T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OLUKLU PARALEL PLAKALI DALGA KILAVUZLARININ ANALİZİ, TASARIMI VE İNCELENMESİ

Fatih ÇOLAK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Agah Oktay ERTAY

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Dr. Öğr. Üyesi Agah Oktay ERTAY
Dr. Öğr. Üyesi Umut Şükrü YAŞAR
Dr. Öğr. Üyesi Semih DOĞU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Fatih ÇOLAK]. Tüm hakları saklıdır.

ÖZET

OLUKLU PARALEL PLAKALI DALGA KILAVUZLARININ ANALİZİ, TASARIMI VE İNCELENMESİ

Fatih ÇOLAK

Yüksek Lisans Tezi
Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Ögr. Üyesi Agah Oktay ERTAY
2026, 42 sayfa

Mikrodalga sistemlerinde düşük dispersiyon özellikleriyle öne çıkan kayma-simetrik çift oluklu paralel plakalı dalga kılavuzlarının (GS-DCPPW) geleneksel tam dalga analizleri genellikle yavaş ve karmaşıktır. Bu tezde, söz konusu yapıların boyutsal sentezi ve analizi için Genelleştirilmiş Saçılma Matrisinin Yardımcı Fonksiyonları (AFGSM) yöntemini temel alan, oldukça hızlı ve pratik yeni bir tasarım modeli geliştirilmiştir.

Önerilen yaklaşımda, birim hücrenin saçılma (S) parametrelerini elde etmek için zaman alan tam dalga çözücüler yerine eşdeğer iletim hattı devre modeli kullanılmıştır. AFGSM yöntemi sayesinde karmaşık özdeğer denklemleri çözülmeden, yalnızca yardımcı fonksiyonların sıfır geçişleri incelenerek yapının iletim ve durdurma bantları kolaylıkla belirlenebilmektedir.

Algoritmanın geçerliliği, Ku-bandı ve X-bandı filtre uygulamaları için optimize edilen birim hücrelerle test edilmiş; performans sonuçları ticari tam dalga simülatörleri (CST ve HFSS) ile doğrulanmıştır. Geliştirilen bu yöntem, tasarım sürecinde 360 saatlik hesaplama sürelerini 20 saniyeye kadar düşürerek önemli bir hız avantajı sağlamış; aynı zamanda literatürdeki örneklere kıyasla çok daha kompakt ve geniş bant bastırma kapasitesine sahip filtrelerin tasarlanabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Oluklu paralel plakalı dalga kılavuzları, boyutsal sentez, kayma simetrisi, periyodik filtre tasarımı, AFGSM yöntemi.

ABSTRACT

ANALYSIS, DESIGN AND INVESTIGATION OF CORRUGATED PARALLEL PLATE WAVEGUIDES

Fatih ÇOLAK

Master's Thesis
Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,
Department of Electrical Electronics Engineering
Advisor: Assis. Prof. Agah Oktay ERTAY
2026, 42 pages

Traditional full-wave analyses of glide-symmetric double-corrugated parallel-plate waveguides (GS-DCPPW)—components critical to microwave systems due to their low dispersion properties—are typically computationally complex and extremely time-consuming. To address this limitation, this thesis presents a novel, rapid, and highly practical design methodology based on the Auxiliary Functions of the Generalized Scattering Matrix (AFGSM) for the dimensional synthesis and analysis of these structures.

The proposed approach utilizes an equivalent transmission line circuit model rather than conventional, time-consuming full-wave solvers to extract the scattering (S) parameters of the unit cell. By employing the AFGSM method, the passband and stopbands of the structure can be readily identified simply by analyzing the zero-crossings of the auxiliary functions, entirely eliminating the need to solve complex eigenvalue equations.

The validity of the algorithm was tested using unit cells optimized for Ku-band and X-band filter applications, with the resulting performances successfully verified against commercial full-wave simulators (CST Microwave Studio and HFSS). Ultimately, the developed method offers a significant speed advantage within the design space—reducing a computational process that would normally take 360 hours down to merely 20 seconds. Furthermore, it demonstrates that it is possible to design highly compact filters with broader stopband suppression capabilities compared to existing alternatives in the literature.

Keywords: corrugated parallel plate waveguides, dimensional synthesis, glide symmetry, periodic filter design, AFGSM method.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın planlanmasından tamamlanmasına kadar geçen süreçte engin bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, karşılaştığım zorluklarda sabır ve anlayışla desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Agah Oktay ERTAY'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan, maddi ve manevi destekleriyle her an yanımda hissettiğim, bana olan inançlarını hiçbir zaman yitirmeyen kıymetli aileme; ayrıca eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği olan tüm değerli hocalarıma ve büyüklerime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Fatih ÇOLAK
Haziran, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
TABLOLAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
1.1. Çalışmanın Arka Planı 1
1.2. Problemin Tanımı 3
1.3. Çalışmanın Amacı 3
1.4. Çalışmanın Özgün Değeri 4
1.5. Kapsam ve Sınırlılıklar 5
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR 6
2.1. Periyodik Yapılar 6
2.1.1. Periyodik yapıların temel özellikleri 6
2.1.2. Dispersiyon diyagramları 7
2.1.3. Özdeğer denklemleri 7
2.2. Kayma Simetrisi 8
2.2.1. Kayma simetrisi kavramı 8
2.3. Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi Yöntemi 9
2.3.1. Saçılma parametreleri 9
2.3.2. Yardımcı fonksiyonlar yaklaşımı 9
2.4. Elektromanyetik Benzetim Yöntemleri 10
2.4.1. Tam dalga simülatörleri 11
2.4.2. Mevcut yöntemlerin kısıtları 11
3. YÖNTEM 12
3.1. Oluklu Paralel Plakalı Dalga Kılavuzları 12
3.1.1. Tek oluklu yapılar 12
3.1.2. Kayma Simetrili Çift oluklu yapılar 12
3.1.3. Eşdeğer devre modelleri 13
3.2. AFGSM Tabanlı Sentez Metodolojisi 14
3.2.1. Algoritmanın yapısı 15
3.2.2. Tasarım uzayının tanımlanması 15
3.2.3. Adım adım tasarım süreci 16
4. BULGULAR 18
4.1. Birim Hücre Analizleri 18

4.1.1. Geniş bant analizi 18
4.1.2. Dar bant analizi 19
4.1.4. Benzetim Doğrulamaları 20
4.2. Bant Durduran Filtre Tasarımları 22
4.2.1. Ku-bant tek oluklu PPW filtre tasarımı 23
4.2.2. X-bant çift oluklu PPW filtre tasarımı 24
4.3. Tasarım Senaryolarının Karşılaştırılması 25
4.3.1. Senaryo 1: Dar bantlı tasarım 25
4.3.2. Senaryo 2: Hedef bant genişliğini sağlayan tasarım 26
4.3.3. Senaryo 3: Kompakt tasarım 27
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 31
5.1. Yöntemin Değerlendirilmesi 31
5.1.1. Tasarım hızı ve verimlilik 31
5.1.2. Boyut küçültme avantajları 32
5.1.3. Sınırlılıklar ve karşılaşılan zorluklar 32
5.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler 33
KAYNAKÇA 35
EKLER 39
Ek A. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Genişletilmiş Çıkarımı ve Birim Hücre S-Parametrelerinin Elde Edilmesi 39

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Şekil 4a ve 4b'deki EE ve AFGSM yöntemlerinin frekans davranışları için bant kenar frekansı sonuçları. 20

Tablo 2 Belirli bir frekans sapması ile 10 GHz merkez frekanslı çeşitli durdurma bant genişliklerine karşı $h_1 = 0.5$ mm için AFGSM ile bulunan $a, h_2 = h_3$ ve b parametre değerleri. Frekans sapması, belirli bir hata frekansı aralığında bant kenarı frekanslarının belirlenmesine ve beklenen merkez frekansından sapmaya bağlı olan bir miktardır. 25

Tablo 3. Tüm senaryolar için tasarlanmış birim hücre parametreleri ve N = 10 için toplam filtre boyutları (TFD). 28

Tablo 4. AFGSM yöntemiyle tasarlanan bant durdurma filtrelerinin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmalı tablosu. 29

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1 1 (bir) boyutlu oluklu paralel plakalı dalga kılavuzlarının birim hücre geometrileri. (a) tek CPPW; (b) kayma simetrik DCPPW 8
Şekil 2 (a) Tek oluklu ve (b) kayma simetrik çift oluklu PPW yapılarının eşdeğer devre modeli. 14
Şekil 3. (a) Geniş ve (b) dar durdurma bandı bölgesi analizi için tek oluklu PPW'nin dispersiyon diyagramı ve X_+, X_- frekans davranışı. 19
Şekil 4. (a) Geniş ve (b) dar durdurma bandı bölgesi analizi için kayma simetrik çift oluklu PPW'nin dispersiyon diyagramı ve X_+, X_- frekans davranışı. 20
Şekil 5. Farklı dielektrik yüklemeler için tek oluklu PPW'nin dispersiyon diyagramı ve X_+, X_- frekans davranışı: (a) $\varepsilon_r = 1$, $\varepsilon_r = 2{,}25$ (b) $\varepsilon_r = 3$, $\varepsilon_r = 11{,}2$. 21
Şekil 6. Farklı dielektrik yüklemeler için kayma simetrik çift oluklu PPW'nin dispersiyon diyagramı ve X_+ ve X_- frekans davranışı: (a) $\varepsilon_r = 1$, $\varepsilon_r = 2{,}25$ (b) $\varepsilon_r = 3$, $\varepsilon_r = 11{,}2$. 21
Şekil 7. (a) CST-FD dispersiyon diyagramı. Tek bir CPPW birim hücresinin baskın modunun, X_+^{full}, X_-^{full} frekans davranışı ve çok modlu uyarım altında eşdeğer devre modeli geometrisinin dispersiyon diyagramı. (b) Tam dalga simülatörü destekli X_+^{full}, X_-^{full} kullanılarak h_2 varyasyonu ile tek bir CPPW birim hücresinin tolerans analizi. 22
Şekil 8. (a) CST-FD dispersiyon diyagramı. Tek bir CPPW birim hücresinin baskın modunun X_+^{full}, X_-^{full} frekans davranışı ve çok modlu uyarım altında eşdeğer devre modeli geometrisinin dispersiyon diyagramı. (b) Tam dalga simülatörü destekli X_+^{full}, X_-^{full} kullanılarak Δa varyasyonu ile kayma simetrik DCPPW birim hücresinin tolerans analizi..... 22
Şekil 9. AFGSM fonksiyonları X_+ ve X_- aracılığıyla hesaplanan bant aralığının a/h_2 ve b/h_2'ye bağlı frekans değişimi. 23
Şekil 10. (a) AFGSM fonksiyonları aracılığıyla tasarlanmış bant aralığı. (b) CST, HFSS ve EC sonuçları aracılığıyla tasarlanmış tek CPPW birim hücresinin farklı sayıdaki kademeli bağlanmasının genlik-frekans karakterizasyonu. 24
Şekil 11. (a) Senaryo 1 için AFGSM fonksiyonları ve diğer hesaplama yöntemleri kullanılarak tasarlanan kayma simetrik DCPPW'nin elde edilen iletim bandı-durdurma bandı karakterizasyonu. (b) Senaryo 1'in farklı sayıda tasarlanmış GS-DCPPW birim hücresinin CST, HFSS ve eşdeğer devre sonuçları aracılığıyla kademeli olarak bağlanmasının $|S_{21}|$ frekans karakterizasyonu. 25
Şekil 12. **(a)** Senaryo 2 için AFGSM fonksiyonları ve diğer hesaplama yöntemleri kullanılarak tasarlanan kayma simetrik DCPPW'nin elde edilen iletim bandı-durdurma bandı

karakterizasyonu. **(b)** CST, HFSS ve EC sonuçları aracılığıyla Senaryo 2'nin farklı sayıda tasarlanmış GS-DCPPW birim hücresinin kademeli bağlanmasının $|S_{21}|$ frekans karakterizasyonu. 27
Şekil 13. **(a)** Senaryo 3 için AFGSM fonksiyonları ve diğer hesaplama yöntemleri kullanılarak tasarlanan kayma simetrik DCPPW'nin elde edilen iletim bandı-durdurma bandı karakterizasyonu. **(b)** Senaryo 3'ün farklı sayıda tasarlanmış GS-DCPPW birim hücresinin CST, HFSS ve EC sonuçları aracılığıyla kademeli olarak bağlanmasının $|S_{21}|$ frekans karakterizasyonu. 28
Şekil 14. Tasarım hedeflerine ulaşmak için Senaryo 1, Senaryo 2 ve Senaryo 3'ün karşılaştırılması. 28

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

AFGSM	Genelleştirilmiş Saçılma Matrisinin Yardımcı Fonksiyonları
BSF	Bant Durduran Filtre
CPPW	Oluklu Paralel Plakalı Dalga Kılavuzu
CST	Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi
EC	Eşdeğer Devre
EE	Özdeğer Denklemi
FHMSIW	Katlanmış Yarım Modlu Substrat Entegre Dalga Kılavuzu
GS-DCPPW	Kayma-Simetrik Çift Oluklu Paralel Plakalı Dalga Kılavuzu
GSM	Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi
HFSS	Yüksek Frekanslı Yapı Simülatörü
MM-GSM	Mod Uyumlama - Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi
NCS	Normalize Edilmiş Devre Boyutu
SLBW	Bastırma Seviyesi Bant Genişliği
SSPP	Sahte Yüzey Plazmon Polaritonları
UC	Birim Hücre
VNA	Vektör Ağ Analizörü

Simgeler

$A(f), D(f)$	ABCD parametrelerinin A ve D elemanları
a, b	Oluk genişlik parametreleri
a_1, b_1	Saçılma parametrelerinde kullanılan normalize güç dalgaları
β_x	x yönünde yayılan Floquet faz faktörü

δ	Frekans sapması
Δf	Durdurma bandı genişliği
ϵ_r	Dielektrik sabiti
E_t	Elektrik alanın teğet bileşeni
H_t	Manyetik alanın teğet bileşeni
h_1	Oluklu paralel plakalar arasındaki yükseklik
h_2	Alt plaka oluğunun yüksekliği
h_3	Üst plaka oluğunun yüksekliği
λ	Özdeğer
m	Kayma operatörü
N	Birim hücre sayısı
p	Periyot uzunluğu
$S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$	İki kapılı ağın klasik saçılma matrisi elemanları
$\boldsymbol{S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}}$	Genelleştirilmiş saçılma matrisinin blok alt matrisleri
$x_{\mp}^{full}$	Yardımcı fonksiyonların tam formu
$X_{\mp}$	Yardımcı fonksiyonların indirgenmiş formu

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Arka Planı

Periyodik yapılar, elektromanyetik dalgaların yayılımını kontrol etme kabiliyetleri nedeniyle onlarca yıldır araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu yapıların dalga yayılım karakteristikleri; ileri ve geri yönlü dalgalar, hızlı ve yavaş dalgalar ile elektromanyetik bant aralıklarının varlığı gibi zengin fiziksel olguları içermektedir (Amari vd., 2000; Ertay & Simsek, 2022; Hessel vd., 1973; Jimenez-Suarez vd., 2025; Lech & Mazur, 2004; Navarro vd., 1980; Othman vd., 2017; Petek vd., 2025; Simsek & Topuz, 2007; Tahir vd., 2024). Periyodik yapıların bu özelliklerinin anlaşılması ve yorumlanması, antenler, frekans seçici yüzeyler, filtreler ve metayüzeyler gibi kritik uygulamalarda önemli rol oynamaktadır (Alex-Amor vd., 2021; Ertay & Simsek, 2018a; Karamirad vd., 2023; Liu vd., 2020; Maci vd., 2011; Xu vd., 2024). Özellikle filtre uygulamalarında, durdurma bantları oluşturmak ve çoklu iletim/durdurma bandı karakteristikleri elde etmek için periyodik yapıların serbestlik derecelerinden faydalanılmaktadır (Ertay & Simsek, 2018a; Karamirad vd., 2023; Xu vd., 2024).

Son yıllarda, mikrodalga uygulamalarında daha yüksek simetrilere sahip periyodik yapıların analizi, tasarımı ve incelenmesi önem kazanmıştır (Arnberg vd., 2020; Dahlberg vd., 2017; Ghasemifard vd., 2018; Palomares-Caballero vd., 2020; Quevedo-Teruel vd., 2020, 2021). Kayma simetrisine sahip periyodik yapılar, ilk olarak 50-60 yıl önce çalışılmaya başlanmış olup (Ebrahimpouri vd., 2017; Hessel vd., 1973; Quevedo-Teruel vd., 2015; Tamayo-Dominguez vd., 2019), günümüzde farklı geometrilerde uygulanabilmektedir (Chen vd., 2020; Ebrahimpouri vd., 2017; Ertay, 2024; Fischer & Valerio, 2024; Ghasemifard vd., 2017, 2018; Herran vd., 2023; Memeletzoglou vd., 2019; Palomares-Caballero vd., 2020; Valerio vd., 2017, 2018). Bu yapılar, dispersiyonu azaltma, bant aralıklarını ve bant genişliklerini kontrol etme ve belirli uygulamalar için eşdeğer kırılma indisini ayarlama gibi üstün performans özellikleri nedeniyle yoğun olarak araştırılmaktadır (Quevedo-Teruel vd., 2021; Tamayo-Dominguez vd., 2019).

Kayma simetrisini uygulayan geometrilerden biri de oluklu paralel plakalı dalga kılavuzları (CPPW)' dır. Bu yapılar, geniş bantlı mikrodalga bileşenlerinin geliştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Fischer & Valerio, 2022; Lai & Kehn, 2019; Liu vd., 2020; Quevedo-Teruel vd., 2015). Kayma-simetrik oluklara sahip CPPW periyodik yapıları ile mikrodalga devreleri tasarlarken, öncelikle yapının dispersiyon diyagramının çıkarılması gerekmektedir.

Dispersiyon diyagramı, yapının zayıflama ve faz ilişkileri hakkında kritik bilgiler sunmaktadır (Mesa vd., 2020).

Bu yapıların dispersiyon analizi genellikle mod uyumlama teknikleri, momentler yöntemi, frekans domeni çözücüleri ve tam dalga elektromanyetik benzeticilerin özmod çözücüleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir (Bagheriasl vd., 2019; Castillo-Tapia vd., 2021, 2022; Ghasemifard vd., 2018; Petek vd., 2024; Valerio vd., 2017, 2018). Mod uyumlama formülasyonları, kayma-simetrik periyodik yapıların dispersiyon özelliklerini incelemek için kullanılmıştır (Ghasemifard vd., 2018; Petek vd., 2024). Ancak bu yöntemler, kayma simetrisinin periyodik yapı üzerindeki etkisinin fiziksel olarak anlaşılmasını sağlamakta yetersiz kalabilmektedir. Frekans domeni çözücülerinde ise, periyodik yapının birim hücresine ait ağ parametreleri (S-parametreleri, ABCD parametreleri) çok modlu uyarım kullanılarak belirlenmekte ve elde edilen parametreler özdeğer denkleminde yerine konularak dispersiyon diyagramı elde edilmektedir (Castillo-Tapia, 2022; Lech & Mazur, 2004; Simsek & Topuz, 2007). Karmaşık geometrilere rağmen bu yöntemlerle dispersiyon diyagramını hassas bir şekilde elde etmek mümkün olsa da tam dalga benzeticiler oldukça uzun hesaplama sürelerine yol açmaktadır. Bu nedenle, kayma-simetrik paralel plakalı dalga kılavuzlarının bant aralığı özelliklerini basit ve etkili hesaplama teknikleriyle incelemek ve tasarım yapmak, tasarım süresini önemli ölçüde azaltabilecek potansiyele sahiptir.

Bu doğrultuda, Valerio ve arkadaşları tarafından kayma-simetrik oluklara sahip CPPW'lerin analizi için bir eşdeğer devre (EC) modeli önerilmiştir (Valerio vd., 2017). Bu model, süreksizliklerle uyarılan bölgelerde, sonsuz sayıdaki yüksek dereceli modlar arasından yalnızca baskın modun yayıldığı varsayımına dayanmaktadır (Mesa vd., 2018b). Devre modeli, birim hücrenin ABCD parametrelerini hesaplayan ve geniş bir geometrik parametre yelpazesi için tam dalga benzeticilerle karşılaştırılabilir dispersiyon sonuçları üreten hızlı ve etkili bir yöntemdir (Valerio vd., 2017). Bu devre modelinden ABCD veya S-parametreleri elde edildikten sonra, modelin dispersiyon diyagramı ancak (Simsek & Topuz, 2007; Valerio vd., 2017)'de belirtilen özdeğer denklemlerinin çözülmesiyle elde edilebilmektedir. Diğer taraftan, Genelleştirilmiş Saçılma Matrisinin Yardımcı Fonksiyonları (AFGSM) yöntemi (Simsek & Topuz, 2007), yardımcı fonksiyonların sıfır geçişlerini analiz ederek periyodik yapıların iletim ve durdurma bandı bölgelerini belirleyen oldukça başarılı alternatif bir tekniktir. Bu yöntem, özdeğer denklemini çözme ihtiyacını ortadan kaldırarak periyodik yapıların bant aralıklarının kontrolünde önemli bir hesaplama yükü azaltımı sağlamaktadır (Simsek & Topuz, 2007). AFGSM yöntemi daha önce dikdörtgen dalga kılavuzları (Ertay & Simsek, 2018a; Simsek &

Topuz, 2007), fotonik kristaller (Şimşek, 2014) ve helis yavaş dalga yapıları (Ertay & Simsek, 2018a, 2018b) gibi çeşitli uygulamalarda periyodik yapıların iletim/durdurma bandı bölgelerini belirlemek ve birim hücre tasarımı yapmak için kullanılmıştır. Ancak, mevcut literatürde AFGSM yönteminin kayma-simetrik oluklara sahip CPPW yapılarının analizi, tasarımı ve incelenmesine uygulandığına dair bir çalışmaya rastlanmamıştır.

1.2. Problemin Tanımı

Kayma-simetrik çift oluklu paralel plaka dalga kılavuzları (GS-DCPPW), elektromanyetik bant aralığı, düşük dispersiyon ve eşdeğer kırılma indisini kontrol edebilme gibi önemli teknik özelliklere sahiptir. Bu özellikler, onları gelişmiş mikrodalga sistemlerinin tasarımında değerli kılmaktadır. Ancak, bu yapıların analizi ve tasarımı için kullanılan geleneksel yöntemler, ya fiziksel anlayışı sınırlayan karmaşık matematiksel formülasyonlar (mod uyumlama gibi) ya da yüksek hesaplama yükü getiren CST, HFSS gibi tam dalga benzeticilerdir. Tam dalga benzeticiler, yüksek doğruluk sunmalarına rağmen, özellikle parametrik çalışmalar ve optimizasyon süreçlerinde tasarım süresini önemli ölçüde uzatmaktadır. Bu durum, hızlı prototipleme ve geniş tasarım uzaylarının taranmasını gerektiren uygulamalarda önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Literatürde GS-DCPPW yapılarının analizi için önerilen eşdeğer devre modeli (Valerio vd., 2017), hızlı çözüm imkânı sunmakla birlikte, dispersiyon diyagramını elde etmek için yine bir özdeğer denkleminin çözülmesini gerektirmektedir. Bu da frekans taramaları yapmayı zorunlu kılarak hesaplama yükünü bir miktar artırmaktadır. AFGSM yöntemi ise özdeğer denklemini çözme gerekliliğini ortadan kaldırarak, doğrudan S-parametreleri üzerinden bant kenar frekanslarının tespitine olanak tanımaktadır. Bu yöntemin, sağladığı hız avantajına rağmen, GS-DCPPW yapılarının analizi ve boyutsal sentezi için henüz kullanılmamış olması, literatürde önemli bir boşluk olarak durmaktadır. Bu tez çalışması, işte bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

1.3. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, bir boyutlu (1D) kayma-simetrik çift oluklu paralel plakalı dalga kılavuzlarının hızlı, basit ve yaklaşık bir yöntemle boyutsal sentezini gerçekleştirecek yeni bir tasarım metodolojisi geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki alt hedefler belirlenmiştir:

- AFGSM yönteminin, tek ve kayma-simetrik çift oluklu PPW yapılarının iletim/durdurma bandı bölgelerini belirlemedeki etkinliğini test etmek ve sonuçlarını geleneksel özdeğer denklemi çözümüyle karşılaştırmak.
- AFGSM yöntemini temel alan, adım adım ilerleyen ve kullanıcıya belirli tasarım kriterlerini (hedef durdurma bandı frekans aralığı ve bastırma seviyesi) karşılayan birim hücre boyutlarını sunan bir tasarım stratejisi oluşturmak.
- Önerilen tasarım stratejisini, Ku-bandı (15.20-17.78 GHz) ve X-bandı (8.27-10.91 GHz) için belirlenen tasarım hedeflerini karşılayan filtre örnekleri üzerinde uygulamalı olarak göstermek.
- Tasarımı yapılan birim hücrelerin, farklı sayılarda periyodik olarak bağlanmasıyla oluşturulan filtrelerin performansını, CST Microwave Studio ve HFSS gibi tam dalga elektromanyetik benzeticiler kullanarak doğrulamak.
- Elde edilen filtre performansını (bastırma bandı genişliği, iletim bandı dalgalanmaları, fiziksel boyutlar) literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırarak, önerilen yöntemin avantajlarını ve sınırlamalarını ortaya koymak.

1.4. Çalışmanın Özgün Değeri

Bu tez çalışması, aşağıda sıralanan özgün katkılarıyla literatürdeki yerini almayı hedeflemektedir:

İlk Uygulama: AFGSM yöntemi, ilk kez bu çalışmada kayma-simetrik çift oluklu paralel plakalı dalga kılavuzlarının analizi ve boyutsal sentezi için kullanılmıştır. Bu, yöntemin uygulama alanını genişleten önemli bir yeniliktir.

Hızlı Tasarım Metodolojisi: Eşdeğer devre modeli (Valerio vd., 2017) ile AFGSM yönteminin (Simsek & Topuz, 2007) birleştirilmesiyle, tam dalga benzeticilere olan ihtiyacı minimize eden, hızlı ve etkili bir tasarım prosedürü geliştirilmiştir. Bu prosedür, S-parametrelerini elde etmek için tam dalga çözücüleri kullanan literatürdeki diğer çalışmalara (Bagheriasl vd., 2019; Castillo-Tapia, 2022) kıyasla önemli bir hız avantajı sunmaktadır. AFGSM fonksiyonlarının kök bulma rutini ile kullanılması, ince frekans taramalarını ortadan kaldırarak hesaplama yükünü yaklaşık altı kat azaltabilmektedir.

Kompakt Tasarım İmkânı: Önerilen yöntem, aynı tasarım hedeflerini karşılayan çok sayıda birim hücre geometrisi üretebilmektedir. Bu sayede tasarımcı, bu çözüm kümesi içinden en küçük boyutlu birim hücreyi seçme imkânına kavuşmaktadır. Bu, özellikle boyut kısıtı olan uygulamalar için büyük önem taşımaktadır.

Detaylı Analiz ve Tasarım: Çalışmada, tek ve kayma-simetrik çift oluklu yapılar için geniş/dar bantlı durdurma bölgeleri, farklı dielektrik sabiti yüklemesi, üretim toleranslarının etkisi gibi çeşitli senaryolar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu analizler, AFGSM yönteminin bu tür yapıların elektromanyetik bant aralığı davranışını anlamadaki gücünü göstermektedir.

Performans Karşılaştırması: Tasarımı yapılan filtrelerin performansı, literatürdeki benzer çalışmalarla (mikroşerit, dalga kılavuzu tabanlı filtreler) bastırma bandı genişliği, bastırma seviyesi, iletim bandı eğimi ve normalize edilmiş devre boyutu gibi metrikler üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, önerilen yöntemin güçlü ve zayıf yönlerini nesnel bir şekilde ortaya koymaktadır.

1.5. Kapsam ve Sınırlılıklar

Bu tez çalışması, bir boyutlu (1D) tek ve kayma-simetrik çift oluklu paralel plakalı dalga kılavuzu yapılarıyla sınırlandırılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen geometrik parametreler Şekil 1'de tanımlanan $p, h_1, h_2, h_3, a, b\ ve\ m$ parametreleri ile sınırlıdır. Dielektrik malzeme olarak sadece hava ($\varepsilon_r = 1$) ve belirli dielektrik sabiti değerleri ($\varepsilon_r = 2.25, 3, 11.2$) dikkate alınmıştır. Tasarım uygulamaları, Ku-bandı (12-18 GHz) ve X-bandı (8-12 GHz) için belirlenen hedef frekans aralıklarını kapsamaktadır.

Çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle, kullanılan eşdeğer devre modeli (Valerio vd., 2017), süreksizlik bölgelerindeki yüksek dereceli mod etkileşimlerini yalnızca reaktif bileşenlerle modellemekte olup, bu durum tam dalga benzetim sonuçlarıyla küçük farklılıklara yol açabilmektedir. AFGSM yönteminin indirgenmiş formu, yalnızca tek modlu yayılım varsayımına dayandığından, çok modlu etkileşimlerin baskın olduğu durumlarda tam dalga destekli formunun kullanılması gerekmektedir. Bu tez kapsamında, üretim toleranslarının etkisi kısaca incelenmiş olup, detaylı bir tolerans analizi veya optimizasyonu yapılmamıştır. Ayrıca, tasarımı yapılan filtrelerin iletim bantlarındaki dalgalanmaların minimize edilmesi için kullanılan kayma simetrisini bozma veya kademeli boyutlandırma (inceltme) gibi yöntemler bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Bu tezde yer alan içerik ve tasarımlar (Çolak & Ertay, 2025) yayın ile literatüre giren ve bu tezden üretilen makaleyi içermektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, tez çalışmasının temelini oluşturan kavramlar ve çerçeve ile ilgili çalışmalar detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Öncelikle periyodik yapıların temel özellikleri, dispersiyon diyagramları ve özdeğer denklemleri açıklanacak, ardından kayma simetrisi kavramı ve bu simetriye sahip yapıların elektromanyetik özellikleri irdelenecektir. Daha sonra, Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi (GSM) yöntemi ve bu yöntemin bir uzantısı olan Yardımcı Fonksiyonlar yaklaşımı tanıtılacaktır. Son olarak, elektromanyetik benzetim yöntemleri ve mevcut yöntemlerin kısıtları tartışılacaktır.

2.1. Periyodik Yapılar

Periyodik yapılar, belirli bir temel hücrenin (birim hücre) uzayın bir, iki veya üç yönünde düzenli aralıklarla tekrarlanmasıyla oluşan yapılardır. Bu yapıların elektromanyetik dalgalarla etkileşimi, mühendislik uygulamalarında geniş bir yelpazede kullanılmalarına olanak tanımaktadır. Antenler, filtreler, frekans seçici yüzeyler ve metayüzeyler bu uygulamalardan sadece birkaçıdır (Alex-Amor vd., 2021; Ertay & Simsek, 2018a; Karamirad vd., 2023; Liu vd., 2020; Maci vd., 2011; Xu vd., 2024).

2.1.1. Periyodik yapıların temel özellikleri

Periyodik yapıların en önemli özelliklerinden biri, elektromanyetik dalgaların yayılımını belirli frekans bantlarında engelleyebilmeleri (durdurma bandı) veya belirli bantlarda iletmeleridir (iletim bandı). Bu bant yapısı, periyodikliğin geometrik parametreleri ve kullanılan malzemenin özellikleri tarafından belirlenir. Periyodik yapılarda dalga yayılımı, Floquet teoremi ile tanımlanır. Bu teoreme göre, periyodik bir ortamda yayılan dalganın alan dağılımı, periyodik bir fonksiyon ile bir düzlem dalganın çarpımı şeklinde ifade edilebilir. Bu durum, dalga vektörünün (Floquet faz sabiti) sanal veya gerçek olmasına bağlı olarak dalganın sönümlenmesi veya yayılması anlamına gelir. Periyodik yapılar; ileri ve geri yönlü dalgalar, hızlı ve yavaş dalgalar ile elektromanyetik bant aralıklarının varlığı gibi zengin fiziksel olguları içermektedir (Amari vd., 2000; Coves vd., 2021; Ertay & Simsek, 2018a, 2022; Hessel vd., 1973; Jimenez-Suarez vd., 2025; Lech & Mazur, 2004; Mesa vd., 2018a; Navarro vd., 1980; Othman vd., 2017; Petek vd., 2025; Simsek & Topuz, 2007; Şimşek vd., 2012; Tahir vd., 2024).

2.1.2. Dispersiyon diyagramları

Periyodik bir yapının frekansa bağlı davranışını anlamanın en etkili yolu, dispersiyon diyagramını elde etmektir. Dispersiyon diyagramı, genellikle frekansın (f) Floquet faz sabitine (β_x) karşı çizildiği bir grafiktir (Mesa vd., 2020). Bu diyagram, yapının hangi frekanslarda dalga yayılımına izin verdiğini (iletim bantları) ve hangi frekanslarda dalgayı sönümlendirdiğini (durdurma bantları) açıkça gösterir. Durdurma bantları, dispersiyon eğrisinin olmadığı frekans bölgeleri olarak karşımıza çıkar. Dispersiyon diyagramı aynı zamanda dalganın faz hızı ve grup hızı gibi önemli parametreleri hakkında da bilgi verir. Bu diyagramın doğru ve verimli bir şekilde elde edilmesi, periyodik yapıların tasarımında kritik bir öneme sahiptir.

2.1.3. Özdeğer denklemleri

Periyodik bir yapının dispersiyon diyagramını elde etmenin matematiksel yolu, ilgili dalga denkleminin periyodik sınır koşulları altında çözülmesini sağlayan özdeğer denklemlerini kullanmaktır. Bir periyodik yapının birim hücresine ait ağ parametreleri (ABCD veya S-parametreleri) biliniyorsa, dispersiyon ilişkisi aşağıdaki özdeğer denklemi ile elde edilebilir (Valerio vd., 2017):

$$cos(\beta_x p) = \frac{A(f) + D(f)}{2} = A(f). \tag{1}$$

Denklem (1)'de β_x, x-yönünde yayılan dalgaya ait Floquet faz sabitini, p birim hücrenin periyodunu $A(f)$ ve $D(f)$ ise birim hücreye ait ABCD matrisinin frekansa bağlı elemanlarını temsil etmektedir.

Eğer birim hücrenin S-parametreleri mevcutsa, özdeğer denklemi aşağıdaki formu alır (Simsek & Topuz, 2007):

$$cos(\beta_x p) = \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}}. \tag{2}$$[1]

Denklem (2)'deki S_{11} ve S_{21} parametreleri, birim hücrenin saçılma parametresi bileşenlerini gösterir. Bu denklemlerin belirli bir frekans aralığında çözülmesiyle dispersiyon diyagramı elde

[1]Bu tezden üretilen Çolak & Ertay, (2025) atıfı ile verilen makalede bu denklemin sağ tarafındaki işaretlerin hepsi sadece yazım hatasından kaynaklı olarak + işaretli verilmiştir. Denklemin doğru yazımı (2) nolu denklemdeki gibi verilmektedir. Bu denkleme ilişkin elde edilen tüm sonuçlar hem makalede hem de bu tezde (2) nolu denkleme göre elde edilmiştir.

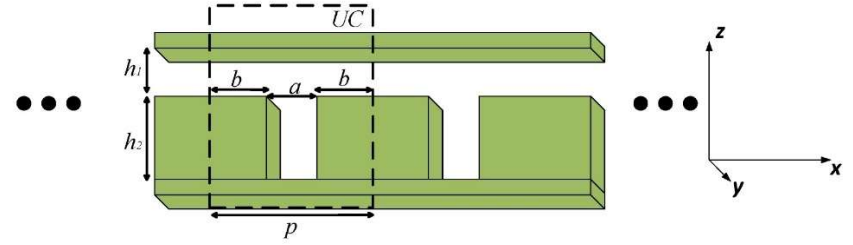
edilir. Ancak bu yöntem, özellikle geniş frekans bantlarında ince çözünürlüklü bir tarama yapılmasını gerektirdiğinden hesaplama yükü yüksek olabilir.

2.2. Kayma Simetrisi

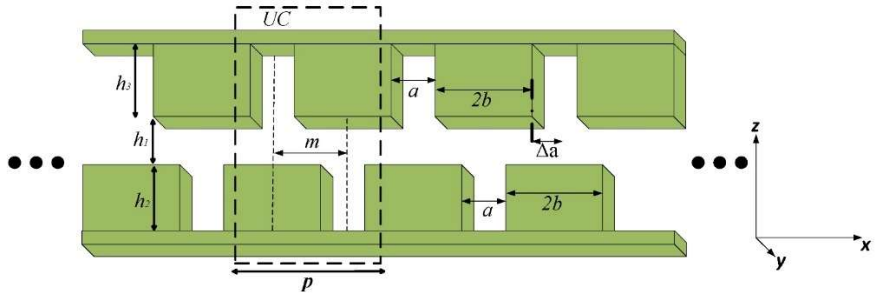
Kayma simetrisi, öteleme ve yansıma işlemlerinin bir birleşimi olan bir uzay simetrisi türüdür. Son yıllarda periyodik yapıların elektromanyetik özelliklerini iyileştirmek için sıklıkla başvurulan bir yöntem haline gelmiştir (Arnberg vd., 2020; Dahlberg vd., 2017; Ghasemifard vd., 2018; Palomares-Caballero vd., 2020; Quevedo-Teruel vd., 2020, 2021).

2.2.1. Kayma simetrisi kavramı

Bir periyodik yapı, belirli bir yönde periyodun yarısı kadar ($p/2$) ötelendiğinde ve aynı anda bir simetri düzlemine göre yansıtıldığında kendisiyle çakışıyorsa, bu yapı kayma simetrisine sahiptir (Hessel vd., 1973, Ertay 2024). Şekil 1'de tek oluklu (a) ve kayma simetrili çift oluklu (b) paralel plakalı dalga kılavuzlarının birim hücre geometrileri gösterilmektedir. Kayma simetrisi durumunda, üst ve alt oluklar birbirine göre periyodun yarısı kadar kaydırılmıştır. Şekil 1b'deki yapı için kayma simetrisi koşulu, $h_2 = h_3$ ve $m = p/2$ eşitliklerinin sağlanmasıdır (Valerio vd., 2017).



(a)



(b)

Şekil 1 Bir boyutlu oluklu paralel plakalı dalga kılavuzlarının birim hücre geometrileri. (a) tek CPPW; (b) kayma simetrik DCPPW

2.2.2. Kayma simetrili yapıların elektromanyetik özellikleri

Kayma simetrisi, periyodik yapılara önemli teknik avantajlar kazandırmaktadır. Bunların başlıcaları şunlardır (Quevedo-Teruel vd., 2021; Tamayo-Dominguez vd., 2019):

Düşük Dispersiyon: Kayma simetrisi, yapının dispersiyon karakteristiğini düzleştirerek geniş bir frekans bandı boyunca sabit faz hızı elde edilmesine yardımcı olur. Bu, özellikle geniş bantlı uygulamalar için kritiktir.

Bant Aralığı Kontrolü: Kayma simetrisi, elektromanyetik bant aralıklarının konumunu ve genişliğini hassas bir şekilde kontrol etme imkânı sağlar. Bu sayede istenilen frekanslarda yüksek bastırma seviyelerine sahip filtreler tasarlanabilir.

Eşdeğer Kırılma İndisi Ayarı: Yapının geometrik parametreleri değiştirilerek eşdeğer kırılma indisi belirli bir değere ayarlanabilir. Bu özellik, lensler ve metamalzeme uygulamaları için önemlidir.

Bu avantajlar, kayma simetrili yapıları özellikle filtre (Karamirad vd., 2023; Xu vd., 2024), anten (Liu vd., 2020) ve metayüzey (Maci vd., 2011) tasarımlarında oldukça cazip kılmaktadır.

2.3. Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi Yöntemi

Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi (GSM), çok modlu çalışan mikrodalga ağlarını karakterize etmek için kullanılan güçlü bir araçtır. Bir yapıdaki GSM, gelen ve yansıyan tüm modların genlikleri arasındaki ilişkiyi tanımlar.

2.3.1. Saçılma parametreleri

İki kapılı bir mikrodalga devresinde, saçılma parametreleri (S-parametreleri), gerilim veya akım dalgaları yerine normalize güç dalgaları cinsinden tanımlanır. S_{11}, 1. kapıdan yansıyan dalganın, 1. kapıya gelen dalgaya oranını, S_{21} ise, 1. kapıdan çıkan dalganın 2. kapıya gelen dalgaya oranını ifade eder. Periyodik yapıların analizinde, birim hücrenin S-parametreleri, yapının dispersiyon özelliklerini belirlemek için temel girdiyi oluşturur. Bu parametreler, eşdeğer devre modelleri veya tam dalga benzeticiler aracılığıyla elde edilebilir.

2.3.2. Yardımcı fonksiyonlar yaklaşımı

AFGSM yöntemi, Şimşek ve Topuz tarafından önerilmiş olup, periyodik yapıların iletim/durdurma bandı bölgelerini belirlemek için özdeğer denklemini çözme ihtiyacını ortadan

kaldıran yenilikçi bir yaklaşımdır (Simsek & Topuz, 2007). Bu yöntem, birim hücrenin GSM elemanlarından türetilen yardımcı fonksiyonların sıfır geçişlerini analiz ederek bant kenar frekanslarını doğrudan bulmayı sağlar. Denklem (3)'te çok modlu uyarılmış bir periyodik yapının özdeğer denklemi verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & -\boldsymbol{S_{11}} \\ \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{S_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{b_1} \\ \boldsymbol{a_1} \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} -\boldsymbol{S_{12}} & \boldsymbol{0} \\ -\boldsymbol{S_{22}} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{b_1} \\ \boldsymbol{a_1} \end{bmatrix} = 0. \tag{3}$$

Birim hücrede depo edilen kompleks gücün reel ve sanal kısımlarını incelenmesi sonucunda çok modlu uyarım için, AFGSM fonksiyonları aşağıdaki denklemle ifade edilir (Simsek & Topuz, 2007):

$$X_{\pm}^{full} = 2Im\left(S_{n,n} \pm S_{n,n+P}\right) - \sum_{k=M+1}^{P} \left|S_{n,k} \pm S_{n,k+P}\right|^2 = 0. \tag{4}$$

Burada P toplam mod sayısını, M yayılan mod sayısını, S_{ij} genelleştirilmiş saçılma matrisi elemanlarını ve n ise baskın moda karşılık gelen giriş kapısını temsil eder. Bu çalışmada kullanılan eşdeğer devre modeli (Valerio vd., 2017), tek modlu yayılım ($P = M = 1$) varsayımına dayandığından, denklem (4)'ün indirgenmiş formu denklem (5) kullanılabilir (Simsek & Topuz, 2007):

$$X_{\pm} = 2Im\left(S_{1,1} \pm S_{1,2}\right) = 0. \tag{5}$$

AFGSM yönteminin en büyük avantajı, X_+ ve X_- fonksiyonlarının sıfır olduğu frekansların ($X_+ = 0$ ve $X_- = 0$), durdurma bandının alt ve üst kenar frekanslarına karşılık gelebilmesidir. Bu sayede, sık aralıklı frekans taramaları yapmak yerine, bir kök bulma algoritması ile bu frekanslar hızlıca tespit edilebilir. Bu durum, hesaplama yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır.

2.4. Elektromanyetik Benzetim Yöntemleri

Karmaşık geometrilerin elektromanyetik analizinde, analitik yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda sayısal benzetim yöntemlerine başvurulur. Bu yöntemler, Maxwell denklemlerini nümerik olarak çözerek yapının elektromanyetik davranışı hakkında detaylı bilgi sağlar.

2.4.1. Tam dalga simülatörleri

CST Microwave Studio ve HFSS, mikrodalga mühendisliğinde en yaygın kullanılan tam dalga elektromanyetik benzeticilerdir. Bu yazılımlar, Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) veya Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) gibi sayısal yöntemleri kullanarak yapıların S-parametrelerini, dispersiyon diyagramlarını ve elektromanyetik alan dağılımlarını yüksek doğrulukla hesaplayabilir. Özellikle periyodik yapıların analizi için özmod çözücüler ve frekans domeni çözücüler sunarlar. Bu çalışmada da önerilen AFGSM tabanlı tasarım yönteminin doğrulanması amacıyla hem CST hem de HFSS yazılımları kullanılmıştır.

2.4.2. Mevcut yöntemlerin kısıtları

Her ne kadar tam dalga simülatörleri yüksek doğruluk sunsa da bazı önemli kısıtları bulunmaktadır:

Yüksek Hesaplama Süresi: Özellikle geniş frekans bantlarında sık frekanslı analizler yapmak veya parametrik çalışmalar gerçekleştirmek saatler hatta günler sürebilir.

Fiziksel Anlayış Eksikliği: Simülatörler, doğru sayısal sonuçlar verse de bu sonuçların altında yatan fiziksel mekanizmalar hakkında derinlemesine bir anlayış sağlamakta çoğu zaman yetersiz kalır. Tasarımcı, neden belirli bir sonucun elde edildiğini anlamakta zorlanabilir (Valerio vd., 2017).

Optimizasyon Zorluğu: Yüksek hesaplama süreleri, simülatörlerin doğrudan optimizasyon algoritmalarıyla birlikte kullanılmasını zorlaştırır. Mod uyumlama gibi analitik yöntemler ise, fiziksel anlayışı geliştirebilse de genellikle karmaşık matematiksel formülasyonlar gerektirir ve her geometriye kolayca uygulanamaz. İşte bu noktada, eşdeğer devre modeli gibi hızlı analitik yöntemler ile AFGSM gibi akıllı algoritmaların birleştirilmesi hem hızlı hem de fiziksel anlayışa dayalı tasarımlar yapılmasına olanak tanıyarak mevcut yöntemlerin kısıtlarını aşmada önemli bir potansiyel sunmaktadır.

3. YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasının temelini oluşturan oluklu paralel plakalı dalga kılavuzu yapılarının geometrik ve devresel modelleri detaylandırılacak, ardından AFGSM yöntemine dayalı yeni tasarım metodolojisi adım adım açıklanacaktır. Yöntemin temelinde, birim hücrenin S-parametrelerinin eşdeğer devre modeli aracılığıyla hızlı bir şekilde elde edilmesi ve bu parametreler üzerinden AFGSM fonksiyonlarının (X_+ ve X_-) sıfır geçişlerinin belirlenerek bant kenar frekanslarının bulunması yatmaktadır.

3.1. Oluklu Paralel Plakalı Dalga Kılavuzları

Oluklu paralel plaka dalga kılavuzları, birbirine paralel iki iletken plaka ve bu plakalar üzerinde belirli aralıklarla açılmış oluklardan oluşan periyodik yapılardır. Bu çalışmada, tek oluklu ve kayma simetrili çift oluklu olmak üzere iki farklı CPPW konfigürasyonu incelenmiştir.

3.1.1. Tek oluklu yapılar

Tek oluklu PPW yapısının birim hücre geometrisi Şekil 1a'da gösterilmektedir. Bu yapı, alt plaka üzerinde periyodik olarak açılmış dikdörtgen oluklardan oluşur. Birim hücreyi tanımlayan temel geometrik parametreler şunlardır:

p: Periyot uzunluğu

h_1: Paralel plakalar arasındaki yükseklik (boşluk yüksekliği)

h_2: Oluk yüksekliği (alt plakadaki oluğun derinliği)

a: Oluk genişliği

$2b$: İki oluk arasındaki düz bölgenin uzunluğu

Bu parametreler arasında $p = a + 2b$ ilişkisi bulunmaktadır. Yapı, x-yönünde periyodik olup, dalga yayılımı bu doğrultuda gerçekleşmektedir.

3.1.2. Kayma Simetrili Çift oluklu yapılar

Kayma simetrili çift PPW yapısında ise hem alt hem de üst plaka üzerinde oluklar bulunmaktadır. Kayma simetrisi durumunda, üst ve alt plakalardaki oluklar birbirine göre periyodun yarısı kadar ($p/2$) kaydırılmıştır. Şekil 1b'de kayma simetrili çift oluklu PPW'nin (GS-DCPPW) birim hücre geometrisi gösterilmektedir. Tek oluklu yapıya ek olarak, burada tanımlanan parametreler şunlardır:

h_3: Üst plakadaki oluğun yüksekliği

m: Kayma operatörü

Kayma simetrisi koşulu, $h_2 = h_3$ ve $m = p/2$ eşitliklerinin sağlanmasıdır (Valerio vd., 2017). Bu koşul altında, yapı hem öteleme hem de yansıma simetrisinin bir kombinasyonunu sergileyerek, dispersiyon karakteristiğinde önemli iyileştirmeler sağlar.

3.1.3. Eşdeğer devre modelleri

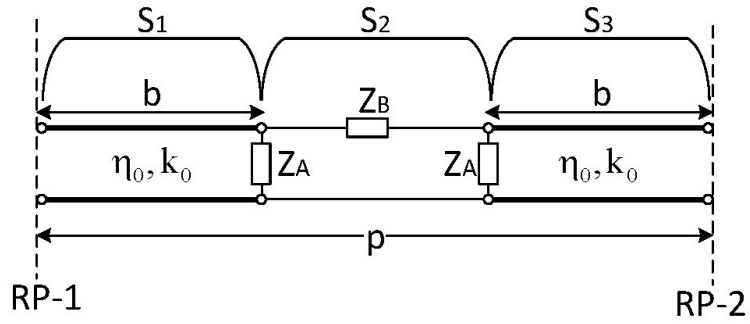
Karmaşık üç boyutlu elektromanyetik problemlerin analizinde, eşdeğer devre modelleri önemli bir basitleştirme sağlar. Bu çalışmada, Valerio ve arkadaşları tarafından geliştirilen (Valerio vd., 2017) ve Marcuvitz'in dalga kılavuzu devre modellerine (Marcuvitz, 1986) dayanan bir eşdeğer devre yaklaşımı kullanılmıştır. Bu model, süreksizlik bölgelerinde yüksek dereceli modların etkisinin sadece reaktif elemanlarla temsil edilebileceği ve yayılımın sadece baskın mod tarafından gerçekleştirildiği varsayımına dayanır (Mesa vd., 2018b).

Şekil 2a ve 2b, sırasıyla tek oluklu ve kayma simetrili çift oluklu PPW yapıları için önerilen eşdeğer devre modellerini göstermektedir. Her iki modelde de birim hücre, kaskat bağlanmış beş alt bloktan (S_1'den S_5'e) oluşmaktadır. S_1, S_3 ve S_5 blokları, uzunluğu l olan geleneksel kayıpsız iletim hatlarını temsil eder. Bu hatların saçılma matrisi şu şekilde ifade edilir:

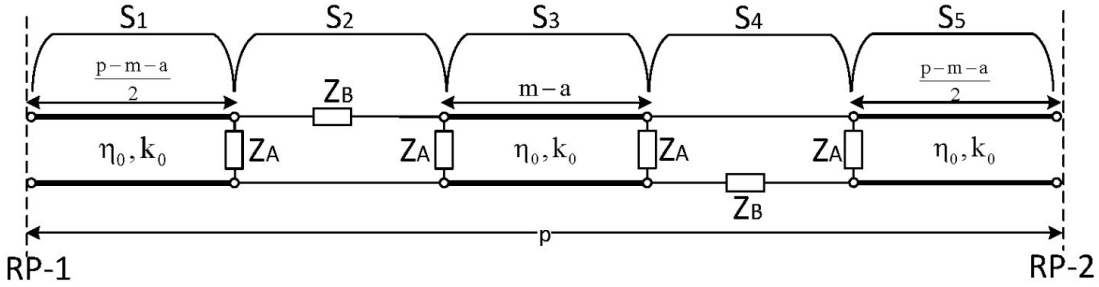
$$[S^{TL}] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-jk_0 l} \\ e^{-jk_0 l} & 0 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Burada $k_0 = 2\pi f/c$ serbest uzay dalga sayısı, f frekans ve c ışık hızıdır. Tek oluklu yapıda l, S_1 ve S_3 için b'ye eşitken; çift oluklu yapıda S_1 ve S_5 için $(p - m - a)/2$, S_3 için ise $(m - a)$ olarak alınır. S_2 ve S_4 blokları ise, süreksizliklerin bulunduğu bölgelerdeki oluk yapılarını ve bu bölgelerde oluşan yüksek dereceli mod etkileşimlerini temsil eden π devreleridir. Bu devrelerin açık yapısı ve empedans ifadeleri (Z_A ve Z_B) Ek A'da detaylandırılmıştır. Her bir S_{ij} bloğunun saçılma matrisi hesaplandıktan sonra, bu matrisler aşağıdaki kaskat bağlantı denklemleri kullanılarak birleştirilir ve birim hücrenin toplam S-parametreleri elde edilir (Simsek & Topuz, 2007):

$$S_{11} = S_{11}^A + \frac{S_{12}^A S_{11}^B S_{21}^A}{1 - S_{22}^A S_{11}^B}. \tag{7}$$



(a)



(b)

Şekil 2 (a) Tek oluklu ve (b) kayma simetrik çift oluklu PPW yapılarının eşdeğer devre modeli.

$$S_{12} = \frac{S_{12}^{A} S_{12}^{B}}{1 - S_{11}^{B} S_{22}^{A}}. \tag{8}$$

$$S_{21} = \frac{S_{21}^{B} S_{21}^{A}}{1 - S_{22}^{A} S_{11}^{B}}. \tag{9}$$

$$S_{22} = S_{22}^{B} + \frac{S_{21}^{B} S_{22}^{A} S_{12}^{B}}{1 - S_{11}^{B} S_{22}^{A}}. \tag{10}$$

Eşdeğer devre modeli sayesinde, birim hücrenin S-parametreleri, tam dalga simülatörlerine kıyasla çok daha kısa sürede hesaplanabilmektedir.

3.2. AFGSM Tabanlı Sentez Metodolojisi

Bu tez çalışmasının temel özgün katkısı, AFGSM yöntemini kullanarak GS-DCPPW yapıları için hızlı, basit ve yaklaşık bir boyutsal sentez yöntemi geliştirmektir. Yöntem, birim hücrenin

S-parametrelerinden türetilen X_+ ve X_- yardımcı fonksiyonlarının sıfır geçişlerinin, durdurma bandının kenar frekanslarına karşılık gelmesi prensibine dayanır (Simsek & Topuz, 2007).
Eşdeğer devre modelinin tek modlu yayılım varsayımı altında, AFGSM fonksiyonlarının indirgenmiş formu denklem (5) kullanılır. Bu denklemde $Im(.)$, sanal kısmı ifade eder. denklem (5)'in çözümü, $X_+ = 0$ ve $X_- = 0$ koşullarından elde edilen kökler durdurma bandının bant kenar frekanslarını verir. Ancak bu köklerin alt veya üst bant kenarına karşılık gelmesi her durumda sabit olmayıp, yapının elektromanyetik özelliklerine bağlı olarak değişebilir. AFGSM yönteminin en büyük avantajı, dispersiyon diyagramını çizmek için sık aralıklı frekans taramaları yapmak yerine, bir kök bulma algoritması ile bu iki frekansın doğrudan ve hızlıca bulunabilmesidir.
Periyodik filtre tasarımında tasarım hedeflerinden bazı sapmaların oluşabileceği göz önünde bulundurulsa da (Simsek & Rezaeieh, 2013), devre modeli birim hücre boyutlarının hızlı bir şekilde hesaplanmasında kullanılabilmektedir.

3.2.1. Algoritmanın yapısı

Önerilen sentez metodolojisinin temelinde, denklem (5)'in sağladığı bu hızlı hesaplama avantajını, bir optimizasyon veya parametrik tarama süreciyle birleştiren bir algoritma yatmaktadır. Algoritma, kullanıcı tarafından belirlenen tasarım hedeflerini (hedef durdurma bandı frekans aralığı, merkez frekansı veya bant genişliği) girdi olarak alır ve bu hedefleri karşılayan birim hücre geometri parametrelerini (a, b, h_1, h_2, h_3) çıktı olarak verir.
Algoritmanın verimli çalışabilmesi için, parametrelerin alabileceği değer aralıklarının (tasarım uzayının) önceden uygun şekilde sınırlandırılması kritik öneme sahiptir.

3.2.2. Tasarım uzayının tanımlanması

Tasarım uzayı, pratik uygulamalar ve üretilebilirlik kısıtları göz önünde bulundurularak tanımlanmalıdır. Bu çalışmada, parametreler için belirli başlangıç değerleri ve değişim aralıkları seçilmiştir. Örneğin, tek oluklu PPW için h_1 ve h_2 sabit tutulup a ve b parametreleri belirli aralıklarda ($a = 0.6h_2$ ile $a = 0.8h_2$ arası, $b = 2h_2$ ile $b = 2.2h_2$ arası gibi) taranmıştır. Kayma-simetrik çift oluklu PPW için ise, h_1 sabit tutulup $a, h_2 = h_3$ ve b parametreleri belirli adımlarla taranarak geniş bir veri seti oluşturulmuştur. Bu tarama işlemi, eşdeğer devre modeli ve AFGSM yönteminin hızı sayesinde, tam dalga simülatörleriyle kıyaslanamayacak kadar kısa sürede tamamlanabilmektedir. Örneğin, çalışmada belirtilen sınırlı tasarım uzayındaki veri seti,

CST'nin özmod çözücüsü ile 360 saatte elde edilebilirken, devre modeline dayalı özdeğer denkleminin klasik frekans taraması yöntemiyle çözülmesi 612 saniye sürmüştür Buna karşın, aynı veri seti önerilen AFGSM tabanlı kök bulma algoritmasıyla sadece 20 saniyede başarıyla oluşturulmuştur.

3.2.3. Adım adım tasarım süreci

Önerilen AFGSM tabanlı boyutsal sentez yöntemi, aşağıdaki dört adımlı tasarım sürecini takip eder:

Adım 1: Model ve Başlangıç Konfigürasyonunun Seçimi
İlk adımda, tasarlanacak yapı tipi (tek oluklu veya kayma simetrili çift oluklu PPW) belirlenir ve uygun bir başlangıç birim hücre geometrisi seçilir. Başlangıç parametreleri, daha önceki bilgi birikimine veya literatürdeki benzer çalışmalara dayanarak atanabilir.

Adım 2: Tasarım Uzayının Sınırlandırılması
İkinci adımda, seçilen başlangıç geometrisi etrafında, geometrik parametrelerin (a, b, h_1, h_2, h_3) alabileceği fiziksel ve pratik aralıklar belirlenir. Bu sınırlandırma, tasarım uzayının boyutunu küçülterek algoritmanın verimliliğini artırır. Ayrıca, simetri koşulları (örneğin, kayma simetrisi için $h_2 = h_3$) bu aşamada tanımlanır.

Adım 3: AFGSM ile Parametrelerin Belirlenmesi
Tasarım uzayını sınırlandırdıktan sonra, farklı parametre kombinasyonları için denklem (5) kullanılarak X_+ ve X_- fonksiyonlarının sıfır geçişleri hesaplanır. Bu geçişler, durdurma bandının alt ve üst kenar frekanslarını verir. Her bir parametre seti için elde edilen f_{alt} ve $f_{\text{üst}}$ değerleri kaydedilir. Daha sonra, kullanıcının belirlediği tasarım hedeflerine (örneğin belli bir merkez frekansı ve bant genişliği) en yakın sonucu veren parametreler seçilir. Bu tür taramalarla elde edilen grafikler, tasarımcıya hangi bölgelerin hedefe uygun olduğunu görsel olarak gösterir. (Bu yaklaşımın somut bir örneği, aşağıda tek oluklu filtre tasarımı anlatılırken verilecektir.)

Adım 4: Tasarımın Doğrulanması ve Gerçeklenmesi
Son adımda, AFGSM yöntemiyle belirlenen birim hücre geometrisi kullanılarak, bu birim hücrelerin art arda belirli sayıda (N) bağlanmasıyla oluşturulan periyodik filtrenin performansı,

CST Microwave Studio ve HFSS gibi tam dalga elektromanyetik benzeticiler kullanılarak doğrulanır. Farklı kaskat bağlı birim hücre sayısı (N) değerleri için elde edilen $|S_{21}|$ frekans karakteristikleri, tasarım hedeflerine (bastırma seviyesi, iletim bandı dalgalanmaları) ulaşılıp ulaşılmadığını gösterir. Bu adım, aynı zamanda eşdeğer devre modeli yaklaşımının doğruluğunu test etme imkânı da sunar.

Bu dört adımlı süreç, tasarımcıya hem hızlı hem de esnek bir tasarım imkânı sunarak, istenilen performans kriterlerini sağlayan ve mümkün olan en küçük boyutlu (kompakt) birim hücrenin belirlenmesine olanak tanır.

4. BULGULAR

Bu bölümde, önerilen AFGSM tabanlı tasarım metodolojisinin uygulanabilirliğini test etmek amacıyla gerçekleştirilen sayısal analizler ve tasarım örnekleri sunulacaktır. İlk olarak, tek ve kayma-simetrili çift oluklu PPW yapılarının iletim/durdurma bandı bölgelerini belirlemede AFGSM yönteminin etkinliği, çeşitli geometrik parametreler ve dielektrik sabiti değerleri için incelenecektir. Ardından, belirlenen tasarım hedefleri doğrultusunda gerçekleştirilen bant durduran filtre tasarımları ve bu tasarımların tam dalga benzeticilerle doğrulama sonuçları aktarılacaktır. Son olarak, farklı tasarım senaryoları karşılaştırılacak ve elde edilen filtre performansı literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanacaktır.

4.1. Birim Hücre Analizleri

AFGSM yönteminin iletim/durdurma bandı bölgelerini belirlemedeki başarısını değerlendirmek için öncelikle çeşitli analiz örnekleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde hem geniş hem de dar durdurma bantlarına sahip tek ve kayma-simetrili çift oluklu PPW yapıları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, geleneksel özdeğer denklemi (EE) çözümleriyle karşılaştırılmıştır.

4.1.1. Geniş bant analizi

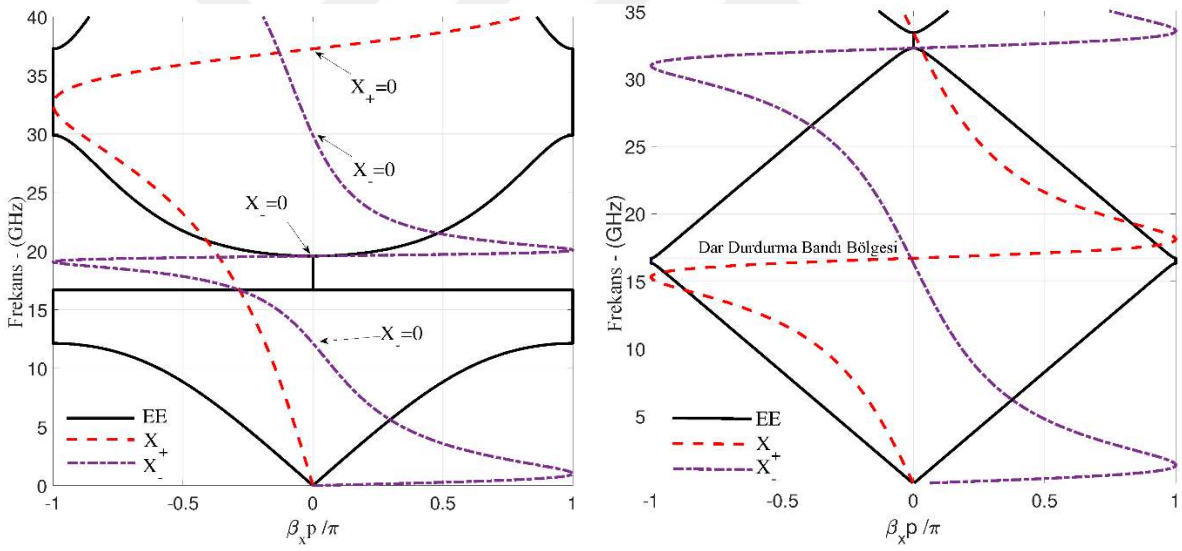
Şekil 3a, tek oluklu bir PPW yapısı için geniş bantlı bir durdurma bandı örneğini göstermektedir. Analizde kullanılan parametreler $\epsilon_r = 1, p = 6$ mm, $h_1 = 3.5$ mm, $h_2 = 4.33$ mm, $a = 5.1$ mm ve $b = 0.45$ mm olarak alınmıştır. Özdeğer denklemi çözümü, periyodik yapının birinci durdurma bandını 12.14-19.58 GHz, ikinci durdurma bandını ise 29.89-37.26 GHz aralığında vermektedir. AFGSM yöntemi ile elde edilen bant kenar frekansları ise sırasıyla 12.136 GHz, 19.584 GHz, 29.881 GHz ve 37.263 GHz'dir. İki yöntem arasındaki maksimum fark sadece 6 MHz olup, AFGSM yönteminin geniş bantlı durdurma bölgelerini yüksek doğrulukla tespit edebildiğini göstermektedir.

Kayma-simetrili çift oluklu PPW için benzer bir geniş bant analizi Şekil 4a'da sunulmuştur. Burada kullanılan parametreler $\epsilon_r = 1, p = 6$ mm, $h_1 = 3.5$ mm, $h_2 = h_3 = 15$ mm, $a = 3$ mm ve $b = 1.5$ mm'dir. Şekil 4a'da görüldüğü gibi, X_+ ve X_- fonksiyonlarının sıfır geçişleri, özdeğer denkleminden elde edilen dispersiyon diyagramındaki bant kenarlarıyla mükemmel bir uyum içerisindedir.

4.1.2. Dar bant analizi

AFGSM yönteminin dar bantlı yapıları ayırt etme kapasitesi, Şekil 3b ve 4b'deki örneklerle test edilmiştir. Şekil 3b'deki tek oluklu PPW için parametreler $\epsilon_r = 1$, $p = 9$ mm, $h_1 = 6$ mm, $h_2 = 1$ mm, $a = 1$ mm ve $b = 4$ mm olarak seçilmiştir. Bu durumda, birinci durdurma bandı yaklaşık 16.33-16.71 GHz, ikinci durdurma bandı ise 32.29-33.43 GHz aralığında oluşmaktadır. AFGSM yöntemi, bu bant kenarlarını maksimum 7 MHz'lik bir sapma ile yakalamıştır.

Şekil 4b'deki kayma-simetrili çift oluklu PPW için ise $\epsilon_r = 1$, $p = 9$ mm, $h_1 = 10$ mm, $h_2 = h_3 = 1$ mm, $a = 0.5$ mm ve $b = 4.25$ mm parametreleri kullanılmıştır. Şekil 4b'de ve Tablo 1'de görüldüğü üzere, AFGSM fonksiyonlarının sıfır geçişleri ile özdeğer denklemi sonuçları yine büyük bir uyum göstermektedir. Bu analizler, durdurma bandı ne kadar dar olursa olsun, AFGSM yönteminin bant kenarlarını net bir şekilde ayırt edebildiğini kanıtlamaktadır.

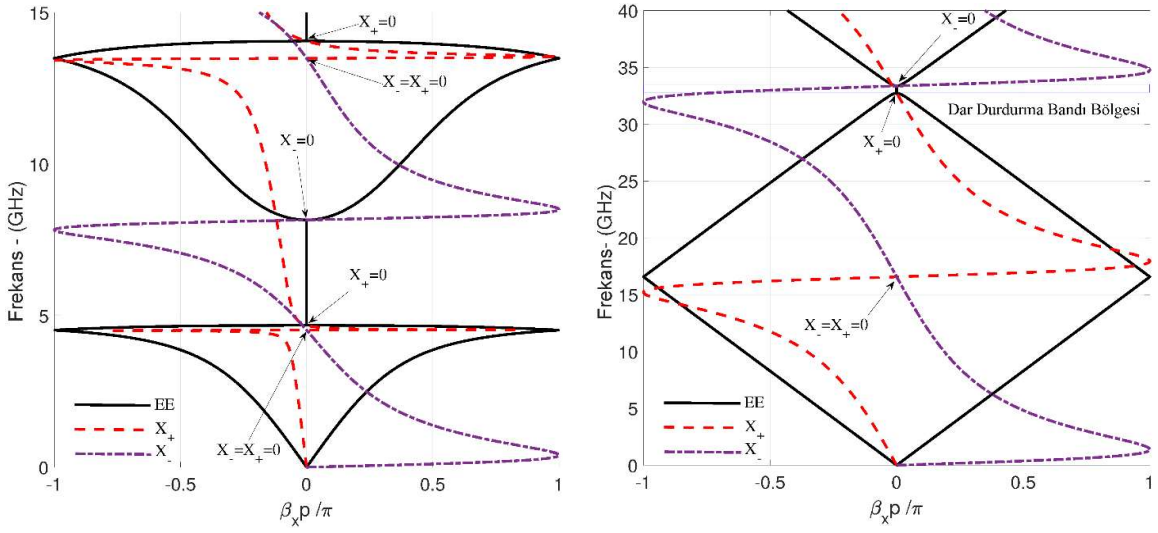


(a) (b)

Şekil 3. (a) Geniş ve (b) dar durdurma bandı bölgesi analizi için tek oluklu PPW'nin dispersiyon diyagramı ve X_+, X_- frekans davranışı.

4.1.3. Dielektrik malzeme etkisi

Birim hücrenin dielektrik sabitinin değişiminin bant yapısı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Şekil 5, tek oluklu PPW için farklı dielektrik sabiti değerlerinde ($\epsilon_r = 1, 2.25, 3, 11.2$) elde edilen dispersiyon diyagramlarını ve AFGSM fonksiyonlarını göstermektedir.



Şekil 4. (a) Geniş ve (b) dar durdurma bandı bölgesi analizi için kayma simetrik çift oluklu PPW'nin dispersiyon diyagramı ve X_+, X_- frekans davranışı.

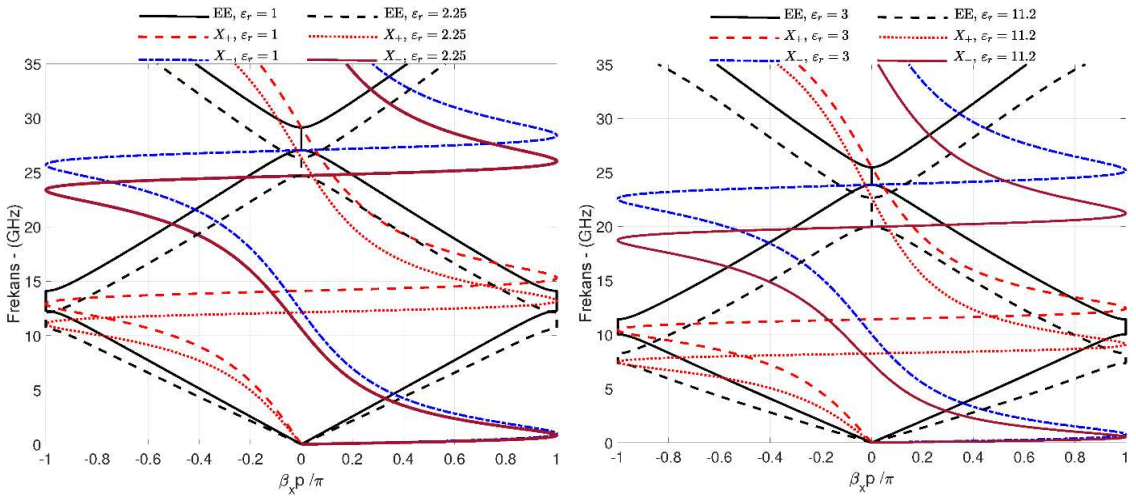
Tablo 1. Şekil 4a ve 4b'deki EE ve AFGSM yöntemlerinin frekans davranışları için bant kenar frekansı sonuçları.

Şekil	X_+ [GHz]	X_- [GHz]	EE [GHz]	$X_+ = X_- = 0$ [GHz]
Şekil 4a	4.681	8.157	4.69 – 8.15	4.52-13.49
Şekil 4b	32.729	33.364	32.73 – 33.363	16.57

Analizde kullanılan ortak parametreler $p = 12$ mm, $h_1 = 3$ mm, $h_2 = 0.5$ mm, $a = 5$ mm ve $b = 3.5$ mm'dir. Şekil 6'da ise kayma-simetrili çift oluklu PPW için benzer bir analiz sunulmaktadır. Buradaki ortak parametreler $p = 16$ mm, $h_1 = 4$ mm, $h_2 = h_3 = 8$ mm, $a = 4$ mm ve $b = 6$ mm'dir. Her iki şekilde de dielektrik sabitinin artmasıyla bantların daha düşük frekanslara kaydığı ve AFGSM fonksiyonlarının bu kaymayı başarıyla yansıttığı görülmektedir.

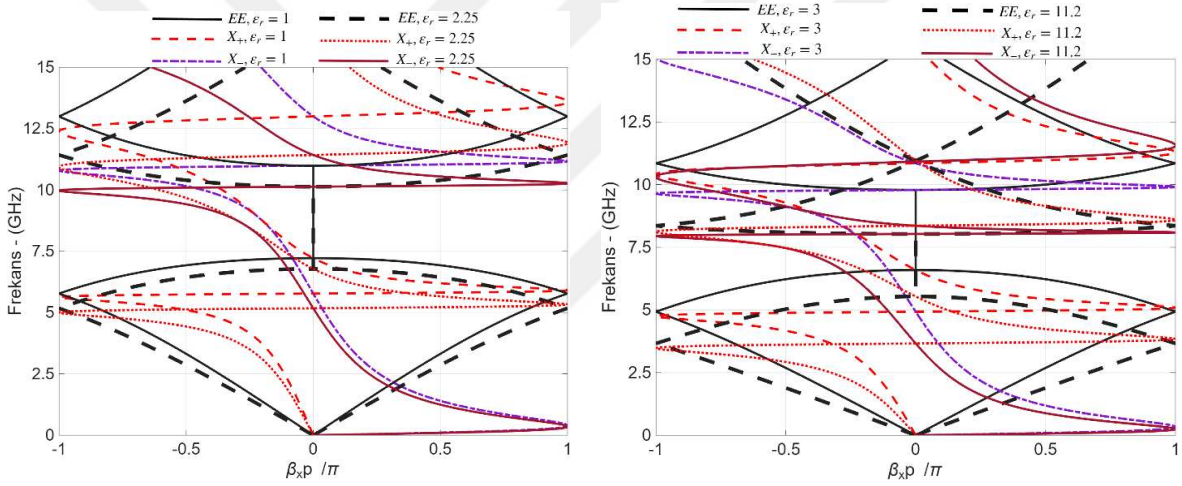
4.1.4. Benzetim Doğrulamaları

Önerilen yöntemin doğruluğunu daha yüksek mertebeden modları da dikkate alarak test etmek amacıyla, CST Microwave Studio'nun frekans domeni çözücüsü kullanılarak çok modlu (ilk on dalga kılavuzu modu) analizler gerçekleştirilmiştir. Her iki PPW geometrisi modellerinin CST ve HFSS'de modellenmesi için uygun sınır koşullarının atanması gerekmektedir. Bu amaçla, CST'de elektrik ($E_t = 0$) ve manyetik ($H_t = 0$) koşulları kullanılmış; HFSS'de ise incelenen yapıların üst-alt ve yan duvarlarına sırasıyla perfect E ve perfect H sınır koşulları atanmıştır.



(a) (b)

Şekil 5. Farklı dielektrik yüklemeler için tek oluklu PPW'nin dispersiyon diyagramı ve X_+, X_- frekans davranışı: (a) $\varepsilon_r = 1$, $\varepsilon_r = 2{,}25$ (b) $\varepsilon_r = 3$, $\varepsilon_r = 11{,}2$.

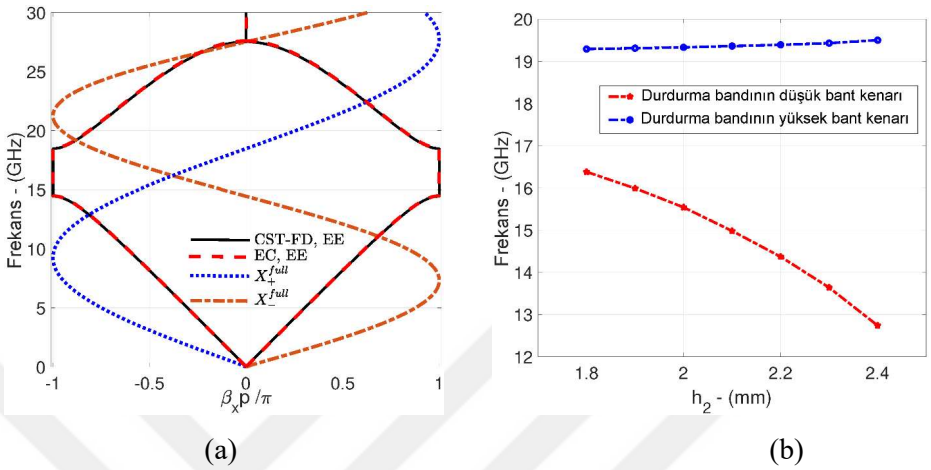


(a) (b)

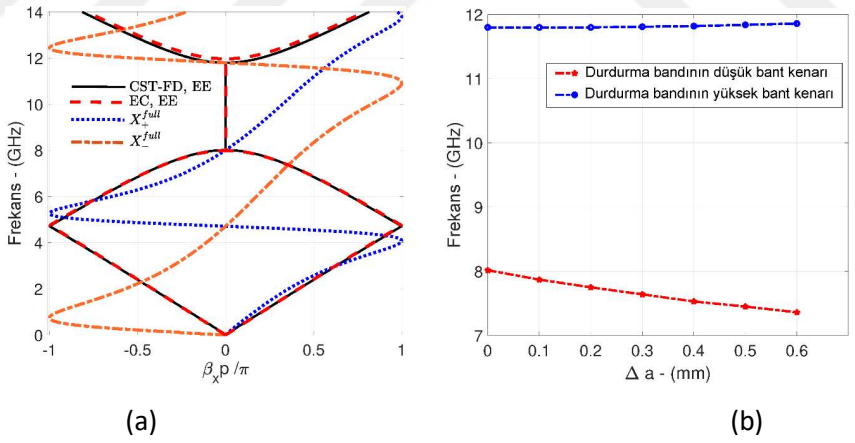
Şekil 6. Farklı dielektrik yüklemeler için kayma simetrik çift oluklu PPW'nin dispersiyon diyagramı ve X_+ ve X_- frekans davranışı: (a) $\varepsilon_r = 1$, $\varepsilon_r = 2{,}25$ (b) $\varepsilon_r = 3$, $\varepsilon_r = 11{,}2$.

Simülasyonlar aynı bilgisayar (Intel Core i7-6700HQ CPU@2.6 GHz, 16 GB RAM) kullanılarak çalıştırılmıştır. İncelenen yapılarda, dalga kılavuzu portu (CST) ve dalga portu (HFSS) ile on modluk uyarım sağlanmış ve $|S_{21}|$'in baskın modunun frekans karakteristikleri incelenmiştir. Şekil 7a ve 8a, sırasıyla tek ve kayma simetrili çift oluklu bir PPW birim hücresi (tek oluklu PPW için: $\epsilon_r = 1, p = 8.28$ mm, $h_1 = 1$ mm, $h_2 = 1.8$ mm, $a = 1.08$ mm, $b = 3.6$ mm ve kayma simetrili çift oluklu PPW için ($\epsilon_r = 1, p = 26.5$ mm, $h_1 = 0.5$ mm, $h_2 = h_3 = 2$ mm, $a = 1.5$ mm, $b = 12.5$ mm) için CST'den elde edilen dispersiyon diyagramını, Denklem (4) ile hesaplanan X_+^{full} ve X_-^{full} fonksiyonlarını ve eşdeğer devre modelinin dispersiyon diyagramını göstermektedir. Bant kenarlarında, CST ve eşdeğer devre modellerinin

birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 7b'de ise, h_2 yüksekliğinin kademeli olarak artırılmasının durdurma bandı üzerindeki etkisi incelenmiştir. h_2 arttıkça durdurma bandının genişlediği gözlemlenmiştir. Benzer bir tolerans analizi, kayma-simetrili çift oluklu PPW için Şekil 8b'de sunulmuştur. Burada, oluk konumundaki bir kaymanın (Δa) simetriyi bozarak durdurma bandını genişlettiği görülmektedir.



Şekil 7. (a) CST-FD dispersiyon diyagramı. Tek bir CPPW birim hücresinin baskın modunun X_+^{full} , X_-^{full} frekans davranışı ve çok modlu uyarım altında eşdeğer devre modeli geometrisinin dispersiyon diyagramı. (b) Tam dalga simülatörü destekli X_+^{full} , X_-^{full} kullanılarak h_2 varyasyonu ile tek bir CPPW birim hücresinin tolerans analizi.



Şekil 8. (a) CST-FD dispersiyon diyagramı. Kayma simetrik çift oluklu (GS-DCPPW) birim hücrenin baskın modunun X_+^{full}, X_-^{full} frekans davranışı ve çok modlu uyarım altında eşdeğer devre modeli geometrisinin dispersiyon diyagramı. (b) Tam dalga simülatörü destekli X_+^{full}, X_-^{full} kullanılarak Δa varyasyonu ile kayma simetrik DCPPW birim hücresinin tolerans analizi.

4.2. Bant Durduran Filtre Tasarımları

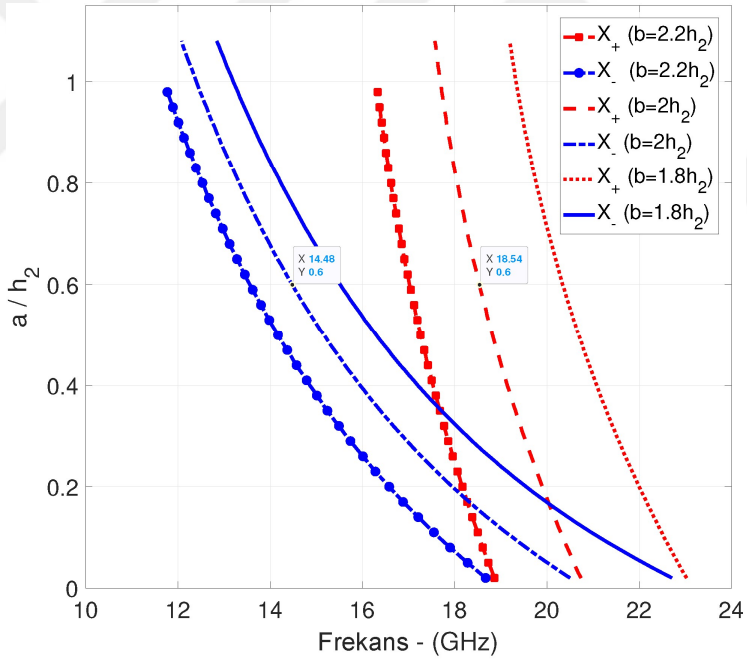
AFGSM tabanlı boyutsal sentez yönteminin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla iki farklı bant durduran filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım hedefleri şu şekilde belirlenmiştir:

Hedef 1 (Ku-Bandı): 15.20- 17.78 GHz frekans aralığında -50 dB'nin üzerinde bastırma seviyesine sahip tek oluklu PPW filtre tasarımı.

Hedef 2 (X-Bandı): 8.27- 10.91 GHz frekans aralığında -60 dB'nin üzerinde bastırma seviyesine sahip kayma-simetrili çift oluklu PPW filtre tasarımı.

4.2.1. Ku-bant tek oluklu PPW filtre tasarımı

Tasarıma, hava dolu tek oluklu PPW modeli için başlangıç parametreleri ($h_1 = 1$ mm, $h_2 = 1.8$ mm, $a = 0.8h_2$, $b = 2.2h_2$) seçilerek başlanmıştır. Tasarım uzayı, h_1 ve h_2 sabit tutulup a ve b parametreleri belirli aralıklarda ($a = 0.6h_2$ ile $a = 0.8h_2$ arası, $b = 2h_2$ ile $b = 2.2h_2$ arası) taranarak sınırlandırılmıştır. Şekil 9, bu sınırlandırılmış uzayda a/h_2 ve b/h_2 oranlarına bağlı olarak durdurma bandı kenar frekanslarının ($X_+ = 0$ ve $X_- = 0$) değişimini göstermektedir. Şekilde işaretlenen X ve Y noktaları, tasarım hedeflerini karşılayan ($b = 2h_2$ ve $a = 0.6h_2$) parametrelerine karşılık gelmektedir.

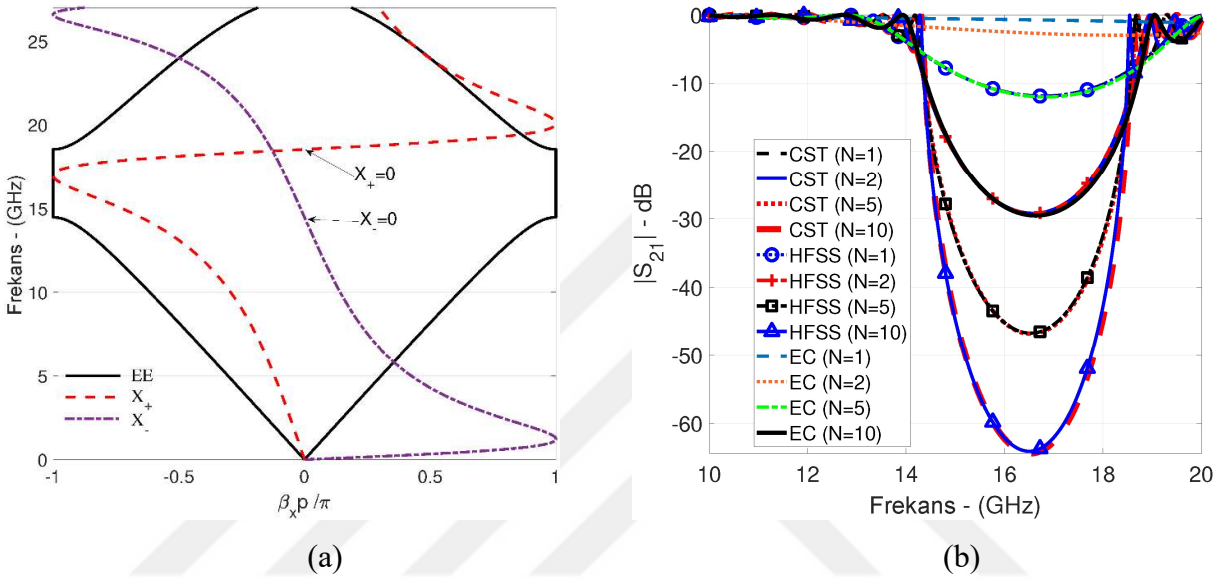


Şekil 9. AFGSM fonksiyonları X_+ ve X_- aracılığıyla hesaplanan bant aralığının a/h_2 ve b/h_2'ye bağlı frekans değişimi.

Bu şekilde belirlenen birim hücre ($a = 1.08$ mm, $b = 3.6$ mm) için elde edilen dispersiyon diyagramı Şekil 10a'da verilmiştir. Birim hücrenin dispersiyon diyagramına göre, 4.06 GHz bant genişliğine ve 16.51 GHz merkez frekansına sahip bir durdurma bandı üretmektedir. Filtre

performansını test etmek için bu birim hücreler farklı sayılarda ($N = 1, 2, 5, 10$) art arda bağlanmış ve elde edilen $|S_{21}|$ frekans karakteristikleri Şekil 10b'de gösterilmiştir.

Şekil 10b'de, periyodik yapılarda bilindiği üzere, birim hücre sayısı arttıkça durdurma bandı derinliğinin de arttığı görülmektedir. $N = 10$ için CST ve HFSS sonuçları, hedeflenen 15.20-17.78 GHz bandında -50 dB'nin altında bir bastırma seviyesine ulaşıldığını doğrulamaktadır. Eşdeğer devre modeli sonuçları, durdurma bandı derinliğini tam dalga simülatörlerine göre daha az tahmin etse de bant kenar frekanslarını ve genel eğilimi başarıyla yakalamaktadır.



(a) (b)

Şekil 10. (a) AFGSM fonksiyonları aracılığıyla tasarlanmış bant aralığı. (b) CST, HFSS ve EC sonuçları aracılığıyla tasarlanmış tek CPPW birim hücresinin farklı sayıdaki kademeli bağlanmasının genlik-frekans karakterizasyonu.

4.2.2. X-bant çift oluklu PPW filtre tasarımı

Kayma-simetrili çift oluklu PPW filtresi için başlangıç parametreleri $a = 1$ mm, $h_1 = 0.5$ mm $h_2 = h_3 = 1$ mm ve $b = 12.4$ mm olarak seçilmiştir. Tasarım uzayı, a ve $h_2 = h_3$ için $1 - 2.5$ mm, b için ise $12.4 - 13.6$ mm aralığında 0.1 mm adımlarla taranarak oluşturulmuştur. Bu tarama sonucunda, her bir parametre kombinasyonu için X_+ ve X_- fonksiyonları kullanılarak ilk durdurma bandının kenar frekansları belirlenmiş ve geniş bir veri seti elde edilmiştir.

Bu veri setinden, merkez frekansı 10 GHz olacak şekilde, farklı bant genişliklerine ve belirli bir frekans sapmasına (δ) sahip parametreler seçilmiştir. Tablo 2, bu şekilde elde edilen bazı tasarım alternatiflerini göstermektedir.

4.3. Tasarım Senaryolarının Karşılaştırılması

Tablo 2'de AFGSM yöntemi kullanılarak elde edilen 10GHz merkez frekanslı çeşitli durdurma bant genişliklerine ve belirli frekans sapmaları ile gösterilen tasarım adayları verilmektedir. Tablo 2'de verilen veriseti daha öncede belirtildiği gibi AFGSM yöntemi ile eşdeğer devre modelinini birlikte kullanımı sonucu diğer yöntemlere göre oldukça hızlı elde edilmiştir. Bu verisetinden üç farklı senaryo seçilerek tasarımların başarımı test edilecektir. Tüm senaryolarda $h_1 = 0.5$ mm ve $\epsilon_r = 1$ alınmıştır.

Tablo 2 Belirli bir frekans sapması ile 10 GHz merkez frekanslı çeşitli durdurma bant genişliklerine karşı $h_1 = 0.5$ mm için AFGSM ile bulunan $a, h_2 = h_3$ ve b parametre değerleri. Frekans sapması, belirli bir hata frekansı aralığında bant kenarı frekanslarının belirlenmesine ve beklenen merkez frekansından sapmaya bağlı olan bir miktardır.

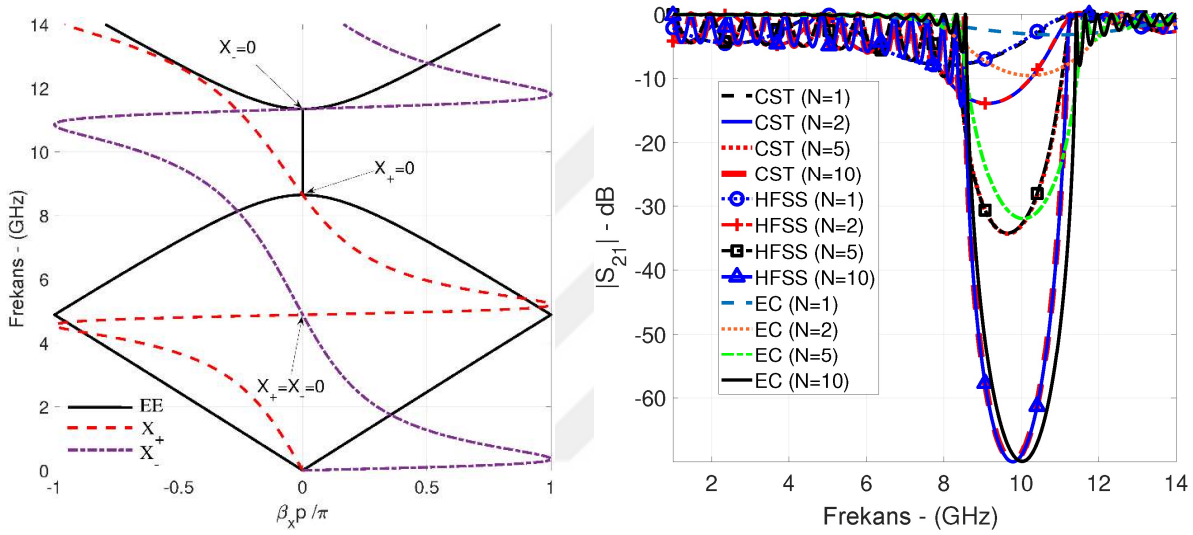
Δf [GHz]	δ [MHz]	a [mm]	$h_2 = h_3$ [mm]	b [mm]
1.8	30	1.1	1.1	13.6
2	10	1.2	1.1	13.5
2.7	***10***	***1.5***	***1.2***	***13.2***
		1.7	1	13.3
3	10	1.2	1.8	12.9
3.2	10	1.5	1.5	12.9
3.6	10	1.7	1.5	12.8
		2.1	1.1	13.1
3.8	10	1.3	2.2	12.5
		1.7	1.6	12.7
		2.2	1.1	13.1
4	***20***	***1.5***	***2***	***12.5***
		1.9	1.5	12.7
		2	1.4	12.8
		2.1	1.3	12.9
		2.2	1.2	13
		2.3	***1.1***	***13.1***
4.4	10	2	1.6	12.6
	10	2.4	1.2	13
4.8		2.4	1.4	12.8

4.3.1. Senaryo 1: Dar bantlı tasarım

Senaryo 1 için seçilen parametreler $a = 1.5$ mm, $h_2 = h_3 = 1.2$ mm ve $b = 13.2$ mm'dir. Bu tasarım, Tablo 2'de $\Delta f = 2.7$ GHz bant genişliğine ve $\delta = 10$ MHz sapmaya sahiptir. Şekil

11a, bu birim hücre için AFGSM fonksiyonları, eşdeğer devre özdeğer denklemi ve CST çok modlu analizi ile elde edilen dispersiyon karakteristiklerini göstermektedir. Bant kenarları $X_+ = 0$ için 8.648 GHz ve $X_- = 0$ için 11.344 GHz olarak belirlenmiştir.

Şekil 11b'de, bu birim hücrenin farklı sayılarda ($N = 1, 2, 5, 10$) kaskat bağlanmasıyla elde edilen $|S_{21}|$ grafikleri görülmektedir. $N = 10$ için durdurma bandı derinliği yaklaşık -45 dB civarında kalmış olup, hedeflenen -60 dB bastırma seviyesine ulaşılamamıştır. Ayrıca iletim bantlarındaki dalgalanmalar belirgin bir şekilde artmıştır. Bu senaryo, hedeflenen bastırma seviyesine ulaşmak için daha fazla birim hücreye ihtiyaç duyulacağını, bunun da iletim bandı performansını olumsuz etkileyeceğini göstermektedir.



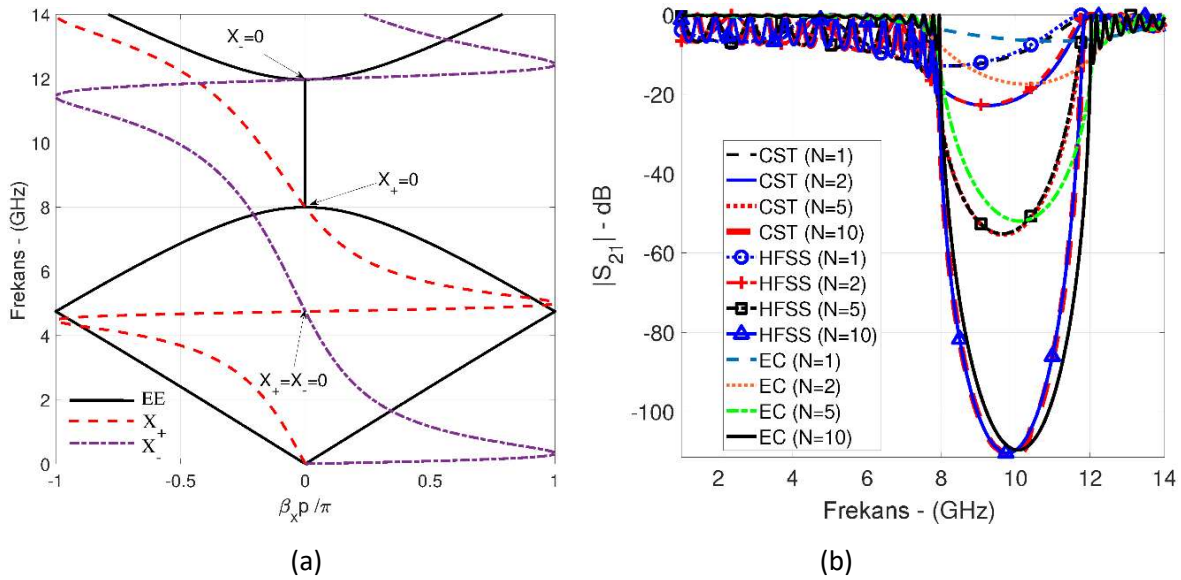
(a) (b)

Şekil 11. (a) Senaryo 1 için AFGSM fonksiyonları ve diğer hesaplama yöntemleri kullanılarak tasarlanan kayma simetrik DCPPW'nin elde edilen iletim bandı-durdurma bandı karakterizasyonu. (b) Senaryo 1'in farklı sayıda tasarlanmış GS-DCPPW birim hücresinin CST, HFSS ve eşdeğer devre sonuçları aracılığıyla kademeli olarak bağlanmasının $|S_{21}|$ frekans karakterizasyonu.

4.3.2. Senaryo 2: Hedef bant genişliğini sağlayan tasarım

Senaryo 2, $a = 1.5$ mm, $h_2 = h_3 = 2$ mm ve $b = 12.5$ mm parametreleriyle ($\Delta f = 4$ GHz) tanımlanmıştır. Şekil 12a'da bu birim hücrenin dispersiyon karakteristikleri sunulmaktadır.

Şekil 12b'deki filtre yanıtları incelendiğinde, $N = 10$ için CST ve HFSS sonuçlarının $8.27 - 10.91$ GHz bandında -60 dB'nin altında bir bastırma sağladığı açıkça görülmektedir. İletim bantlarındaki dalgalanmalar Senaryo 1'e göre daha düşük seviyededir. Bu senaryo, belirlenen tasarım hedeflerini başarıyla karşılamaktadır.



(a) (b)

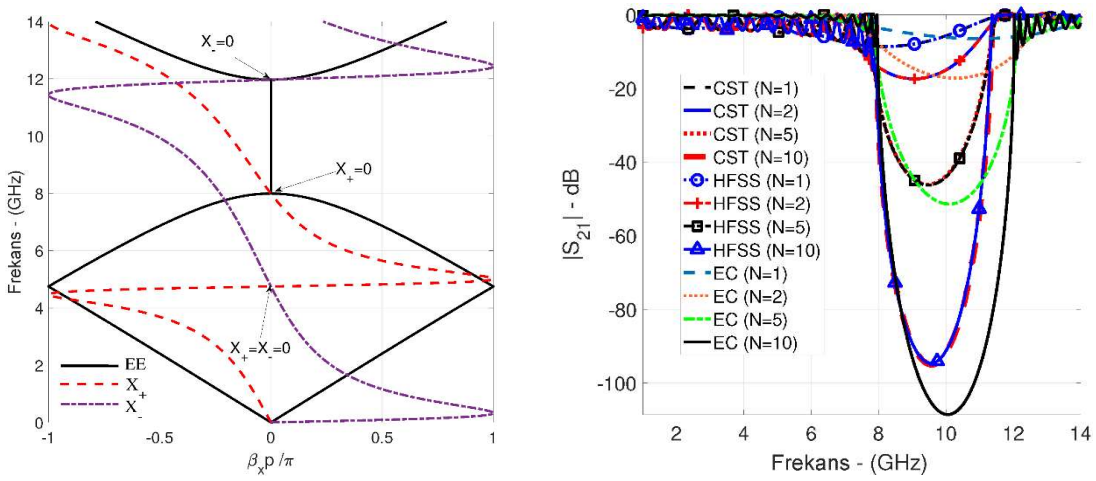
Şekil 12. (a) Senaryo 2 için AFGSM fonksiyonları ve diğer hesaplama yöntemleri kullanılarak tasarlanan kayma simetrik DCPPW'nin elde edilen iletim bandı-durdurma bandı karakterizasyonu. (b) CST, HFSS ve EC sonuçları aracılığıyla Senaryo 2'nin farklı sayıda tasarlanmış GS-DCPPW birim hücresinin kademeli bağlanmasının $|S_{21}|$ frekans karakterizasyonu.

4.3.3. Senaryo 3: Kompakt tasarım

Senaryo 3, $a = 2.3$ mm, $h_2 = h_3 = 1.1$ mm ve $b = 13.1$ mm parametreleriyle daha geniş bir durdurma bandı sunmaktadır. Şekil 13a'daki dispersiyon diyagramı bu geniş bandı doğrulamaktadır. Bu senaryonun en önemli özelliği, $h_2 = h_3$ yüksekliğinin diğer senaryolara göre daha küçük olması nedeniyle ($h_1 + h_2 + h_3 = 2.7$ mm), daha düşük profil (kompakt) bir filtre tasarımına imkân tanımasıdır (bkz. Tablo 3).

Şekil 13b'deki filtre yanıtları, $N = 10$ için CST ve HFSS sonuçlarının hedeflenen durdurma bandında -60 dB bastırma seviyesine ulaşmakta zorlandığını, bant derinliğinin daha az olduğunu göstermektedir. Bu durum, hedeflenen durdurma bandının dispersiyon diyagramındaki üst modlara yakın bir bölgeye denk gelmesi ve yüksek dereceli mod etkileşimlerinin artmasıyla açıklanabilir. Ancak, iletim bantlarındaki dalgalanmaların Senaryo 2'ye kıyasla daha düşük seviyede olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 14, her üç senaryo için $N = 10$ iken elde edilen $|S_{21}|$ frekans karakteristiklerini bir arada göstermektedir. Bu karşılaştırmalı grafik, Senaryo 2'nin tasarım hedeflerini en iyi karşılayan performansa sahip olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Senaryo 1 hedeflenen bastırma seviyesine ulaşamazken, Senaryo 3 kompakt yapısına rağmen bastırma performansında zayıf kalmıştır.

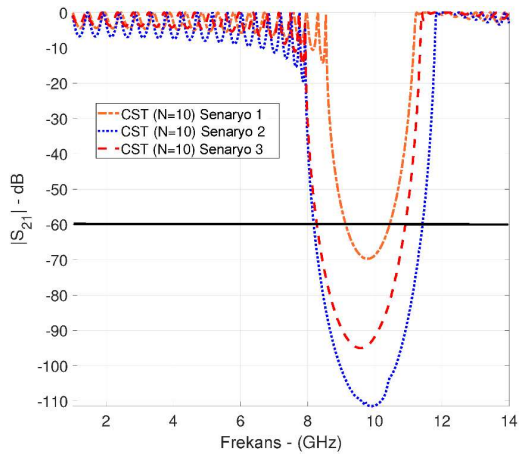


(a) (b)

Şekil 13. (a) Senaryo 3 için AFGSM fonksiyonları ve diğer hesaplama yöntemleri kullanılarak tasarlanan kayma simetrik DCPPW'nin elde edilen iletim bandı-durdurma bandı karakterizasyonu. (b) Senaryo 3'ün farklı sayıda tasarlanmış GS-DCPPW birim hücresinin CST, HFSS ve EC sonuçları aracılığıyla kademeli olarak bağlanmasının $|S_{21}|$ frekans karakterizasyonu.

Tablo 3. Tüm senaryolar için tasarlanmış birim hücre parametreleri ve N = 10 için toplam filtre boyutları (TFD).

Çalışmalar	a [mm]	b [mm]	h_1 [mm]	$h_2 = h_3$ [mm]	p [mm]	$h_1 + h_2 + h_3$ [mm]	TFD [mm]
Senaryo 1	1.5	13.2	0.5	1.2	27.9	2.9	279
Senaryo 2	1.5	12.5	0.5	2	26.5	4.5	265
Senaryo 3	2.3	13.1	0.5	1.1	28.5	2.7	285



Şekil 14. Tasarım hedeflerine ulaşmak için Senaryo 1, Senaryo 2 ve Senaryo 3'ün karşılaştırılması.

4.4. Literatür Karşılaştırması

Senaryo 2'de elde edilen bant durduran filtre performansı, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. Karşılaştırmada kullanılan metrikler;

merkez frekans (f_0), alt ve üst geçiş bandı dalgalanmaları (PR1, PR2) -60 dB bastırma seviyesindeki bant genişliği (SLBW), durdurma bandı kenar eğimleri (SS_1, SS_2), fiziksel boyutlar ve normalize edilmiş devre boyutudur (NCS).

Tablo 4 incelendiğinde, bu çalışmada tasarlanan filtrenin en dikkat çekici özelliği, -60 dB gibi yüksek bir bastırma seviyesinde 2.64 GHz gibi oldukça geniş bir durdurma bandı sunmasıdır. Literatürdeki mikroşerit tabanlı filtreler (Ertay & Simsek, 2016; Reines, Park, & Rebeiz, 2010; Zheng & Papapolymerou, 2004) çok daha küçük boyutlara sahip olsa da ya bastırma seviyeleri daha düşüktür (genellikle -20 dB) ya da durdurma bantları çok daha dardır.

Tablo 4. AFGSM yöntemiyle tasarlanan bant durdurma filtrelerinin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmalı tablosu.

Çalışmalar	f_0, Teknoloji [GHz]	PR_1* [dB]	PR_2* [dB]	SLBW [GHz]	SS_1* dB/GHz	SS_2* dB/GHz	Fiziksel Boyutlar [mm × mm × mm]	NCS* $\lambda_g \times \lambda_g \times \lambda_g$
(Simsek & Topuz, 2007), Şekil 10, MM-GSM	9, Dalga Kılavuzu	~1	~1	@-60 dB, 0.1	~370	~370	1120.14 × 22.86 × 10.16	Verilmemiş
(Ertay & Simsek, 2016), Şekil 6, SONNET	9.7, Mikroşerit	~0.1	~0.1	@-60 dB, 1	~33.04	~20.56	12.87 × 7.04 × 0.25	0.65 × 0.36 × 0.01
(Hou vd., 2022), Şekil 9, Geleneksel BSF	9.3, Dalga Kılavuzu	~0.6	~0.6	@-60 dB, 1.23	~10.57	~37	86 × 74 × 18	Verilmemiş
(Hou vd., 2022), Şekil 9, Önerilen BSF	9.35, Hibrit	~0.6	~0.6	@-55.5 dB, 2.67	~61.67	~370	15 × 8 × 1	0.5 × 0.25 × 0.04
(Reines vd., 2010), Şekil 10a, Durum (01)	10.3, Mikroşerit	~0.15	~0.56	@-20 dB, 0.215	~92.5	~46.25	7.3 × 7.5 × 0.508	0.4 × 0.42 × 0.03
(Reines vd., 2010), Şekil 10a, Durum (10)	10.2, Mikroşerit	~0.15	~0.51	@-20 dB, 0.22	NA*	NA*	7.3 × 7.5 × 0.508	0.4 × 0.42 × 0.03
(Reines vd., 2010), Şekil 14a, V_b=25V	9.56, Mikroşerit	~0.10	~0.16	@-20 dB, 0.192	~119.35	~84.09	7.3 × 7.5 × 0.508	0.38 × 0.39 × 0.03
(Zheng & Papapolymerou, 2004), Tablo 5, Açık-Kısa Devre	9, Mikroşerit	~0.5	~0.5	@-10 dB, 0.7	NA*	NA*	6.1 × 6.2 × 0.4	0.51 × 0.52 × 0.03
Bu çalışma, Senaryo 2, Şekil 14, CST	9.59, Dalga Kılavuzu	~6.6	~2.5	@-60 dB, 2.64	~148	~185	265 × 26.5 × 4.5	8.47 × 0.85 × 0.85

* PR_1: alt bölge geçiş bandı dalgalanması; PR_2: üst bölge geçiş bandı dalgalanması; SS_1: düşük frekanslı durdurma bandı eğimi; SS_2: yüksek frekanslı durdurma bandı eğimi; NCS: normalize edilmiş devre boyutu; NA: mevcut değil, λg bu tablodaki f_0 frekansına göre belirlenmiştir.

Dalga kılavuzu tabanlı filtreler (Hou vd., 2022; Simsek & Topuz, 2007) ile kıyaslandığında ise, önerilen filtre özellikle durdurma bandı genişliği açısından belirgin bir üstünlük göstermektedir. Filtrenin en önemli dezavantajı, iletim bantlarındaki yüksek dalgalanma seviyeleridir ($PR_1 \approx$ 6.6 dB, $PR_2 \approx$ 2.5 dB). Bu durum, periyodik yapıların doğasından kaynaklanmakta olup, gelecek çalışmalarda kırık simetri veya inceltme teknikleriyle iyileştirilebilir. Normalize edilmiş devre boyutu (NCS) açısından bakıldığında, önerilen filtre dalga kılavuzu tabanlı diğer filtrelere göre daha büyük olsa da sunduğu geniş ve derin durdurma bandı ile bu dezavantajı telafi etmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bölümde, önerilen AFGSM tabanlı boyutsal sentez metodolojisinin performansı, sunduğu avantajlar ve karşılaşılan sınırlılıklar kapsamlı bir şekilde değerlendirilecektir. Elde edilen bulgular ışığında yöntemin tasarım hızına etkisi, kompakt yapılar geliştirmedeki rolü ve mevcut kısıtları tartışılacaktır. Ayrıca, bu çalışmadan yola çıkarak gelecekte yapılabilecek araştırmalar için çeşitli öneriler sunulacaktır.

5.1. Yöntemin Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasında, bir boyutlu tek ve kayma-simetrili çift oluklu paralel plaka dalga kılavuzlarının (GS-DCPPW) analizi ve boyutsal sentezi için AFGSM yöntemine dayalı yeni bir tasarım metodolojisi geliştirilmiştir. Yöntemin temelinde, eşdeğer devre modeli (Valerio vd., 2017) aracılığıyla hızlıca elde edilen birim hücre S-parametrelerinden türetilen X_+ ve X_- yardımcı fonksiyonlarının sıfır geçişlerinin, durdurma bandı kenar frekanslarını doğrudan vermesi prensibi yatmaktadır (Simsek & Topuz, 2007). Elde edilen sonuçlar, bu yaklaşımın hem tek oluklu hem de kayma-simetrili çift oluklu PPW yapılarının bant aralığı özelliklerini belirlemede son derece etkili olduğunu göstermiştir.

5.1.1. Tasarım hızı ve verimlilik

Önerilen yöntemin en belirgin avantajı, tasarım sürecine kazandırdığı hız ve verimliliktir. Geleneksel yaklaşımlarda, bir periyodik yapının dispersiyon diyagramını elde etmek için ya karmaşık analitik formülasyonlar (mod uyumlama gibi) ya da yüksek hesaplama yükü getiren tam dalga benzeticiler (CST, HFSS) kullanılmaktadır. Özellikle geniş bir parametrik tarama veya optimizasyon gerektiğinde, tam dalga benzeticilerin kullanımı günler veya haftalar sürebilen hesaplama sürelerine yol açmaktadır. Örneğin, bu çalışmada incelenen sınırlı tasarım uzayında ($a, h_2 = h_3, b$ parametrelerinin taranması) bir veri seti oluşturmak, CST'nin özmod çözücüsü ile yaklaşık 360 saat (15 gün) sürerken, aynı veri seti önerilen AFGSM tabanlı yöntemle sadece 20 saniyede elde edilebilmiştir. Bu dramatik süre azalması, yöntemin parametrik çalışmalar, tolerans analizleri ve çok kriterli optimizasyon problemleri için ne denli güçlü bir araç olduğunu açıkça göstermektedir.

AFGSM yönteminin hız avantajı, denklem (5)'in sağladığı basitlikten kaynaklanmaktadır. Geleneksel özdeğer denklemi (denklem 2) tüm frekans bandı boyunca çözülerek dispersiyon eğrisinin elde edilmesini gerektirirken, AFGSM yöntemi sadece $X_+ = 0$ ve $X_- = 0$ koşullarını

sağlayan frekansların (bant kenarlarının) bulunmasına odaklanır. Bir aralık bölme kök bulma algoritması ile bu iki frekans, ince frekans taramalarına gerek kalmadan, çok kısa sürede tespit edilebilmektedir. Bu durum, özellikle erken tasarım aşamalarında, farklı geometrik parametrelerin bant aralığı üzerindeki etkisinin hızlıca incelenmesine ve tasarım uzayının daraltılmasına imkân tanır.

5.1.2. Boyut küçültme avantajları

Önerilen metodolojinin bir diğer önemli katkısı, aynı tasarım hedeflerini karşılayan birden fazla birim hücre geometrisi sunarak tasarımcıya seçim özgürlüğü tanıması ve bu sayede daha kompakt yapıların geliştirilmesine olanak sağlamasıdır. Tablo 2'de görüldüğü gibi, 10 GHz merkez frekansı hedeflendiğinde, farklı bant genişliklerine (Δf) sahip çok sayıda ($a, h_2 = h_3, b$) parametre kombinasyonu mevcuttur. Tasarımcı, belirlediği bant genişliği gereksinimine en uygun olanı seçebileceği gibi, bu küme içinden en küçük fiziksel boyutlara sahip (örneğin en küçük $h_2 = h_3$ veya en küçük periyot p değerine sahip) birim hücreyi tercih ederek daha kompakt bir filtre tasarımı gerçekleştirebilir. Tablo 3'teki üç senaryo bu durumu açıkça örneklemektedir. Senaryo 3, diğer iki senaryoya göre daha düşük bir profil yüksekliğine ($h_1 + h_2 + h_3 = 2.7$ mm) sahip olup, kompaktlık açısından avantajlıdır. Her ne kadar bu senaryoda hedeflenen -60 dB bastırma seviyesine tam olarak ulaşılamamış olsa da daha düşük bastırma gereksinimi olan uygulamalar için bu kompakt yapı ideal bir çözüm olabilir. Bu esneklik, önerilen yöntemin sadece hızlı değil, aynı zamanda çok yönlü ve tasarımcı odaklı olduğunu göstermektedir.

5.1.3. Sınırlılıklar ve karşılaşılan zorluklar

Önerilen yöntemin sağladığı tüm avantajlara rağmen, bazı sınırlılıkları ve uygulamada karşılaşılan zorluklar da bulunmaktadır. Bunların başında, kullanılan eşdeğer devre modelinin (Valerio vd., 2017) temel mod yayılımı varsayımına dayanması gelmektedir. Bu model, süreksizlik bölgelerindeki yüksek dereceli mod etkileşimlerini yalnızca reaktif elemanlarla temsil ettiğinden, bu modelde özellikle bu etkileşimlerin yoğun olduğu frekans bölgelerinde veya geometrilerde tam dalga benzetim sonuçlarından sapmalar gözlemlenebilmektedir. Şekil 8a'da, eşdeğer devre modelinden elde edilen özdeğer denklemi sonucunun, CST sonucuna göre yaklaşık 12 GHz'deki bant kenarında hafif bir sapma göstermesi bu duruma örnektir. Benzer şekilde, Şekil 13b'de Senaryo 3 için eşdeğer devre modeli, hedeflenen durdurma bandında tam

dalga simülatörlerine göre daha iyi bir bastırma öngörmüş, ancak gerçek performans (CST/HFSS) beklentiyi karşılayamamıştır. Bu, hedeflenen bandın dispersiyon diyagramındaki üst modlara yakınlığı nedeniyle yüksek dereceli mod etkileşimlerinin artmasıyla açıklanabilir. Bu gibi durumlarda, Denklem (4) ile ifade edilen tam dalga destekli AFGSM formunun kullanılması daha doğru sonuçlar verecektir.

Bir diğer sınırlılık, tasarlanan filtrelerin iletim bantlarındaki yüksek dalgalanma seviyeleridir. Özellikle Tablo 4'te görüldüğü üzere, önerilen filtrenin alt geçiş bandındaki dalgalanma ($PR_1 \approx 6.6\,\text{dB}$) literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla oldukça yüksektir. Bu dalgalanmalar, periyodik yapıların doğasında bulunan ve birim hücre sayısı arttıkça belirginleşen bir olgudur. Kayma simetrisi kullanımı da bu dalgalanmaları artırıcı bir etki yapabilmektedir (Şekil 11-13). Ayrıca, AFGSM yönteminin kendisi birim hücre analizine dayandığından, sonlu sayıda birim hücrenin kaskat bağlanmasıyla oluşan filtre performansı hakkında doğrudan bilgi vermez. Tasarımın nihai performansı, mutlaka tam dalga benzetimcilerle doğrulanmalıdır. Yöntemin "yaklaşık" olarak nitelendirilmesinin temel nedeni de budur.

5.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular ve karşılaşılan sınırlılıklar doğrultusunda, gelecekte yapılabilecek araştırmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- **Çok Modlu Eşdeğer Devre Modelleri:** Yüksek dereceli mod etkileşimlerinin daha doğru bir şekilde modellenebilmesi için, kayma-simetrili yapılar için çok modlu eşdeğer devre modelleri geliştirilebilir (Alex-Amor vd., 2021). Bu modellerden elde edilecek GSM elemanları, AFGSM yönteminde kullanılarak hem hızlı hem de daha doğru analiz ve tasarım imkânı sağlanabilir.
- **Farklı Geometrilere Uygulama:** AFGSM metodolojisi, bu çalışmada ele alınan 1D GS-DCPPW yapılarının ötesine taşınarak, katlanmış yarım modlu substrate entegre dalga kılavuzları (FHMSIW) ile yapay yüzey plazmon polariton (SSPP) dalga kılavuzlarının birleşik yapıları (Wang vd., 2021, 2023; Yan vd., 2021), konik/düzlemsel oluklu iletim (Cabello-Sánchez vd., 2022; Ghasemifard vd., 2017; Wu vd., 2023) veya 2D frekans seçici yüzeyler (Alex-Amor vd., 2021) gibi daha karmaşık periyodik geometrilere uyarlanabilir. Bu yapılar için yeni veya yeniden düzenlenmiş AFGSM fonksiyonları türetilebilir.
- **Geçiş Bandı Dalgalanmalarının Azaltılması:** Tasarlanan filtrelerin en önemli dezavantajı olan yüksek geçiş bandı dalgalanmalarını minimize etmek için çeşitli yöntemler araştırılabilir. Bunlar arasında, simetrinin kasten bozulması (Castillo-Tapia vd.,

2021; Ertay, 2024; Karamirad vd., 2023; Monje-Real vd., 2019; Padilla vd., 2018, 2019; Tamayo-Dominguez vd., 2019) veya birim hücre parametrelerinin belirli bir kurala göre kademeli olarak değiştirildiği inceltme teknikleri (Karamirad vd., 2023; Zhu & Mao, 2012) sayılabilir. AFGSM yöntemi, bu tür karmaşık geometrilerde hızlı parametrik analizler yaparak en uygun inceltme profilinin bulunmasında kullanılabilir.

- **Üretim Toleranslarının Kapsamlı Analizi:** Bu çalışmada kısaca değinilen üretim toleranslarının etkisi (Şekil 7b, 8b), daha kapsamlı bir istatistiksel analizle ele alınabilir. Monte Carlo simülasyonları gibi yöntemlerle, geometrik parametrelerdeki rastgele sapmaların filtre performansına etkisi incelenebilir ve üretim süreçleri için tolerans aralıkları belirlenebilir.
- **Optimizasyon Algoritmaları ile Entegrasyon:** Önerilen yöntemin hızı, onu genetik algoritmalar veya parçacık sürü optimizasyonu gibi meta-sezgisel optimizasyon yöntemleriyle birleştirmek için ideal kılmaktadır. Bu sayede, çoklu tasarım hedeflerini (belirli bir merkez frekansı, bant genişliği, bastırma seviyesi ve minimum boyut) aynı anda en iyi şekilde karşılayan birim hücre geometrileri tamamen otomatik bir süreçle elde edilebilir.
- **Deneysel Doğrulama:** Tez kapsamında sunulan tasarımların (özellikle Senaryo 2) prototipleri üretilerek, vektör ağ analizörü (VNA) ile ölçümleri gerçekleştirilebilir. Deneysel sonuçların tam dalga benzetimleri ve AFGSM tabanlı tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılması, önerilen metodolojinin pratikteki geçerliliğini en somut şekilde ortaya koyacaktır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, AFGSM yönteminin tek ve kayma-simetrili oluklu paralel plakalı dalga kılavuzlarının analiz ve tasarımında güçlü, hızlı ve esnek bir araç olduğunu göstermiştir. Geliştirilen metodoloji, mikrodalga mühendislerine, özellikle filtre tasarımı olmak üzere, çeşitli uygulamalar için kompakt ve yüksek performanslı bileşenler geliştirmede yeni bir perspektif sunmaktadır. Yöntemin mevcut sınırlılıklarının aşılması ve farklı geometrilere uyarlanması yönünde yapılacak gelecek çalışmalar, bu potansiyeli daha da artıracaktır.

KAYNAKÇA

Alex-Amor, A., Mesa, F., Palomares-Caballero, Á., Molero, C., & Padilla, P. (2021). Exploring the potential of the multi-modal equivalent circuit approach for stacks of 2-D aperture arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *69*, 6453–6467.

Amari, S., Vahldieck, R., Bornemann, J., & Leuchtmann, P. (2000). Spectrum of corrugated and periodically loaded waveguides from classical matrix eigenvalues. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *48*, 453–460.

Arnberg, P., Barreira Petersson, O., Zetterstrom, O., Ghasemifard, F., & Quevedo-Teruel, O. (2020). High refractive index electromagnetic devices in printed technology based on glide-symmetric periodic structures. *Applied Sciences*, *10*(9), 3216.

Bagheriasl, M., Quevedo-Teruel, O., & Valerio, G. (2019). Bloch analysis of artificial lines and surfaces exhibiting glide symmetry. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *67*, 2618–2628.

Cabello-Sánchez, J., Drakinskiy, V., Stake, J., & Rodilla, H. (2022). Analysis of the electromagnetic interaction between periodically corrugated transmission lines through the mutual capacitance and mutual inductance. *IEEE Access*, *10*, 15818–15834.

Castillo-Tapia, P. (2022). *The multimodal transfer matrix method: And its application to higher-symmetric periodic structures* (Doctoral dissertation). KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Castillo-Tapia, P., Mesa, F., & Quevedo-Teruel, O. (2022). Multimodal transfer matrix approach for the analysis and fundamental understanding of periodic structures with higher symmetries. In *Proceedings of the 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1–5). Madrid, Spain.

Castillo-Tapia, P., Mesa, F., Yakovlev, A., Valerio, G., & Quevedo-Teruel, O. (2021). Study of forward and backward modes in double-sided dielectric-filled corrugated waveguides. *Sensors*, *21*(19), 6293.

Chen, Q., Mesa, F., Yin, X., & Quevedo-Teruel, O. (2020). Accurate characterization and design guidelines of glide-symmetric holey EBG. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *68*, 4984–4994.

Çolak, F., & Ertay, A. O. (2025). A fast, simple, and approximate method for a minimal unit cell design of glide-symmetric double-corrugated parallel-plate waveguides. *Applied Sciences*, *15*(11), 5876.

Coves, A., San-Blas, A. A., & Bronchalo, E. (2021). Analysis of the dispersion characteristics in periodic substrate integrated waveguides. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *139*, 153914.

Dahlberg, O., Mitchell-Thomas, R., & Quevedo-Teruel, O. (2017). Reducing the dispersion of periodic structures with twist and polar glide symmetries. *Scientific Reports*, *7*, 10136.

Ebrahimpouri, M., Quevedo-Teruel, O., & Rajo-Iglesias, E. (2017). Design guidelines for gap waveguide technology based on glide-symmetric holey structures. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, *27*, 542–544.

Ertay, A. O., & Simsek, S. (2016). A compact bandstop filter design for X-band applications. In *Proceedings of the 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)* (pp. 1–6). Bucharest, Romania.

Ertay, A. O., & Simsek, S. (2018a). A comprehensive auxiliary functions of generalized scattering matrix (AFGSM) method to determine bandgap characteristics of periodic structures. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *94*, 139–144.

Ertay, A. O., & Simsek, S. (2018b). Determination of stopband characteristics of asymmetrically loaded helix slow wave structures with auxiliary functions of

generalized scattering matrix (AFGSM) method. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *95*, 271–278.

Ertay, A. O., & Simsek, S. (2022). Detection of band edge frequencies in symmetric/asymmetric dielectric loaded helix slow-wave structures. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, *50*, 507–524.

Ertay, A. O. (2024). Modeling, analysis, and comparison of rectangular waveguide structures having glide symmetrical step discontinuity with periodic dielectric loading. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, *17*, 826–839.

Fischer, B., & Valerio, G. (2022). Quasi-static homogenization of glide-symmetric holey parallel-plate waveguides with ultra-wideband validity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *70*, 10569–10582.

Fischer, B., & Valerio, G. (2024). Dispersion properties of glide-symmetric corrugated metasurface waveguides. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, *16*, 13–20.

Ghasemifard, F., Norgren, M., & Quevedo-Teruel, O. (2017). Dispersion analysis of 2-D glide-symmetric corrugated metasurfaces using mode-matching technique. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, *28*, 1–3.

Ghasemifard, F., Norgren, M., & Quevedo-Teruel, O. (2018). Twist and polar glide symmetries: An additional degree of freedom to control the propagation characteristics of periodic structures. *Scientific Reports*, *8*, 11266.

Ghasemifard, F., Norgren, M., Quevedo-Teruel, O., & Valerio, G. (2018). Analyzing glide-symmetric holey metasurfaces using a generalized Floquet theorem. *IEEE Access*, *6*, 71743–71750.

Herran, L. F., Chen, Q., Mesa, F., & Quevedo-Teruel, O. (2023). Electromagnetic bandgap based on a compact three-hole double-layer periodic structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *72*, 1045–1050.

Hessel, A., Chen, M. H., Li, R. C., & Oliner, A. A. (1973). Propagation in periodically loaded waveguides with higher symmetries. *Proceedings of the IEEE*, *61*, 183–195.

Hou, F., Li, L., Shen, Y., Sun, C., Luan, H., & Hu, S. (2022). Wideband switchable sharp-rejection filter in compact 3-D heterogeneous integration. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, *12*, 1583–1590.

Jimenez-Suarez, J. M., Mesa, F., & Quevedo-Teruel, O. (2025). A symmetry-based multimodal transfer-matrix method for the analysis of 2D-periodic structures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1–11.

Karamirad, M., Pouyanfar, N., Alibakhshikenari, M., Ghobadi, C., Nourinia, J., See, C. H., & Falcone, F. (2023). Low-loss and dual-band filter inspired by glide symmetry principle over millimeter-wave spectrum for 5G cellular networks. *iScience*, *26*, 1–14.

Lai, W. Y., & Kehn, M. N. M. (2019). Analysis of rotated corrugated parallel plate waveguide using asymptotic corrugation boundary conditions. In *Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting* (pp. 837–838). Atlanta, GA, USA.

Lech, R., & Mazur, J. (2004). Propagation in rectangular waveguides periodically loaded with cylindrical posts. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, *14*, 177–179.

Liu, Z., Lu, H., Liu, J., Yang, S., Liu, Y., & Lv, X. (2020). Compact fully metallic millimeter-wave waveguide-fed periodic leaky-wave antenna based on corrugated parallel-plate waveguides. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *19*, 806–810.

Maci, S., Minatti, G., Casaletti, M., & Bosiljevac, M. (2011). Metasurfing: Addressing waves on impenetrable metasurfaces. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *10*, 1499–1502.

Marcuvitz, N. (1986). *Waveguide handbook*. London, UK: P. Peregrinus on Behalf of the Institution of Electrical Engineers.

Memeletzoglou, N., Sanchez-Cabello, C., Pizarro-Torres, F., & Rajo-Iglesias, E. (2019). Analysis of periodic structures made of pins inside a parallel plate waveguide. *Symmetry*, *11*(5), 582.

Mesa, F., Rodriguez-Berral, R., & Medina, F. (2018a). On the computation of the dispersion diagram of symmetric one-dimensionally periodic structures. *Symmetry*, *10*(7), 307.

Mesa, F., Rodriguez-Berral, R., & Medina, F. (2018b). Unlocking complexity using the ECA: The equivalent circuit model as an efficient and physically insightful tool for microwave engineering. *IEEE Microwave Magazine*, *19*, 44–65.

Mesa, F., Valerio, G., Rodriguez-Berral, R., & Quevedo-Teruel, O. (2020). Simulation-assisted efficient computation of the dispersion diagram of periodic structures: A comprehensive overview with applications to filters, leaky-wave antennas and metasurfaces. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, *63*, 33–45.

Monje-Real, A., Fonseca, N., Zetterstrom, O., Pucci, E., & Quevedo-Teruel, O. (2019). Holey glide-symmetric filters for 5G at millimeter-wave frequencies. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, *30*, 31–34.

Navarro, M. S., Rozzi, T. E., & Lo, Y. T. (1980). Propagation in a rectangular waveguide periodically loaded with resonant irises. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *28*, 857–865.

Othman, M. A. K., Pan, X., Atmatzakis, G., Christodoulou, C. G., & Capolino, F. (2017). Experimental demonstration of degenerate band edge in metallic periodically loaded circular waveguide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *65*, 4037–4045.

Padilla, P., Herran, L., Tamayo-Dominguez, A., Valenzuela-Valdes, J., & Quevedo-Teruel, O. (2018). Glide symmetry to prevent the lowest stopband of printed corrugated transmission lines. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, *28*, 750–752.

Padilla, P., Palomares-Caballero, A., Alex-Amor, A., Valenzuela-Valdes, J., Fernández-Gonzalez, J., & Quevedo-Teruel, O. (2019). Broken glide-symmetric holey structures for bandgap selection in gap-waveguide technology. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, *29*, 327–329.

Palomares-Caballero, Á., Alex-Amor, A., Padilla, P., & Valenzuela-Valdés, J. F. (2020). Dispersion and filtering properties of rectangular waveguides loaded with holey structures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *68*, 5132–5144.

Petek, M., Rico-Fernández, J., Vásquez, J. A. T., Valerio, G., Mesa, F., Quevedo-Teruel, O., & Vipiana, F. (2025). Numerical modelling of higher-symmetric periodic structures with hexagonal lattice. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *73*, 1650–1661.

Petek, M., Rivero, J., Vásquez, J. A. T., Valerio, G., Quevedo-Teruel, O., & Vipiana, F. (2024). Method of moments for the dispersion modeling of glide-symmetric periodic structures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *72*, 756–766.

Pozar, D. M. (2021). *Microwave engineering: Theory and techniques*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.

Quevedo-Teruel, O., Chen, Q., Mesa, F., Fonseca, N. J., & Valerio, G. (2021). On the benefits of glide symmetries for microwave devices. *IEEE Journal of Microwaves*, *1*, 457–469.

Quevedo-Teruel, O., Ebrahimpouri, M., & Kehn, M. N. M. (2015). Ultrawideband metasurface lenses based on off-shifted opposite layers. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *15*, 484–487.

Quevedo-Teruel, O., Valerio, G., Sipus, Z., & Rajo-Iglesias, E. (2020). Periodic structures with higher symmetries: Their applications in electromagnetic devices. *IEEE Microwave Magazine*, *21*, 36–49.

Reines, I., Park, S. J., & Rebeiz, G. M. (2010). Compact low-loss tunable X-band bandstop filter with miniature RF-MEMS switches. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *58*, 1887–1895.

Simsek, S. (2014). A fast and accurate design method for broad omnidirectional bandgaps of one dimensional photonic crystals. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *68*, 865–868.

Simsek, S., & Rezaeieh, S. A. (2013). A design method for substrate integrated waveguide electromagnetic bandgap (SIW-EBG) filters. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *67*, 981–983.

Simsek, S., & Topuz, E. (2007). Some properties of generalized scattering matrix representations for metallic waveguides with periodic dielectric loading. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *55*, 2336–2344.

Simsek, S., Topuz, E., & Niver, E. (2012). A novel design method for electromagnetic bandgap based waveguide filters with periodic dielectric loading. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *66*, 228–234.

Tahir, G., Hassan, A., Ali, S., & Bermak, A. (2024). Unit cell optimization of groove gap waveguide for high bandwidth microwave applications. *Applied Sciences*, *14*(23), 10891.

Tamayo-Dominguez, A., Fernandez-Gonzalez, J. M., & Quevedo-Teruel, O. (2019). One-plane glide-symmetric holey structures for stop-band and refraction index reconfiguration. *Symmetry*, *11*(4), 495.

Valerio, G., Ghasemifard, F., Sipus, Z., & Quevedo-Teruel, O. (2018). Glide-symmetric all-metal holey metasurfaces for low-dispersive artificial materials: Modeling and properties. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *66*, 3210–3223.

Valerio, G., Sipus, Z., Grbic, A., & Quevedo-Teruel, O. (2017). Accurate equivalent-circuit descriptions of thin glide-symmetric corrugated metasurfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *65*, 2695–2700.

Wang, S., Chung, K. L., Du, L., Kong, F., & Li, K. (2021). Design and analysis of a compact frequency beam-scanning antenna based on composite FHMSIW/SSPP waveguide. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *21*, 546–550.

Wang, S., Chung, K. L., Kong, F., Du, L., & Li, K. (2023). A simple circularly polarized beam-scanning antenna using modulated slotline-spoof surface plasmon polariton slow-wave transmission line. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *22*, 1109–1113.

Wu, C. H., Zhou, G., Ma, P., Wu, Y., Li, K., Shen, L., Shen, Q., Zhang, H., Yan, J., & You, Y. (2023). A corrugated planar-Goubau-line termination for terahertz waves. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, *33*, 643–646.

Xu, S., Wu, J., & Chen, X. (2024). Design of broadband highly efficient power amplifier based on low-pass filtering network with periodic structure. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. Advance online publication.

Yan, X. T., Tang, W., Liu, J. F., Wang, M., Gao, X. X., & Cui, T. J. (2021). Glide symmetry for mode control and significant suppression of coupling in dual-strip SSPP transmission lines. *Journal of Nanophotonics*, *15*(2), 026001.

Zheng, G., & Papapolymerou, J. (2004). Monolithic reconfigurable bandstop filter using RF MEMS switches. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, *14*, 373–382.

Zhu, H., & Mao, J. (2012). Miniaturized tapered EBG structure with wide stopband and flat passband. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *11*, 314–317.

EKLER

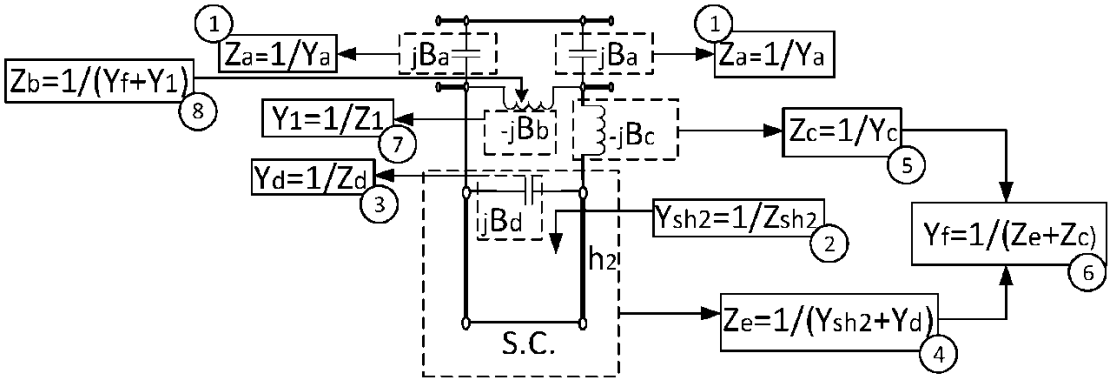
Ek A. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Genişletilmiş Çıkarımı ve Birim Hücre S-Parametrelerinin Elde Edilmesi

Şekil 2'de verilen birim hücrelere ait eşdeğer devrelerdeki tüm yapıların saçılma matrislerini bulmak için, öncelikle her bir S_i $(i = 1,2,\dots,5)$ blok elemanının saçılma matrisinin elde edilmesi gerekmektedir. Şekil 2'deki S_1, S_3 ve S_5 blokları geleneksel kayıpsız iletim hatlarıdır ve l uzunluğundaki kayıpsız bir iletim hattının saçılma parametreleri şu şekilde tanımlanır:

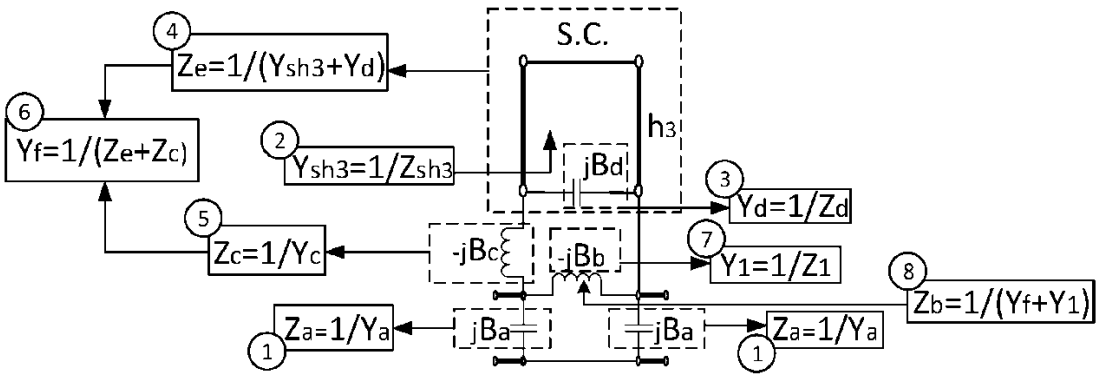
$$[S^{TL}] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-jk_0 l} \\ e^{-jk_0 l} & 0 \end{bmatrix}. \qquad (A1)$$

Burada l iletim hattının uzunluğunu ve $k_0 = 2\pi f/c$ (f frekans, c ışık hızı) boş uzay faz sabitini temsil etmektedir. İncelenen bloğun uzunluğu ve faz sabiti denkleme yerleştirilerek S_1, S_3 ve S_5 bloklarının S-parametreleri bulunur. Tek oluklu PPW'de l değeri S_1 ve S_3 için b iken; kayma-simetrik çift oluklu yapıda S_1 ve S_5 için $(p - m - a)/2$, S_3 için ise $(m - a)$'dır.

S_2 ve S_4 devre blokları ise yapının saçılma parametrelerini belirlemede çok önemli bir role sahiptir. Bu durumu netleştirmek için, seri kısa devre hatlarla oluşturulmuş π devrelerinin (S_2 ve S_4) açık formları Şekil A1'de verilmiştir. İlgili devrelerde gösterilen reaktif elemanlar, yüksek dereceli mod etkileşimlerini hesaba katmak amacıyla süreksizlik noktalarında konumlandırılmıştır (Valerio vd., 2017).



(a)



(b)

Şekil A1, Şekil 2'de verilen (a) S_2 ve (b) S_4 bloklarındaki π devresinin tam görünümü.

İlgili eşdeğer devrelerdeki Z_A ve Z_B empedans ifadelerinin çıkarımı, Şekil A1 üzerinde gösterilen işlem adımları takip edilerek ardışık 8 adım halinde aşağıda sunulmuştur:

Adım 1: Verilen $Y_A = jB_a$ eşitliği kullanılarak önce Y_A türetilir, ardından $Z_A = 1/Y_A$ olarak hesaplanır (Marcuvitz, 1986).

$$B_a = \frac{2a}{\lambda_0 \eta_0}\left[\tan^{-1}(1/\alpha) + \frac{\ln\left(\sqrt{1+\alpha^2}\right)}{\alpha}\right]. \qquad (A2)$$

Bu denklemdeki α, λ_0 ve η_0 sırasıyla $a/2h_1$, $2\pi/k_0$ ve 120π değerlerine karşılık gelmektedir.

Adım 2: Kısa devre ile sonlandırılmış iletim hattının empedansı $Z_{shi}(i = 2,3) = j\eta_0' \tan(k_0 h_i)$ dikkate alınır. Buradan bu yapının admitansı $Y_{shi}(i = 2,3) = 1/Z_{shi}$ olarak elde edilir. Burada η_0' değeri, $\eta_0 \frac{a}{h_1}$ ifadesine eşittir (Marcuvitz, 1986; Pozar, 2021).

Adım 3: Y_{shi}'ye bağlı kapasitörün admitansı $Y_d = jB_d$, aşağıdaki denklemler yardımıyla belirlenir (Marcuvitz, 1986):

$$B_d = \frac{h_1}{\lambda_0 \eta_0}\left(\frac{\pi}{3\alpha} + A_2\right). \qquad (A3)$$

$$A_2 = 2\left[\alpha \tan^{-1}(1/\alpha) + \frac{\tan^{-1}(\alpha)}{\alpha} + \ln\left(\frac{1+\alpha^2}{4\alpha}\right) - \frac{\pi(1+\alpha^2)}{6\alpha}\right] - A_1. \qquad (A4)$$

$$A_1 = -\frac{2\alpha}{\pi} e^{\left(-\frac{2\tan^{-1}(\alpha)}{\alpha}\right)} \left[1 + \frac{5+\alpha^2}{4(1+\alpha^2)} e^{\left(-\frac{2\tan^{-1}(\alpha)}{\alpha}\right)} + \left[\frac{4}{1+\alpha^2} + \left(\frac{5-\alpha^2}{1+\alpha^2}\right)^2\right] \frac{e^{\left(-\frac{4\tan^{-1}(\alpha)}{\alpha}\right)}}{9}\right] \quad (A5)$$

Adım 4: Adım 2 ve Adım 3'te elde edilen Y_d ve Y_{shi} kullanılarak eşdeğer devre empedansı $Z_e = 1/(Y_{shi} + Y_d)$ şeklinde hesaplanır.

Adım 5: Belirtilen endüktansın admitansı $Y_c = -jB_c$ aşağıdaki denklemle hesaplanır ve buradan $Z_c = 1/Y_c$ bulunur (Marcuvitz, 1986):

$$B_c = \frac{\lambda_0}{2\pi a \eta_0}. \quad (A6)$$

Adım 6: Adım 4 ve Adım 5'te elde edilen Z_c ve Z_e empedansları kullanılarak admitans $Y_f = 1/(Z_e + Z_c)$ olarak bulunur.

Adım 7: Belirtilen endüktansın admitansı B_b aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilir (Marcuvitz, 1986):

$$B_b = \frac{B_a - \left[\left(\frac{2h_1}{\lambda_0\eta_0}\right)\left(\frac{\pi a}{3} + A_1\right)\right]}{2}. \quad (A7)$$

Adım 8: Adım 6 ve Adım 7'de bulunan Y_f ve Y_1 (Şekil A1'e göre $Y_1 = 1/Z_1$) admitansları kullanılarak $Z_B = 1/(Y_f + Y_1)$ empedansı elde edilir.

Böylece Şekil 2'de verilen tüm Z_A ve Z_B empedansları kolaylıkla belirlenmiş olur. Şekil A1'de gösterilen π yapıları simetrik devrelerdir ve bu devrelere ait saçılma parametreleri ($S_{11}^{\pi}, S_{22}^{\pi}, S_{21}^{\pi}, S_{12}^{\pi}$) aşağıda tanımlanmıştır:

$$S_{11}^{\pi} = S_{22}^{\pi} = \frac{\{[(\eta_0 \parallel Z_A) + Z_B] \parallel Z_A\} - \eta_0}{\{[(\eta_0 \parallel Z_A) + Z_B] \parallel Z_A\} + \eta_0}. \quad (A8)$$

$$S_{21}^{\pi} = S_{12}^{\pi} = (1 + S_{11}^{\pi}) \frac{\eta_0 \parallel Z_A}{(\eta_0 \parallel Z_A) + Z_B}. \quad (A9)$$

Her bir S_i $(i = 1,2,\dots,5)$ blok devresinin saçılma matrisleri bulunduktan sonra, Bölüm 3'te (Yöntem Bölümü, Denklem 7-10) detaylandırıldığı üzere matrisler ardışık olarak (kaskat) bağlanır ve birim hücrenin toplam S-parametreleri elde edilir.