

# **ULTRA-GENİŞ BANTLI 180 DERECE HİBRİT BAĞLAŞTIRICI TASARIMI**

## **ULTRA-WIDE BANDWIDTH 180 DEGREE HYBRID COUPLER DESIGN**

**MERVE AKIN**

**PROF. DR BİRSEN SAKA**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.



Anneme...





## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30 / 06 / 2020

MERVE AKIN





## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir.
- ☐ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

30... / 05 / 2020

(İmza)

MERVE AKIN





# ÖZET

## ULTRA-GENİŞ BANTLI 180 DERECE HİBRİT BAĞDAŞTIRICI TASARIMI

**Merve AKIN**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA**

**Haziran 2020, 111 sayfa**

Bu çalışmada, 1 – 15 GHz arasında performans gösteren 180 derece hibrit bağdaştırıcı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımda, çok kısımlı bağdaştırıcı ve çok kısımlı faz kaydırıcı yöntemleri uygulanmıştır. Bağlaşım değerinin yapıda gerçekleştirilebilmesi için, üçlü şerit hat yapısı kullanılmıştır ve bu şerit hat yapısında RT/Duroid 5880 alttaş malzemesi seçilmiştir. Üçlü şerit hat yapısındaki alt ve üst katmanlar 1.525 mm, orta katman ise 0.254 mm kalınlığında seçilmiştir. Bu yapıda biri yalnızca alttaş üzerinden, diğeri hem alttaş hem çapraz geçiş deliği üzerinden bağlaşımı olan iki farklı bağdaştırıcı yapısı tasarlanmış; benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** 180° hibrit bağdaştırıcı, 3dB bağdaştırıcı, geniş bant yapısı, çok kısımlı bağdaştırıcı, üçlü şerit hat

# **ABSTRACT**

## **ULTRA-WIDE BANDWIDTH 180 DEGREE HYBRID COUPLER DESIGN**

**Merve AKIN**

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA**

**June 2020, 111 pages**

In this study, an ultra-wide bandwidth 180 degree hybrid coupler which performs in 1 – 15 GHz bandwidth design is presented. In the design, multisection coupler design and multisection phase shifter design methods are implemented. In order to realize the proper coupling values, three-layered stripline is used with RT/Duroid 5880 substrate. It is preferred that the top and bottom layer thickness of three-layered stripline structure is 1.525 mm and the middle layer thickness is 0.254 mm. Two different couplers are designed in the form of the structure: one of them performs coupling only through substrate and the other performs coupling through substrate and crossover via. For both couplers, simulation and measurement results and their comparisons are obtained.

**Keywords:** 180° hybrid coupler, 3dB coupler, ultra-wide band, multisection coupler, three-layer stripline

## TEŞEKKÜR

Bugüne kadar tüm maddi manevi desteğini hissettiren başta annem Şerife Akın ve kardeşim Can Akın'a; sevgili teyzem Fatma Sönmez ve dayım Hüseyin Yılmaz'a ve tüm aileme,

Çalışmam boyunca yardımları için mesai arkadaşlarım M. Caner Önder ve H. Kayhan Yılmaz'a,

Yüksek lisans eğitimim boyunca tüm desteği ve ilgisiyle yanımda olan ve yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Birsen Saka'ya,

Destek ve tavsiyelerini eksik etmeyen Sayın Tez Jürisi üyelerine,

en içten teşekkürlerimle.

# İÇİNDEKİLER

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| ABSTRACT .....                                               | ii  |
| TEŞEKKÜR .....                                               | iii |
| İÇİNDEKİLER.....                                             | iv  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                         | vi  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                      | x   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                 | xi  |
| 1. GİRİŞ .....                                               | 1   |
| 2. TEORİ .....                                               | 4   |
| 2.1. Yönlü Bağlaştırmacılar .....                            | 4   |
| 2.1.1 Yönlü Bağlaştırmacılarda Çift ve Tek Mod Analizi ..... | 7   |
| 2.2 180° Hibrit Bağlaştırmacılar .....                       | 14  |
| 2.2.1 Konik Bağlaştırmacı Hat Bağlaştırmacı.....             | 15  |
| 2.2.2 Çok Kısmılı Faz Kaydırıcılar .....                     | 27  |
| 2.2.3 Ofset Paralel Bağlaştırmacı Şerit Hat Yapısı .....     | 27  |
| 3. UYGULAMA.....                                             | 31  |
| 3.1 Voltaj Bağlaştırmacı Katsayısının Belirlenmesi .....     | 31  |
| 3.2 Çift ve Tek Mod Empedanslarının Hesaplanması.....        | 31  |
| 3.3 Malzeme Seçiminin Yapılması .....                        | 31  |
| 3.4 Parametrelerin Belirlenmesi .....                        | 32  |
| 4. BENZETİM.....                                             | 38  |
| 4.1 Benzetim Ortamı .....                                    | 38  |
| 4.2 3D Bağlaştırmacı Modelleri.....                          | 38  |
| 4.2.1 Bağlaştırmacı1 3D Modeli .....                         | 40  |
| 4.2.1 Bağlaştırmacı2 3D Modeli .....                         | 40  |
| 4.3 Benzetim Sonuçları .....                                 | 41  |
| 4.3.1 Bağlaştırmacı1 İçin Benzetim Sonuçları.....            | 41  |
| 4.3.2 Bağlaştırmacı2 İçin Benzetim Sonuçları.....            | 50  |
| 4.4 Parametrik Analizler .....                               | 62  |

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 4.4.1 Hücre Boyutunun Etkileri .....          | 63  |
| 4.4.2 Çözüm Yönteminin Etkileri .....         | 67  |
| 4.4.3 Gap Parametresinin Etkileri .....       | 75  |
| 5. FABRİKASYON VE ÖLÇÜM .....                 | 82  |
| 5.1 Bağlaştırmacı1 İçin Ölçüm Sonuçları ..... | 86  |
| 5.2 Bağlaştırmacı2 İçin Ölçüm Sonuçları ..... | 97  |
| 6. SONUÇ .....                                | 109 |
| 7. KAYNAKÇA .....                             | 110 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                | 111 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2. 1 Yönlü Bağlaştırmacı Geometrisi ve Kapıları.....                                | 4  |
| Şekil 2. 2 Yönlü Bağlaştırmacılarda Güç Akışı Şematiği.....                               | 6  |
| Şekil 2. 3 Çift ve Tek Mod Uyarımı.....                                                   | 8  |
| Şekil 2. 4 Bağlaştırmacı Şematiği .....                                                   | 8  |
| Şekil 2. 5 Çift Mod Eşdeğer Devre Şematiği .....                                          | 9  |
| Şekil 2. 6 Tek Mod Eşdeğer Devre Şematiği .....                                           | 9  |
| Şekil 2. 7 180 Hibrit Bağlaştırmacı Şematiği .....                                        | 14 |
| Şekil 2. 8 Asimetrik Konik Bağlaştırmacı Hat Bağlaştırmacı Şematiği .....                 | 16 |
| Şekil 2. 9 Konik Hattın Uzunluğuna Göre Karakteristik Empedans Değişimi.....              | 16 |
| Şekil 2. 10 Konik Bağlaştırmacı Hat Bağlaştırmacı Çift Mod Uyarımı.....                   | 17 |
| Şekil 2. 11 Konik Bağlaştırmacı Hat Bağlaştırmacı Tek Mod Uyarımı.....                    | 18 |
| Şekil 2. 12 Çift ve Tek Mod Eşdeğer Devresi.....                                          | 19 |
| Şekil 2. 13 Klopfenstein Koniği Eşleme Çizgesi .....                                      | 22 |
| Şekil 2. 14 Çok Kısmı Bağlaştırmacı Gösterimi.....                                        | 24 |
| Şekil 2. 15 Peşpeşe (Tandem) Bağlantı Gösterimi.....                                      | 26 |
| Şekil 2. 16 Çok Kısmı Faz Kaydırıcı Geometrisi .....                                      | 27 |
| Şekil 2. 17 Ofset Paralel Bağlaştırmacı Şerit Hat Yapısının Yan Kesiti.....               | 28 |
| Şekil 3. 1 50 Ohm Empedans Değeri İçin Gereken Hat Genişliği .....                        | 32 |
| Şekil 3. 2 Çift Mod Empedans Değeri İçin Gereken Hat Genişliği .....                      | 33 |
| Şekil 3. 3 Bağlaştırmacı1 İçin Verilen Parametrelerin 3D Model Üzerinde Gösterimi ....    | 35 |
| Şekil 3. 4 Bağlaştırmacı2 İçin Verilen Parametrelerin 3D Model Üzerinde Gösterimi ....    | 36 |
| Şekil 3. 5 Konektör 3D Modelinde Parametre Gösterimi .....                                | 36 |
| Şekil 4. 1 Bağlaştırmacı Benzetiminde Kullanılan Modül 3D Modeli – Karşıdan Görünüm ..... | 39 |
| Şekil 4. 2 Bağlaştırmacı Benzetiminde Kullanılan Modül 3D Modeli - Yandan Görünüm .....   | 39 |
| Şekil 4. 3 Bağlaştırmacı Benzetiminde Kullanılan Konektör 3D Modeli.....                  | 39 |
| Şekil 4.4 Bağlaştırmacı1 İçin Üçlü Şerit Hat Yapısı 3D Modeli .....                       | 40 |
| Şekil 4.5 Bağlaştırmacı2 İçin Üçlü Şerit Hat Yapısı 3D Modeli .....                       | 41 |
| Şekil 4. 6 Bant Boyunca Bağlaştırmacı1 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı.....     | 42 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4. 7 Bant Boyunca Bağlaştırmacı1 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı ..... | 42 |
| Şekil 4. 8 Bağlaştırmacı1 İçin Yalıtım Parametresi Grafiği .....                       | 43 |
| Şekil 4. 9 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği .....                   | 44 |
| Şekil 4. 10 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği .....                  | 44 |
| Şekil 4. 11 Kapı 2 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği .....                  | 45 |
| Şekil 4. 12 Kapı3 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği .....                   | 45 |
| Şekil 4. 13 Fark Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı .....                    | 47 |
| Şekil 4. 14 Fark Kapıları İçin Faz Dengesi Grafiği .....                               | 47 |
| Şekil 4. 15 Toplam Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı .....                  | 48 |
| Şekil 4. 16 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Grafiği .....                         | 49 |
| Şekil 4. 17 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Grafiği .....                         | 50 |
| Şekil 4. 18 Bant Boyunca Bağlaştırmacı2 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı ...  | 51 |
| Şekil 4. 19 Bant Boyunca Bağlaştırmacı2 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı ...  | 52 |
| Şekil 4. 20 Bağlaştırmacı2 İçin Yalıtım Parametresi Grafiği .....                      | 52 |
| Şekil 4. 21 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği .....                  | 53 |
| Şekil 4. 22 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği .....                  | 54 |
| Şekil 4. 23 Kapı 2 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği .....                  | 54 |
| Şekil 4. 24 Kapı 3 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği .....                  | 55 |
| Şekil 4. 25 Fark Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı .....                    | 56 |
| Şekil 4. 26 Fark Kapıları İçin Faz Dengesi Grafiği .....                               | 57 |
| Şekil 4. 27 Toplam Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı .....                  | 58 |
| Şekil 4. 28 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Grafiği .....                         | 59 |
| Şekil 4. 29 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Grafiği .....                         | 59 |
| Şekil 4. 30 Bant Boyunca Geri Dönüş Kaybı Değerleri .....                              | 60 |
| Şekil 4. 31 Bağlaştırmacı1 ve Bağlaştırmacı2'de İletim ve Bağlaşım Değerleri .....     | 61 |
| Şekil 4. 32 Bağlaştırmacı1 ve Bağlaştırmacı2'de Yalıtım Değerleri.....                 | 61 |
| Şekil 4. 33 Farklı Hücre Boyutları İçin Geri Dönüş Kaybı Değerleri ( $S_{11}$ ).....   | 64 |
| Şekil 4. 34 Farklı Hücre Boyutları İçin Geri Dönüş Kaybı Değerleri ( $S_{44}$ ).....   | 64 |
| Şekil 4. 35 Farklı Hücre Boyutları İçin Yalıtım Parametreleri.....                     | 65 |
| Şekil 4. 36 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafikleri.....                | 66 |
| Şekil 4. 37 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafikleri.....                | 66 |
| Şekil 4. 38 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Geri Dönüş Kaybı Değerleri (FDS) .....               | 68 |
| Şekil 4. 39 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Geri Dönüş Kaybı Değerleri .....                     | 68 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4. 40 Yalıtım Parametresi.....                                                        | 69 |
| Şekil 4. 41 Kapı 1 Giriş Kapısı İken Bant Boyunca İletim ve Bağlaşım Değerleri .....        | 70 |
| Şekil 4. 42 Kapı 4 Giriş Kapısı İken Bant Boyunca İletim ve Bağlaşım Değerleri .....        | 70 |
| Şekil 4. 43 Kapı 2 Giriş Kapısı İken Bant Boyunca İletim ve Bağlaşım Değerleri .....        | 71 |
| Şekil 4. 44 Kapı 3 Giriş Kapısı İken Bant Boyunca İletim ve Bağlaşım Değerleri .....        | 71 |
| Şekil 4. 45 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Değerleri .....                            | 72 |
| Şekil 4. 46 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Değerleri .....                            | 73 |
| Şekil 4. 47 Fark Kapıları İçin Faz Farkı Değerleri.....                                     | 73 |
| Şekil 4. 48 Faz Dengesi Değerleri.....                                                      | 74 |
| Şekil 4. 49 Toplam Kapıları İçin Faz Farkı Değerleri.....                                   | 74 |
| Şekil 4. 50 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin $S_{11}$ Değerleri.....                     | 76 |
| Şekil 4. 51 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin $S_{44}$ Değerleri.....                     | 76 |
| Şekil 4. 52 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin Yalıtım Değerleri.....                      | 77 |
| Şekil 4. 53 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin $S_{31}$ Değerleri.....                     | 78 |
| Şekil 4. 54 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin $S_{21}$ Değerleri.....                     | 78 |
| Şekil 4. 55 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin $S_{24}$ Değerleri.....                     | 79 |
| Şekil 4. 56 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin $S_{34}$ Değerleri.....                     | 79 |
| Şekil 4. 57 Kapı 1 Giriş Kapısı İken Genlik Dengesi Değerleri .....                         | 80 |
| Şekil 4. 58 Kapı 4 Giriş Kapısı İken Genlik Dengesi Değerleri .....                         | 81 |
| Şekil 5. 1 Bağlaştırmacı1 İçin Üretilmiş Altaşlar ve Modülleri .....                        | 82 |
| Şekil 5. 2 Bağlaştırmacı2 İçin Üretilmiş Altaşlar ve Modülleri .....                        | 83 |
| Şekil 5. 3 Bağlaştırmacı1 ve Bağlaştırmacı2 Konfigürasyonlarının Montelenmiş Modülleri..... | 84 |
| Şekil 5. 4 Ölçüm Düzenneği .....                                                            | 85 |
| Şekil 5. 5 Bağlaştırmacı1 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafiği.....      | 86 |
| Şekil 5. 6 Bağlaştırmacı1 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafiği.....      | 86 |
| Şekil 5. 7 Bağlaştırmacı1 İçin Yalıtım Parametresi Ölçüm Grafiği .....                      | 87 |
| Şekil 5. 8 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği .....                  | 88 |
| Şekil 5. 9 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği .....                  | 88 |
| Şekil 5. 10 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği .....                 | 89 |
| Şekil 5. 11 Kapı 3 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği .....                 | 89 |
| Şekil 5. 12 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Ölçüm Grafiği.....                         | 90 |
| Şekil 5. 13 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Grafiği.....                               | 91 |
| Şekil 5. 14 Fark Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı Ölçümleri .....               | 92 |



|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5. 15 Fark Kapıları İçin Faz Dengesi Grafiği .....                              | 92  |
| Şekil 5. 16 Toplam Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı Ölçümleri.....        | 93  |
| Şekil 5. 17 Bağlaştırmacı1 İçin Geri Dönüş Kaybı Değerleri .....                      | 94  |
| Şekil 5. 18 Bağlaştırmacı1 İçin Yalıtım Değerleri .....                               | 94  |
| Şekil 5. 19 Bağlaştırmacı1 İçin Kapı 1 Giriş Kapısı İken Bağlaşım Değerleri .....     | 95  |
| Şekil 5. 20 Bağlaştırmacı1 İçin Kapı 4 Giriş Kapısı İken Bağlaşım Değerleri .....     | 96  |
| Şekil 5. 21 Bağlaştırmacı1 Orta Katmanı .....                                         | 96  |
| Şekil 5. 22 Bağlaştırmacı2 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafiği .. | 97  |
| Şekil 5. 23 Bağlaştırmacı2 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafiği .. | 98  |
| Şekil 5. 24 Bağlaştırmacı2 İçin Yalıtım Parametresi Ölçüm Grafiği .....               | 98  |
| Şekil 5. 25 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği .....           | 99  |
| Şekil 5. 26 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği .....           | 100 |
| Şekil 5. 27 Kapı 2 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği .....           | 100 |
| Şekil 5. 28 Kapı 3 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği .....           | 101 |
| Şekil 5. 29 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Ölçüm Grafiği .....                  | 101 |
| Şekil 5. 30 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Ölçüm Grafiği .....                  | 102 |
| Şekil 5. 31 Fark Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı Ölçümleri .....         | 102 |
| Şekil 5. 32 Fark Kapıları İçin Faz Dengesi Grafiği .....                              | 103 |
| Şekil 5. 33 Toplam Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı Ölçümleri.....        | 104 |
| Şekil 5. 34 Bağlaştırmacı2 İçin Geri Dönüş Kaybı Değerleri .....                      | 105 |
| Şekil 5. 35 Bağlaştırmacı2 İçin Yalıtım Değerleri .....                               | 105 |
| Şekil 5. 36 Bağlaştırmacı2 İçin Kapı 1 Giriş Kapısı İken Bağlaşım Değerleri .....     | 106 |
| Şekil 5. 37 Bağlaştırmacı2 İçin Kapı 4 Giriş Kapısı İken Bağlaşım Değerleri .....     | 107 |
| Şekil 5. 38 Bağlaştırmacı2 Orta Katmanı .....                                         | 107 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 Çift Mod ve Tek Mod İçin Gelen Dalga ve Yansıyan Dalga Eşitlikleri..... | 12 |
| Çizelge 3. 1 Bağlaştırmacı1 İçin Elektriksel ve Mekanik Parametreler .....          | 34 |
| Çizelge 3. 2 Bağlaştırmacı2 İçin Elektriksel ve Mekanik Parametreler .....          | 35 |
| Çizelge 4. 1 Dalga Boyu Cinsinden Devre Boyutları .....                             | 38 |
| Çizelge 4. 2 Giriş Kapısına Göre Kapıların Numara ve Görev Eşleştirmeleri .....     | 46 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| $V$           | Voltaj                 |
| $I$           | Akım                   |
| $\varepsilon$ | Dielektrik sabiti      |
| $Z_0$         | Karakteristik empedans |
| $C$           | Bağlaşım katsayısı     |
| $\Gamma$      | Yansıma katsayısı      |
| $T$           | İletim katsayısı       |
| $\lambda$     | Dalga boyu             |
| $\theta$      | Faz sabiti             |
| $\phi$        | Faz sabiti             |
| $w$           | Hat genişliği          |

### Kısaltmalar

|                  |                                     |
|------------------|-------------------------------------|
| dB               | Desibel                             |
| GHz              | Gigahertz                           |
| 3D               | 3 Boyut                             |
| S-Parametereleri | Saçılım parametreleri               |
| KBHB             | Konik bağlaşıklık hat bağlaştırmacı |
| DC               | Doğru Akım                          |
| TDS              | Time Domain Solver                  |
| FDS              | Frequency Domain Solver             |
| FDTD             | Sonlu farklar metodu                |
| FEM              | Sonlu elemanlar metodu              |



# 1. GİRİŞ

Genel tanımıyla bağlaştırmacılar, üç, dört veya daha fazla kapağıya sahip, güç birleştirmacı veya güç bölücü görevi gören pasif mikrodalga bileşenlerdir. Bu bileşenler radar, elektronik harp, iletişim, uydu sistemlerinde ve anten sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Son dönemlerde geniş bantlı sistemlere duyulan ihtiyaçlar doğrultusunda, geniş bantlı bağlaştırmacı yapılarının geliştirilmesi gündeme gelmiştir. Geniş bantlı bağlaştırmacı yapılarında görülen kullanılan en yaygın tür, yönlü bağlaştırmacı türüdür. Yönlü bağlaştırmacılar, yüksek bağlaştırmacı değerlerine sahip olmaları, geniş bant performansları, kompakt tasarıma sahip olmaları sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedirler.

Yönlü bağlaştırmacı türü olan hibrit bağlaştırmacılar, bağlaştırmacı faktörü 3 dB'e eşit olmaları ve diğer bağlaştırmacılarından farklı olarak birden fazla giriş kapısına sahip olması özelliğiyle hibrit ismini almıştır. Hibrit bağlaştırmacıların, iki çıkış portu arasında 90 veya 180 derece gibi belirli faz farkına sahip özelleşmiş formları bulunmaktadır.

Hibrit bağlaştırmacılar, dalga kılavuzu, şerit hat veya mikro şerit hat formunda imal edilebilmektedirler. Dalga kılavuzu formuna sahip olanlar, hacim ve ağırlık gibi kısıtların mevcut olduğu uygulamalarda tercih edilmeyip karada konumlu sistemler için uygulanabilir bağlaştırmacılarıdır. Bu forma "magic-T" yapısı örnek olarak verilebilir. Şerit hat ve mikro şerit hat formunda inşa edilen bağlaştırmacılar, düşük maliyet ve kompakt tasarım kolaylıkları sağlamasıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu forma örnek olarak ise, halka bağlaştırmacılar, Lange bağlaştırmacılar, dallı hat yönlü bağlaştırmacılar ve konik bağlaştırmacı hat bağlaştırmacıları örnek olarak verilebilir.

Geniş bantlı bağlaştırmacı yapılar içerisinde "konik bağlaştırmacı hat" bağlaştırmacılarının yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir [2-5]. F. Farzaneh, S. Mohammed Saeed Majedi ve S. Mohammed Hassan Javadzadeh'in Ocak 2012'de yaptığı, 1 – 10 GHz bandında performans gösteren geniş bantlı bir bağlaştırmacı tasarım çalışması dikkate değerdir. Bu çalışmada, iki simetrik çok bölümlü (*multisection*) bağlaştırmacılarının konik geçitlerle birbirine bağlanarak (bağlaştırmacı ve iletim kapısının, izole ve giriş kapısına bağlanması) isterlere uygun, geniş bantlı 3-dB hibrit bağlaştırmacı tasarım yönteminden bahsedilmiştir [2].

Daha geniş bantta performans gösteren bir çalışma ise, Kevin K.M. Chan, Adrian E.C. Tan, Karumudi Rambabu'nun Aralık 2012'de yaptığı bağlaştırmacı tasarımıdır. Bu çalışmada da geniş bant performansının iki hibrit bağlaştırmacının konik bağlanmasıyla gözlemlendiğinden bahsedilmiştir. Bant boyunca bağlaşımın sağlanabilmesi ve süreksizliklerin ortadan kaldırılması amacıyla, üçlü şerit hat yönteminin kullanılması gerektiği belirtilmiştir [6].

Krytar firmasına ait olan, 1 – 18 GHz arası performans gösteren hibrit bağlaştırmacı tasarım notunda da yukarıda özetlenen iki çalışmanın adımlarıyla ürün tasarımının yapıldığından bahsedilmiştir. Bu devrede, önceki çalışmalarda olduğu gibi şerit hatlar kullanılmıştır [4].

Bu tez çalışmasında, ultra-geniş bantta performans gösteren bir 3-dB, 180 derece hibrit bağlaştırmacı (hibrit jonksiyon) tasarımı hedeflenmiştir. Yapılan incelemeler ve araştırmalar sonucunda geniş bant performansının sağlanabilmesi için konik bağlaştırmacı hatlar bağlaştırmacı yapısı ve geniş bantta bağlaşım performansının güçlendirilebilmesi için üçlü şerit hat yapısının kullanımı tercih edilmiştir.

Belirlenen hedefler doğrultusunda tercih edilen geometrik yapının teorik çalışmaları yapılmış ve bir parametre listesi hazırlanmıştır. Hesaplanan parametreler doğrultusunda, Computer Simulation Technology (CST®) yazılımı kullanılarak benzetim ortamı oluşturulmuştur. Benzetimin ardından gerçekleştirilen devrenin ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu çalışmanın Teori bölümünde, öncelikle genel olarak yönlü bağlaştırmacı teorisi, ardından özelleşerek "konik bağlaştırmacı hat bağlaştırmacı" teorisi verilmekte, geometrik yapıda kullanılan her birimin detaylı teorik incelemesi aktarılmaktadır.

Uygulama bölümünde, elde edilen teorik bilgiler doğrultusunda bağlaştırmacı bölmesinin ve faz farkı bölmesinin tasarım adımları ayrıntılı olarak verilmektedir.

Benzetim bölümünde, benzetimi ortamı, 3B modelin ayrıntıları ve benzetim sonuçları anlatılmaktadır.

Üretim ve Ölçüm Sonuçları bölümünde ise devrenin üretimi ve mekanik olarak üretimi, üretilen devrenin ölçüm sonuçları verilmektedir.

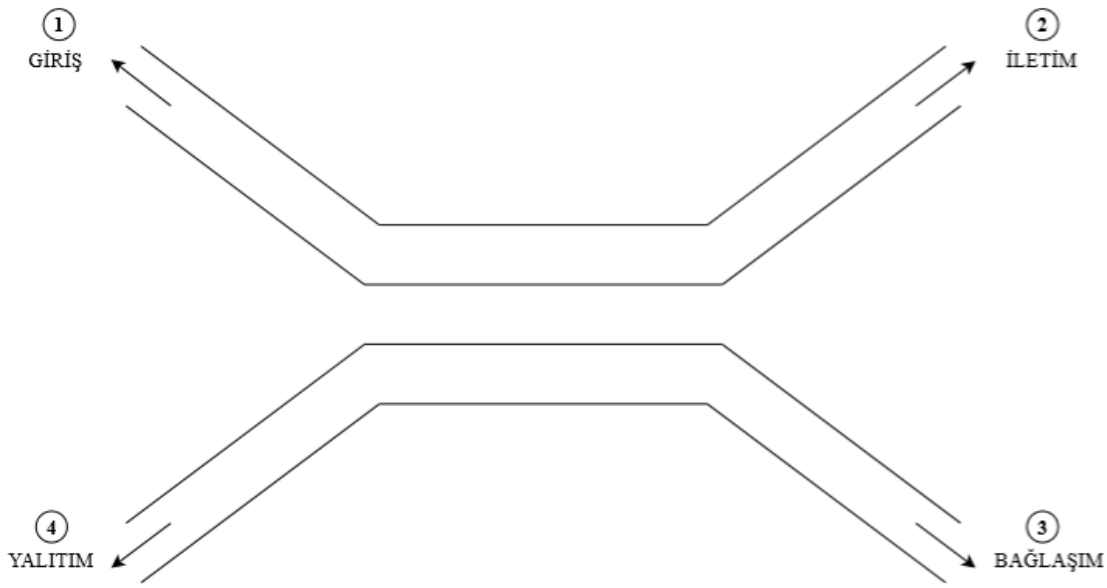
Sonuç bölümünde ise, bu çalışma kapsamında yapılan tüm yöntem ve uygulama adımları özetlenmekte ve benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılmaları değeriendirilmektedir.



## 2. TEORİ

### 2.1. Yönlü Bağlaştırmalar

Yönlü bağlaştırmalar gelen giriş işaretini genellikle eşit olmayan iki çıkış işaretine ayıran mikrodalga bileşenlerdir. İki korumasız iletim hattının birbirine çok yakınlık durumunda olmasıyla, işaretin gücünün hatlar arasındaki bağlaşımla aktarılması prensibi ile çalışmaktadır. Bağlaşımın değeri, çıkış işaretlerindeki güç bölüm veya birleştirme oranlarını ifade etmektedir. Şekil 2.1’de, örnek bir yönlü bağdaştırıcı geometrisi resmedilmiştir.



Şekil 2. 1 Yönlü Bağlaştırmalı Geometrisi ve Kapıları

İdealde, dört kapılı, karşılıklı bir yönlü bağdaştırıcının saçılım parametreleri (S-parametre) matrisi aşağıda verilen şekilde olacaktır:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & 0 & S_{34} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Yapının kayıpsız olduğu varsayılarak, enerji korunumu ve bütünsellik (*unitarity*) sebebiyle bu matristen 10 farklı denklem elde edilmektedir. Bu matriste, satır 1 ve satır 2 ile ve satır 3’ün de satır 4 ile çarpımı düşünüldüğünde:

$$S_{13}^* S_{23} + S_{14}^* S_{24} = 0 \quad (2.2)$$



$$S_{14}^* S_{13} + S_{24}^* S_{23} = 0 \quad (2.3)$$

eşitlikleri elde edilmektedir.

Denklem (2.2),  $S_{24}^*$  ile, Denklem (2.3) de  $S_{13}^*$  ile çarpılıp birbirlerinden çıkarıldıklarında:

$$S_{14}^* (|S_{13}|^2 - |S_{24}|^2) = 0 \quad (2.4)$$

eşitliği elde edilmektedir.

Benzer şekilde tekrar satır 1 ve satır 2, satır 3 ve satır 4'ün çarpımları yapıldığında:

$$S_{12}^* S_{23} + S_{14}^* S_{34} = 0 \quad (2.5)$$

$$S_{14}^* S_{12} + S_{34}^* S_{23} = 0 \quad (2.6)$$

eşitlikleri elde edilmektedir.

Tekrar yukarıdaki adıma benzer şekilde, denklem (2.5)  $S_{12}$  ile ve denklem (2.6)  $S_{34}$  ile çarpılıp çıkarma işlemi tekrarlandığında:

$$S_{23} (|S_{12}|^2 - |S_{34}|^2) = 0 \quad (2.7)$$

eşitliği elde edilmektedir.

Denklem (2.4) ve Denklem (2.7)'nin birbirini doğrulaması ancak  $S_{14} = S_{23} = 0$  ise mümkündür. Bu değer, yapının yönlü bağlaştırıcı oluşunu kanıtlamaktadır.

Bütünsel S-parametre matrisinin çarpımının ardından

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1 \quad (2.8)$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{24}|^2 = 1 \quad (2.9)$$

$$|S_{13}|^2 + |S_{34}|^2 = 1 \quad (2.10)$$

$$|S_{24}|^2 + |S_{34}|^2 = 1 \quad (2.11)$$

eşitlikleri elde edilmektedir. Bu eşitliklerde, enerjinin korunumu ifade edilmektedir. Bu eşitliklerden yola çıkılarak  $|S_{13}| = |S_{24}|$  ve  $|S_{12}| = |S_{34}|$  ilişkisi elde edilmektedir.

İfadeyi basitleştirmek ve faz parametrelerini de vurgulayabilmek amacıyla  $S_{12} = S_{34} = \alpha$ ,  $S_{13} = \beta e^{j\theta}$ ,  $S_{24} = \beta e^{j\varphi}$  olarak seçilmektedir. Burada  $\alpha$  ve  $\beta$  reel,  $\theta$  ve  $\varphi$  sembolleri de faz (yani açı) sabitlerini ifade etmektedir. Aynı zamanda,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri arasındaki ilişki, enerjinin korunumunu da ifade etmektedir. Bu ifade aşağıda verilmiştir.

$$\alpha^2 + \beta^2 = 1 \quad (2.12)$$

Satır 2 ve satır 3'ün nokta çarpım sonucu

$$S_{12}^* S_{13} + S_{24}^* S_{34} = 0 \quad (2.13)$$

eşitliğine sahiptir. Bu çarpım sonucunda, faz sabitleri arasındaki ilişki

$$\theta + \varphi = \pi \pm 2n\pi \quad (2.14)$$

eşitliğiyle elde edilmektedir.  $2\pi$ 'nin tam çarpımları göz ardı edilecek olursa, faz sabitlerinin değerlerine göre bağlaştırmacılar için iki farklı yapı ortaya çıkmaktadır.

1. *Simetrik Bağlaştırmacı*:  $\theta = \varphi = \pi/2$

$\beta$  değerinin faz katsayıları eşit seçilmektedir. Bu seçimlere göre S-parametre matrisi, aşağıda verilen formu almaktadır.

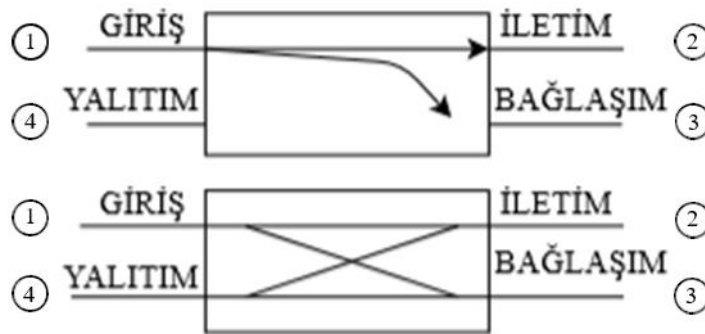
$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & j\beta & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & j\beta \\ j\beta & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & j\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2. *Asimetrik Bağlaştırmacı*:  $\theta = 0, \varphi = \pi$

$\beta$  değerinin faz katsayıları, birbirinden  $180^\circ$  ayrı olacak şekilde seçilmektedir. Bu seçimlere göre S-parametre matrisi, aşağıda verilen formu almaktadır.

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \beta & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & -\beta \\ \beta & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Şekil 2.2'de, iki farklı güç akışını gösteren yönlü bağlaştırmacı sembolleri verilmiştir. Bu sembollerde simgelenen güç akışından da takip edilebileceği gibi; kapı 1'den verilen güç, kapı 3'e bağlanmaktadır. Aynı zamanda kapı 1'den verilen güç, kapı 2'ye iletilmektedir. İdeal bir yönlü bağlaştırmacıda, kapı 1'den verilen güç kapı 4'e ulaşmamaktadır.



Şekil 2. 2 Yönlü Bağlaştırmacılar Güç Akışı Şematığı

Yönlü bağlaştıracının bu özelliklerine göre, dört farklı denklemle yönlü bağlaştıracılar karakterize edilebilmektedir:

$$\text{Bağlaşım: } 10 \log \frac{P_1}{P_3} = -20 \log |S_{13}| \quad (2.17)$$

$$\text{Yönlülük: } 10 \log \frac{P_3}{P_4} = 20 \log \frac{|S_{13}|}{|S_{14}|} \quad (2.18)$$

$$\text{Yalıtım: } 10 \log \frac{P_1}{P_4} = -20 \log |S_{14}| \quad (2.19)$$

$$\text{Araya Girme Kaybı: } 10 \log \frac{P_1}{P_2} = -20 \log |S_{12}| \quad (2.20)$$

Yukarıda verilen tanımlarda

$P_1$ : Kapı 1'den (giriş kapısı) verilen gücü,

$P_2$ : Kapı 2'de ölçülen gücü,

$P_3$ : Kapı 3'te ölçülen gücü,

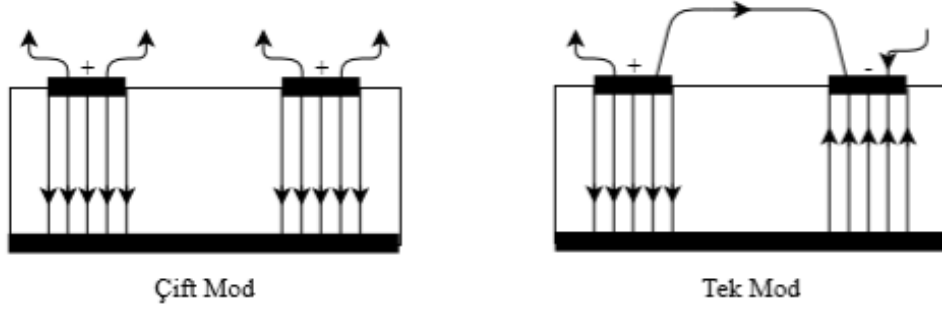
$P_4$ : Kapı 4'te ölçülen gücü ifade etmektedir.

Bu eşitliklere göre, giriş kapısından verilen gücün çıkış kapısına bağlaşım miktarı bağlaşım faktörünü ifade etmektedir. Yönlülük ise, bağlaşmış ve bağlaşmamış kapılar arasındaki yalıtımın belirlenmesinde kullanılan bir ölçüttür. Yalıtım ise, gücün bağlaşmamış kapıya hangi oranla gittiğini ifade etmektedir.

### 2.1.1 Yönlü Bağlaştıracılarda Çift ve Tek Mod Analizi

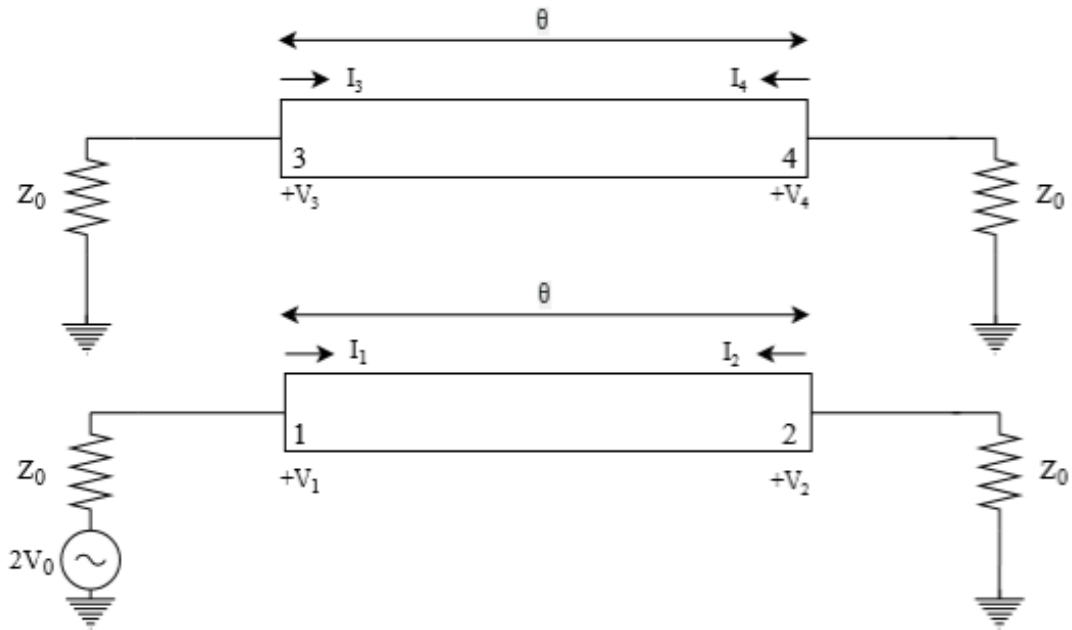
Paralel hatlara sahip bağlaştıracılar tek ve çift mod üzerinden analiz edilmektedirler. Bu analizde, hatların birbirinden bağımsız olarak iletim hattı yöntemleriyle analizini sağlama amaçlanmaktadır. Analiz sonucu çift mod ve tek mod empedansları ortaya çıkmakta ve bu empedanslar tasarım adımlarında etkin rol oynamaktadır. Yönlü bağlaştıracılarda da çift ve tek mod analizi yapılmaktadır.

Çift mod ve tek mod analizinde, üst üste bindirme (*superposition*) tekniği kullanılarak hatların ayrıştırılması sağlanmaktadır. Bu ayrıştırma, giriş kapısından verilen voltajın, çift mod ve tek mod voltajlarının toplamaları olacak şekilde ayrıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Şekil 2.3'te, hatların çift mod ve tek mod olarak uyarımı verilmiştir.



Şekil 2. 3 Çift ve Tek Mod Uyarımı

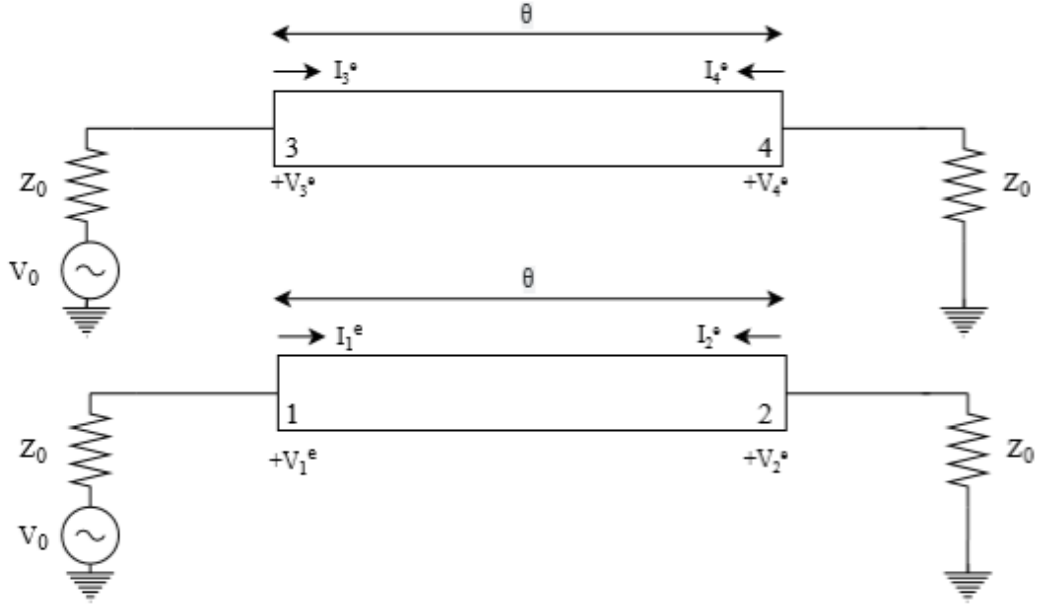
Şekil 2.4'te verilen şematikte, ayrılmamış bir bağlaştırmacı verilmiştir. Bu şematikte, kapı 2, kapı 3 ve kapı 4  $Z_0$  empedansı ile sonlandırılmış, giriş kapısı ise birim genlikte bir voltaj ile sürülmüştür. Şekil 2.5'te ve Şekil 2.6'da, üst üste bindirme tekniği kullanılarak ayrıştırılmış sırasıyla çift ve tek mod devreleri verilmektedir.



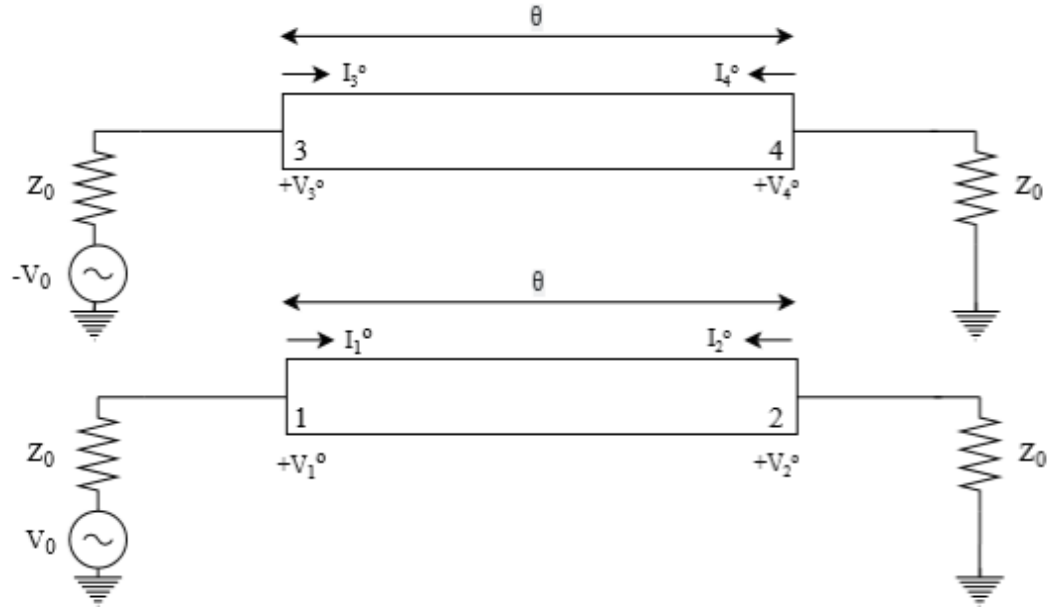
Şekil 2. 4 Bağlaştırmacı Şematığı

Şekil 2.5'te verilen şematığe göre, çift mod için bağlaştırmacıya ait kapı 1 ve kapı 3'e eşit genlikte gerilim uygulanmıştır. Bu sebeple hatların bağlaşımı gerçekleşmeyecek ve hatlar arasında manyetik bir duvar; yani açık devre oluşturacaktır. Şekil 2.6'da verilen şematikte, tek mod için ise bağlaştırmacıya ait kapı 1 ve kapı 3'e eşit genlikte; fakat zıt işaretli gerilim uygulanmıştır. Kapı 3'ten verilen gerilim, zıt işarete sahiptir. Zıt işaretli genliğe sahip gerilimlerden dolayı, iki hat arasında kısa devre oluşacaktır. Bu iki modun

analizinde, açık devre ve kapalı devre oluşması, hatların bağımsız analiz edilebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2. 5 Çift Mod Eşdeğer Devre Şematiği



Şekil 2. 6 Tek Mod Eşdeğer Devre Şematiği

Şemattikte görüldüğü gibi,

Çift mod için voltaj ve akım eşitlikleri:

$$I_1^e = I_3^e, I_4^e = I_2^e \quad (2.21)$$

$$V_1^e = V_3^e, V_4^e = V_2^e \quad (2.22)$$

Tek mod için voltaj ve akım eşitlikleri:

$$I_1^o = -I_3^o, I_4^o = -I_2^o \quad (2.23)$$

$$V_1^o = -V_3^o, V_4^o = -V_2^o \quad (2.24)$$

olacaktır.

Şekil 2.4'te verilen devrenin giriş empedansı

$$Z_g = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_1^e + V_1^o}{I_1^e + I_1^o} \quad (2.25)$$

eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Bu denklemden yola çıkarak, çift mod giriş empedansı  $Z_g^e$ , tek mod giriş empedansı  $Z_g^o$  için giriş empedans formülleri

$$Z_g^e = Z_{0e} \frac{Z_0 + jZ_{0e} \tan \theta}{Z_{0e} + jZ_0 \tan \theta} \quad (2.26)$$

$$Z_g^o = Z_{0o} \frac{Z_0 + jZ_{0o} \tan \theta}{Z_{0o} + jZ_0 \tan \theta} \quad (2.27)$$

kullanılmaktadır.  $\theta$  parametresi, devrenin elektriksel uzunluğunu ifade etmektedir.

Hatların bağımsız analiz edildiği düşünüldüğünde, çift ve tek mod analizinde, karakteristik empedansı  $Z_{0e}$  ve  $Z_{0o}$  olan ve  $Z_0$  empedansı ile sonlandırılan bir iletim hattına indirgenebilmektedir. Basit bir voltaj bölümü hesabı ile

$$V_1^o = V_0 \frac{Z_g^o}{Z_g^o + Z_0} \quad (2.28)$$

$$V_1^e = V_0 \frac{Z_g^e}{Z_g^e + Z_0} \quad (2.29)$$

voltaj değerleri, aynı şekilde de akım değerleri

$$I_1^o = \frac{V_0}{Z_g^o + Z_0} \quad (2.30)$$

$$I_1^e = \frac{V_0}{Z_g^e + Z_0} \quad (2.31)$$

elde edilmektedir.

Giriş empedansı hesaplamak için voltaj ve akım eşitlikleri (2.25)'e yerleştirilirse, giriş empedansı denklemi

$$Z_g = Z_0 + \frac{2(Z_g^o Z_g^e - Z_0^2)}{Z_g^e + Z_g^o + 2Z_0} \quad (2.32)$$

formuna indirgenmektedir. Eğer,

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}} \quad (2.33)$$

kullanılırsa, (2.26) ve (2.27)'de verilen çift ve tek mod giriş empedansları, aşağıda verilen eşitliklere dönüşmektedir.

$$Z_g^e = Z_{0e} \frac{\sqrt{Z_{0o}} + j\sqrt{Z_{0e}} \tan \theta}{\sqrt{Z_{0e}} + j\sqrt{Z_{0o}} \tan \theta} \quad (2.34)$$

$$Z_g^o = Z_{0o} \frac{\sqrt{Z_{0e}} + j\sqrt{Z_{0o}} \tan \theta}{\sqrt{Z_{0o}} + j\sqrt{Z_{0e}} \tan \theta} \quad (2.35)$$

Denklem (2.34) ve (2.35)'in birbiriyle çarpımında, (2.33) de ele alınarak

$$Z_g^e Z_g^o = Z_{0e} Z_{0o} = Z_0^2 \quad (2.36)$$

$$Z_g = Z_0 \quad (2.37)$$

eşitlikleri yazılabilmektedir. Burada, (2.37)'nin sağlandığı durumlarda, tüm kapıların eşlenmiş olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Üst üste bindime özelliği kullanılarak kapılar için gelen ve yansıyan dalgaların voltaj genliklerinin ifade edilmesi, Çizelge 2.1'de açıklanmaktadır [1]. Çizelgede yer alan ifadelerde  $\Gamma$  yansıma katsayısını,  $T$  ise iletim katsayısını temsil etmek için kullanılmıştır.

Çizelge 2.1 Çift Mod ve Tek Mod İçin Gelen Dalga ve Yansıyan Dalga Eşitlikleri

| Kapı   | Çift Mod         |                                  | Tek Mod           |                                  |
|--------|------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|
|        | Gelen Dalga      | Yansıyan Dalga                   | Gelen Dalga       | Yansıyan Dalga                   |
| Kapı 1 | $V_1^{e+} = V_0$ | $V_1^{e-} = \Gamma_1^e V_1^{e+}$ | $V_1^{o+} = V_0$  | $V_1^{o-} = \Gamma_1^o V_1^{o+}$ |
| Kapı 2 | $V_2^{e+} = 0$   | $V_2^{e-} = T_{23}^e V_2^{e+}$   | $V_2^{o+} = 0$    | $V_2^{o-} = T_{23}^o V_2^{o+}$   |
| Kapı 3 | $V_3^{e+} = V_0$ | $V_3^{e-} = \Gamma_3^e V_3^{e+}$ | $V_3^{o+} = -V_0$ | $V_3^{o-} = \Gamma_3^o V_3^{o+}$ |
| Kapı 4 | $V_4^{e+} = 0$   | $V_4^{e-} = T_{41}^e V_4^{e+}$   | $V_4^{o+} = 0$    | $V_4^{o-} = T_{41}^o V_4^{o+}$   |

Paralel bağlaşıklık hatlar olması ve birbirinden bağımsız olmaları sayesinde, bağlaşım gösteren hatlar simetrik fiziksel özellikler gösterecektir. Bu durumda

$$\Gamma_1^e = \Gamma_3^e, \Gamma_1^o = \Gamma_3^o$$

$$T_{23}^e = T_{41}^e, T_{23}^o = T_{41}^o$$

eşitlikleri geçerlidir. Çizelge 2.1'e göre, her kapı için gerilim değerleri aşağıda verilmiştir.

$$V_1^+ = V_1^{e+} + V_1^{o+} = 2V_0 \quad (2.38)$$

$$V_1^- = V_1^{e-} + V_1^{o-} = V_0(\Gamma_1^e + \Gamma_1^o) \quad (2.39)$$

$$V_2^+ = V_2^{e+} + V_2^{o+} = 0 \quad (2.40)$$

$$V_2^- = V_2^{e-} + V_2^{o-} = V_0(T_{23}^e - T_{23}^o) \quad (2.41)$$

$$V_3^+ = V_3^{e+} + V_3^{o+} = 0 \quad (2.42)$$

$$V_3^- = V_3^{e-} + V_3^{o-} = V_0(\Gamma_3^e - \Gamma_3^o) \quad (2.43)$$

$$V_4^+ = V_4^{e+} + V_4^{o+} = 0 \quad (2.44)$$

$$V_4^- = V_4^{e-} + V_4^{o-} = V_0(T_{41}^e + T_{41}^o) \quad (2.45)$$

Bu voltaj eşitliklerinden yola çıkılarak, ideal bir yönlü bağlaştırmacı ve kapılar arası özellikleri aşağıdaki maddelerde açıklanmıştır.

1. Kapı 1'den yansıyan güç sıfıra eşit olduğu için, kapı 1 tüm frekanslarda eşlenmiştir.
2. Kapı 2'den yansıyan güç sıfıra eşit olduğundan, kapı 2, kapı 1'den yalıtılmıştır.



3. Kapı 4'ten iletilen gücün tamamı geri yansıdığı için, kapı 4 yalıtım kapısıdır ve tüm frekanslarda diğer kapılardan yalıtılmıştır.

4. Bağlaşım, kapı 3'ten elde edilen voltaj değerinin kapı 1'deki voltaj değerine oranı olarak ifade edilebilmektedir.  $Z_g = Z_0$  eşitliğinin ve (2.33)'ün geçerli olduğu durumlarda  $V_3^-/V_1^+$  oranı, bağlaşımı ifade edecektir. (2.34) ile (2.35)'de verilen oranlardan, kapı 3'teki voltaj değeri aşağıdaki denklemle ifade edilebilmektedir.

$$V_3^- = V_0 \left[ \frac{Z_g^e}{Z_g^e + Z_0} - \frac{Z_g^o}{Z_g^o + Z_0} \right] \quad (2.46)$$

Bu eşitlikten (2.26) ve (2.27) aracılığı ile

$$V_3^- = V_0 \frac{j(Z_{0e} - Z_{0o}) \tan \theta}{2Z_0 + j(Z_{0e} + Z_{0o}) \tan \theta} \quad (2.47)$$

haline indirgenmektedir.

Merkez banttaki voltaj bağlaşım katsayısı C için

$$C = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \quad (2.48)$$

oranı yazılırsa, kapı 3 için voltaj değeri

$$V_3^- = V_0 \frac{jC \tan \theta}{\sqrt{1 - C^2} + j \tan \theta} \quad (2.49)$$

olarak ifade edilebilecektir.

Benzer şekilde, kapı 2 için voltaj değeri aşağıdaki gibi yazılacaktır.

$$V_2^- = V_0 \frac{\sqrt{1 - C^2}}{\sqrt{1 - C^2} \cos \theta + j \sin \theta} \quad (2.50)$$

Bu eşitlikler aracılığıyla, hatların elektriksel uzunluk parametresi  $\theta$  ile hatların bağlaşım ve iletim değerleri belirlenebilir.

Voltaj bağlaşım katsayısı C aracılığı ile de çift ve tek mod empedansları, aşağıda verilen denklemler ile elde edilebilmektedir.

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1 + C}{1 - C}} \quad (2.51)$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1-C}{1+C}} \quad (2.52)$$

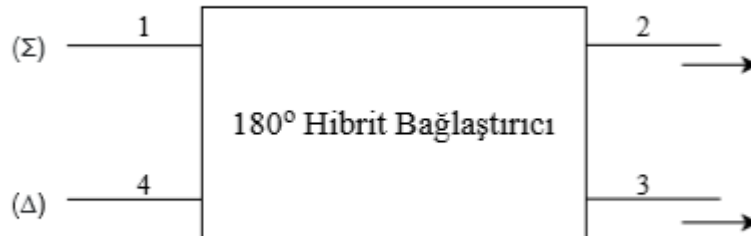
Böylece, hedeflenen bağlaşım değeri ile çift ve tek mod empedans hesaplamaları verilen bu eşitlikler ile sağlanmaktadır.

S-parametre matrisi, verilen tüm yansıyan ve gelen dalga değerlerinin oranıyla elde edilebilmekte, böylece tüm devrenin karakteristiğinin, çift mod ve tek mod analizi ile elde edilebileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Yönlü bağlaştırmacıların güç bölme, bağlaşım, üretim teknolojisi vb gibi kıstaslara göre özelleşmiş halleri bulunmaktadır. Bunlardan biri, çıkış kapılarında eşit güç bölümü görülen ve giriş ve yalıtım kapılarının giriş kapısı, iletim ve bağlaşım kapılarının da çıkış kapıları olarak (veya tam tersi konfigürasyon) kullanıldığı hibrit bağlaştırmacılarıdır. Hibrit bağlaştırmacılar, simetrik veya asimetrik olarak tasarlanabilirler. Buna göre, çıkış kapılarının saçılım parametreleri arasındaki faz katsayıları farkı 90° veya 180° olarak seçilmektedir.

## 2.2 180° Hibrit Bağlaştırmacılar

Hibrit bağlaştırmacılar, yönlü bağlaştırmacıların özelleşmiş bir biçimidir. Hibrit bağlaştırmacılar, bağlaşım faktörü 3 dB'ye eşittir. İki çeşit hibrit bağlaştırmacı bulunmaktadır: 90° hibrit bağlaştırmacı ve 180° hibrit bağlaştırmacı. 90° hibrit bağlaştırmacılar, simetrik bağlaştırmacı sınıfında yer almaktadırlar. Kapı 1'den uyarıldığında çıkış kapıları arasındaki faz farkı, 90°'ye eşittir. 180° hibrit bağlaştırmacılar, kapı 4'ten uyarıldığında, iki çıkış kapısı arasında 180° faz farkı bulunan bağlaştırmacılarıdır (Bkz. Şekil 2.7). Bu nedenle asimetrik bağlaştırmacı sınıfında yer almaktadır.



Şekil 2. 7 180 Hibrit Bağlaştırmacı Şematiği

Güç bölücü olarak kullanıldığında, kapı 1'den uygulanan işaret kapı 2 ve kapı 3'te eş faz ve yarı güce düşmüş olarak elde edilecek ve kapı 4 ise yalıtılmış olacaktır. Kapı 4'ten uygulanan işaret ise kapı 2 ve kapı 3'te yarı güce düşmüş ve zıt faz olarak edilecek; bu kez de kapı 1 yalıtılmış olacaktır.

Bu yapı bir güç birleştirici olarak kullanılmak istendiğinde kapı 2 ve kapı 3'ten verilen işaretlerin toplamı kapı 1'de, farkları ise kapı 4'te elde edilmiş olacaktır. Bu sebeple, kapı 1 toplam kapısı, kapı 4 ise fark kapısı olarak isimlendirilir.

İdeal bir 180° hibrit bağlaştırmacının S-parametre matrisi, aşağıda verilmiştir [1].

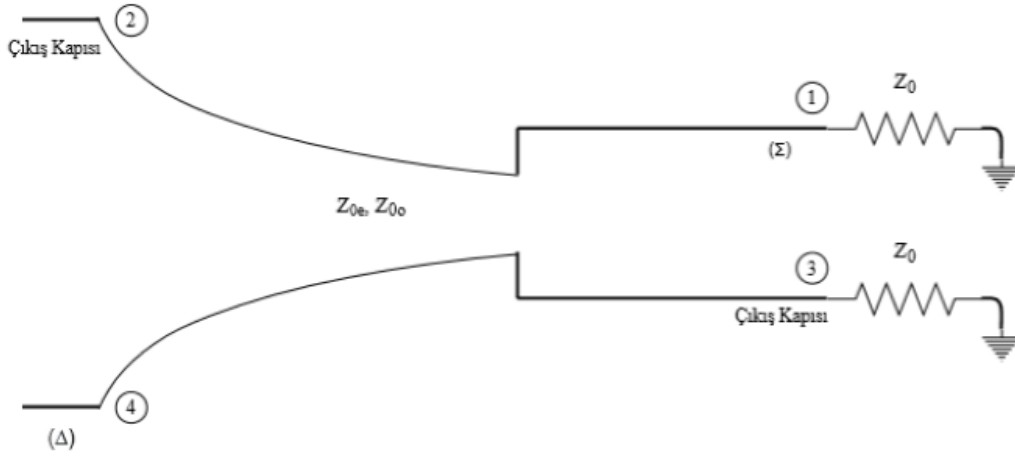
$$[S] = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Verilen S-parametre matrisinden de yapının simetrik olduğu doğrulanmaktadır.

Yapılan araştırmaların sonucunda, beklenen kıstasları karşılayıp geniş bant performansının elde edilebildiği 180° hibrit bağlaştırmacılar, konik bağlaşık hat (*tapered coupled line*) hibrit bağlaştırmacılarıdır. Takip eden başlıkta, konik bağlaşık hat bağlaştırmacı teorisi anlatılacaktır.

### 2.2.1 Konik Bağlaşık Hat Bağlaştırmacı

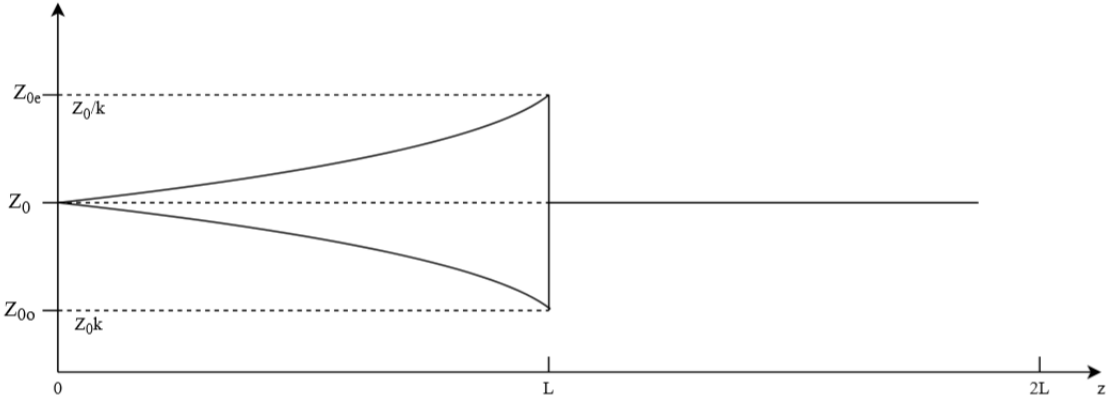
Konik bağlaşık hat bağlaştırmacılarında, herhangi bir güç bölüm değeri 1:10 ve daha fazla orana sahip bant genişliklerinde sağlanabilmektedir. Şekil 2.8'de, bir konik bağlaşık hat bağlaştırmacısı şekli verilmiştir. Yönlü bağlaştırmacılarda olduğu gibi, bağlaştırmacının karakteristiğini ve S-parametre matrisini belirleyebilmek amacıyla yapının çift ve tek mod analizi yapılacaktır.



Şekil 2. 8 Asimetrik Konik Bağlaşık Hat Bağlaştırmacı Şematifi

### 2.2.1.1 Konik Bağlaşık Hatlarda Çift ve Tek Mod Analizi

Şekil 2.9’de, konik bağlaşık hattın karakteristik empedansının hattın uzunluğu boyunca uğradığı değişim grafiği gösterilmektedir.



Şekil 2. 9 Konik Hattın Uzunluğuna Göre Karakteristik Empedans Değişimi

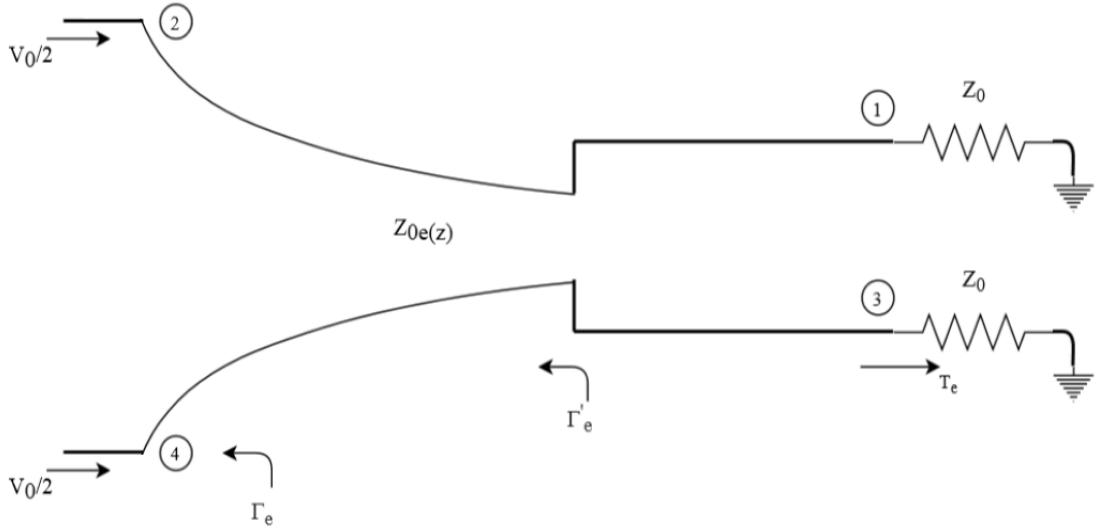
Şekil 2.9’den yola çıkılarak, hat boyunca karakteristik empedansın uğradığı değişimler aşağıda listelenmiştir [3].

- $z = 0$  noktasında iki hat arasında oldukça zayıf bir bağlaşım bulunmaktadır. Burada,  $Z_{0e}(0) = Z_{0o}(0) = Z_0$  eşitliği geçerli olmaktadır.
- $0 < z < L$  aralığında ise bu iki hat arasında konik karakteristik mevcuttur.

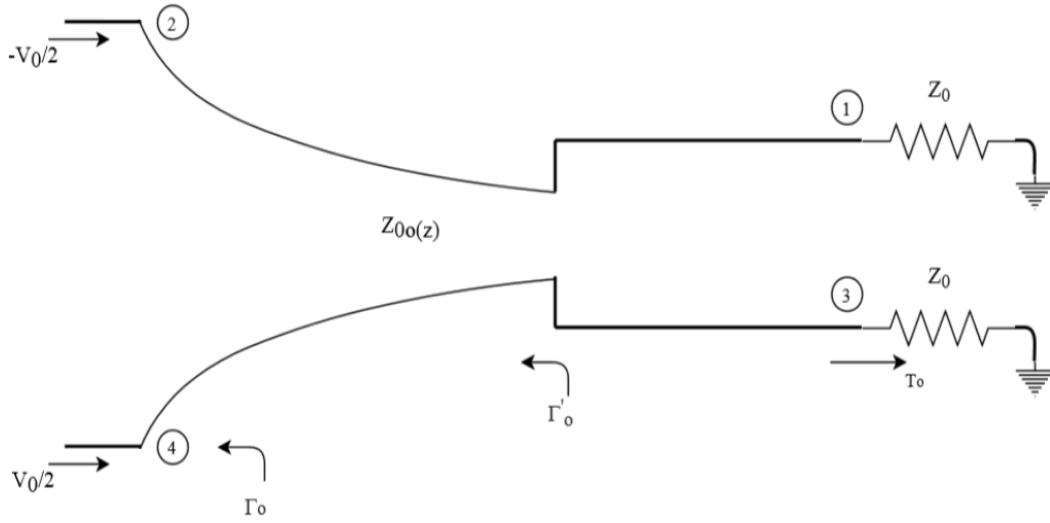
- $z = L$  noktasında ise, iki hat arasında kuvvetli bağlaşım bulunmaktadır. Burada çift ve tek mod empedansları  $Z_{0e}(L) = Z_0/k$ ,  $Z_{0o}(L) = kZ_0$  olarak ifade edilmektedir. Eşitlikte geçen  $k$  katsayısı, bağlaşım katsayısı ile ilişkili olan bir ifadedir ve  $0 \leq k \leq 1$  aralığında bulunmaktadır. Parametre  $k$  için bahsedilen bağlaşım katsayısı, güç bağlaşımından ziyade, voltaj bağlaşımını ifade etmektedir.

Grafik boyunca Eşitlik (2.33) geçerlidir.

Konik bağlaşık hat bağlaştırmacılar, üst üste bindirme özelliği kullanılarak çift ve tek modlarının toplamı şeklinde ifade edilebilmektedirler. Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de, yapının çift ve tek mod uyarımı verilmektedir.



Şekil 2. 10 Konik Bağlaşık Hat Bağlaştırmacıda Çift Mod Uyarımı



Şekil 2. 11 Konik Bağlaşık Hat Bağlaştırmada Tek Mod Uyarımı

Burada, genliği  $V_0$  olan bir gelen dalganın kapı 4'e uygulandığı düşünülmüştür. Bağlaşık ve bağlaşık olmayan hatların kesiştiği L noktasında, konik hattın çift ve tek mod için yansıma katsayıları aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

Çift ve tek mod yansıma katsayıları sırasıyla

$$\Gamma'_e = \frac{Z_0 - Z_0/k}{Z_0 + Z_0/k} = \frac{k - 1}{k + 1} \quad (2.54)$$

$$\Gamma'_o = \frac{Z_0 - kZ_0}{Z_0 + kZ_0} = \frac{1 - k}{1 + k} \quad (2.55)$$

eşitlikleriyle ifade edilmektedir.

Bağlaşımın olmadığı,  $z = 0$  konumunda çift ve tek mod yansıma katsayıları sırasıyla

$$\Gamma_e = \frac{k - 1}{k + 1} e^{-2j\theta} \quad (2.56)$$

$$\Gamma_o = \frac{1 - k}{1 + k} e^{-2j\theta} \quad (2.57)$$

hallerini almaktadır.

Üst üste bindirme özelliğinden faydalanılarak kapı 2 ve kapı 4 için S-parametreleri

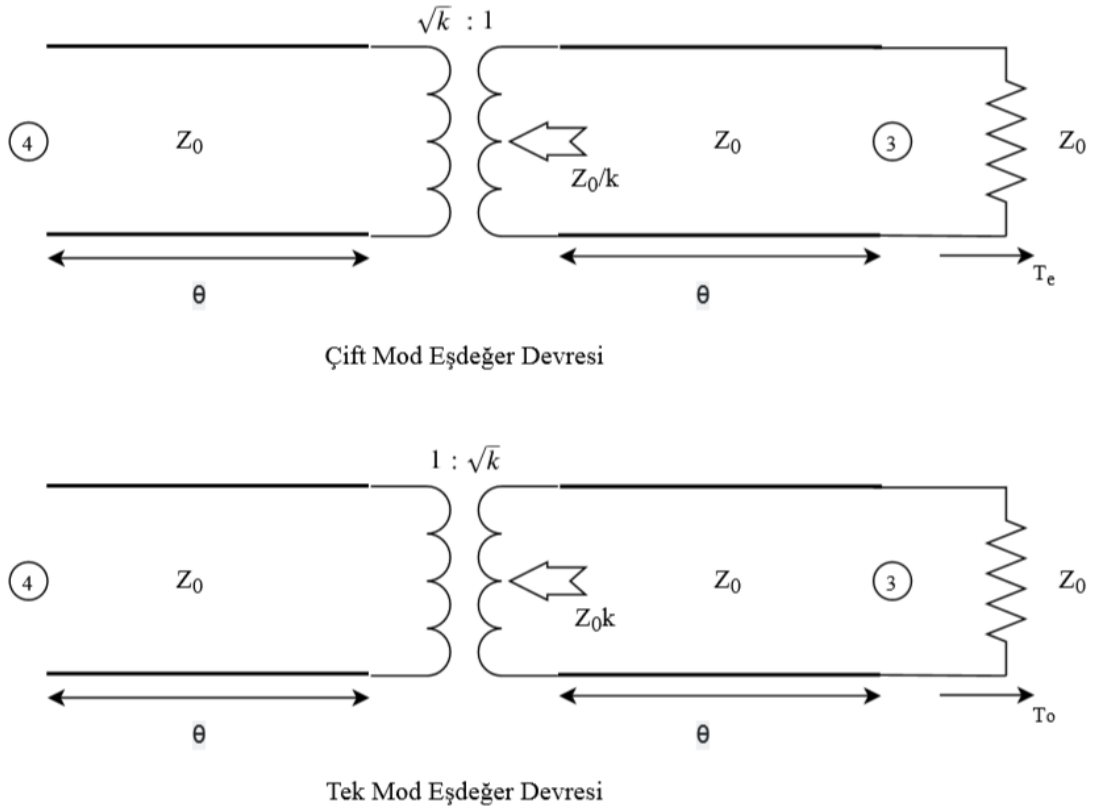
$$S_{44} = \frac{1}{2}(\Gamma_e + \Gamma_o) = 0 \quad (2.58)$$

$$S_{24} = \frac{1}{2}(\Gamma_e - \Gamma_o) = \frac{k-1}{k+1}e^{-2j\theta} \quad (2.59)$$

olarak bulunmaktadır. Burada  $\theta$ , yapının elektriksel uzunluğunu ifade etmektedir.

Yapının simetrik ve karşılıklı olması özelliği kullanılarak  $S_{44} = S_{22} = 0$ ,  $S_{24} = S_{42}$  eşitlikleri de yazılabilmektedir.

Kapı 1 ve Kapı 3 aracılığıyla iletim katsayılarını elde edebilmek için ABCD parametreleri kullanılmaktadır. Bu çıkarımda, Şekil 2.12’de verilen sırasıyla çift mod ve tek mod durumları için eşdeğer devrenin analizi yapılmıştır.



Şekil 2. 12 Çift ve Tek Mod Eşdeğer Devresi

Bu devrede, eşlemelerin olduğu bölgeler ideal olarak kabul edilmiş ve bu bölgeler trafolar yerleştirilerek sembolize edilmiştir. Şekilde, art arda iletim hattı – trafo – iletim hattı bağlantısını ifade eden ABCD matrisi, her üç bileşenin ayrı ayrı ABCD matrislerinin çarpımıyla elde edilebilecektir. İdeal durumda, iletim hatlarının kayıpsız olacağı ve yalnızca dalganın fazını etkileyeceği göz önüne alındığında, yalnızca

trafonun ABCD matrisinin kullanılması analizi kolaylaştıracaktır. Bu çıkarımlar doğrultusunda, trafonun sırasıyla çift mod ve tek mod için ABCD matrisleri

$$[ABCD]_e = \begin{bmatrix} \sqrt{k} & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{k} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

$$[ABCD]_o = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{k} & 0 \\ 0 & \sqrt{k} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

olarak belirlenmiştir.

Ardından, çift ve tek mod için iletim katsayılarını belirlemek için

$$T = \frac{2}{(A + B/Z_0 + CZ_0 + D)} \quad (2.62)$$

denklemini kullanarak

$$T_e = T_o = \frac{2\sqrt{k}}{k+1} e^{-2j\theta} \quad (2.63)$$

çift ve tek mod iletim katsayıları belirlenmektedir. İletim katsayıları aracılığıyla kapı 1 ve kapı 3 için elde edilen S-parametreleri aşağıda verilmektedir.

$$S_{34} = \frac{1}{2} (T_e + T_o) = \frac{2\sqrt{k}}{k+1} e^{-2j\theta} \quad (2.64)$$

$$S_{14} = \frac{1}{2} (T_e - T_o) = 0 \quad (2.65)$$

Benzer bir yöntemle, kapı 1'e,  $V_0$  genliğinde bir dalga uygulandığında, üst üste bindirme yönteminden faydalananarak kapı 1 ve kapı 3 için yansıma katsayıları elde edilebilmektedir. Buna göre, kapı 1 ve kapı 3'e çift ve tek mod uyarımı uygulandığında, sırasıyla çift ve tek mod yansıma katsayıları aşağıda verildiği gibi olacaktır.

$$\Gamma_e = \frac{1-k}{1+k} e^{-2j\theta} \quad (2.66)$$

$$\Gamma_o = \frac{k-1}{k+1} e^{-2j\theta} \quad (2.67)$$

Bu eşitlikler kullanılarak S-parametreleri çıkarımı yapılacak olursa



$$S_{11} = \frac{1}{2}(\Gamma_e + \Gamma_o) = 0 \quad (2.68)$$

$$S_{31} = \frac{1}{2}(\Gamma_e - \Gamma_o) = \frac{1-k}{1+k} e^{-2j\theta} \quad (2.69)$$

sonuçları gözlemlenecektir. Yeniden, yapının simetrik ve karşılıklı olma özelliği kullanılacak olursa  $S_{33} = 0, S_{31} = S_{13}, S_{14} = S_{32}, S_{12} = S_{34}$  çıkarımları yapılabilir.

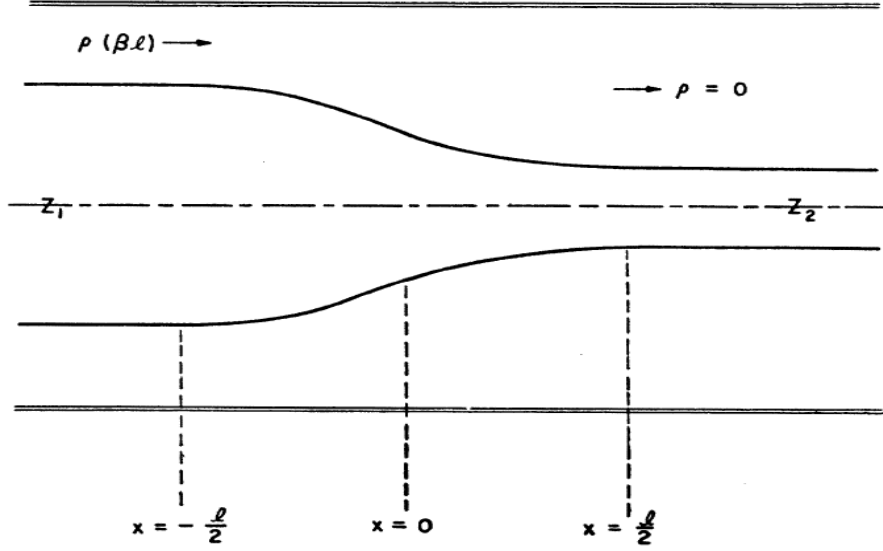
Analiz sonucunda elde edilen S-parametre matrisi aşağıda verilmiştir.

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \beta & \alpha & 0 \\ \beta & 0 & 0 & -\alpha \\ \alpha & 0 & 0 & \beta \\ 0 & -\alpha & \beta & 0 \end{bmatrix} e^{-2j\theta} \quad (2.70)$$

Matrisin yazımı kolaylığı amacıyla  $\alpha = |S_{24}|, \beta = |S_{34}|$  değerlerini ifade etmektedir.

#### 2.2.1.2 Konik Bağlaışık Hatlarda Eşleme

S-parametre analizlerinden anlaşılacağı üzere, yapının bağlaışım performansı  $k$  parametresi ile doğrudan ilişkiliyken, bant genişliği performansı ise konik hatların ne kadar eşlenmiş olduğuyula doğrudan ilişkilidir. İdeal durumda, tüm bant boyunca iletim noktasından yansıyan tüm sinyaller bağlaışım kapısında toplanacaktır. Pratik durumda ise, yansıma katsayısındaki dalgalanmalar olmadan tüm bant boyunca eşlenmiş bir devreyi gerçekleyebilmek mümkün değildir. Geniş bir bant boyunca eşleme yapabilmek için doğrusal konik, eksponansiyel konik, üçgensel konik ve Klopfenstein koniği gibi eşleme yapıları kullanılmaktadır. Bu konik yapının seçimi, yapının uygulanma kolaylığı ve empedanslar arasındaki geçişteki dalgalanmaların minimum olması dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu ölçütlere göre en uygun seçim, Klopfenstein konik hattıdır.



Şekil 2. 13 Klopfenstein Koniği Eşleme Çizgesi [7]

Klopfenstein koniği, yüksek frekans geçirgenliğine sahip, empedans dönüştürücü görevi gören bir yapıdır. Bu yapı, bant boyunca düşük dalgacıklara sahip bir yansıma katsayısı elde etmeyi sağlamaktadır. Yüksek frekans geçirgenliğine sahip olduğu için, hattın dalga boyu cinsinden uzunluğu ile istenen düşük frekansa eşleme yapılması sağlanabilmektedir [2]. Diğer yapılara kıyasla, minimum dalgacıkları mümkün olan minimum konik hat uzunluğuyla sağlayabilmektedir.

Klopfenstein koniği, Bessel fonksiyonlarının da bulunduğu bir dizi karmaşık denklemler içeren bir hesaplama sahiptir. Bu hesaplamalarda, karakteristik empedansın reel sayı ve frekanstan bağımsız olduğu kabul edilmektedir.

Maksimum bant genişliğinde sabit bir yansıma katsayısı için konik hat

$$\rho e^{j\beta l} = \rho_0 \frac{\cos[\sqrt{(\beta l)^2 - A^2}]}{\cosh A} \quad (2.71)$$

formuna dönüşmektedir. Bu, konik hattaki yansıma katsayısının ulaşabileceği limiti vermektedir [7]. Bu eşitlikteki  $l$ , konik hattın uzunluğunu,  $A$  parametresi ise  $\beta l \geq A$  eşitliğini sağlayan tüm frekanslarını kapsayan geçirgen banttaki maksimum yansıma katsayısı genliğini ifade etmektedir. Yansıma katsayısının genliği, sıfır frekansta (yani geçirgen banttaki en küçük frekans) maksimum  $|\rho_0|$  değerini almaktadır ve  $\rho_0/\cosh A$  genliğinde dalgalanma göstermektedir.

Bu yansıma katsayısı çıkarımının tersinin alınması düşünüldüğünde, Fourier dönüşümü ve Bessel fonksiyonlarının da içerisinde bulunduğu bir karakteristik empedans varyasyonu

$$\ln(Z_0) = \begin{cases} \frac{1}{2} \ln\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right) + \frac{\rho_0}{\cosh A} \left\{ A^2 \varphi\left(\frac{2x}{l}\right) + U\left(x - \frac{l}{2}\right) + U\left(x + \frac{l}{2}\right) \right\}, & |x| \leq l/2 \\ \ln Z_2, & x > l/2 \\ \ln Z_1, & x < l/2 \end{cases} \quad (2.72)$$

parçalı fonksiyonlarıyla ifade edilmektedir. Burada U, birim adım fonksiyonu

$$\begin{aligned} U(z) &= 0, z < 0 \\ U(z) &= 1, z \geq 0 \end{aligned} \quad (2.73)$$

$\varphi$  fonksiyonu

$$\varphi(z, A) = -\varphi(-z, A) = \int_0^z \frac{I_1(A\sqrt{1-y^2})}{A\sqrt{1-y^2}} dy, |z| \leq 1 \quad (2.74)$$

olarak tanımlanmaktadır.  $I_1$ , birinci tür birinci dereceden modifiye Bessel fonksiyonudur. Bu denklemlerde,  $Z_2$  ve  $Z_1$  uyumlandırma yapılacak empedans değerleri,  $\rho_0$  bu empedans değerlerinden elde edilen yansıma katsayısı değerini,  $A$  ise geçirgen banttaki elde edilebilir maksimum yansıma katsayısı büyüklüğü ele alınarak seçilen parametrelerdir. Maksimum yansıma katsayısı değeri  $\rho_0$  değerine yakınsadıkça,  $A$  parametresi sıfıra yakınsar ve böylece sıfırdan sonsuz frekansa tüm frekansları kapsayan bir bant genişliğinde çalışabildiği sonucu elde edilmektedir. Bu da, Klopfenstein konik hattının klasik bir çeyrek dalga dönüştürücüye dönüştüğü söylenebilmektedir.

$\varphi$  fonksiyonu, belli özel değerleri haricinde kapalı formda ifade edilemediğinden, tümlşik sonuçları hesaplatılmış ve tablo halinde elde edilerek hesaplamalara dahil edilmiştir. Bahsedilen bu özel değerler, parametre kümesinin başlangıç ve bitiş değerleridir ve bu değerler ile  $\varphi$  fonksiyonu

$$\begin{aligned} \varphi(0, A) &= 0 \\ \varphi(z, 0) &= z/2 \\ \varphi(1, A) &= \frac{\cosh A - 1}{A^2} \end{aligned}$$

değerlerine sahiptir.

En basit ve doğal haliyle  $\rho_0$  parametresi

$$\rho_0 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.75)$$

oranıyla hesaplanmaktadır. Fakat Eşitlik (2.72) incelendiğinde, konik hat için uygun eşleme sonuçları veremeyecek bir değer olacaktır. Klopfenstein, yaptığı matematiksel dönüşümlerin ardından başlangıç yansıma katsayısı değerini

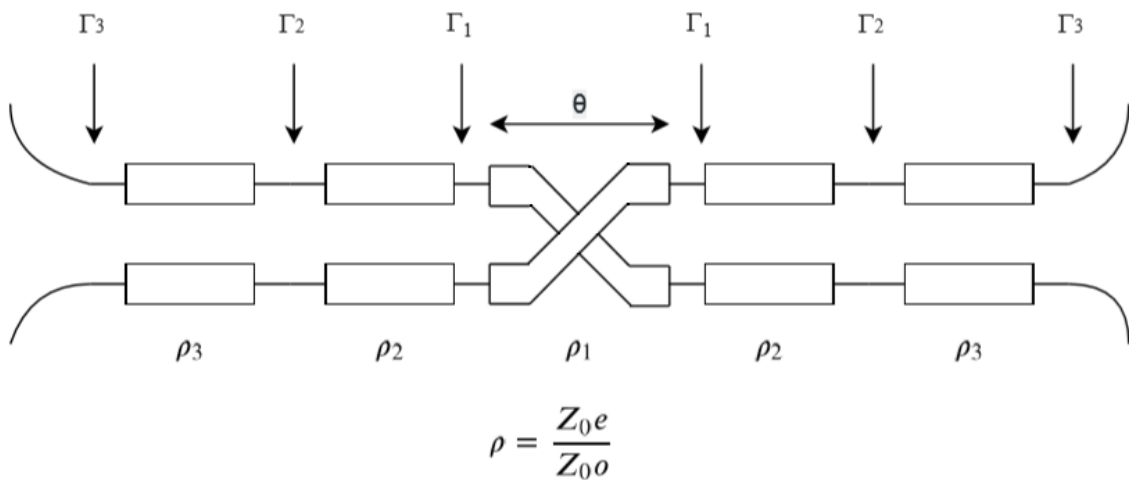
$$\rho_0 = \frac{1}{2} \ln(Z_2/Z_1) \quad (2.76)$$

formülüne indirgemıştır [8]. Eğer  $Z_1$  ve  $Z_2$  değerleri birbirine yakın empedans değerleri ise, iki fonksiyon da başlangıç yansıma katsayısı değerini elde etmek için kullanılabilir.

Konik bağlaşık hatlardaki empedans eşlemesi,  $Z_{0e}$  ve  $Z_0$  değerleri aralarında olacağından; bağlaşım katsayısı ile hangi değerler arasında olacağı belirlenmektedir [3].

### 2.2.1.3 Çok Kısımlı Bağlaştırmacı Teorisi

Yönlü ve hibrit bağlaştırmacılarda, geniş bant performansının sağlanabilmesi için genellikle çok kısımlı bağlaştırmacı yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, birden fazla bağlaşım kısmı art arda eklenerek geniş bantlı yapı gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.14'te, çok kısımlı bağlaştırmacıya örnek bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 14 Çok Kısımlı Bağlaştırmacı Gösterimi

Çok kısımlı bağlaştırmacı yönteminde, daha önce de bahsedildiği gibi, eklenen her kısmın karakteristik empedans değerinin dizilimine göre bağlaştırmacılar simetrik veya asimetrik olarak sınıflandırılmaktadır. Simetrik olan bağlaştırmacılarda, çıkış kapıları arasındaki faz farkı  $90^\circ$ 'ye eşittir. Eğer çıkış kapıları arasındaki faz farkı değeri  $180^\circ$ 'ye eşit ise, bu bağlaştırmacı asimetrik olarak isimlendirilmektedir [8]. Bu tez çalışmasında, asimetrik bağlaştırmacı yapısı çalışılmıştır.

Çok kısımlı bağlaştırmacılarda, her bir kısım merkez frekansa karşılık gelen dalga boyunun dörtte biri uzunluğundadır. Bahsedilen uzunluktaki kısımların sentezlenmesiyle, geniş bantta performans gösteren bir bağlaştırmacı elde edilebilmektedir.

Çok kısımlı bağlaştırmacıların sentezlenebilmesi için uygun bir polinom ile çift ve tek mod yansıma katsayılarının her bir kısma dağıtılmış olması gerekmektedir [9]. Eğer kısım  $j$  için çift ve tek mod empedans oranı  $\rho_j = Z_{0ej}/Z_{0oj}$  olarak yazılırsa,  $j$  ve  $j+1$  arasında yer alan eklem bölgesi için çift mod yansıma katsayısı

$$\Gamma_j = \frac{\sqrt{\rho_{j+1}} - \sqrt{\rho_j}}{\sqrt{\rho_{j+1}} + \sqrt{\rho_j}} = \frac{Z_{0ej+1} - Z_{0ej}}{Z_{0ej+1} + Z_{0ej}} \quad (2.77)$$

olarak yazılacaktır. Bu durumda, simetrik olan tüm kısımlar için bu denklemler yazılırsa

$$\Gamma_1 e^{j\theta} - \Gamma_1 e^{-j\theta} = 2j\Gamma_1 \sin \theta \quad (2.78)$$

eşitliğine varılacaktır. Burada  $\Gamma_1$  merkez kısmı,  $\theta$  ise elektriksel uzunluğu ifade etmektedir. Bu yöntemle, çok kısımlı bir bağlaştırmacının bütünü için bir yansıma katsayısı serisi

$$\Gamma(\theta) = 2j[\Gamma_1 \sin \theta + \Gamma_2 \sin 3\theta + \Gamma_3 \sin 5\theta + \dots] \quad (2.78)$$

olarak elde edilecektir [9]. Bu seriden görüldüğü üzere, bağlaşım tek sinüs harmonikleri serisi olarak ifade edilmektedir.

Bu yöntemde, bağlaşımın olduğu bölge çift mod açık devre, tek mod ise kısa devre olacak şekilde sonlandırılmıştır. Böylece, mod empedansları zıt işaretlere sahip olacak ve yine her kısımda  $Z_{0e}Z_{0o} = Z_0^2$  eşitliği korunduğundan bağlaştırmacı kısımları her frekansta yalıtılmış olduğu doğrulanacaktır.

#### 2.2.1.4 Peşpeşe (Tandem) Bağlantı Yöntemi

Çok kısımlı bağlaştırmacı yöntemindeki bir dezavantaj, bant boyunca yüksek bağlaşım değerini sağlayan bir yapının pratik olarak gerçekleştirilmesinin mümkün olmayışıdır. İstenen geniş bant boyunca yüksek bağlaşım değerini pratik olarak gerçekleştirebilmeyi sağlayacak bir yöntem, bağlaşımı parçalara bölmektir. Parçalara ayrılmış bağlaşım kısımlarının peşpeşe bağlantı yöntemiyle sentezlenmesi sayesinde istenilen bağlaşım değeri elde edilebilmektedir. Bağlaşım değerine denk gelen sinüs açısının belirli oranda bölünmesiyle, kaç kısımlı bir peşpeşe bağlantı yapılacağı da belirlenebilecektir [8].

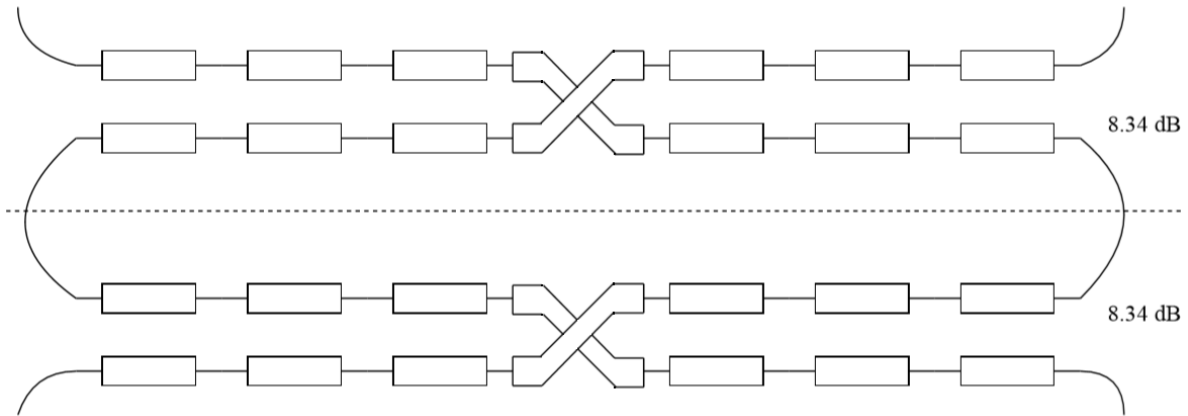
Örneğin, 3 dB bağlaşım değerinin gerçekleştirilmek istediği bir devrede, bu bağlaşım değerine karşılık gelen sinüs açısı

$$-3 \text{ dB} = 20 \log(\sin \alpha) \rightarrow \alpha = \pi/4$$

olacaktır. Burada, bağlaşım iki parçaya bölünerek tek peş peşe bağlantıyla bağlaşım değeri gerçekleştirilebilecektir. Bölünmüş bağlaşım değeri,  $\sin \alpha/2$  olacaktır. Buradan

$$20 \log(\sin \alpha / 2) = -8.34 \text{ dB}$$

değerine eşit olacaktır. Geniş bant performansında 3 dB'lik bir güç bölüm oranı, iki adet 8.34 dB'lik bağlaşım değerine sahip iki bağlaştırmacı peş peşe bağlantıyla birleştirilerek elde edilebilmektedir. Şekil 2.15'te, örnek bir peş peşe bağlantı gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 15 Peşpeşe (Tandem) Bağlantı Gösterimi

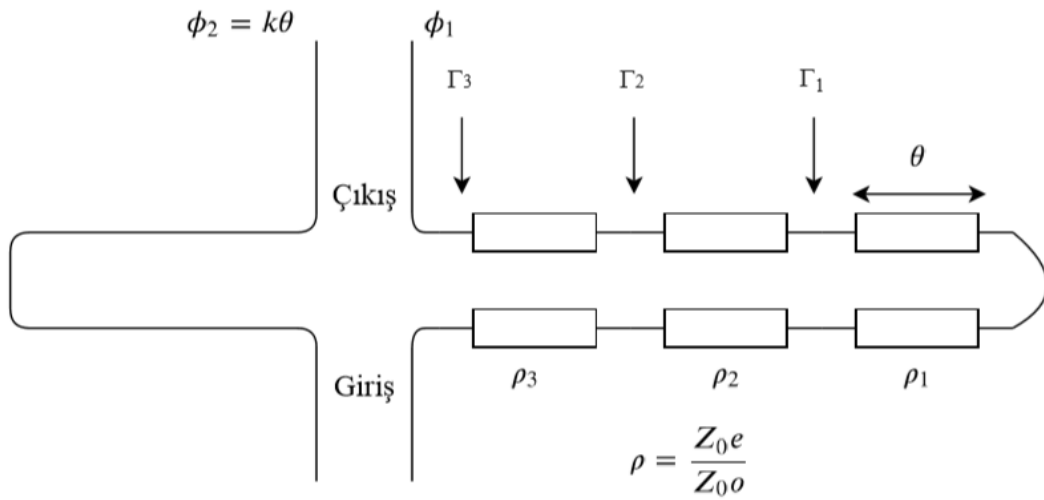
Peşpeşe bağlantı, bir bağlaştırmacının bağlaşım ve doğrudan kapısı, diğer bağlaştırmacının sırasıyla yalıtım ve giriş kapılarına bağlanarak gerçekleştirilmektedir.

### 2.2.2 Çok Kısımlı Faz Kaydırıcılar

Geniş bant boyunca faz kaydırma yöntemi, çok kısımlı bağlaştırmacı yöntemi, çok kısımlı bağlaştırmacı yöntemine oldukça benzemektedir. Bölüm 2.2.1.3'te bahsedilen yansıma katsayılarının oluşturduğu seri, faz kaydırıcılar için aşağıdaki formu almaktadır [9].

$$\Gamma(\theta) = \Gamma_{1,2} \sin 2\theta + \Gamma_{2,3} \sin 4\theta + \dots \quad (2.79)$$

Yukarıdaki eşitlikte görülebileceği gibi, faz kaydırıcı tepkisi çift sinüs harmoniklerin toplam serisine eşittir. Şekil 2.16'da yukarıda verilen eşitlik için çok kısımlı faz kaydırıcı geometrisi verilmiştir.



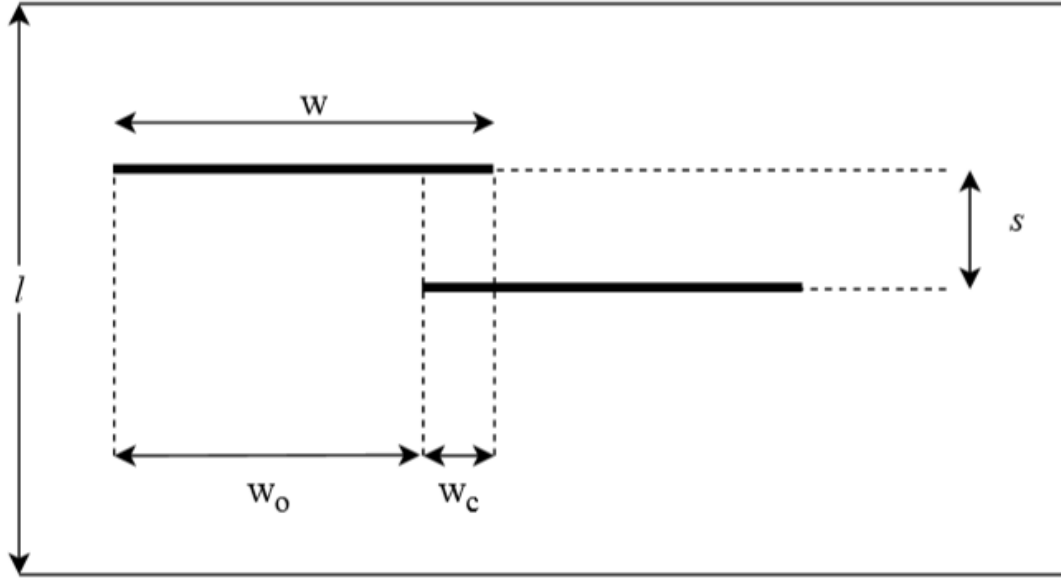
Şekil 2. 16 Çok Kısımlı Faz Kaydırıcı Geometrisi

### 2.2.3 Ofset Paralel Bağlaştık Şerit Hat Yapısı

Geniş bantta performans gösteren bağlaştık hatların olduğu yapılarda, kullanılan yapının mikro şerit veya şerit hat olmasına göre bağlaştım katsayılarında birtakım sınırlamalar olmaktadır. Özellikle kuvvetli bağlaştımın istendiği yapılarda bağlaştım değeri oldukça sınırlandırıldığından, bu bağlaştım değeri mikro şerit veya şerit hat olarak gerçekleştirilmesi mümkün olmayacaktır [8].

Şerit hat yapılarında, yapı içerisindeki katman sayısı artırılarak bağlaştım değerinin limitleri esnetilebilmektedir. Üçlü şerit hat yapılarında, bağlaştım ve yansıma katsayıları arasındaki fark bant boyunca küçük değişimlere uğramaktadır. Böylece, kuvvetli bağlaştım performansı küçük dalgalanmalarla bant boyunca sağlanabilmektedir. Ayrıca konik bağlaştık hat bağlaştırmacılarda, çapraz geçiş (crossover) yapısı bulunduğu için, üçlü

şerit hat yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu üçlü şerit hat yapısı, ofset paralel bağlaşık şerit hat yapısı ismini almaktadır. Üç katman ile sandviçe benzer bir yapı oluşturulmaktadır. Şekil 2.17’de, yapının yan kesiti verilmiştir. Her bir dielektrik katmanın kalınlıkları değiştirilmeden şeritler arasındaki ofset değerleri ile bağlaşım oranında değişimler gözlenebilmektedir.



Şekil 2. 17 Ofset Paralel Bağlaşık Şerit Hat Yapısının Yan Kesiti

Bu yapıda, sıkı bağlaşım ve zayıf bağlaşım için belirli çıkarımlar yapılarak çalışma prensibi açıklanmaktadır. Tasarım formülleri, zayıf bağlaşım ve sıkı bağlaşım için ayrı ayrı analiz edilmiştir.

Zayıf bağlaşım analizi için sırasıyla kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir [8].

$$C_o = \frac{120\pi\sqrt{\rho}}{\sqrt{\epsilon_r} Z_0} \quad (2.80)$$

$$\Delta C = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} Z_0} \frac{\rho - 1}{\sqrt{\rho}} \quad (2.81)$$

$$k = \frac{1}{e^{\frac{\pi\Delta C}{2}} - 1} \quad (2.82)$$



$$a = \sqrt{\left(\frac{s-k}{s+1}\right)^2 + k} - \left(\frac{s-k}{s+1}\right) \quad (2.83)$$

$$q = \frac{k}{a} \left[ \text{veya } q = \left(\frac{s+1}{2}\right) \left(\frac{a + \frac{2s}{s+1}}{a + \frac{s+1}{2}}\right) \right] \quad (2.84)$$

$$C_{fo} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{1+s} \log \frac{1+a}{a(1-q)} - \frac{1}{1-s} \log q \right] \quad (2.85)$$

$$w_c = \frac{1}{\pi} \left[ s \log \frac{q}{a} + (1-s) \log \left( \frac{1-q}{1+a} \right) \right] \quad (2.86)$$

$$C_f(a = \infty) = -\frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{1+s} \log \frac{1-s}{2} + \frac{1}{1-s} \log \frac{1+s}{2} \right] \quad (2.87)$$

$$w = \frac{1-s^2}{4} [C_o - C_{fo} - C_f(a = \infty)] \quad (2.88)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde

$C_o$  tek mod kapasitans değerini,

$\rho$  yansıma katsayısını,

$C_{fo}$  tek mod saçaklanma kapasitans değerini,

$w_c$  üst üste gelen hat genişliğini,

$w$  ise hat genişliğini,

$s$  orta katmandaki alttaş malzeme kalınlığını ifade etmektedir.

Kuvvetli bağlaşım analizi için kullanılan denklemler sırasıyla aşağıda verilmiştir [8].

$$A = \exp \left[ \frac{60\pi^2}{\sqrt{\epsilon_r} Z_0} \left( \frac{1-\rho s}{\sqrt{\rho}} \right) \right] \quad (2.89)$$

$$B = \frac{A - 2 + \sqrt{A^2 - 4A}}{2} \quad (2.90)$$

$$p = \frac{(B-1) \left( \frac{1+s}{2} \right) + \sqrt{\left( \frac{1+s}{2} \right)^2 (B-1)^2 + 4sB}}{2} \quad (2.91)$$

$$r = \frac{sB}{p} \left[ \text{veya } r = \frac{p + \frac{1+s}{2}}{1 + p \left( \frac{1+s}{2s} \right)} \right], 0 < p < \infty \quad (2.92)$$

$$C_{fo} = \frac{1}{\pi} \left\{ -\frac{2}{1-s} \log s + \frac{1}{s} \log \left[ \frac{pr}{(p+s)(1+p)(r-s)(1-r)} \right] \right\} \quad (2.93)$$

$$C_o = \frac{120\pi\sqrt{\rho}}{\sqrt{\epsilon_r} Z_0} \quad (2.94)$$

$$w = \frac{s(1-s)}{2} (C_o - C_{fo}) \quad (2.95)$$

$$w_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ (1+s) \log \frac{p}{r} + (1-s) \log \left( \frac{1+p}{s+p} \right) \frac{r-s}{1-p} \right] \quad (2.96)$$

$w_0 = 0$  olduğu durumda, maksimum kuvvetli bağlaşımı belirleyen formül aşağıda verilmiştir.

$$\frac{1 - \rho_{max}s}{\sqrt{\rho_{max}}} = \frac{\sqrt{\epsilon_r} Z_0}{60\pi^2} \ln 4 \quad (2.97)$$

Kuvvetli bağlaşım analizi için verilen formüllerde

$C_o$  tek mod kapasitans değerini,

$\rho$  yansıma katsayısını,

$C_{fo}$  tek mod saçaklanma kapasitans değerini,

$w$  hat genişliğini,

$\rho_{max}$  maksimum bağlaşım katsayısını,

$s$  orta katmandaki dielektrik malzeme kalınlığını,

$Z_0$  hattın karakteristik empedans değerini

$w_0$  hatlar arasındaki ofset değerini ifade etmektedir.

Bu formüle göre, maksimum bağlaşım için ince, düşük dielektrik katsayısına sahip bir malzemenin seçilmesi gerektiği sonucu çıkarılmaktadır.

### 3. UYGULAMA

Bölüm 2’de verilen teorik bilgiler yardımıyla, yapının her bir kısmı Computer Simulation Technology (CST®) yazılımında inşa edilerek tasarıma devam edilmiştir. Tasarım adımları, aşağıda verilmiştir.

#### 3.1 Voltaj Bağlaşım Katsayısının Belirlenmesi

3 dB bağlaşım değerine sahip bir bağlaştırmacı için, 8.34 dB’lik bağlaşım değerine sahip iki çok kısımlı bağlaştırmacının peşpeşe bağlantı yöntemi kullanılarak yapılacak sentezi gerekmektedir. Buna göre, öncelikle bağlaşım değeri 8.34 dB’ye eşit bir bağlaştırmacı tasarım adımları uygulanmadır. Buna göre, 8.34 dB’lik bir bağlaşım değerine karşılık gelen voltaj bağlaşım katsayısı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$20 \log(C) = -8.34 \text{ dB} \rightarrow C = 0,383$$

#### 3.2 Çift ve Tek Mod Empedanslarının Hesaplanması

Eşitlik (2.51) ve Eşitlik (2.52) aracılığı ile çift ve tek mod empedansları

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1+C}{1-C}} = 74.58 \Omega$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1-C}{1+C}} = 33.40 \Omega$$

olarak hesaplanmıştır.

#### 3.3 Malzeme Seçiminin Yapılması

Malzeme seçimi için Eşitlik (2.97) kullanılacaktır. Bu formüle göre, dielektrik katsayısının oldukça düşük tutulabilmesi gerekliliği görülmektedir. Bu gerekçeyle, alttaş malzeme olarak RT/Duroid 5880 seçilmiştir. Bu malzemenin dielektrik katsayısı,  $\epsilon_r$  değeri 2.2’dir. Tekrar, Eşitlik (2.97) aracılığı ile olabilecek maksimum alttaş kalınlığı değeri mm cinsinden belirlenecektir. Bu eşitlikteki maksimum yansıma katsayısı değeri, çift mod ve tek mod empedanslarının birbirine oranını ifade etmektedir.

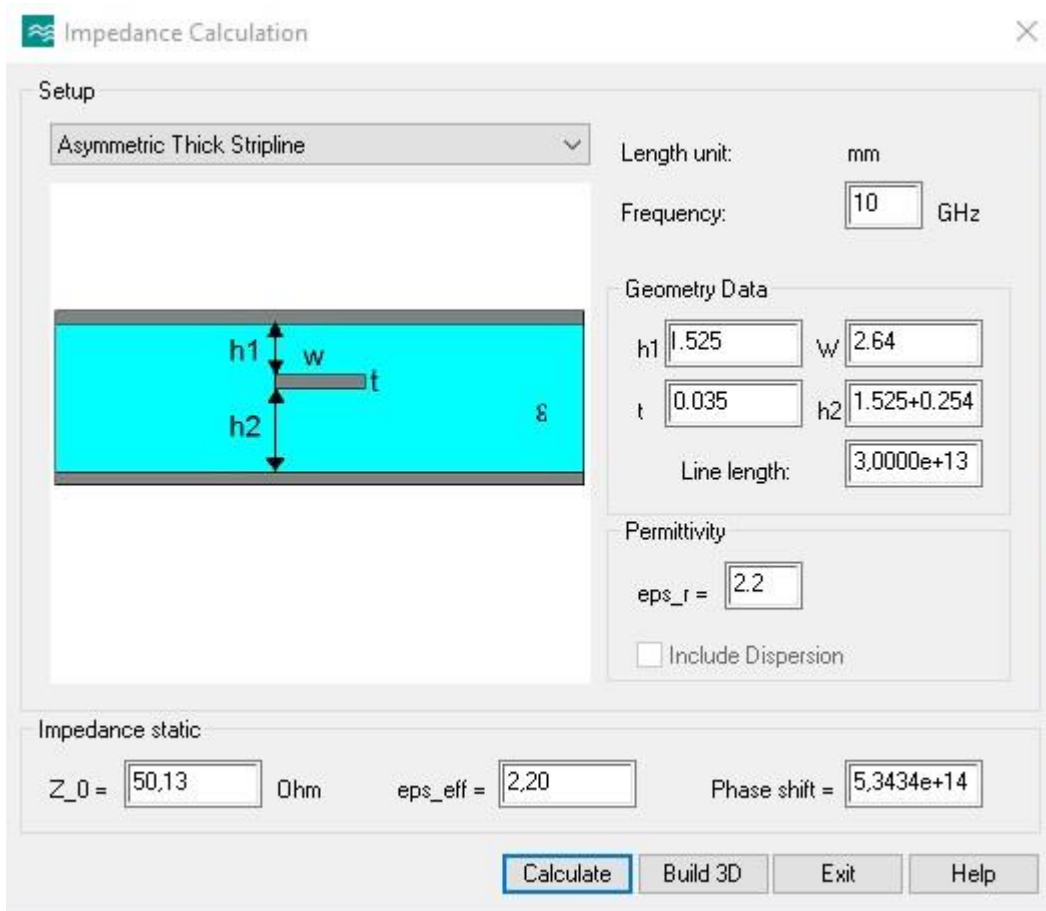
$$\rho_{max} = \frac{Z_{0e}}{Z_{0o}} = 2.23$$

$$\frac{1 - \rho_{max} s}{\sqrt{\rho_{max}}} = \frac{\sqrt{\epsilon_r} Z_0}{60\pi^2} \ln 4 \rightarrow s = 0.331 \text{ mm}$$

Bu hesaplamaların ardından, orta katmanda, 0,254 mm (10 mil) kalınlığında, üst ve alt katmanlarda ise 1.525 mm (60 mil) kalınlığında RT/Duroid 5880 alttaş malzeme kullanılması kararlaştırılmıştır.

### 3.4 Parametrelerin Belirlenmesi

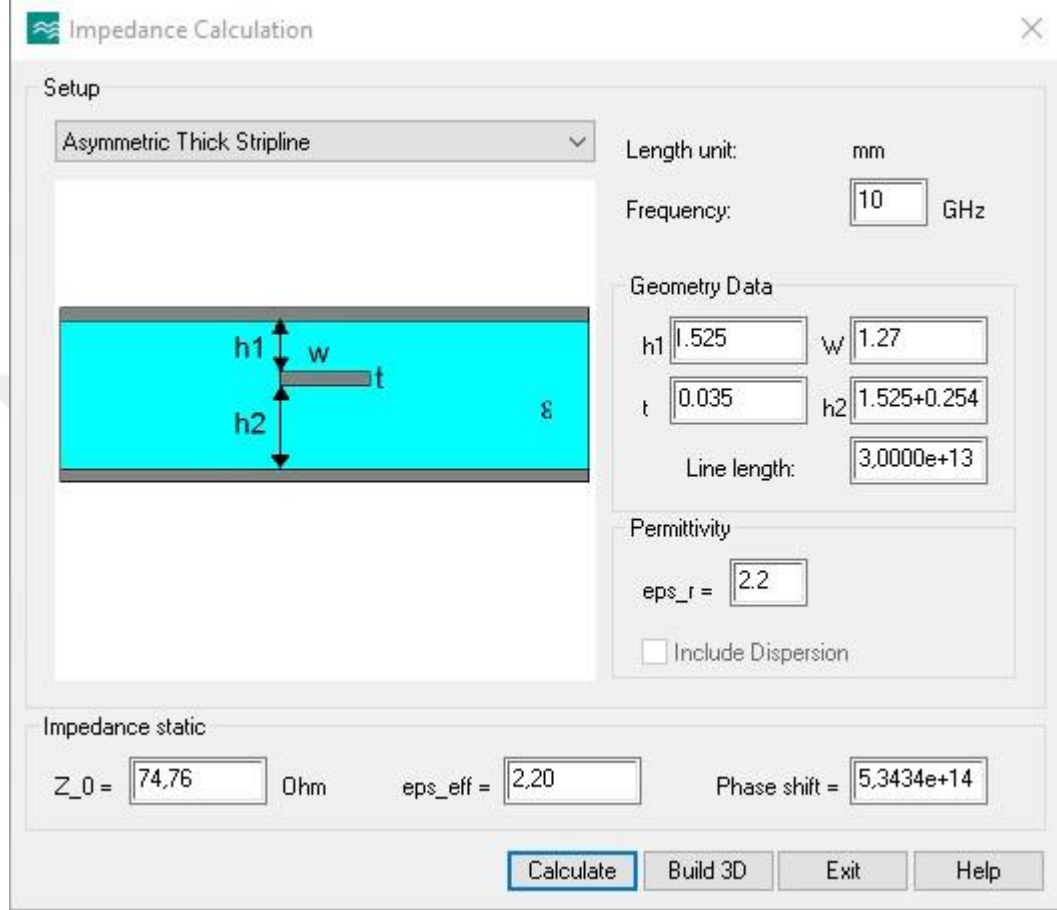
Bu kalınlık ve dielektrik katsayısı değeri için gereken 50 ohm hat genişliği, CST yazılımında mevcut olan hesaplama aracı ile gerçekleştirilmiştir. 50 ohm empedans için gereken hat genişliği, 2.64 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. 1 50 Ohm Empedans Değeri İçin Gereken Hat Genişliği

Bir sonraki adım ise, çift ve tek mod uyarımlarını eşlemektir. Bu eşlemede, Klopfenstein koniği kullanılacaktır. Burada, 50 ohm karakteristik empedansa sahip hat, istenen bağlaşım değerindeki çift mod empedansına eşlenmelidir. Çift mod empedansına eşlenmesinin sebebi, çok kısımlı bağlaştırmacı yapısında çift modun açık devre, tek modun ise kısa devre olarak kabul edilmesidir.

74.58 ohm değerini sağlayan hat genişliği, aynı araç aracılığıyla hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonunda gereken hat genişliği, 1.27 mm olarak bulunmuştur. Bu konik yapıda, merkez frekansı 10 GHz olacak şekilde, dalga boyunun dörtte biri uzunluğunda 23 kısım art arda eklenerek 74.7 ohm genişliğine dek inceltilmiştir.



Şekil 3. 2 Çift Mod Empedans Değeri İçin Gereken Hat Genişliği

Yapı, sentezi gereği  $90^\circ$  faz farkına sahip olduğundan,  $90^\circ$ 'lik faz kaydırıcılar kapı 2 ve kapı 4'ün son kısımları olarak eklenmişlerdir. Burada, merkez frekansı 10 GHz olacak şekilde seçilmiş ve bu frekanstaki dalga boyunun dörtte biri uzunluğu kadar olan 11 kısımlı bir faz kaydırıcı inşa edilmiştir. Spiral bir yapı kullanılarak, geniş bant performansına uyumlandırılması sağlanmaya çalışılmıştır.

Yapıda, peşpeşe bağlantı dışında herhangi bir etkinin yer almaması için önlem amacıyla, üç katmanın da orta bölgesine 100 mm uzunluğunda ve 2 mm genişliğinde bir yarık oluşturulmuştur.

Uygulamada iki adet bağlaştırmacı inşa edilmiştir. Bağlaştırmacı1'de, bağlaşım yalnızca alttaş üzerinden gerçekleşmektedir. Bağlaştırmacı2'de ise, alttaş üzerinden gerçekleşen

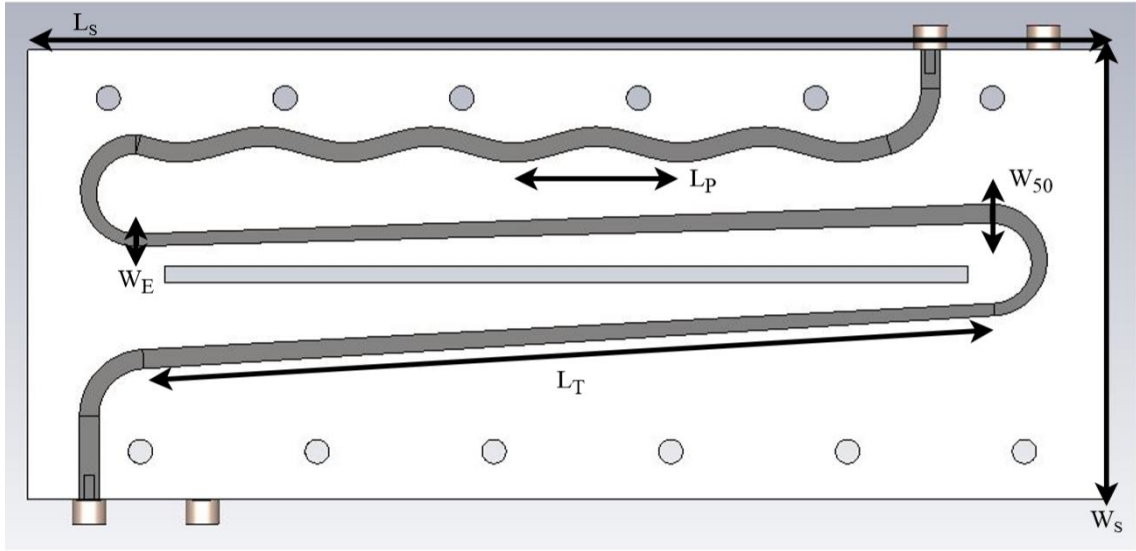
bağlaşım ek olarak, çapraz geçiş deliği ile bağlaşım değerin artırabilmesi hedeflenmiştir.

Her iki bağlaştırıcı için de bir modül modeli benzetimlere eklenmiş ve tasarıma dahil edilmiştir. Her iki bağlaştırıcı yapısında da topraklamanın güçlendirilmesi ve üçlü şerit hat yapısı ve modülün birbirleriyle entegre olabilmesi amacıyla vida delikleri yapının üzerinde yer almaktadır.

Bağlaştırıcı1 ve Bağlaştırıcı2 modelinde kullanılan parametreler ve değlerinin yer aldığı listeler sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de listelenen parametrelerin, yapı üzerinde hangi bölümleri ifade ettiği, sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te, benzetim ortamı üzerinde oluşturulan 3D model üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 3. 1 Bağlaştırıcı1 İçin Elektriksel ve Mekanik Parametreler

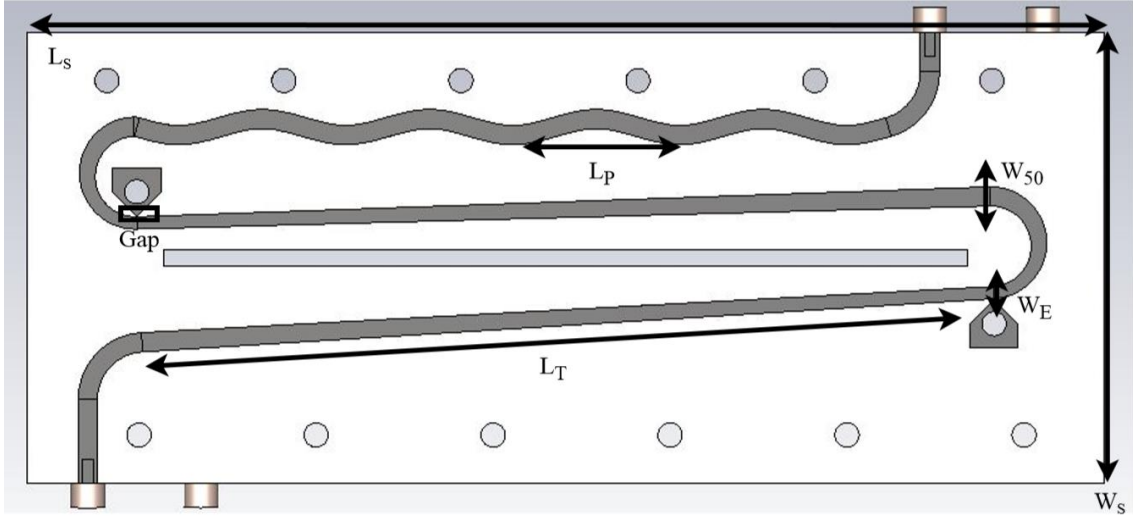
| Parametre Adı | Parametre Tanımı                                  | Değeri    |
|---------------|---------------------------------------------------|-----------|
| $L_S$         | Altaş malzeme boyu                                | 138 mm    |
| $W_s$         | Altaş malzeme genişliği                           | 54 mm     |
| $W_{50}$      | 50 ohm empedans hat genişliği                     | 2.64 mm   |
| $W_E$         | Çift mod empedans genişliği                       | 1.27 mm   |
| $L_T$         | Konik eşleme hattı uzunluğu                       | 116.15 mm |
| $L_P$         | Tek kısım için faz kaydırıcı hattın uzunluğu      | 10.12 mm  |
| $W_C$         | Konektör canlı ucunun ve iç iletkeninin genişliği | 1.27 mm   |
| $R_T$         | Konektördeki teflon malzemesinin çapı             | 4.252 mm  |
| $T_M$         | Kullanılan modülün et kalınlığı                   | 3 mm      |



Şekil 3. 3 Bağlaştırmacı1 İçin Verilen Parametrelerin 3D Model Üzerinde Gösterimi

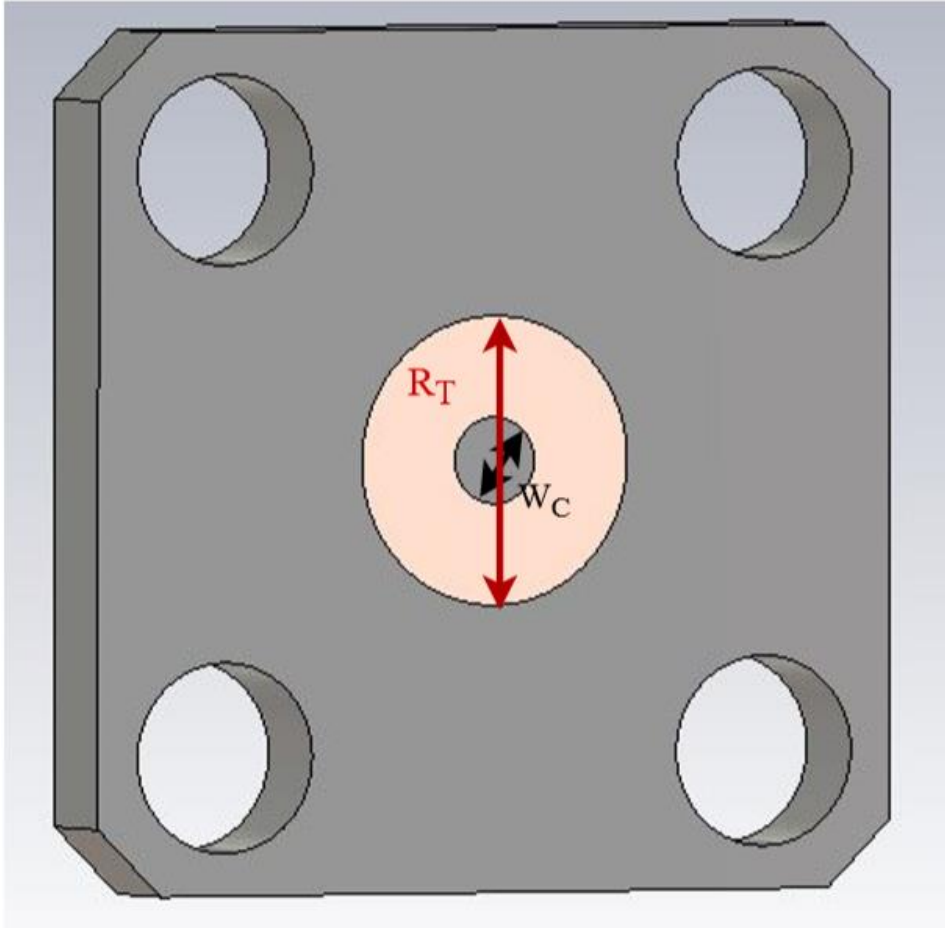
Çizelge 3. 2 Bağlaştırmacı2 İçin Elektriksel ve Mekanik Parametreler

| Parametre Adı | Parametre Tanımı                                            | Değeri    |
|---------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| $L_s$         | Alttaş malzeme boyu                                         | 138 mm    |
| $W_s$         | Alttaş malzeme genişliği                                    | 54 mm     |
| $W_{50}$      | 50 ohm empedans hat genişliği                               | 2.64 mm   |
| $W_E$         | Çift mod empedans genişliği                                 | 1.27 mm   |
| Gap           | Çapraz geçiş deliğinin kuvvetli bağlaşım noktasına uzaklığı | 0.1 mm    |
| $L_T$         | Konik eşleme hattı uzunluğu                                 | 116.15 mm |
| $L_P$         | Tek kısım için faz kaydırıcı hattın uzunluğu                | 10.12 mm  |
| $W_C$         | Konektör canlı ucunun ve iç iletkeninin genişliği           | 1.27 mm   |
| $R_T$         | Konektördeki teflon malzemesinin çapı                       | 4.252 mm  |
| $T_M$         | Kullanılan modülün et kalınlığı                             | 3 mm      |



Şekil 3. 4 Bağlaştırmacı2 İçin Verilen Parametrelerin 3D Model Üzerinde Gösterimi

Modelde ve Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilen, konektöre ait parametrelerin 3D model üzerinde gösterimi, Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3. 5 Konektör 3D Modelinde Parametre Gösterimi



Uygulama bölümünde elde edilen parametreler aracılığı ile oluşturulan 3D model üzerinde koşturulan benzetimler, bir sonraki bölümde incelenmektedir.



## 4. BENZETİM

### 4.1 Benzetim Ortamı

Benzetimler yalnızca CST® yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetimde seçilen frekans bandı, 1 – 20 GHz aralığıdır. Benzetimde kullanılan frekans bandı için devrenin boyutunun dalga boyuna göre oranı, Çizelge 4.1’de verilmiştir. Dalga boyu hesaplanan frekanslar, en düşük frekans olan 1 GHz, merkez frekans seçilen 10 GHz ve seçilen maksimum frekans olan 20 GHz’dir.

Çizelge 4. 1 Dalga Boyu Cinsinden Devre Boyutları

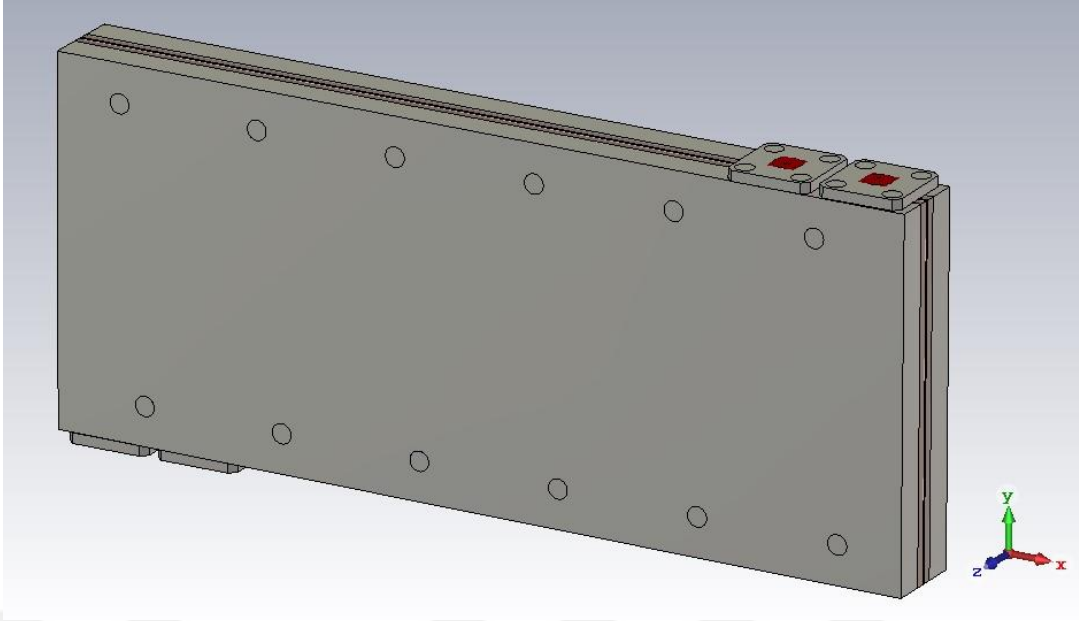
| Frekans | Dalga Boyu ( $\lambda$ ) | Devre Boyutu                     |
|---------|--------------------------|----------------------------------|
| 1 GHz   | 0.2 m                    | $0.69\lambda \times 0.27\lambda$ |
| 10 GHz  | 0.02 m                   | $6.9\lambda \times 2.7\lambda$   |
| 20 GHz  | 0.01 m                   | $13.8\lambda \times 5.4\lambda$  |

Çizelge 4.1’de verilen boyutların oranı ve gözlemlenecek bant genişliğinin oldukça yüksek olması nedeniyle, öncelikli "Time Domain Solver" kullanılarak benzetimler koşturulmuştur. Her iki bağlaştıracının çözümünde, hücre boyutu (*mesh size*), o frekans için dalga boyunun 1/30 oranı sağlanacak şekilde seçilmiştir.

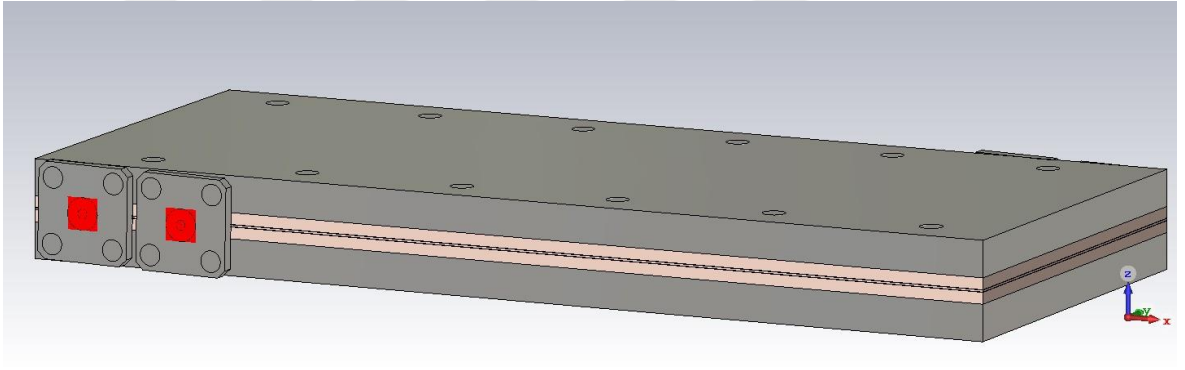
### 4.2 3D Bağlaştıracı Modelleri

Her iki bağlaştıracı modelinde de ortak modül ve DC – 18 GHz aralığında performans gösteren konektör yapısı kullanılmıştır. Modül ve konektörler ile elektromanyetik analiz yapılarak, ölçüm sonuçlarına en yakın benzetimin elde edilmesi hedeflenmiştir.

Şekil 4.1’de ortak modül yapısının 3D modelinin karşıdan görünümü, Şekil 4.2’de ise yan görünümü, konektörlerin konumlanmasının anlaşılabilmesi amacıyla, verilmiştir.

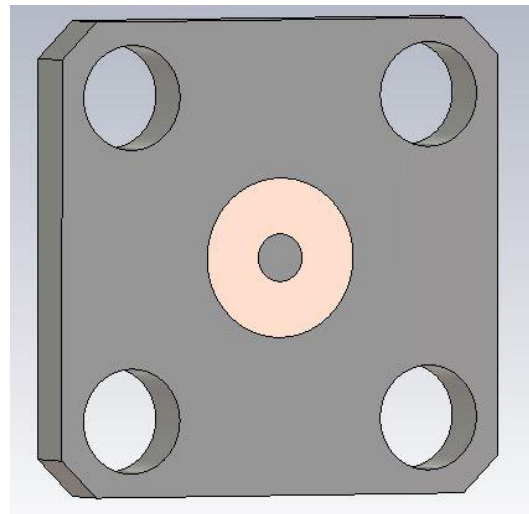
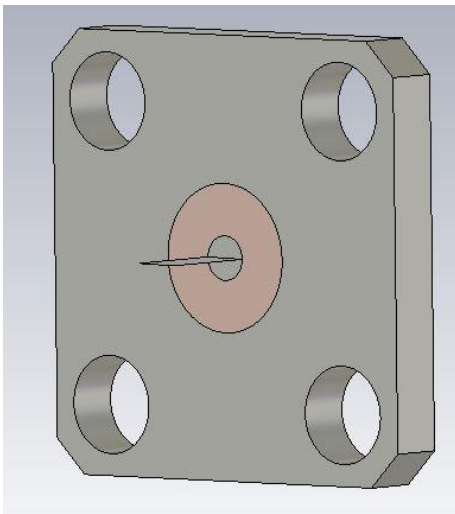


Şekil 4. 1 Bağlaştırmacı Benzetiminde Kullanılan Modül 3D Modeli – Karşıdan Görünüm



Şekil 4. 2 Bağlaştırmacı Benzetiminde Kullanılan Modül 3D Modeli - Yandan Görünüm

Şekil 4.3’te ise, kullanılan konektörün 3D modeli iki farklı açıdan verilmiştir.

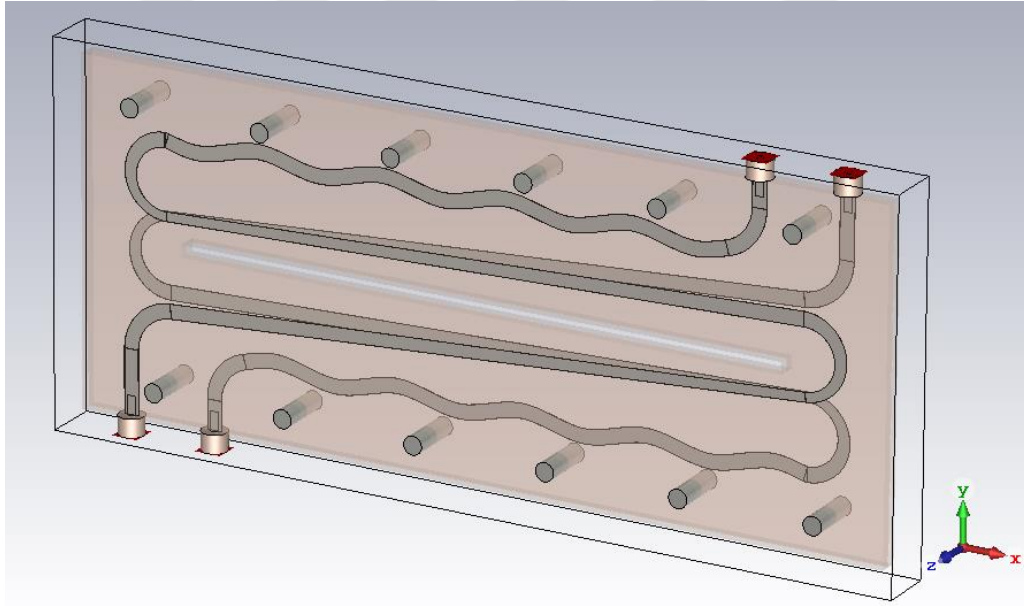


Şekil 4. 3 Bağlaştırmacı Benzetiminde Kullanılan Konektör 3D Modeli

İlerleyen bölümlerde, Bağlaştırmacı1 ve Bağlaştırmacı2'ye ait 3D modeller ile benzetim karşılaştırmaları aktarılacaktır.

#### 4.2.1 Bağlaştırmacı1 3D Modeli

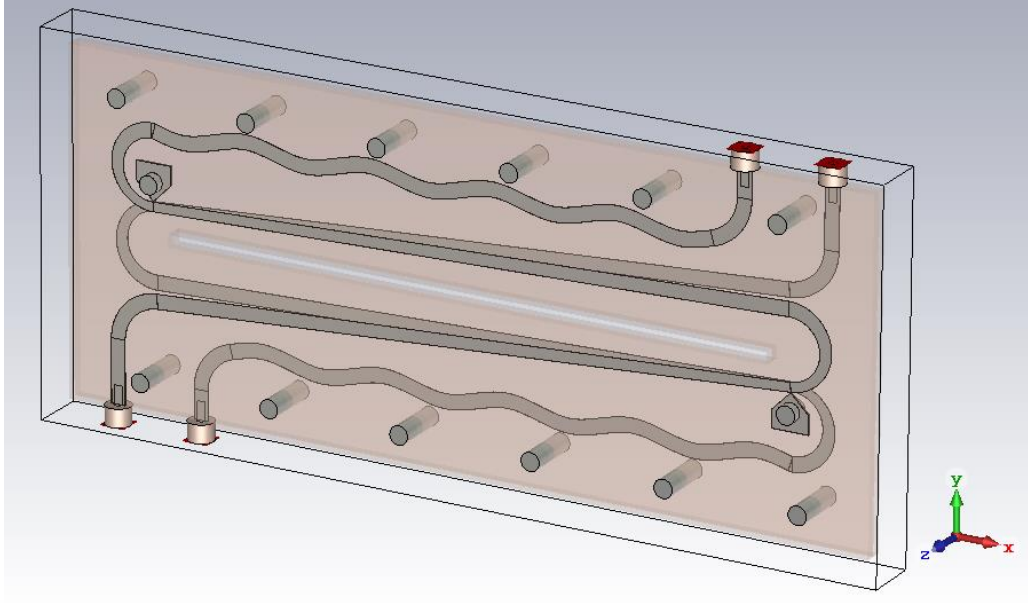
Bağlaştırmacı1 isimli bağlaştırmacı modelinin orta katmanının üst ve alt yüzeyleri sırasıyla, Şekil 4.4'te verilmiştir. İnşa edilen yapıda bahsedilen üçlü şerit hat yapısına uygun olarak üç katman yer almaktadır. Üçlü şerit hat yapısında yer alan orta katmanda, orta katmanın alt ve üst yüzeylerinin yapıdaki simetrikliği daha iyi ifade edebilmesi için alt ve üst katmanlar gizlenmiş ve orta katman saydamlaştırılarak görseller eklenmiştir. Aynı zamanda, Şekil 4.4'te yer alan 3D model görselinde, yapının mekanik olarak sabitlenmesini sağlayacak vidalar konumlandırılmıştır. Bu vidalar, kapasitif bir etkiyi elimine etmek amacıyla birbirine eşit uzaklıkta ve tekrar simetrik yer alacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 4.4 Bağlaştırmacı1 İçin Üçlü Şerit Hat Yapısı 3D Modeli

#### 4.2.1 Bağlaştırmacı2 3D Modeli

Bağlaştırmacı12 isimli bağlaştırmacı modelinin orta katmanının üst ve alt yüzeyleri, Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.5 Bağlaştırmacı2 İçin Üçlü Şerit Hat Yapısı 3D Modeli

Şekil 4.5'te yer alan Bağlaştırmacı2'nin 3D model görselinde, Şekil 4.4'teki gibi, orta katman saydamlaştırılarak orta katmanın alt ve üst yüzeyleri vurgulanmıştır. Bağlaştırmacı1'e ait yapı ile benzer şekilde, yapının mekanik olarak sabitlenmesini sağlayacak vidalar görselde yer almaktadır. Bağlaştırmacı2 modelinde ek olarak, çapraz geçiş deliklerinde yer alacak vidalar da görselde eklenmiştir.

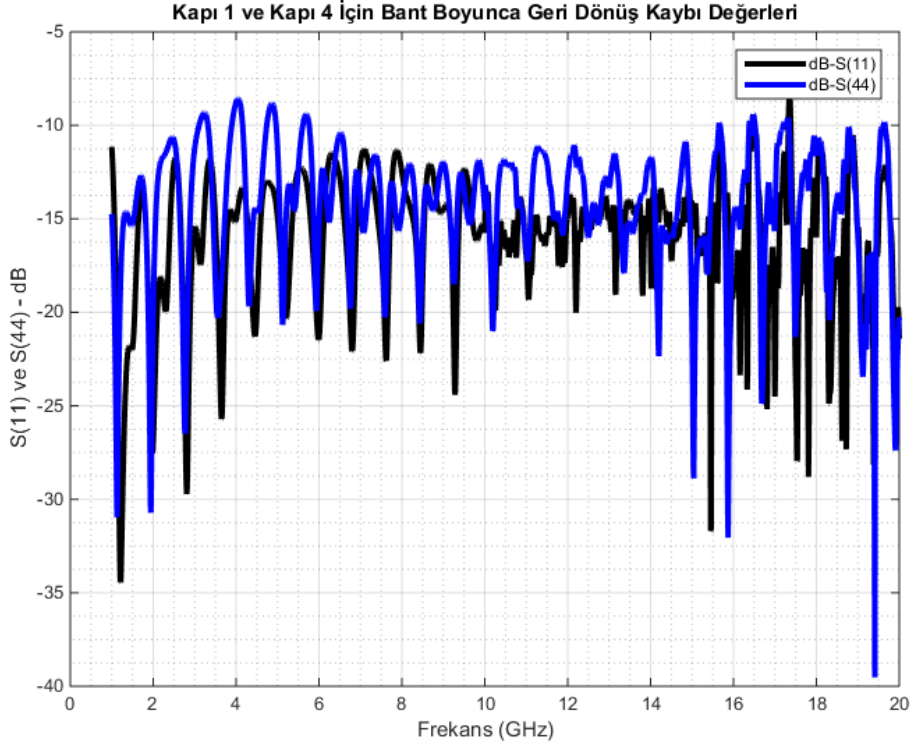
Verilen bu yapılar üzerinden koşturulan benzetimler, farklı çözücülerle koşturulan benzetimlerin karşılaştırılması ve parametrelerin benzetim üzerine etkilerinin analizi, sırasıyla karşılaştırılarak ilerleyen başlıklarda verilecektir.

### 4.3 Benzetim Sonuçları

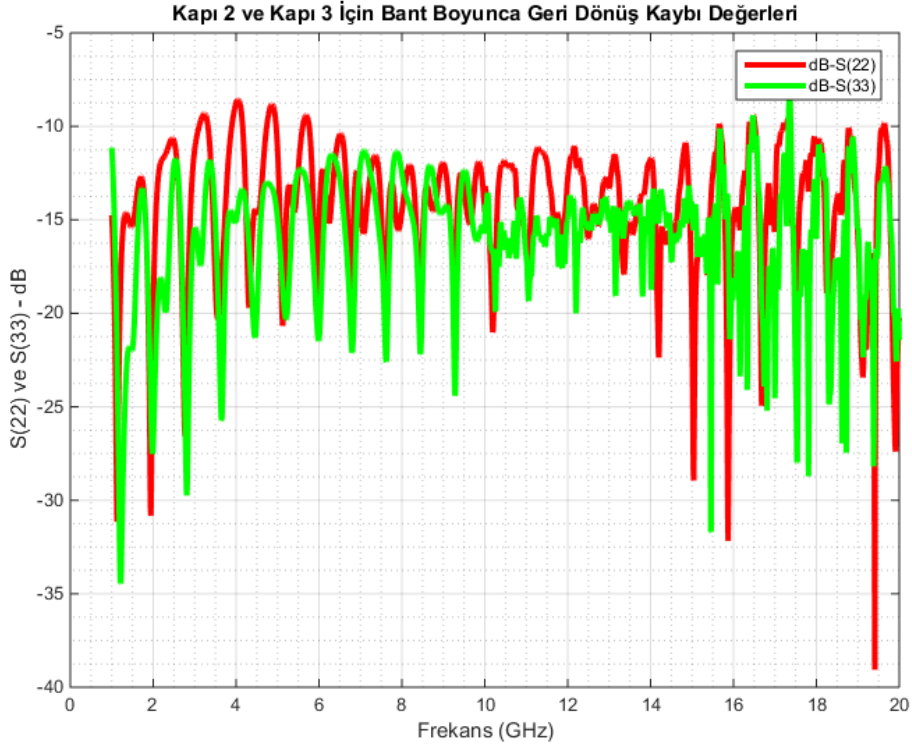
#### 4.3.1 Bağlaştırmacı1 İçin Benzetim Sonuçları

Bağlaştırmacı1 için koşturulan benzetimlerin sonuçları, her bir kapı için analizlenerek verilmiştir. Benzetim sonuçlarından elde edilen veriler kaydedilerek, MATLAB yazılımı üzerinde grafikleri çizdirilmiştir. Yapı karşılıklı ve simetrik olduğu için, birbirine eşit olan parametrelerin yalnızca biri grafikler üzerinde gösterilmiştir.

Öncelikle, her bir kapı için bant boyunca elde edilen geri dönüş kaybı değerleri, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu şekillerde elde edilen grafiğe göre, 1 – 20 GHz bandı boyunca, her bir kapının giriş empedansının konektör empedansı olan 50 ohm değerine ne kadar eşlendiği analizlenmiş olacaktır.



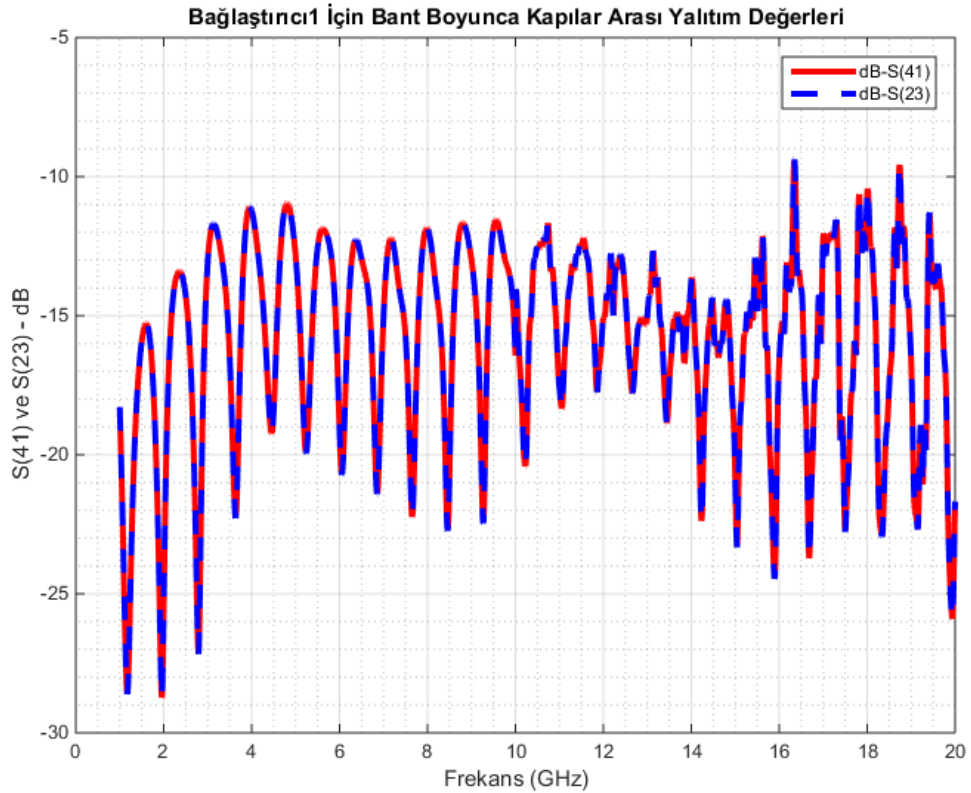
Şekil 4. 6 Bant Boyunca Bağlaştırmalı Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı



Şekil 4. 7 Bant Boyunca Bağlaştırmalı Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 incelendiğinde, kapı 1 ve kapı 3 için, kapı 2 ve kapı 4 için elde edilen geri dönüş kaybı değerleri birbirine eşit görünmektedir. Yapının simetrik olması sebebiyle bu sonucun gözlenmesi beklenmiştir. Şekillerdeki grafiklerden, yapının yaklaşık olarak 3 – 4 GHz aralığında performansının beklenenden biraz daha düşük olduğu, geri dönüş kaybının -10 dB'nin üzerine çıktığı görülmektedir. Kapı 1 ve kapı 3 için ise, bant boyunca -10 dB değerinin altında kalan değerler gözlenmiştir. Bu grafiklerden, Bağlaştırmalı yapısı için bant boyunca kapıların empedans eşlemesi sağlandığını söylenebilmektedir.

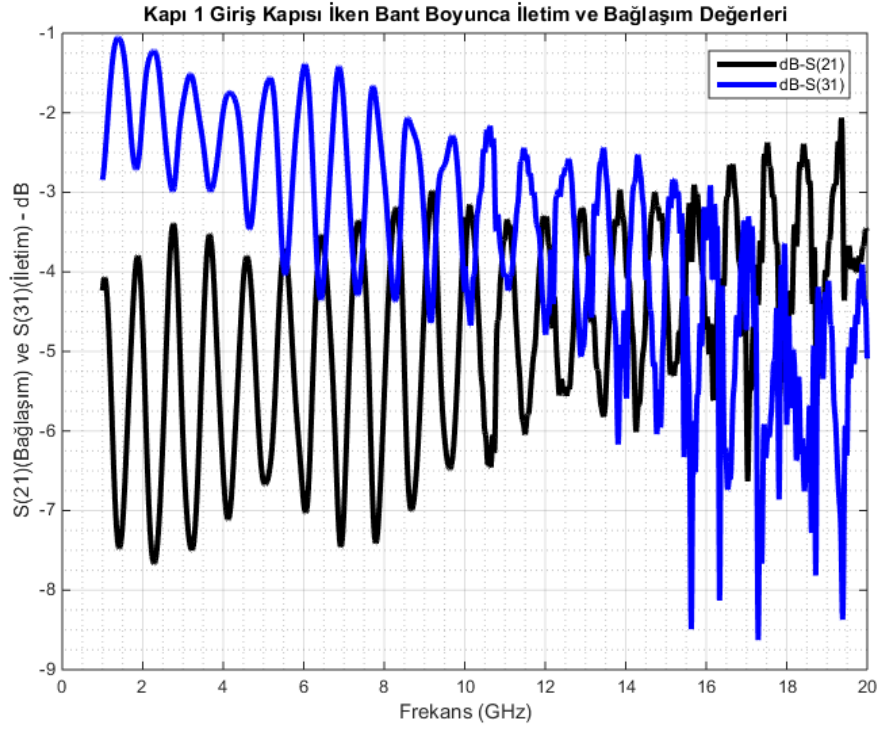
Yapıda, parazitik kapasitans etkisi yaratmaması ve yapının doğru çalışabildiğinin bir diğer ölçütü olan yalıtım parametresi bir diğer önemli parametredir. Kapı 1 ve kapı 4, kapı 2 ve kapı 3 giriş kapıları olarak kullanıldığından, birbirlerine etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Şekil 4.8'de, yalıtım parametresine ait grafik verilmiştir.



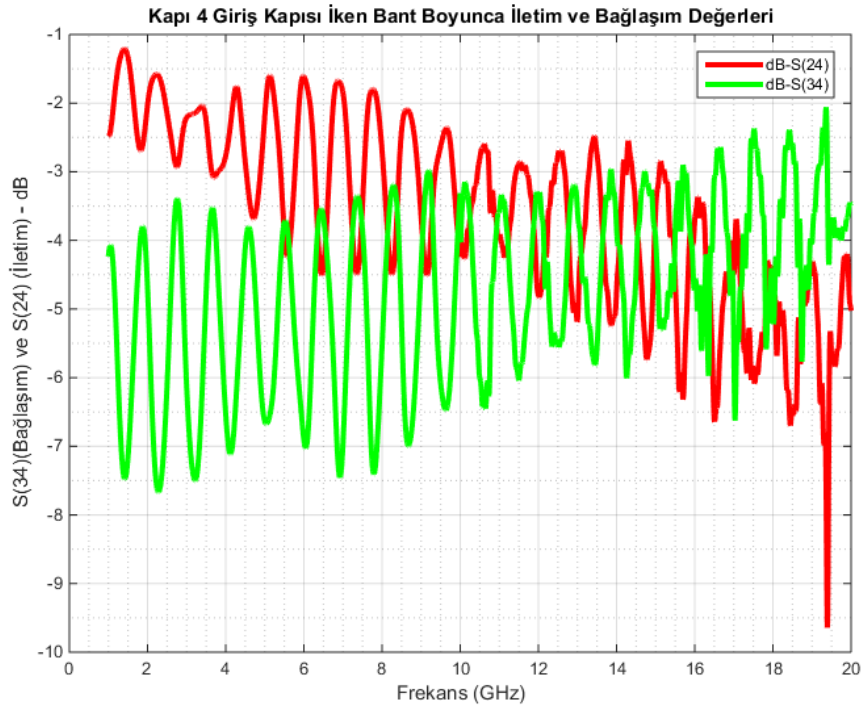
Şekil 4. 8 Bağlaştırmalı İçin Yalıtım Parametresi Grafiği

Şekil 4.8'de verilen grafiğe göre, kapılar arasındaki yalıtım değeri 16.5 GHz'e kadar -10 dB değerinin altında kalmaktadır. Bu da kapıların birbiriyle etkileşime girmediğini, neredeyse bant boyunca yalıtımın sağlandığını ifade etmektedir.

Her bir kapının giriş kapısı olarak kullanılmasıyla elde edilen iletim ve bağlaşım değerleri, aşağıdaki şekillerde sırasıyla verilmiştir.

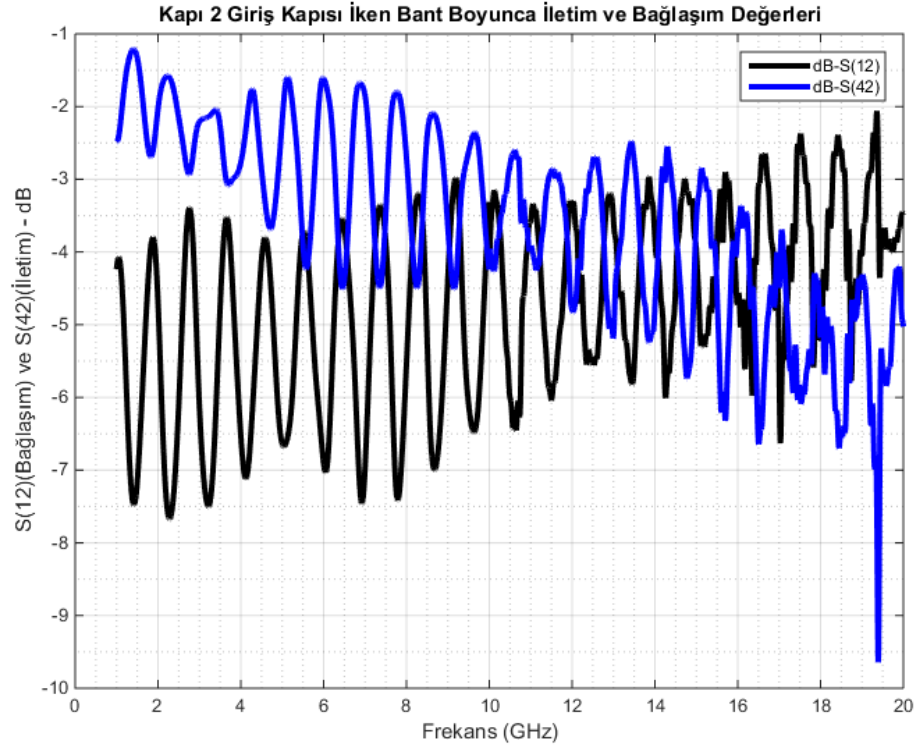


Şekil 4. 9 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği

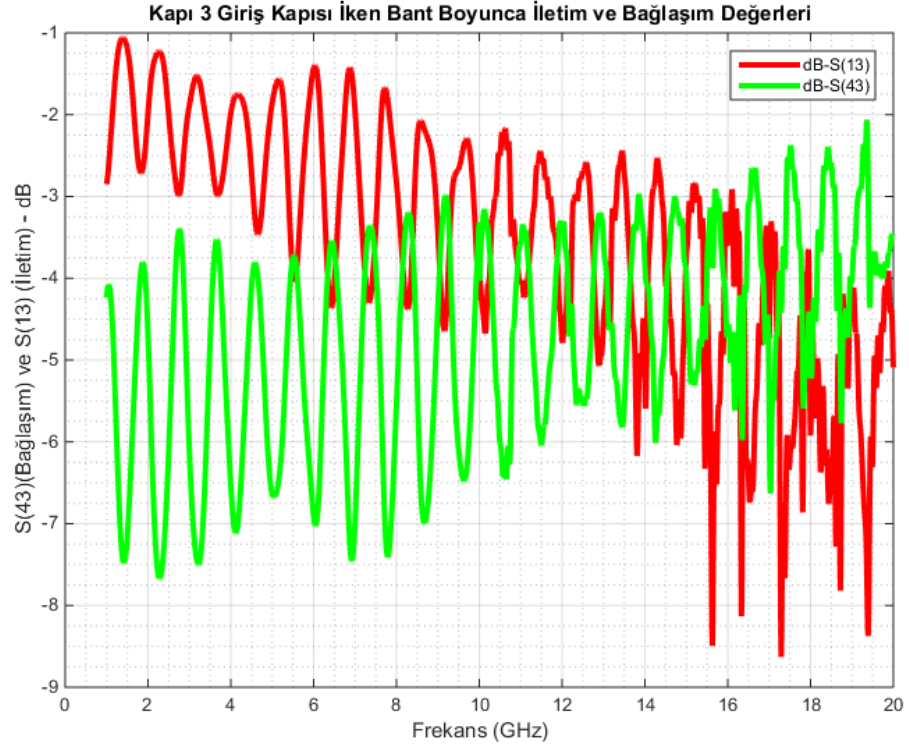


Şekil 4. 10 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği





Şekil 4. 11 Kapı 2 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği



Şekil 4. 12 Kapı3 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği

Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 incelendiğinde de görülebileceği gibi, yapının simetrik ve karşılıklı olması sayesinde, birbirine eş grafikler çıkmakta, iletim ve bağlaşım değerlerinin seçilen her bir giriş kapısı için eş olduğu görülmektedir.

Peşpeşe bağlantı ile sentezlenen iki bağlaştırmacı olması sebebiyle, giriş kapısı seçilen kapıya göre diğer kapı numaraları farklı isimler almaktadırlar. Giriş kapılarına göre diğer kapıların numaraları ve görevleri, Çizelge 4.1’de yer almaktadır.

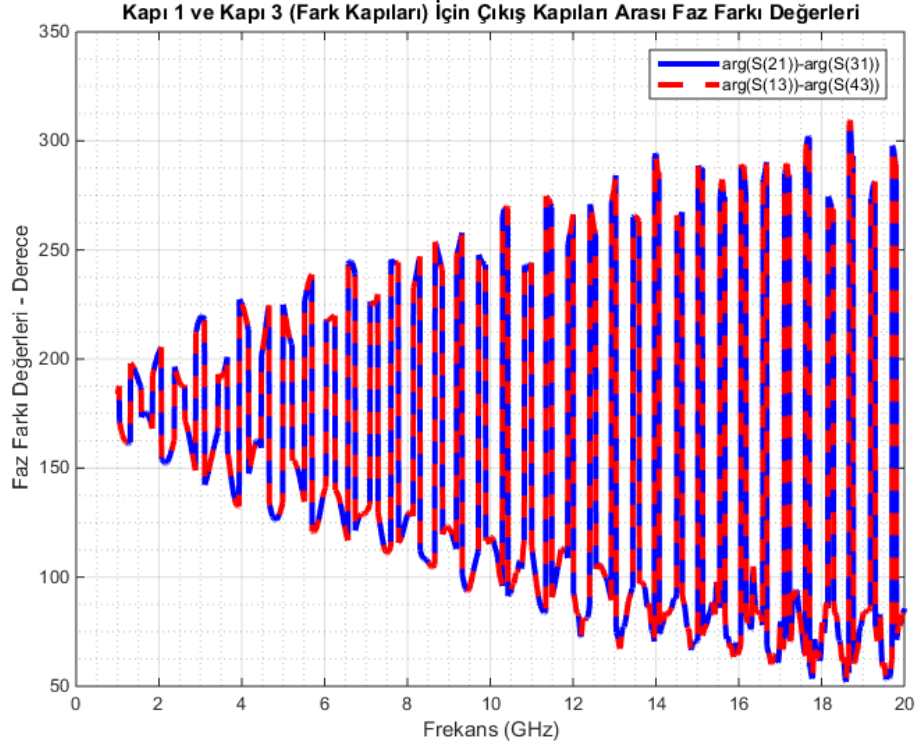
Çizelge 4. 2 Giriş Kapısına Göre Kapıların Numara ve Görev Eşleştirmeleri

| Giriş Kapısı | İletim Kapısı | Bağlaşım Kapısı | Yalıtım Kapısı |
|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Kapı 1       | Kapı 3        | Kapı 2          | Kapı 4         |
| Kapı 2       | Kapı 4        | Kapı 1          | Kapı 3         |
| Kapı 3       | Kapı 1        | Kapı 4          | Kapı 2         |
| Kapı 4       | Kapı 2        | Kapı 3          | Kapı 1         |

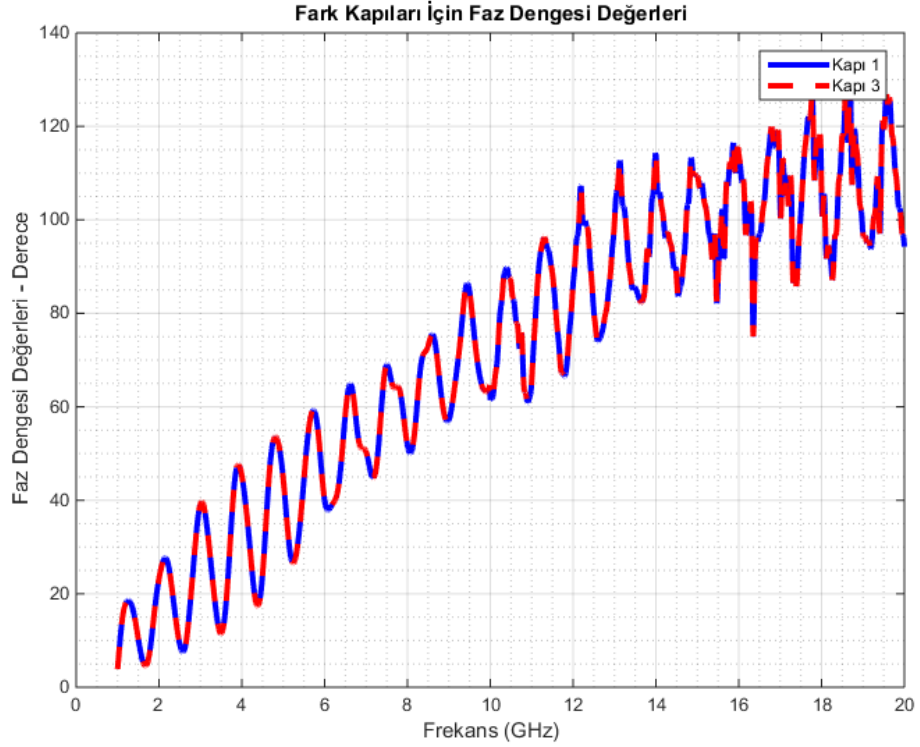
Bant içerisindeki düşük frekanslarda bağlaşım değerinin düşük olduğu, frekans değeri artarken bağlaşımın daha yükseğe çıkıp iletim değeriyle eşit seviyelere geldiği gözlemlenmektedir. Klopfenstein koniği yüksek frekans geçirgenliğe sahip bir yapı olduğu için, düşük frekanslarda bağlaşım ve iletim değerinin birbirine eşit olması sağlanamamıştır. Merkez frekans olarak seçilen 10 GHz çevresinde, yaklaşık 4 dB değerinde bir araya girme kaybının olduğu gözlemlenmektedir. Bant boyunca, hem iletim hem bağlaşım grafiklerinde, ortalama 3 dB değerinde bir salınım gösterildiği de ayrıca gözlemlenmiştir.

Bağlaşım değerlerinin ardından, çıkış kapıları arasındaki faz farkı değerleri incelenecektir. Yapının asimetrik bağlaştırmacı olması sebebiyle, çıkış kapıları arasındaki faz farkının  $0^\circ$  ve  $180^\circ$  olması beklenmektedir.

Şekil 4.13 ve Şekil 4.15’te sırasıyla kapı 1 ve kapı 3 giriş kapısı seçildiğinde çıkış kapıları arasındaki faz farkı, kapı 2 ve kapı 4 giriş kapıları olarak seçildiğinde çıkış kapıları arasındaki faz farkı verilmiştir.



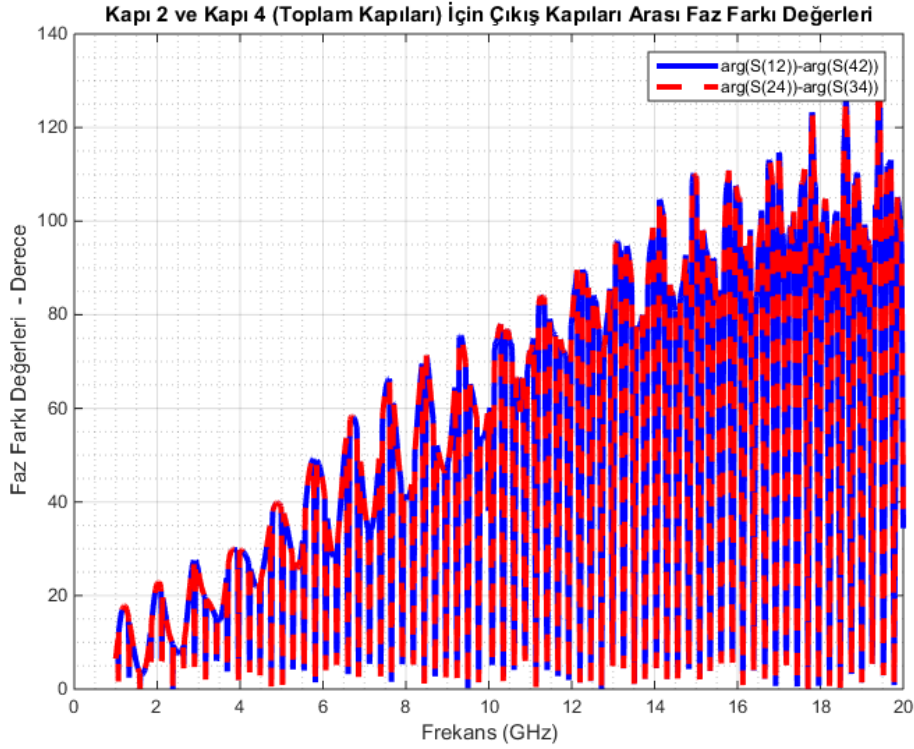
Şekil 4. 13 Fark Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı



Şekil 4. 14 Fark Kapıları İçin Faz Dengesi Grafiği

Asimetrik bağlaştırıcı yapısında da bahsedildiği gibi, çıkış kapılarına ait S-parametrelerinin argümanları arasındaki fark, faz farkı değerini vermektedir. Seçilen giriş kapısı için elde edilen faz farkı değeri  $0^\circ$  ise o kapı toplam kapısı,  $180^\circ$  ise fark kapısı olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 4.13'te verilen grafikte, sırasıyla kapı 1 giriş kapısı seçildiğinde çıkış kapıları olan kapı 2 ve kapı 3 için; kapı 3 giriş kapısı seçildiğinde çıkış kapıları olan kapı 1 ve kapı 4 için faz farkı değerleri verilmiştir. Faz farkı değeri düşük frekanslarda  $180^\circ$  çevresinde değer alırken, yüksek frekansta ise faz dengesi değeri artmaktadır. Şekil 4.14'te ise fark kapıları için faz dengesi değeri verilmiştir. Şekil 4.14'te de, faz dengesi değerinin frekans arttıkça arttığı görülmektedir.

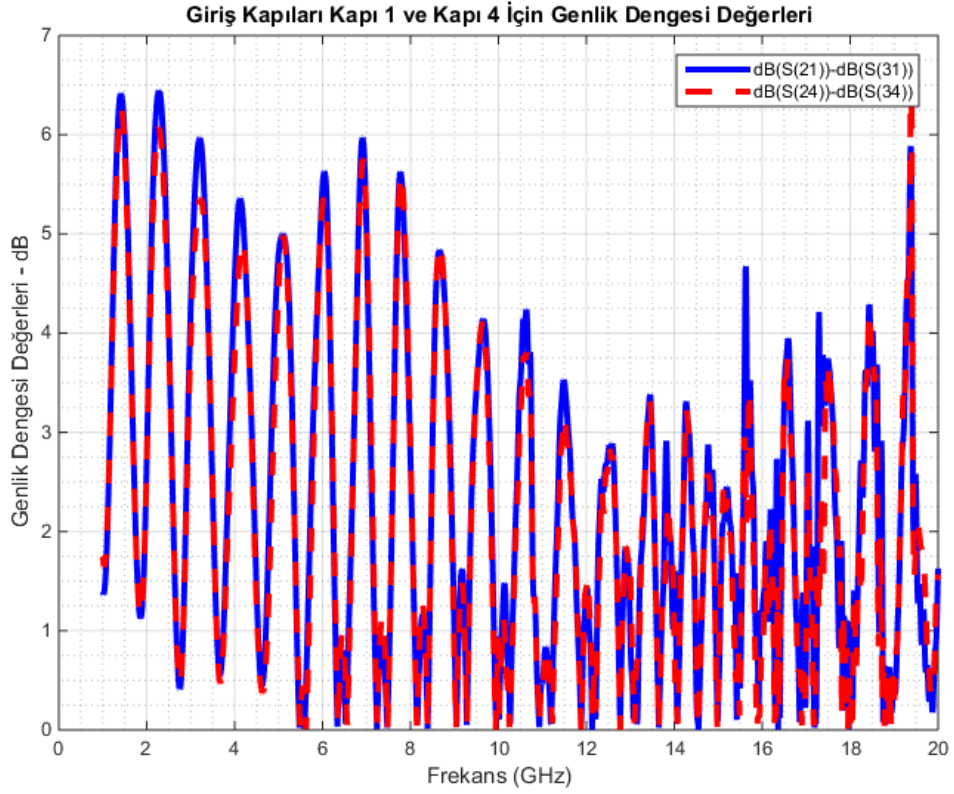


Şekil 4. 15 Toplam Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı

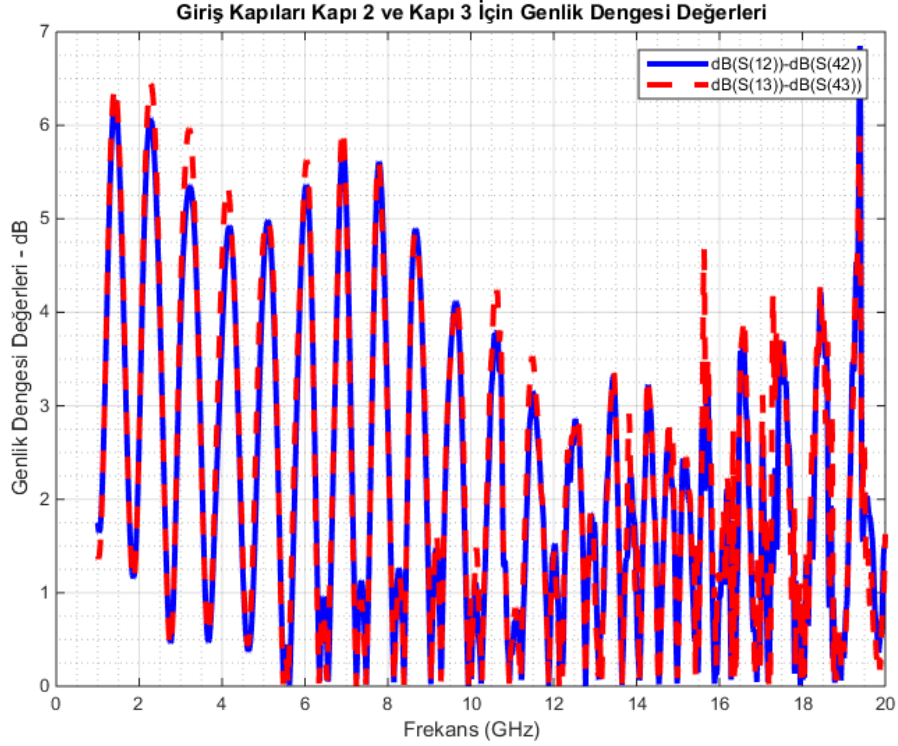
Şekil 4.15'te, toplam kapıları için elde edilen faz farkı değerleri verilmiştir. Toplam kapıları için de faz farkı değerinin  $0^\circ$  olması beklenmektedir. Düşük frekanslarda, faz farkı değerinin  $0^\circ$  civarında olduğu gözlenirken, faz farkı değeri frekans yükseldikçe artmaktadır.

Merkez frekans olan 10 GHz çevresinde, iki faz dengesi değeri de yaklaşık olarak  $65^\circ$  olarak gözlemlenmektedir.  $90^\circ$  faz farkı için eklenen faz kaydırıcılar, merkez frekans olarak 10 GHz'e karşılık gelen dalga boyuna göre hesaplanarak eklenmiştir. Çok kısımlı faz kaydırıcı teorisine göre sentezlenmesi sebebiyle, faz dengesinin frekans arttıkça artması beklenmektedir. Yaklaşık  $15^\circ$  değerinde bir salınımla, faz dengesi değerlerinin arttığı görülmektedir.

Bağlaştırmacı için bir incelenmesi gereken bir diğer özellik, genlik dengesidir. Genlik dengesi, iletim ve bağlaşım değerlerinin birbiri arasındaki farkını vermektedir. Bir diğer tanım olarak, çıkış kapıları arasındaki genlik farkını ifade etmektedir. Giriş kapıları için elde edilen genlik dengesi değerleri, sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4. 16 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Grafiği



Şekil 4. 17 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Grafiği

Yukarıda verilen şekillerde, genlik dengesinin frekans yükselirken azaldığı görülmektedir. Düşük frekanslarda bağlaşım değeri düşük, iletim değeri yüksek olduğu için genlik dengesi yüksektir. Frekans yükseldikçe, iletim ve bağlaşım değerleri birbirlerine yaklaştıkları için, genlik dengesi değeri azalmaktadır. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de bulunan grafikler incelendiğinde, bant boyunca ortalama genlik dengesi değerinin 4 dB olduğu söylenebilmektedir.

Bağlaştırmacı1 yapısının benzetim sonuçları ve bu veriler aracılığı ile performansını belirleyecek parametreler incelenmiştir. Sonraki bölümde, Bağlaştırmacı2 için analiz yapılacaktır.

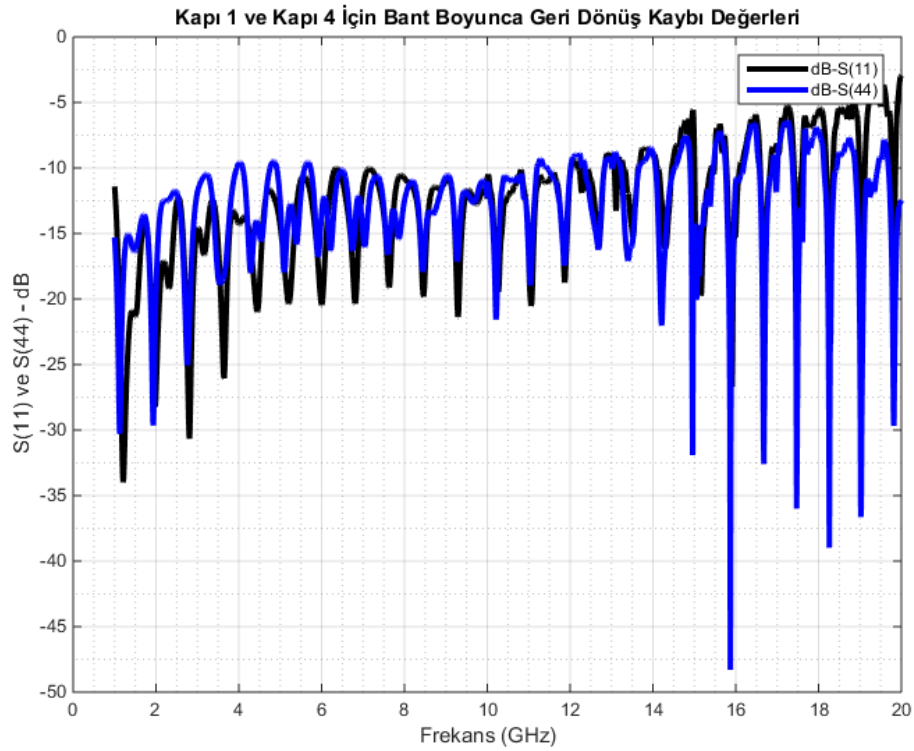
#### 4.3.2 Bağlaştırmacı2 İçin Benzetim Sonuçları

Bağlaştırmacı2 için, hücre boyutu 30 seçilerek ve “Time Domain Solver” çözücüsü kullanılarak koşturulan benzetimlerin sonuçları, her bir kapı için analiz edilerek verilmiştir. Benzetim sonuçlarından elde edilen veriler kaydedilerek, MATLAB yazılımı üzerinde grafikleri çizdirilmiştir.

Yapı karşılıklı ve simetrik olduğu için, Bağlaştırmacı2 yapısında da birbirine eşit olan parametrelerin yalnızca biri grafikler üzerinde gösterilmiştir.

Bağlaştırmacı2 yapısında, bağlaşımın ek olarak çapraz geçiş deliği aracılığı ile gerçekleştirilmesinin, bağlaşım performansına etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bağlaştırmacı1 için koşturulan benzetimlerin analizleriyle eş olarak gidilecek ve her bir parametre için Bağlaştırmacı1 ile performansı karşılaştırılarak yorumlar eklenecektir.

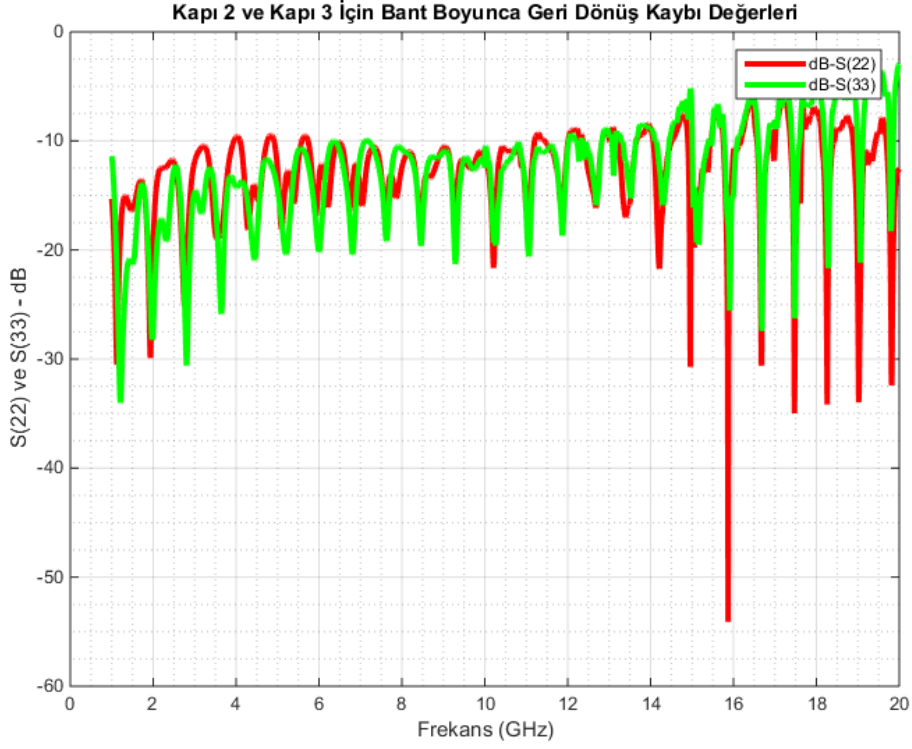
Benzer şekilde, ilk olarak her bir kapının giriş empedanslarının eşlenme performansı incelenecektir. Buna göre her bir kapı için bant boyunca elde edilen geri dönüş kaybı değerleri, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4. 18 Bant Boyunca Bağlaştırmacı2 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı

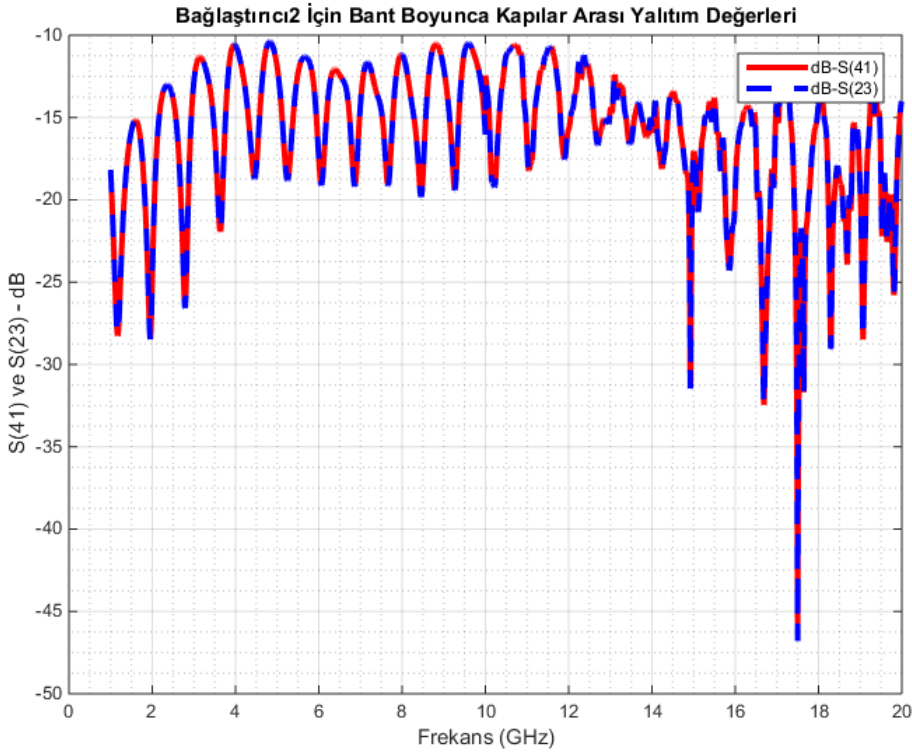
Bağlaştırmacı2 yapısında,  $S_{22}$  ve  $S_{44}$  parametrelerinin, Bağlaştırmacı1 yapısındaki  $S_{22}$  ve  $S_{44}$  parametrelerine göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmektedir.  $S_{11}$  ve  $S_{33}$  parametreleri için ise, geri dönüş kaybının Bağlaştırmacı1 yapısındaki değerine göre -10 dB değerine daha yakın olduğu görülmüştür. Bağlaştırmacı2 yapısında, 15 GHz değerinin ardından eşlenmenin bozulmaya başladığı, geri dönüş kaybının artarak devrenin istenilen performansa ulaşamadığı için operasyon bandının dışında kalınacağı yorumu yapılabilir.





Şekil 4. 19 Bant Boyunca Bağlaştırmacı2 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı

Bağlaştırmacı2 için yalıtım parametresinin grafiği Şekil 4.20’de verilmiştir.

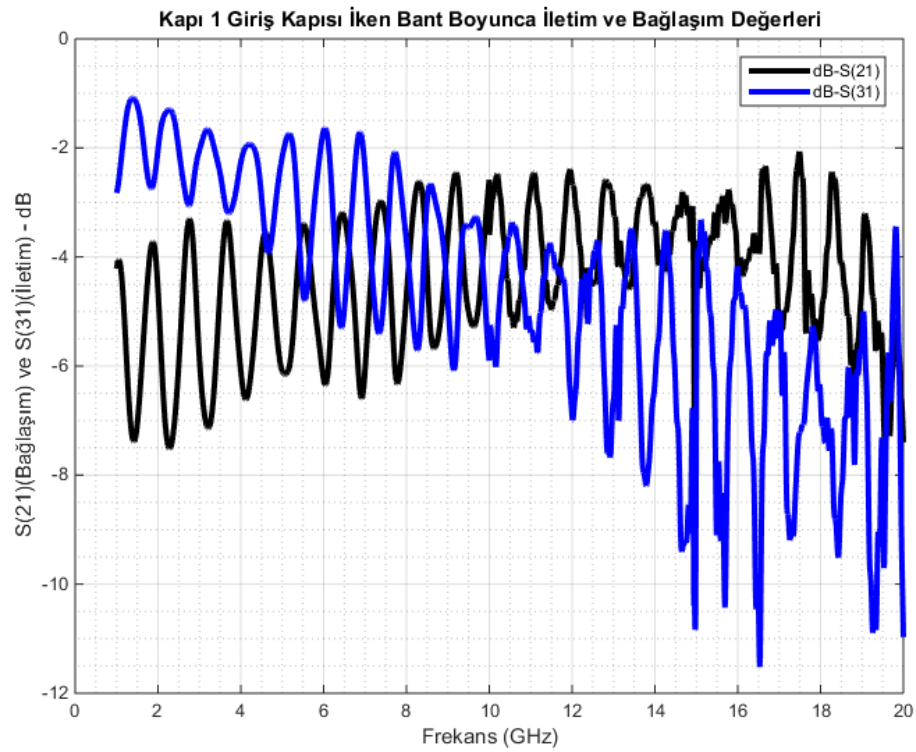


Şekil 4. 20 Bağlaştırmacı2 İçin Yalıtım Parametresi Grafiği

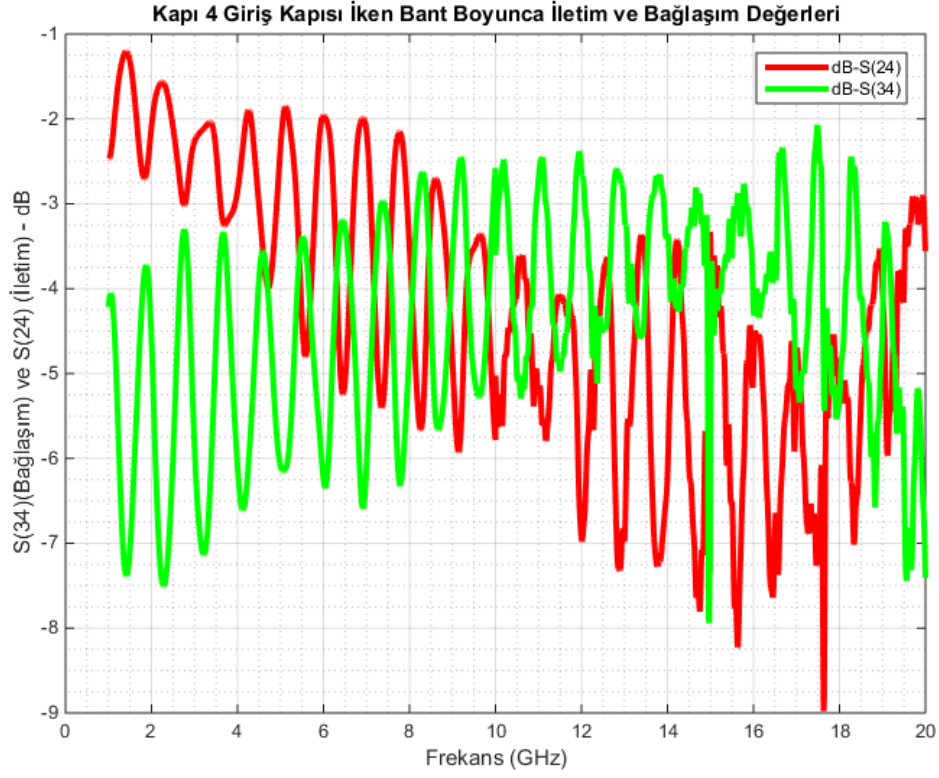


Bağlaştırmacı2 yapısında elde edilen yalıtım grafiğinde, bant boyunca kapılar arası yalıtım değerinin -10 dB altında olması hedeflenmiştir. Bu istere göre, beklenen performansta gerçekleştirildiği görülmektedir. Bağlaştırmacı1 yapısına kıyasla, Bağlaştırmacı2’de yalıtım performansı daha iyi gerçekleşmektedir. Fakat grafikte, 15 GHz değerinin ardından elde edilen dip noktaları, 15 GHz ve sonraki frekanslarda geri dönüş kaybının fazla olmasından dolayı, 15 GHz öncesinde gözlemlenen periyodik salınımı vermemektedir. Bu nedenle, beklenen performanstaki yalıtımın 15 GHz’e kadar gerçekleştiği yorumu yapılabilir.

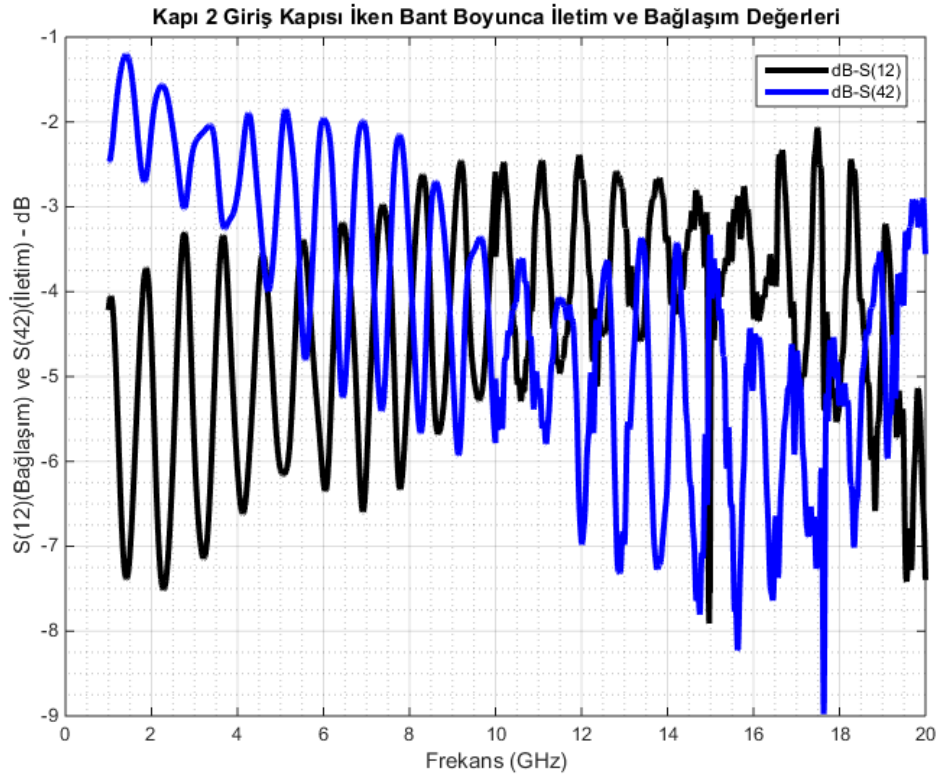
Bağlaştırmacı2 yapısı için elde edilen iletim ve bağlaşım değerleri, takip eden grafiklerde sırasıyla verilmiştir.



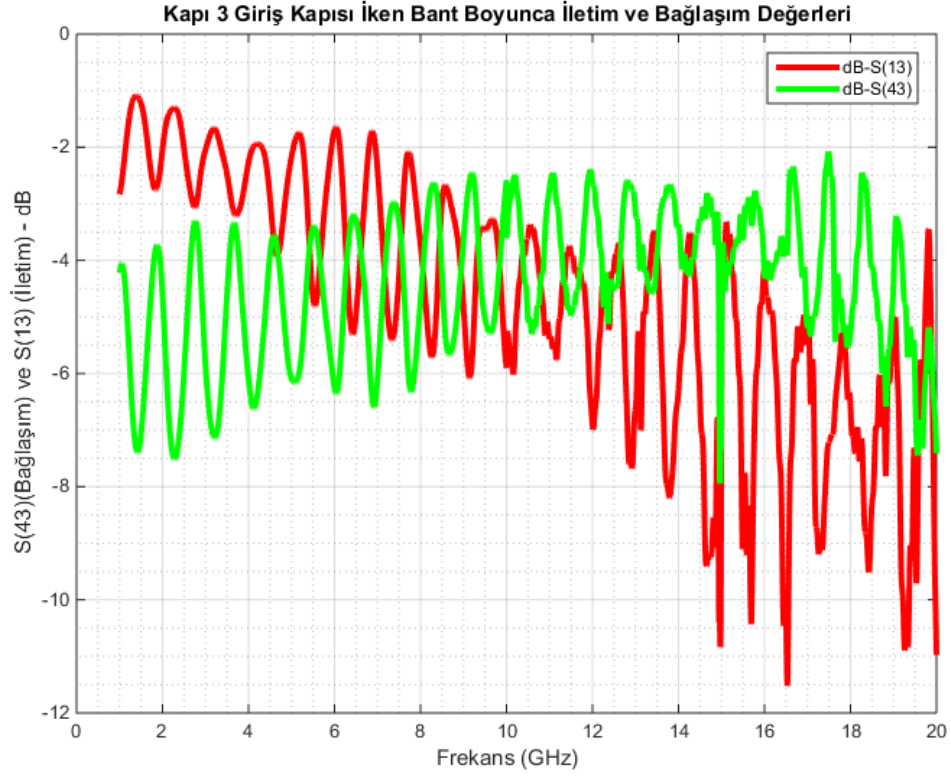
Şekil 4. 21 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği



Şekil 4. 22 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği



Şekil 4. 23 Kapı 2 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği



Şekil 4. 24 Kapı 3 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafiği

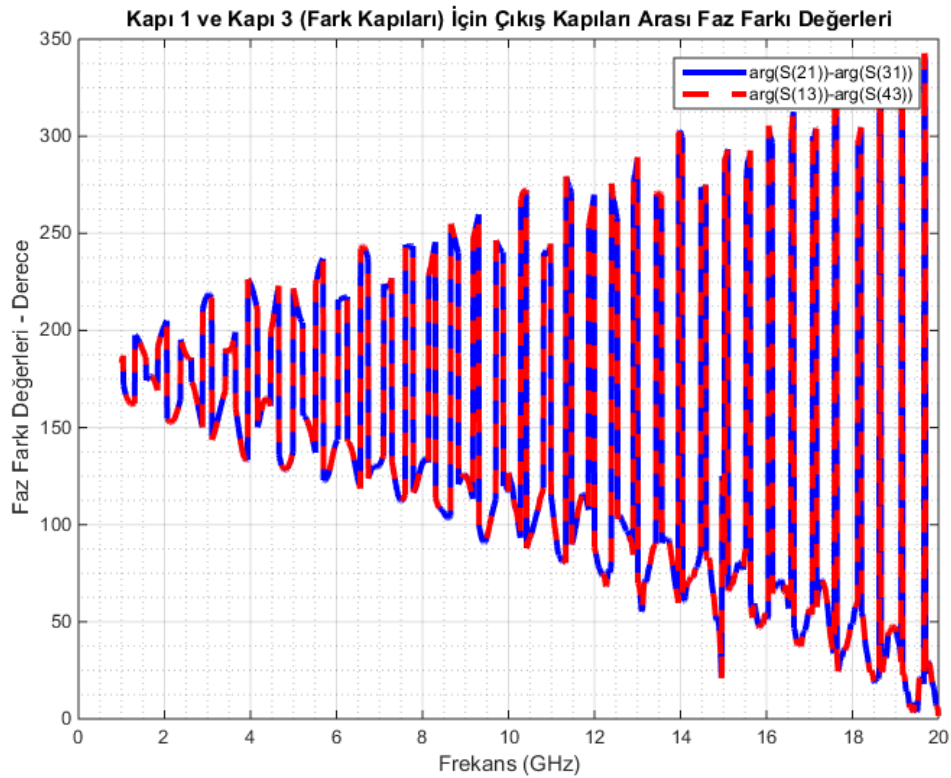
Bağlaştırmacı1 yapısının benzetim analizlerinde de bahsedildiği gibi, bant içerisindeki düşük frekanslarda bağlaşım değerinin düşük olduğu, frekans değeri artarken bağlaşımın daha yükseğe çıkıp iletim değeriyle eşit seviyelere geldiği gözlemlenmektedir. Bağlaştırmacı2 yapısında, düşük frekanslarda beklenen değer olan -3 dB değerine daha yakın bir değer olduğu, frekans yükseldikçe iletim ve bağlaşım değerlerinin eşitlendiği görülmektedir. Bağlaştırmacı1 yapısına göre bağlaşım değeri düşük frekansta daha yüksek olduğundan, iletim ve bağlaşım seviyelerinin eşitlenmesi Bağlaştırmacı1 yapısında görülen frekansa göre daha düşük frekanslarda gerçekleşmiştir.

Grafiklerde, bağlaşım değerindeki dalgacıklanmaların genliğinin ortalama yaklaşık 1 dB, iletim değerindeki dalgacıklanmaların genliğinin ise ortalama 3.7 dB olduğu gözlemlenmektedir. Bağlaştırmacı2 yapısında, bağlaşım performansının daha kuvvetli gerçekleştirildiği görülmektedir. Çapraz geçiş vidasının eklenmesi ile bağlaşım değeri düşük frekansta yükseldiğinden, bağlaşım performansının artırıldığı söylenebilir. Merkez frekans olarak seçilen 10 GHz çevresinde, yaklaşık 2.3 dB değerinde bir araya girme kaybının olduğu ölçülmüştür.

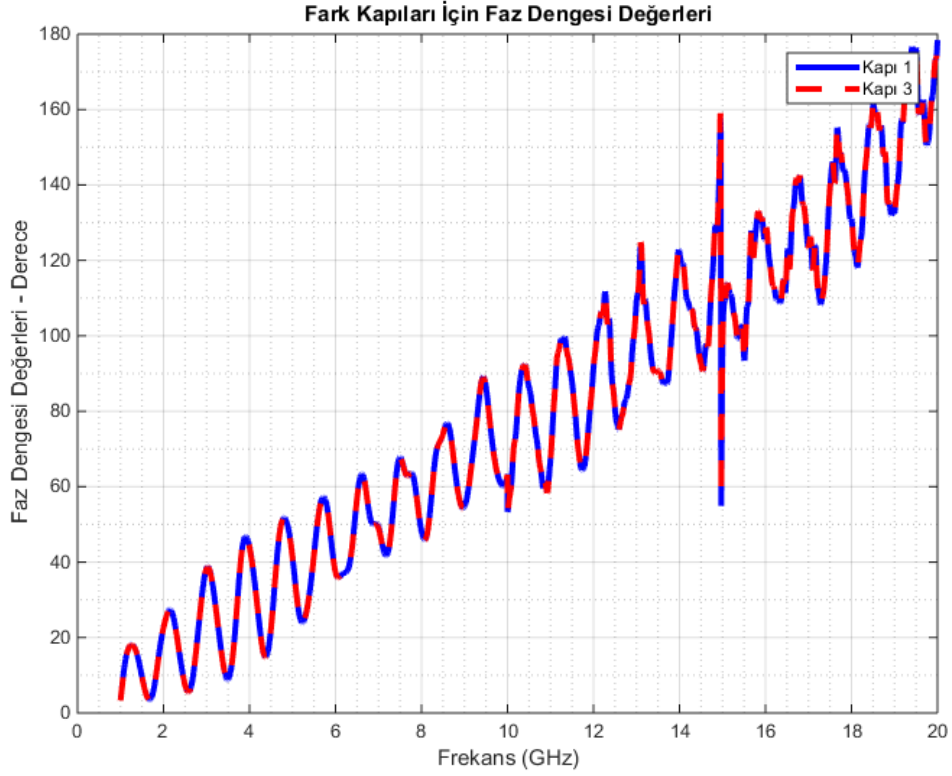
Grafiklerde, bir önceki parametrelerin grafiklerinde görüldüğü gibi, 15 GHz’de oluşan dip noktalar, performans için önemli işaretler vermektedir. Salınımın oldukça yükseldiği yer olan 13.9 GHz’den itibaren, beklenen performansın altında kalacağı beklenmektedir.

Bağlaşım değerlerinin ardından, çıkış kapıları arasındaki faz farkı değerleri incelenecektir. Yapının asimetrik bağlaştırmalı olması sebebiyle, çıkış kapıları arasındaki faz farkının  $0^\circ$  ve  $180^\circ$  olması beklenmektedir.

Şekil 4.25 ve Şekil 4.27’de sırasıyla kapı 1 ve kapı 3 giriş kapısı seçildiğinde çıkış kapıları arasındaki faz farkı, kapı 2 ve kapı 4 giriş kapıları olarak seçildiğinde çıkış kapıları arasındaki faz farkı verilmiştir.



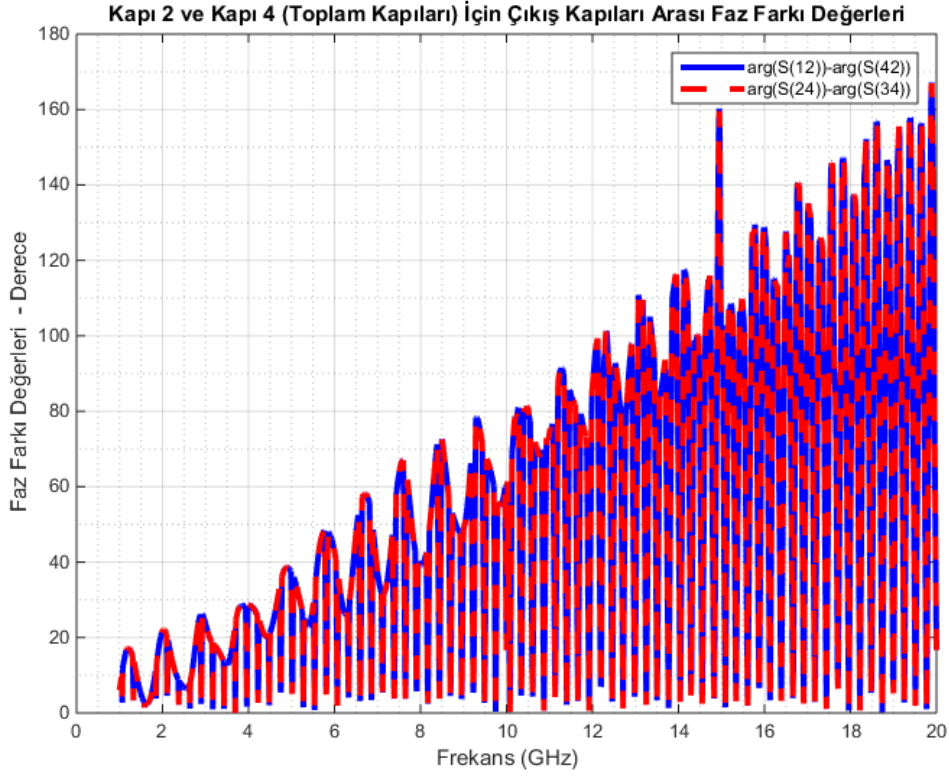
Şekil 4. 25 Fark Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı



Şekil 4. 26 Fark Kapıları İçin Faz Dengesi Grafiği

Şekil 4.25'te verilen grafikte, sırasıyla kapı 1 giriş kapısı seçildiğinde çıkış kapıları olan kapı 2 ve kapı 3 için; kapı 3 giriş kapısı seçildiğinde çıkış kapıları olan kapı 1 ve kapı 4 için faz farkı değerleri verilmiştir. Faz farkı değeri düşük frekanslarda  $180^\circ$  çevresinde değer alırken, yüksek frekansta ise faz dengesi değeri artmaktadır. Şekil 4.14'te ise fark kapıları için faz dengesi değeri verilmiştir. Şekil 4.26'da da, faz dengesi değerinin frekans arttıkça arttığı görülmektedir. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 incelendiğinde, 15 GHz'de görülen dip ve tavan noktaları, performansın bozulmaya başladığını göstermektedir.

Bağlaştırmacı1 yapısına kıyasla, fark kapılarında görülen faz farkı değerinin Bağlaştırmacı2'de daha düşük faz dengesinde olduğu görülmektedir. Bağlaşım performansının iyileşmesiyle, faz dengesi de daha düşük değerlerde olmuştur.

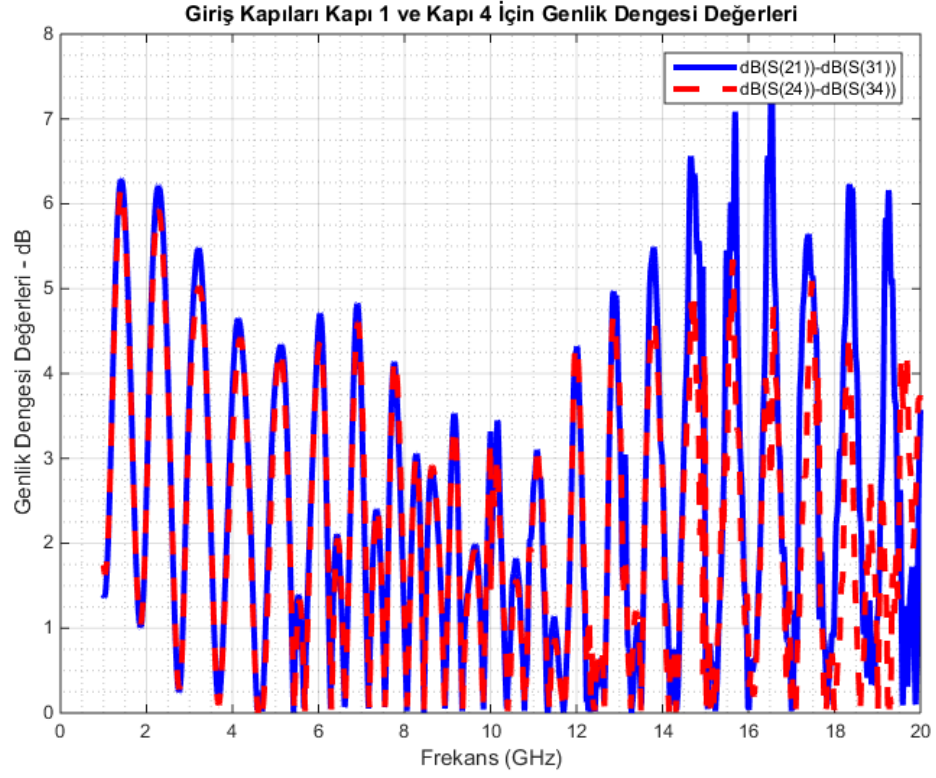


Şekil 4. 27 Toplam Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı

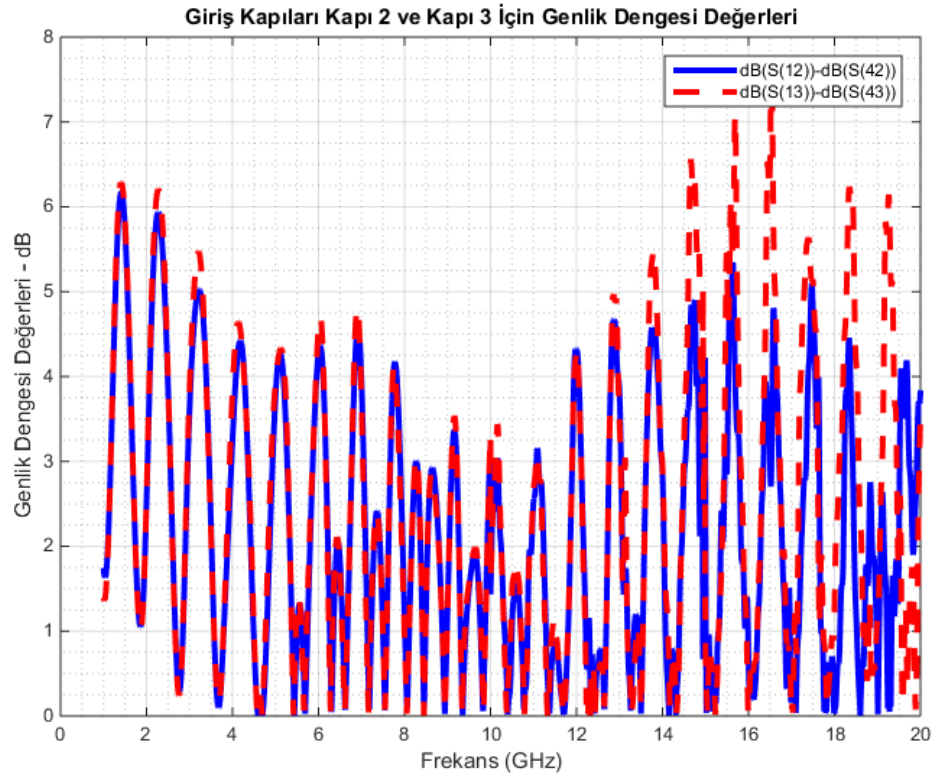
Şekil 4.27’de, toplam kapıları için elde edilen faz farkı değerleri verilmiştir. Toplam kapıları için de, faz farkı değerinin  $0^\circ$  olması beklenmektedir. Düşük frekanslarda, faz farkı değerinin  $0^\circ$  civarında olduğu gözlenirken, faz farkı değeri frekans yükseldikçe artmaktadır.

Merkez frekans olan 10 GHz çevresinde, faz dengesi değeri yaklaşık  $58^\circ$  olarak kaydedilmiştir.  $90^\circ$  faz farkı için eklenen faz kaydırıcılar, merkez frekans olarak 10 GHz’e karşılık gelen dalga boyuna göre hesaplanarak eklenmiştir. Çok kısımlı faz kaydırıcı teorisine göre sentezlenmesi sebebiyle, faz dengesinin frekans arttıkça artması, bu yapıda da beklenmektedir. Bağlaştırmalı yapısında da olduğu gibi, yaklaşık  $15^\circ$  değerinde bir salınımla, faz dengesi değerlerinin arttığı görülmektedir.

Genlik parametresinin analizi için, her bir kapının giriş kapısı seçilmesi ile iletim ve bağlaşım değerleri arasındaki farklar grafiklenerek şekillerde sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4. 28 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Grafiği

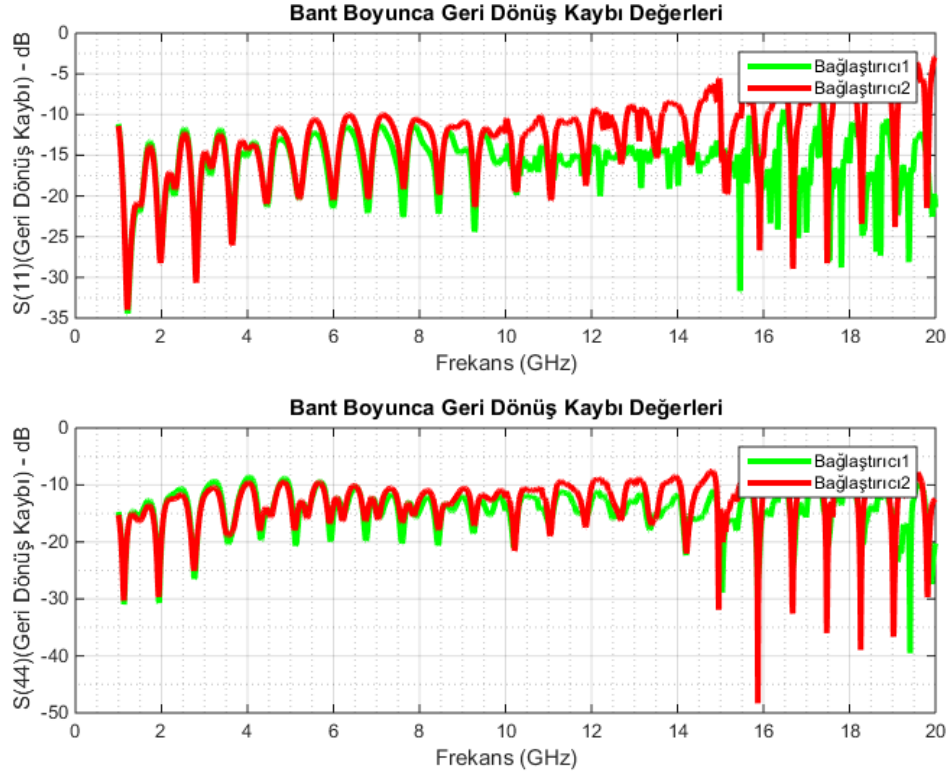


Şekil 4. 29 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Grafiği



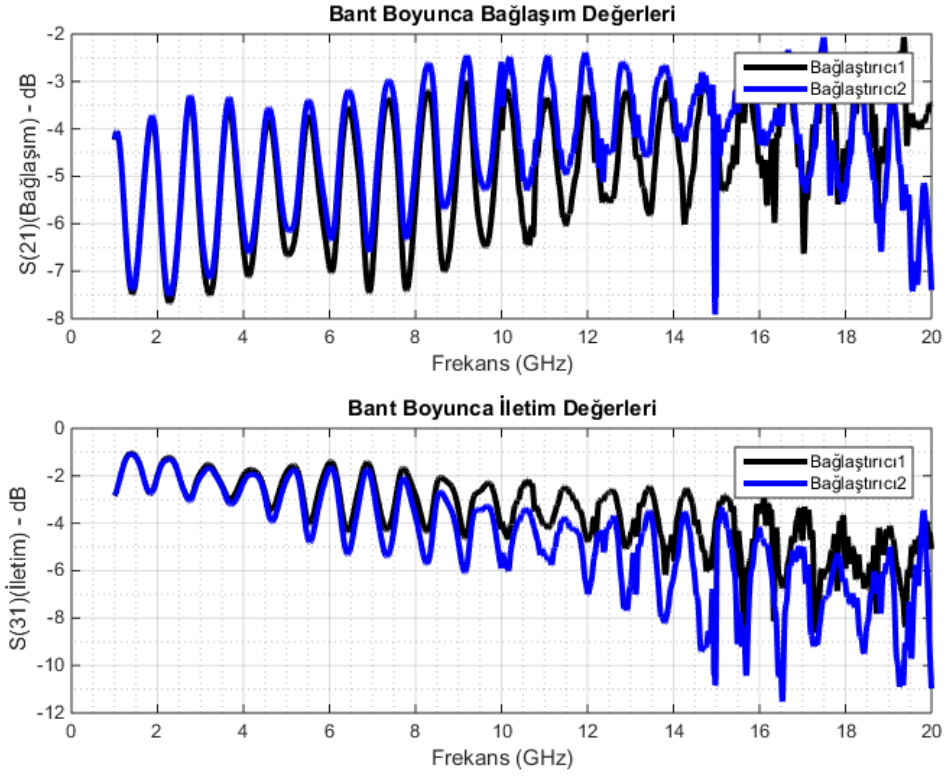
Şekil 4.28’te kapı 1 ve kapı 4 giriş kapısı seçildiğinde elde edilen genlik dengesi grafiği, Şekil 4.29’da ise, kapı 2 ve kapı 3 giriş kapısı seçildiğinde elde edilen genlik dengesi grafiği verilmiştir.

Bağlaştırmacı1 ile Bağlaştırmacı2 yapıları arasında bazı farklar sonuçlar üzerinden görülmektedir. Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de, örnek olarak sırasıyla geri dönüş kaybı, iletim-bağlaşım ve yalıtım değerleri grafik üzerinde karşılaştırılmıştır.

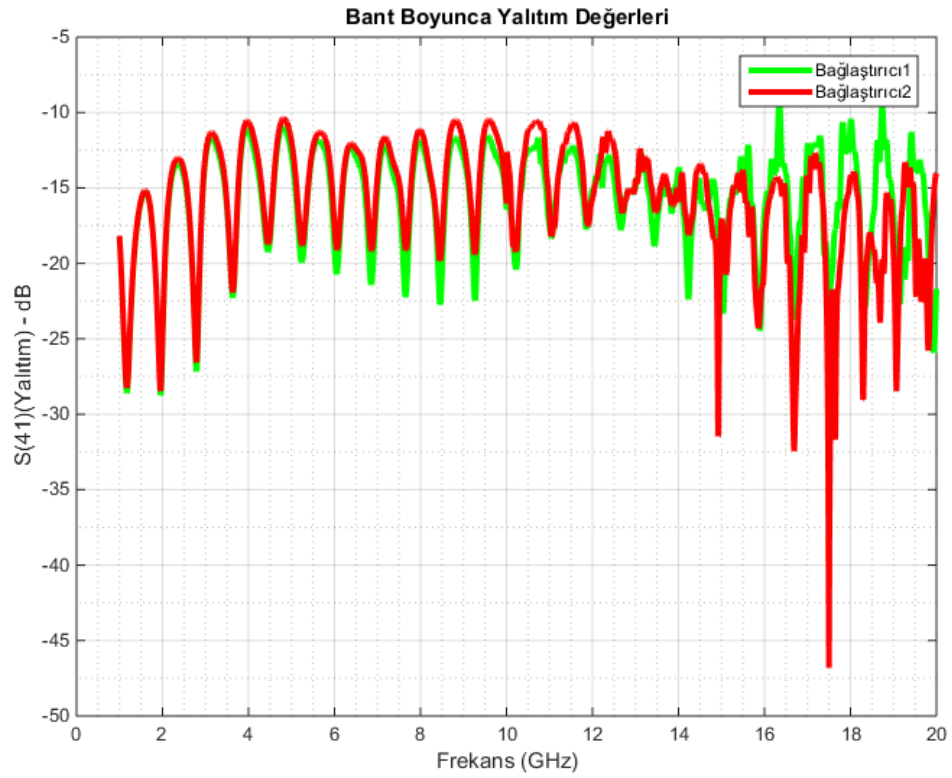


Şekil 4. 30 Bant Boyunca Geri Dönüş Kaybı Grafikleri





Şekil 4. 31 Bağlaştırmacı1 ve Bağlaştırmacı2'de İletim ve Bağlaşım Grafikleri



Şekil 4. 32 Bağlaştırmacı1 ve Bağlaştırmacı2'de Yalıtım Grafikleri

Düşük frekans bölgesinde majör bir değişim görülmediği söylenebilir. Yüksek frekans bölgesinde, geri dönüş kaybı değerleri incelenirse, Bağlaştırmacı2’de performansın daha düşük olduğu söylenebilir. İletim ve bağlaşım değerlerinde, yine düşük frekans bölgesinde benzerlik gözlemlenirken, frekans yükseldikçe Bağlaştırmacı2 için bant genişliğini farklılaşmaktadır. Merkez frekansa yaklaştıkça genlik dengesinin düştüğü; fakat frekans yükselmeye devam ettikçe genlik dengesinin yine arttığı gözlemlenmektedir. Buradan, Bağlaştırmacı2 konfigürasyonunda, seçilen merkez frekanstan daha yüksek frekans bölgesine gidildikçe genlik dengesinin Bağlaştırmacı1 genlik dengesine kıyasla çok daha fazla arttığı ve performans olarak zayıf kaldığı görülmektedir. Merkez frekans seçilen 10 GHz’de genlik dengesinin 2.1 dB, bant boyunca ise ortalama 5 dB olduğu kaydedilmiştir. Bu karşılaştırmada, yalıtım değerlerinin karşılaştırılmasında 1 – 15 GHz bölgesinde değerlerin neredeyse eşit olduğu, 15 GHz’in ardından bozulmaların başladığı gözlemlenmiştir.

#### **4.4 Parametrik Analizler**

KBHB için, parametrelerin değişiminin yapıya ve benzetim sonuçlarına etkisinin, doğru benzetim ortamının kurulmasına ilişkin parametreler ve çözüm yönteminin belirlenmesinin, bu parametrelerin ve yöntemlerin değişiminin de aynı şekilde benzetim sonuçlarına etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla, çalışma içerisinde parametrik analizlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçlarla birkaç parametre ve etken üzerinde, parametrik taramalar yapılmıştır.

İlk başlıkta yer alan analiz, Bağlaştırmacı1 yapısı üzerinde, “Time Domain Solver” kullanılırken seçilen hücre boyutunun çözüme ve benzetim sonuçlarına etkisinin gözlemlenmesinde kullanılmıştır.

İkinci başlıkta yer alan analiz, Bağlaştırmacı2 yapısında kullanılan “Gap” parametresi için parametrik tarama yapılmıştır. “Gap” parametresinin değerinin belirlenmesi ve parametrenin aldığı farklı değerlerin benzetim üzerinde etkisini gözlemlemek amacıyla kullanılmıştır.

Üçüncü ve son analiz ise, Bağlaştırmacı1 yapısı üzerinde, “Frequency Domain Solver” kullanılarak çözüm yöntemlerinin farklılaşmasıyla benzetim sonuçlarının nasıl etkilendiğinin gözlemlenmesinde kullanılmıştır.

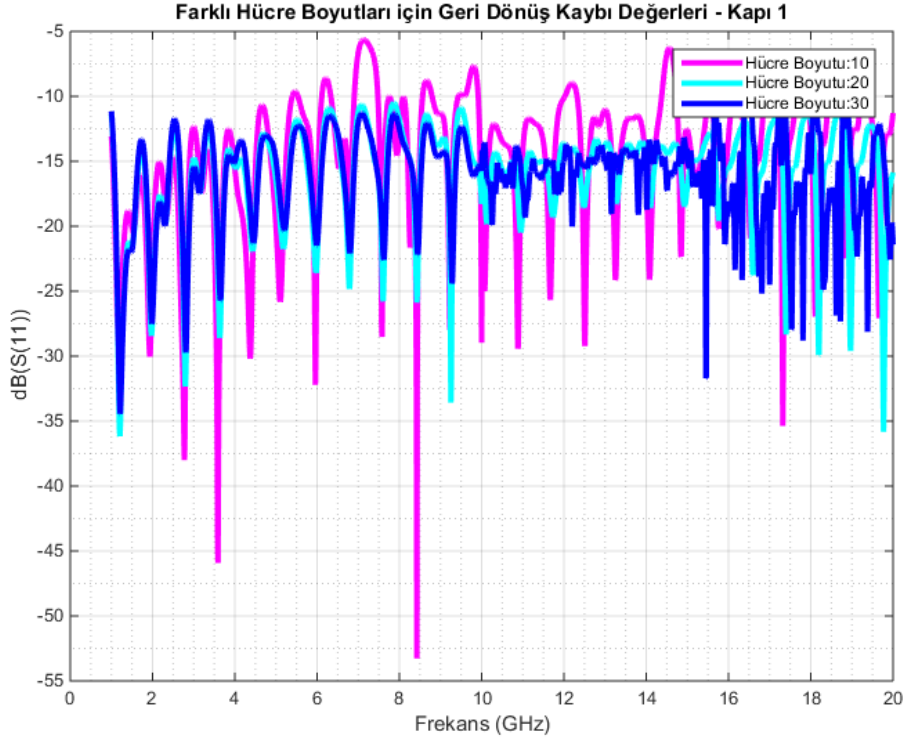
#### 4.4.1 Hücre Boyutunun Etkileri

Hücre boyutunun etkilerinin görülebilmesi için Bağlayıcı1 yapısı 3B model olarak kullanılmıştır. “Time Domain Solver” için, çözüm zamanda sonlu farklar metodu (FDTD) ile yapılmaktadır. Bu yöntemde hücre boyutu, çözümün doğruluğu için önem arz etmektedir. İletim hatları üzerine ne kadar hücre düşerse, çözümün doğruluğu o kadar yüksek olacaktır. Burada hücre boyutu, dalga boyu cinsinden oran olarak ifade edilmektedir. Bu parametrik analizde, hücre boyutu 10 birim, 20 birim ve 30 birim olarak seçilmiştir. Hücre boyutunda birim olarak ifade edilen kısım, dalga boyunun kesrini ifade etmektedir. Örneğin, hücre boyutunun 10 birim olması,  $\lambda/10$  boyutunda olmasını ifade etmektedir.

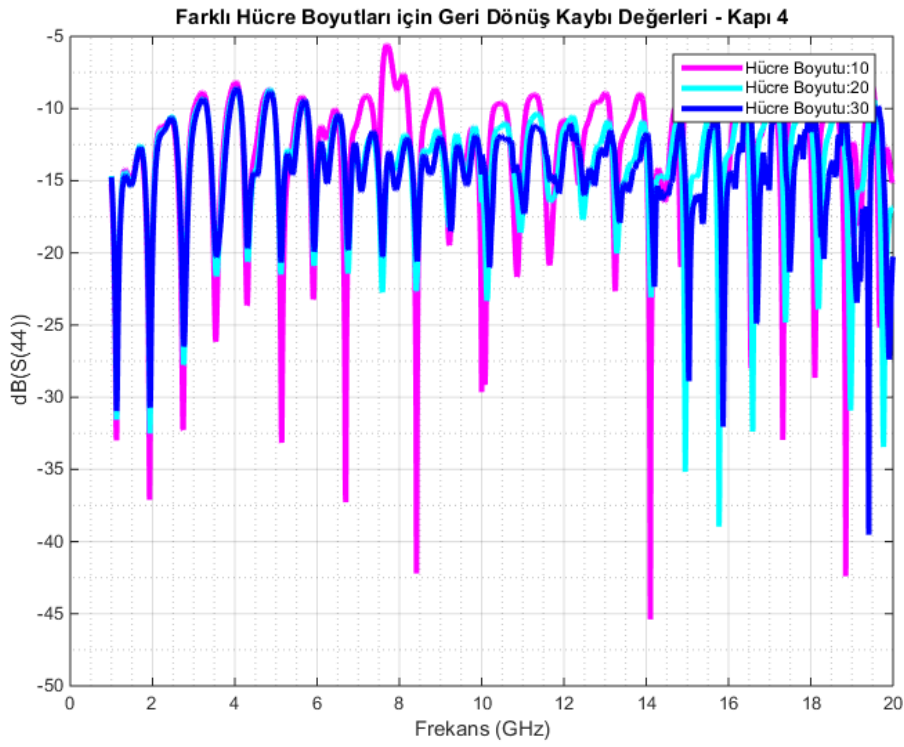
Analiz için koşturulan benzetimlerin sonuçları, her bir kapı giriş kapısı seçildiğinde oluşan sonuçlar için verilmiştir. Benzetim sonuçlarından elde edilen veriler kaydedilerek, MATLAB yazılımı üzerinde grafikleri çizdirilmiştir. Yapı karşılıklı ve simetrik olduğu için, birbirine eşit olan parametrelerin yalnızca biri grafikler üzerinde gösterilmiştir.

Farklı hücre boyutları için koşturulan benzetimlerin sonuçları, her bir kapı için ayrı grafikler çizdirilerek verilmiştir.

Öncelikle, yapıda bulunan toplam ve fark kapıları için geri dönüş kaybı değerleri, sırasıyla grafiklerde verilmiştir.



Şekil 4. 33 Farklı Hücre Boyutları İçin Geri Dönüş Kaybı Grafikleri ( $S_{11}$ )

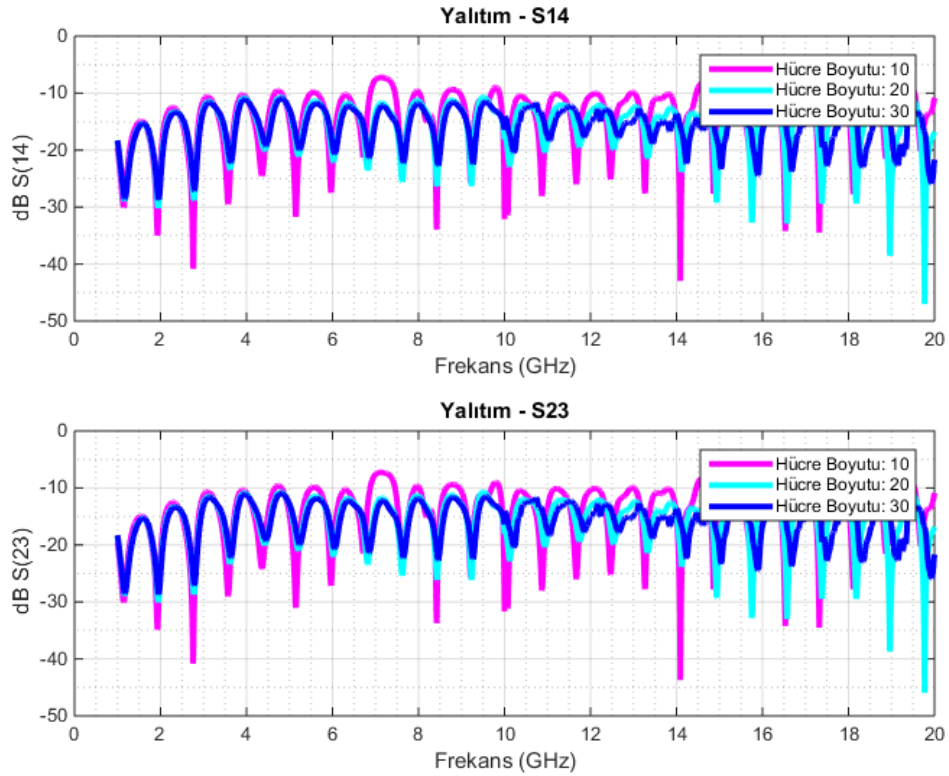


Şekil 4. 34 Farklı Hücre Boyutları İçin Geri Dönüş Kaybı Grafikleri ( $S_{44}$ )

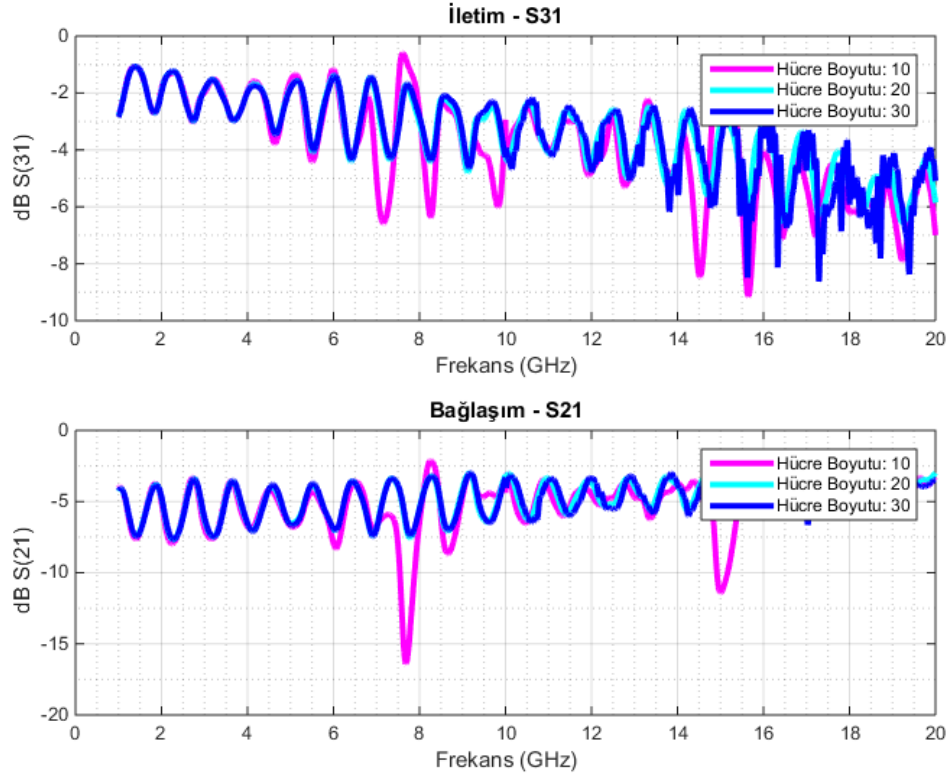
Yukarıda verilen grafiklerde farklı hücre boyutlarıyla elde edilen değerlerin birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Çözüm yöntemi gereği değerlerin farklı olması, ancak belli bir hücre boyutu değerinden sonra sabitlenmesi beklenmektedir.

İki kapı için de elde edilen grafiklere bakıldığında, hücre boyutu 10 iken çözümlerin nihai sonuçları için güvenilir olmadıkları açıktır. Hücre boyutu 10 iken yapılan hücre dağılımı, iletim hattını çözümlmek için yeterli kalmamaktadır. Belli frekans noktalarında çözümlerin dip noktalarının oldukça düşük olması, dikkat çeken başka bir noktadır. Frekans yükseldikçe dalga boyu küçüldüğü için, çözümün doğruluğu giderek azalmakta ve yapının çalışabildiği bant genişliği için de doğru sonuçlar vermemektedir.

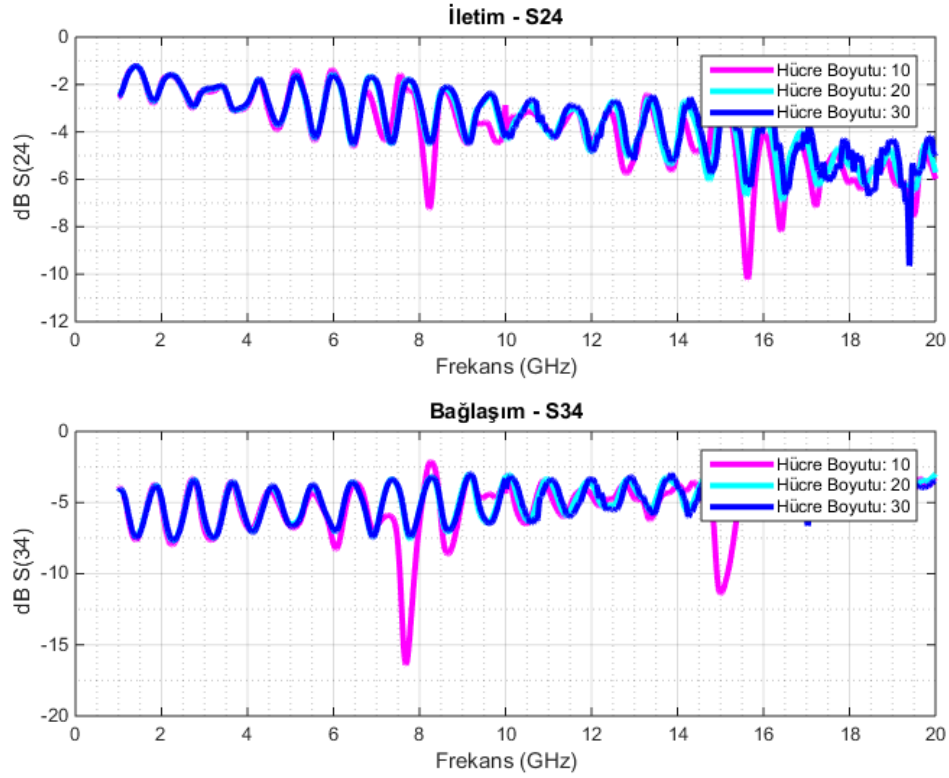
Şekil 4.35'te, yalıtım parametresinin hücre boyutuna göre nasıl değiştiği verilmiştir. Yalıtım parametresi için de, hücre boyutu 10 iken çözümün kesin sonuçları verilememektedir. Hücre boyutu 30 iken hassasiyetin daha yüksek olduğu sonuçların elde edildiği söylenebilmektedir.



Şekil 4. 35 Farklı Hücre Boyutları İçin Yalıtım Parametre Grafikleri



Şekil 4. 36 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafikleri



Şekil 4. 37 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Grafikleri

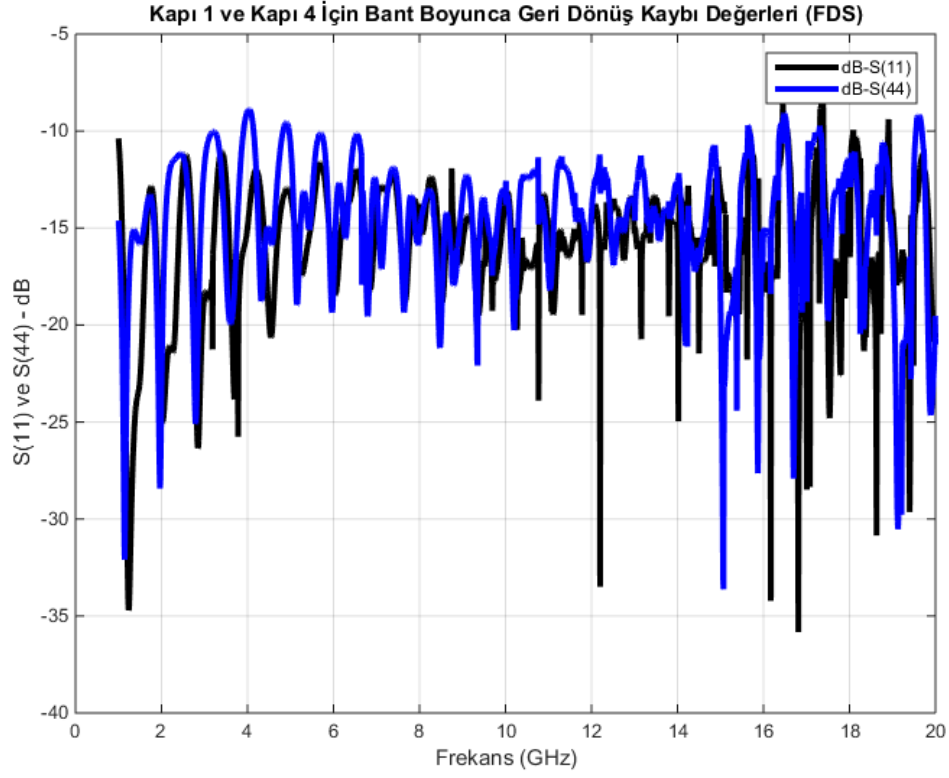
Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de, toplam ve fark kapıları giriş kapıları olarak seçildiğinde, çıkış kapılarında görülen iletim ve bağlaşım değerlerinin grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde ortak olarak, hücre boyutu 10 iken 6 – 9 GHz arası çözüm sonuçlarında hata olduğu görülmektedir.

Hücre boyutu etkilerinin tartışılması sonucunda, hücre boyutu 10 iken doğru çözümlerin oluşamadığı, hücre boyutu 20 ve 30 iken çözümler arasında dramatik bir fark olmadığı söylenebilir. Bu etkilerin analizinden sonra nihai benzetim, çözümlerde ölçüm sonuçlarına en yakın ve doğru sonuç olabilmesi amacıyla, hücre boyutu 30 seçilerek koşturulmuştur.

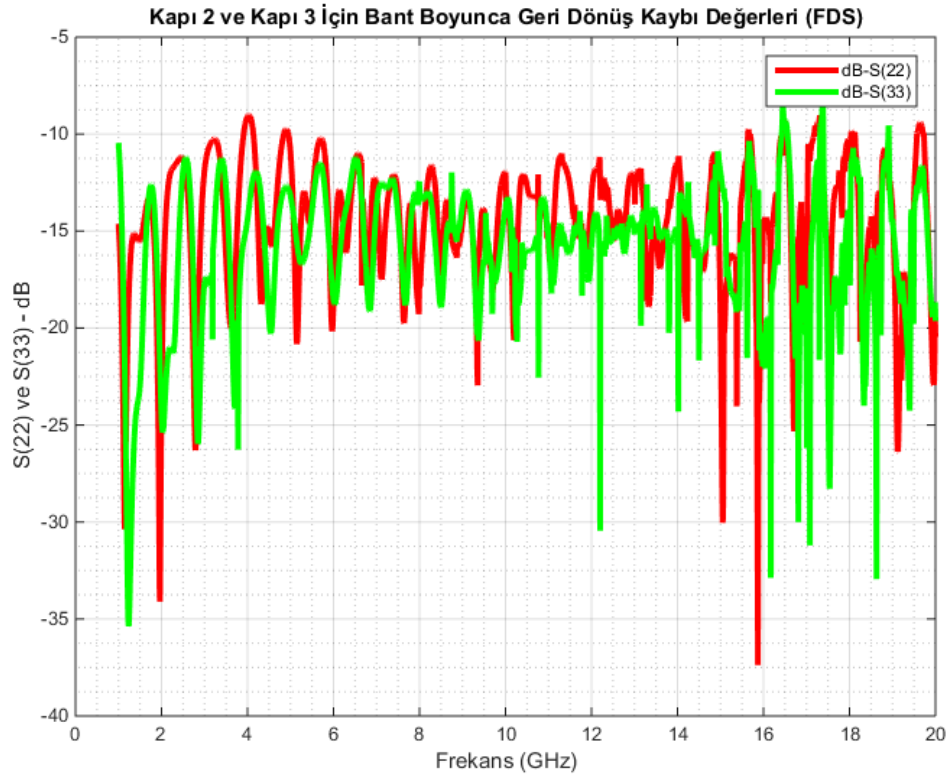
#### **4.4.2 Çözüm Yönteminin Etkileri**

CST® yazılımında, doğru benzetim sonuçları için farklı yapılara farklı çözümler bulunmaktadır. “Time Domain Solver” çözümünde zamanda sonlu farklar (FDTD) metodu kullanılırken, “Frequency Domain Solver” çözümünde ise sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılmaktadır. Time Domain Solver genellikle elektriksel olarak büyük ve geniş bantlı yapılar için kullanılması önerilirken, Frequency Domain Solver elektriksel olarak küçük ve dar bantlı yapılar için kullanılması önerilmektedir.

Çözüm yönteminin etkisinin analizinde de 3B model olarak Bağlaştırmacı11 yapısı kullanılmıştır. Frequency Domain Solver çözümünde hücre boyutu belirlenmemiş, uyumlanabilir hücre eklentisi kullanılmıştır. Bu eklentide, yapının çözümü için yapılan hücrelemenin belli bir bölümden ziyade, yapının geometrisine göre uyarlanması prensibi mevcuttur.



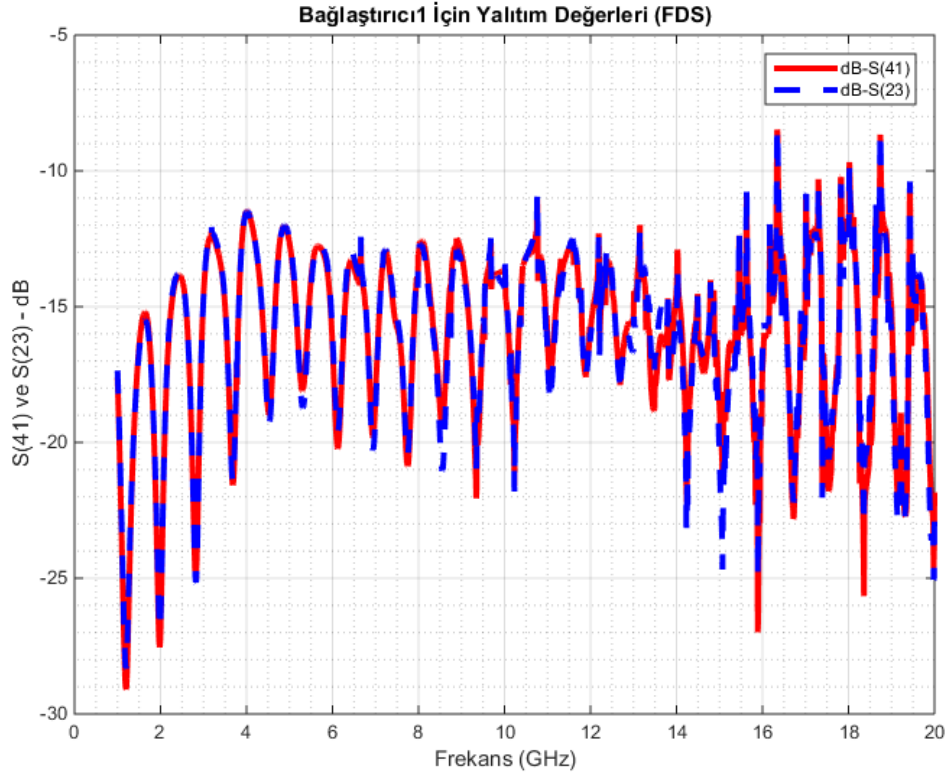
Şekil 4. 38 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Geri Dönüş Kaybı Grafikleri (FDS)



Şekil 4. 39 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Geri Dönüş Kaybı Grafikleri

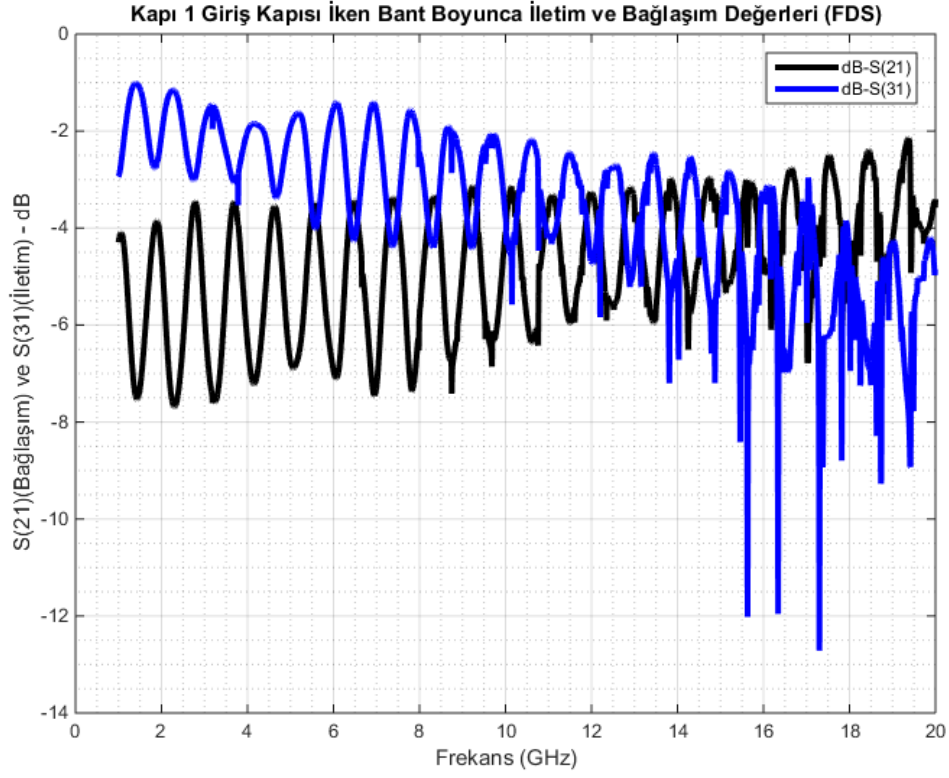


Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da, FDS kullanılarak koşturulan benzetimde, her bir kapı için geri dönüş kaybı değerleri verilmiştir. TDS kullanılarak yapılan çözümlerde elde edilen geri dönüş kaybı grafikleriyle kıyaslandığında, neredeyse birbirine yakın sonuçlar olduğu görülmektedir.

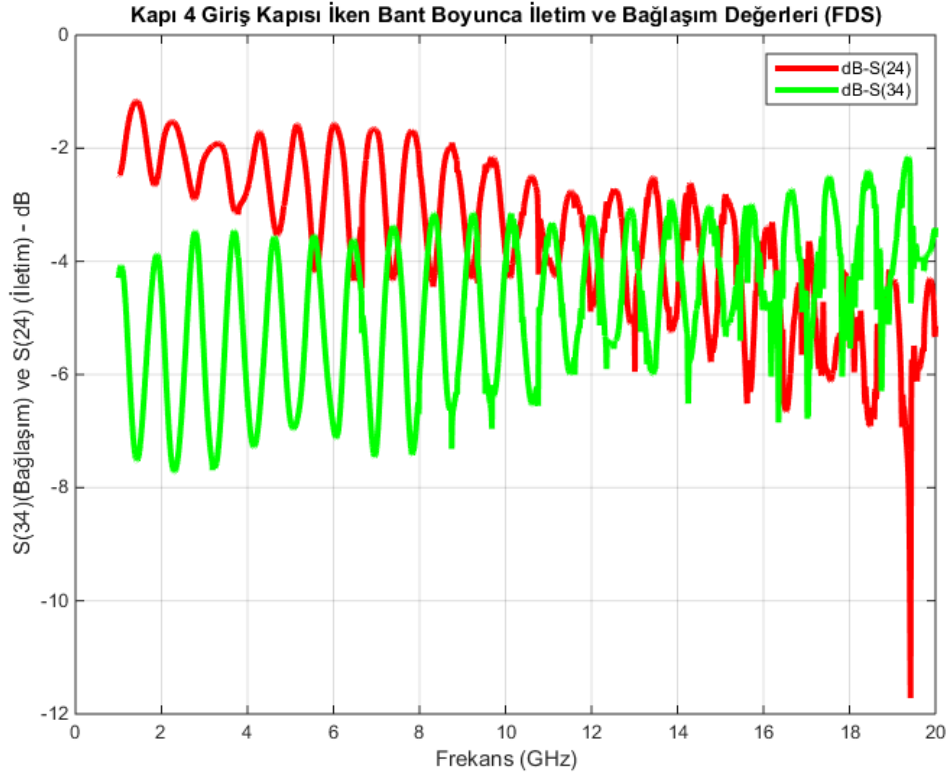


Şekil 4. 40 Yalıtım Parametresi Grafikleri

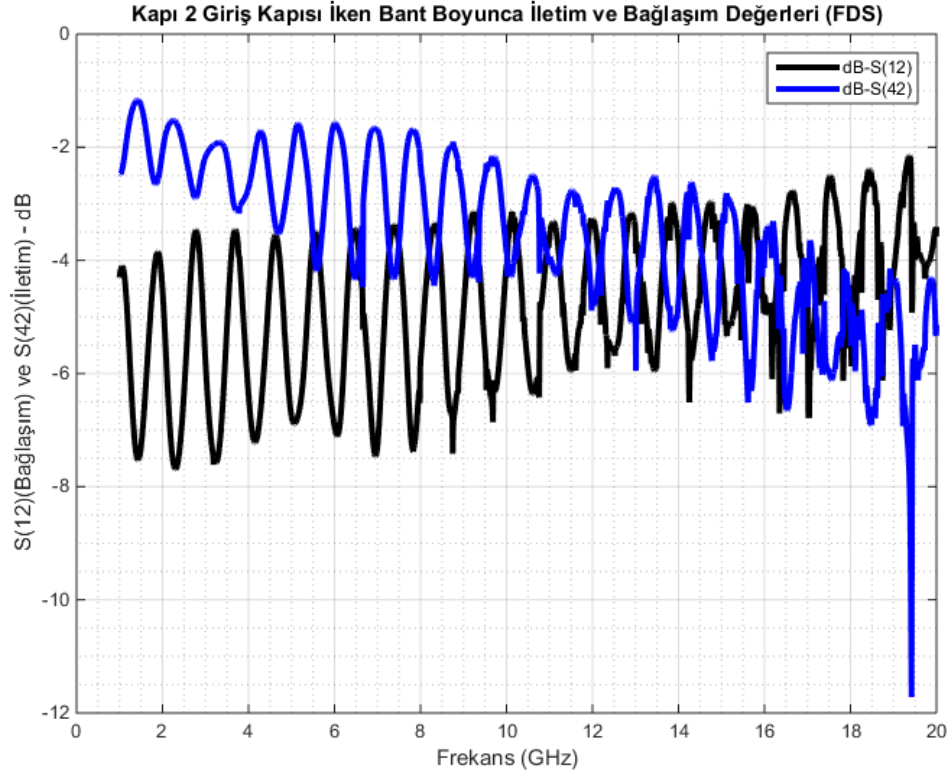
Şekil 4.40’ta, yalıtım parametresinin grafiği verilmiştir. TDS çözümü sonuçları ile karşılaştırıldığında 16 GHz ve sonrası için FDS çözümlerinde keskin tepe noktaları ve daha derin dip noktalarının olduğu görülmektedir. Yalıtım parametresi için elde edilen değerlerin, TDS çözümüne oldukça benzer olduğu görülmektedir.



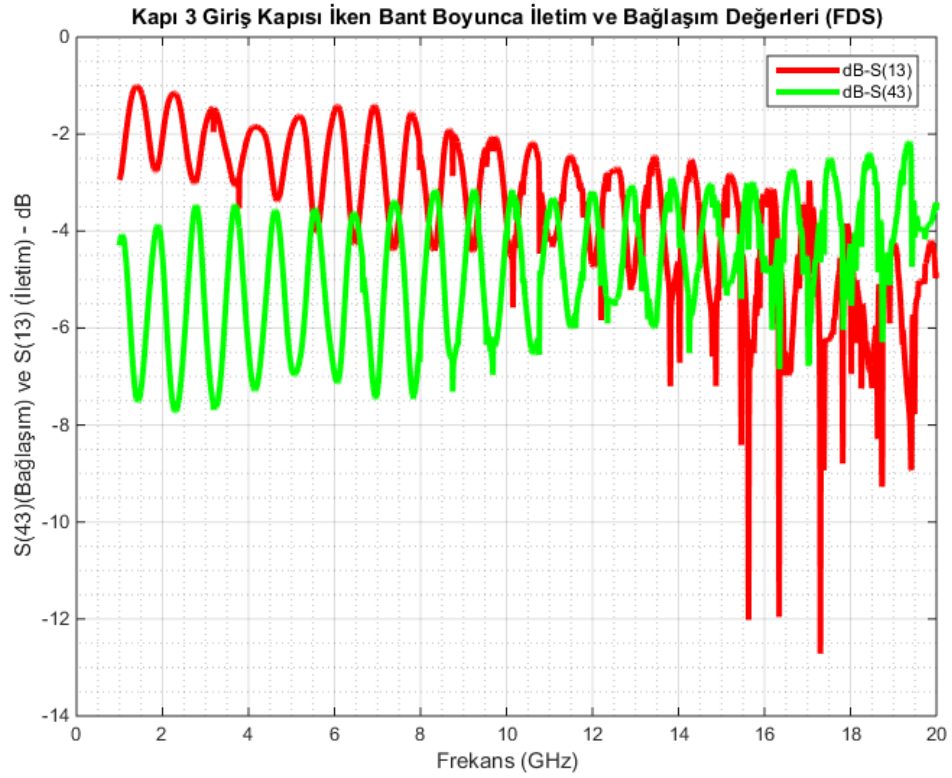
Şekil 4. 41 Kapı 1 Giriş Kapısı İken Bant Boyunca İletim ve Bağlaşım Grafikleri



Şekil 4. 42 Kapı 4 Giriş Kapısı İken Bant Boyunca İletim ve Bağlaşım Grafikleri



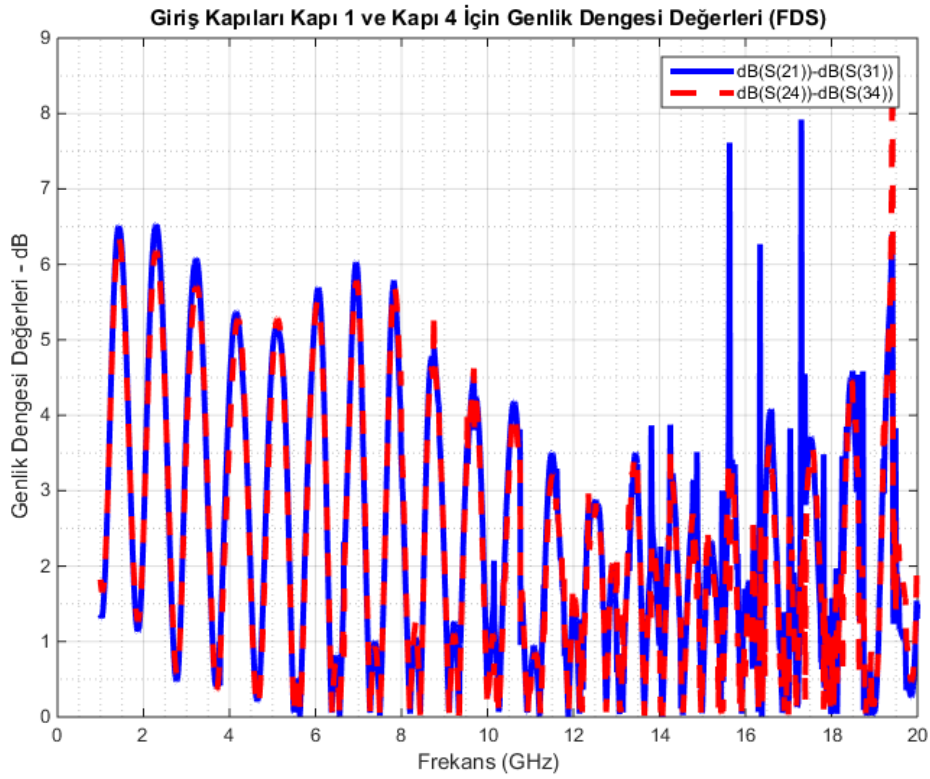
Şekil 4. 43 Kapı 2 Giriş Kapısı İken Bant Boyunca İletim ve Bağlaşım Grafikleri



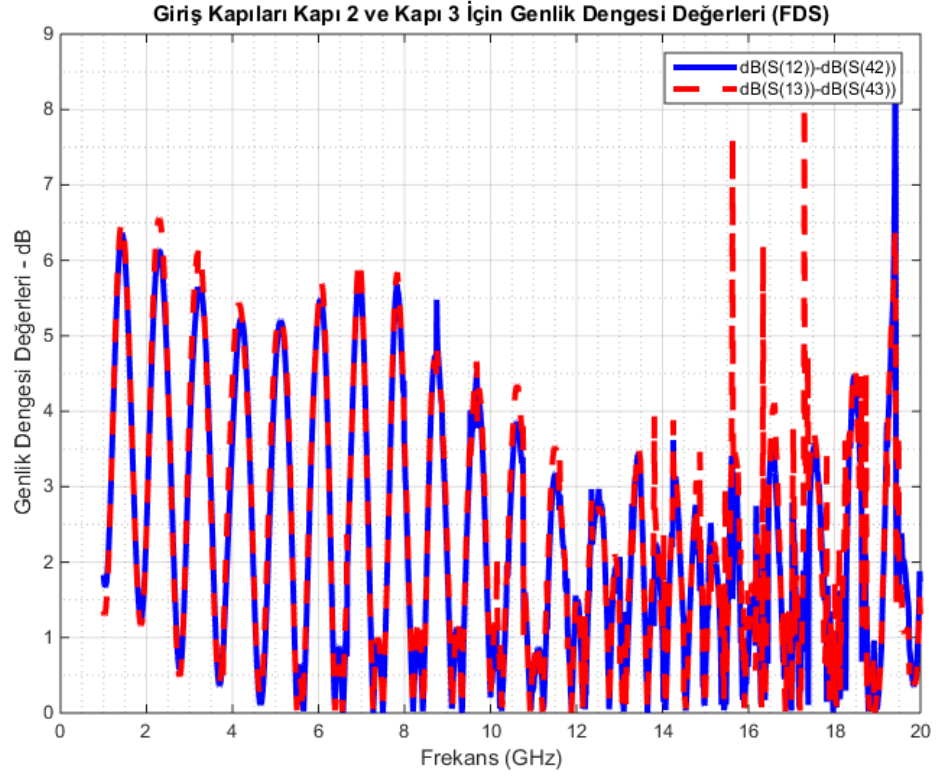
Şekil 4. 44 Kapı 3 Giriş Kapısı İken Bant Boyunca İletim ve Bağlaşım Grafikleri

Şekil 4.41, Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’te, her bir kapı giriş kapısı seçildiğinde elde edilen bağlaşım ve iletim değerlerinin FDS çözümleri verilmiştir. İki çözüm metodu için elde edilen grafiklerin karşılaştırılmasında, FDS çözümünde 16 – 20 GHz bandında elde edilen değerlerde daha derin dip noktaları olduğu görülmüştür. Bu fark haricinde, çözümlerin ve değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülebilir.

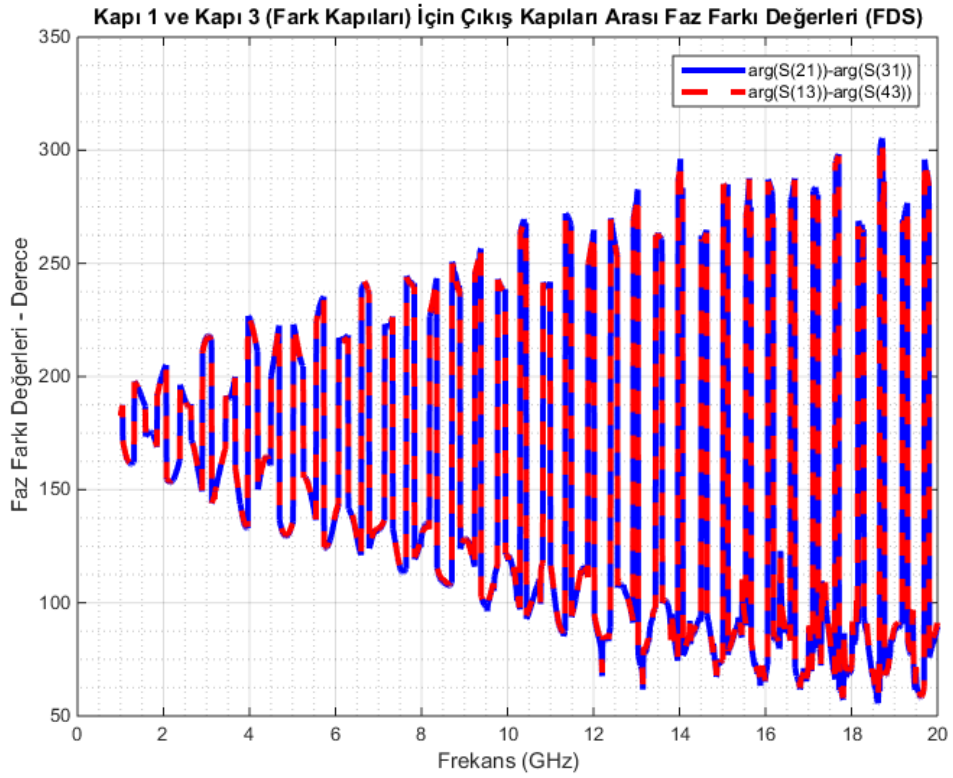
Şekil 4.45 ve Şekil 4.46’da, giriş kapıları için elde edilen genlik dengesi değerleri verilmiştir. Yukarıda da bahsedildiği gibi, iletim değerlerinin 16 – 20 GHz bandında dip noktalara sahip olmasıyla, genlik dengesi değerleri artmıştır. Bu bant haricinde, incelenen değerlerin neredeyse birbiriyle eş oldukları gözlemlenmiştir.



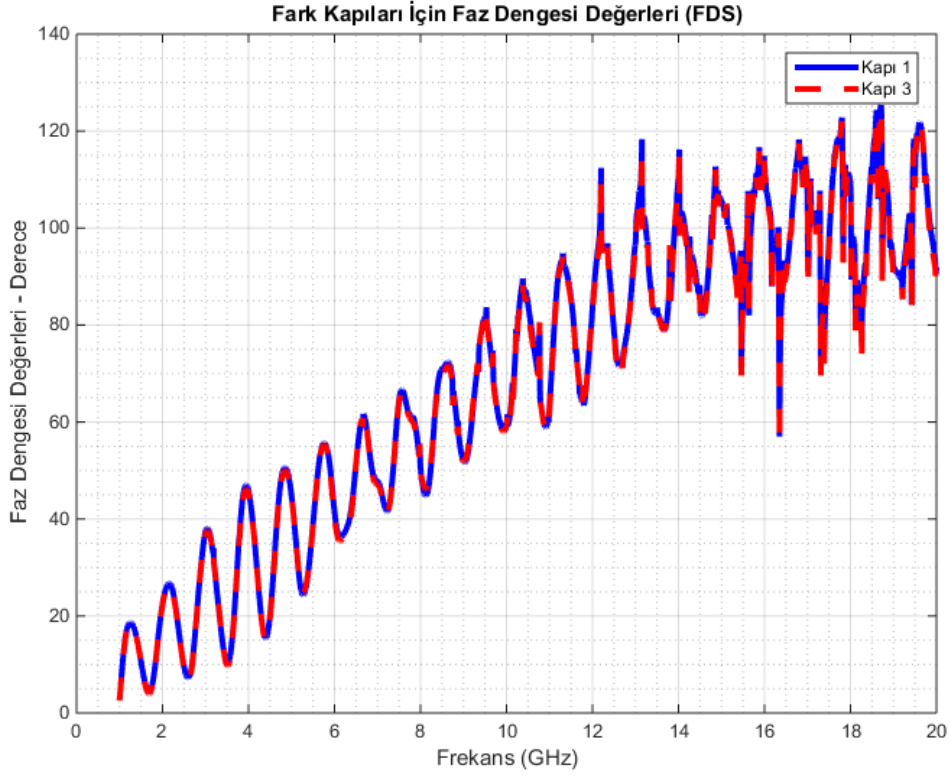
Şekil 4. 45 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Grafikleri



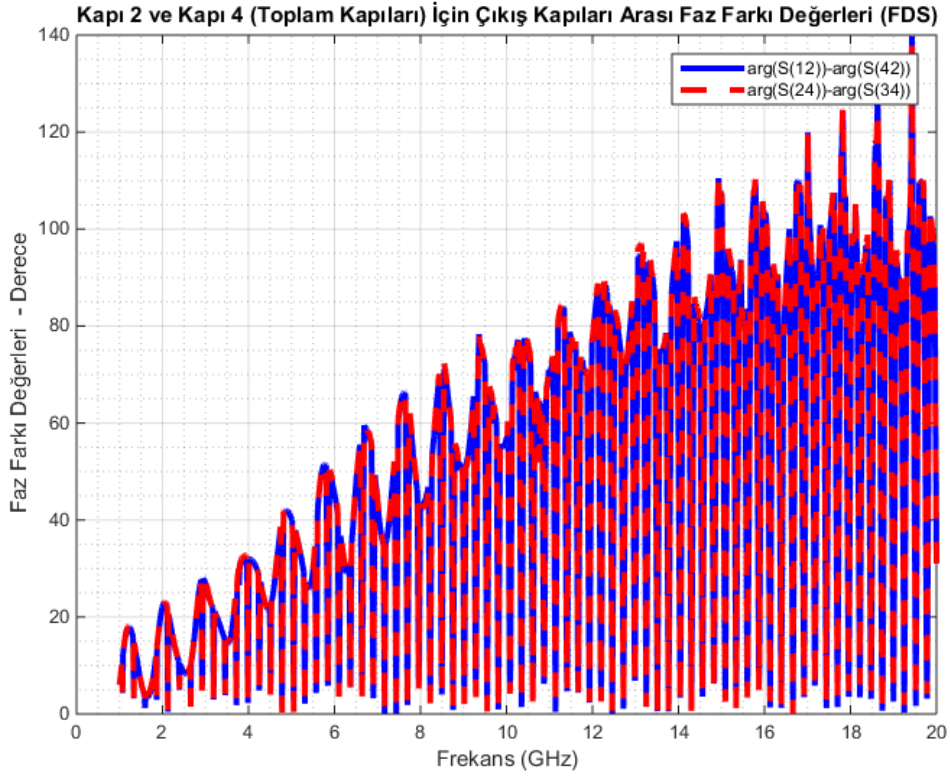
Şekil 4. 46 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Grafikleri



Şekil 4. 47 Fark Kapıları İçin Faz Farkı Grafikleri



Şekil 4. 48 Faz Dengesi Değerleri Grafikleri



Şekil 4. 49 Toplam Kapıları İçin Faz Farkı Grafikleri

Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’da, devrenin FDS çözümleri için faz farkı ve faz dengesi değerleri incelenmiştir. Şekil 4.47’de, fark kapıları olarak isimlendirilen kapı 1 ve kapı 3 için faz farkı değerlerinin FDS çözümleri verilmiştir. TDS çözümleri ile karşılaştırıldığında, 12.2 GHz frekansına kadar sonuçların birbiriyle oldukça benzer olduğu görülmektedir. Şekil 4.48’de verilen faz dengesi grafiğinde daha kolay görülebileceği gibi, 12.2 – 20 GHz arasında faz dengesinin TDS çözümlerine göre daha düşük olduğu okunmaktadır. Şekil 4.49’da verilen toplam kapıları için faz farklarında ise, FDS çözümlerinin frekans yükseldikçe TDS çözümlerine oranla daha da yüksek faz farkına sahip olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, TDS çözümleriyle FDS çözümleri arasında majör farklılıklar görülmemektedir. Bu farkın en büyük sebebi, daha önce de belirtildiği gibi uyumlanabilir hücre eklentisidir. Uyumlanabilir hücre eklentisinin kullanılmasıyla, TDS ve FDS çözümlerinin birbirlerine yakın değerlere sahip olduğu görülebilmektedir.

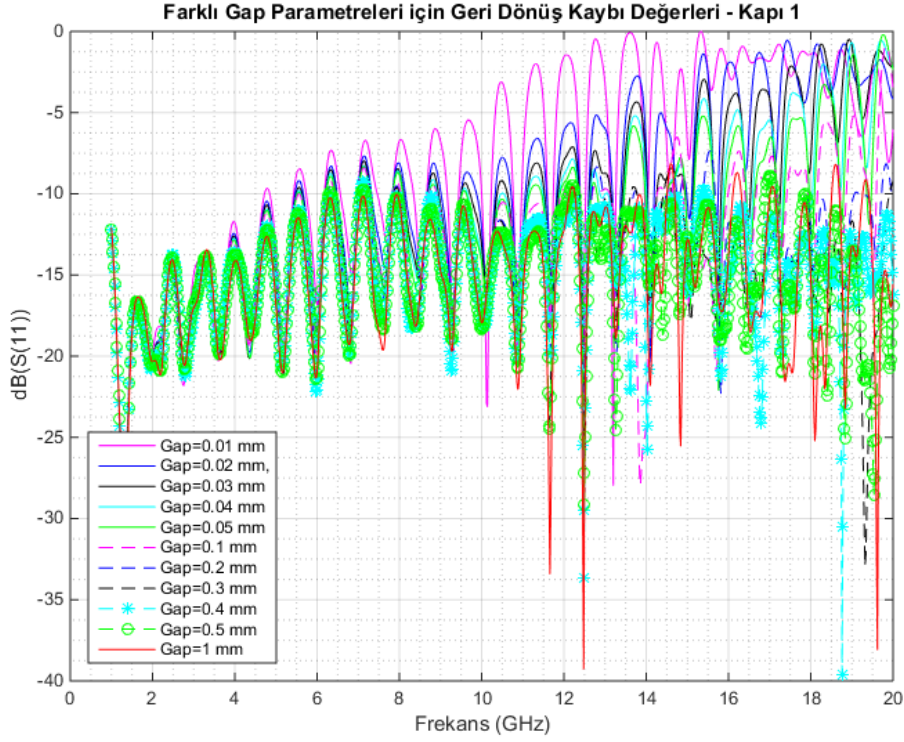
#### **4.4.3 Gap Parametresinin Etkileri**

Çapraz geçiş deliğinin sıkı bağlaşım noktasına uzaklığını ifade eden parametre üzerinden yapılan parametrik taramanın sonuçları, bu başlık altında verilecektir. Parametrenin aldığı değerler grafikler üzerinde verilmiştir.

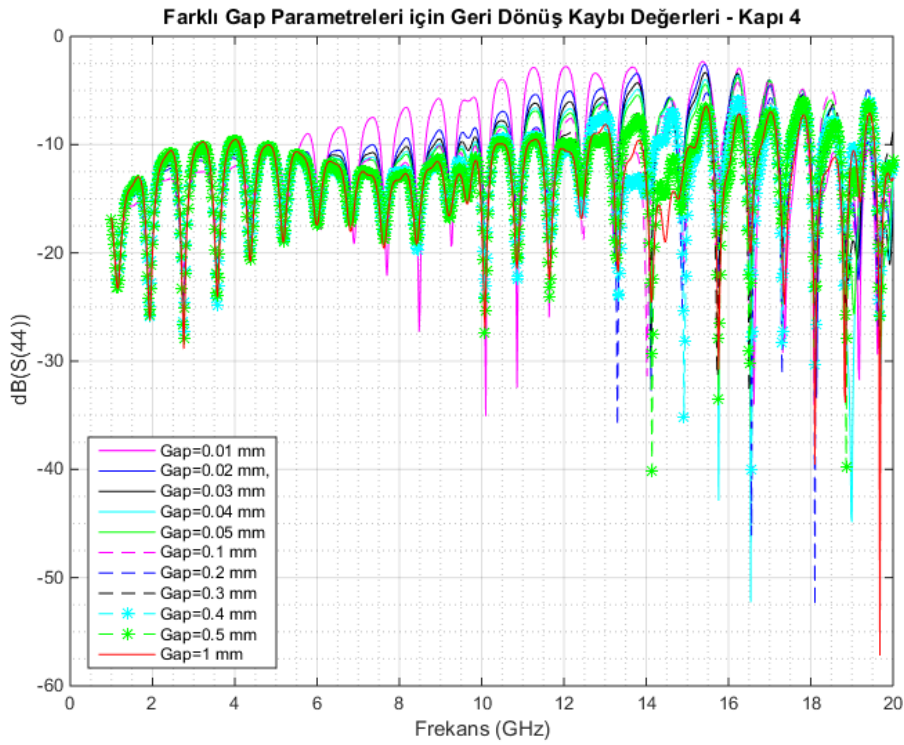
Çözümler TDS çözümüyle yapılmış ve bant boyunca 951 noktada örneklenmişlerdir. Çözüm süresinin kısaltılması amacıyla yalnızca kapı 1 ve kapı 4 giriş kapısı olarak seçilerek uyarım yapılmış ve hücre boyutu 10 olarak seçilmiştir.

Bu karşılaştırmada, ilk olarak kapı 1 ve kapı 4 için geri dönüş kaybı değerleri verilmiştir.





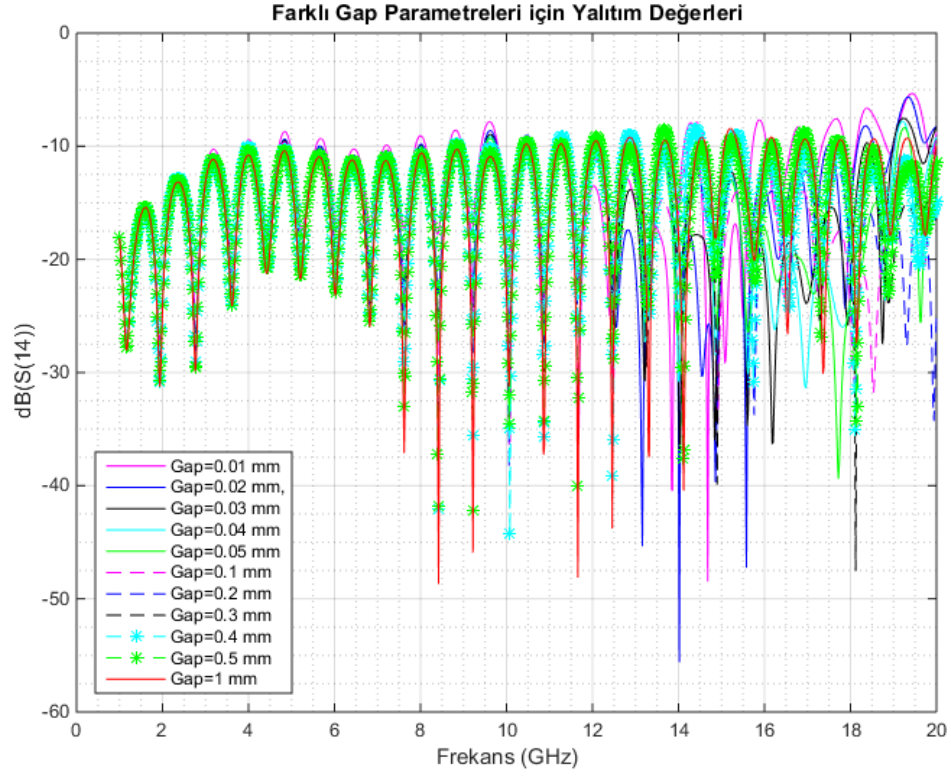
Şekil 4. 50 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin  $S_{11}$  Grafikleri



Şekil 4. 51 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin  $S_{44}$  Grafikleri

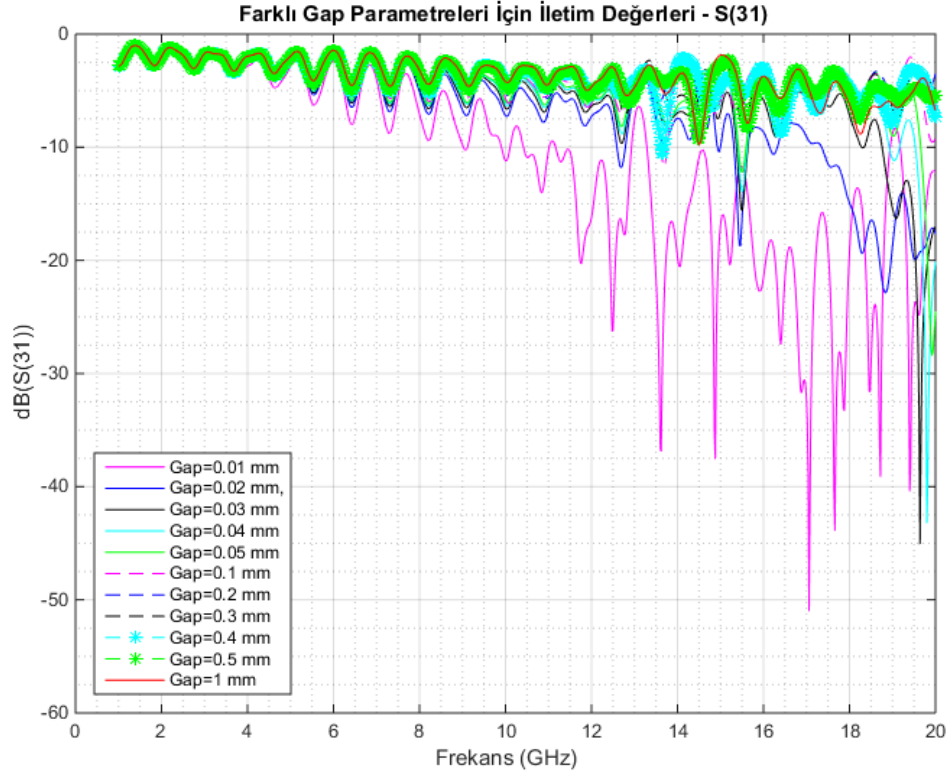


Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de, düşük frekanslarda dramatik bir fark gözlemlenmezken, frekans arttıkça parametrenin değerine göre geri dönüş kaybı değerlerinin birbirinden çok farklı olduğu gözlemlenmiştir. Gap değeri 0.1 mm ve sonrasında, bant boyunca dramatik bir değişim olmadığı görülmektedir.

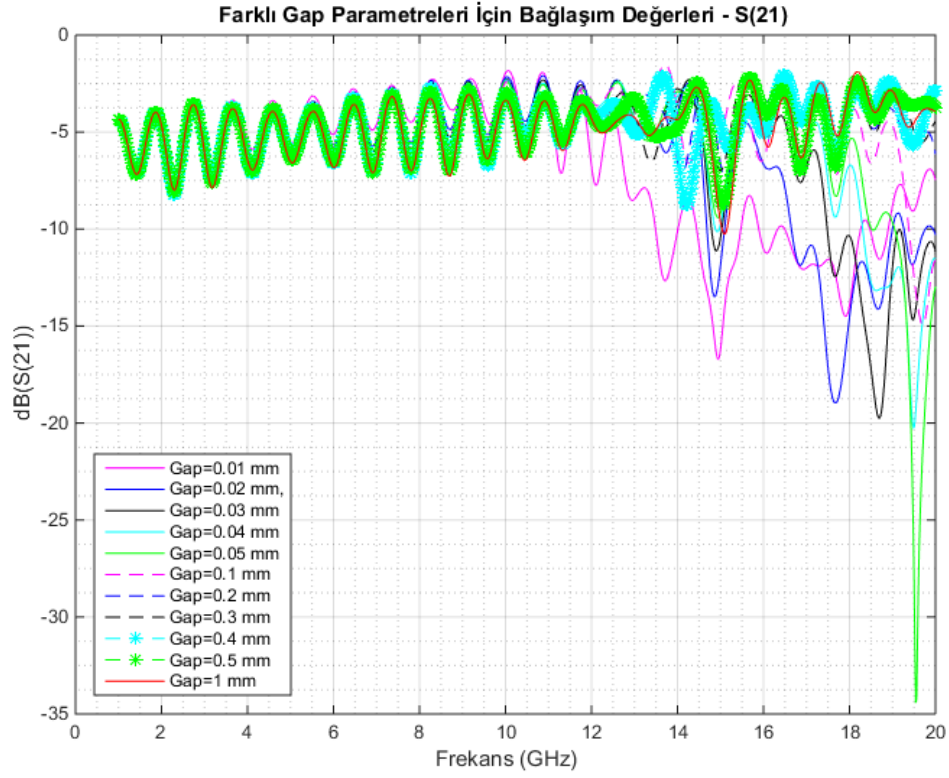


Şekil 4. 52 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin Yalıtım Değerleri Grafikleri

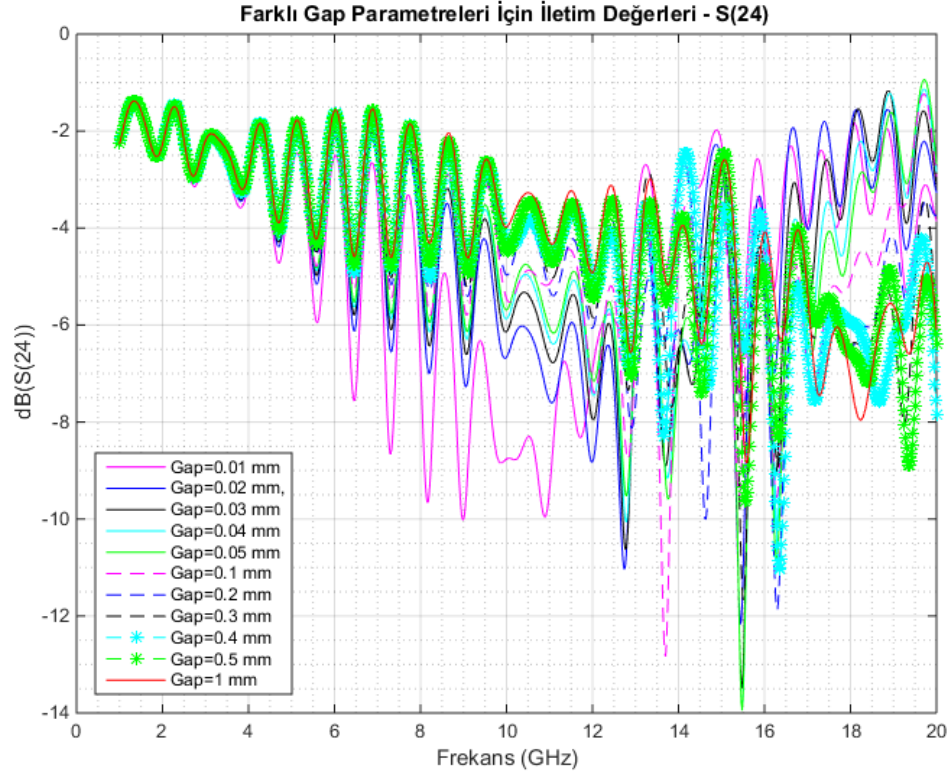
Şekil 4.52’de, parametrik taramada yalıtım değerleri verilmiştir. Hedeflenen yalıtım değerinin, gap parametresinin değerinden bağımsız olarak sağlanabildiği gözlemlenmektedir.



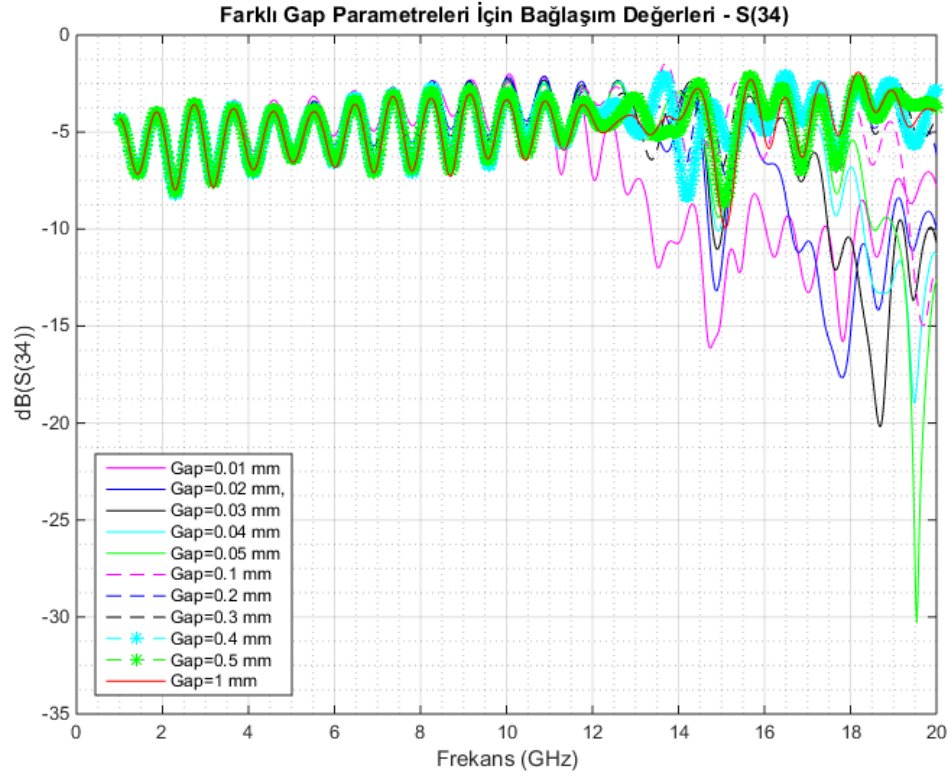
Şekil 4. 53 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin  $S_{31}$  Grafikleri



Şekil 4. 54 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin  $S_{21}$  Grafikleri



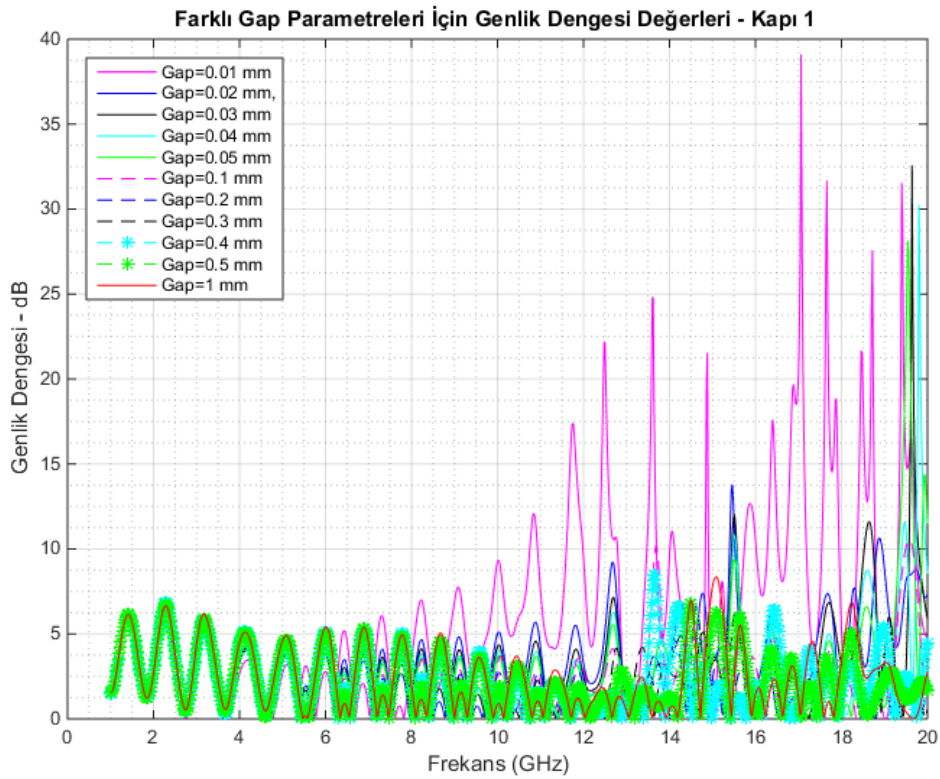
Şekil 4. 55 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin  $S_{24}$  Grafikleri



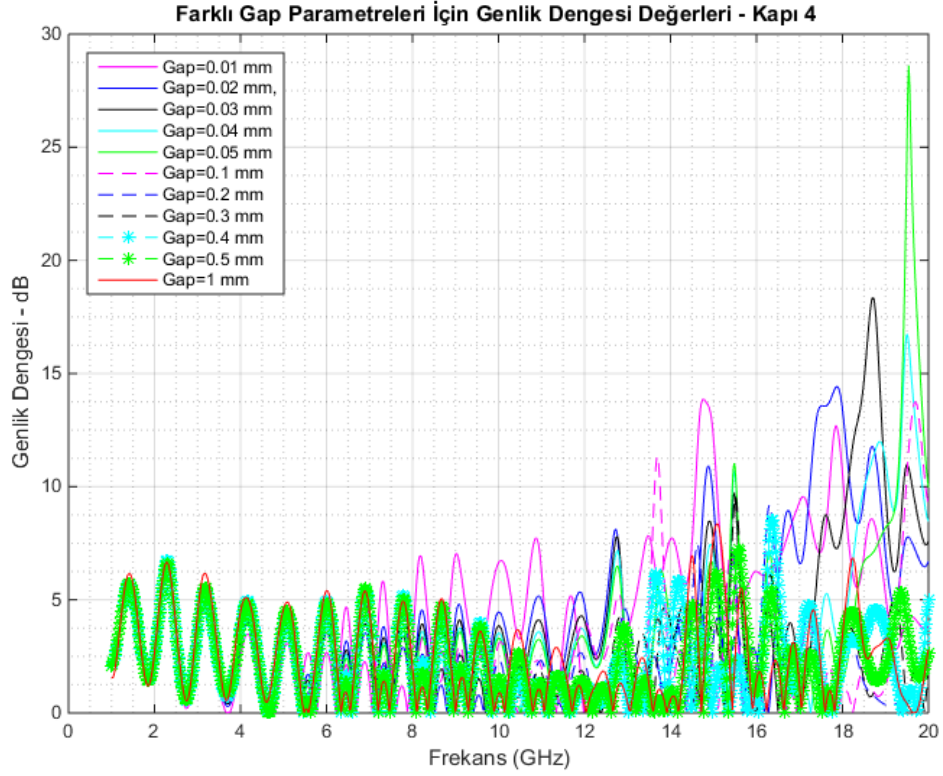
Şekil 4. 56 Farklı Gap Parametre Değerleri İçin  $S_{34}$  Grafikleri

Şekil 4.53, Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da sırasıyla kapı 1 ve kapı 4 giriş kapısı iken elde edilen iletim ve bağlaşım değerlerinin, gap parametre taramasına göre varyasyonları verilmiştir. Bu grafiklerde de gap parametresi 0.01 mm iken 12.5 GHz’den sonra bozulmaların başladığı ve devrenin performansının tamamen düştüğü gözlemlenmiştir. Yaklaşık 10 GHz’e kadar taranan tüm gap değerleri için sonuç benzerken, X-banttı sonraki frekans bantları için devrenin çalışmadığı yorumu yapılabilir. Buradan, özellikle yüksek frekansta hedeflenen performans için, gap değeri 0.1 mm’ye eşit iken optimum değerin sağlandığı görülebilmektedir.

Benzer şekilde, iletim ve bağlaşım performanslarını gözlemleyebilmek amacıyla, genlik dengesi değerlerinin incelenmesi de gerekmektedir. Şekil 4.57 ve Şekil 4.58’de, sırasıyla kapı 1 ve kapı 4 giriş kapısı iken elde edilen genlik dengesi grafikleri verilmiştir.



Şekil 4. 57 Kapı 1 Giriş Kapısı İken Genlik Dengesi Grafikleri



Şekil 4. 58 Kapı 4 Giriş Kapısı İken Genlik Dengesi Grafikleri

İletim ve bağlaşım değerlerinin analizinde de görülebileceği gibi, düşük frekanslarda farklı gap parametre değerleri için benzer sonuçlar elde edilirken, gap parametresinin 0.01 mm ve 0.05 mm değerleri arasındaki değerlerinde yüksek frekanslarda oldukça düşük performanslar görülmektedir. Gap parametresinin 0.1 mm ve sonrasında yer alan değerleri için genlik dengesi sonuçları benzerdir.

Gap parametresinin parametrik tarama değerlerinde elde edilen sonuçlarda, bağlaştırmalı devresinin tüm parametreleri incelendiğinde  $0.01 \text{ mm} \leq \text{gap} \leq 0.5 \text{ mm}$  için benzer sonuçlar olduğu,  $0.1 \text{ mm} \leq \text{gap} \leq 1 \text{ mm}$  için sonuçların birbirine çok benzer olması gerekçesiyle ise nihai tasarımda gap parametresinin değerinin 0.1 mm olmasının yeterli olacağı sonucu elde edilmiştir.

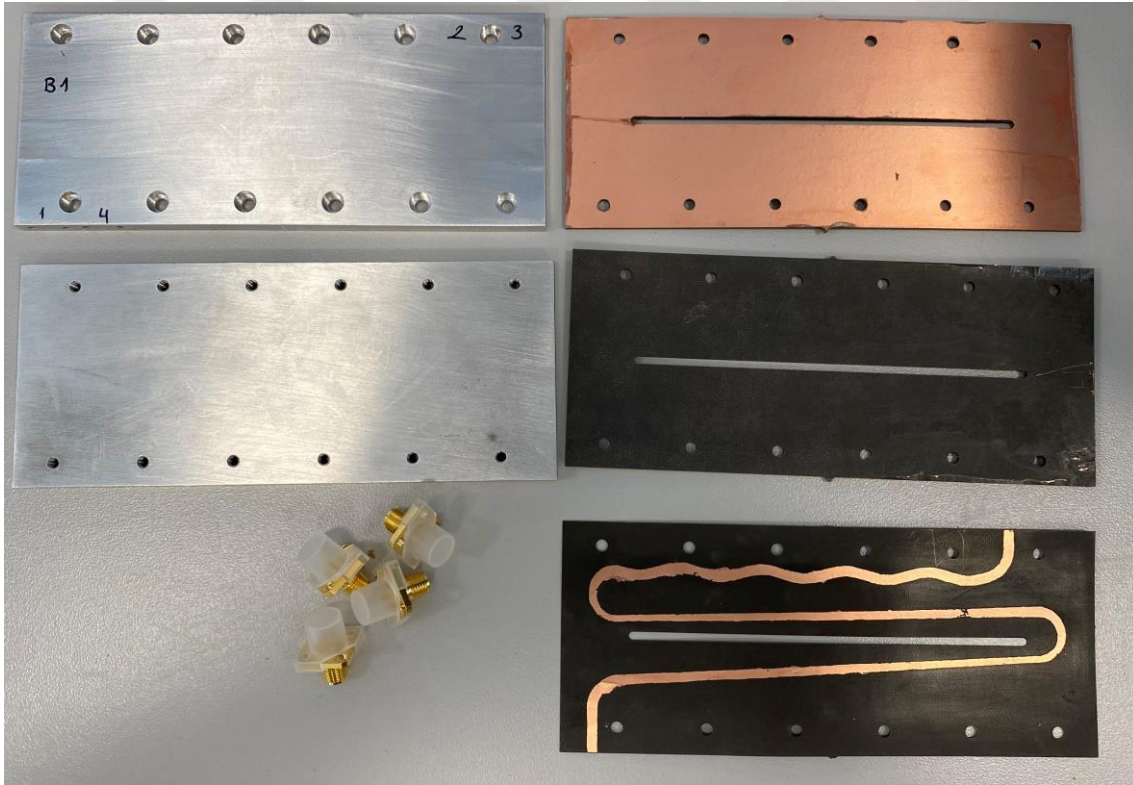


## 5. FABRİKASYON VE ÖLÇÜM

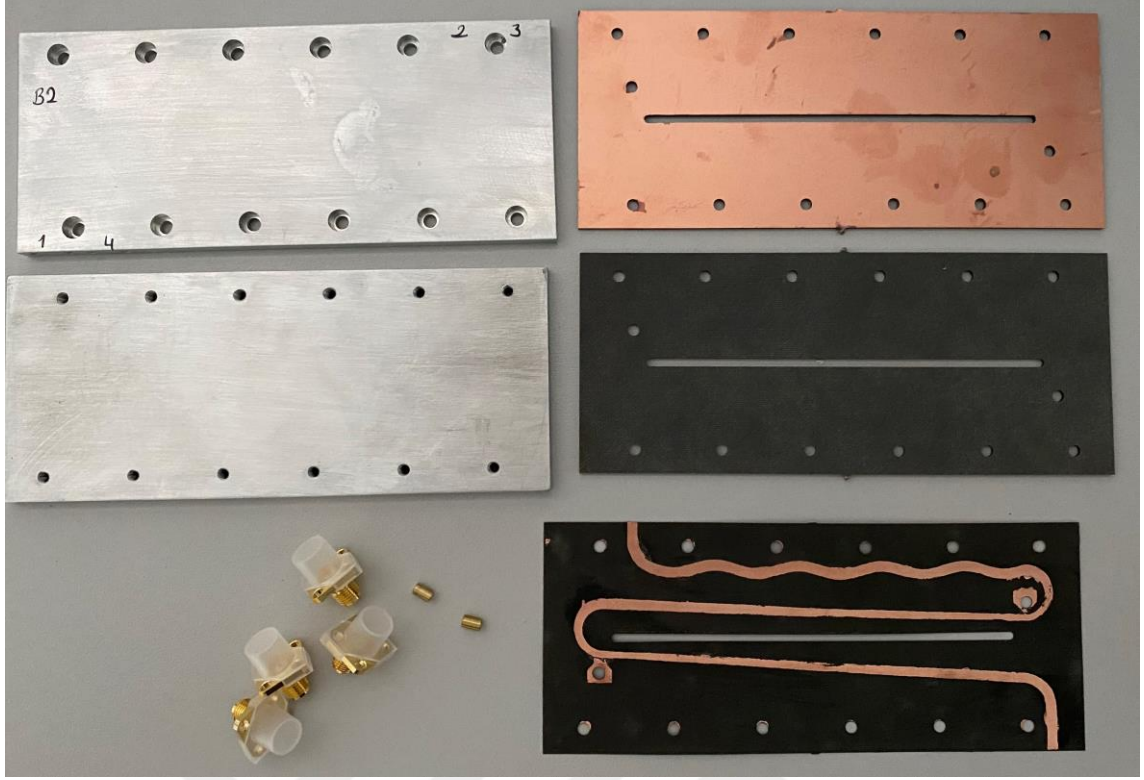
Önceki bölümlerde tasarım ve benzetim aşamaları aktarılmış olan iki farklı bağlaştııcı konfigürasyonunu (Bağlaştııcı1 ve Bağlaştııcı2) üretimleri yapılmış ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Üretim yöntemi olarak kimyasal kazıma yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemin seçilme sebebi, orta katmanda yer alan alttaşın oldukça ince olmasıdır (10 mil).

Kuşe kağıda bastırılan serim (*layout*), ısı yardımıyla alttaş üzerine aktarılmış, daha sonra asit çözeltileri kullanılarak kazıma sağlanmıştır. Bağlaştııcı1 ve Bağlaştııcı2 konfigürasyonlarına ait kazınmış alttaşlar ve kullanılan modülleri, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’te sırasıyla verilmiştir.



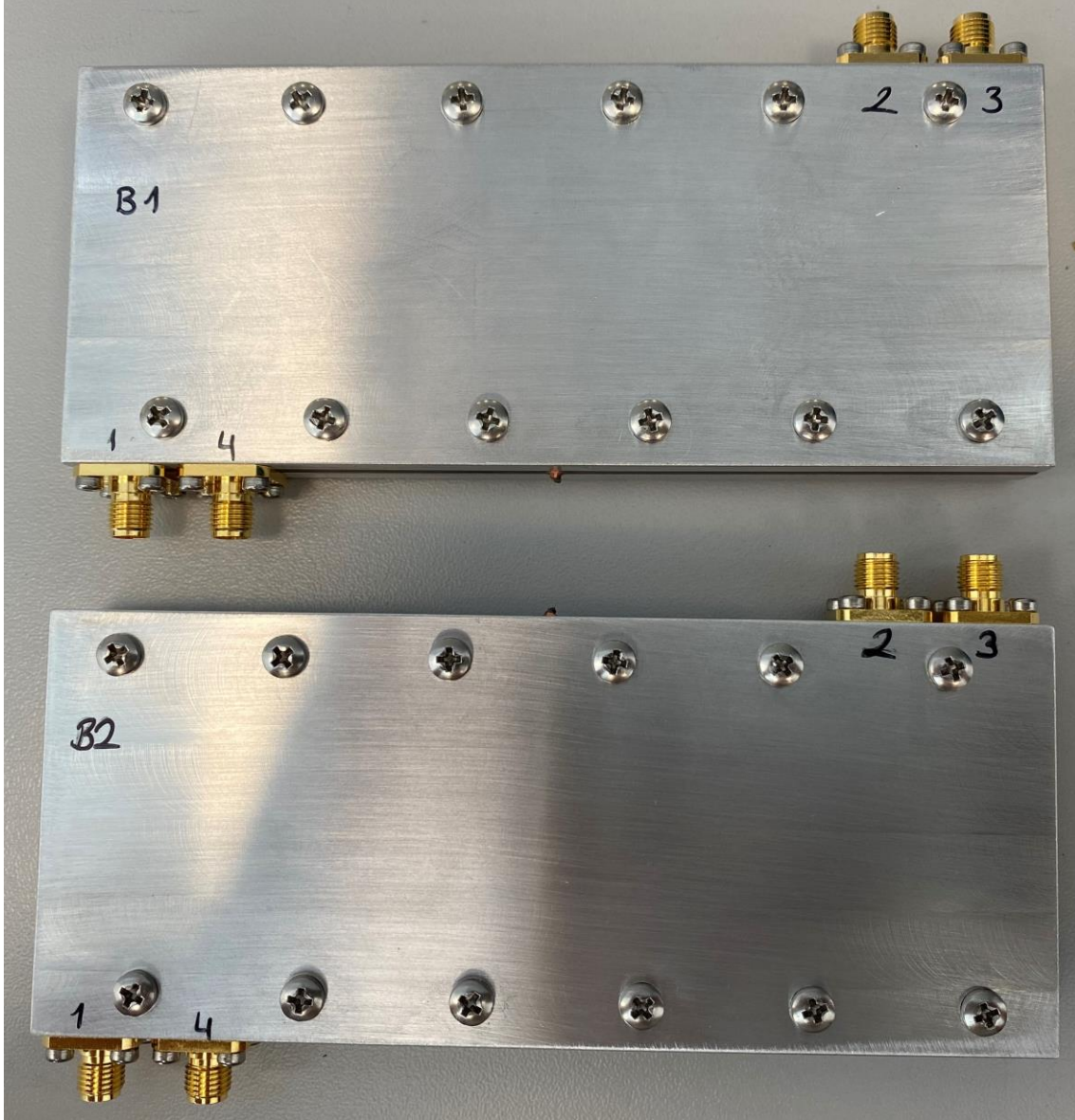
Şekil 5. 1 Bağlaştııcı1 İçin Üretilmiş Alttaşlar ve Modülleri



Şekil 5. 2 Bağlaştırmacı2 İçin Üretilmiş Alttaşlar ve Modülleri

Üç katmanlı şerit hat yapısının sağlanabilmesi için, vidalar yardımıyla sabitleme kullanılacak olup Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilen modüller de aynı yöntemle sabitleneceklerdir. Kullanılacak konektörleri lehimle sabitleme yönteminin devreye bozucu etkisi olacağından, konektörler de devre modülüne vidalar yardımıyla sabitlenecek ve konektörlere ait canlı uçlar da üçlü şerit hat yapısında sıkıştırılarak kullanılacaktır.

Şekil 5.3’te, Bağlaştırmacı1 ve Bağlaştırmacı2 için monte edilmiş şekli yer almaktadır.

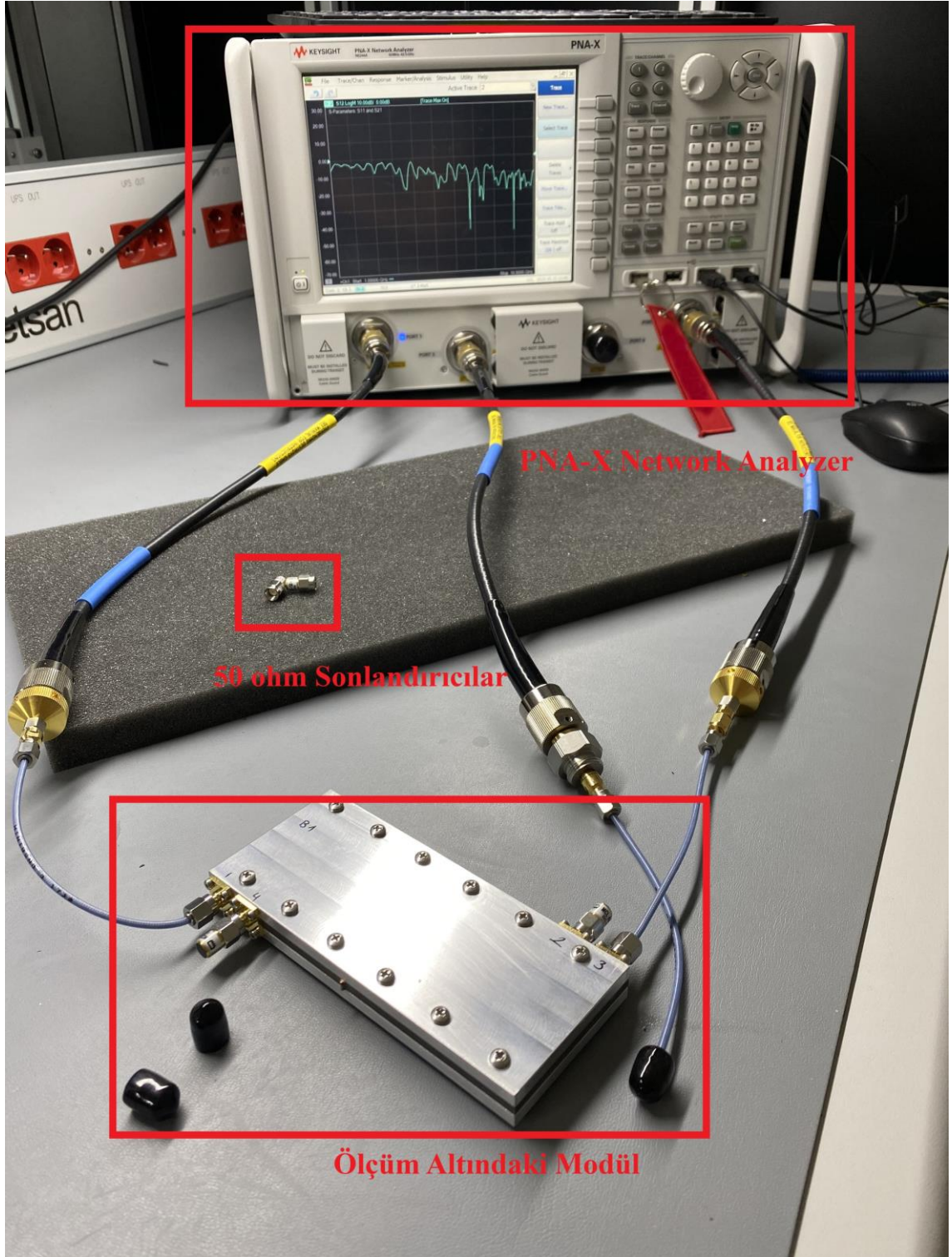


Şekil 5. 3 Bağlaştırmacı1 ve Bağlaştırmacı2 Konfigürasyonlarının Montelenmiş Modülleri

Üretilmiş bu modüller, 10 MHz – 43.5 GHz frekans aralığında ölçüm alabilen, model ve markası Keysight – N5244A olan “PNA-X Network Analyzer” aracılığı ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, “.s2p” formatında kaydedilerek MATLAB yazılımı üzerinde grafik olarak çıktı alınmıştır.

Ölçüm için kalibrasyon iki kapılı konfigürasyonda, 1 – 18.5 GHz arasında yapılmıştır. Buna göre, ölçüm esnasında, ölçüm alınmayacak diğer iki kapı, 50  $\Omega$  sonlandırıcılar ile termine edilmiştir. Ölçüm için yapılan kurulum ve örnek ölçüm görseli, Şekil 5.4’te yer almaktadır.



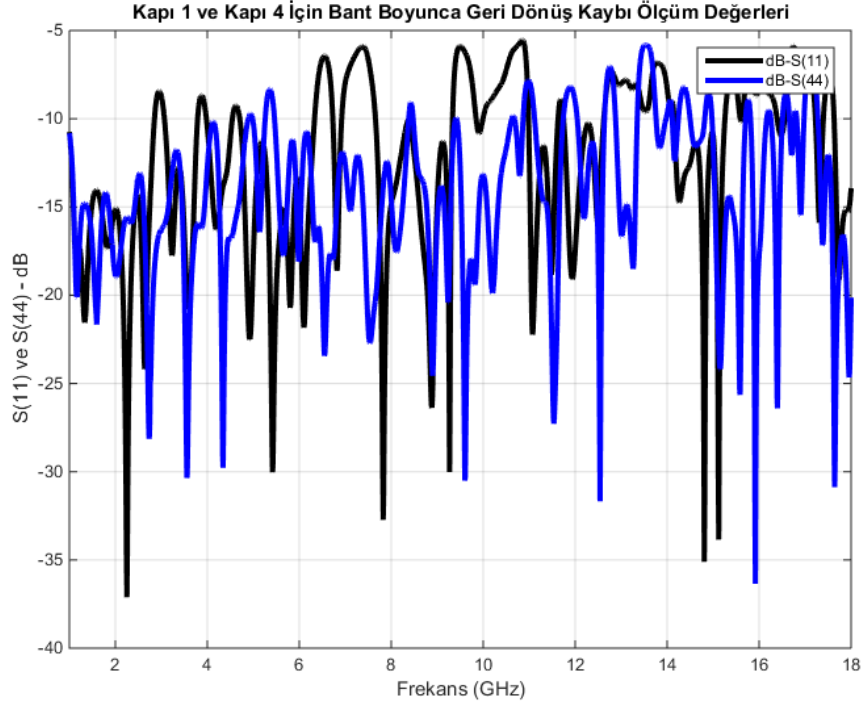


Şekil 5. 4 Ölçüm Düzenneği

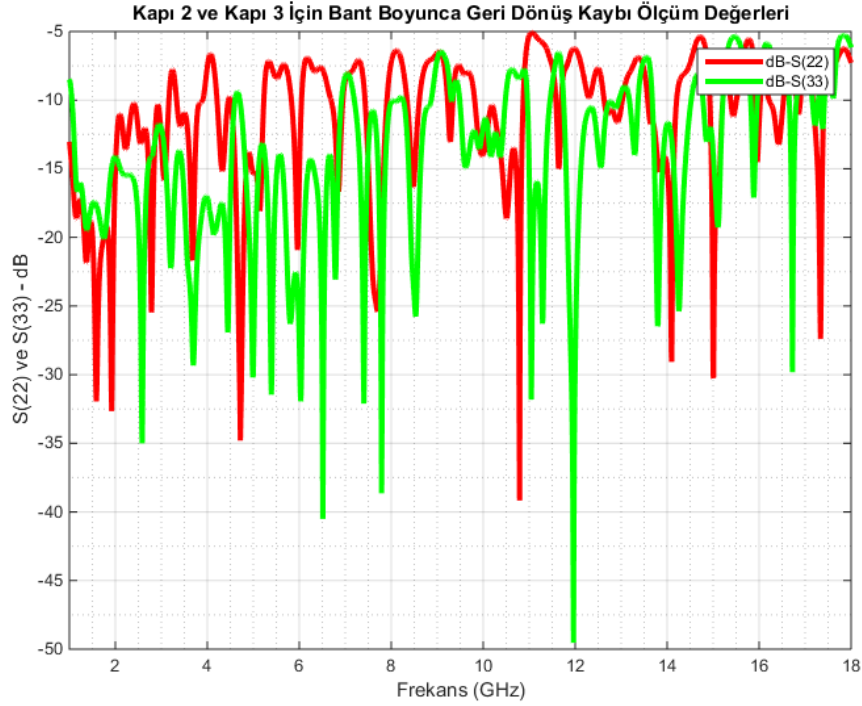
Şekil 5.4'te verilen düzenek ile Bağlaştırmacı1 ve Bağlaştırmacı2 için alınan ölçümler, sırasıyla verilmiştir.

## 5.1 Başlaştırıcı1 İçin lm Sonuçları

Her bir kapı için geri dönüş kayıpları ölçümleri, şekil 5.5 ve şekil 5.6’da verilmiştir.



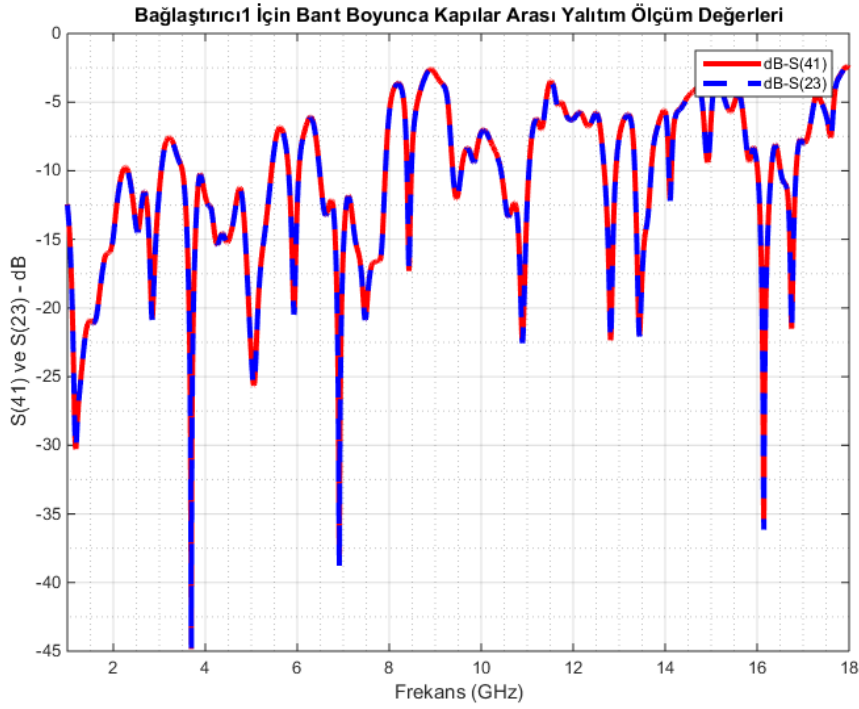
şekil 5. 5 Başlaştırıcı1 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı lm Grafiği



şekil 5. 6 Başlaştırıcı1 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı lm Grafiği

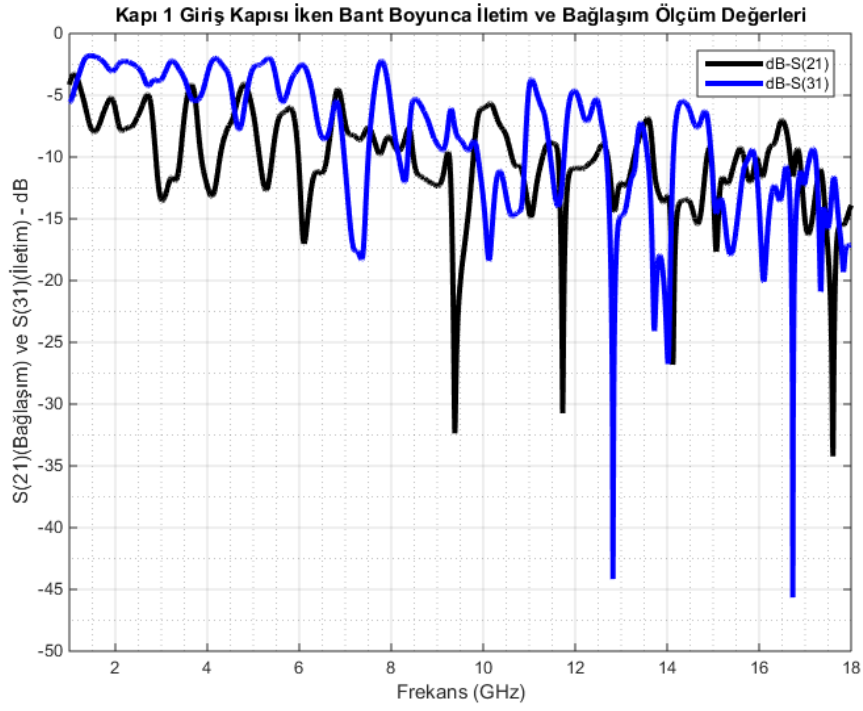
Bağlaştırmacı1 için yapılan ölçümlerde elde edilen geri dönüş kaybı değerleri, benzetime oranla yüksek değerlerdedir. Her iki grafikte de, geri dönüş kaybı değerinin neredeyse -5 dB değerine çıktığı görülmektedir.

Şekil 5.7’de ise, kapılar arası yalıtım değerleri verilmiştir. Bu grafikte, Bağlaştırmacı1 için kapılar arası yalıtımın değerlerinin benzetime oranla düştüğü görülmektedir. Belirli frekans değerlerinde, kapılar arası yalıtımın oldukça düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bazı frekans değerlerinde, 5 dB’nin altına düşen yalıtım değerleri yer almaktadır.

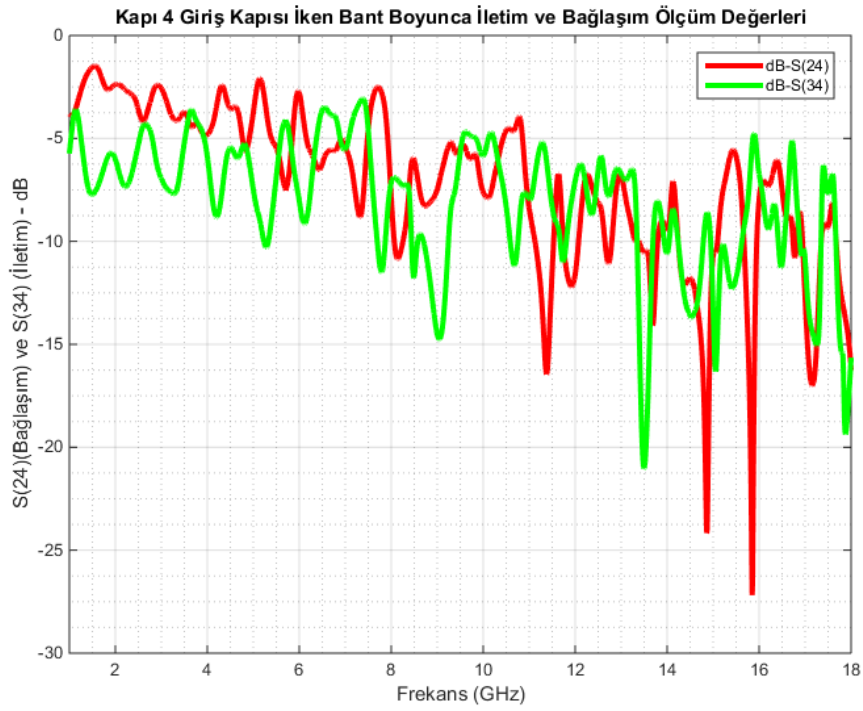


Şekil 5. 7 Bağlaştırmacı1 İçin Yalıtım Parametresi Ölçüm Grafiği

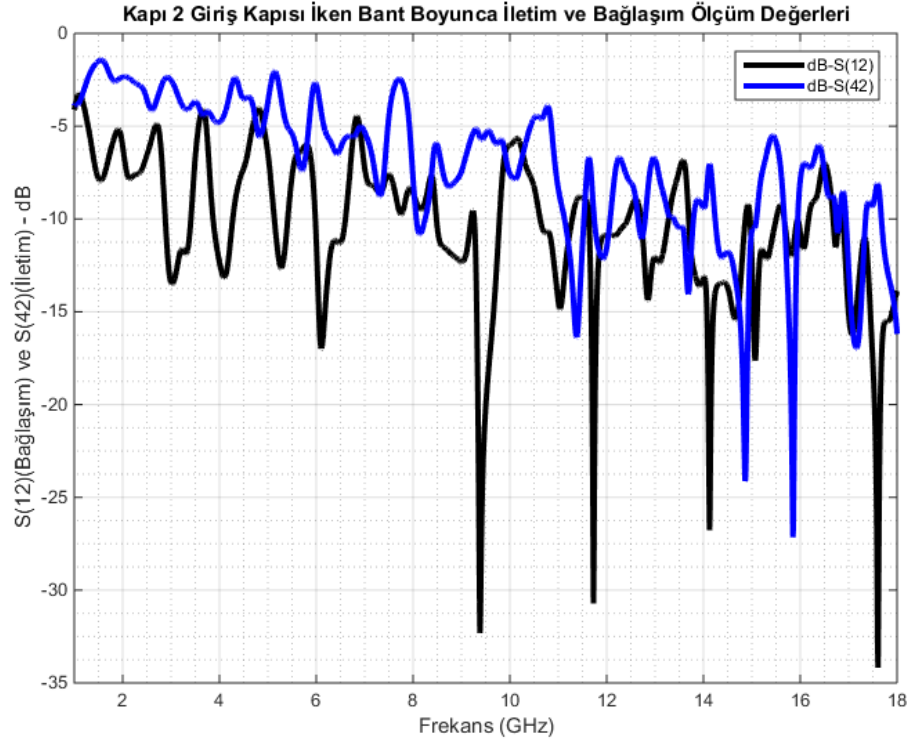
Her bir kapı giriş kapısı olarak kullanıldığında ölçülen iletim ve bağlaşım değerlerinin grafikleri, aşağıda sırasıyla verilmiştir.



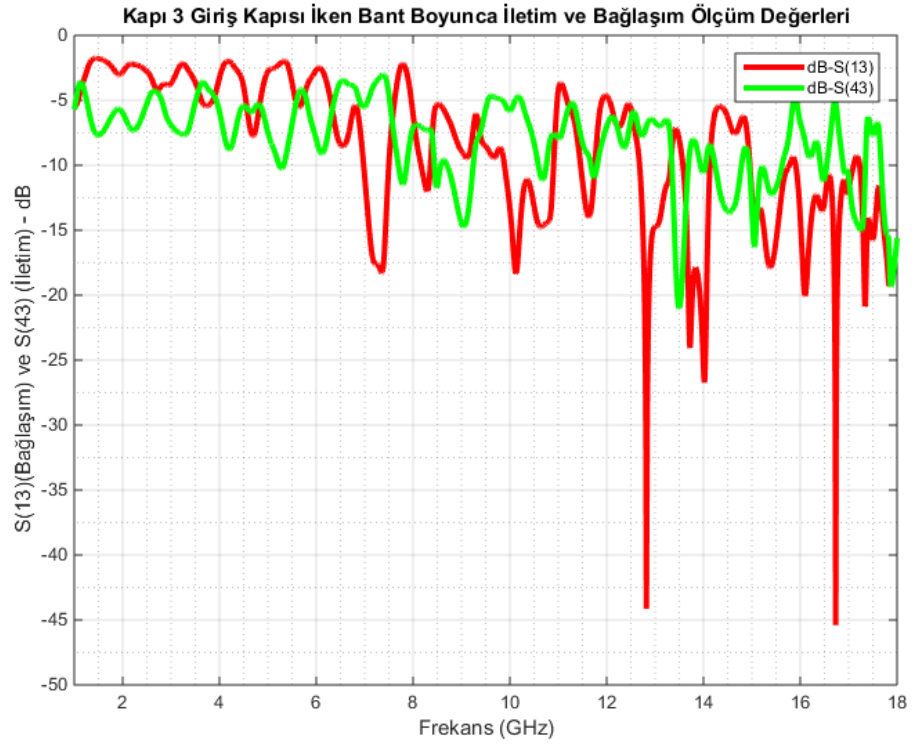
Şekil 5. 8 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği



Şekil 5. 9 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği

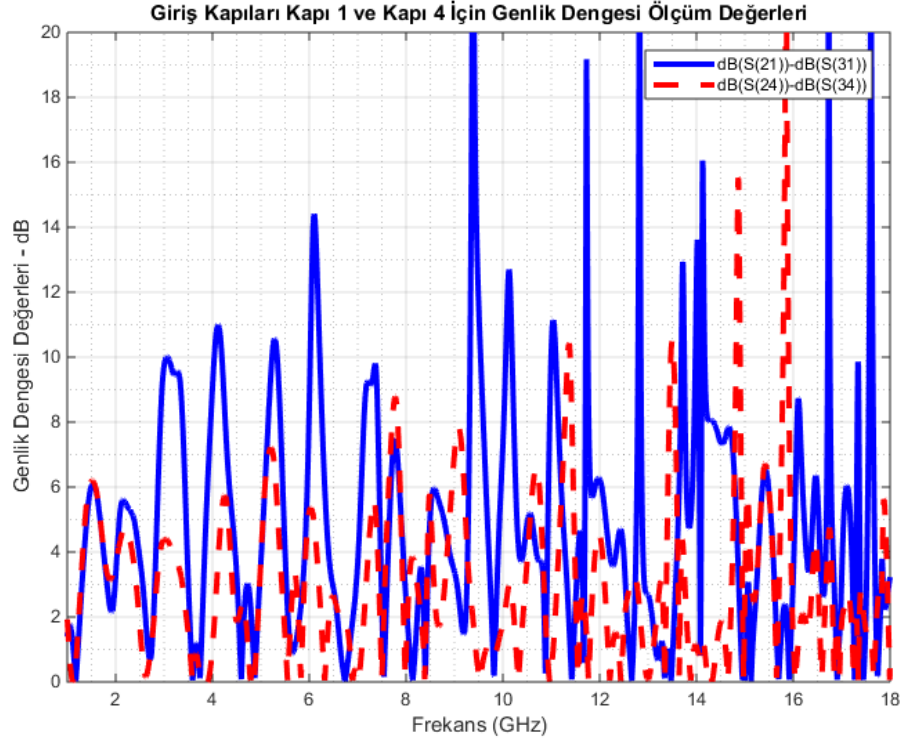


Şekil 5. 10 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği



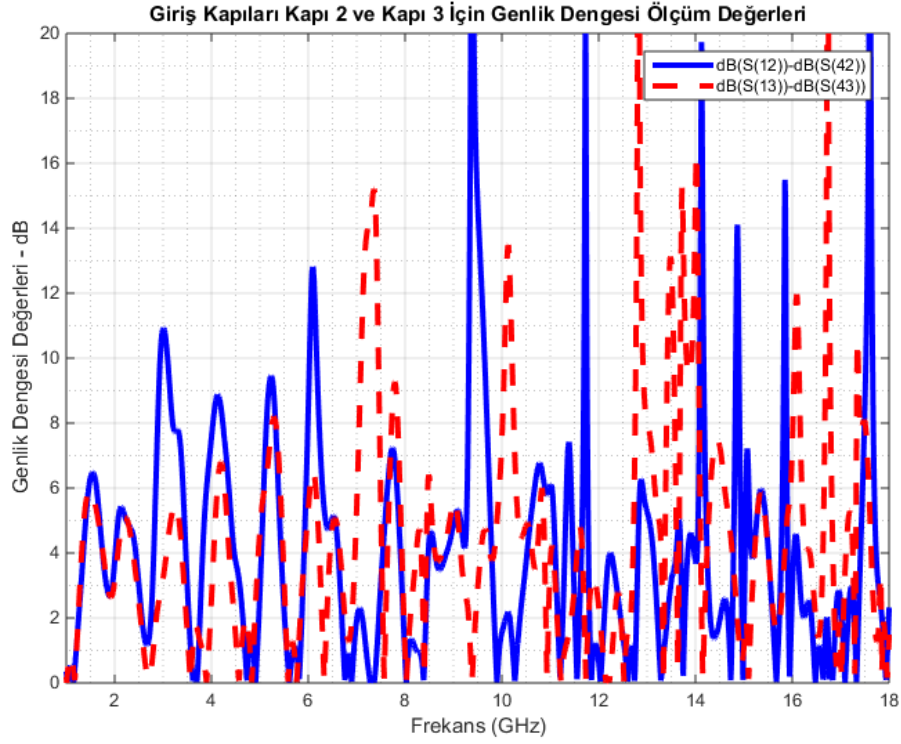
Şekil 5. 11 Kapı 3 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği

Yukarıdaki grafiklerde, özellikle düşük frekans bölgesinde yer alan 1 – 5 GHz bandında, bağlaşım ölçüm değerlerinin benzetim ölçüm değerlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Fakat frekans arttıkça, bağlaşım ve iletim mekanizması giderek bozulmaktadır. Özellikle, geri dönüş kaybı ve yalıtım grafikleri de incelendiğinde, frekans yükseldikçe devrenin çalışması giderek bozulmakta, buna bağlı olarak bağlaşım mekanizması da bozulmaktadır.



Şekil 5. 12 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Ölçüm Grafiği

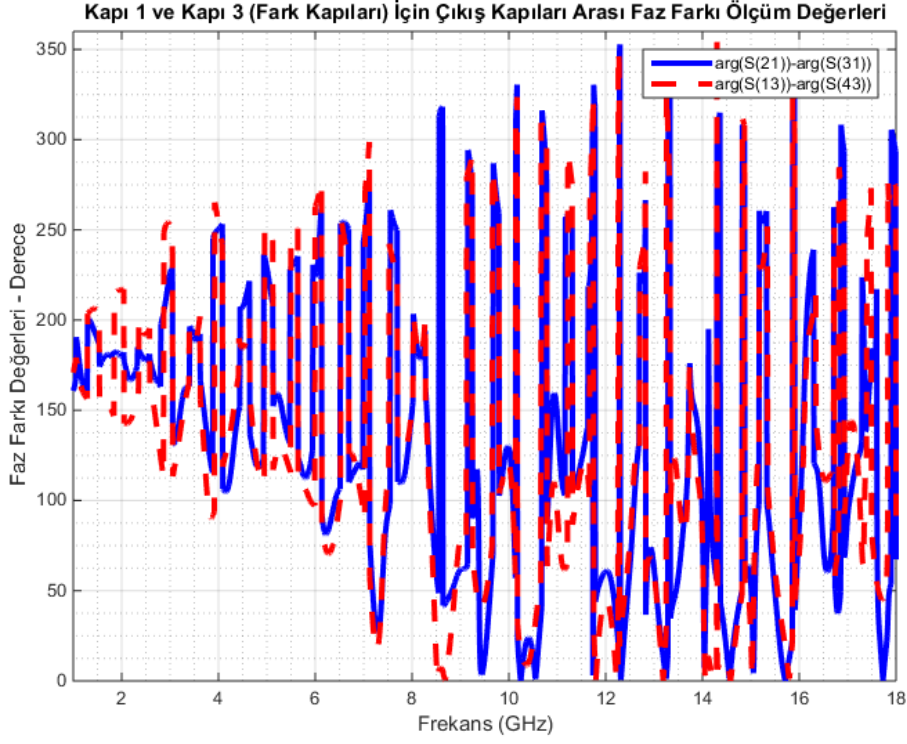




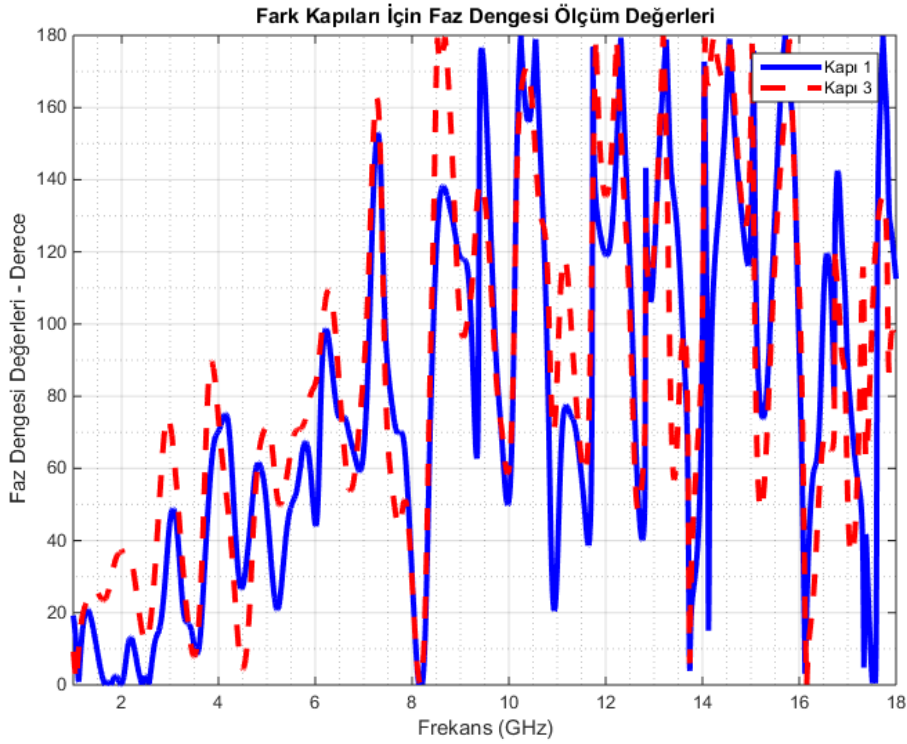
Şekil 5. 13 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Grafiği

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te, kapılar için genlik dengesinin ölçüm grafikleri verilmektedir. Frekans yükseldikçe, genlik dengesi değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Benzetim grafiklerinden yola çıkarak yorum yapılacak olursa, frekans arttıkça bozulan bağlaşım değerleriyle birlikte, genlik dengesi değerinin artması da beklenen bir sonuçtur.

Bir diğer parametre olan faz farkları grafikleri, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da verilmiştir.



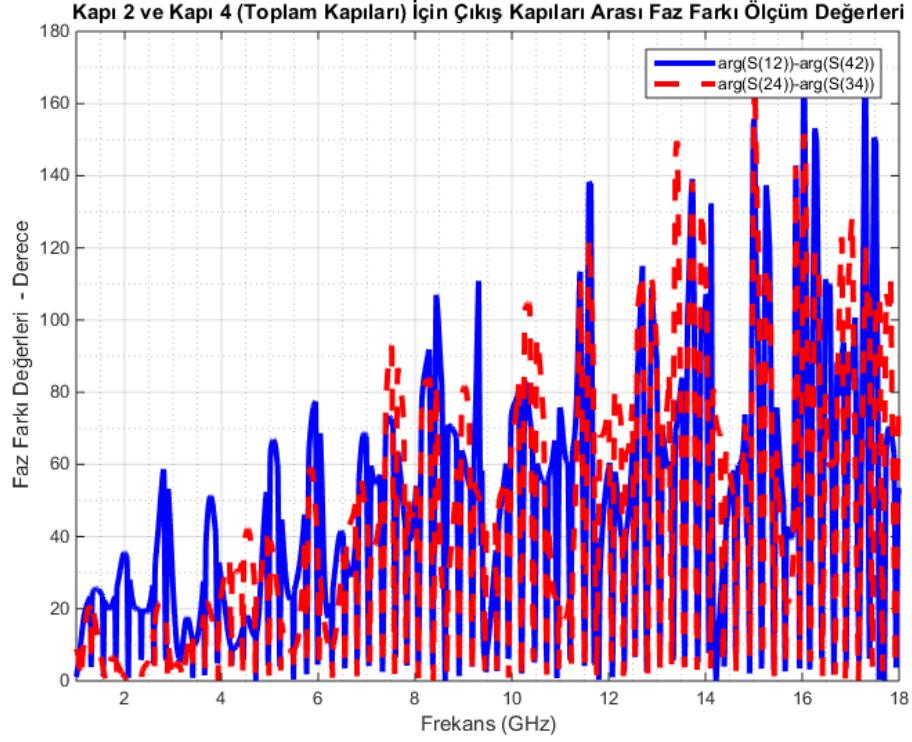
Şekil 5. 14 Fark Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı Ölçümleri



Şekil 5. 15 Fark Kapıları İçin Faz Dengesi Grafiği



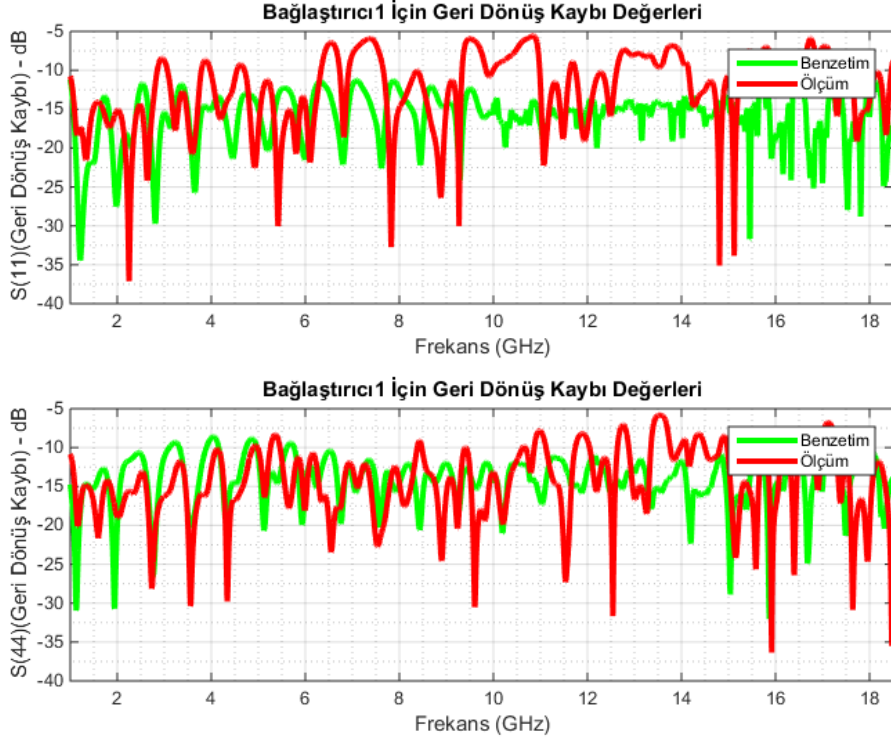
Şekil 5.14'te, fark kapıları için elde edilen faz farkı grafiği, Şekil 5.15'te ise fark kapıları için faz dengesi ölçüm değerleri verilmektedir. Faz dengesi grafiği incelendiğinde, benzer şekilde, 1 – 6 GHz bandında benzetim sonuçlarına yakın değerler gelmiş; fakat 6 GHz'den yüksek frekanslarda ise bozulmanın başladığı gözlemlenmiştir.



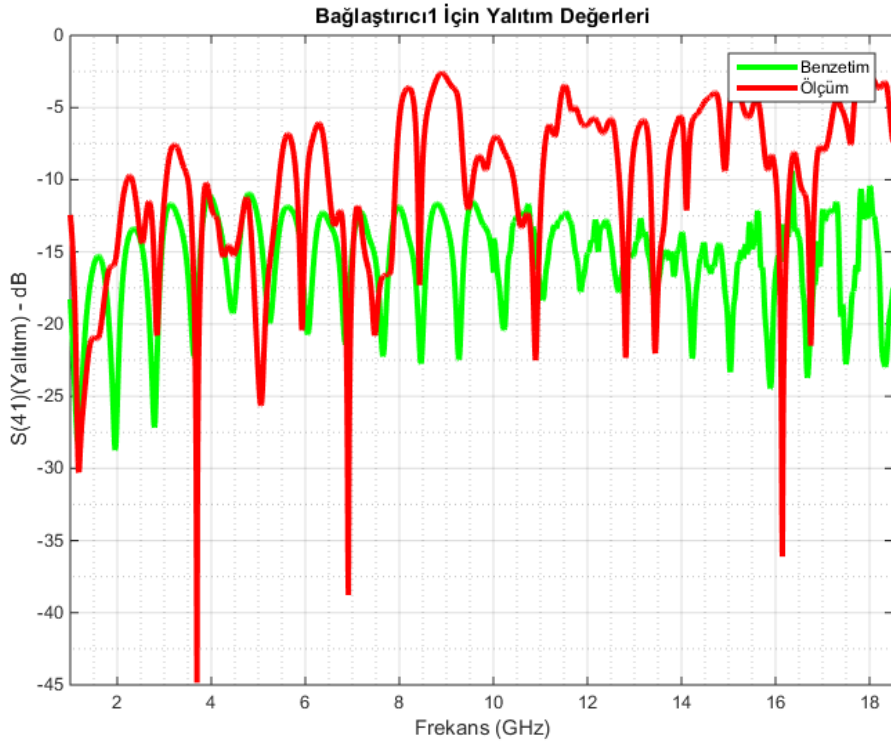
Şekil 5. 16 Toplam Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı Ölçümleri

Şekil 5.16'da, toplam kapıları için faz farkı grafiği verilmiştir. Frekans yükseldikçe, bozulmaların artmaya başladığı bu grafikte de gözlemlenmektedir. 1 – 8 GHz arasında, benzetim sonuçlarıyla oldukça benzer sonuçların elde edildiği gözlemlenmektedir.

Bağlaştırmacı1 konfigürasyonunda fabrikasyonun ardından elde edilen ölçüm değerleri ile benzetim değerleri, birkaç parametre üzerinden aşağıda verilen grafikler üzerinde karşılaştırılarak incelenmiştir.



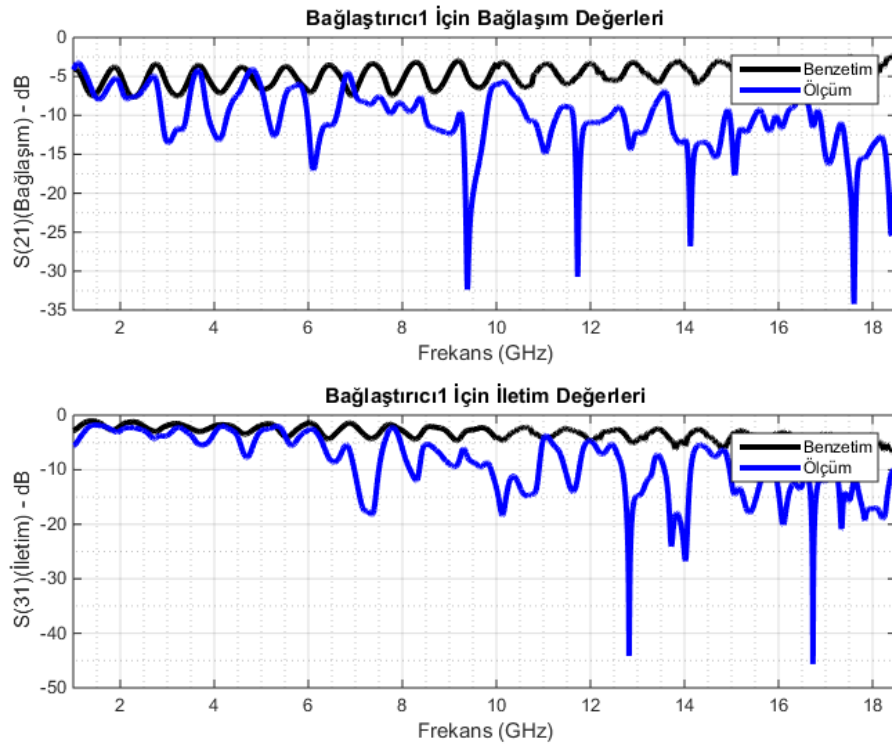
Şekil 5. 17 Bağlaştırıcı1 İçin Geri Dönüş Kaybı Grafikleri



Şekil 5. 18 Bağlaştırıcı1 İçin Yalıtım Grafikleri

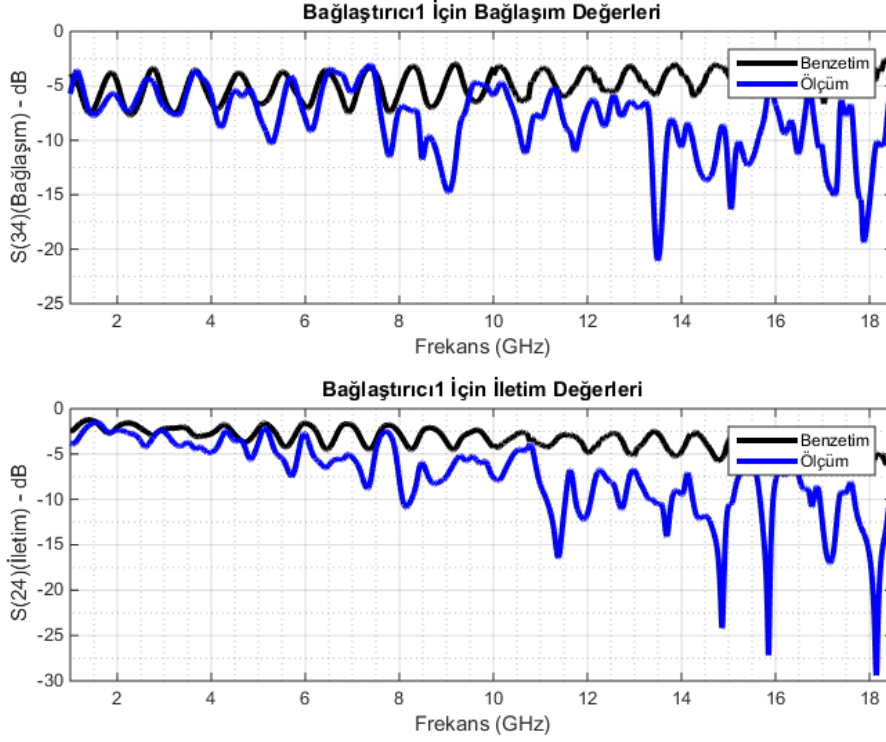
Fark ve toplam kaybı olan Kapı 1 ve Kapı 4 için elde edilen geri dönüş kaybı grafiklerinde (Şekil 5.17), benzetim oranla yüksek değerlerde oldukları görülmektedir. Düşük frekans bölgesinde kayıp fazla görülmezken, frekans yükseldikçe bozulmanın ve kaybın arttığı grafiklerdeki karşılaştırmalardan görülmektedir.

Şekil 5.18’de verilen yalıtım grafiğinde ise, yalıtım performansında fazlaca fark olduğu görülmektedir. Frekans yükseldikçe, ölçümde elde edilen kapılar arası yalıtım değerlerinin, benzetimde elde edilen yalıtım değerlerine oranla oldukça düşük olduğu gözlemlenmektedir.



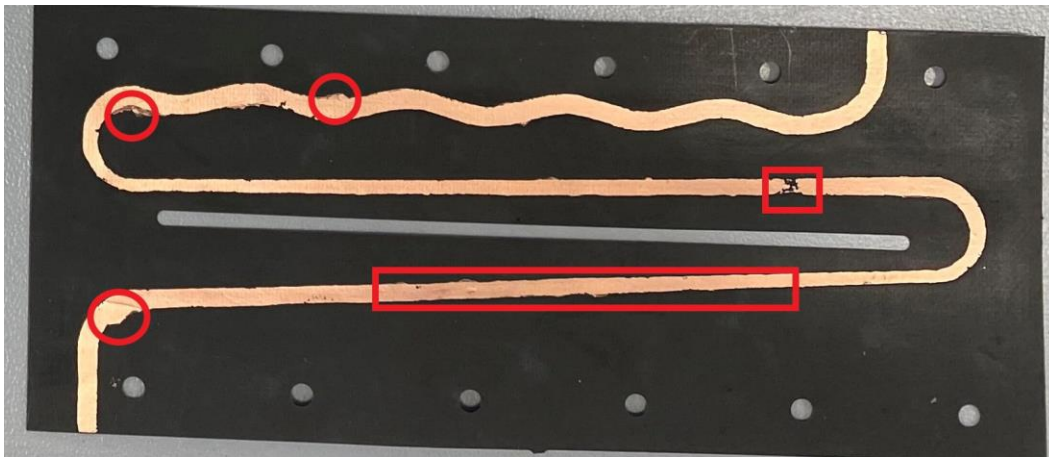
Şekil 5. 19 Bağlaştırmacı1 İçin Kapı 1 Giriş Kapısı İken Bağlaşım Grafikleri

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de, sırasıyla kapı 1 ve kapı 4 giriş kapısı seçildiğinde elde edilen bağlaşım ve iletim değerleri grafikleri verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi, düşük frekans bölgesinde (1 – 5 GHz) yer alan ölçüm sonuçlarının, benzetimde elde edilen sonuçlara oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Fakat frekans yükseldikçe bağlaşım mekanizması bozulmakta ve genlik dengesi değerleri benzetimdekine oranla oldukça yükselmektedir (Bkz. Şekil 5.12).



Şekil 5. 20 Bağlaştıracı1 İçin Kapı 4 Giriş Kapısı İken Bağlaşım Grafikleri

Bu konfigürasyonun, benzetim sonuçlarına oranla düşük performansta ölçüm değerlerine sahip olmasının en büyük sebebi, kullanılan üretim tekniğidir. Kimyasal kazıma işleminde, serimin basıldığı yüzey ve basımda kullanılan tonerin kalitesi, serimin alttaşa aktarılmasındaki en önemli iki kısıttır. Üretim sürecinde, bu iki kısıtın karşılanmasında çeşitli zorluklarla karşılaşmıştır.



Şekil 5. 21 Bağlaştıracı1 Orta Katmanı

Şekil 5.21’de, orta katmanda yer alan alttaş verilmiştir. Bu görselde işaretlenmiş yerlerde, serimin istenen şekilde alttaşa aktarılamamasından ötürü elde edilen hatalar

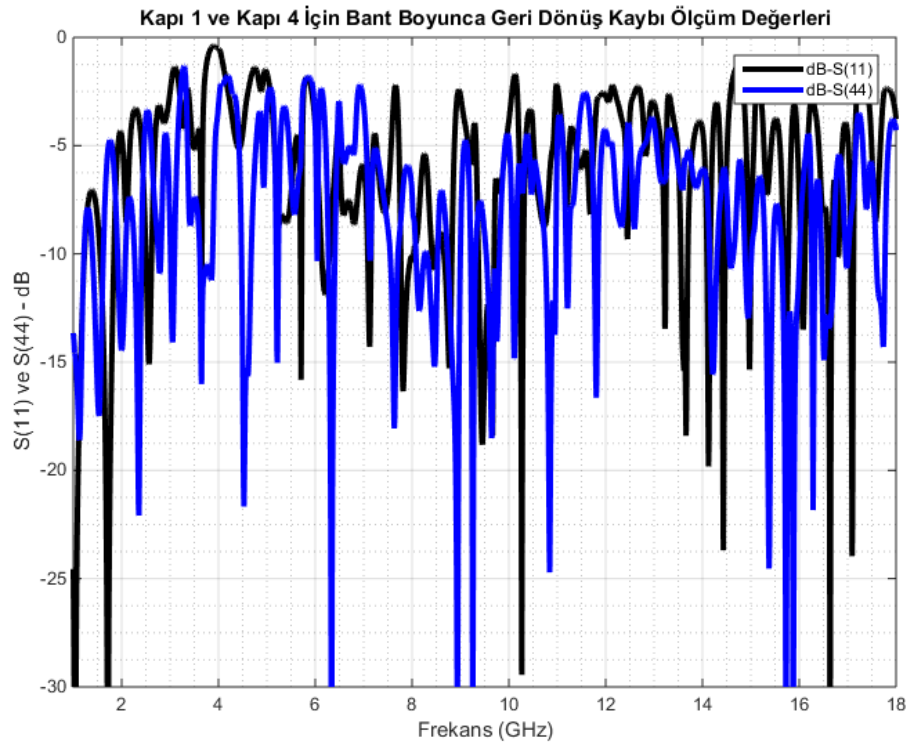
görülmektedir. Serimin geçirilmesi esnasında, yeterli sıcaklık sağlanamadığında, bazı hat kalınlıklarının yüzeye daha ince geçtiği, bazı bölgelerde ise daha kalın hatların olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak hatlarda süreksizlikler oluşmuştur. Özellikle Klopfenstein koniği ve çok kısımlı bağlaştırmacı teorisi düşünüldüğünde, hatların kalınlığı ve konikliği, performans için büyük önem arz etmektedir. Bu koşul sağlanamadığında, yapının çalışmasında eksiklikler oluşacaktır.

Serimin alttaşa aktarımı sırasında, hizalamada milimetrik kaymaların olduğu gözlenmiştir. Serimin kaymasıyla, bağlaşım için sağlanmaya çalışan ofsette (üst üste gelme uzunluğunda) değişimler olmuş, bu da bağlaşım mekanizmasına ve kapılar arası yalıtıma etki etmiştir.

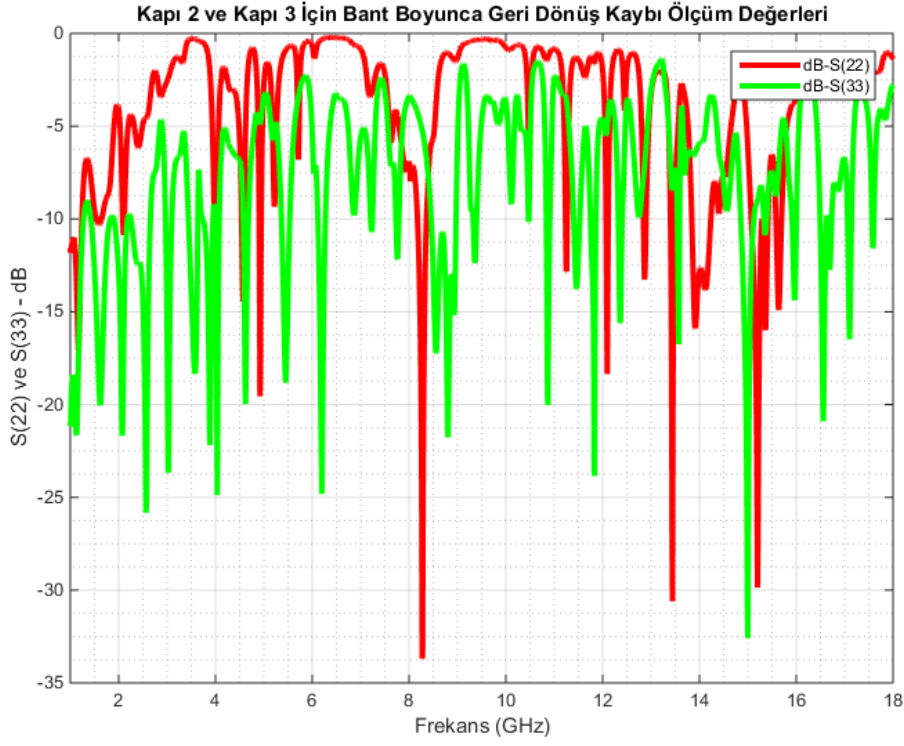
Bahsedilen sebeplerden ötürü, yapının performansı benzetime kıyasla zayıf kalmıştır.

## 5.2 Bağlaştırmacı2 İçin Ölçüm Sonuçları

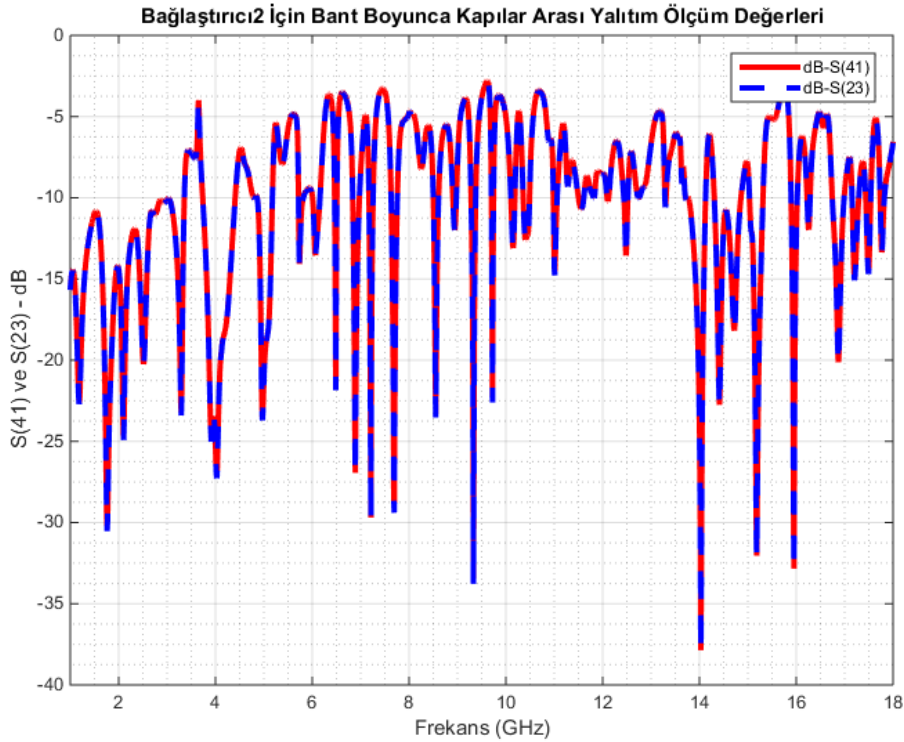
Bağlaştırmacı2 için, her bir kapının geri dönüş kaybı ölçüm grafikleri şekillerde sırasıyla verilmiştir.



Şekil 5. 22 Bağlaştırmacı2 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafikleri



Şekil 5. 23 Bağlaştırmacı2 Yapısının Kapılarına Ait Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Grafiği

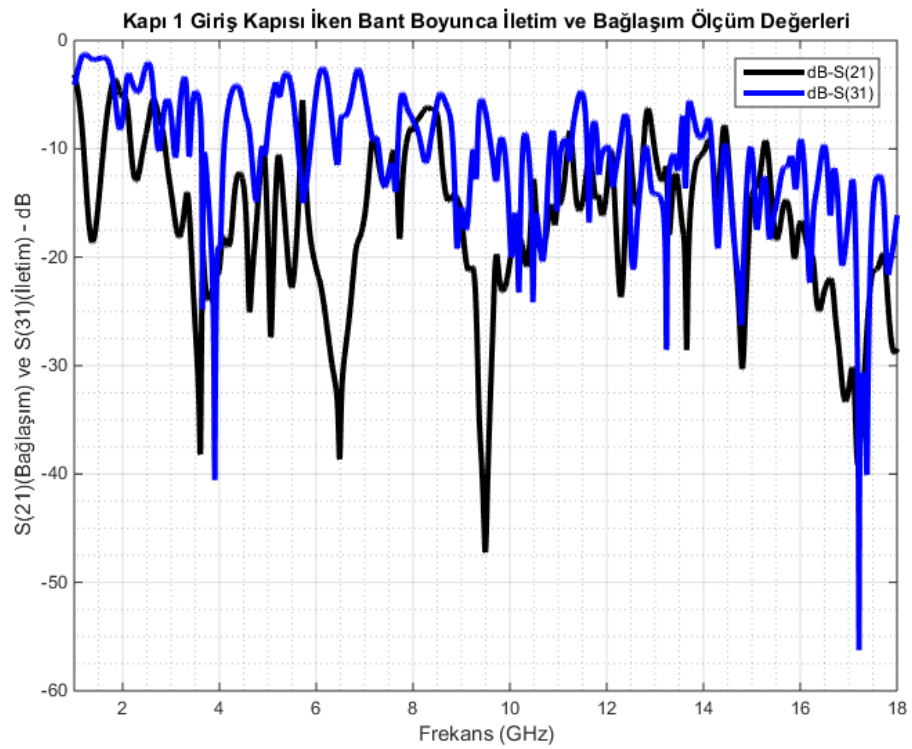


Şekil 5. 24 Bağlaştırmacı2 İçin Yalıtım Parametresi Ölçüm Grafiği

Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te verilen geri dönüş kaybı grafikleri incelendiğinde, devrenin performansının benzetime kıyasla çok düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmektedir.

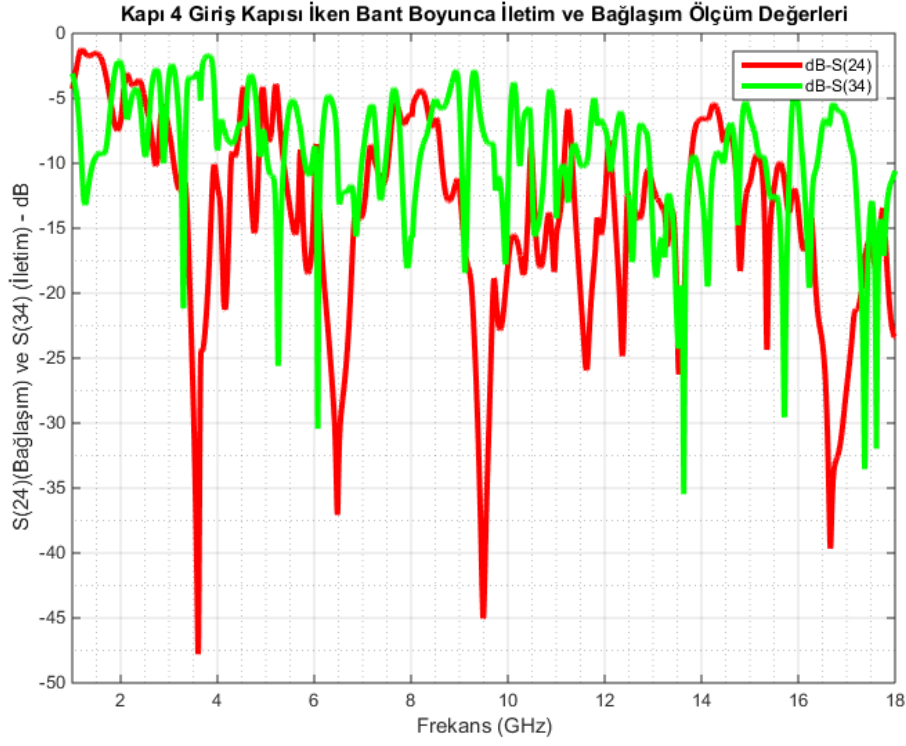
Şekil 5.24'te, yalıtım ölçümleri grafiği verilmiştir. Kapılar arası yalıtım değerlerinin, Bağlaştırmacı1 konfigürasyonunun ölçümleriyle benzer olduğu gözlemlenmektedir.

Sıradaki şekillerde yer alan grafiklerde, her bir kapı giriş kapısı seçildiğinde elde edilen iletim ve bağlaşım değerlerinin ölçüm grafikleri verilmiştir. Burada da, devrenin performansının oldukça düşük olmasından dolayı, bağlaşımın bozulduğu gözlemlenmiştir.

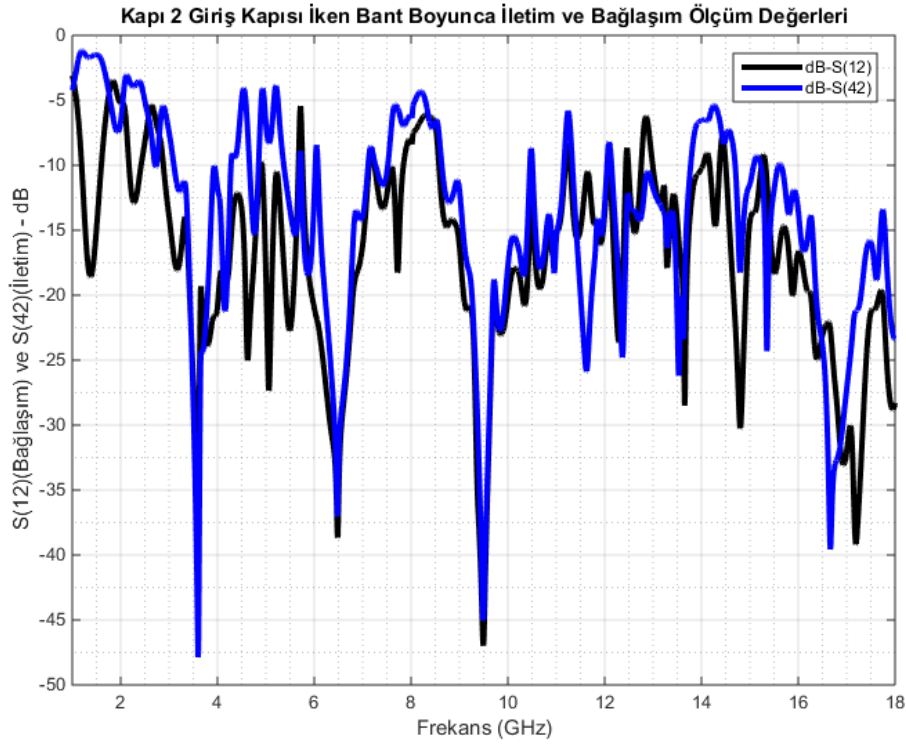


Şekil 5. 25 Kapı 1 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği



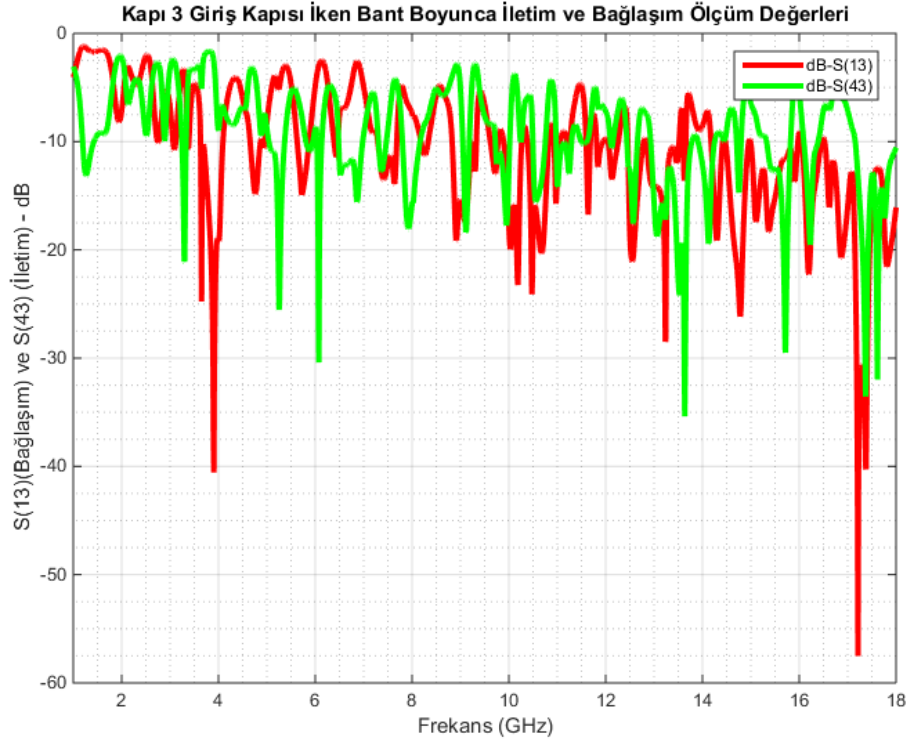


Şekil 5. 26 Kapı 4 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği

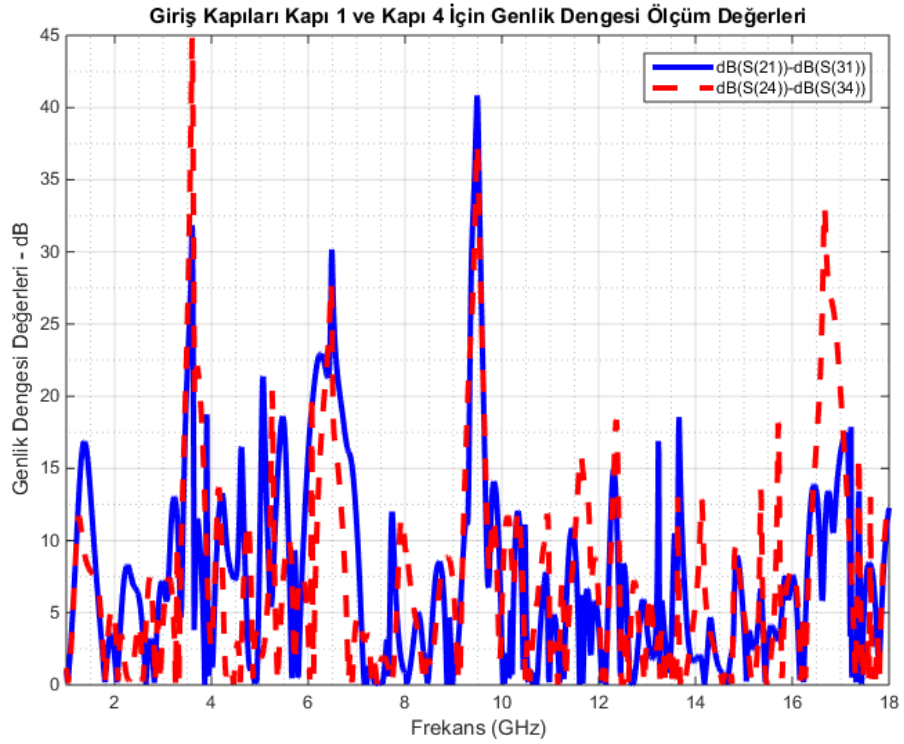


Şekil 5. 27 Kapı 2 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği

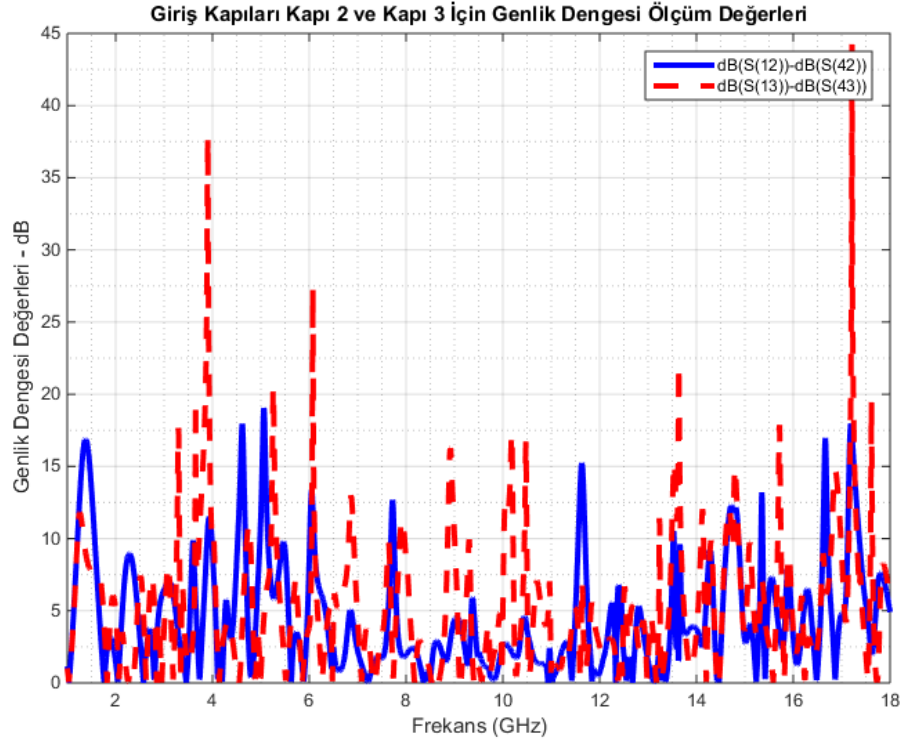




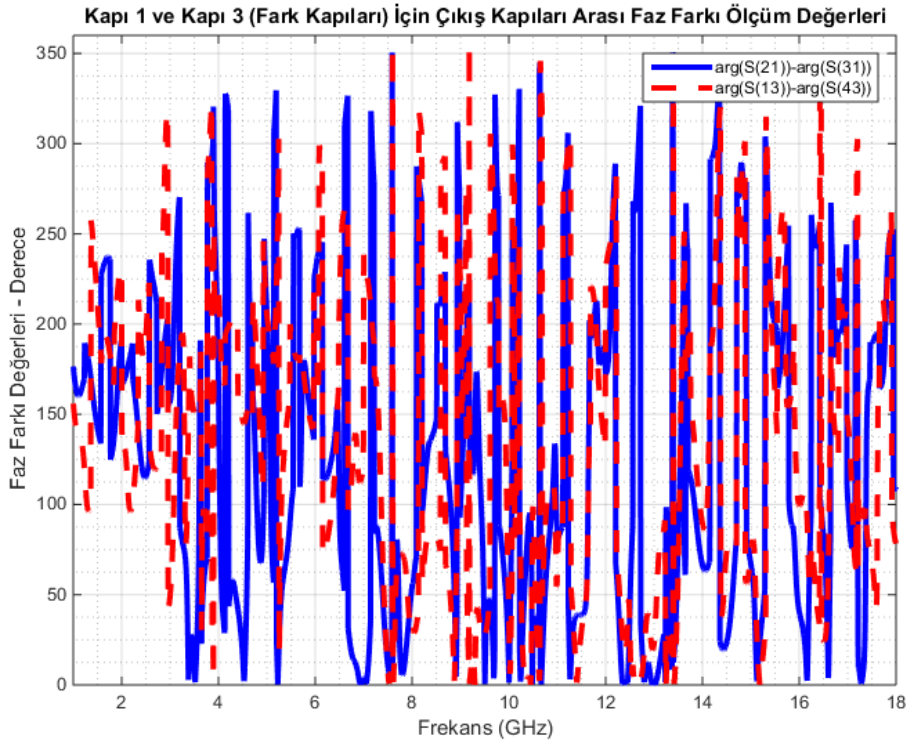
Şekil 5. 28 Kapı 3 Giriş Kapısı İken İletim ve Bağlaşım Ölçüm Grafiği



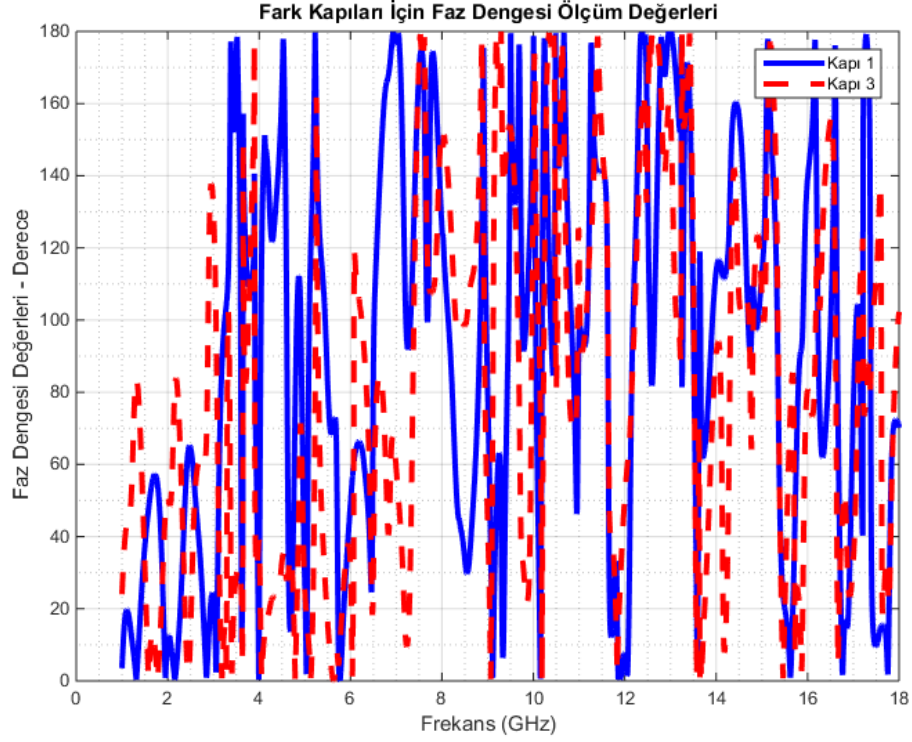
Şekil 5. 29 Kapı 1 ve Kapı 4 İçin Genlik Dengesi Ölçüm Grafiği



Şekil 5. 30 Kapı 2 ve Kapı 3 İçin Genlik Dengesi Ölçüm Grafiği



Şekil 5. 31 Fark Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı Ölçümleri

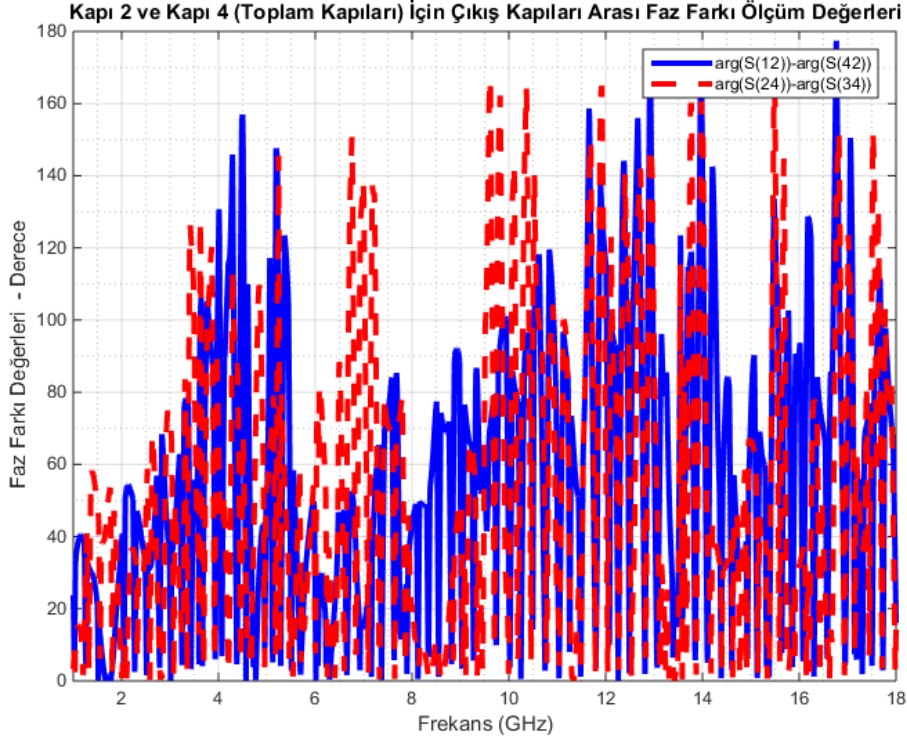


Şekil 5. 32 Fark Kapıları İçin Faz Dengesi Grafiği

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30’da, genlik dengesi değerleri verilmiştir. İletim ve bağlaşım değerlerinin aralarındaki farkın, frekans yükseldikçe giderek bozulması, genlik dengesi değerinde de yükselmelere neden olmuştur. Frekans değerleri yükseldikçe, bağlaşım mekanizmasının giderek bozulmasından ötürü, genlik dengesi değerleri birbirinden gittikçe farklılaşmaktadır.

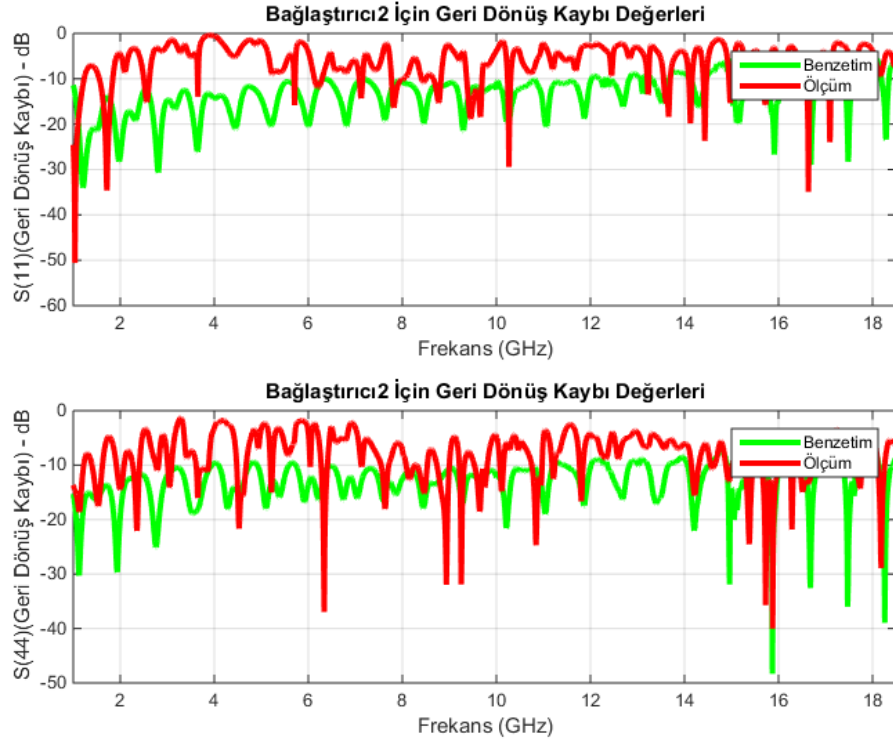
Şekil 5.31 ve Şekil 5.32’de verilen, fark kapıları için faz farkı ölçümleri ve buna göre elde edilen faz dengesi değerleri incelendiğinde, neredeyse 1 – 2 GHz arası beklenen performansın elde edildiği görülebilmektedir. Frekans değeri yükseldikçe, bozulma gittikçe artmakta ve periyodik bir salınım gözlemlenmemektedir.

Şekil 5.33’de verilen, toplam kapılarındaki faz farkı ölçümlerine de benzer yorum yapılabilir. Frekans yükseldikçe, bozulma gittikçe artmakta ve benzetim sonuçlarında elde edilen grafikten oldukça uzaklaşmaktadır.

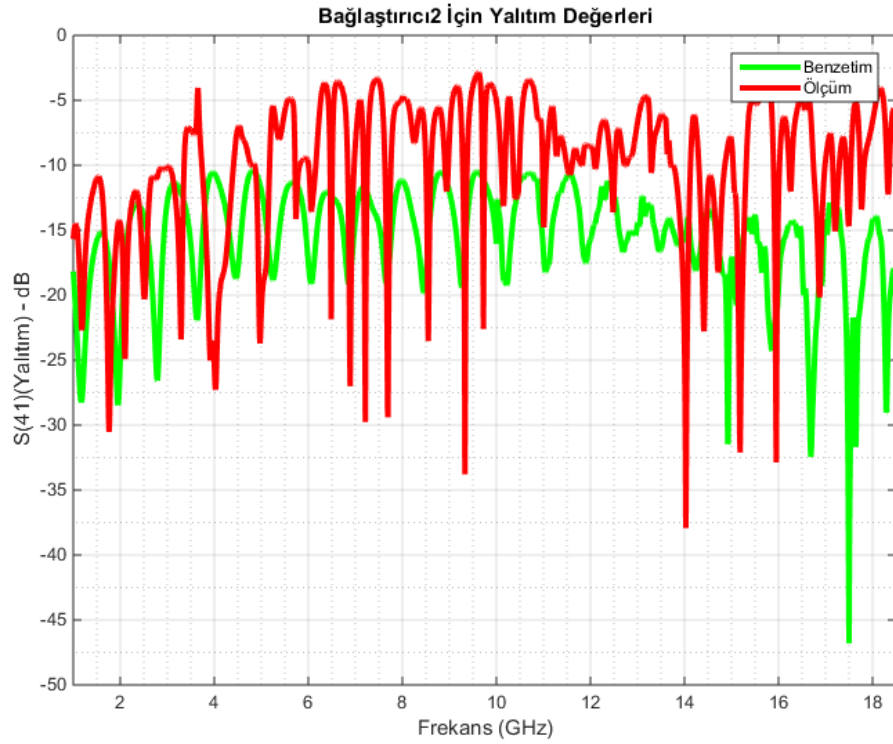


Şekil 5. 33 Toplam Kapıları İçin Çıkış Kapıları Arası Faz Farkı Ölçümleri

Bağlaştırıcı2 konfigürasyonunda da, fabrikasyonun ardından elde edilen ölçüm değerleri ile benzetim değerleri, birkaç parametre üzerinden aşağıda verilen grafikler üzerinde karşılaştırılarak incelenmiştir.



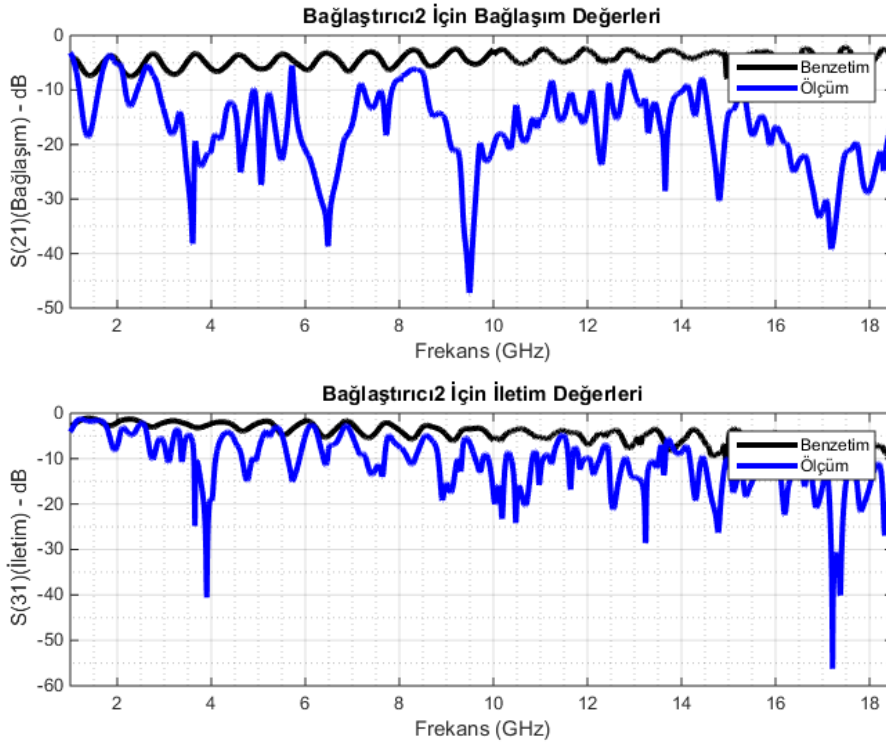
Şekil 5. 34 Bağlaştırmacı2 İçin Geri Dönüş Kaybı Grafikleri



Şekil 5. 35 Bağlaştırmacı2 İçin Yalıtım Grafikleri

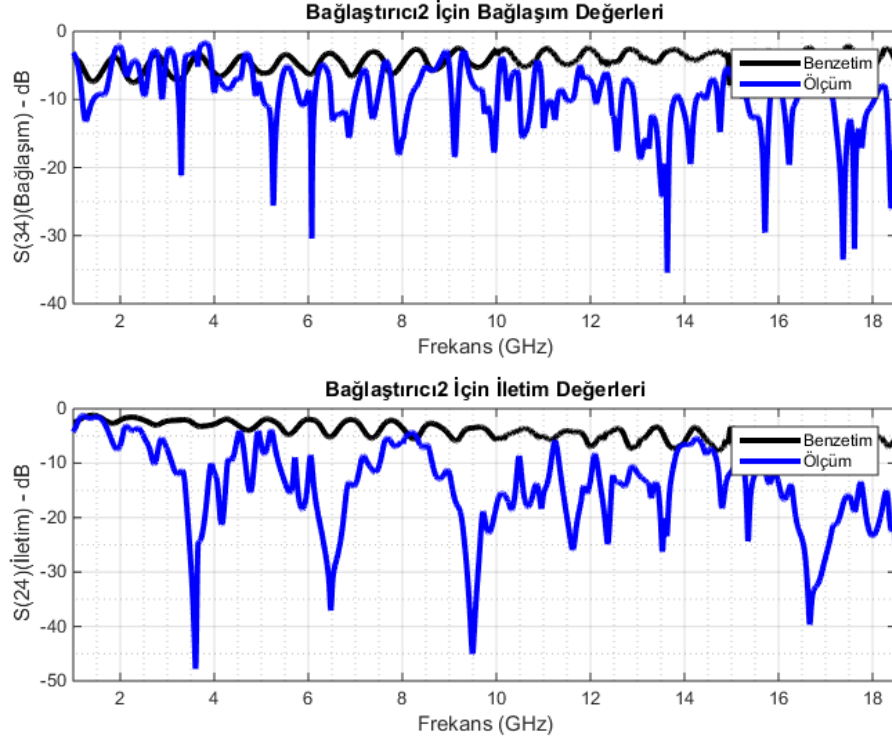
Şekil 5.34'te verilmiş Kapı 1 ve Kapı 4 için elde edilen geri dönüş kaybı grafiklerinde, benzetimle karşılaştırıldığında oldukça yüksek seviyede farklara sahip değerlerde oldukları görülmektedir. Bağlaştırmacı1 konfigürasyonunda düşük frekans bölgesinde kayıp fazla görülmezken, bu konfigürasyonda bozulmanın oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 5.35'te verilen yalıtım grafiğinde ise, yalıtım değerlerinin benzetimle oranla fazlaca düştüğü görülmektedir. Bant boyunca, ölçüm sonuçları benzetim sonuçlarından yaklaşık 5 dB daha düşük değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir.



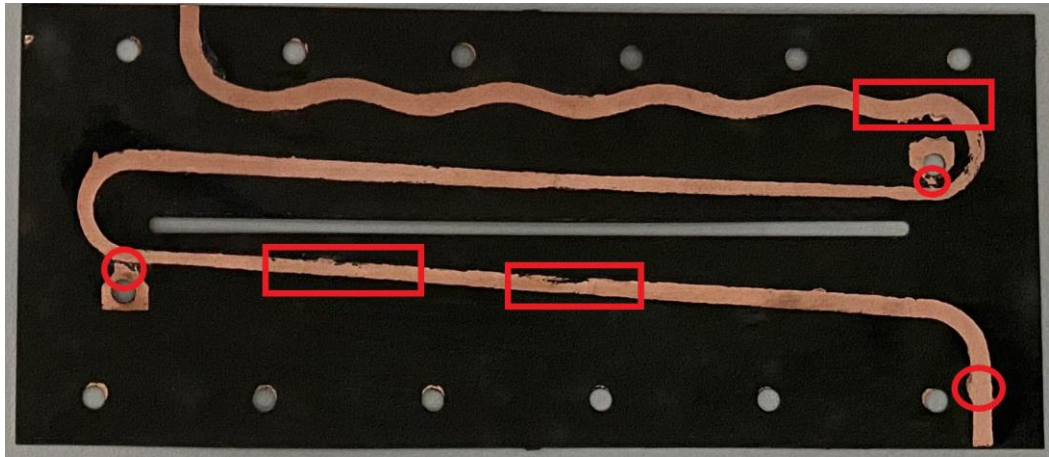
Şekil 5. 36 Bağlaştırmacı2 İçin Kapı 1 Giriş Kapısı İken Bağlaşım Grafikleri

Şekil 5.36 ve Şekil 5.37'de, sırasıyla kapı 1 ve kapı 4 giriş kapısı seçildiğinde elde edilen bağlaşım ve iletim değerleri grafikleri verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi, birçok parametrenin sonuçlarının benzetimden farklı gelmesinden ötürü, bağlaşımın benzetimle oranla oldukça düşük değerlerde ve beklenen örüntüden uzak oldukları görülmektedir.



Şekil 5. 37 Bağlaştırmacı2 İçin Kapı 4 Giriş Kapısı İken Bağlaşım Grafikleri

Bölüm 5.1’de açıklanmış Bağlaştırmacı1 yapısının üretiminde karşılaşılan zorluklarla, Bağlaştırmacı2 yapısının üretiminde de karşılaşılmıştır. Bu yapının üretiminde de, serimin aktarımının ardından görülen süreksizlikler, yapının işleyişini bozmaktadır.



Şekil 5. 38 Bağlaştırmacı2 Orta Katmanı

Şekil 5.38’de görülebileceği gibi, bu yapıda da süreksizlikler ve hatlarda incelmeler oluşmuştur. Bağlaştırmacı2 yapısında ek olarak karşılaşılan bir diğer sorun da, çapraz geçiş deliğinin uzaklığında kullanılan iletkenin mesafesinin benzetimde kullanılan



değerle aynı olmamasıdır. Bölüm 4.4.3'te, bu parametrenin yapının çalışmasında etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bağlaştırmacılığın üretiminde bahsedilen, serimin hizalanmasındaki ufak kaymalar, bu yapıda çapraz geçiş deliğinin bulunmasından ötürü daha bozucu bir etkiye sahip olmuştur.

Her iki yapı da; yüksek frekanslara çıkması, geniş bant aralığına sahip olması, yapının hassaslığı nedeniyle daha profesyonel yöntemlerle üretime ihtiyaç duymaktadır. Lazer ile devre kazımanın yapıldığı yöntemlerin, bu hassaslığa sahip bir yapının üretimi için daha uygun olacaktır.





## 6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, 1 – 15 GHz bandında,  $\pm 6$  dB genlik dengesinde performans gösteren, iki farklı yapıda  $180^\circ$  hibrit bağlaştırmacı tasarımı, benzetimi ve üretimi yapılmıştır.

Çalışmada, geniş bantlı bağlaştırmacı yapıları araştırılmış, araştırmanın sonucunda konik hat bağlaştırmacı hat bağlaştırmacılar üzerine yoğunlaşmıştır. Bu yapının teorisi ve bu yapıya benzer çalışmalar taranmıştır.

Çalışmanın başlangıcında, merkez frekans 10 GHz alınarak, ultra-geniş bant aralığına sahip  $180^\circ$  hibrit bağlaştırmacı tasarımı hedeflenmiştir. Benzetim ortamında iki farklı yapı inşa edilmiş ve bağlaştırmacı performansları karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, hücre boyutu, farklı çözüm yöntemi ve çapraz geçiş deliğinin uzaklığı parametrelerinin sonuçlara etkisi gözlemlenmiş, karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda, “Time Domain Solver” çözücüsü ile “Frequency Domain Solver” çözücüsünde yapılan benzetimlerden oldukça benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılacak hücre boyutunun ise, parametrik tarama sonucunda görülebileceği sonucuna varılmıştır. Bağlaştırmacı2 yapısında kullanılan çapraz geçiş deliğinin, kuvvetli bağlaştırmacı noktasına uzaklığının önemli bir parametre olduğu, çok yakın seçilmesinin bağlaştırmacı mekanizmasına bozucu etkileri olduğu görülmüştür.

Yapının üretiminde, üçlü şerit hat yapısı kullanılmıştır. 1 adet 10 mil kalınlığında, 2 adet 60 mil kalınlığında RT/Duroid 5880 alttaş katmanlar kullanılmıştır. Bu katmanlar, topraklama için de kullanılacak iki metal yüzey arasına vidalanarak monte edilmiştir.

Kullanılan kimyasal kazıma yöntemi, üretim hassasiyetini karşılamayarak yapıya bozucu etkiler vermiştir. Özellikle Bağlaştırmacı2 yapısındaki bozucu etkisi çok daha fazla olmuştur.

Teorik kazanımları, benzetim yetkinlikleri ve özellikle üretim kısmında yaşanan aksaklıklardan edinilen kazanımların ardından, incelenmesi gereken bazı konular mevcuttur. Özellikle benzetim ve üretim arasındaki karşılaştırmaların doğru bir biçimde yapılabilmesi için, orta katmanın üretiminde lazer ile devre kazıma yöntemlerinin çok daha uygun ve risk içermeyeceği düşünülmektedir. Bu yöntemle üretilmiş devrenin benzetim sonuçlarıyla sapmalarının kıyaslanması, ultra-geniş bantlı yapıların performansını da gözlemleyebilmek amacıyla, olası gelecek çalışmalardan olacaktır.

## 7. KAYNAKÇA

- [1] Pozar, David M., Microwave Engineering, John Wiley & Sons, **2009**.
- [2] Javadzadeh, S., Majedi S., Farzaneh F., Broadside Coupler Channels 1 to 10 GHz, Microwaves and RF, Vol. 51, pp. 68 - 77, **2012**.
- [3] Chan, Kevin K.M., Tan, Adrian E. C., Karumudi R., Design and Analysis of A Decade Bandwidth 180 Degree Hybrid Coupler, IET Microwaves, Antennas & Propagation, Vol. 7, pp. 71 -77 , **2012**.
- [4] Russel, T., 180-Deg. Hybrids Control Signals From 2 to 20 GHz, Microwaves & RF, Vol. 1, pp. 129 - 130, **1988**.
- [5] Scherr, S., Ayhan, S., Adamiuk, G., Pahl, P., Zwick, P., Ultrawide Bandwidth 180 Degree-Hybrid-Coupler in Planar Technology, International Journal of Microwave Science and Technology, Vol 2014, p. 6, **2014**.
- [6] Shelton, J. P., Impedances of Offset Parallel-Coupled Strip Transmission Lines, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-14, pp. 7 - 15, **1966**.
- [7] Klopfenstein, R. W., A Transmission Line Taper of Improved Design, Proceedings of the IRE, Vol. 44, pp. 31 - 35, **1956**.
- [8] Shelton, J., Mosko, J.A., Synthesis and Design of Wide-Band Equal-Ripple TEM Directional Couplers and Fixed Shifters, IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-14, no. 10, pp. 462 - 473, **1966**.
- [9] Collin, R.E., Foundations of Microwave Engineering, Mc-Graw Hill, **1992**.



**HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

**HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA**

Tarih: 30/06/2020

Tez Başlığı / Konusu: Ultra-Geniş Bantlı 180 Derece Hibrit Bağlaştırıcı Tasarımı

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler, d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 110 sayfalık kısmına ilişkin, 30/06/2020 tarihinde şahsım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %6 'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Merve AKIN  
Öğrenci No: N16221028  
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği  
Programı:  
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

30.06.2020

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Birsen SAKA

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Merve Akın  
Doğum yeri : Antalya  
Doğum tarihi : 13.08.1993  
Elektronik posta adresi : merveakin13@yahoo.com  
Yabancı dili : İngilizce

### EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi,  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği ( 2011 – 2016)  
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi,  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği ( 2017 – 2020)

### İş Tecrübesi

2017 - ... ROKETSAN A.Ş

RF & Mikrodalga Tasarım Mühendisi