

T.C
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



MANYETİK KUPLAJLI REZONANS DEVRELERİNDE
KOMPANZASYON ŞEMALARININ MATEMATİKSEL ANALİZİ VE
DENEYSEL UYGULANMASI

NURŞAH ERDUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri: **Doç. Dr. Seyit Ahmet SİS (Tez Danışmanı)**
 Doç. Dr. İbrahim Bahadır BAŞYİĞİT
 Dr. Öğr. Üyesi Bayram ESEN

BALIKESİR, OCAK- 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Manyetik Kuplajlı Rezonans Devrelerinde Kompanzasyon Şemalarının Matematiksel Analizi ve Deneysel Uygulanması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

Beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Nurşah ERDUR

(İmza)

ÖZET

MANYETİK KUPLAJLI REZONANS DEVRELERİNDE KOMPANZASYON ŞEMALARININ MATEMATİKSEL ANALİZİ VE DENEYSEL UYGULANMASI YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nurşah ERDUR

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. SEYİT AHMET SİS)
BALIKESİR, OCAK - 2023

Manyetik rezonans devreleri MR görüntüleme ve bazı kritik fizik uygulamalarının yanı sıra son yıllarda kablosuz güç transferi gibi güç elektroniği uygulamalarında da sıklıkla kullanılmaya başlamıştır. Kablosuz güç transferi, arada herhangi bir bağlantı bulunmadan hava sayesinde güç kaynağından yüke güç aktarılması olarak ifade edilebilir. Manyetik rezonans tekniği, maksimum verimli güç transferi için orta mesafelerde kullanılmaktadır.

Manyetik rezonans temelli sistemlerde manyetik alan ile bağlaşımda olan primer ve sekonder bobinlerinden oluşan bobin çiftlerinin her biri kompanzasyon kapasitörünün bağlantı şekline göre, seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-paralel (PP) ve paralel-seri (PS) olarak bilinen dört ana kompanzasyon şemasından birine sahiptirler. Bu kompanzasyon topolojileri sayesinde mevcut devrenin rezonans frekansında reaktif gücü sıfırlanması ve maksimum aktif güç ile çalışabilmesi sağlamaktadır. Böylece en yüksek verimlilik ile güç aktarımı sağlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında manyetik rezonans devrelerinde kullanılan SS, SP, PS ve PP topolojilerinin matematiksel analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucu SS ve SP için tek rezonans ve frekans ayrılması diye bilinen üç rezonans koşulları çıkarılmıştır. PS ve PP için ise bazı koşullarda çok uzun analitik ifadeler elde edildiği ve analitik çözümler bulunamadığı için devre simülasyon programları üzerinden simülasyonları yapıp rezonans cevapları incelenmiştir. Analitik ifadeleri çıkarılan SS kompanzasyon şeması örnek bir manyetik pasif sensör uygulamasında kullanılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Kablosuz güç transferi, rezonans, devre, bobin

Bilim Kod / Kodları: 90512, 90516, 90517

Sayfa Sayısı: 71

ABSTRACT

MATHEMATICAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL APPLICATION OF COMPENSATION SCHEMES IN MAGNETIC COUPLED RESONANCE CIRCUITS

MSC THESIS

NURŞAH ERDUR

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

(SUPERVISOR: DOÇ. DR. SEYİT AHMET SİS)

BALIKESİR, JANUARY - 2023

In addition to MR imaging and some critical physics applications, magnetic resonance circuits have been used frequently in power electronics applications such as wireless power transfer systems in recent years. Wireless power transfer can be expressed as the transfer of power to the load from a high frequency power source through the air without any connection in between. The magnetic resonance technique is used at medium distances for maximum efficient power transfer.

In magnetic resonance-based systems, each of coil pair consists of so-called primary and secondary coils coupled via the magnetic field. Capacitors are connected to both primary and secondary coils so as to eliminate the reactive component of the input impedance. The most common connection schemes of the compensation capacitors are series-series (SS), series-parallel (SP), parallel-parallel (PP), and parallel-series (PS). With these connection schemes, power transmission is provided with the highest efficiency.

In this thesis, mathematical analyses of SS, SP, PS and PP topologies used in magnetic resonance circuits are performed. As a result of these analyses, three resonance conditions, known as single resonance and frequency separation, are deduced for SS and SP schemes. For the PS and PP compensation schemes, since very long analytical expressions are obtained and analytical solutions could not be found for certain cases, simulations are made through circuit simulation programs and resonance responses are examined. The SS compensation scheme, whose analytical expressions are extracted, is utilized in a sample magnetic passive sensor application.

KEYWORDS: Wireless power transfer, resonance, circuit, coil

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	3
1.2. Çalışmanın Amacı ve İçeriği	6
2. MANYETİK REZONANS TEMELLİ UYGULAMALAR İÇİN KULLANILAN YAYGIN KOMPANZASYON ŞEMALARININ İNCELENMESİ	7
2.1. Rezonans İçin Kullanılan Kompanzasyon Topolojileri ve Endüktans Hesaplama Teknikleri	7
2.1.1. Bobin Endüktansının Hesabı İçin Kullanılan Teknikler	9
2.1.1.1. Wheeler Tekniği Sayesinde Endüktans Hesaplanması	9
2.1.1.2. Lundin Tekniği Sayesinde Endüktans Hesaplanması	10
2.1.1.3. Sidhu Tekniği Sayesinde Endüktans Hesaplanması	11
2.1.2. Ortak Endüktans Hesaplama Tekniği	11
2.1.2.1. Sidhu İteratif Tekniği	12
2.1.2.2. Neumann İteratif Tekniği	13
2.2. Seri-Seri Devre Topolojisi İncelenmesi	13
2.2.1. Seri-Seri Devre Topolojisinin Mathematica Programında Analiz Edilmesi	13
2.2.2. Seri-Seri Devre Topolojisinin ADS Programında Analiz Edilmesi	16
2.3. Seri-Paralel Devre Topolojisi İncelenmesi	20
2.3.1. Seri-Paralel Devre Topolojisinin Mathematica Programında Analiz Edilmesi	20
2.3.2. Seri-Paralel Devre Şemasının ADS Programında Analiz Edilmesi	24
2.3.3. Seri Paralel Topoloji de ADS Sonuçlarının Yorumlanması	27
2.4. Paralel-Seri Devre Topolojisi İncelenmesi	29
2.4.1. Paralel-Seri Devre Topolojisi Mathematica Analizi	30
2.4.2. Paralel Seri Devresi ADS Programı Analizi	31
2.5. Paralel-Paralel Devre Topolojisi Analizi	34
2.5.1. Paralel-Paralel Devre Topolojisi Mathematica Analizi	34
2.5.2. Paralel-Paralel Devre Topolojisi ADS Programında İncelenmesi	36
3. KOMPANZASYON ŞEMALARININ ÖRNEK BİR KABLOSUZ PASİF SENSÖRE UYGULANMASI	37
3.1. Strain Gauge Sensörü Karakterizasyonu	37
3.2. Manyetik Pasif Bobinlerin Karakterizasyonu	40
3.3. Seri-Seri ve Seri-Paralel Kompanzasyon Durumları İçin Manyetik Pasif Sensör Düzenegi	47
4. SONUÇ	48
KAYNAKLAR	49
EKLER	52
EK A: Seri-Paralel Devre İçin Solve Komutları Sonuçları	52
EK B: Seri Paralel Devre Farklı Kondansatör Değeri için Sonuç Denklemleri	58
EK C: Paralel Seri Devre Eşit Kondansatör Yapısı İçin Sonuç Denklemleri	59

EK D: Paralel Seri Devre Farklı Kondansatör Değerleri İçin ComplexExpand Komutu Sonuçları ve İmajiner Değeri.....	60
EK E: Paralel Seri Devre Farklı Kondansatör Değerleri İçin w Sonuçları	61
EK F: Paralel-Paralel Devre Topolojisi ComplexExpand Komut Sonuçları	67
EK G: Paralel-Paralel Devresi Kararlı Sonuçlar İçin Değişken Değerleri.....	69
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Gerinim ölçer sensör örnek ölçüm şeması (Beckwith vd., 1993).....	2
Şekil 2.1: Rezonans devresine ait topolojiler; a)SS, b) SP, c) PS, d) PP (Chopra ve Bauer, 2011).....	8
Şekil 2.2: Rezonans frekans hesaplama kodu (Ahmad vd.,2018).....	14
Şekil 2.3: Zin giriş değeri kodu.....	14
Şekil 2.4: Cozum=Solve komutu ve denklemler.	15
Şekil 2.5: Frekans değerlerinin zin değerine işlenmesi.....	15
Şekil 2.6: Sonuç değeri kodu.	15
Şekil 2.7: Seri-Seri topoloji devre şeması.	16
Şekil 2.8: Rezonans frekans değerleri.....	17
Şekil 2.9: Frekans değerleri değiştirilmiş seri-seri devre şeması.....	17
Şekil 2.10: Devrenin rezonans frekans ve S parametre değerleri.	18
Şekil 2.11: ADS programında analiz edilen frekans değerleri.....	19
Şekil 2.12: Mathematica programından elde edilen değerler.....	19
Şekil 2.13: Kondansatör değerlerinin eşit olduğu seri-paralel devre giriş kodu.	20
Şekil 2.14: ComplexExpand kodu ile reel ve imajiner kısımların ayrılması.	21
Şekil 2.15: İmajiner kısmı 0'a eşitleyen w değerleri için solve komutu.	21
Şekil 2.17: Giriş empedans değerinin imajinerinin farklı kondansatör değerlerine göre hesaplanması.....	22
Şekil 2.18: Farklı kondansatör değerleri için bulunan wn değerleri.	23
Şekil 2.19: Farklı kondansatör değerleri için hesaplanmış olan giriş empedans reel değerleri	24
Şekil 2.20: Kondansatör değerlerinin eşit olduğu seri-paralel devre şeması.	25
Şekil 2.21: Kondansatör değerlerinin eşit olduğu durumda S parametre ve rezonans frekans değerleri.	25
Şekil 2.22: Kondansatör değerinin ADS programına işlenmesi.	26
Şekil 2.23: Primer kondansatör değişiminin ardından S parametre ve rezonans frekans değerleri.	27
Şekil 2.24: Elde edilen grafik sonuçları.	27
Şekil 2.25: Bobin değerine bağlı olarak sonuçlar.	28
Şekil 2.26: K değerine bağlı olarak sonuçlar.	28
Şekil 2.27: Kapasite değerine bağlı olarak sonuçlar.	29
Şekil 2.28: Kondansatör değerlerinin eşit olduğu giriş değerinin programda tanımlanma kodu.	30
Şekil 2.29: Giriş değerlerinin imajiner ve reel için ayrılması komutu.....	30
Şekil 2.30: Kondansatör değerlerinin eşit olmadığı durumda giriş empedans komutu.	31
Şekil 2.31: Paralel-Seri devresi kondansatörlerin eşit olduğu durum ADS şeması.	32
Şekil 2.32: Paralel seri devresi kondansatörlerin eşit olduğu durumda rezonans frekans sonuçları.	32
Şekil 2.33: Farklı kondansatör değerli için paralel-seri devrenin ADS simülasyonunda gösterimi.	33
Şekil 2.34: Paralel-Seri devresi kondansatörlerin eşit olmadığı durum rezonans frekans değerleri.....	34
Şekil 2.35: Paralel-Seri devresi S parametre değerleri.....	34
Şekil 2.36: Zin giriş değerinin Mathematica programına tanıtılması.	34
Şekil 2.37: Paralel-Paralel devre topolojisinde kondansatörlerin eşit olmadığı durumda giriş kodu.	35
Şekil 2.38: Paralel-Paralel devre topolojisi kondansatörlerin eşit olduğu durum.	36

Şekil 2.39: Paralel-paralel devresi giriş empedansı imajiner değerleri ve S parametre değerleri.....	37
Şekil 3.1: Gerinim ölçer (strain gauge) örneği (Arorami vd., 2020).....	38
Şekil 3.2: Gerinim ölçer sensörü şekil değişimi.....	39
Şekil 3.3: İlk rezonans frekans değeri için oluşturulan eğim grafiği.	41
Şekil 3.4: İkinci rezonans frekans değeri için oluşturulan eğim grafiği.	42
Şekil 3.5: Son rezonans frekans değeri için oluşturulan eğim grafiği.....	43
Şekil 3.6: Endüktans ölçümü düzeneği.	44
Şekil 3.7: Kapasite ölçüm düzeneği.	44
Şekil 3.8: Direnç ölçüm düzeneği.	45
Şekil 3.9: Endüktans ölçüm düzeneği.	46
Şekil 3.10: Kapasite ölçüm düzeneği.	46
Şekil 3.11: Direnç ölçüm düzeneği.	47
Şekil 3.12: Sensör ve bobinler bir araya getirilerek oluşturulan devre düzeneğinin network analizörde ölçüm düzeneği.	47

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: Farklı kompanzasyon topolojileri için birincil kapasite hesabı (Pashaei vd., 2016).....	9
Tablo 2.2: ADS programında belirlenen değişken değerleri.....	18
Tablo 3.1: İlk rezonans frekans değeri için ölçümler.	40
Tablo 3.2: İkinci rezonans frekans değeri için ölçümler.	41
Tablo 3.3: Son rezonans frekans değeri için ölçümler.	42

KISALTMALAR LİSTESİ

3D	: Üç Boyutlu Uzay
ADS	: Advanced Design System (Gelişmiş Tasarım Sistemi)
Akt	: Aktaran Yazar
CIS	: Güneş Pili (Copper Indium Selenide)
CITRIS	: Toplumun İlgi Alanında Bilgi Teknolojileri Araştırma Merkezi ve Banatao Enstitüsü (Center for Information Technology Research in the Interest of Society)
CMOS	: Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
FSR	: Kuvvete Duyarlı Dirençler (Force Sensitive Resistor)
GMR	: Dev manyetorezistans (Giant magnetoresistance)
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)
HR-WPT	: Yüksek Rezonanslı Güç Aktarımı (Highly Resonant Wireless Power Transfer)
K	: Kuplaj Katsayısı
KHz	: Kilohertz
LSV	: Lazer Yüzey Hız Ölçer (Laser Surface Velocimeter)
M	: Ortak Endüktans Katsayısı
MEMS	: Mikro-Elektro-Mekanik Sistem
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (Massachusetts Institute of Technology)
MW	: Megawatt
NTC	: Negatif Sıcaklık Katsayısı (Negative Temperature Coefficient)
PP	: Paralel-Paralel Bağlantı
PS	: Paralel-Seri Bağlantı
PTC	: Pozitif Sıcaklık Katsayısı (Positive Temperature Coefficient)
PWM	: Darbe Genişliği Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
Q	: Kalite Faktörü
RF	: Radyo Frekansı
SP	: Seri-Paralel Bağlantı
SS	: Seri-Seri Bağlantı
vb	: Ve Benzerleri
vd	: Ve Diğerleri
WSN	: Kablosuz Sensör Ağları (Wireless sensor networks)

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın adımlarında emeği geçen danışman hocam sayın Doç.Dr. Seyit Ahmet Sis'e ve araştırmalarımnda beni yalnız bırakmayan Dr.Arş.Gör.Haris Çalgan'a sonsuz teşekkürler.

Savunmasının değerlendirilmesinde emeği geçen jüri üyelerine ayrıca saygılarımı sunarım.

Tüm aileme, özellikle beni her zaman içtenlikle destekleyen canım annem Ayşe Erdur ve bu çalışmanın asıl mimarı, sırtımda her zaman eli bulunan, maddi manevi her açıdan benim arkamdan bir an olsun ayrılmayan canım babam Adnan Erdur'a içtenlikle teşekkür ederim.

Balıkesir, 2023

Nurşah ERDUR

1. GİRİŞ

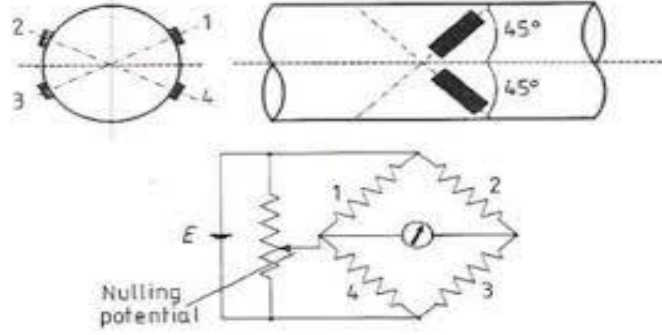
Fiziksel bir ortamdaki genel koşullar (basınç, sıcaklık, ışık vb.) sensörler yardımı ile belirlenmektedir. Günümüz teknolojisinde sensörlerin en temel amacı herhangi bir ortamdaki değişkenleri tespit ederek bu verileri işlemek ve bunları bir bilgisayar işlemcisine iletmektir. Bu bağlamda kullanım ağları oldukça geniş ve kapsamlı bir konumda yer almaktadır. Lojistik, aydınlatma, işletme ve endüstri gibi pek çok alanda bu teknolojiden yararlanılmaktadır. Sensörler temelde veriyi algılayan ve işleyen bölümlerin bağlantısına göre kablolu veya kablosuz olarak ikiye ayrılır. (Karakaya, 2012).

Sensörler kullanım alanlarında yüksek iş kolaylığı sağlamaktadır. Günlük hayatta otomatik kapılar, sıcaklık düzenleyiciler ve en basit örneği olarak sensörlü lambalar gibi birçok yerde bu sensörler işlemleri kolaylaştırmaktadır. Kablosuz sensörler ise aktif ve pasif olma durumlarına göre iki gruba ayrılmaktadır. Aktif sensörler belli bir güç kaynağı tarafından sürekli beslenirken, Pasif sensörler böyle bir beslemeye ihtiyaç duymadan, genellikle belirli sistemlere gömülerek ve yapılarındaki malzemeler bozuluncaya kadar işlevlerini yitirmezler. Pasif sensörler çıkış değerinin değişmesine göre sonuç vermektedir (Kavak, 2008).

Günümüzde yaygın kullanımıyla “*Strain Gauge*” yani direnç gerinim ölçer ve “*Surface Acoustic waves*” yani yüzey akustik dalga gibi çeşitli sensör teknolojileri dikkat çekmektedir (Zhang vd., 2021). Direnç gerinim sensörlerinin temel yapıları çok hafif ve basit olarak bulunmaktadır. Mil üstüne ufak boyutlarda bir strain gauge yapılandırılarak örnek olarak tork ölçümü gibi birçok ölçüm yapmak mümkündür. Buna ek olarak, ölçülen parçaların temel çalışma şartları ile gerilim üstünde bu ölçümün bir etkisi bulunmamaktadır (Trendafilov, 1996). Fakat yapıları dönen mil ile bağlantılı olduğu için yüksek hızlarda gerçekleşen dönüşler, dinamik balans problemlerini basit bir şekilde ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca sıcaklık ve zaman kayması oldukça yüksektir, genel doğruluk düzeyi düşüktür, çıkış sinyali güçsüzdür ve ürünün güvenilirlik düzeyi de oldukça düşüktür (Zhang vd., 2021).

Yüzey akustik dalgalar, temelde cihazlarda düşük miktarda güç tüketimi ve farklı ölçümleri gerçekleştirmek için oldukça hassas olan sensörlerdir. Bu sensörler, havacılık yapılarının içerisinde yer alan zor şartlarda çalışmaya devam edebilen küçük ve pasif kablosuz sensörlerdir (Wilson ve Atkinson, 2011).

Bahsi geçen bu teknolojilerin en temel hedefi, mekanik gerginimi yani gerinim ölçer sensör ölçümü yaparak bunu elektriksel sinyallere dönüştürmesidir. Şekil 1.1. üzerinde bir gerinim ölçer sensör ölçüm şeması gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Gerinim ölçer sensör örnek ölçüm şeması (Beckwith vd., 1993).

Gerinim ölçer sensörlerinin temel çalışma ilkesi, esnek bir bölümde yer alan gerilimi ölçmek üzerinedir. Böylece dört adet gerinim ölçer sensör, wheatstone köprü görevi görecektir bir devre olarak dönmekte olan şafta eklenir. İlk iki gerinim ölçer sensör şaft ekseninin bir tarafından 45 derecelik bir açıya sabitlenir, diğer iki gerinim ölçer sensör ise Şekil 1.1. üzerinde gösterildiği şekilde şaftın diğer bölümünde aynı biçimde hizalanmaktadır.

Böylelikle milde tork kuvveti uygulandığı zaman mil üstünde bir gerilim meydana gelmektedir. Çekme gerilimini hesaplayan bir gerinim ölçer çifti, devrede bulunan direnci artırır. Diğer bir taraftan sıkıştırma gerilimini ölçmekte olan diğer gerinim çifti ise devre direncini düşürür. Bu iki nokta arasında hesaplanan voltaj, gerilim farkı uygulaması yapılan tork düzeyi ile orantılı bir şekilde yükselmekte ya da tersine bir şekilde uygulanıyorsa azalmaktadır (Harish vd., 2011).

Gerinim ölçer sensör gibi kablosuz sensörler, titreşim, basınç, hareket, ses, sıcaklık ve çeşitli konumlar gibi ölçüler dahil olarak bir konumun mevcut dış ve fiziki şartlarını izleme iş birliği yapılması amaçlanarak sensörlerin kullanıldığı, mekânsal açıdan dağıtılmış otonom haldeki cihazlardan oluşmaktadır. Bu cihazla kendi aralarında kablosuz bağlantı sayesinde iletişim kurmaktadır. Kablosuz sensörlerin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır (Kandris vd., 2020).

Kablosuz sensörlerin avantajları şu şekildedir:

- Gereksiz kabloları ortadan kaldırırlar,
- İsteğe bağlı olarak yeni cihazları barındırabilirler,
- Fiziksel bölümlerin arasından geçebilmek için yeterli esnekliğe sahiptirler,
- Merkezi olarak bir monitör sayesinde kullanılabilirler (Kandris vd., 2020).

Kablosuz sensörlerin dezavantajları ise şu şekildedir:

- Kablolu ağlar ile karşılaştırıldığı zaman daha düşük bir hıza sahip olabilirler,
- Fazla satın alındığı zaman maliyetleri yüksek olduğu için kurulum işlemleri ile masraflı olabilir,
- Yapılandırması kablolu ağlara oranla çok daha karmaşık halde olabilir (Kandris vd., 2020).

1.1. Literatür Taraması

Sensörlerin günlük hayattaki kullanımının yanı sıra insanların algıda zorlanacağı (herhangi bir değişkenin matematiksel olarak tam tespiti gibi) alanlarda fazlasıyla verimli olduğu bir gerçektir. Örnek vermek gerekirse GMR (Dev Manyetik Rezistans) sensörler kullanılan bir çalışmada elde edilen elektriksel sonuçlar trafikteki araçların genel durumlarını karakterize eden veriler üretebilmektedir. Bu çalışma ile araçların boy ve hız gibi sabit bilgilerinin yanı sıra trafik akışının da genel işleyişi veri olarak belirlenebileceği ve bu verilerin kaydı ile trafik veri tabanının oluşturulabileceği açıklanmaktadır (Tsymbal ve Pettifor, 2001).

Sensörlerin sağladığı başka faydalar ise insanların ulaşmakta zorluk veya güçlük çekeceği alanlarda kullanılabilmesidir. Yapılan bir çalışmada orman yangınlarını tespit etmek için kablosuz, düşük güç tüketen sensörlerin kullanılabilmesini; sıcaklık, nem, barometrik basınç ve GPS konumu gibi veriler kaydedildikten sonra itfaiye personellerine bildirilmesinin büyük fayda sağlayacağını açıklanmaktadır (Doolin ve Sitar, 2005).

Binaların tam ölçekli izlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada benzerlerinden farklı olarak ivme sensörü yerine eğim sensör kullanılmıştır (Hayat vd., 2019). Bu bizlere çeşitli sensör tiplerinin amaçları dışında kullanılabilmesini göstermektedir.

Kablosuz sensörler ile ilgili çalışmalar incelendiğinde literatürde çok daha fazla kullanım alanı olduğu ve Wireless Sensor Networks/Kablosuz Sensör Ağları (WSN) kavramının ortaya çıktığı görülmektedir. Bu tanım bu tarz sensörlerin verilerini ortak bir bağdaşımında izlenebileceğini ortaya koymaktadır. Örnek olarak, son yıllarda elektrik dağıtım sistemlerinde önemli rol oynayan akıllı şebekelerde (Smart Grid) verimi optimize etmek amacıyla enerjiyi ve enerji tüketimini ölçmede kablosuz sensör ağları kullanılmaktadır (Gungor vd., 2010).

Askeri uygulamalarda Sensörlerin kullanımlarında ilgi alanları; bilgi toplama, düşman izleme, savaş alanı gözleme gibi çeşitlendirilebilmektedir. Ohio Devlet Üniversitesi'nin "A Line In The Sand" projesinde metal içerikli hareket eden cisimleri takip etmek amacıyla metalik objeleri tanıma kapasitesi olan 90 sensör kullanılmıştır (Barr, 2011). Ekolojik alanda yapılan çalışmalar tarım ve ekosistem faydası adına ilerlemektedir. Örneğin Büyük Ördek Adası'nda 32 bölgeden oluşan sensör ağında kullanılan sensörler; sıcaklık, barometrik basınç ve nemi, yaşam alanını izlemek için ölçmektedir (Beckmann vd., 2004). Tarım alanında ise Intel şirketinin üzüm bağında sensör ağlarını kullanması bir örnek olarak gösterilebilir (Wang vd., 2006). Bu sensör ağları kullanılarak insan sağlığı merkezli verilerde takip edilebilir. Örneğin yine Intel şirketinin Portland ve Las Vegas araştırmasında (Proaktif Sağlık Araştırması), kavrama veya idrak etmeye yönelik alzheimer (yaygın görülen bir demans türü) gibi hastalıklara yol açabilen bozukluklar ilk aşamalarında monitörleme ve kontrol altına almayı kablosuz sensör yapılarını kullanarak incelemiştir (Culler ve Mulder, 2004).

Kaliforniya Üniversitesi'nde yapılan çalışmada giyilebilir basınç, sıcaklık, piezoelektrik film sensörlerinden oluşan bir düğüm kullanılmış ve bu şekilde insan vücudundaki değişiklikler hayati değer olarak anlık algılanmaya çalışılmıştır (Kara vd., 2021). Bu tarz sensör yapıları aynı zamanda robotik aygıtlar içinde kullanılabilir ve doğrudan yine insan yaşamını etkileyebilirler. Bu konu ile alakalı yapılmış en önemli çalışmalardan biri olan U.C. Berkeley tarafından geliştirilen "Sanal Klavye" teknolojisidir. Giyilebilir bir eldivene toplamda 6 adet sensör takılarak (5 parmak ve bilek olmak üzere) parmakların hareketi ile mimiklerin tanımlanmasını amaçlanmaktadır ve böylelikle engellilerin yaşamı büyük ölçüde kolaylaştırılmaktadır (Kara vd., 2021).

Kablosuz sensör ağı aynı zamanda sıvı ortamda da çalışma performansı gösterebilir. WSN kullanılarak yapılan bir projede su kalitesini ölçümü için birçok sensör kullanılmış ve enerji tüketiminin azaltılması ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür (Kavak, 2008). Kablosuz sensörler kapalı ortamlarda izleme yapmakta da oldukça verimli olabilmektedir. CITRIS yani “*Toplumun İlgili Alanında Bilgi Teknolojileri Araştırma Merkezi ve Banatao Enstitüsü*” araştırmacıları, Cory Salonundaki sıcaklık ve ısı değişimini, 50 adet kibrit büyüklüğünde sensörü salon boyunca yerleştirerek takip etmişlerdir (Kara vd., 2021).

Kablosuz aktif sensörler görüldüğü gibi geniş alanlarda çok çeşitli parametreler izleyebilseler de kurulum maliyetleri, bakım ve batarya ömürleri gibi kısıtlamalara sahiptir. Kablosuz pasif sensörler ise izlenebilir değişkenler açısından sınırlı olsalar da düşük maliyet, uygulama kolaylığı ve uzun ömürlülük gibi konularda oldukça avantajlıdır (Kara vd., 2021).

Bu sensörler yaygın olarak endüktif-kapasitif (L-C) devre bazlı, bir rezonans frekansa sahip ve koşullar doğrultusunda bu frekansın değişimi ile parametre izleme şeklinde kullanılırlar. (L-C) kablosuz pasif sensörler 1967 yılında Collins tarafından öne sürülmüştür. Bu çalışmada Collins göze yerleştirilen minyatür basınç sensörünü oluşturmak için bir çift düz spiral bobin kullanmıştır (Collins, 1967). Fakat bu sensörler, mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) gelişmesi sebebiyle 1990 tarihine kadar ilgi görmemiştir.

Uzaktan sorgulama yeteneği kablosuz pasif sensörlerin en önemli avantajlarından birisi olarak bilinmektedir. Sensör bilgileri, fiziksel bağlantılar veya katı hizalama kriterleri olmadan elde edilebilmektedir. Bu nedenle kablosuz pasif sensörler, kablolu bağlantının zor veya hatta imkânsız olduğu durumlarda uygulanabilmektedir. Bu tip uygulamalara hareket halindeki parçalarda bulunan sensörler, insan vücudunun içinde tıbbi algılamada kullanılan sensörler ve zor çevre koşullarında algılama gereken durumlar örnek olarak verilebilmektedir (Dong vd., 2016).

Kablosuz pasif sensörlerin diğer büyük avantajı ise harici güç kaynağına gerek duymadan çalışabilmeleridir. Küçük devre yapıları, uzun ömürleri ve düşük maliyetleri gibi avantajlar bu sensörlerin çok önemli bir araştırma alanı olduğunu göstermektedir (Huang vd., 2016). L-C sensörleri genel olarak bir algılama kapasitörüne bağlı bir spiral bobinden oluşmaktadır. Bu bobin ve kapasitör bir rezonans devresi oluşturmaktadır. İlgili parametrelerin değişmesiyle kapasitör değeri de değişmekte ve bunun sonucu olarak rezonans frekansında

kayma meydana gelmektedir. L-C sensörünü kablosuz olarak sorgulamak için, bir okuma bobini sensör ile kuplajlanmıştır. Sensörün rezonans frekansı, okuma bobininin empedansını kaydederek algılanabilmektedir (Karakaya, 2012). Kapasitör sensörün rezonans frekansını düzenlemek için kullanılacak sensör ise algılama için kullanılmaktadır.

Yapılan bir çalışmada L-C rezonans temelli bir basınç sensörü, paralel bağlı kapasitör-indüktör rezonans devresi ile gerçekleştirilmiştir. Kapasitör iki metal plakadan oluşmakta ve kapasitans ise basınca göre değişim göstermektedir. Düzlemsel bobin ise kolay bağlantı için sensörün kapalı boşluğunda bulunmaktadır. Böylece bu boşluğun dışında bağlantı gerekmemekte ve bu sayede üretim süreci basitleşmektedir. Sensör sinyali ise endüktif kuplajlama ile kablosuz olarak aktarılmaktadır (Zheng vd., 2016).

1.2. Çalışmanın Amacı ve İçeriği

Bu çalışmada kablosuz güç transferi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-seri (PS), paralel-paralel (PP) kompanzasyon yapılarına sahip manyetik rezonans devrelerinin matematiksel modellenmesi ve devre analizi programları üzerinden analizleri yapılmıştır.

Analizleri yapılan kompanzasyon şemaları bir kablosuz pasif sensör test düzeneğinde uygulanarak manyetik rezonans tekniklerinin hali hazırda rezonans dışı çalışan manyetik pasif sensörlerde kullanımı amaçlanmaktadır.

2. MANYETİK REZONANS TEMELLİ UYGULAMALAR İÇİN KULLANILAN YAYGIN KOMPANZASYON ŞEMALARININ İNCELENMESİ

Manyetik rezonans temelli uygulamalarda genellikle tercih edilen kompanzasyon şemaları bobin ve kapasitörün bağlantı şekline bağlı olarak seri-seri devre, seri-paralel devre, paralel-seri devre ve paralel-paralel devrelerdir.

Bu devre şemalarında bobinin değerinin ölçülebilmesi için aşağıdaki örnekler gibi farklı yöntemler mevcuttur.

2.1. Rezonans İçin Kullanılan Kompanzasyon Topolojileri ve Endüktans Hesaplama Teknikleri

Kondansatör, bobin ve direnç bir araya gelerek manyetik rezonans devresini oluşturmaktadır. Devre içerisinde kondansatör ve bobinin “*reaktans*” değerlerinin ise toplamda sıfır olarak bulunması temelde rezonans devrelerinin şartını meydana getirmektedir. Rezonans devrede “ $X_L = \frac{1}{X_C}$ ” denklemi ile rezonans devrenin mevcut frekansı hesaplanmaktadır. Seri haldeki rezonans devrede bulunan “*açısal frekans*” türünün eşitliği aşağıda verilmektedir:

$$W = \sqrt{\frac{1}{C_1 L_1}} \approx \sqrt{\frac{1}{C_2 L_2}} \quad (2.1)$$

Seri rezonans koşulunun oluşturulması için gerek duyulan eşitlik ise şu denklem ile gösterilmektedir (Li vd., 2017):

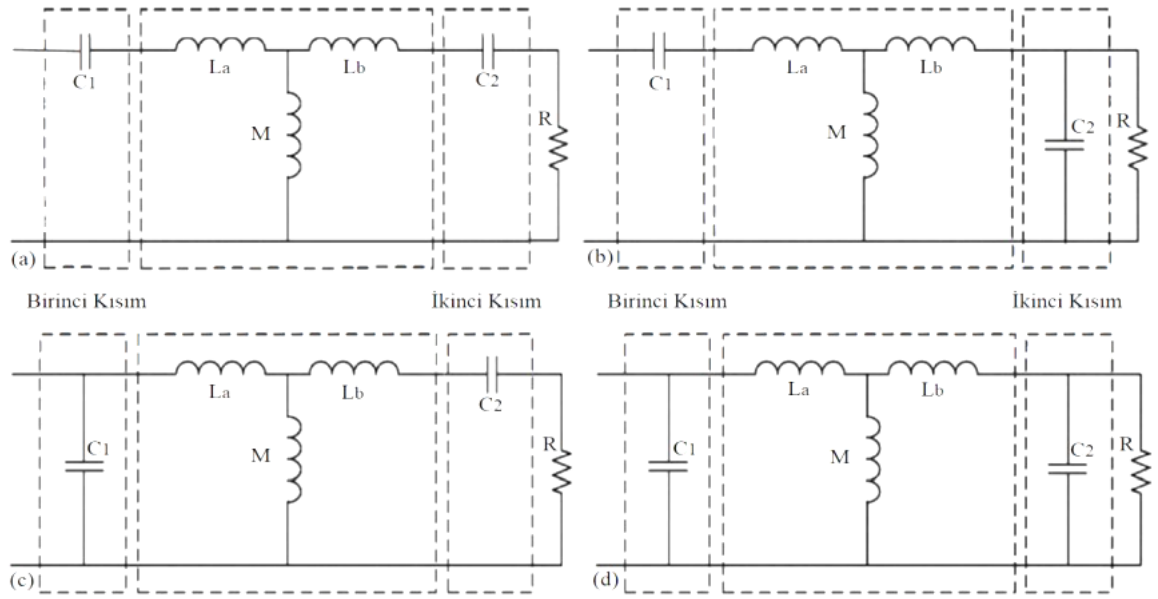
$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.2)$$

(2.1) ve (2.2) numaralı denklemlerden yararlanılarak X_C ve X_L ifadeleri (2.3) ve (2.4) numaralı denklemler şeklinde yazılabilir:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.3)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.4)$$

Rezonans devresinin mevcut yapısı olarak kullanılan toplamda dört adet farklı devre “topolojisi” mevcuttur. Bu topolojilerin yapıları ise Şekil 2.1. üzerinde gösterilmektedir (Chopra ve Bauer, 2011).



Şekil 2.1: Rezonans devresine ait topolojiler; a) SS, b) SP, c) PS, d) PP (Chopra ve Bauer, 2011).

Şekil 2.1’de gösterilen PP, SP, SS ve PS topolojilerinde yer alan kompanzasyon kondansatörleri bağlantı biçimine göre giriş (birincil) kapasitesinde meydana gelen değişim Tablo 2.1’de gösterilmektedir (Pashaei vd., 2016).

Tablo 2.1: Farklı kompanzasyon topolojileri için birincil kapasite hesabı (Pashaei vd., 2016).

Topoloji	Primer Kapasitansı, C_p	Primer Kalite Katsayısı, Q_p	Sekonder Kalite Katsayısı, Q_s
SS	$\frac{C_s L_s}{L_p}$	$\frac{R_L L_p}{w_0 M^2}$	$\frac{w_0 L_s}{R_L}$
SP	$\frac{C_s L_s}{L_p(1-k^2)}$	$\frac{w_0 L_p L_s^2}{R_L M^2}$	$\frac{R_L}{w_0 L_s}$
PS	$\frac{C_s L_s}{L_p(Q_s^2 k^4 + 1)}$	$\frac{R_L L_p}{w_0 M^2}$	$\frac{w_0 L_s}{R_L}$
PP	$\frac{C_s L_s(1-k^2)}{L_p(Q_s^2 k^4 + (1-k^2)^2)}$	$\frac{w_0 L_p L_s^2}{R_L M^2}$	$\frac{R_L}{w_0 L_s}$

Tablo 2.1’de değerleri verilen C_p ; primer kapasitans değerini, Q_p ; primer kalite katsayısını ve Q_s ise sekonder kalite katsayısını vermektedir.

2.1.1. Bobin Endüktansının Hesabı İçin Kullanılan Teknikler

Bobin tasarımı sırasında bulunan endüktans değerlerinin hesaplanabilmesi için bazı matematiksel yöntemlere gerek duyulmaktadır. Bobin endüktansının hesaplanmasında kullanılan teknikler Wheeler, Lundin ve Sidhu yöntemleridir. Bobin tasarımında bobinlerin birden fazla veya tek tabakalı olmasına dikkat edilerek gerek duyulan teknik sıkça tercih edilmektedir.

2.1.1.1. Wheeler Tekniği Sayesinde Endüktans Hesaplanması

Bu yöntem içerisinde “iterasyon” bulundurmeyen, basit bir biçimde hesap yapma imkânı sunan ve yüzde 0,1 ile yüzde 1,7 arasında değişim gösteren hata oranı ile endüktans hesaplama tekniği olarak bilinmektedir (Miller, 1987). Wheeler tekniği çok değişkenli (kompleks yapıda) ya da tek değişkenli (basit yapıda) endüktans hesaplamalarında kullanılabilir. Çok tabakalı halde endüktans hesabında hata düzeyi tabaka sayısının artış göstermesi ile bağlantılıyken, sarımlar içerisindeki uzaklık düzeyi artış gösterdikçe doğruluk oranı da artış göstermektedir. Wheeler tekniği sayesinde çok tabakalı bobin hesaplamasında kullanılan endüktans ifadesi aşağıdaki gibidir (Kassakian vd., 1992).

$$L = \frac{0,8a^2 N^2}{6a+9b+10c} [\mu\mathcal{H}] \quad (2.5)$$

Denklem 2.5. teki a, b, c ve N ifadeleri sırasıyla yarıçap, yükseklik, kablo kesiti ve sarım sayısıdır.

Tek bir tabakalı haldeki bobinde ise mevcut yükseklik yarıçaptan daha büyük değerde ise, endüktans ifadesi aşağıdaki gibi sade hale indirgenebilir. (Wheeler, 1928).

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a+10b} [\mu\mathcal{H}] \quad (2.6)$$

Hata oranı ortalama yüzde 1 civarında olan bu hesaplamanın, tek bir tabakası olan bobinlerde “ $0,2a>b>a$ ” şartlarını karşılayan sarmal haldeki bobinlerin mevcut endüktans hesabındaki wheeler göstergesi yüzde beş hata düzeyi ile aşağıdaki denklem sayesinde hesaplanmaktadır (Wheeler, 1928).

$$L = \frac{a^2 N^2}{8a+11c} [\mu\mathcal{H}] \quad (2.7)$$

2.1.1.2. Lundin Tekniği Sayesinde Endüktans Hesaplanması

Lundin tekniği, içerisinde iterasyon bulunduran bobin endüktansı hesaplama tekniğine dayanmış, içerisinde karmaşık birtakım denklemler bulunmaktadır. Bobinin mevcut yüksekliği, bobin çapından çok daha büyük olduğu durumlarda endüktans ifadesi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır (Fincan, 2015).

$$L = \frac{\mu\pi a^2 n^2}{b^2} \left(f_1 \left(\frac{4a^2}{b^2} \right) - \left(\frac{8a}{3\pi b} \right) \right) \quad (2.8)$$

Bobinin mevcut yükseklik değeri çap değerinden daha küçük olduğunda ise endüktans ifadesi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Fincan, 2015).

$$L = \mu a N^2 \left(1n \left(\frac{8a}{b}, 0,5 \right) f_1 \left(\frac{b^2}{4a^2} \right) - f_2 \left(\frac{b^2}{4a^2} \right) \right) \quad (2.9)$$

(2.9) numaralı analizde kullanılan “ $f_1(x)$ ve $f_2(x)$ ” ifadeleri (2.10) numaralı denklemden elde edilerek hesaplanmaktadır (Fincan, 2015).

$$f_1(x) = \frac{(1+0,383901x+0,017108x^2)}{(1+0,258952x)}, 0 < x < 1$$

$$f_2(x) = (0,093842x + 0,002029x^2) - 0,000801x^2, 0 < x < 1 \quad (2.10)$$

2.1.1.3. Sidhu Tekniği Sayesinde Endüktans Hesaplanması

Sidhu tekniğinin kullanılmasıyla birlikte hata payı günümüzde oldukça azalmıştır. Sidhu tekniğine göre endüktans hesabının temel ifadesi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır (Miller, 1987).

$$L = \frac{a^2 N^2 \mathcal{K} \mu \pi}{\ell} \quad (2.11)$$

Burada K eliptik fonksiyonu aşağıdaki gibi verilmektedir. (2.11) numaralı denklemde bulunan a, b, c ve d uzunlukları metre türünden verilmektedir.

$$\kappa = \frac{1}{3\pi} \left(\left(\frac{dc}{a^2} \right) (f(k) - E(k)) + \left(\frac{4d}{b} \right) E(k) - \left(\frac{8a}{b} \right) \right)$$

$$\mathcal{F}(k) = \frac{\pi}{2a_N}$$

$$E(k) = \mathcal{F}(k) \left(1 - (0,5 \sum_0^N 2^n c N^2) \right)$$

$$d = (4a^2 + b^2)$$

$$k = \frac{2a}{d} \quad (2.12)$$

2.1.2. Ortak Endüktans Hesaplama Tekniği

Kablo kullanmadan gerçekleştirilen enerji aktarımında, akımı ileten devre bobinlerinin arasındaki karşılıklı endüktans faktörünü direkt olarak etkileyen ortak bir ifade ortaya çıkmaktadır. Ortak haldeki endüktans ifadesi, bobin tasarımında bulunan değişimlerden sürekli olarak etkilendiği için bobinlerin kalite düzeyi yüksek olarak tasarlanmaktadır ve böylece yüksek değerlerde tutulabilmektedirler.

2.1.2.1. Sidhu İteratif Tekniği

Sidhu tekniği sayesinde ortak haldeki endüktans hesaplanmasında birden çok iterasyon barındıran özellik sıkça tercih edilmektedir. Sidhu tekniğine göre endüktans hesabı (2.13) numaralı denklem sayesinde yapılmaktadır (Miller, 1987).

$$\mathcal{M} = \frac{2\mu}{k} \sqrt{ab} \left(\left(\frac{1-k^2}{2} \right) \mathcal{F}(k) - E(k) \right) \quad (2.13)$$

Ortak endüktans'da bulunan “ k ” (2.14) numaralı denklemde verilmektedir (Miller, 1987).

$$k^2 = \frac{4ab}{(a+b^2+c^2)} \quad (2.14)$$

Ortak endüktans denkleminde yer alan “ $f(k)$ ve $E(k)$ ” iterasyon ifadeleri ise (2.15) numaralı denklemlerde verilmektedir (Miller, 1987).

$$\mathcal{F}(k) = \frac{\pi}{2a_N}$$

$$E(k) = \mathcal{F}(k) \left(1 - \left(0,5 \sum_0^N 2^n c_N^2 \right) \right) \quad (2.15)$$

Mevcut N iterasyon sayısı kadar işlem uygulanarak c_N ve a_N katsayıları elde edilmektedir. İterasyonun başlaması, ilk terime hâkim olduğu zaman gerçekleşmektedir. Bobinlerde yer alan parametrelerinin mevcut değerleri “ a_0, b_0, c_0 ” (2.16)’da ki denklemler kullanılarak hesaplanabilmektedir (Miller, 1987).

$$a_0 = 1$$

$$b_0 = \sqrt{1 - k^2}$$

$$c_0 = k \quad (2.16)$$

Başlangıçtaki değerlerin hesaplanması sağlayan “ a_N , b_N , ve c_N ,” iterasyonları (2.17) numaralı denklemlerde verilmektedir (Miller, 1987).

$$a_N = \frac{1}{2}(a_{N-1} + b_{N-1})$$

$$b_N = \sqrt{a_N} - b_{N-1}$$

$$c_N = \frac{1}{2}(a_N - b_{N-1}) \quad (2.17)$$

2.1.2.2. Neumann İteratif Tekniği

Neuman tekniğinde ortak olan endüktans hesabı, mutlaka integral denklemini içerisinde bulundurmalıdır. İterasyonun zor olması nedeniyle, ortak olan endüktans hesabındaki “*Simposon 3/8*” yaklaşım formülü tekniği sıkça tercih edilmektedir. Neumann iteratif tekniğini ortak endüktans hesabı (2.18) numaralı denklemde verilmektedir (Fincan, 2015).

$$\mathcal{M} = \mathcal{N}_1 \mathcal{N}_2 r_1 r_2 \frac{\mu_0}{2} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(a)}{\sqrt{b^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(a)}} \quad (2.18)$$

2.2. Seri-Seri Devre Topolojisi İncelenmesi

Seri-seri devre topolojisi primer ve sekonder devre yapılarında bobin ve kondansatörün birbirlerine seri bağlandığı devre topolojisidir. Bu devre yapısında yapılmış çalışmalar oldukça fazla olup (2.1) numaralı denklemde ifade edilen rezonans frekans formülü bu devre yapısına aittir.

2.2.1. Seri-Seri Devre Topolojisinin Mathematica Programında Analiz Edilmesi

Mathematica kullanılarak devrelerin analiz edilmesi öncelikle giriş empedansı ifadesinin mathematica programına Şekil 2.2’deki kod formunda girilmesiyle başlamıştır:

$$In[-]=$$

$$Zin = I * (w * L - 1 / (w * T)) + ((w^2) * (M^2) / (RL + I * (L * w - 1 / (T * w))))$$

$$Out[-]= i \left(-\frac{1}{T w} + L w \right) + \frac{M^2 w^2}{RL + i \left(-\frac{1}{T w} + L w \right)}$$

Şekil 2.2: Rezonans frekans hesaplama kodu (Ahmad vd.,2018).

Şekil 2.2’de verilmiş olan Z_{in} giriş denkleminde I, w, L, T, M, RL değerleri sırası ile imajiner ifade, rezonans frekans değeri, bobin değeri, kapasite değeri, bobinler arası indüktans değeri (Mutual Inductance) ve sensör (yük) değerlerini temsil etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus C (kapasite) sembolü ışık ızı sabiti olarak programda kabul edildiği için denklemde T olarak ifade edilmiştir. Denklemde $L_1 = L_2$ ve $C_1 = C_2$ olarak alındığı için L ve T değerleri ikişer tanedir. Mathematica da j yerine ise I harfi kullanılmaktadır. Denklemi tanımladıktan sonra ilk amaç denklemin imajiner kısmının bulunması olacaktır. Çünkü amaç imajiner kısmı 0’a eşitleyen w değerlerini hesaplayarak hem ADS (Gelişmiş Tasarım Sistemi) kıyaslamaları yapmak hem de bu değeri yerine koyarak giriş empedansını reel hale getirebilmektir. Giriş empedansı ifadesinin reel ve imajiner kısımlarını ayıran ComplexExpand komutunun mathematica’da uygulandığı ve çıkan sonuç Şekil 2.3’te kod formunda verilmektedir.

```
Zin2 = ComplexExpand[Zin]
```

$$i = \frac{M^2 RL w^2}{RL^2 + \left(-\frac{1}{T w} + L w\right)^2} + i \left(-\frac{1}{T w} + L w + \frac{M^2 w}{T (RL^2 + \left(-\frac{1}{T w} + L w\right)^2)} - \frac{L M^2 w^3}{RL^2 + \left(-\frac{1}{T w} + L w\right)^2} \right)$$

$$Zimag = -\frac{1}{T w} + L w + \frac{M^2 w}{T (RL^2 + \left(-\frac{1}{T w} + L w\right)^2)} - \frac{L M^2 w^3}{RL^2 + \left(-\frac{1}{T w} + L w\right)^2}$$

Şekil 2.3: Zin giriş değeri kodu.

Yalnızca imajiner kısım ele alınarak Solve komutu içerisinde w değerini 0’a eşitleyen değerler hesaplanışı ve sonuçlar ise Şekil 2.4’te mathematica kod formunda verilmektedir.

```
FullSimplify[Cozum, Elements[M, L, T, RL, w], PositiveReals]
FullSimplify[{{w -> -\frac{1}{\sqrt{L} \sqrt{T}}}, {w -> 1 / (Sqrt[L] * Sqrt[T])}},
```

Şekil 2.4: Cozum=Solve komutu ve denklemler.

Giriş empedans ifadesinde w yerine Şekil 2.4'te elde edilen çözümlerden biri konulduğunda Şekil 2.5'te görüldüğü gibi rezonans frekans için sağlanması gerekli olan değerlere ulaşılır. Görüldüğü üzere giriş empedansı tamamen reel değer vererek çözümün doğruluğu teyit edilmiştir.

```
FullSimplify[Zin5, w = 1 / (Sqrt[L] * Sqrt[T])]
= \frac{M^2}{L RL T}
```

Şekil 2.5: Frekans değerlerinin zin değerine işlenmesi.

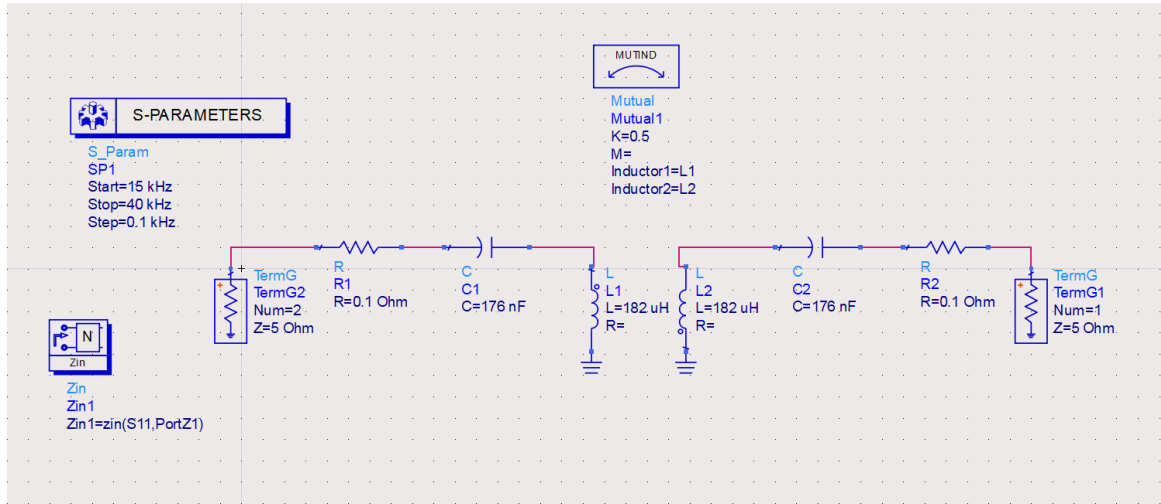
Bulunan rezonans frekansın diğer çözüm değerinden biri Zin denkleminde yerine koyulursa Şekil 2.6'daki gibi girişten görülen empedansın sadece yük değerine (RL'ye) eşit olduğu görülmektedir;

```
FullSimplify[Zin5, w = Sqrt[(2 * L * T) / (L^2 * T^2 - M^2 * T^2) - (RL^2 * T^2) /
(L^2 * T^2 - M^2 * T^2) +
Sqrt[T^2 * (4 * M^2 - 4 * L * RL^2 * T + RL^4 * T^2)] /
(L^2 * T^2 - M^2 * T^2)] / Sqrt[2]]
RL
```

Şekil 2.6: Sonuç değer kodu.

Yani rezonans frekans yalnızca yükten etkilenir sonucuna ulaşılır.

2.2.2. Seri-Seri Devre Topolojisinin ADS Programında Analiz Edilmesi



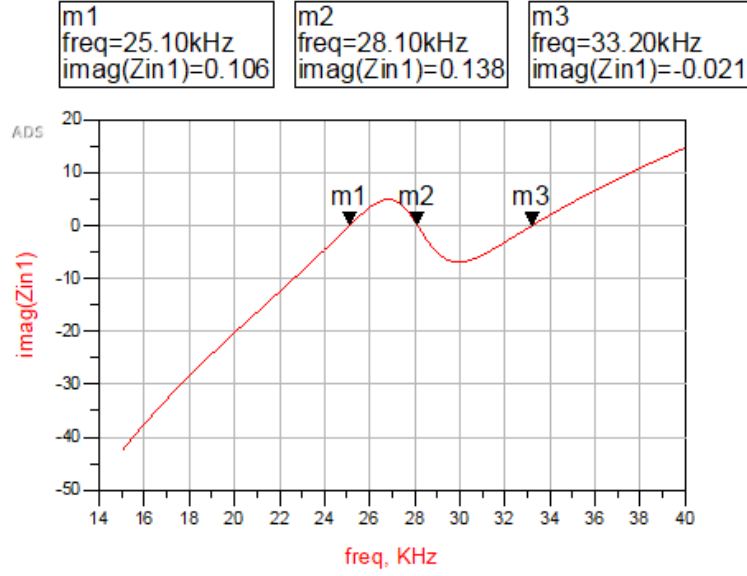
Şekil 2.7: Seri-Seri topoloji devre şeması.

Seri-seri devre topolojisi ADS devresi Şekil 2.7’ de görülmektedir. Devrenin giriş kısmında Zin giriş empedans değerini analiz edebilmek için modül eklenmiştir. Bobin ve kondansatör değerleri eşittir. Program düzeneğinin başlangıç frekansı 15 kHz ve bitiş frekans 40 kHz seçilmiş, rezonans frekans değer değişimlerini tam incelemek için adım frekansı 0.1 kHz belirlenmiştir.

S parametlerine girilen start stop ve step adımları basitçe başlangıç, son ve adım frekansları olarak nitelendirilebilir. Daha fazla adım veya geniş bir devre simülasyonu için başlangıç son ve adım değerleri değiştirilebilir. Geniş alanda fazla adımlı ve az hatalı simülasyonlar yapmak mümkün olur.

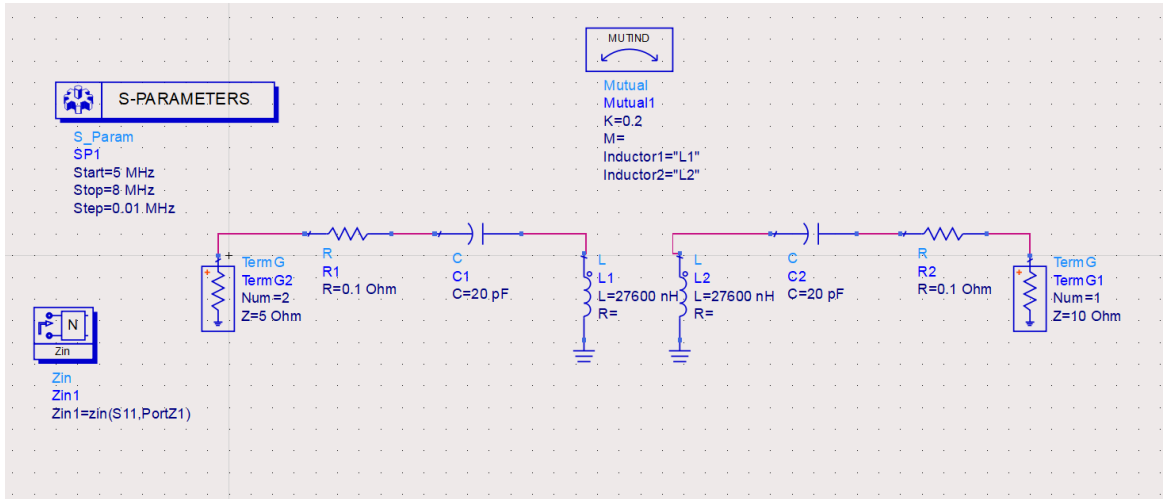
Zin giriş empedans seçeneği ise Zin in hangi noktalarında 0 değerine geldiğini, devredeki rezonans frekans sayısını ve bu frekansın değerini vermesi için eklenir. Buna göre Zin giriş değerinin imajiner kısmı 0’a eşit olduğu durumlarda rezonans frekans değeri ölçülebilir.

Mutind seçeneği ise hangi iki bobinin arasında böyle bir etkileşim olduğunun simülasyona girilmesini ve k değerinin belirlenmesini sağlar. Tüm bu adımların tamamlanmasının ardından simülasyon çalıştırılmaya hazır hale getirilir.



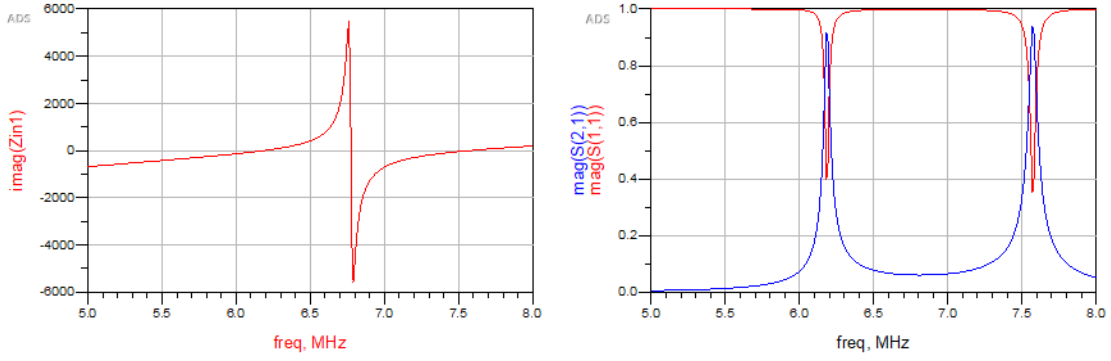
Şekil 2.8: Rezonans frekans değerleri.

Şekil 2.8’de incelenebileceği gibi 3 adet rezonans frekans değeri gözlemlenmiştir. Kuplajlanma sabiti (K değerinin) değiştirildiği diğer seri-seri devre de Şekil 2.9’da verildiği üzere incelenmiştir. Burada kapasite ve bobin değer değişimleri de mevcuttur. Başlangıç frekansı 5 MHz bitiş 8 MHz ve adım 0.01 MHz olarak seçilmiştir.



Şekil 2.9: Frekans değerleri değiştirilmiş seri-seri devre şeması.

Buna göre rezonans frekans ve S parametre değerleri Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.10: Devrenin rezonans frekans ve S parametre değerleri.

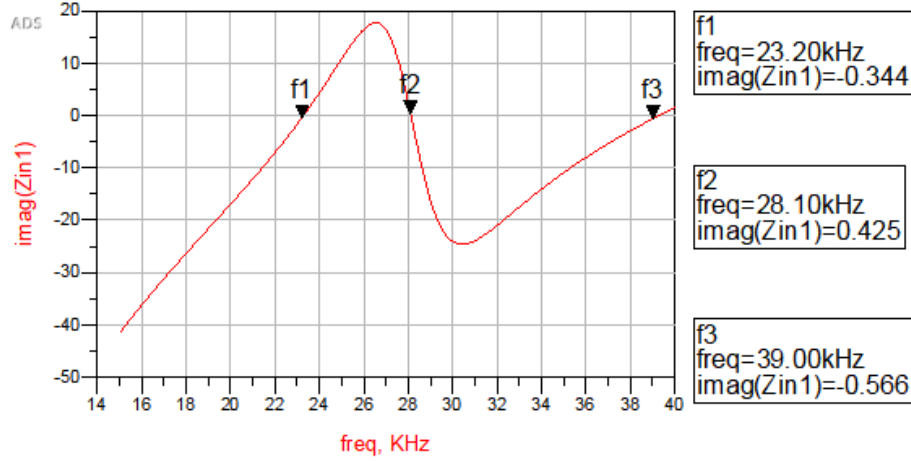
2.2.3. Seri-Seri Devre Topolojisi ADS ve Mathematica Sonuçlarının Kıyaslanması

Seri-seri devre topolojisi için oluşturulan devre yapısında sonuçların kıyaslanması için öncelikle ADS programına girilen yük direnci, ortak endüktans değeri, bobin değeri ve kapasite değerinin tespit edilmesi gereklidir.

Tablo 2.2: ADS programında belirlenen değişken değerleri

RL	5 Ohm
L	182×10^{-6} Henry
C	176×10^{-9} Farad
k	0.5

Tablo 2.2’de belirlenen değişken değerleri ADS programına işlenerek sonuçlar analiz edilirse Şekil 2.11’deki grafik elde edilmektedir.



Şekil 2.11: ADS programında analiz edilen frekans değerleri

Belirlenen değerler aynı şekilde mathematica programına girilerek analiz gerçekleştirilebilir.

```

In[ ]:= T = 0.000000176
L = 0.000182
k = 0.5
M = k * Sqrt [L * L]
RL = 5

1 / (sqrt(L) * sqrt(T) * (2 * pi))

sqrt( (2 * L * T / (L^2 * T^2 - M^2 * T^2) - RL^2 * T^2 / (L^2 * T^2 - M^2 * T^2) - sqrt(T^2 * (4 * M^2 - 4 * L * RL^2 * T + RL^4 * T^2)) / (L^2 * T^2 - M^2 * T^2)) / 2) / (2 * pi)

sqrt( (2 * L * T / (L^2 * T^2 - M^2 * T^2) - RL^2 * T^2 / (L^2 * T^2 - M^2 * T^2) + sqrt(T^2 * (4 * M^2 - 4 * L * RL^2 * T + RL^4 * T^2)) / (L^2 * T^2 - M^2 * T^2)) / 2) / (2 * pi)

Out[ ]:= 1.76 x 10^-7
Out[ ]:= 0.000182
Out[ ]:= 0.5
Out[ ]:= 0.000091
Out[ ]:= 5
Out[ ]:= 28120.8
Out[ ]:= 23246.9
Out[ ]:= 39279.

```

Şekil 2.12: Mathematica programından elde edilen değerler.

Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 deki sonuç değerleri kıyaslandığında sonuçların aynı olduğu gözlemlenebilir.

2.3. Seri-Paralel Devre Topolojisi İncelenmesi

Seri-paralel devre yapısında primer kısımdaki bobin ve kondansatör birbirlerine seri, sekonder kısımdaki bobin ve kondansatör birbirlerine paralel bağlanmıştır.

2.3.1. Seri-Paralel Devre Topolojisinin Mathematica Programında Analiz Edilmesi

Seri-paralel devre yapısının Mathematica programında analiz edilmesinde iki farklı durum mevcuttur. Bunlardan ilki primer ve sekonder kondansatörün eşit olduğu durum, diğeri ise primer kondansatörün diğere devre değişkenlerine bağlı (bkz. Tablo 2.1) oluşturulduğu durumdur. Şekil 2.13'te eşit primer ve sekonder kondansatörü durumu için girişten görünen empedansın mathematicada kod formunda ifadesi verilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{In[]:= } & R = 0 \\ & \text{Zin} = \{ R + I * (L * w - 1 / (Ca * w)) + ((M^2) * (w^2)) / (R + I * L * w + RL / (1 + I * Ca * RL * w)) \} \\ \text{Out[]:= } & 0 \\ \\ \text{Out[]:= } & \left\{ i \left(-\frac{1}{Ca * w} + L * w \right) + \frac{M^2 * w^2}{i * L * w + \frac{RL}{1 + i * Ca * RL * w}} \right\} \end{aligned}$$

Şekil 2.13: Kondansatör değerlerinin eşit olduğu seri-paralel devre giriş kodu.

Burada R, L, I, Ca, w ve RL değerleri sırası ile direnç değeri, bobin değeri, imajiner gösterim, kondansatör değeri, rezonans frekans değeri ve yüküdür. R değerleri seri-seri devre yapısında olduğu gibi oldukça küçük olmaları sebebi ile kısa devre edilmiştir dolayısıyla 0 değerine eşitlenmiştir. Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te gösterildiği üzere, ComplexExpand komutu ile reel ve imajiner kısımlar ayrıldıktan sonra Solve komutu ile imajiner kısmı 0'a eşitleyecek w değerleri çıkarılabilir.

`SONUC = ComplexExpand[Zin]`

$$\begin{aligned} & \{ (M^2 * RL * w^2) / ((Ca^2 * RL^2 * w^2 + 1) * ((L * w - (Ca * RL^2 * w) / (Ca^2 * RL^2 * w^2 + 1))^2 + \\ & RL^2 / (Ca^2 * RL^2 * w^2 + 1)^2) + \\ & I * (-((L * M^2 * w^3) / ((L * w - (Ca * RL^2 * w) / (Ca^2 * RL^2 * w^2 + 1))^2 + \\ & RL^2 / (Ca^2 * RL^2 * w^2 + 1)^2) + (Ca * M^2 * RL^2 * w^3) / ((Ca^2 * RL^2 * w^2 + 1) * \\ & ((L * w - (Ca * RL^2 * w) / (Ca^2 * RL^2 * w^2 + 1))^2 + RL^2 / (Ca^2 * RL^2 * w^2 + 1)^2)) - \\ & 1 / (Ca * w) + L * w \} \end{aligned}$$

Şekil 2.14: ComplexExpand kodu ile reel ve imajiner kısımların ayrılması.

Cozum = Solve[COZUMimag == 0, w]

Şekil 2.15: İmajiner kısmı 0'a eşitleyen w değerleri için solve komutu.

Bu işlemin ardından bulunan 6 adet w değeri Ek A. 'da gösterilmiştir. İncelendiğinde görüleceği üzere $W_2 = -W_1$, $W_4 = -W_3$ ve $W_6 = -W_5$ dir. Kapasite değerlerinin eşit olmadığı durum için hesaplamalar da kondansatör değerlerinin ifadeleri yazılarak analiz edilmiştir.

```
In[ ]:= ZinSimp = Simplify[Zin, Cp2 = 1 / (L * (w^2))]
```

$$\text{Out[]} = \frac{M^2 RL}{L^2} - \frac{i}{Cs1 w} + i L w - \frac{i M^2 w}{L}$$

```
In[ ]:= ZinAcik = ComplexExpand[ZinSimp]
```

$$\text{Out[]} = \frac{M^2 RL}{L^2} + i \left(-\frac{1}{Cs1 w} + L w - \frac{M^2 w}{L} \right)$$

```
In[ ]:= ZinAcikImag = -(1 / (Cs1 * w)) + L * w - (M^2 * w) / L
```

$$\text{Out[]} = -\frac{1}{Cs1 w} + L w - \frac{M^2 w}{L}$$

```
In[ ]:= Cozum = Solve[ZinAcikImag == 0, w]
```

$$\text{In[]} = \left\{ \left\{ w \rightarrow -\frac{\sqrt{L}}{\sqrt{Cs1 L^2 - Cs1 M^2}} \right\}, \left\{ w \rightarrow \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{Cs1 L^2 - Cs1 M^2}} \right\} \right\}$$

```
Solve[-(Sqrt[L] / Sqrt[Cs1 * L^2 - Cs1 * M^2]) == w, Cs1]
```

$$\text{Out[]} = \left\{ \left\{ w \rightarrow -\frac{\sqrt{L}}{\sqrt{Cs1 L^2 - Cs1 M^2}} \right\}, \left\{ w \rightarrow \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{Cs1 L^2 - Cs1 M^2}} \right\} \right\}$$

```
In[ ]:= Cs1 = L / ((L^2 - M^2) * w^2)
```

$$\text{Out[]} = \frac{L}{(L^2 - M^2) w^2}$$

Şekil 2.16: Farklı kondansatör değerlerinin belirlenerek giriş empedans değerine işlenmesi.

Şekil 2.16’da verilen kondansatör değerleri Zin giriş empedans değerinde yerine konularak giriş empedansının hesaplamaları yapılabilir. Giriş empedans hesaplaması için gerekli olan primer kondansatör değeri Tablo 2.1’den alınmış ve mathematica programına Şekil 2.16’da görüldüğü gibi işlenmiştir.

$$\text{In[]:= ZinNew} = I * (L * wn - 1 / (Cs1 * wn)) + ((wn^2) * (M^2)) / (I * wn * L + (RL / (1 + I * RL * Cp2 * wn)))$$

$$\text{Out[]:= } i \left(-\frac{(L^2 - M^2) w^2}{L wn} + L wn \right) + \frac{M^2 wn^2}{i L wn + \frac{RL}{1 - \frac{i RL wn}{L w^2}}}$$

$$\text{In[]:= ZinAcikNew} = \text{ComplexExpand[ZinNew]}$$

$$\text{Out[]:= } \frac{M^2 RL wn^2}{\left(1 + \frac{RL^2 wn^2}{L^2 w^4}\right) \left(\frac{RL^2}{\left(1 - \frac{RL^2 wn^2}{L^2 w^4}\right)^2} + \left(L wn - \frac{RL^2 wn}{L w^2 \left(1 - \frac{RL^2 wn^2}{L^2 w^4}\right)}\right)^2\right)} +$$

$$i \left(-\frac{L w^2}{wn} + \frac{M^2 w^2}{L wn} + L wn - \frac{L M^2 wn^3}{\frac{RL^2}{\left(1 - \frac{RL^2 wn^2}{L^2 w^4}\right)^2} + \left(L wn - \frac{RL^2 wn}{L w^2 \left(1 - \frac{RL^2 wn^2}{L^2 w^4}\right)}\right)^2} + \right.$$

$$\left. \frac{M^2 RL^2 wn^3}{L w^2 \left(1 + \frac{RL^2 wn^2}{L^2 w^4}\right) \left(\frac{RL^2}{\left(1 - \frac{RL^2 wn^2}{L^2 w^4}\right)^2} + \left(L wn - \frac{RL^2 wn}{L w^2 \left(1 - \frac{RL^2 wn^2}{L^2 w^4}\right)}\right)^2\right)} \right)$$

$$\text{In[]:= ZinAcikNewImag} = \text{Simplify} [-((L * w^2) / wn) + (M^2 * w^2) / (L * wn) + L * wn - (L * M^2 * wn^3) / (RL^2 / (1 + (RL^2 * wn^2) / (L^2 * w^4)))^2 + (L * wn - (RL^2 * wn) / (L * w^2 * (1 + (RL^2 * wn^2) / (L^2 * w^4))))^2) + (M^2 * RL^2 * wn^3) /$$

$$(L * w^2 * (1 + (RL^2 * wn^2) / (L^2 * w^4))) * (RL^2 / (1 + (RL^2 * wn^2) / (L^2 * w^4)))^2 + (L * wn - (RL^2 * wn) / (L * w^2 * (1 + (RL^2 * wn^2) / (L^2 * w^4))))^2)]$$

$$\text{Out[]:= } \frac{(-w^2 + wn^2) (L^4 w^4 wn^2 - M^2 RL^2 (w^4 - w^2 wn^2 + wn^4) + L^2 (-M^2 w^4 wn^2 + RL^2 (w^2 - wn^2)^2))}{L wn (L^2 w^4 wn^2 + RL^2 (w^2 - wn^2)^2)}$$

Şekil 2.17: Giriş empedans değerinin imajinerinin farklı kondansatör değerlerine göre hesaplanması.

Şekil 2.17’de verilmiş olan kod yardımı ile giriş empedans değerinin imajiner kısmını 0 yapan wn değerleri bulunur. Elde edilen 6 adet sonuç yine birbirlerinin negatifi olarak değerlendirilmektedir.

In[*]= Solve[ZinAcikNewImag == 0, wn]

Out[*]= {wn → -w}, {wn → w},

$$\left\{ \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{L^2 RL^2 w^2}{L^2 RL^2 - M^2 RL^2} - \frac{M^2 RL^2 w^2}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} - \frac{L^4 w^4}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} + \frac{L^2 M^2 w^4}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} - \right. \\ & \left. \frac{\sqrt{(-2L^2 RL^2 w^2 + M^2 RL^2 w^2 + L^4 w^4 - L^2 M^2 w^4)^2 - 4(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)(L^2 RL^2 w^4 - M^2 RL^2 w^4)}}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} \right) \right\}, \\ & \left\{ \left(\frac{L^2 RL^2 w^2}{L^2 RL^2 - M^2 RL^2} - \frac{M^2 RL^2 w^2}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} - \frac{L^4 w^4}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} + \frac{L^2 M^2 w^4}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\sqrt{(-2L^2 RL^2 w^2 + M^2 RL^2 w^2 + L^4 w^4 - L^2 M^2 w^4)^2 - 4(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)(L^2 RL^2 w^4 - M^2 RL^2 w^4)}}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} \right) \right\}, \\ & \left\{ \left(\frac{L^2 RL^2 w^2}{L^2 RL^2 - M^2 RL^2} - \frac{M^2 RL^2 w^2}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} - \frac{L^4 w^4}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} + \frac{L^2 M^2 w^4}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\sqrt{(-2L^2 RL^2 w^2 + M^2 RL^2 w^2 + L^4 w^4 - L^2 M^2 w^4)^2 - 4(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)(L^2 RL^2 w^4 - M^2 RL^2 w^4)}}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} \right) \right\}, \\ & \left\{ \left(\frac{L^2 RL^2 w^2}{L^2 RL^2 - M^2 RL^2} - \frac{M^2 RL^2 w^2}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} - \frac{L^4 w^4}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} + \frac{L^2 M^2 w^4}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\sqrt{(-2L^2 RL^2 w^2 + M^2 RL^2 w^2 + L^4 w^4 - L^2 M^2 w^4)^2 - 4(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)(L^2 RL^2 w^4 - M^2 RL^2 w^4)}}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)} \right) \right\} \end{aligned} \right\}$$

Şekil 2.18: Farklı kondansatör değerleri için bulunan wn değerleri.

Şekil 2.18 incelendiğinde sonuçlardan da görüleceği gibi $wn_2 = -wn_1$ $wn_4 = -wn_3$ $wn_6 = -wn_5$ eşitlikleri vardır.

Şekil 2.18'de bulunan sonuç denklemleri Zin giriş empedansında yerine konarak reel giriş değerlerine ulaşılabilir.

```

Simplify[ZinNew2, wn = w]
Out[ ]:=  $\frac{M^2 RL}{L^2}$ 

In[ ]:= FullSimplify[ZinNew2,
  wn =
  -  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 
  (  $\sqrt{\left( -\frac{1}{(L^2 - M^2) RL^2} (M^2 RL^2 w^2 + L^4 w^4 - L^2 (2 RL^2 w^2 + M^2 w^4)) + \sqrt{(w^4 (-3 M^4 RL^4 + L^8 w^4 + L^2 (4 M^2 RL^4 - 2 M^4 RL^2 w^2)) - 2 L^6 (2 RL^2 w^2 + M^2 w^4)) + L^4 (6 M^2 RL^2 w^2 + M^4 w^4)} \right)}$  ) ]

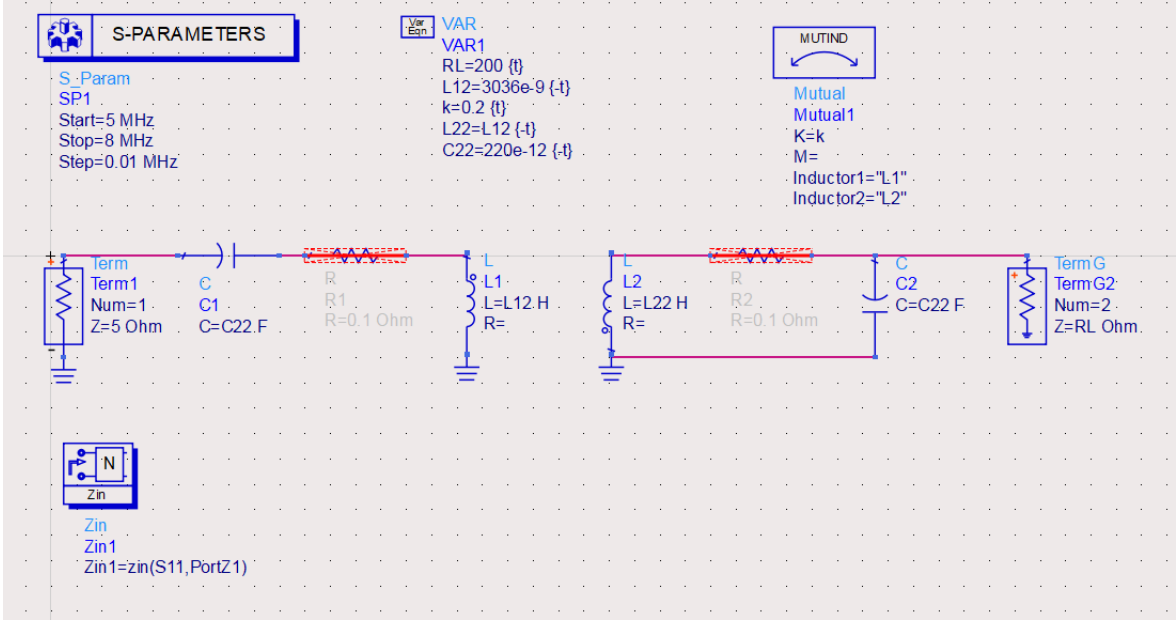
In[ ]:= ((L - M) * (L + M) * w^2) / RL
Out[ ]:=  $\frac{(L - M) (L + M) w^2}{RL}$ 

```

Şekil 2.19: Farklı kondansatör değerleri için hesaplanmış olan giriş empedans reel değerleri.

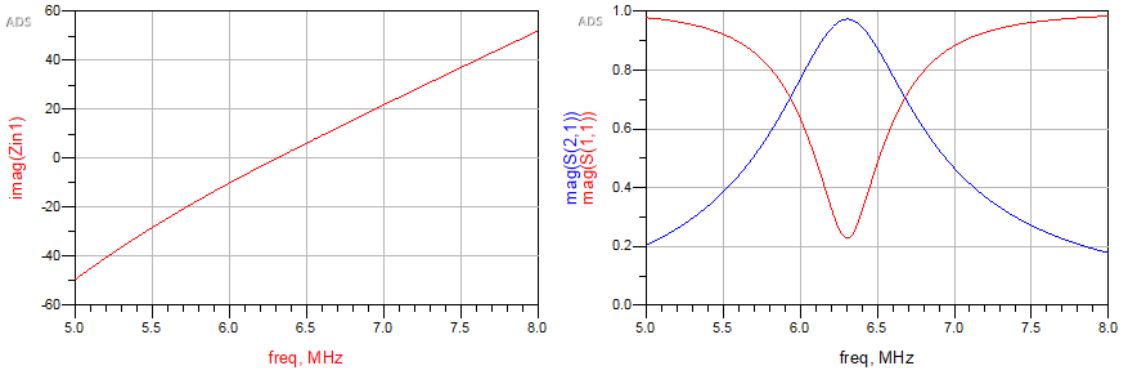
Kondansatör değerlerinin farklı olduğu bu hesaplamalara ait komutlarla birlikte bulunan sonuç denklemleri Ek B’de verilmiştir.

2.3.2. Seri-Paralel Devre Şemasının ADS Programında Analiz Edilmesi



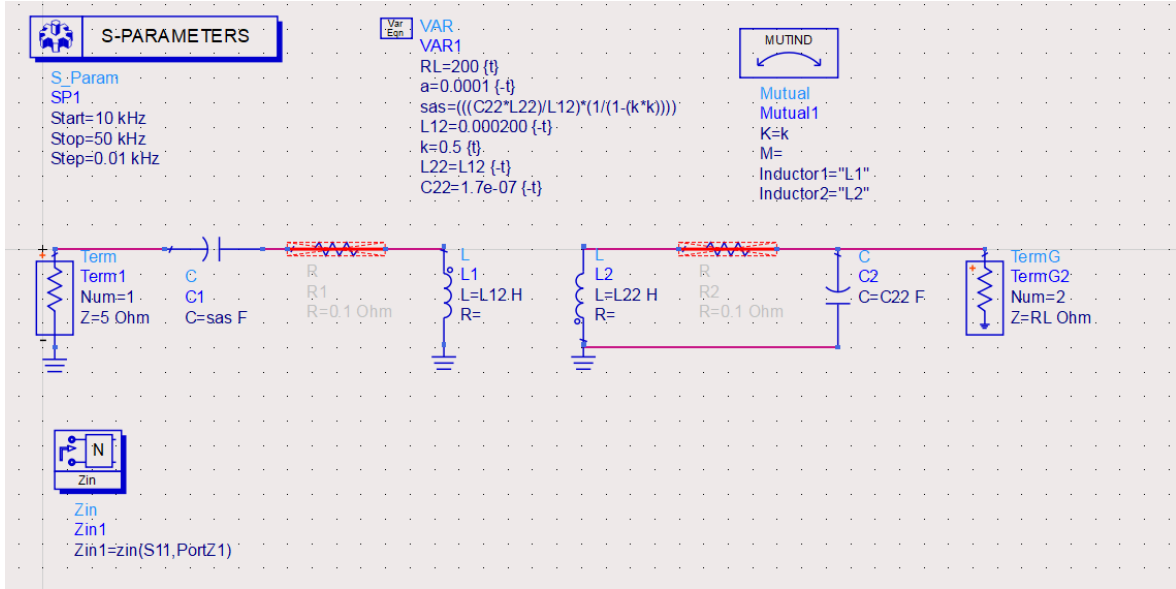
Şekil 2.20: Kondansatör değerlerinin eşit olduğu seri-paralel devre şeması.

Devre yapısı ADS sistemde bu şekilde oluşturulabilir. Burada devre yapısında R (direnç) değerlerinin kısa devre olmasının sebebi değerlerinin oldukça küçük ve neredeyse etkisiz olmasıdır. Başlangıç frekansı 5 MHz, bitiş frekansı 8 MHz ve adım frekansı 0.01 MHz seçilmiştir.



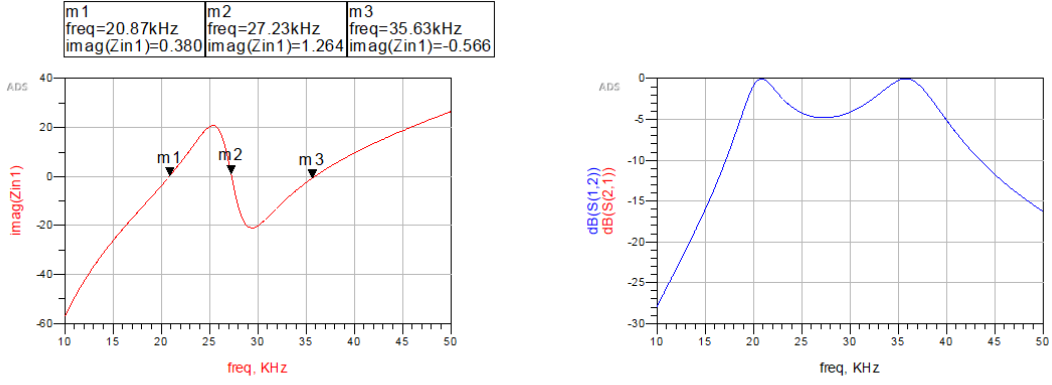
Şekil 2.21: Kondansatör değerlerinin eşit olduğu durumda S parametre ve rezonans frekans değerleri.

Seri-seri devre topolojisi dışında kullanılan diğer topolojilerde C değerlerinin birbirinden farklı olduğu durum mevcuttur. Bu duruma dair primer devrenin C değeri Tablo 2.1’de verilmiştir. Kondansatör değeri değişiminin ADS sisteme kod olarak işlenmesi Şekil 2.22’de verilmiştir.



Şekil 2.22: Kondansatör değerinin ADS programına işlenmesi.

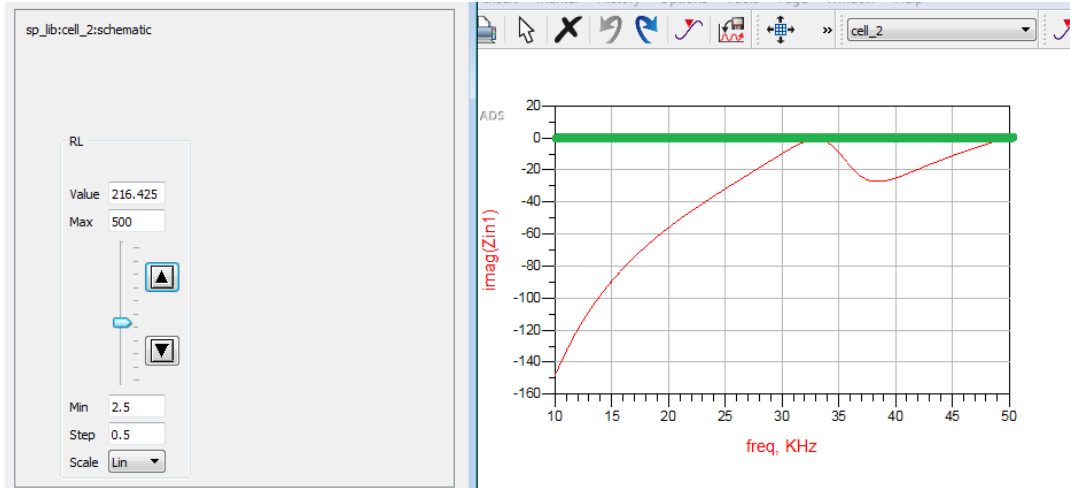
Burada “sas” olarak belirlenen değişken aslında C_{12} kondansatörünün kapasite değeridir. “Var” değişkenleri ADS programında HOME çubuğunda Var Eqn olarak belirlenen yere tıklanarak girilebilir. Buraya devre şemasında kullanılan materyallerin asıl değerleri girilebileceği gibi C_{12} gibi hesaplanması gereken değerlerin hesabı da girilerek yapılabilmektedir. Simülasyona S parametreleri, Zin giriş empedansı ve Mutind yani bobinlerin birbirlerine reaksiyonlarının gösterildiği alanda tanımladıktan sonra çalıştırmaya hazır hale getirilir.



Şekil 2.23: Primer kondansatör değişiminin ardından S parametre ve rezonans frekans değerleri.

2.3.3. Seri Paralel Topoloji de ADS Sonuçlarının Yorumlanması

ADS sisteminde ulaşılan sonuçlar Tuning ile değiştirerek grafik değişimleri yapılabilir.



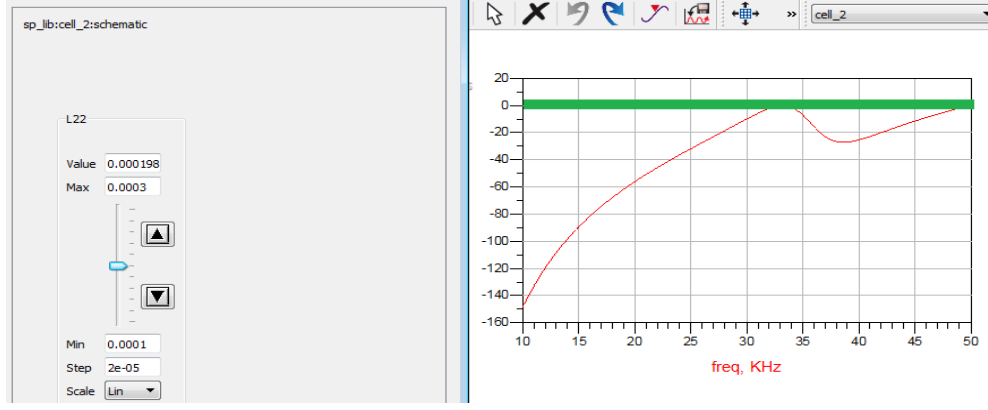
Şekil 2.24: Elde edilen grafik sonuçları.

RL değişkeni azaltıldığında 216 Ohm civarı ve altında grafiğin 0 noktasını bir kez kesmesi artırıldığında ise bu kesimin 3 kez olduğunu gözlemlenmektedir. Bunun anlamı şudur;

$RL > 220 \rightarrow 3$ REZONANS

$RL < 220 \rightarrow 1$ REZONANS

Bobin değeri azaltılıp artırılarak bulunan sonuçlar Şekil 2.25'te gözlemlenmektedir.



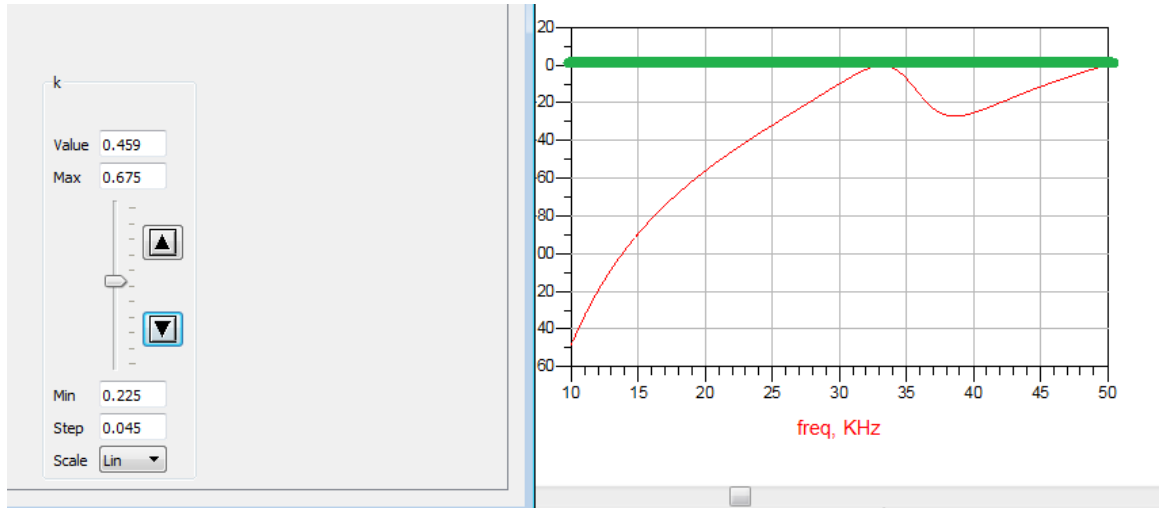
Şekil 2.25: Bobin değerine bağlı olarak sonuçlar.

Kullanılan bobinin endüktans değeri 198 uH ve üstünde olduğunda Zin imajinerin 0 noktasının bir kez, değer azaldıkça ise 3 kez kesildiğini gözlemlenebilir.

$L_{22} > 198 \text{ uH} \rightarrow 1 \text{ REZONANS}$

$L_{22} < 198 \text{ uH} \rightarrow 3 \text{ REZONANS}$

Anlamına gelmektedir. K değerinde oluşturulan değişimlerin grafiği Şekil 2.26'da verilmiştir.



Şekil 2.26: K değerine bağlı olarak sonuçlar.

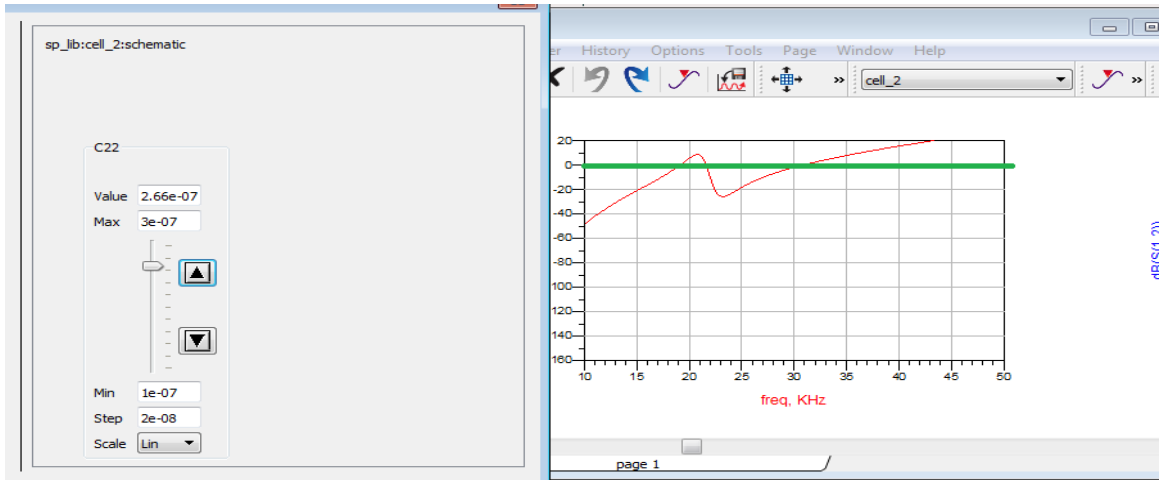
k değeri yaklaşık 0.459 ve üstünde olduğunda grafiğin Zin imajinerin 0 noktasını 3 kez , değeri azaldıkça ise 1 kez kestiği gözlemlenmektedir.

$k > 0.459 \rightarrow 3$ REZONANS

$k < 0.459 \rightarrow 1$ REZONANS

Olarak yorumlanabilir.

Kapasite değişimi ile sonuçların değişmesi Şekil 2.27'de gözlemlenebilir.



Şekil 2.27: Kapasite değerine bağlı olarak sonuçlar.

Kapasite değerinin rezonans çeşitliliği sağlamaktan çok rezonans değerlerini frekans anlamında kaydıracağı gözlemlenebilir. Yani deneysel anlamda frekans kaymasına sebebiyet vermiştir.

2.4. Paralel-Seri Devre Topolojisi İncelenmesi

Paralel seri devre topolojisi primer kısımdaki bobin ve kondansatör yapıları birbirlerine paralel ve sekonder kısımdaki bobin ve kondansatör yapılarının birbirine seri olduğu devre

yapısıdır. Seri-paralel devre topolojisinde olduğu gibi kondansatörlerin eşit ve farklı değerlerde olduğu durumlar analiz edilmiştir.

2.4.1. Paralel-Seri Devre Topolojisi Mathematica Analizi

Paralel seri devre yapısının Mathematica programında analiz edilebilmesi için Zin giriş değerinin programda tanımlanabilmesi gerekir.

$$\text{In[]:= Zin} = 1 / ((I * L1 * w) + (w^2 * M^2 / (RL + I (L2 * w - (1 / (w * T1))))) + (I * T1 * w))$$

$$\text{Out[]:= } \frac{1}{i L1 w + i T1 w + \frac{M^2 w^2}{RL + i \left(-\frac{1}{T1 w} - L2 w \right)}}$$

Şekil 2.28: Kondansatör değerlerinin eşit olduğu giriş değerinin programda tanımlanma kodu.

Giriş değerlerinin reel ve imajiner olarak ayrılabilmesi için ComplexExpand komutu kullanılmıştır.

$$\text{In[]:= ComplexExpand[Zin]}$$

$$\frac{(M^2 * RL * w^2) / ((RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2) * ((M^4 * RL^2 * w^4) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2 + (L1 * w + T1 * w + (M^2 * w^2 * (1 / (T1 * w) - L2 * w)) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2)) + i - ((L1 * w) / ((M^4 * RL^2 * w^4) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2 + (L1 * w + T1 * w + (M^2 * w^2 * (1 / (T1 * w) - L2 * w)) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2)) - (T1 * w) / ((M^4 * RL^2 * w^4) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2 + (L1 * w + T1 * w + (M^2 * w^2 * (1 / (T1 * w) - L2 * w)) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2)) - (M^2 * w) / (T1 * (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2) * ((M^4 * RL^2 * w^4) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2 + (L1 * w + T1 * w + (M^2 * w^2 * (1 / (T1 * w) - L2 * w)) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2)) + (L2 * M^2 * w^3) / ((RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2) * ((M^4 * RL^2 * w^4) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2 + (L1 * w + T1 * w + (M^2 * w^2 * (1 / (T1 * w) - L2 * w)) / (RL^2 + (-1 / (T1 * w)) + L2 * w)^2))$$

Şekil 2.29: Giriş değerlerinin imajiner ve reel için ayrılması komutu.

Giriş değerlerinin imajiner kısmı ayırıldıktan sonra imajiner kısım 0'a eşitlenerek w değerleri çıkarılmıştır. Çıkarılan w değerleri Ek C.'de yer almaktadır. Ek C.'de ifade edilen 4 sonuç arasında $W_1 = -W_2$ ve $W_3 = -W_4$ ilişkisi bulunmaktadır.

Kondansatör değerlerinin eşit olmadığı durum için yapılan hesaplamaların giriş empedansı Şekil 2.30'da yer alan komut ile gösterilmektedir.

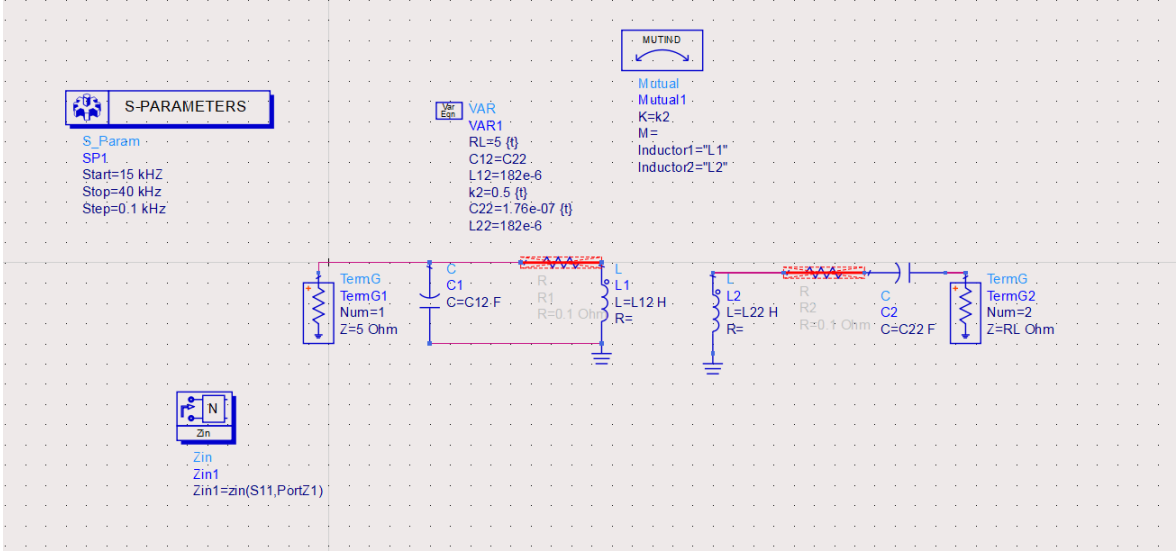
$$\begin{aligned} \text{In[]} &= a = 1 / \text{Sqrt} [T2 * L2] \\ Q &= a * L2 / RL \\ T1 &= (T2 * L2 / L1) * (1 / ((Q^2 * k^4) + 1)) \\ \\ Zin &= 1 / ((I * L1 * w) + (w^2 * M^2 / (RL + I (L2 * w - (1 / (w * T2))))) + (I * T1 * w)) \\ \\ \text{Out[]} &= \frac{1}{\sqrt{L2 T2}} \\ \\ \text{Out[]} &= \frac{L2}{RL \sqrt{L2 T2}} \\ \\ \text{Out[]} &= \frac{L2 T2}{L1 \left(1 + \frac{k^4 L2}{RL^2 T2} \right)} \\ \\ \text{Out[]} &= \frac{1}{i L1 w + \frac{i L2 T2 w}{L1 \left(1 - \frac{k^4 L2}{RL^2 T2} \right)} + \frac{M^2 w^2}{RL + i \left(-\frac{1}{T2 w} - L2 w \right)} \end{aligned}$$

Şekil 2.30: Kondansatör değerlerinin eşit olmadığı durumda giriş empedans komutu.

Giriş değerinin ifadesinin ardından ComplexExpand ile reel ve imajiner kısımlar ayrılır. Ek D.'de reel ve imajiner kısımların ayrımı görülmektedir. Bu ayrımın ardından imajiner kısımları 0'a eşitleyen w değerleri yine Ek D.'de yer almaktadır. Bu w değerleri arasında da $W_1 = -W_2$ ve $W_3 = -W_4$ ilişkisi bulunmaktadır.

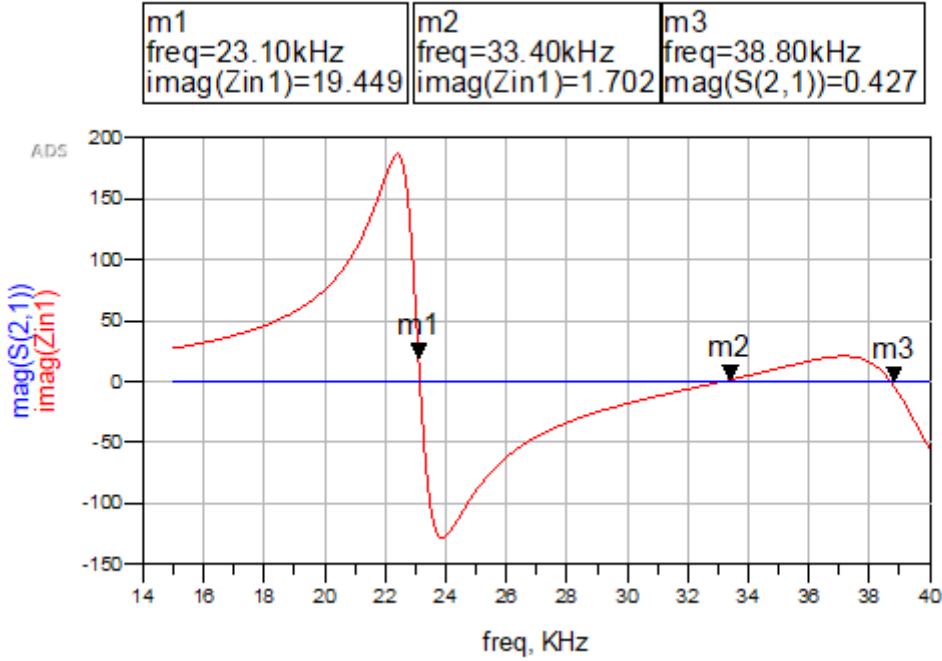
2.4.2. Paralel Seri Devresi ADS Programı Analizi

Paralel seri devresinin ADS programında analizinde kondansatörlerin eşit olduğu ve olmadığı durumlar için değerlendirme yapılmıştır.



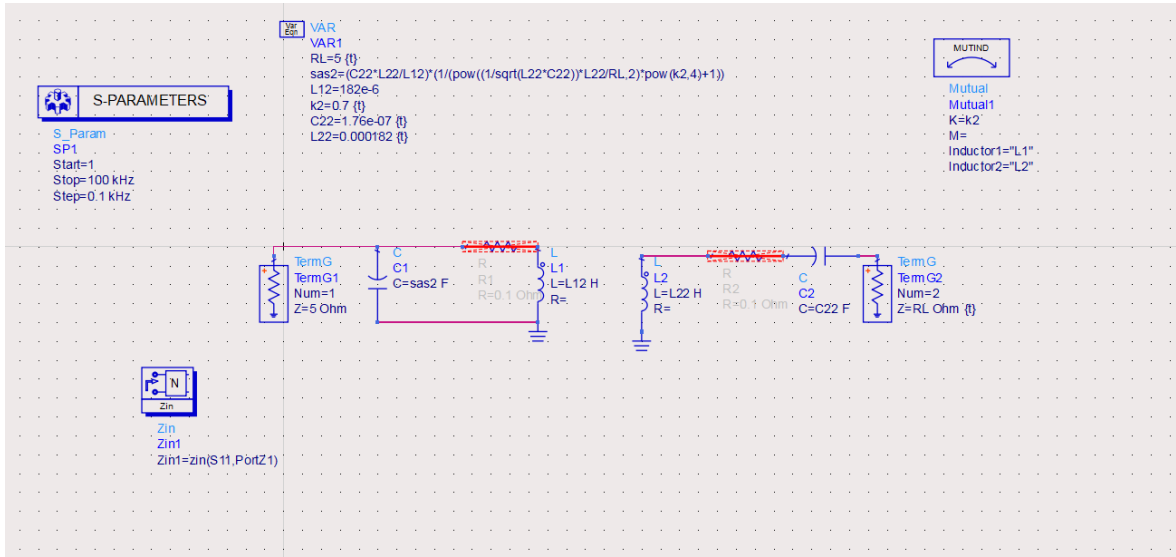
Şekil 2.31: Paralel-Seri devresi kondansatörlerin eşit olduğu durum ADS şeması.

Şekil 2.31’de giriş empedans değerinin gözlemlenebilmesi için devreye Zin modülü konulmuş ve S parametre değerlerinde başlangıç frekansı 15 kHz, bitiş frekansı 40 kHz ve adım frekansı 0.1 kHz seçilmiştir.



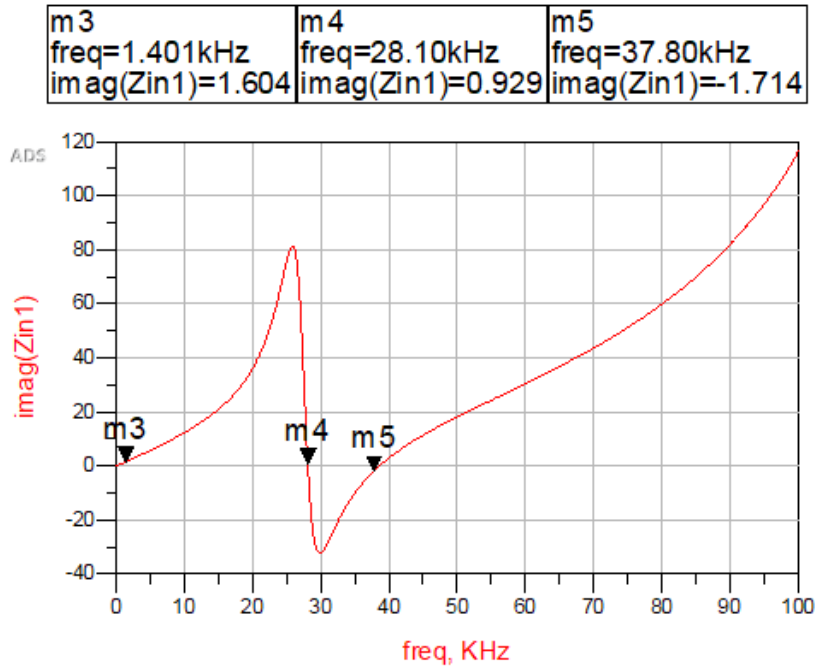
Şekil 2.32: Paralel seri devresi kondansatörlerin eşit olduğu durumda rezonans frekans sonuçları.

Paralel-seri devrede aynı zamanda kondansatör değerlerin eşit olmadığı durum için mathematica analiz sonuçları gerçekleştirilmiştir.

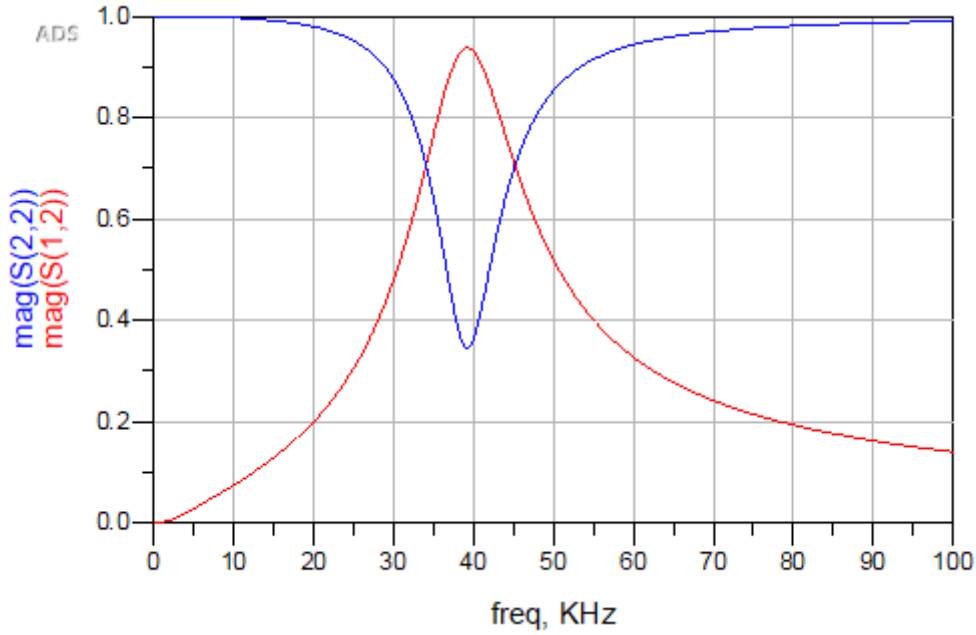


Şekil 2.33: Farklı kondansatör değerli için paralel-seri devrenin ADS simülasyonunda gösterimi.

Şekil 2.33'te belirlenen "sas2" değeri seri paralel devrede olduğu gibi hesaplanarak programa işlenmiştir. Buna göre sonuçlar Şekil 2.34'te ki gibidir.



Şekil 2.34: Paralel-Seri devresi kondansatörlerin eşit olmadığı durum rezonans frekans değerleri.



Şekil 2.35: Paralel-Seri devresi S parametre değerleri.

2.5. Paralel-Paralel Devre Topolojisi Analizi

Paralel-paralel devre topolojisi primer ve sekonder devrelerdeki bobin ve kondansatörlerin birbirlerine paralel bir biçimde bağlanması ile oluşturulur.

2.5.1. Paralel-Paralel Devre Topolojisi Mathematica Analizi

Analizin yapılması için öncelikle Zin giriş empedans değeri Şekil 2.36'da gösterildiği gibi programa tanıtılmıştır.

In[]:=

$$Zin = 1 / ((1 / ((1 / (I * L * w) + ((w^2 * M^2) * (1 + I * RL * T * w)) / (RL + (I * L * w) * (1 + I * RL * T * w)))) + (I * T * w))$$

$$Out[]:= \frac{1}{i T w + \frac{1}{-i L w + \frac{M^2 w^2 (1 + i RL T w)}{RL + i L w (1 + i RL T w)}}$$

Şekil 2.36: Zin giriş değerinin Mathematica programına tanıtılması.

ComplexExpand komutu ile giriş değeri imajiner ve reel kısımlara ayrılmıştır. Buna dair sonuçlar Ek F.'de verilmiştir. Ancak imajiner kısmı 0'a eşitleyen w değerleri kararsız durumda sonuçlanmıştır.

Paralel-paralel devre topolojisinde de diğer topolojilerde olduğu gibi kondansatör değerlerinin eşit olmadığı durum mevcuttur. Tanımlamasının yapılması için zin empedans değeri Şekil 2.37'de gösterildiği gibi mathematica programına girilmelidir.

```

a = 1 / Sqrt[T2 * L]
Q = RL / L * a
T1 = (T2 * L / L) * ((1 - k^2) / (((Q^2 * k^4) + (1 - k^2))) ^ 2)
Zin = 1 / ((1 / ((1 / I * L * w) + ((w^2 * M^2) * (1 + I * RL * T2 * w))) / (RL + (I * L * w) * (1 + I * RL * T2 * w)))) + (I * T1 * w)

```

$$Out[] = \frac{1}{\frac{i(1-k^2)T_2w}{\left(1-k^2+\frac{k^4RL^2}{L^3T_2}\right)^2} + \frac{1}{-iLw + \frac{M^2w^2(1+iRLT_2w)}{RL+iLw(1+iRLT_2w)}}}$$

Şekil 2.37: Paralel-Paralel devre topolojisinde kondansatörlerin eşit olmadığı durumda giriş kodu.

Tanımladığımız Zin kodunun ardından ComplexExpand komutu ile imajiner ve reel kısımlar ayrılmıştır. Sonuç w denklemleri oldukça uzun olmasına rağmen kararlı denklemlerde bir döngü olduğu gözlemlenmiş ve bu tekrar eden ifadeler a, b, c ve d değişkenleri ile ifade edilmiştir. Bu değişken değerleri EK G. 'de verilmiştir. Ulaşılan kararlı sonuçlar (2.19) ve (2.20) numaralı denklemlerde gösterilmiştir.

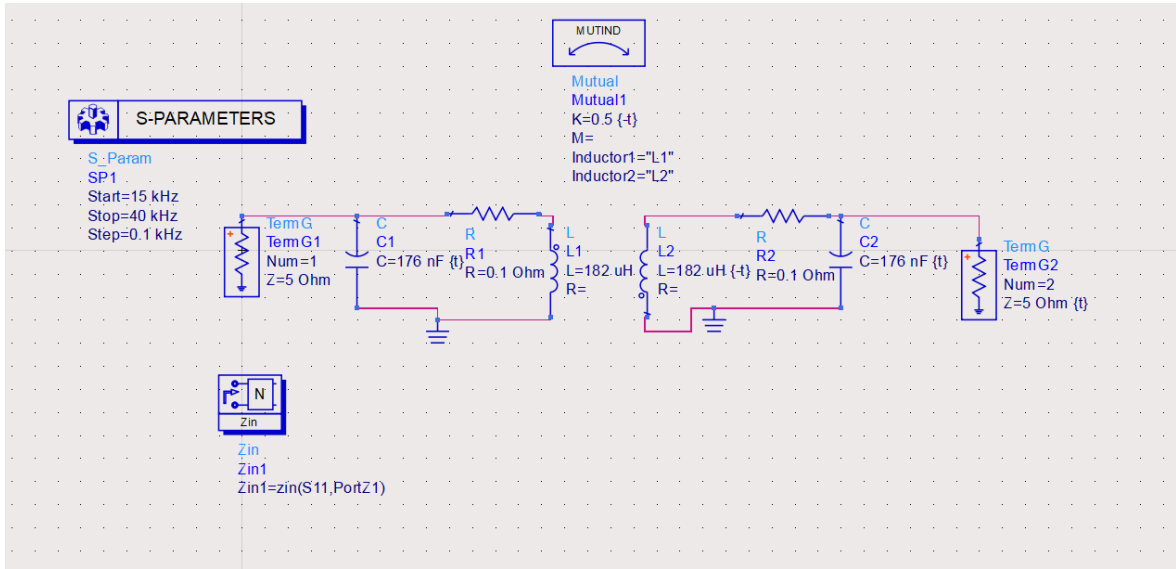
$$W1 = - \sqrt{-\frac{a}{3b} + \frac{2^{1/3}(a^2-3bc)}{3b\left(-2a^3+9ab^3c+\sqrt{-4(a^2-3bc)^3+(2a^3-9a^2b+27b^2d)^2}\right)^{1/3}} + \frac{\left(-2a^3+9a^2b-27b^2d+\sqrt{-4(a^2-3bc)^3+(2a^3-9abc+27b^2d)^2}\right)^{1/3}}{32^{1/3}b}} \quad (2.19)$$

$$W_2 = \sqrt{-\frac{a}{3b} + \frac{2^{1/3}(a^2-3bc)}{3b(-2a^3+9ab^3c+\sqrt{-4(a^2-3bc)^3+(2a^3-9a^2b+27b^2d)^2})^{1/3}} + \frac{(-2a^3+9a^2b-27b^2d+\sqrt{-4(a^2-3bc)^3+(2a^3-9abc+27b^2d)^2})^{1/3}}{32^{1/3}b}} \quad (2.20)$$

Farklı topolojilerde görüldüğü gibi $W_1 = -W_2$ olarak gözlemlenmektedir.

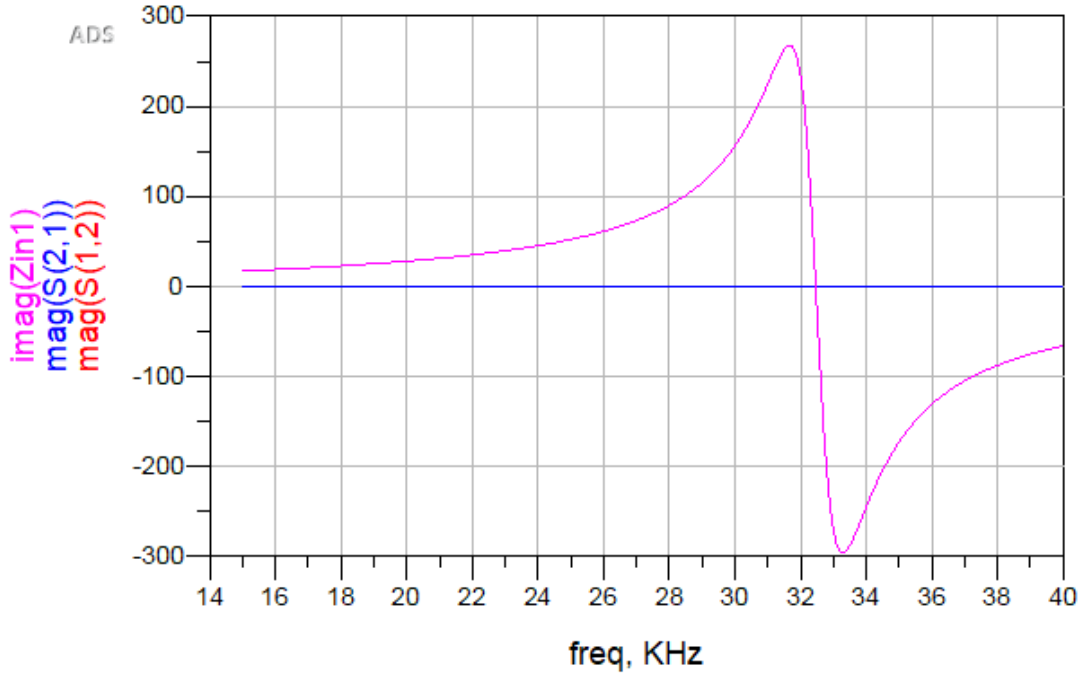
2.5.2. Paralel-Paralel Devre Topolojisi ADS Programında İncelenmesi

Paralel-paralel devre topolojisi için kondansatörlerin eşit olduğu durumlar için değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 2.38: Paralel-Paralel devre topolojisi kondansatörlerin eşit olduğu durum.

Şekil 2.38'e göre giriş empedans değerinin imajiner kısmı ve S parametreleri aşağıda görülmektedir.



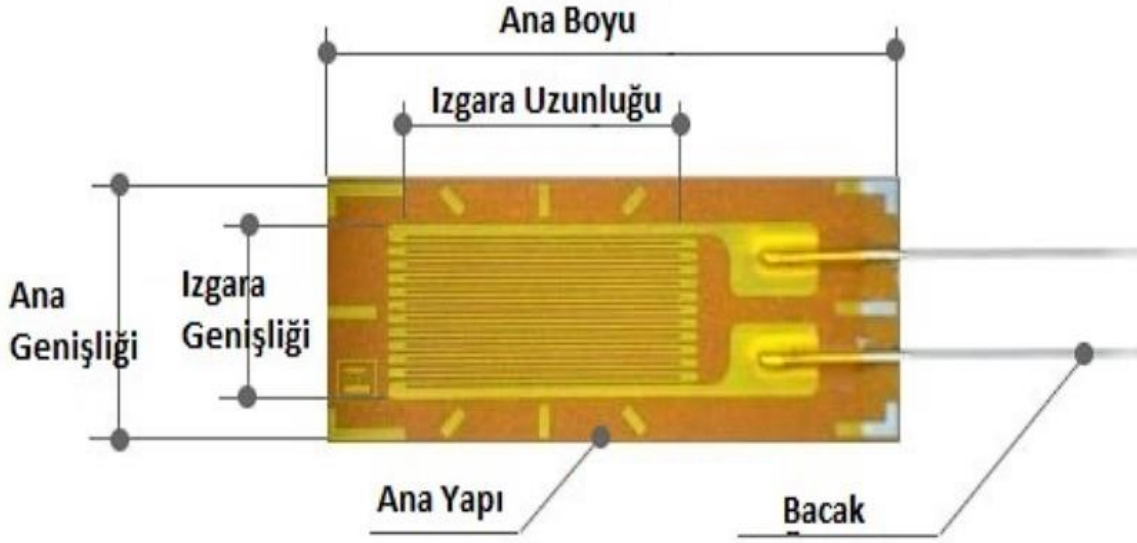
Şekil 2.39: Paralel-paralel devresi giriş empedansı imajiner değerleri ve S parametre değerleri.

3. KOMPANZASYON ŞEMALARININ ÖRNEK BİR KABLOSUZ PASİF SENSÖRE UYGULANMASI

3.1. Gerinim Ölçer Sensörü (Strain Gauge) Karakterizasyonu

Gerinim ölçer sensörleri, esneme özelliğine sahip bir tabaka üstünde ince bir şeridin ya da telin çok kuvvetli bir şekilde yapıştırılması ile oluşmuşlardır. Üstündeki basıncın etkisi nedeniyle tabakanın esneklik kazanması, iletken şeridin gerilmesine ve daha da uzamasına neden olur. Bu uzama sırasında telin boyu uzar ve kesit azalır. İletkenlerin sahip olduğu kesit azaldığı zaman direnç artış göstereceği için, uygulanan kuvvet ile bağlantılı olarak iletkenin de mevcut direncinde değişim gözlenecektir. Bu dirençte görülen değişime bağlı olarak da uygulanan kuvvetin düzeyi belirlenebilir (Arorami vd., 2020).

Gerinim ölçer (Strain Gauge) sensörlerin yüzeyinde oluşan birim uzamaları ölçmek için kullanılmaktadır. Şekil 3.1 üzerinde bir gerinim ölçer sensör örneği gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Gerinim ölçer (strain gauge) örneği (Arorami vd., 2020).

Gerinim ölçer sensör hücresinin ince yapısı düşünüldüğü zaman, metal yüzeye monte edilmesi basit değildir. Ancak, gerinim ölçer sensörün metal malzeme üstüne dikkatli bir şekilde yerleştirilerek sanki tek bir malzeme gibi durması gerekmektedir. Bu nedenle metal yüzey olabildiğince güzel bir şekilde temizlenmelidir. Temizleme işleminden sonra ise kolonya veya alkol gibi sıvılar sayesinde ince tozlar yüzeyden alınmalıdır. Daha sonra alt tabakaya tutkal tarzı bir yapıştırıcı sayesinde yapıştırılmalıdır (Ravenscroft vd., 2022).

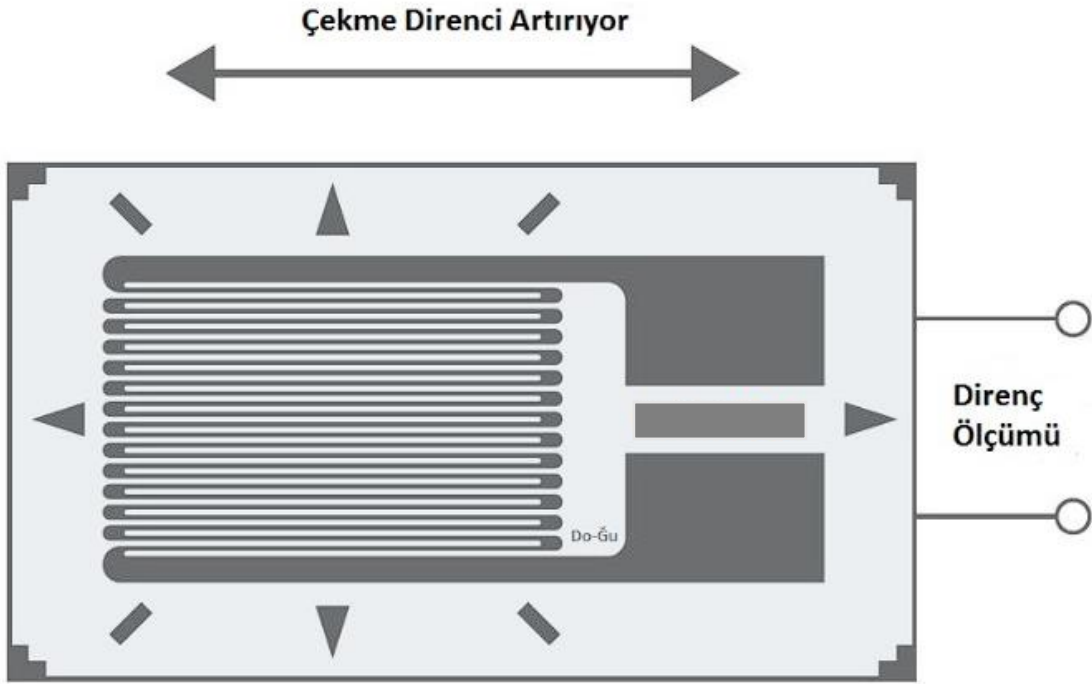
Hesaplama işleminin en temel mantığıysa; uzama sırasında gerinim ölçer sensör telinin boyunun uzayarak kesitinin azalmasıdır. Bilindiği üzere iletkenlerin kesiti azaldıkça dirençleri artış gösterir. Uygulanan kuvvetle orantılı olarak iletkenin direncinde azalma veya artış görülecektir. Bu durum gerinim ölçer sensörü üstünden geçen akımın mevcut voltajının değişmesine neden olur. Bu voltaj değişimi ise ölçülerek tellerde ve üstündeki yapıştırılan parçadaki şekil değişimini ölçmeye yarar. Sonrasında ise elastisite teorisinin mevcut denklemleri sayesinde ölçülen bu şekil değişimi aşağıda verilen formül sayesinde gerilime dönüştürülür (Ravenscroft vd., 2022).

Gerinim ölçer sensörlerini seçerken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar bulunmaktadır. Bunlar şu şekildedir:

- Yüzeyin k-tipi ve faktörü,
- Ölçüm yapılacak alanın sıcaklığı ve sensörün bu sıcaklığa dayanma oranı,

- Ölçüm yerinde bulunan yükler ve alanın bu yüklere dayanma oranı,
- Gerinim ölçer sensörün süneklilik ve enine genişleme sınırı,
- Gerinim ölçer sensör ile kullanılacak olan ölçü araç gereçleri ve bunların uyumluluğu (Dos vd., 2018).

Gerinim ölçer sensörleri, elektriksel olarak iletkenlik ve bununla bağlantılı olarak iletken geometrisi ile oldukça avantaj sağlamaktadır. Elektriksel iletken, kalıcı herhangi bir deforme bulunmadan ya da kırılmayacak biçimde elastisite limitleri kapsamında çekilmeye maruz kaldığında boyuna uzamaya ve daralmaya uğramaktadır. Şekil 3.2 üzerinde görülen bu şekil değişimiyle beraber ise elektriksel dirençlerin artma yönünde bir değişim ortaya çıkmaktadır (Arorami vd., 2020).



Şekil 3.2: Gerinim ölçer sensörü şekil değişimi.

Ancak bunun tam tersi olarak iletkenler de bir basma olduğu için bükülme olmadan bu defa gerinim ölçer ile genişleme sağlanmakta ve boyuna kısalma görülmektedir. Bu şekil

değişimiyle de gerinim ölçerin elektriksel olan direnci azalmaktadır. Klasik bir Gerinim ölçer sensörü, daha önce bahsedildiği iletken ince şerit tellerden zig-zag olacak biçimde paralel şekilde yerleştirilmiştir. Böylece yaşanacak ufak bir gerilme durumunda iletken tellerinin efektif uzunluğu artmış olacak ve ölçüm gerçekleştirilecektir (Dos vd., 2018).

Gerilmenin değişimine bağlı olarak, gerinim ölçer sensörü üstünde birkaç mili volt değerinde değişim görülür. Ölçümlerin doğru ve sağlıklı yapılabilmesi için gerinim ölçer sensörü geniş malzemeye daha önce bahsedildiği gibi doğru ve sağlam bir şekilde sabitlenmelidir. Bu nedenle, inceliği ortalama 25 mikron düzeyindedir. Gerinim ölçer sensörü yapı bakımından, nikel ve bakır karışımı metalik tellerin üstünün yalıtkan bir madde sayesinde kapatılması işlemidir. Bu sensör yalnızca metal gibi özellik olarak genişleyen malzemelerde kullanılabilir (Arorami vd., 2020).

Gerinim ölçer sensörleri temelde şekil değişimlerini ölçer ve bu değişimlere bağlı olarak direnci de değişiklik gösterir. Hassas olduğu için birçok alanda kullanılmaktadır. Gerinim ölçer sensörlerinin başlıca kullanıldığı alanlar ise şu şekildedir:

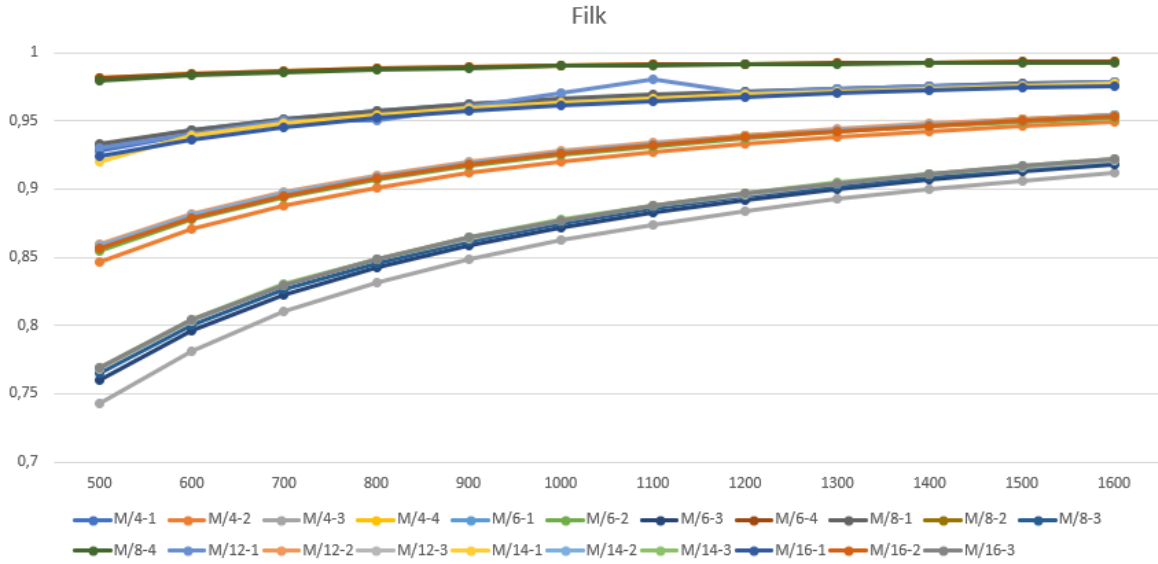
- Alarm Cihazlarında,
- Sağlık Testlerinde,
- Dijital Barometrelerde,
- Esneklik Algılamada,
- Pozisyon ve Deplasman Sensörleri (Ravenscroft vd., 2022).

3.2. Manyetik Pasif Bobinlerin Karakterizasyonu

Bobin değerinin tam olarak belirlenebilmesi için Excel üzerinden farklı bobin değerlerinde oluşacak grafikler analiz edilmiştir. Buna göre optimum bobin karakterizasyonu oluşturulmuştur.

Tablo 3.1: İlk rezonans frekans değeri için ölçümler.

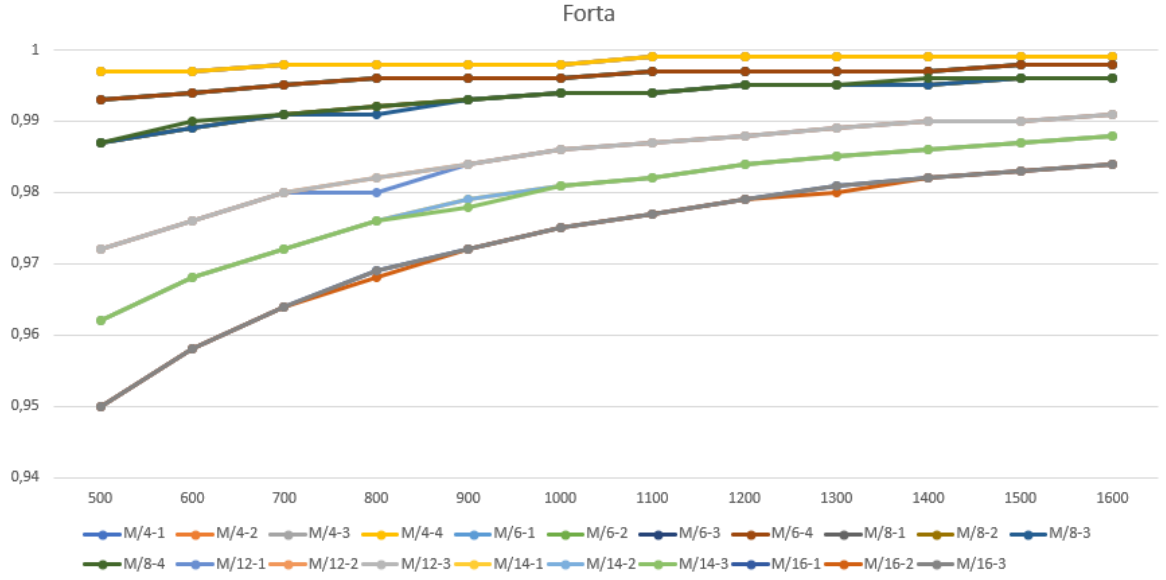
Filk	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
M/4-1	0,928	0,94	0,948	0,955	0,96	0,964	0,967	0,97	0,972	0,974	0,976	0,977
M/4-2	0,847	0,871	0,888	0,901	0,912	0,92	0,927	0,933	0,938	0,942	0,946	0,949
M/4-3	0,743	0,781	0,81	0,831	0,849	0,863	0,874	0,884	0,893	0,9	0,906	0,912
M/4-4	0,981	0,984	0,986	0,988	0,989	0,99	0,991	0,992	0,993	0,993	0,994	0,994
M/6-1	0,932	0,943	0,951	0,957	0,962	0,965	0,968	0,971	0,973	0,975	0,977	0,978
M/6-2	0,855	0,878	0,894	0,907	0,917	0,925	0,931	0,937	0,942	0,946	0,949	0,952
M/6-3	0,76	0,796	0,822	0,843	0,859	0,872	0,883	0,892	0,9	0,907	0,913	0,918
M/6-4	0,981	0,984	0,986	0,988	0,989	0,99	0,991	0,992	0,993	0,993	0,994	0,994
M/8-1	0,933	0,943	0,951	0,957	0,962	0,966	0,969	0,971	0,973	0,975	0,977	0,978
M/8-2	0,859	0,881	0,897	0,909	0,919	0,927	0,933	0,939	0,943	0,947	0,951	0,954
M/8-3	0,765	0,8	0,826	0,846	0,862	0,875	0,886	0,895	0,902	0,909	0,915	0,92
M/8-4	0,979	0,983	0,985	0,987	0,988	0,99	0,99	0,991	0,992	0,993	0,993	0,993
M/12-1	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,97	0,98	0,97	0,973	0,975	0,976	0,978
M/12-2	0,86	0,882	0,898	0,91	0,92	0,928	0,934	0,939	0,944	0,948	0,951	0,954
M/12-3	0,768	0,803	0,829	0,849	0,864	0,877	0,888	0,896	0,904	0,911	0,916	0,921
M/14-1	0,92	0,939	0,948	0,954	0,959	0,963	0,966	0,969	0,971	0,973	0,975	0,977
M/14-2	0,859	0,881	0,897	0,909	0,919	0,927	0,933	0,938	0,943	0,947	0,95	0,954
M/14-3	0,769	0,804	0,83	0,849	0,865	0,878	0,888	0,897	0,905	0,911	0,917	0,922
M/16-1	0,924	0,936	0,945	0,952	0,957	0,961	0,964	0,967	0,97	0,972	0,974	0,975
M/16-2	0,857	0,879	0,895	0,908	0,918	0,926	0,932	0,938	0,942	0,946	0,95	0,953
M/16-3	0,769	0,804	0,829	0,849	0,865	0,877	0,888	0,897	0,904	0,911	0,917	0,922



Şekil 3.3: İlk rezonans frekans değeri için oluşturulan eğim grafiği.

Tablo 3.2: İkinci rezonans frekans değeri için ölçümler.

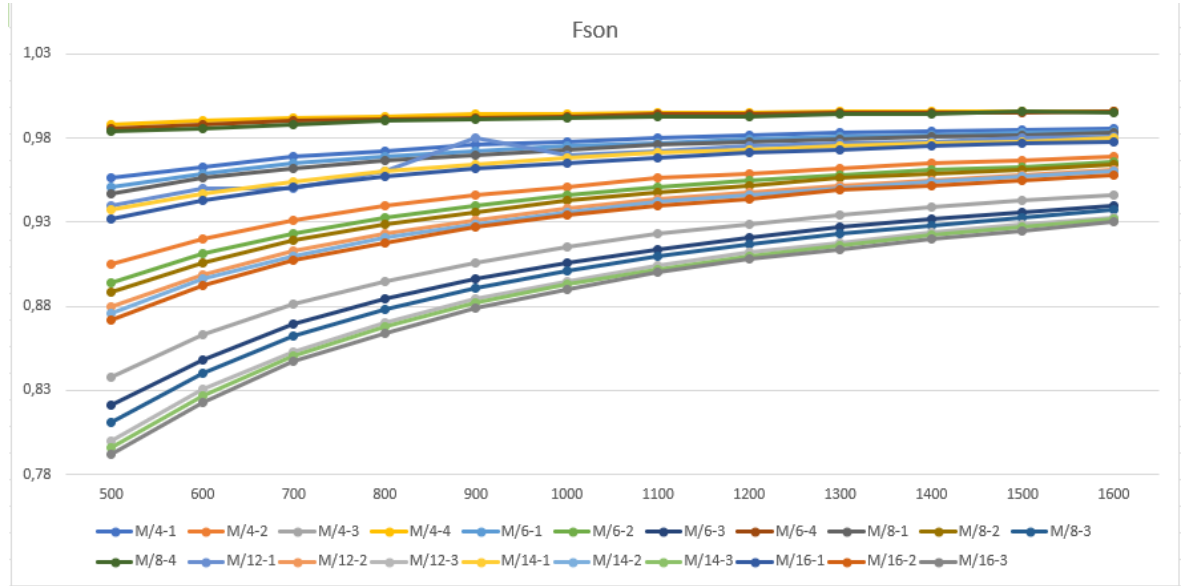
Forta	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
M/4-1	0,997	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
M/4-2	0,997	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
M/4-3	0,997	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
M/4-4	0,997	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
M/6-1	0,993	0,994	0,995	0,996	0,996	0,996	0,997	0,997	0,997	0,997	0,998	0,998
M/6-2	0,993	0,994	0,995	0,996	0,996	0,996	0,997	0,997	0,997	0,997	0,998	0,998
M/6-3	0,993	0,994	0,995	0,996	0,996	0,996	0,997	0,997	0,997	0,997	0,998	0,998
M/6-4	0,993	0,994	0,995	0,996	0,996	0,996	0,997	0,997	0,997	0,997	0,998	0,998
M/8-1	0,987	0,989	0,991	0,992	0,993	0,994	0,994	0,995	0,995	0,995	0,996	0,996
M/8-2	0,987	0,989	0,991	0,992	0,993	0,994	0,994	0,995	0,995	0,995	0,996	0,996
M/8-3	0,987	0,989	0,991	0,991	0,993	0,994	0,994	0,995	0,995	0,995	0,996	0,996
M/8-4	0,987	0,99	0,991	0,992	0,993	0,994	0,994	0,995	0,995	0,996	0,996	0,996
M/12-1	0,972	0,976	0,98	0,98	0,984	0,986	0,987	0,988	0,989	0,99	0,99	0,991
M/12-2	0,972	0,976	0,98	0,982	0,984	0,986	0,987	0,988	0,989	0,99	0,99	0,991
M/12-3	0,972	0,976	0,98	0,982	0,984	0,986	0,987	0,988	0,989	0,99	0,99	0,991
M/14-1	0,962	0,968	0,972	0,976	0,979	0,981	0,982	0,984	0,985	0,986	0,987	0,988
M/14-2	0,962	0,968	0,972	0,976	0,979	0,981	0,982	0,984	0,985	0,986	0,987	0,988
M/14-3	0,962	0,968	0,972	0,976	0,978	0,981	0,982	0,984	0,985	0,986	0,987	0,988
M/16-1	0,95	0,958	0,964	0,969	0,972	0,975	0,977	0,979	0,981	0,982	0,983	0,984
M/16-2	0,95	0,958	0,964	0,968	0,972	0,975	0,977	0,979	0,98	0,982	0,983	0,984
M/16-3	0,95	0,958	0,964	0,969	0,972	0,975	0,977	0,979	0,981	0,982	0,983	0,984



Şekil 3.4: İkinci rezonans frekans değeri için oluşturulan eğim grafiği.

Tablo 3.3: Son rezonans frekans değeri için ölçümler.

Fson	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
M/4-1	0,956	0,963	0,969	0,972	0,976	0,978	0,98	0,982	0,983	0,984	0,985	0,986
M/4-2	0,905	0,92	0,931	0,94	0,946	0,951	0,956	0,959	0,962	0,965	0,967	0,969
M/4-3	0,838	0,863	0,881	0,895	0,906	0,915	0,923	0,929	0,934	0,939	0,943	0,946
M/4-4	0,988	0,99	0,992	0,993	0,994	0,994	0,995	0,995	0,996	0,996	0,996	0,996
M/6-1	0,951	0,959	0,965	0,969	0,972	0,975	0,977	0,979	0,981	0,982	0,983	0,984
M/6-2	0,894	0,911	0,923	0,933	0,94	0,946	0,951	0,955	0,958	0,961	0,963	0,966
M/6-3	0,821	0,848	0,869	0,884	0,896	0,906	0,914	0,921	0,927	0,932	0,936	0,94
M/6-4	0,986	0,988	0,99	0,991	0,992	0,993	0,994	0,994	0,995	0,995	0,995	0,996
M/8-1	0,947	0,956	0,962	0,967	0,97	0,973	0,976	0,978	0,979	0,981	0,982	0,983
M/8-2	0,888	0,906	0,919	0,929	0,936	0,943	0,948	0,952	0,956	0,959	0,961	0,964
M/8-3	0,811	0,84	0,862	0,878	0,891	0,901	0,91	0,917	0,923	0,928	0,933	0,937
M/8-4	0,984	0,986	0,988	0,99	0,991	0,992	0,993	0,993	0,994	0,994	0,996	0,995
M/12-1	0,94	0,95	0,95	0,96	0,98	0,97	0,972	0,975	0,977	0,978	0,98	0,981
M/12-2	0,88	0,899	0,913	0,923	0,931	0,938	0,944	0,948	0,952	0,955	0,958	0,961
M/12-3	0,8	0,831	0,853	0,87	0,884	0,895	0,904	0,912	0,918	0,924	0,929	0,933
M/14-1	0,937	0,947	0,954	0,96	0,964	0,968	0,971	0,973	0,975	0,977	0,978	0,98
M/14-2	0,876	0,896	0,91	0,921	0,929	0,936	0,942	0,946	0,95	0,954	0,957	0,96
M/14-3	0,796	0,827	0,85	0,868	0,882	0,893	0,902	0,91	0,916	0,922	0,927	0,932
M/16-1	0,932	0,943	0,951	0,957	0,962	0,965	0,968	0,971	0,973	0,975	0,977	0,978
M/16-2	0,872	0,892	0,907	0,918	0,927	0,934	0,94	0,944	0,949	0,952	0,955	0,958
M/16-3	0,792	0,823	0,847	0,864	0,879	0,89	0,9	0,908	0,914	0,92	0,925	0,93



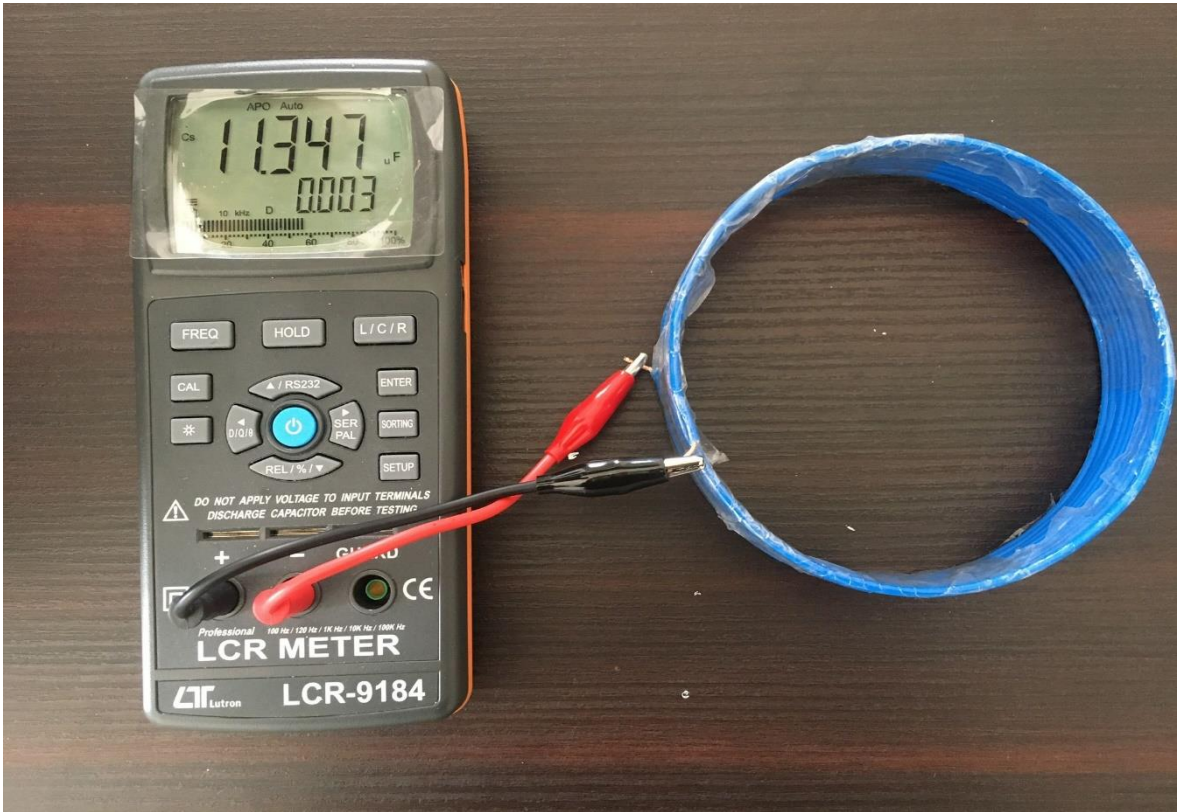
Şekil 3.5: Son rezonans frekans değeri için oluşturulan eğim grafiği.

Bobin değerlerinin eğim grafikleri ile analizinin ardından farklı yapılar da bobinler oluşturularak ölçümler alınmıştır. Bobin kalınlıkları 1.5 ve 2 mm olarak değişmektedir.

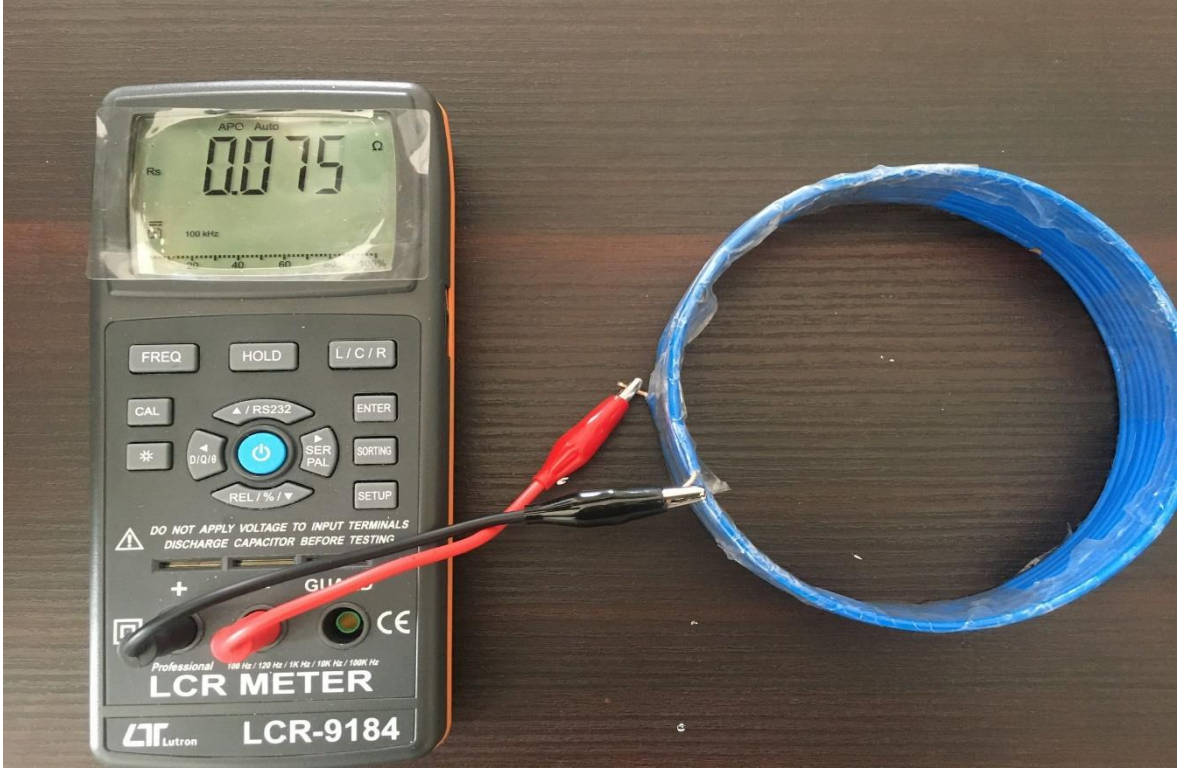
1.5 milimetrelilik kablo kullanılarak sarılan bobine ait kapasite, endüktans ve direnç ölçümleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.6: Endüktans ölçümü düzeneği.



Şekil 3.7: Kapasite ölçüm düzeneği.

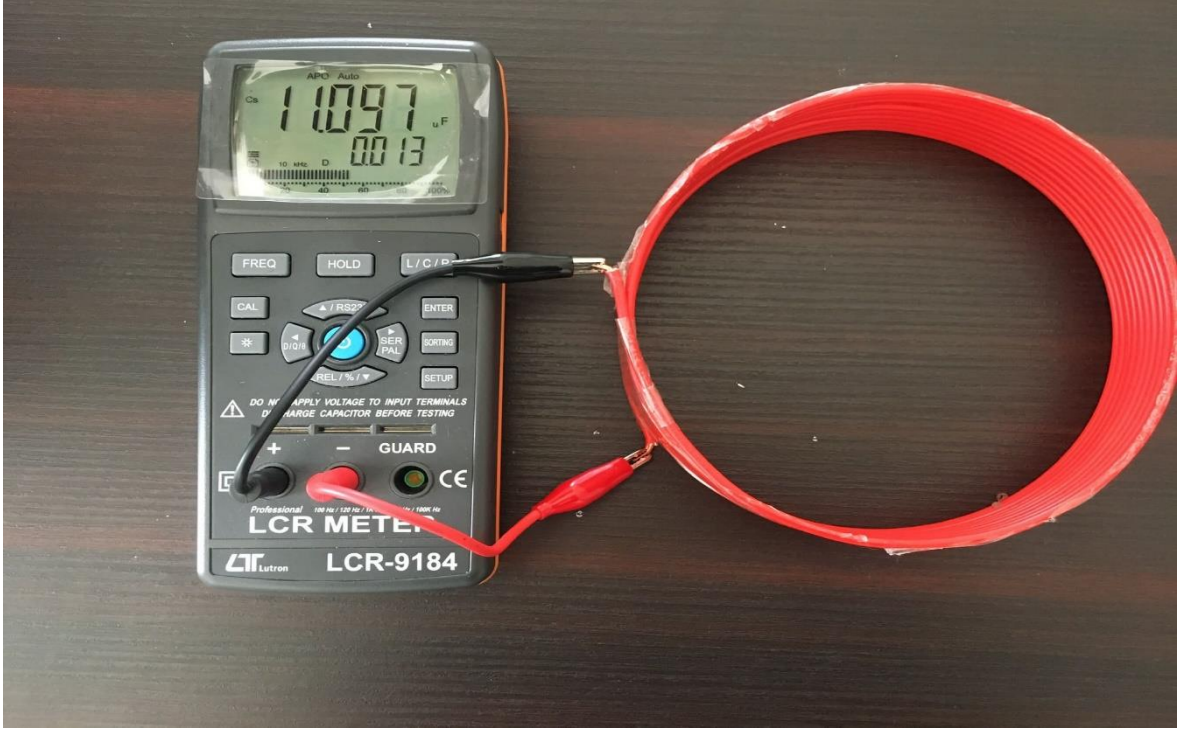


Şekil 3.8: Direnç ölçüm düzeneği.

2 milimetrelilik kablo kullanılarak sarılan bobinin endüktans, kapasite ve direnç ölçüm değerleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.9: Endüktans ölçüm düzeneği.



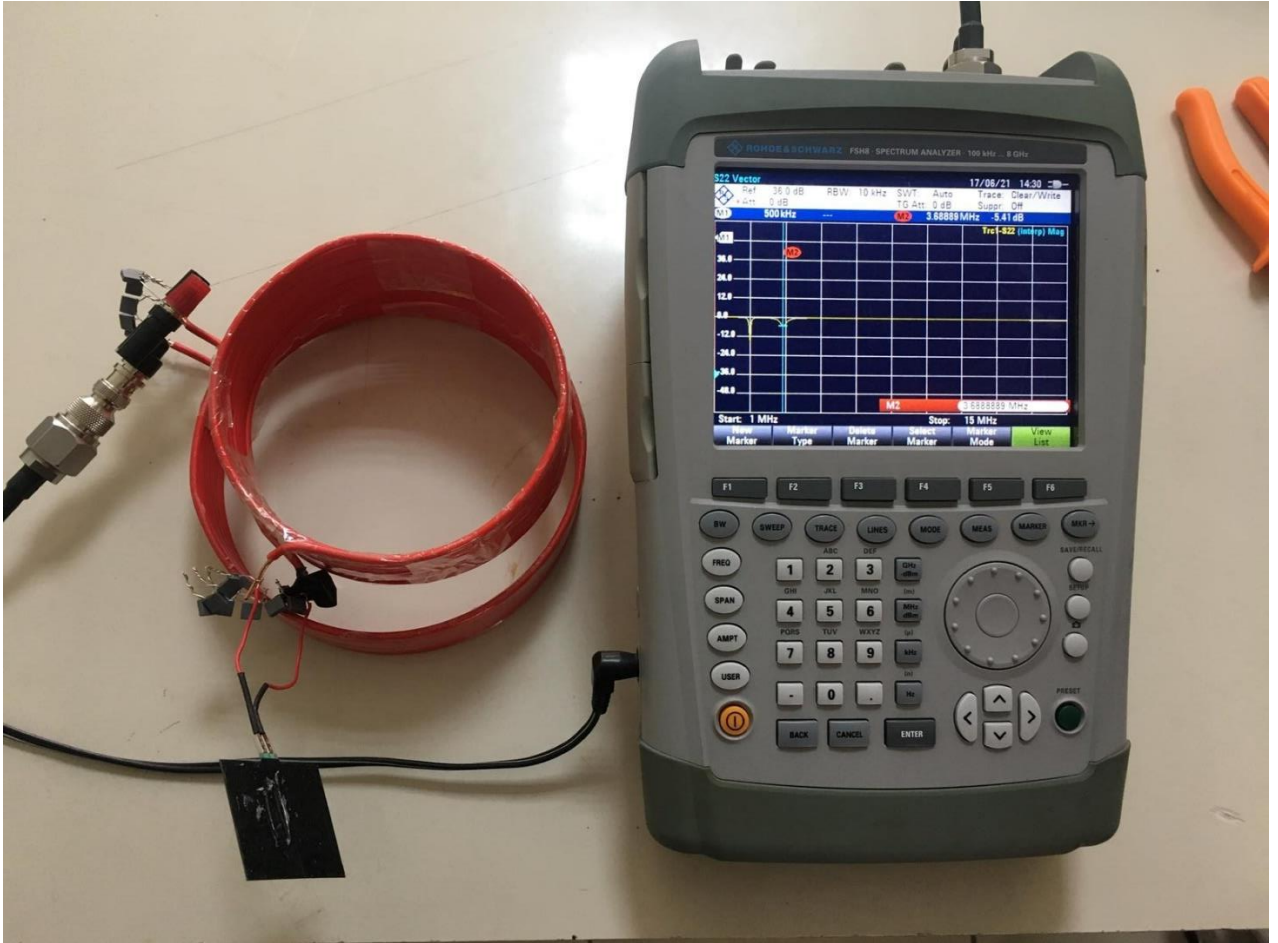
Şekil 3.10: Kapasite ölçüm düzeneği.



Şekil 3.11: Direnç ölçüm düzeneği.

3.3. Seri-Seri ve Seri-Paralel Kompanzasyon Durumları İçin Manyetik Pasif Sensör Düzeneği

Gerinim ölçer sensörü kullanılarak Network Analizör yardımı ile farklı değer ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlere ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.12: Sensör ve bobinler bir araya getirilerek oluşturulan devre düzeneğinin network analizörde ölçüm düzeneği.

4. SONUÇ

Manyetik rezonans devreleri birbirine manyetik alan vasıtası ile kuplajlanmış iki bobinin uygun kompanzasyon şemaları ile rezonansa girmesiyle gerçekleşen devre yapılarıdır. En yaygın kullanım alanlarından biri kablosuz güç transfer sistemleridir ve kullanılan kompanzasyon şemasına bağlı olarak tüm tasarım yaklaşımı değişmektedir.

Manyetik rezonans temelli sistemlerde manyetik alan ile bağlaşımda olan primer ve sekonder bobinlerinden oluşan bobin çiftlerinin her biri kompanzasyon kapasitörünün bağlantı şekline göre, seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-paralel (PP) ve paralel-seri (PS) olarak bilinen dört ana kompanzasyon şemasından birine sahiptirler. Bu kompanzasyon topolojileri sayesinde mevcut devrenin rezonans frekansında reaktif gücü sıfırlanması ve maksimum aktif güç ile çalışabilmesi sağlamaktadır. Böylece en yüksek verimlilik ile güç aktarımı sağlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında manyetik rezonans devrelerinde kullanılan SS, SP, PS ve PP topolojilerinin matematiksel analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucu SS ve SP için tek rezonans ve frekans ayrılması diye bilinen üç rezonans koşulları çıkarılmıştır. PS ve PP için ise çok uzun analitik ifadeler elde edildiği ve analitik çözümler bulunamadığı için devre simülasyon programları üzerinden simülasyonları yapıp rezonans cevapları incelenmiştir. Analitik ifadeleri çıkarılan SS kompanzasyon şeması örnek bir manyetik pasif sensör uygulamasında kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

- Araromi, O. A., Graule, M. A., Dorsey, K. L., Castellanos, S., Foster, J. R., Hsu, W. H., ... & Wood, R. J. (2020). Ultra-sensitive and resilient compliant strain gauges for soft machines. *Nature*, 587(7833), 219-224.
- Ahmad, A., Alam, M. S., & Chabaan, R. (2017). A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles. *IEEE transactions on transportation electrification*, 4(1), 38-63.
- Barr, J. (2011). *A line in the sand: Britain, France and the struggle that shaped the Middle East*. Simon and Schuster.
- Beckwith, T.G., Marangoni, R.D. and Lienhard, J.H. (1993) *Mechanical Measurements, 5th ed.* USA:Addison-Wesley Publishing Company.
- Chopra, S., & Bauer, P. (2011). Driving range extension of EV with on-road contactless power transfer—A case study. *IEEE transactions on industrial electronics*, 60(1), 329-338.
- Collins, C. C. (1967). Miniature passive pressure transensor for implanting in the eye. *IEEE transactions on biomedical engineering*, (2), 74-83.
- Culler, D. E., & Mulder, H. (2004). *Smart sensors to network the world*. *Scientific American*, 290(6), 84-91.
- Dong, L., Wang, L. F., & Huang, Q. A. (2016). An LC passive wireless multifunctional sensor using a relay switch. *IEEE Sensors Journal*, 16(12), 4968-4973.
- Doolin, D. M., & Sitar, N. (2005). *Wireless sensors for wildfire monitoring*. In *Smart structures and materials 2005: sensors and smart structures technologies for civil, mechanical, and aerospace systems* (Vol. 5765, pp. 477-484). SPIE.
- Dos Reis, J., Oliveira Costa, C., & Sá da Costa, J. (2018). Strain gauges debonding fault detection for structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(12), e2264.
- Fincan B., (2015) *Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul,

- Gungor, V. C., Lu, B., & Hancke, G. P. (2010). *Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. IEEE transactions on industrial electronics*, 57(10), 3557-3564.
- Harish. K, Ani. K and Sanjiv. G. (2011) Design Studies and Testing of Torque Transducer. *Indian Journal of Pure and Applied Physics* (49), pp.653-656
- Hayat, H., Griffiths, T., Brennan, D., Lewis, R. P., Barclay, M., Weirman, C., ... & Searle, J. R. (2019). The state-of-the-art of sensors and environmental monitoring technologies in buildings. *Sensors*, 19(17), 3648.
- Huang, Q. A., Dong, L., & Wang, L. F. (2016). LC passive wireless sensors toward a wireless sensing platform: status, prospects, and challenges. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 25(5), 822-841.
- Kandris, D., Nakas, C., Vomvas, D., & Koulouras, G. (2020). Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey. *Applied System Innovation*, 3(1), 14.
- Kara, E., Ikizoglu, S., Sahin, K., Çakar, T., & Atas, A. (2021). A New Algorithm for Dynamic Vestibular System Analysis with Wearable Pressure and Motion Sensors/Giyilebilir Basınç ve Hareket Sensörleri ile Dinamik Vestibüler Sistem Analiz Algoritması Gelistirilmesi. *Journal of Academic Research in Medicine*, 11(2), 149-157.
- Karakaya, A. M. (2012). *Aktif güç faktörü düzeltme devrelerinin incelenmesi ve bir uygulama devresinin gerçekleştirilmesi*. Yüksek Lisans tezi, Yıldız teknik Üniversitesi.
- Kassakian J. G., Schlecht M. F., Verghese G. C., (1992) *Principles of Power Electronics*, 1st ed., New York,
- Kavak, M. (2008). *Harmonikli devrelerde güç katsayısının düzeltilmesi*. Yüksek Lisans tezi, Yıldız teknik Üniversitesi.
- Li Z., Zhu C., Jiang J., Song K., Wei G., (2017) *A 3-kW Wireless Power Transfer System for Sightseeing Car Supercapacitor Charge*, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(5), 3301-3316.
- Li, S., & Mi, C. C. (2014). Wireless power transfer for electric vehicle applications. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, 3(1), 4-17.

- Miller H. C., (1987) *Inductance formula for a single-layer circular coil*, in *Proceedings of the IEEE*, 75(2), 256-257.
- Pashaei A., Aydın E., Polat. M., Yıldırım E., Aydemir M. T., (2016) Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri, *Emo Bilimsel Dergi*, 6(11), 1-12.
- Ravenscroft, D., Prattis, I., Kandukuri, T., Samad, Y. A., & Occhipinti, L. G. (2021, June). A Wearable Graphene Strain Gauge Sensor with Haptic Feedback for Silent Communications. In *2021 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)* (pp. 1-4). IEEE.
- Trendafilov, G. I. (1996). Magnetoelastic force-measuring transducer. *Facta Universitatis. Series Electronics-Energetics*, 9(2), 263-273.
- Tsymbal, E. Y., & Pettifor, D. G. (2001). *Perspectives of giant magnetoresistance*. In *Solid state physics* (Vol. 56, pp. 113-237). Academic Press.
- Wang, N., Zhang, N., & Wang, M. (2006). *Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective*. *Computers and electronics in agriculture*, 50(1), 1-14.
- Wheeler H.A., (1928) Simple inductance formulas for radio coils, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 16(10), 1398 -1400
- Wilson, W., & Atkinson, G. (2011). Surface acoustic wave strain sensor model. *Sensors & Transducers*, 11, 23.
- Zhang, C., Li, Z., Chen, J., Qiu, F., & Na, S. (2021). Design and research of a novel non-contact vertical inductive torque sensor. *Measurement*, 177, 109252.
- Zheng, C., Li, W., Li, A. L., Zhan, Z., Wang, L. Y., & Sun, D. H. (2016). Design and manufacturing of a passive pressure sensor based on LC resonance. *Micromachines*, 7(5), 87.

EKLER

EK A: Seri-Paralel Devre İçin Solve Komutları Sonuçları

$$\begin{aligned} W1 \rightarrow & -1/\text{Sqrt}[6] \left(\sqrt{\left((-2)^{2/3} Ca^3 L (3 L^4 - 5 L^2 M^2 + 2 M^4) RL^2 + 2^{2/3} Ca^4 M^2 (3 L^2 + M^2) RL^4 - 2 Ca L (L^2 - M^2) (-2 Ca^3 (L^3 - L M^2)^3 + 3 Ca^4 L^2 (3 L^2 - 2 M^2) (L^2 - M^2)^2 RL^2 + 6 Ca^5 L M^4 (-L^2 + M^2) RL^4 - 2 Ca^6 M^4 (-9 L^2 + M^2) RL^6 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-Ca^8 (L^3 - L M^2)^2 RL^4 (L^{10} - 2 L^8 M^2 - 4 Ca L^9 RL^2 + 4 Ca L^7 M^2 RL^2 + 4 Ca L^5 M^4 RL^2 - 20 Ca^2 L^4 M^4 RL^4 + 12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4 - 12 Ca^3 L M^6 RL^6 + 4 Ca^4 M^6 RL^8 - 4 Ca L^3 M^4 RL^2 (M^2 + 3 Ca^2 RL^4) + L^6 (M^4 + 12 Ca^2 M^2 RL^4)) \right)^{1/3}} + (-4 Ca^3 (L^3 - L M^2)^3 + 6 Ca^4 L^2 (3 L^2 - 2 M^2) (L^2 - M^2)^2 RL^2 + 12 Ca^5 L M^4 (-L^2 + M^2) RL^4 - 4 Ca^6 M^4 (-9 L^2 + M^2) RL^6 + 6 \sqrt{3} \sqrt{-Ca^8 (L^3 - L M^2)^2 RL^4 (L^{10} - 2 L^8 M^2 - 4 Ca L^9 RL^2 + 4 Ca L^7 M^2 RL^2 + 4 Ca L^5 M^4 RL^2 - 20 Ca^2 L^4 M^4 RL^4 + 12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4 - 12 Ca^3 L M^6 RL^6 + 4 Ca^4 M^6 RL^8 - 4 Ca L^3 M^4 RL^2 (M^2 + 3 Ca^2 RL^4) + L^6 (M^4 + 12 Ca^2 M^2 RL^4)) \right)^{2/3}} + 2 Ca^2 (2^{1/3} L^6 - 2^{1/3} L^4 M^2 - M^2 RL^2 (-2 Ca^3 (L^3 - L M^2)^3 + 3 Ca^4 L^2 (3 L^2 - 2 M^2) (L^2 - M^2)^2 RL^2 + 6 Ca^5 L M^4 (-L^2 + M^2) RL^4 - 2 Ca^6 M^4 (-9 L^2 + M^2) RL^6 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-Ca^8 (L^3 - L M^2)^2 RL^4 (L^{10} - 2 L^8 M^2 - 4 Ca L^9 RL^2 + 4 Ca L^7 M^2 RL^2 + 4 Ca L^5 M^4 RL^2 - 20 Ca^2 L^4 M^4 RL^4 + 12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4 - 12 Ca^3 L M^6 RL^6 + 4 Ca^4 M^6 RL^8 - 4 Ca L^3 M^4 RL^2 (M^2 + 3 Ca^2 RL^4) + L^6 (M^4 + 12 Ca^2 M^2 RL^4)) \right)^{1/3}} \right) / (Ca^3 (L^3 - L M^2) RL^2 (-2 Ca^3 (L^3 - L M^2)^3 + 3 Ca^4 L^2 (3 L^2 - 2 M^2) (L^2 - M^2)^2 RL^2 + 6 Ca^5 L M^4 (-L^2 + M^2) RL^4 - 2 Ca^6 M^4 (-9 L^2 + M^2) RL^6 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-Ca^8 (L^3 - L M^2)^2 RL^4 (L^{10} - 2 L^8 M^2 - 4 Ca L^9 RL^2 + 4 Ca L^7 M^2 RL^2 + 4 Ca L^5 M^4 RL^2 - 20 Ca^2 L^4 M^4 RL^4 + 12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4 - 12 Ca^3 L M^6 RL^6 + 4 Ca^4 M^6 RL^8 - 4 Ca L^3 M^4 RL^2 (M^2 + 3 Ca^2 RL^4) + L^6 (M^4 + 12 Ca^2 M^2 RL^4)) \right)^{1/3}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W2 \rightarrow & 1/\text{Sqrt}[6] \left(\sqrt{\left((-2)^{2/3} Ca^3 L (3 L^4 - 5 L^2 M^2 + 2 M^4) RL^2 + 2^{2/3} Ca^4 M^2 (3 L^2 + M^2) RL^4 - 2 Ca L (L^2 - M^2) (-2 Ca^3 (L^3 - L M^2)^3 + 3 Ca^4 L^2 (3 L^2 - 2 M^2) (L^2 - M^2)^2 RL^2 + 6 Ca^5 L M^4 (-L^2 + M^2) RL^4 - 2 Ca^6 M^4 (-9 L^2 + M^2) RL^6 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-Ca^8 (L^3 - L M^2)^2 RL^4 (L^{10} - 2 L^8 M^2 - 4 Ca L^9 RL^2 + 4 Ca L^7 M^2 RL^2 + 4 Ca L^5 M^4 RL^2 - 20 Ca^2 L^4 M^4 RL^4 + 12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4 - 12 Ca^3 L M^6 RL^6 + 4 Ca^4 M^6 RL^8 - 4 Ca L^3 M^4 RL^2 (M^2 + 3 Ca^2 RL^4) + L^6 (M^4 + 12 Ca^2 M^2 RL^4)) \right)^{1/3}} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& RL^{2-20} Ca^2 L^4 M^4 RL^4 + 12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4 - 12 Ca^3 L M^6 RL^6 + 4 Ca^4 M^6 \\
& RL^{8-4} Ca L^3 M^4 RL^2 (M^2+3 Ca^2 RL^4) + L^6 (M^4+12 Ca^2 M^2 \\
& RL^4))^{(1/3)} + L^2 (2^{(1/3)} (-1-I \sqrt{3}) M^4 + 6 RL^2 (-2 Ca^3 (L^3-L M^2)^3 + 3 Ca^4 \\
& L^2 (3 L^2-2 M^2) (L^2-M^2)^2 RL^2 + 6 Ca^5 L M^4 (-L^2+M^2) RL^4 - 2 Ca^6 M^4 (-9 \\
& L^2+M^2) RL^6 + 3 \sqrt{3} \sqrt{[-Ca^8 (L^3-L M^2)^2 RL^4 (L^{10-2} L^8 M^2-4 Ca L^9 \\
& RL^2+4 Ca L^7 M^2 RL^2+4 Ca L^5 M^4 RL^2-20 Ca^2 L^4 M^4 RL^4+12 Ca^2 L^2 \\
& M^6 RL^4-12 Ca^3 L M^6 RL^6+4 Ca^4 M^6 RL^8-4 Ca L^3 M^4 RL^2 (M^2+3 Ca^2 \\
& RL^4)+L^6 (M^4+12 Ca^2 M^2 RL^4))^{(1/3))}) / (Ca^3 (L^3-L M^2) RL^2 (-2 Ca^3 \\
& (L^3-L M^2)^3 + 3 Ca^4 L^2 (3 L^2-2 M^2) (L^2-M^2)^2 RL^2 + 6 Ca^5 L M^4 (- \\
& L^2+M^2) RL^4 - 2 Ca^6 M^4 (-9 L^2+M^2) RL^6 + 3 \sqrt{3} \sqrt{[-Ca^8 (L^3-L M^2)^2 \\
& RL^4 (L^{10-2} L^8 M^2-4 Ca L^9 RL^2+4 Ca L^7 M^2 RL^2+4 Ca L^5 M^4 RL^2-20 \\
& Ca^2 L^4 M^4 RL^4+12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4-12 Ca^3 L M^6 RL^6+4 Ca^4 M^6 RL^8- \\
& 4 Ca L^3 M^4 RL^2 (M^2+3 Ca^2 RL^4)+L^6 (M^4+12 Ca^2 M^2 RL^4))^{(1/3))})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{W6} & > 1/(2 \sqrt{3}) (\sqrt{[(2 2^{(1/3)} (1+I \sqrt{3}) Ca^3 L (3 L^4-5 L^2 M^2+2 M^4) RL^2- \\
& 2 I 2^{(1/3)} (-I+\sqrt{3}) Ca^4 M^2 (3 L^2+M^2) RL^4-4 Ca L (L^2-M^2) (-2 Ca^3 (L^3-L \\
& M^2)^3 + 3 Ca^4 L^2 (3 L^2-2 M^2) (L^2-M^2)^2 RL^2 + 6 Ca^5 L M^4 (-L^2+M^2) RL^4- \\
& 2 Ca^6 M^4 (-9 L^2+M^2) RL^6 + 3 \sqrt{3} \sqrt{[-Ca^8 (L^3-L M^2)^2 RL^4 (L^{10-2} \\
& L^8 M^2-4 Ca L^9 RL^2+4 Ca L^7 M^2 RL^2+4 Ca L^5 M^4 RL^2-20 Ca^2 L^4 M^4 \\
& RL^4+12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4-12 Ca^3 L M^6 RL^6+4 Ca^4 M^6 RL^8-4 Ca L^3 M^4 \\
& RL^2 (M^2+3 Ca^2 RL^4)+L^6 (M^4+12 Ca^2 M^2 RL^4))^{(1/3)} + I (I+\sqrt{3}) (-4 Ca^3 \\
& (L^3-L M^2)^3 + 6 Ca^4 L^2 (3 L^2-2 M^2) (L^2-M^2)^2 RL^2 + 12 Ca^5 L M^4 (- \\
& L^2+M^2) RL^4 - 4 Ca^6 M^4 (-9 L^2+M^2) RL^6 + 6 \sqrt{3} \sqrt{[-Ca^8 (L^3-L M^2)^2 \\
& RL^4 (L^{10-2} L^8 M^2-4 Ca L^9 RL^2+4 Ca L^7 M^2 RL^2+4 Ca L^5 M^4 RL^2-20 \\
& Ca^2 L^4 M^4 RL^4+12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4-12 Ca^3 L M^6 RL^6+4 Ca^4 M^6 RL^8- \\
& 4 Ca L^3 M^4 RL^2 (M^2+3 Ca^2 RL^4)+L^6 (M^4+12 Ca^2 M^2 RL^4))^{(2/3)} + 2 Ca^2 \\
& (2^{(1/3)} (-1-I \sqrt{3}) L^6 + 2 2^{(1/3)} (1+I \sqrt{3}) L^4 M^2 - 2 M^2 RL^2 (-2 Ca^3 (L^3-L \\
& M^2)^3 + 3 Ca^4 L^2 (3 L^2-2 M^2) (L^2-M^2)^2 RL^2 + 6 Ca^5 L M^4 (-L^2+M^2) RL^4- \\
& 2 Ca^6 M^4 (-9 L^2+M^2) RL^6 + 3 \sqrt{3} \sqrt{[-Ca^8 (L^3-L M^2)^2 RL^4 (L^{10-2} \\
& L^8 M^2-4 Ca L^9 RL^2+4 Ca L^7 M^2 RL^2+4 Ca L^5 M^4 RL^2-20 Ca^2 L^4 M^4 \\
& RL^4+12 Ca^2 L^2 M^6 RL^4-12 Ca^3 L M^6 RL^6+4 Ca^4 M^6 RL^8-4 Ca L^3 M^4 \\
& RL^2 (M^2+3 Ca^2 RL^4)+L^6 (M^4+12 Ca^2 M^2 RL^4))^{(1/3)} + L^2 (2^{(1/3)} (-1-I \\
& \sqrt{3}) M^4 + 6 RL^2 (-2 Ca^3 (L^3-L M^2)^3 + 3 Ca^4 L^2 (3 L^2-2 M^2) (L^2-M^2)^2 \\
& RL^2 + 6 Ca^5 L M^4 (-L^2+M^2) RL^4 - 2 Ca^6 M^4 (-9 L^2+M^2) RL^6 + 3 \sqrt{3}
\end{aligned}$$

$$\frac{\sqrt[3]{\sqrt{(-Ca^8(L^3-LM^2)^2RL^4(L^{10-2}L^8M^2-4CaL^9RL^2+4CaL^7M^2RL^2+4CaL^5M^4RL^2-20Ca^2L^4M^4RL^4+12Ca^2L^2M^6RL^4-12Ca^3LM^6RL^6+4Ca^4M^6RL^8-4CaL^3M^4RL^2(M^2+3Ca^2RL^4)+L^6(M^4+12Ca^2M^2RL^4))}}}{(Ca^3(L^3-LM^2)RL^2(-2Ca^3(L^3-LM^2)^3+3Ca^4L^2(3L^2-2M^2)(L^2-M^2)^2RL^2+6Ca^5LM^4(-L^2+M^2)RL^4-2Ca^6M^4(-9L^2+M^2)RL^6+3\sqrt{3}\sqrt[3]{\sqrt{(-Ca^8(L^3-LM^2)^2RL^4(L^{10-2}L^8M^2-4CaL^9RL^2+4CaL^7M^2RL^2+4CaL^5M^4RL^2-20Ca^2L^4M^4RL^4+12Ca^2L^2M^6RL^4-12Ca^3LM^6RL^6+4Ca^4M^6RL^8-4CaL^3M^4RL^2(M^2+3Ca^2RL^4)+L^6(M^4+12Ca^2M^2RL^4))}}))}^{1/3}}$$

EK B: Seri Paralel Devre Farklı Kondansatör Değeri için Sonuç Denklemleri

$\omega n \rightarrow -\omega$

$\omega n \rightarrow \omega$

$$\omega n \rightarrow -\left[\frac{\sqrt{(L^2 RL^2 \omega^2)/(L^2 RL^2 - M^2 RL^2) - (M^2 RL^2 \omega^2)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) - (L^4 \omega^4)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) + (L^2 M^2 \omega^4)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) - \sqrt{(-2L^2 RL^2 \omega^2 + M^2 RL^2 \omega^2 + L^4 \omega^4 - L^2 M^2 \omega^4)^2 - 4(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)(L^2 RL^2 \omega^4 - M^2 RL^2 \omega^4)}}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)}\right]$$

$$\omega n \rightarrow \left[\frac{\sqrt{(L^2 RL^2 \omega^2)/(L^2 RL^2 - M^2 RL^2) - (M^2 RL^2 \omega^2)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) - (L^4 \omega^4)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) + (L^2 M^2 \omega^4)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) - \sqrt{(-2L^2 RL^2 \omega^2 + M^2 RL^2 \omega^2 + L^4 \omega^4 - L^2 M^2 \omega^4)^2 - 4(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)(L^2 RL^2 \omega^4 - M^2 RL^2 \omega^4)}}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)}\right]$$

$$\omega n \rightarrow -\left[\frac{\sqrt{(L^2 RL^2 \omega^2)/(L^2 RL^2 - M^2 RL^2) - (M^2 RL^2 \omega^2)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) - (L^4 \omega^4)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) + (L^2 M^2 \omega^4)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) + \sqrt{(-2L^2 RL^2 \omega^2 + M^2 RL^2 \omega^2 + L^4 \omega^4 - L^2 M^2 \omega^4)^2 - 4(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)(L^2 RL^2 \omega^4 - M^2 RL^2 \omega^4)}}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)}\right]$$

$$\omega n \rightarrow \left[\frac{\sqrt{(L^2 RL^2 \omega^2)/(L^2 RL^2 - M^2 RL^2) - (M^2 RL^2 \omega^2)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) - (L^4 \omega^4)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) + (L^2 M^2 \omega^4)/(2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)) + \sqrt{(-2L^2 RL^2 \omega^2 + M^2 RL^2 \omega^2 + L^4 \omega^4 - L^2 M^2 \omega^4)^2 - 4(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)(L^2 RL^2 \omega^4 - M^2 RL^2 \omega^4)}}{2(L^2 RL^2 - M^2 RL^2)}\right]$$

Bu değerlerin Simplfy komutu ile sadeleştirilmiş durumları aşağıdadır.

$\omega n \rightarrow -\omega$

$\omega n \rightarrow \omega$

$$\omega n \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{\sqrt{(L^2 - M^2) RL^2}} \left(M^2 RL^2 \omega^2 + L^4 \omega^4 - L^2 (2 RL^2 \omega^2 + M^2 \omega^4) \right) + \sqrt{(w^4 (-3 M^4 RL^4 + L^8 \omega^4 + L^2 (4 M^2 RL^4 - 2 M^4 RL^2 \omega^2) - 2 L^6 (2 RL^2 \omega^2 + M^2 \omega^4) + L^4 (6 M^2 RL^2 \omega^2 + M^4 \omega^4)))} \right) \right)$$

EK C: Paralel Seri Devre Eşit Kondansatör Yapısı İçin Sonuç Denklemleri

$$w \rightarrow -\left[\frac{\sqrt{(L_1 L_2 T_1)}}{(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} - \frac{(M^2 T_1)}{2(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} \right] \frac{L_2 T_1^2}{(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} - \left[\frac{L_1 R L^2 T_1^2}{2(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} - \frac{(R L^2 T_1^3)}{2(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} - \left(\frac{\sqrt{-4(L_1 + T_1)(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} + (-2L_1 L_2 T_1 + M^2 T_1 - 2L_2 T_1^2 + L_1 R L^2 T_1^2 + R L^2 T_1^3)^2}{2(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} \right) \right]$$

$$w \rightarrow \frac{\sqrt{(L_1 * L_2 * T_1)}}{(L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} - \frac{(M^2 * T_1)}{2 * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} + \frac{(L_2 * T_1^2)}{(L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} - \frac{(L_1 * R L^2 * T_1^2)}{2 * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} - \frac{(R L^2 * T_1^3)}{2 * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} - \frac{\sqrt{-4 * (L_1 + T_1) * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} + (-2 * L_1 * L_2 * T_1 + M^2 * T_1 - 2 * L_2 * T_1^2 + L_1 * R L^2 * T_1^2 + R L^2 * T_1^3)^2}{2 * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)}}]$$

$$w \rightarrow -\frac{\sqrt{(L_1 * L_2 * T_1)}}{(L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} - \frac{(M^2 * T_1)}{2 * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} + \frac{(L_2 * T_1^2)}{(L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} - \frac{(L_1 * R L^2 * T_1^2)}{2 * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} - \frac{(R L^2 * T_1^3)}{2 * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} + \frac{\sqrt{-4 * (L_1 + T_1) * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)} + (-2 * L_1 * L_2 * T_1 + M^2 * T_1 - 2 * L_2 * T_1^2 + L_1 * R L^2 * T_1^2 + R L^2 * T_1^3)^2}{2 * (L_1 * L_2^2 * T_1^2 - L_2 * M^2 * T_1^2 + L_2^2 * T_1^3)}}]$$

$$w \rightarrow \left[\frac{\sqrt{(L_1 L_2 T_1)}}{(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} - \frac{(M^2 T_1)}{2(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} \right] + \frac{(L_2 T_1^2)}{(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} - \frac{(L_1 R L^2 T_1^2)}{2(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} - \frac{(R L^2 T_1^3)}{2(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} + \left(\frac{\sqrt{-4(L_1 + T_1)(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} + (-2L_1 L_2 T_1 + M^2 T_1 - 2L_2 T_1^2 + L_1 R L^2 T_1^2 + R L^2 T_1^3)^2}{2(L_1 L_2^2 T_1^2 - L_2 M^2 T_1^2 + L_2^2 T_1^3)} \right)$$

EK D: Paralel Seri Devre Farklı Kondansatör Değerleri İçin ComplexExpand Komutu Sonuçları ve İmajiner Değeri

$$\begin{aligned}
 & (M^2 RL w^2)/((RL^2 + (-1/(T2 w)) + L2 w)^2) ((M^4 RL^2 w^4)/(RL^2 + (-1/(T2 w)) \\
 & + L2 w)^2)^2 + (L1 w + (L2 T2 w)/(L1 (1 + (k^4 L2)/(RL^2 T2))) + (M^2 w^2 (1/(T2 w) \\
 & - L2 w))/(RL^2 + (-1/(T2 w)) + L2 w)^2))^2 + I - ((L1*w)/((M^4*RL^2*w^4)/(RL^2 + \\
 & (-1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2 + (L1*w + (L2*T2*w)/(L1*(1 + (k^4*L2)/(RL^2*T2)))) + \\
 & (M^2*w^2*(1/(T2*w) - L2*w))/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2 - \\
 & (L2*T2*w)/(L1*(1 + (k^4*L2)/(RL^2*T2)))*((M^4*RL^2*w^4)/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + \\
 & L2*w)^2)^2 + (L1*w + (L2*T2*w)/(L1*(1 + (k^4*L2)/(RL^2*T2)))) + \\
 & (M^2*w^2*(1/(T2*w) - L2*w))/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2) \\
 & (M^2*w)/(T2*(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2)*((M^4*RL^2*w^4)/(RL^2 + (- \\
 & 1/(T2*w)) + L2*w)^2)^2 + (L1*w + (L2*T2*w)/(L1*(1 + (k^4*L2)/(RL^2*T2)))) + (M^2* \\
 & w^2*(1/(T2*w) - L2*w))/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2) (L2*M^2*w^3)/((RL^2 + \\
 & (-1/(T2*w)) + L2*w)^2)* ((M^4*RL^2*w^4)/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2)^2 + \\
 & (L1*w + (L2*T2*w)/(L1*(1 + (k^4*L2)/(RL^2*T2)))) + (M^2*w^2*(1/(T2*w) - \\
 & L2*w))/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Zimag} = & -((L1*w)/((M^4*RL^2*w^4)/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2 + (L1*w + \\
 & (L2*T2*w)/(L1*(1 + (k^4*L2)/(RL^2*T2)))) + (M^2*w^2*(1/(T2*w) - L2*w))/(RL^2 + (- \\
 & 1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2 - (L2*T2*w)/(L1*(1 + \\
 & (k^4*L2)/(RL^2*T2)))*((M^4*RL^2*w^4)/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2)^2 + (L1*w + \\
 & (L2*T2*w)/(L1*(1 + (k^4*L2)/(RL^2*T2)))) + (M^2*w^2*(1/(T2*w) - L2*w))/(RL^2 + (- \\
 & 1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2) - (M^2*w)/(T2*(RL^2 + (-1/(T2*w)) + \\
 & L2*w)^2)*((M^4*RL^2*w^4)/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2)^2 + (L1*w + \\
 & (L2*T2*w)/(L1*(1 + (k^4*L2)/(RL^2*T2)))) + (M^2*w^2*(1/(T2*w) - L2*w))/(RL^2 + (- \\
 & 1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2) + (L2*M^2*w^3)/((RL^2 + (-1/(T2*w)) + \\
 & L2*w)^2)*((M^4*RL^2*w^4)/(RL^2 + (-1/(T2*w)) + L2*w)^2)^2 + (L1*w + \\
 & (L2*T2*w)/(L1*(1 + (k^4*L2)/(RL^2*T2)))) + (M^2*w^2*(1/(T2*w) - L2*w))/(RL^2 + (- \\
 & 1/(T2*w)) + L2*w)^2))^2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& RL^4 T^2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T^2^4 + L2^3 RL^4 T^2^5)) - (L2 RL^6 T^2^5)/(2 (k^8 L1^2 \\
& L2^4 T^2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T^2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T^2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 \\
& RL^2 T^2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T^2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T^2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T^2^4 + \\
& L2^3 RL^4 T^2^5)) - (\sqrt{-4 (k^8 L1^2 L2^2 + 2 k^4 L1^2 L2 RL^2 T2 + k^4 L2^2 RL^2 \\
& T2^2 + L1^2 RL^4 T2^2 + L2 RL^4 T2^3) (k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 \\
& + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + \\
& L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) + (-2 k^8 L1^2 L2^3 \\
& T2 + k^8 L1 L2^2 M^2 T2 - 4 k^4 L1^2 L2^2 RL^2 T2^2 + k^8 L1^2 L2^2 RL^2 T2^2 + \\
& 2 k^4 L1 L2 M^2 RL^2 T2^2 - 2 k^4 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 L1^2 L2 RL^4 T2^3 + 2 k^4 \\
& L1^2 L2 RL^4 T2^3 + L1 M^2 RL^4 T2^3 - 2 L2^2 RL^4 T2^4 + k^4 L2^2 RL^4 T2^4 + \\
& L1^2 RL^6 T2^4 + L2 RL^6 T2^5)^2)/(2 (k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 \\
& + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + \\
& L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5)))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
w \rightarrow & \sqrt{(k^8 L1^2 L2^3 T2)/(k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 \\
& L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 \\
& L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) - (k^8 L1 L2^2 M^2 T2)/(2 \\
& (k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 \\
& L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 \\
& T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5)) + (2 k^4 L1^2 L2^2 RL^2 T2^2)/(k^8 L1^2 \sqrt{L2^4 T2^2 - k^8 \\
& L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 \\
& L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) - \\
& (k^8 L1^2 L2^2 RL^2 T2^2)/(2 (k^8 L1^2 L2^4 \sqrt{T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 \\
& L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 \\
& L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5)) - (k^4 L1 L2 M^2 RL^2 \\
& T2^2)/(k^8 L1^2 L2^4 \sqrt{T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 \\
& k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 \\
& M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) + (k^4 L2^3 RL^2 T2^3)/(k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 \\
& L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 \\
& L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) + \\
& (L1^2 L2 RL^4 T2^3)/(k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 \\
& RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 \\
& T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) - (k^4 L1^2 L2 RL^4 T2^3)/(k^8 L1^2 \\
& L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + \\
& L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5) - (L^1 M^2 RL^4 T^2 \wedge^3) / (2 (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 \\
& + 2 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 k^4 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + \\
& L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5)) + (L^2 \wedge^2 RL^4 \\
& T^2 \wedge^4) / (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 + 2 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 \\
& k^4 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 \\
& M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5) - (k^4 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4) / (2 (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - \\
& k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 + 2 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 k^4 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^3 + \\
& k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + L^2 \wedge^3 RL^4 \\
& T^2 \wedge^5)) - (L^1 \wedge^2 RL^6 T^2 \wedge^4) / (2 (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 + 2 k^4 L^1 \wedge^2 \\
& L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 k^4 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 \\
& RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5)) - (L^2 RL^6 T^2 \wedge^5) / (2 (k^8 L^1 \wedge^2 \\
& L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 + 2 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 k^4 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 \\
& RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + \\
& L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5)) - (\sqrt{-4 (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 + 2 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 RL^2 T^2 + k^4 L^2 \wedge^2 RL^2 \\
& T^2 \wedge^2 + L^1 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^2 + L^2 RL^4 T^2 \wedge^3) (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 \\
& + 2 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 k^4 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + \\
& L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5)) + (-2 k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 \\
& T^2 + k^8 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 T^2 - 4 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^2 T^2 \wedge^2 + k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^2 T^2 \wedge^2 + \\
& 2 k^4 L^1 L^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^2 - 2 k^4 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 L^1 \wedge^2 L^2 RL^4 T^2 \wedge^3 + 2 k^4 L^1 \wedge^2 \\
& L^2 RL^4 T^2 \wedge^3 + L^1 M^2 RL^4 T^2 \wedge^3 - 2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + k^4 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + L^1 \wedge^2 \\
& RL^6 T^2 \wedge^4 + L^2 RL^6 T^2 \wedge^5)^2) / (2 (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 + 2 \\
& k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 k^4 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + \\
& L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5)))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
w \rightarrow & -\sqrt{(k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 T^2) / (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 + 2 k^4 \\
& L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 k^4 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + L^1 \wedge^2 \\
& L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5) - (k^8 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 T^2) / (2 \\
& (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 + 2 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 k^4 L^1 \\
& L^2 \wedge^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 \\
& T^2 \wedge^4 + L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5)) + (2 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^2 T^2 \wedge^2) / (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 \\
& L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 + 2 k^4 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^3 RL^2 T^2 \wedge^3 - 2 k^4 L^1 L^2 \wedge^2 M^2 RL^2 T^2 \wedge^3 + k^4 \\
& L^2 \wedge^4 RL^2 T^2 \wedge^4 + L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^4 T^2 \wedge^4 - L^1 L^2 M^2 RL^4 T^2 \wedge^4 + L^2 \wedge^3 RL^4 T^2 \wedge^5) - \\
& (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^2 RL^2 T^2 \wedge^2) / (2 (k^8 L^1 \wedge^2 L^2 \wedge^4 T^2 \wedge^2 - k^8 L^1 L^2 \wedge^3 M^2 T^2 \wedge^2 + 2 k^4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 \\
& L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) - (k^4 L1 L2 M^2 RL^2 \\
& T2^2)/(k^8 L1^2 L2^4 \sqrt{T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 \\
& k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 \\
& M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) + (k^4 L2^3 RL^2 T2^3)/(k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 \\
& L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 \\
& L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) + \\
& (L1^2 L2 RL^4 T2^3)/(k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 \\
& RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 \\
& T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) - (k^4 L1^2 L2 RL^4 T2^3)/(k^8 L1^2 \\
& L2^4 T2^2 \sqrt{-k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 \\
& RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + \\
& L2^3 RL^4 T2^5) - (L1 M^2 RL^4 T2^3)/(2 (k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 \\
& + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + \\
& L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5)) + (L2^2 RL^4 \\
& T2^4)/(k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 \\
& k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 \\
& M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) - (k^4 L2^2 RL^4 T2^4)/(2 (k^8 L1^2 L2^4 T2^2 \sqrt{- \\
& k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + \\
& k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 \\
& T2^5)) - (L1^2 RL^6 T2^4)/(2 (k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 \\
& L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 \\
& RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5)) - (L2 RL^6 T2^5)/(2 (k^8 L1^2 \\
& L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 \\
& RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + \\
& L2^3 RL^4 T2^5)) + (\sqrt{-4 (k^8 L1^2 L2^2 + 2 k^4 L1^2 L2 RL^2 T2 + k^4 L2^2 \\
& RL^2 T2^2 + L1^2 RL^4 T2^2 + L2 RL^4 T2^3) (k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 \\
& T2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T2^3 + k^4 L2^4 RL^2 \\
& T2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T2^4 + L2^3 RL^4 T2^5) + (-2 k^8 L1^2 \\
& L2^3 T2 + k^8 L1 L2^2 M^2 T2 - 4 k^4 L1^2 L2^2 RL^2 T2^2 + k^8 L1^2 L2^2 RL^2 \\
& T2^2 + 2 k^4 L1 L2 M^2 RL^2 T2^2 - 2 k^4 L2^3 RL^2 T2^3 - 2 L1^2 L2 RL^4 T2^3 + 2 \\
& k^4 L1^2 L2 RL^4 T2^3 + L1 M^2 RL^4 T2^3 - 2 L2^2 RL^4 T2^4 + k^4 L2^2 RL^4 T2^4 \\
& + L1^2 RL^6 T2^4 + L2 RL^6 T2^5)^2))/(2 (k^8 L1^2 L2^4 T2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T2^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (RL^4 T^2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T^2^4 + L2^3 RL^4 T^2^5)) - (L2 RL^6 T^2^5)/(2 (k^8 L1^2 \\
& L2^4 T^2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T^2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T^2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 \\
& RL^2 T^2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T^2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T^2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T^2^4 + \\
& L2^3 RL^4 T^2^5)) + (\sqrt{-4 (k^8 L1^2 L2^2 + 2 k^4 L1^2 L2 RL^2 T2 + k^4 L2^2 \\
& RL^2 T^2^2 + L1^2 RL^4 T^2^2 + L2 RL^4 T^2^3) (k^8 L1^2 L2^4 T^2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 \\
& T^2^2 + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T^2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T^2^3 + k^4 L2^4 RL^2 \\
& T^2^4 + L1^2 L2^2 RL^4 T^2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T^2^4 + L2^3 RL^4 T^2^5) + (-2 k^8 L1^2 \\
& L2^3 T2 + k^8 L1 L2^2 M^2 T2 - 4 k^4 L1^2 L2^2 RL^2 T^2^2 + k^8 L1^2 L2^2 RL^2 \\
& T^2^2 + 2 k^4 L1 L2 M^2 RL^2 T^2^2 - 2 k^4 L2^3 RL^2 T^2^3 - 2 L1^2 L2 RL^4 T^2^3 + 2 \\
& k^4 L1^2 L2 RL^4 T^2^3 + L1 M^2 RL^4 T^2^3 - 2 L2^2 RL^4 T^2^4 + k^4 L2^2 RL^4 T^2^4 \\
& + L1^2 RL^6 T^2^4 + L2 RL^6 T^2^5)^2)/(2 (k^8 L1^2 L2^4 T^2^2 - k^8 L1 L2^3 M^2 T^2^2 \\
& + 2 k^4 L1^2 L2^3 RL^2 T^2^3 - 2 k^4 L1 L2^2 M^2 RL^2 T^2^3 + k^4 L2^4 RL^2 T^2^4 + \\
& L1^2 L2^2 RL^4 T^2^4 - L1 L2 M^2 RL^4 T^2^4 + L2^3 RL^4 T^2^5)))
\end{aligned}$$

EK F: Paralel-Paralel Devre Topolojisi Complex Expand Komut Sonuçları

$$\begin{aligned}
 & (M^2 RL w^2)/((L^2 w^2 + (RL - L RL T w^2)^2) ((M^4 RL^2 w^4)/(L^2 w^2 + (RL - L \\
 & RL T w^2)^2)^2 + (-L w - (L M^2 w^3)/(L^2 w^2 + (RL - L RL T w^2)^2) + (M^2 RL T \\
 & w^3 (RL - L RL T w^2))/(L^2 w^2 + (RL - L RL T w^2)^2))^2) ((M^4 RL^2 w^4)/((L^2 \\
 & w^2 + (RL - L RL T w^2)^2)^2) ((M^4 RL^2 w^4)/(L^2 w^2 + (RL - L RL T w^2)^2)^2 + \\
 & (-L w - (L M^2 w^3)/(L^2 w^2 + (RL - L RL T w^2)^2) + (M^2 RL T w^3 (RL - L RL T \\
 & w^2))/(L^2 w^2 + (RL - L RL T w^2)^2))^2)^2) + (T w + (L w + (L M^2 w^3)/(L^2 w^2 + \\
 & (RL - L RL T w^2)^2) - (M^2 RL T w^3 (RL - L RL T w^2))/(L^2 w^2 + (RL - L RL T \\
 & w^2)^2))/((M^4 RL^2 w^4)/(L^2 w^2 + (RL - L RL T w^2)^2)^2 + (-L w - (L M^2 \\
 & w^3)/(L^2 w^2 + (RL - L RL T w^2)^2) + (M^2 RL T w^3 (RL - L RL T w^2))/(L^2 w^2 \\
 & + (RL - L RL T w^2)^2))^2))^2) + I - ((T*w)/((M^4*RL^2*w^4)/((L^2*w^2 + (RL - \\
 & L*RL*T*w^2)^2)^2* ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((- \\
 & L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
 & L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)^2) + (T*w + (L*w + \\
 & (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) - (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
 & L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))/ ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + \\
 & (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) \\
 & + (M^2*RL*T*w^3*(RL - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2))^2) \\
 & - (L*w)/(((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - \\
 & (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
 & L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)^2* ((M^4*RL^2*w^4)/((L^2*w^2 \\
 & + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2* ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 \\
 & + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL \\
 & - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)^2) + (T*w + (L*w + \\
 & (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) - (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
 & L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))/ ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + \\
 & (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) \\
 & + (M^2*RL*T*w^3*(RL - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2))^2) \\
 & - (L*M^2*w^3)/((L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)* ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + \\
 & (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) \\
 & + (M^2*RL*T*w^3*(RL - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2))^2) \\
 & + (M^2*RL*T*w^3*(RL - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)^2* \\
 & ((M^4*RL^2*w^4)/((L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 \\
 & + (RL - L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2))^2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - \\
& (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
& L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2 + (T*w + (L*w + \\
& (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) - (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
& L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))/((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + \\
& (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - \\
& L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - \\
& L*RL*T*w^2)^2))^2 + (M^2*RL^2*T*w^3)/((L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)* \\
& ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - \\
& (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
& L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)* ((M^4*RL^2*w^4)/((L^2*w^2 \\
& + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2)* ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 \\
& + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL \\
& - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)^2) + (T*w + (L*w + \\
& (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) - (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
& L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))/((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + \\
& (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) \\
& + (M^2*RL*T*w^3*(RL - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)^2) \\
& - (L*M^2*RL^2*T^2*w^5)/((L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)* \\
& ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - \\
& (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
& L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)* ((M^4*RL^2*w^4)/((L^2*w^2 \\
& + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2)* ((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 \\
& + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) + (M^2*RL*T*w^3*(RL \\
& - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)^2) + (T*w + (L*w + \\
& (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) - (M^2*RL*T*w^3*(RL - \\
& L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))/((M^4*RL^2*w^4)/(L^2*w^2 + \\
& (RL - L*RL*T*w^2)^2)^2 + ((-L)*w - (L*M^2*w^3)/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2) \\
& + (M^2*RL*T*w^3*(RL - L*RL*T*w^2))/(L^2*w^2 + (RL - L*RL*T*w^2)^2))^2)^2)
\end{aligned}$$

EK G: Paralel-Paralel Devresi Kararlı Sonuçlar İçin Değişken Değerleri

$$\begin{aligned} a = & -k^{16} L^3 RL^{10} T^2 - k^{16} L M^2 RL^{10} T^2 - k^8 L^{10} RL^4 T^3 + k^{10} L^{10} \\ & RL^4 T^3 - 2 k^8 L^8 M^2 RL^4 T^3 + 2 k^{10} L^8 M^2 RL^4 T^3 - k^8 L^6 M^4 \\ & RL^4 T^3 + k^{10} L^6 M^4 RL^4 T^3 - 4 k^{12} L^6 RL^8 T^3 + 4 k^{14} L^6 RL^8 T^3 \\ & - 4 k^{12} L^4 M^2 RL^8 T^3 + 4 k^{14} L^4 M^2 RL^8 T^3 - 2 k^4 L^{13} RL^2 T^4 + 4 \\ & k^6 L^{13} RL^2 T^4 - 2 k^8 L^{13} RL^2 T^4 - 4 k^4 L^{11} M^2 RL^2 T^4 + 8 k^6 L^{11} \\ & M^2 RL^2 T^4 - 4 k^8 L^{11} M^2 RL^2 T^4 - 2 k^4 L^9 M^4 RL^2 T^4 + 4 k^6 L^9 \\ & M^4 RL^2 T^4 - 2 k^8 L^9 M^4 RL^2 T^4 - 4 k^8 L^9 RL^6 T^4 + 10 k^{10} L^9 RL^6 \\ & T^4 - 6 k^{12} L^9 RL^6 T^4 - 4 k^8 L^7 M^2 RL^6 T^4 + 10 k^{10} L^7 M^2 RL^6 T^4 \\ & - 6 k^{12} L^7 M^2 RL^6 T^4 - L^{16} T^5 + 3 k^2 L^{16} T^5 - 3 k^4 L^{16} T^5 + k^6 \\ & L^{16} T^5 - 2 L^{14} M^2 T^5 + 6 k^2 L^{14} M^2 T^5 - 6 k^4 L^{14} M^2 T^5 + 2 k^6 \\ & L^{14} M^2 T^5 - L^{12} M^4 T^5 + 3 k^2 L^{12} M^4 T^5 - 3 k^4 L^{12} M^4 T^5 + k^6 \\ & L^{12} M^4 T^5 + 4 k^6 L^{12} RL^4 T^5 - 8 k^8 L^{12} RL^4 T^5 + 4 k^{10} L^{12} RL^4 \\ & T^5 + 4 k^6 L^{10} M^2 RL^4 T^5 - 8 k^8 L^{10} M^2 RL^4 T^5 + 4 k^{10} L^{10} M^2 \\ & RL^4 T^5 + L^{15} RL^2 T^6 - 2 k^2 L^{15} RL^2 T^6 + 2 k^6 L^{15} RL^2 T^6 - k^8 \\ & L^{15} RL^2 T^6 + L^{13} M^2 RL^2 T^6 - 2 k^2 L^{13} M^2 RL^2 T^6 + 2 k^6 L^{13} M^2 \\ & RL^2 T^6 - k^8 L^{13} M^2 RL^2 T^6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b = & -k^8 L^{10} RL^6 T^5 + k^{10} L^{10} RL^6 T^5 - 2 k^8 L^8 M^2 RL^6 T^5 + 2 k^{10} \\ & L^8 M^2 RL^6 T^5 - k^8 L^6 M^4 RL^6 T^5 + k^{10} L^6 M^4 RL^6 T^5 - 2 k^4 L^{13} \\ & RL^4 T^6 + 4 k^6 L^{13} RL^4 T^6 - 2 k^8 L^{13} RL^4 T^6 - 4 k^4 L^{11} M^2 RL^4 \\ & T^6 + 8 k^6 L^{11} M^2 RL^4 T^6 - 4 k^8 L^{11} M^2 RL^4 T^6 - 2 k^4 L^9 M^4 RL^4 \\ & T^6 + 4 k^6 L^9 M^4 RL^4 T^6 - 2 k^8 L^9 M^4 RL^4 T^6 - L^{16} RL^2 T^7 + 3 k^2 \\ & L^{16} RL^2 T^7 - 3 k^4 L^{16} RL^2 T^7 + k^6 L^{16} RL^2 T^7 - 2 L^{14} M^2 RL^2 T^7 \\ & + 6 k^2 L^{14} M^2 RL^2 T^7 - 6 k^4 L^{14} M^2 RL^2 T^7 + 2 k^6 L^{14} M^2 RL^2 T^7 \\ & - L^{12} M^4 RL^2 T^7 + 3 k^2 L^{12} M^4 RL^2 T^7 - 3 k^4 L^{12} M^4 RL^2 T^7 + k^6 \\ & L^{12} M^4 RL^2 T^7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c = & -k^{16} L^3 RL^8 - k^{16} L M^2 RL^8 - 4 k^{12} L^6 RL^6 T^2 + 4 k^{14} L^6 RL^6 T^2 - 4 \\ & k^{12} L^4 M^2 RL^6 T^2 + 4 k^{14} L^4 M^2 RL^6 T^2 + 2 k^{16} L^2 RL^{10} T^2 + k^{16} M^2 \\ & RL^{10} T^2 - 6 k^8 L^9 RL^4 T^2 + 12 k^{10} L^9 RL^4 T^2 - 6 k^{12} L^9 RL^4 T^2 - 6 \\ & k^8 L^7 M^2 RL^4 T^2 + 12 k^{10} L^7 M^2 RL^4 T^2 - 6 k^{12} L^7 M^2 RL^4 T^2 + \\ & 8 k^{12} L^5 RL^8 T^2 - 8 k^{14} L^5 RL^8 T^2 + 4 k^{12} L^3 M^2 RL^8 T^2 - 4 k^{14} \\ & L^3 M^2 RL^8 T^2 - 4 k^4 L^{12} RL^2 T^3 + 12 k^6 L^{12} RL^2 T^3 - 12 k^8 L^{12} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& RL^2 T^2^3 + 4 k^{10} L^{12} RL^2 T^2^3 - 4 k^4 L^{10} M^2 RL^2 T^2^3 + 12 k^6 L^{10} M^2 \\
& RL^2 T^2^3 - 12 k^8 L^{10} M^2 RL^2 T^2^3 + 4 k^{10} L^{10} M^2 RL^2 T^2^3 + 11 k^8 L^8 \\
& RL^6 T^2^3 - 23 k^{10} L^8 RL^6 T^2^3 + 12 k^{12} L^8 RL^6 T^2^3 + 6 k^8 L^6 M^2 RL^6 \\
& T^2^3 - 12 k^{10} L^6 M^2 RL^6 T^2^3 + 6 k^{12} L^6 M^2 RL^6 T^2^3 - L^{15} T^2^4 + 4 k^2 \\
& L^{15} T^2^4 - 6 k^4 L^{15} T^2^4 + 4 k^6 L^{15} T^2^4 - k^8 L^{15} T^2^4 - L^{13} M^2 T^2^4 + 4 \\
& k^2 L^{13} M^2 T^2^4 - 6 k^4 L^{13} M^2 T^2^4 + 4 k^6 L^{13} M^2 T^2^4 - k^8 L^{13} M^2 T^2^4 \\
& + 6 k^4 L^{11} RL^4 T^2^4 - 20 k^6 L^{11} RL^4 T^2^4 + 22 k^8 L^{11} RL^4 T^2^4 - 8 k^{10} \\
& L^{11} RL^4 T^2^4 + 4 k^4 L^9 M^2 RL^4 T^2^4 - 12 k^6 L^9 M^2 RL^4 T^2^4 + 12 k^8 L^9 \\
& M^2 RL^4 T^2^4 - 4 k^{10} L^9 M^2 RL^4 T^2^4 + L^{14} RL^2 T^2^5 - 5 k^2 L^{14} RL^2 T^2^5 \\
& + 9 k^4 L^{14} RL^2 T^2^5 - 7 k^6 L^{14} RL^2 T^2^5 + 2 k^8 L^{14} RL^2 T^2^5 + L^{12} M^2 \\
& RL^2 T^2^5 - 4 k^2 L^{12} M^2 RL^2 T^2^5 + 6 k^4 L^{12} M^2 RL^2 T^2^5 - 4 k^6 L^{12} M^2 \\
& RL^2 T^2^5 + k^8 L^{12} M^2 RL^2 T^2^5
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d = & -k^{16} L RL^{10} - 4 k^{12} L^4 RL^8 T^2 + 4 k^{14} L^4 RL^8 T^2 - 6 k^8 L^7 RL^6 T^2^2 \\
& + 12 k^{10} L^7 RL^6 T^2^2 - 6 k^{12} L^7 RL^6 T^2^2 - 4 k^4 L^{10} RL^4 T^2^3 + 12 k^6 L^{10} \\
& RL^4 T^2^3 - 12 k^8 L^{10} RL^4 T^2^3 + 4 k^{10} L^{10} RL^4 T^2^3 - L^{13} RL^2 T^2^4 + 4 \\
& k^2 L^{13} RL^2 T^2^4 - 6 k^4 L^{13} RL^2 T^2^4 + 4 k^6 L^{13} RL^2 T^2^4 - k^8 L^{13} RL^2 \\
& T^2^4
\end{aligned}$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Nurşah ERDUR
Doğum tarihi ve yeri : 01.05.1997 KONYA
e-posta : nursaherdur@gmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Elektrik Elektronik Mühendisliği	2019
Lise	Konya/Akşehir Anadolu Öğretmen Lisesi/Sayısal	2015