdem
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 15.07.1983 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (533) 332 62 38
E-posta : aegundogdu@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	2007
Ön lisans	Anadolu Üniversitesi/ İşletme Bölümü	2009
Lise	Cumhuriyet Lisesi	2001

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-2011	Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Satranç, Seyahat etmek