T. C.

SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOKLU AÇIKLIKLI METALİK MUHAFAZALARIN EKRANLAMA ETKİNLİĞİNİN HIE-FDTD ALGORİTMASI KULLANILARAK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Arzu KALENDER TUTAŞ

(20209233014)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih KABURCUK

SİVAS

OCAK 2024

Arzu KALENDER TUTAŞ'ın hazırladığı ve **"ÇOKLU AÇIKLIKLI METALİK MUHAFAZALARIN EKRANLAMA ETKİNLİĞİNİN HIE-FDTD ALGORİTMASI KULLANILARAK ANALİZİ"** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	**Doç. Dr. Fatih KABURCUK** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……
Jüri Üyesi	**Dr. Öğr. Üyesi Vekil SARI** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……..……
Jüri Üyesi	**Dr. Öğr. Üyesi Nurhan GÜNEŞ** Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	……..……..

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bütün hakları saklıdır. Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Arzu KALENDER TUTAŞ, 2024

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

25.01.2024

Arzu KALENDER TUTAŞ

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana yardımcı olan, bilgi birikimini aktaran, yol gösteren ve eğitimim süresince desteklerini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fatih KABURCUK' a teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tezin hazırlanma sürecinde tecrübelerinden faydalandığım Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mimarlık, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi Grafik Bölümü hocalarından Sayın Dr. Merve DUYDU 'ya desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca yaşamım boyunca her zaman yanımda olan ve beni her konuda destekleyen eşime, sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Arzu KALENDER TUTAŞ

ÖZET

ÇOKLU AÇIKLIKLI METALİK MUHAFAZALARIN EKRANLAMA ETKİNLİĞİNİN HIE-FDTD ALGORİTMASI KULLANILARAK ANALİZİ

Arzu KALENDER TUTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih KABURCUK

2024, 46+xıv sayfa

Bu tez çalışmasında, elektromanyetik girişimin olumsuz etkilerini önlemek amacıyla girişimden korunma yöntemlerinden biri olan ekranlamayı hesaplamak için etkin bir yöntem sunulmuştur. Elektromanyetik etkilere karşı ekranlama için metal muhafazalar kullanılmaktadır. Ancak, metal muhafazalar üzerindeki ince açıklıklar, ekranlamayı olumsuz yönde etkileyebilir; bu durum elektromanyetik ekranlama verimliliğini azaltır. Bu nedenle metal muhafazaların ekranlama etkinliği değerlerini belirlemek önemlidir. Metal muhafazaların ekranlama etkinliği, zaman alanında sonlu farklar (FDTD) yöntemi ile hesaplanabilir. İnce açıklıkların metal muhafaza üzerinde etkili bir şekilde modellenmesi için, FDTD uzayındaki hücre boyutları, açıklığın dar kenarı boyunca diğer yönlere kıyasla daha küçük olmalıdır. Ancak FDTD yönteminde doğruluğu sağlayabilmek için, Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) kararlılık kriteri nedeniyle küçük hücre boyutları zaman adımı süresini azaltarak daha uzun hesaplama süreleri gerektirir. Bu nedenle, hibrit örtülü açık zaman alanında sonlu farklar (HIE-FDTD) yöntemi önerilerek, küçük hücre boyutları kullanılarak sonuçların doğruluğunu etkilemeden, metalik muhafazaların ekranlama etkinliği çok daha hızlı hesaplanabilmektedir. Benzetim çalışmalarında HIE-FDTD yöntemi kullanılarak, metalik muhafazalar üzerinde tanımlanan tek ve çok sayıda ince açıklığın ekranlama etkinliği üzerindeki etkileri 0.1-1 GHz frekans aralığında MATLAB programlama dili kullanılarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar geleneksel FDTD yöntemi ile yapılan benzetim çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda metal muhafaza üzerindeki toplam açıklık

alanı daraldığında, dalga polarizasyon yönü değiştiğinde ekranlama verimliliğinin rezonans bölgesi dışında arttığı görülmüştür. Aynı zamanda HIE-FDTD yöntemi ile yapılan benzetim sonuçları, geleneksel FDTD yöntemine göre yaklaşık %70 oranında daha kısa sürede elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Uyumluluk (EMC), Ekranlama Etkinliği (EE), Metalik Muhafaza, Hibrit Örtülü Açık Zaman Alanında Sonlu Farklar (HIE-FDTD)

ABSTRACT

EFFICIENT ANALYSIS OF SHIELDING EFFECTIVENESS FOR METALLIC ENCLOSURES WITH MULTIPLE SLOTS USING THE HIE-FDTD ALGORITHM

Arzu KALENDER TUTAŞ

Master of Science Thesis

Department of Electrical & Electronic Engineering

Supervisor: Associate Professor Fatih KABURCUK

2024, 46+xıv pages

In this thesis, an effective method is presented to calculate shielding, which is one of the interference protection methods, in order to prevent the negative effects of electromagnetic interference. Metallic enclosures are used for shielding against electromagnetic effects. However, thin slots on metallic enclosures can negatively affect shielding; This reduces the electromagnetic shielding efficiency. Therefore, it is important to determine the shielding efficiency values of metallic enclosures. The shielding effectiveness of metallic enclosure can be calculated by the finite-difference time-domain (FDTD) method. For effectively modelling of thin slots on the metallic enclosure, cell sizes in the FDTD domain must be smaller along the narrow edge of the slots compared to other directions. However, to ensure accuracy in the FDTD method, smaller cell sizes require longer computational time due to the Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) stability criterion, which decreases the time step size. Therefore, by proposing the hybrid implicit-explicit finite-difference time-domain (HIE-FDTD) method, which allows for the use of small cell sizes without compromising the accuracy of the results, the shielding effectiveness of metallic enclosures can be calculated much faster. Simulation studies using the HIE-FDTD method examine the effects of single and multiple thin apertures defined on metallic enclosures on shielding effectiveness in the 0.1-1 GHz frequency range using the MATLAB programming language, and the results are compared with simulation studies conducted using the traditional FDTD method. This comparison reveals that as the total aperture area on the metal enclosure decreases or when the wave polarization direction changes, the shielding effectiveness increases outside the resonance region. Additionally, simulation results using the HIE-FDTD

method are obtained approximately 70% faster compared to the traditional FDTD method.

Keywords: Electromagnetic Compatibility (EMC), Shielding Effectiveness (EE), Metallic Enclosure, Hybrid Implicit-Explicit Finite Difference Time Domain (HIE-FDTD).

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **vii**
ABSTRACT ..... **ix**
İÇİNDEKİLER ..... **xi**
ŞEKİLLER VE TABLOLAR DİZİNİ ..... **xii**
SİMGELER DİZİNİ ..... **xii**
KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. KAYNAK TARAMASI **5**
2.1. Elektromanyetik Girişim 5
2.2. Elektromanyetik Uyumluluk 6
2.3. Ekranlama Etkinliği 6
2.4. Analitik Yöntemler 8
2.5. Sayısal Yöntemler 9
3. YÖNTEM **11**
3.1. Zaman Alanında Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD) 11
3.1.1. Sayısal kararlılık ve dağılma 16
3.1.2. Sınır koşulları 16
3.1.3. Kaynak seçimi 17
3.2. Hibrit Örtülü Açık Zaman Alanında Sonlu Fark Yöntemi (HIE-FDTD) 20
3.2.1. LU ayrıştırması 26
4. BULGULAR VE SONUÇLAR **28**
4.1. FDTD Yöntemi ve HIE-FDTD Yönteminin Uyumluluğu 28
4.2. Farklı Boyutlarda Tek Açıklığın EE Üzerinde Etkisi 31
4.3. Farklı Boyutlarda Çoklu Açıklığın EE Üzerinde Etkisi 32
4.4. Açıklığın Farklı Bölgelerde Konumlandırılmasının EE Üzerinde Etkisi; 34
4.5. Açıklık Genişliğinin EE Üzerinde Etkisi 35
4.6. Farklı Polarizasyon Yönünün EE Üzerinde Etkisi 36
4.7. Farklı Gözlem Noktalarının EE Üzerinde Etkisi 37
4.8. Kutu Boyutunun EE Üzerinde Etkisi 38
4.9. Farklı Gelen Dalga Açılarının EE Üzerinde Etkisi 39
5. SONUÇ **41**
KAYNAKLAR **43**

ŞEKİLLER VE TABLOLAR DİZİNİ

Şekil 2.1 Elektromanyetik girişim bağlantı yolları 5

Şekil 2.2 Elektromanyetik girişimin metal ekranlama muhafazası tarafından engellenmesi 6

Şekil 3.1 Birim Yee Hücresi 12

Şekil 3.2 TF/SF alan bölgelerinin tanımlandığı sınırlar 17

Şekil 3.3 Zamana karşılık Gauss dalgası 18

Şekil 3.4 Frekansa karşılık Gauss dalgası 19

Şekil 3.5 HIE-FDTD yöntemi akış şeması 25

Şekil 4.1 Dikdörtgen metalik ekranlama muhafazası 29

Şekil 4.2 Geleneksel FDTD ve HIE-FDTD yöntemi ile tek açıklıklı metal muhafazanın ekranlama etkinliği benzetim sonuçları 30

Şekil 4.3 HIE-FDTD yöntemi ile metalik muhafaza üzerinde farklı boyutlarda tek açıklık ile EE'nin incelenmesi 31

Şekil 4.4 Çoklu açıklıklara sahip metalik muhafazanın geometrik şekilleri. 32

Şekil 4.5 Çoklu açıklıklara sahip metalik muhafazanın EE benzetimi sonuçları 32

Şekil 4.6 Çoklu açıklıklara sahip metalik muhafazanın geometrik şekilleri 33

Şekil 4.7 Çoklu açıklıklara sahip metalik muhafazanın EE benzetimi sonuçları 33

Şekil 4.8 Metal muhafaza üzerinde $10x6cm^2$ boyutundaki tek açıklığın tanımlandığı konumlar 34

Şekil 4.9 Farklı konumlarda tanımlanan açıklığın EE üzerindeki değişimi 34

Şekil 4.10 Farklı açıklık genişliğinin EE üzerindeki etkisi 35

Şekil 4.11 Gelen dalganın farklı polarizasyonlarda olmasının EE üzerindeki etkisi 36

Şekil 4.12 Gözlem noktalarının metal muhafaza üzerindeki konumları 37

Şekil 4.13 Gözlem noktası z yönünde üç farklı konumda iken ekranlama etkinliği 37

Şekil 4.14 Üzerinde $20x3cm^2$ tek açıklık bulunan farklı boyutlarda muhafazanıngeometrik şekilleri 38

Şekil 4.15 Farklı boyutlarda metalik muhafaza kutusunun EE üzerindeki etkisi 38

Şekil 4.16 Gelen düzlem dalga polarizasyon açısının EE üzerindeki etkisi 39

Şekil 4.17 Gelen düzlem dalga yayılma açısının EE üzerindeki etkisi 40

Tablo 1 FDTD ve HIE-FDTD yöntemi ile hesaplama süresi karşılaştırma 29

SİMGELER DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\vec{E}$	:Elektrik Alan Vektörü
$\vec{H}$	:Manyetik Alan Vektörü
c_0	:Serbest uzayda ışık hızı
ε_0	:Serbest uzayın dielektrik sabiti
μ_0	:Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
σ	:İletkenlik katsayısı
λ	:Dalga boyu
GHz	:GigaHertz
dB	:Desibel
Δt	:Zaman adımı süresi
n	:Zaman adımı indeksi
Δx	:*x* yönünde birim hücre boyutu
Δy	:*y* yönünde birim hücre boyutu
Δz	:*z* yönünde birim hücre boyutu

KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
EMI	**:** Elektromanyetik Girişim
EMC	**:**Elektromanyetik Uyumluluk
EM	:Elektromanyetik
EE	**:**Ekranlama Etkinliği
FDTD	**:**Zaman Alanında Sonlu Farklar
HIE-FDTD	**:**Hibrit Örtülü Açık Zaman Alanında Sonlu Farklar
ADI-FDTD	**:**Alternatif Yönlü Örtük Zaman Alanında Sonlu Farklar
CFL	**:**Courant–Friedrichs–Lewy
CPML	**:**Konvolüsyon Mükemmel Uyumlu Katman
MoM	**:**Momentler Yöntemi
FEM	**:**Sonlu Elemanlar Yöntemi
TLM	**:**İletim Hattı Teorisi
PCB	**:**Baskı Devre Kartı
EM	**:**Elektromanyetik
Wi-Fi	**:**Kablosuz Ağ
PEC	**:**Mükemmel Elektrik İletken
PMC	**:**Mükemmel Manyetik iletken
PML	**:**Mükemmel Eşleşen Katman
TF/SF	**:**Toplam Alan/ Saçılan Alan

1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik elektronik cihazların kullanımı, teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte insan hayatının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Günümüz şartlarında, bu cihazların kullanımı birçok kolaylık sunmakta ancak birtakım zorlukları da beraberinde getirmektedir. Birçok elektrik elektronik cihaz, çalıştığında etrafına elektromanyetik dalgalar yayar ve dış ortamdan gelen elektromanyetik dalgalardan etkilenirler. Aynı ortam içerisinde gelen veya yayılan elektromanyetik (EM) dalgalar, cihazlarda elektromanyetik girişim (EMI) problemine yol açar. EMI, bir sistem tarafından üretilen elektromanyetik dalgaların, dışındaki başka bir sistem üzerinde olumsuz etkilere neden olabilen müdahalesi olarak tanımlanabilir. EMI'nin olumsuz etkilerini önlemek ve cihazların çalışma ortamlarında birbirlerini etkilemeden işlevlerini yerine getirmelerini sağlamak amacıyla, elektromanyetik uyumluluk (EMC) kontrolleri uygulanır[1], [2]. EMI önlemek amacıyla EMC uygulamaları çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir. Bunlar arasında topraklama, filtreleme, baskı devre kartları (PCB) ve ekranlama yöntemleri EMC uygulamalarından birkaçıdır.

Topraklama düşük frekansta elektriksel koruma yöntemi olarak, yüksek frekansta ise EMI sorunlarını önlemede kullanılır[3]. Elektronik ekipmanın toprak bağlantıları ve toprak yolları, yüksek frekansta oluşan akımları yönlendirmek ve dağıtmak için düşük empedanslı olarak tasarlanmalıdır.

EMI filtreleri, genellikle enerji hatları, sinyal hatları veya veri hatları üzerindeki elektromanyetik girişimi bastırmak için tasarlanmış mekanizmalardır. Filtreleme için, davranışı frekansa göre değişen endüktör ve kapasitör gibi pasif devre elemanları kullanılarak, girişime sebep olan frekans değerlerindeki elektromanyetik dalgalar filtrelenir ve EMI sorunları azaltılır.

PCB söz konusu olduğunda, EMC analizi EMI yayılmasını azaltma, girişim karşısında duyarlılığını artırma veya bağlantı yolları arasında akım, voltaj dalga formunun bütünlüğünü sağlama olarak 3 farklı konuda ele alınır. Görece düşük frekanslarda bu sorunlar ihmal edilebilir düzeyde olsa da dalga boyu arttıkça bir sorun haline gelmektedir. Bu yüzden PCB tasarımlarında, yayılan sinyallerin dalga boyları, elektromanyetik elemanların kart üzerindeki konumları veya elektriksel iletimi sağlayan yollar gibi faktörler PCB'lerin EMC'sini belirleme de önemli konular arasındadır[4].

Bozucu elektromanyetik sinyalleri önlemede ekranlama, iletken ya da manyetik bir malzeme ile sistemleri veya cihazları çevreleyerek yapılan koruma şeklidir. EMI'nin farklı frekans aralıklarında oluşabileceği dikkate alınırsa ekranlama koruması da farklı şekillerde uygulanabilir. Örneğin, düşük frekans bantlarında (0-300MHz) ekranlama malzemesi olarak ferrit veya karbon içerikli malzemeler kullanılabilirken, yüksek frekanslardaki elektromanyetik dalgalar (cep telefonu dalgaları, Wi-Fi sinyalleri, radyo dalgaları vb.) için elektriksel iletkenliği yüksek olan metal muhafazalar tercih edilir[5], [6].

EMC için kullanılan metal muhafaza yüzeyleri, elektromanyetik dalgaları yansıtarak veya emerek zayıflatır. Metal muhafazaya temas eden elektromanyetik dalga, muhafaza yüzeyinde varsa bulanan açıklıklardan muhafaza içerisine nüfuz eder, ardından metal duvarlara çarpar ve içeride çoklu yansımalara sebep olur[6], [7]. Ekranlama muhafazaları genelde bir bütün olarak düşünülür. Ancak sistem veya cihaz tasarımı aşamasında, muhafaza üzerinde bulunması gereken çeşitli giriş çıkış bağlantı noktaları, havalandırma boşlukları, kablolama için gerekli alanlar dolayısıyla bu bütünlüğü bozan açıklıklar kullanılır. Bu tür açıklıklar dolayısıyla girişime neden olan elektromanyetik dalgalar, muhafaza içerisine nüfuz ederek ekranlama performansını etkiler. Bu yüzden, muhafaza üzerinde bulunan açıklıkların neden olduğu olumsuz performans etkilerinde ekranlama etkinliği değerlerini bilmek önemlidir. Ekranlama etkinliği parametresi, belirlenen bir gözlem noktasında muhafaza varlığında ve muhafaza olmadan bulunan elektromanyetik alan şiddeti arasındaki orandır. Günümüze kadar, ekranlama etkinliği (EE) değerlerini hesaplamak için çeşitli sayısal ve analitik yöntemler geliştirilmiştir. Analitik yöntemlerden eşdeğer devre yaklaşımı, dikdörtgen bir kutu üzerindeki açıklığın elektrik ve manyetik alan girişimlerini hesaplamak için kullanılmıştır[8], [9]. Sayısal yöntemler zaman alanında sonlu farklar (FDTD)[10] yöntemi, moment yöntemi (MoM)[11], sonlu elemanlar analizi (FEM)[12] ve iletim hattı modelini (TLM) [13] kapsar. Kullanılan her yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları bulunmaktadır[14]. Sayısal yöntemler nispeten doğru olmakla birlikte uzun hesaplama süresi, ayrıntılı ağ oluşturma ve büyük miktarda veri gerektirir. Diğer yandan, analitik yöntemler kısa hesaplama süreleri gerektirir, ancak yüksek frekansta geçerlilik sorununa neden olan çeşitli varsayımları içerir[15].

Bu tez çalışmasında, metalik muhafazaların EE hesaplamalarında oldukça yaygın olarak kullanılan sayısal yöntemlerden biri olan FDTD yöntemi ele alınmıştır. Sayısal

yöntemlerin önemli dezavantajlarından biri olan uzun hesaplama süresi sorunu, FDTD yönteminde de karşımıza çıkmaktadır. FDTD yönteminde kararlılık kriteri adı verilen CFL koşulu, ince hücrelerde zaman adımı süresini azaltarak, uzun hesaplama sürelerine yol açmaktadır. Bu sorunu aşmak ve daha kısa sürelerde aynı doğrulukta sonuçlar elde etmek için, FDTD yöntemi ile bazı teknikler bir arada kullanılarak hibrit yöntemler ortaya çıkmıştır. T. Namiki tarafından zaman adımı büyüklüğü ile ilgili sınırlamaları aşmak için alternatif yönlü örtük FDTD (ADI-FDTD) algoritması önerilmiştir[16]. Bu algoritmada FDTD uzayının hücre boyutu, dalga boyundan çok daha küçük seçildiğinde oldukça verimli sonuçlar elde edilmiştir. 3 boyutlu bir problem çözümünde ADI-FDTD algoritması, her alan güncellemesi için üç zaman adımı kullanır ve alan ilerlemesi için iki alt tekrar gerektirir. İlk alt tekrar, *x*-*y* alternatif güncelleme aşamasını ifade ederken, ikinci alt tekrar ise *z* yönündeki güncellemeleri içerir. Ancak bu teknik zaman açısından bazı dengesizliklere neden olarak ilerleyen adımlarda sayısal hatalar ortaya çıkarır[17]. Zhao[17] tarafından önerilen koşulsuz kararlı zaman alanında sonlu farklar (US-FDTD) yöntemi, ADI-FDTD algoritmasının karşılaştığı bazı kısıtlamaları aşmak için geliştirilmiştir. Bu yöntem sayısal kararlılığı korurken daha büyük zaman adımları kullanarak hesaplama verimliliğini artırır. Bu yöntemde tüm alan bileşenleri için yarı örtük fark şeması uygulanır. Alan ilerlemesi içinse tek adım yeterlidir yani ADI-FDTD algoritmasına göre daha etkili bir çözüm sunar. Ancak bu yöntemde özellikle elektrik alan bileşenlerinin arasındaki bağlantılar, iki ve üç boyutlu yapılarda yüksek boyutlu ve seyrek matris denklemlerinin çözümünü gerektirir. Bu durum yöntemin verimliliğini etkiler ve hesaplama açısından zorlu olabilir. Her iki yöntemin avantajlı yönleri kullanılarak yeni bir FDTD algoritması olan açık-örtük zaman alanında sonlu farklar (HIE-FDTD) algoritması geliştirilmiştir. HIE-FDTD algoritması örtük ve açık fark şemalarını bir arada kullanarak alan güncellemelerini gerçekleştirir ve zaman açısından da denklemleri dengelidir[18].

Bu tez çalışmasında, FDTD yönteminin neden olduğu uzun hesaplama süresi sorununu çözmek amacıyla önerilen HIE-FDTD yöntemi kullanılmıştır. MATLAB programlama dili ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, dikdörtgen metalik bir muhafazanın bir yönündeki ince açıklıkların EE parametresindeki değişiklikleri incelenmiştir.

İkinci bölümde kaynak taraması yapılarak elektromanyetik girişim, elektromanyetik uyumluluk ve ekranlama etkinliği konuları açıklanmış, ekranlama etkinliği için kullanılan sayısal ve analitik yöntemlerle yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

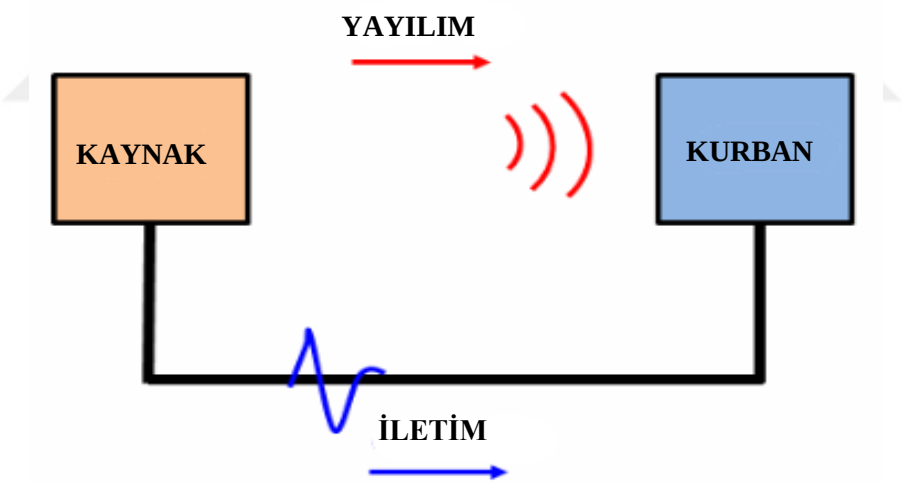
Üçüncü bölümde, tez çalışmasında kullanılacak olan sayısal yöntemlerden FDTD ve HIE-FDTD yöntemleri tanıtılarak gerekli matematiksel eşitlikler verilmiştir.

Dördüncü bölümde EE hesaplaması için ilk olarak, FDTD yöntemi ile yapılan benzetim çalışmaları, HIE-FDTD yöntemi ile karşılaştırılarak hibrit yöntemin doğruluğu tespit edilmiştir. Daha sonra, tekli ve çok sayıda ince açıklıkların metalik muhafazanın EE performansı üzerindeki etkileri, HIE-FDTD yöntemi kullanılarak yapılan benzetim çalışmalarıyla sunulmuştur. Açıklıkların boyutları, sayıları ve konumları değiştirilerek farklı senaryolarda analizler yapılmış, ayrıca farklı polarizasyon yönleri ve gözlem noktaları belirlenerek EE'nin değişimi gözlemlenmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Elektromanyetik Girişim

Elektromanyetik bir cihazın çalışmasında istenmeyen aksaklıklar, bozulmalar veya kontrol dışı işlevlerin gerçekleşmesine sebep olan her olay elektromanyetik girişim adını alır. Elektromanyetik girişime bir sistem veya cihaz sebep olabileceği gibi doğal olaylarda sebep olabilir. EMI, kablo iletimleri veya cihazların havaya yaydığı elektromanyetik dalgalar aracılığı ile ortamda gürültü oluşturabilir. Her iki durumda da cihaz performanslarında olumsuz etkiler meydana gelebileceği için EMI azaltılmalı veya tamamen engellenmelidir. Elektromanyetik girişim iki şekilde önlenebilir. Birincisi elektromanyetik girişim kaynağından gelen gürültüyü azaltmak ikicisi ise bu gürültüye maruz kalan kurban için girişim bağlantı yollarını kesmektir. Şekil 2.1'de elektromanyetik girişimin kurban üzerinde etki edebileceği yollar gösterilmiştir.



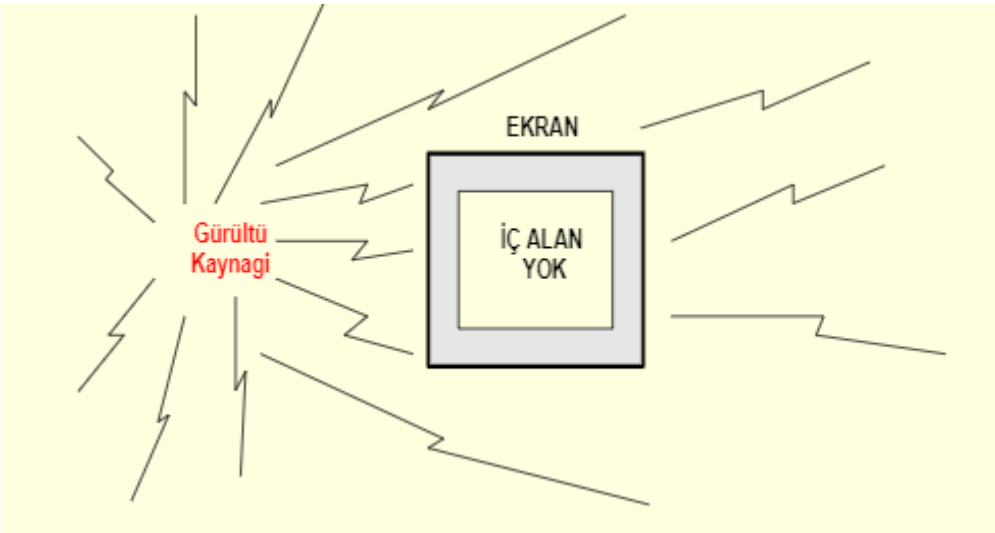
Şekil 2.1 Elektromanyetik girişim bağlantı yolları.

2.2. Elektromanyetik Uyumluluk

Elektronik tasarımın vazgeçilmez bir öğesi olan elektromanyetik uyumluluk, sistemler arasındaki elektromanyetik etkileşimleri kontrol etme ve istenmeyen elektromanyetik yayılımları önleme sürecidir. Elektromanyetik uyumluluk, aynı ortamda bulunan cihazların elektromanyetik girişimden etkilenmeden verimli, etkin ve güvenli bir şekilde faaliyet gösterebilme yeteneği olarak da ifade edilebilir. Elektronik sistemlerde bulunan elemanların, çalışmaları sırasında elektromanyetik radyasyon yayma potansiyeli olduğundan, bir elektronik elemanın veya cihazın ürettiği sinyallerin, diğer elektronik elemanları aşırı şekilde etkilememesi için tasarımlarında bir koruma unsuru bulunmalıdır. Bu koruma şekli bir cihazdan veya ortamdan gelen elektromanyetik dalgalara karşı bağışıklık veya bu tür cihazların yaydığı elektromanyetik dalga miktarını azaltmak ya da her iki yöntemin ortak birleşimi olabilir. Elektromanyetik cihazları girişimden kaynaklanan zararlı etkilerden korumak için EMC koruması, metal kaplamalı muhafazaları kullanır. Ekranlama etkinliği adı verilen parametre, muhafaza içerisindeki cihazı dışarıdaki zararlı elektromanyetik etkilerden koruma yeteneğinin ölçüsüdür [19].

2.3. Ekranlama Etkinliği

Elektromanyetik cihazlar için metalik koruma muhafazaları, sıklıkla kullanılan elektromanyetik koruma yöntemlerinden birisidir. Muhafaza ile çevrilen elektronik cihaz, ortama elektromanyetik dalga yaymaz; aynı zamanda, ortamda bulunan elektromanyetik dalgalarda muhafaza içerisine nüfuz edemez.



Şekil 2.2 Elektromanyetik girişimin metal ekranlama muhafazası tarafından engellenmesi.

Koruma etkisinin tam olması için kullanılan muhafazanın metalik ve tamamen kapalı olması gerekir. Ancak, kablolama, havalandırma açıklıkları, giriş çıkış bağlantı noktaları gibi sistem gerekliliklerinden dolayı birtakım açıklıklar bulunmak zorundadır. Elektromanyetik dalga metalik muhafazaya çarptığında, enerjisinin bir kısmı muhafaza üzerinden yansırken, bir kısmı da muhafaza üzerinde bulunan açıklıklardan içeri girerek girişime neden olur [35]. Bu durumda, metalik muhafazanın ekranlama verimliliği, özellikle açıklıklardan geçen enerji sebebiyle, belirli frekans aralıklarında azalabilir [36]. Ekranlama etkinliği metal muhafazanın elektromanyetik dalgaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. EE'deki azalma, açıklıkların boyutlarına ve elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olarak değişebilir. Desibel (dB) cinsinden ifade edilen EE muhafazanın merkez noktasında bir örnekleme noktası seçilerek ölçülen, metalik muhafaza içindeki elektrik veya manyetik alan büyüklüğünün ($\vec{E}_{toplam}$, $\vec{H}_{toplam}$) metalik muhafazaya gelen dalganın boş uzaydaki elektrik veya manyetik alan büyüklüğüne ($\vec{E}_{gelen}$, $\vec{H}_{gelen}$) oranı olarak şu şekilde ifade edilir:

$$EE = -20log10\left(\frac{\vec{E}_{toplam}}{\vec{E}_{gelen}}\right) \quad [2.1]$$

$$EE = -20log10\left(\frac{\vec{H}_{toplam}}{\vec{H}_{gelen}}\right) \quad [2.2]$$

Ekranlama etkinliği, kaynağın frekansı, metalik muhafazanın tasarlanma şekli ve boyutları, metalik muhafaza üzerindeki açıklıkların ölçüsü ve bu açıklıkların sayıları, örnek alınan noktanın koordinatları, gelen düzlem dalganın açısı, yönü, polarizasyonu vb. durumlara göre değişkenlik gösterebilmektedir.

2.4. Analitik Yöntemler

Elektromanyetik problemlerin hesaplanması temel olarak Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Maxwell'in denklemleri, elektromanyetik dalgaların yayılması, elektromanyetik alanların bir ortamda nasıl davrandığı ve elektromanyetik etkileşimlerin temel kurallarını içerir. Ancak bu denklemlerin pratik uygulamalar üzerinde kullanılması oldukça zor ve karmaşıktır. Bu zorlukları aşmak adına, elektromanyetik problemleri çözmek için sayısal ve analitik yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, Maxwell denklemlerini daha uygulanabilir ve işlevsel hale getirerek, özellikle metal muhafazaların ekranlama etkinliği gibi konularda verimli çözümler sunarlar. Bu bağlamda, elektromanyetik problemleri analitik yöntemlerle çözmeye yönelik çalışmalara örnek olarak, Bethe'nin[20] elektriksel alana sahip duvar teorisini verebiliriz. Bethe, duvarın üzerindeki açıklığın, şeklinin ve boyutunun duvarın diğer tarafındaki alan üzerindeki etkilerini inceleyerek, açıklığın merkezindeki elektrik ve manyetik dipollerin etkisi ile oluştuğunu varsaymıştır. Bethe'nin teorisi dar açıklıklar için uygundu ve sadece basit yapılar için kullanılabilirdi [21], [22]. Mendez[23], Bethe'nin küçük delik teorisinden faydalanarak dikdörtgen bir metal muhafaza üzerindeki deliklerden içeriye sızan elektromanyetik enerjinin karakteristik özelliklerini inceleyen EM radyasyon teorisini geliştirmiştir. Ancak Mendez'in geliştirdiği bu teori muhafazanın doğal kesme frekansının altındaki frekans bölgesiyle ve dikdörtgen geometrilerle sınırlıydı[24]. Hill ve arkadaşları [25], daha büyük bir boşluk içeren metal muhafazaların ekranlama etkinliği analizi için güç dengesi yaklaşımını kullanarak matematiksel bir yöntem geliştirmişlerdir. Ancak, bu yöntem ile iç alanlar ayrıntılı şekilde elde edilemez ve muhafaza geometrisi, açıklıkların tüm geometrik detayları gibi özelliklere ihtiyaç duymayan basit ve yaklaşık çözümler sunar. Bu yüzden daha karmaşık yapılı, çeşitli boyut ve özelliklerde şekiller için sayısal yöntemlere ihtiyaç vardır[26].

2.5. Sayısal Yöntemler

Analitik yöntemler, elektromanyetik problemlerde kesin sonuçlar elde etme avantajına sahiptir. Ancak, bu avantajlarına rağmen, problemin karmaşıklığı arttıkça analitik yöntemlerin uygulanması zorlaşabilir. Bu noktada, özellikle elektriksel olarak büyük ve karmaşık problemleri daha etkili bir şekilde çözebilmek amacıyla sayısal yöntemlere yönelme ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Sayısal yöntemler, analitik yöntemlerin sınırlamalarını aşmak ve karmaşık problemleri daha rahat bir şekilde ele almak için geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında TLM (İletim Hattı Teorisi), FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi), MoM (Moment Metodu) ve FDTD (Zaman Alanında Sonlu Farklar Yöntemi) yöntemi bulunmaktadır.

Elektromanyetik dalga yayılımlarını, TLM yöntemini kullanarak ayrık bir şekilde modellemek mümkündür[27]. TLM yönteminin temel prensibi, birbirine bağlı geniş bir iletim hattı içindeki akım ve gerilimlerin etkileşimlerini analiz ederek, elektromanyetik alan ortamında elektrik ve manyetik alanların davranışı arasındaki benzerliği kurmaktır[28]. Zaman ve frekans alanında kullanılabilen bu yöntemde, alan geçişleri arasında kullanılan formüller karmaşıklığa sebep olabilir. Ayrıca, genişletilmiş düğümler arasındaki birim adımların birbirine olan uzaklıkları da yöntemin doğruluğunu etkileyebilir[29], [30].

Büyük yapıları modelleyerek yapı üzerindeki açıklıkların ekranlama etkinliği analizi çalışmalarında kullanılan bir diğer yöntem de momentler yöntemi (MoM)'dir [20]. Bu yöntemde, dikdörtgen geometriye sahip bir kutunun yüzeylerine yüzey akımları yerleştirilir. Yüzey akımları aracılığıyla Maxwell denklemleri kullanılarak elektromanyetik alan etkileşimleri integral formda ifade edilir ve matris formuna dönüştürülür. Elde edilen matrisler MoM yöntemi kullanılarak çözülür. Bu yöntem genellikle belirli frekans aralıklarında ve belirli geometriler için daha uygundur. Ancak frekans aralıkları genişledikçe, MoM için hesaplanması gereken matris boyutları artar ve bu durum hesaplama sürelerinin ciddi oranda artmasına sebep olur. Aynı zamanda, dar açıklıkların geometrisinin tasarımı ve zayıf iç alan hesaplamaları için oldukça küçük hücre boyutları gerektirir[31], [32].

Ekranlama etkinliği analizi için kullanılan sayısal yöntemlerden diğeri sonlu elemanlar yöntemi (FEM)'dir[33]. Bu yöntemde ele alınan problem küçük elemanlara ayrılarak, bu elemanların elektromanyetik ortamdaki davranışları modellenir. Sonlu elemanlar düğüm

noktalarında birbirlerine bağlanarak ayrıklaştırılan problemin şemasını oluşturur. Sonlu elemanlara ayrılan problemin analizinde, eleman sayısı ve büyüklüğü hesaplama hassasiyetini belirler. FEM kullanarak EE hesaplamalarında frekans bağımlılığı bir sınırlama olarak karşımıza çıkar; ayrıca FEM ile çözülmek istenen doğrusal olmayan problemlerin analizinde karmaşıklık artar ve hesaplama zorluğu oluşur[34], [35].

Sayısal yöntemler arasında Zaman Alanında Sonlu Farklar (FDTD)[36], [37] yöntemi hesaplama ve kullanım kolaylığı, geniş frekans aralığı, nesne ve ortam tanımlamaları gibi özellikleri dikkate alındığında metal muhafazaların EE analizi için kullanılan avantajlı bir uygulamadır. Literatürde geçen birçok sayısal yöntem arasında, FDTD yöntemi, metalik muhafazalar üzerinde ekranlama etkinliğini etkileyen açıklıkların, çeşitli boyutlarda ve sayılarda tasarımları yapılarak hesaplanması için en etkili yöntemlerden biridir[38]. Ancak, FDTD uzayının küçük hücre boyutları nedeniyle artan hesaplama süreleri bir sorun oluşturur. Küçük hücre boyutlarına sahip olan FDTD uzayı için, bu yöntemin getirdiği sınırlılıklardan biri olan Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) koşulu sağlanmalıdır[39]. CFL koşulu sağlanırken, problem türüne göre zaman adımları çok küçük olabilir ve bu durum hesaplama sürelerini önemli ölçüde artırabilir. Bu sorunu aşmak için daha ince alt ızgaralama [40], [41] yöntemi önerilerek FDTD uzayında ince ve kaba hücreleme birlikte kullanılmıştır. Ancak bu yöntem de, ilerleyen zaman adımlarında meydana gelen kararsızlık durumu sayısal hatalara yol açar[42]. Başka bir öneri olarak Hibrit Örtük-Açık FDTD (HIE-FDTD) yöntemi ince hücreleme nedeniyle artan problem hesaplama sürelerini azaltmak için kullanılan etkili bir yöntemdir. HIE-FDTD yönteminin zaman adımı büyüklüğü, tüm FDTD alanında kullanılarak ince ve kalın bölgelerde zaman senkronizasyonu sağlar. Bu yöntemde, problem uzayının ince hücreleri CFL kriterine bağlı olmadığından, hesaplama sürelerinde büyük artışlara neden olmaz. Üzerinde açıklık bulunan metal muhafazalar gibi, tüm problem hesaplama uzayının küçük hücrelere bölünmesine gerek olmayan uygulamalarda HIE-FDTD yöntemi son derece kullanışlıdır[43].

3. YÖNTEM

3.1. Zaman Alanında Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD)

Zamanda sonlu farklar (FDTD) yöntemi, metal muhafazalardaki çeşitli açıklıkların ekranlama etkinliğini hesaplamada yaygın olarak kullanılan bir sayısal uygulamadır. Bu yöntem, basit geometrilerden karmaşık sistemlere kadar geniş bir yelpazede analiz çalışmalarına olanak tanır.

FDTD yöntemi, Maxwell denklemlerinin zamana ve konuma bağlı çözümünü sağlar. Maxwell denklemleri, elektromanyetik dalgaların davranışını tanımlayan temel denklemlerdir. FDTD yöntemi, bu denklemleri sonlu farklar yaklaşımını kullanarak ayrıklaştırır. Bu yaklaşım, denklemlerdeki kısmi türevleri belirli bir ızgara üzerinde tanımlanmış sonlu farklar şeklinde ifade eder.

FDTD yöntemi ile metal muhafazalardaki ekranlama etkinliği analizi için aşağıdaki adımlar izlenerek problem hesaplaması gerçekleştirilir.

1- Muhafazanın geometrisi ve açıklık yapısı, bir ızgara üzerinde tanımlanır.

2- Maxwell denklemleri, bu ızgara üzerinde ayrıklaştırılır.

3- Ayrıklaştırılmış Maxwell denklemleri, sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılarak çözülür.

4- Elektrik ve manyetik alan değerlerinin zaman çözümü Fourier dönüşümü yapılarak frekans alanında ifade edilir.

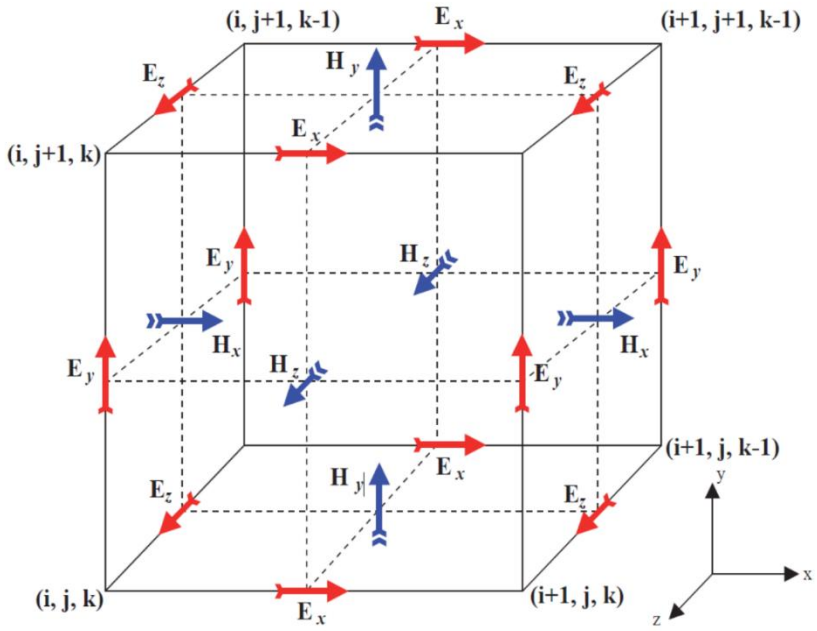
5- Frekans alanı çözümü, ekranlama etkinliği parametrelerini hesaplamak için kullanılır.

Maxwell denklemlerinin zamana ve konuma bağlı formları denklem [3.1] ve [3.2]'de verilmiştir. Burada $\vec{E}$, $\vec{H}$, μ_0,ε_0, σ sırasıyla elektrik alan vektörü, manyetik alan vektörü, boş uzayın manyetik geçirgenliği, boş uzayın dielektrik sabiti ve elektriksel iletkenlik olarak tanımlanır.

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \qquad [3.1]$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \qquad [3.2]$$

Maxwell denklemlerinin zamanda ve konumda ayrıklaştırılması, hesaplanan elektrik ve manyetik alan değerlerinin, malzemenin dielektrik ve manyetik parametreleri kullanılarak belirli konumlarda tanımlanmasını sağlar. Bu iki denklem, Şekil 3.1'de görülen FDTD uzayının birim Yee hücreleri üzerinde ayrıklaştırılır [44], [45].Yee hücresi, FDTD hesaplama uzayının temel bileşenidir. FDTD uzayında problem tanımlaması yapılırken, her nesne yeterli sayıda Yee hücresi ile tanımlanır.



Şekil 3.1 Birim Yee hücresi.

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, Yee hücresi üzerinde elektrik alan vektörleri (E_x, E_y, E_z) hücrenin kenarlarında tanımlanırken, manyetik alan vektörleri (H_x, H_y, H_z) ise hücre yüzeyinin ortasında tanımlanır. Alt indisleri (x, y, z), alan vektörlerinin yönünü belirtir. Her bir elektrik alan vektörü, dört adet manyetik alan vektörü ile çevrelenir. Benzer şekilde, birim hücrelerin art arda eklendiği düşünüldüğünde, her bir manyetik alan vektörü, dört adet elektrik alan vektörü ile çevrelenir. Şekil 3.1'de belirtilen i, j, k indisleri, Yee hücresinin uzaysal artışını ifade eder.

Maxwell eşitliklerinde yer alan elektrik ve manyetik alan vektörleri, FDTD uzayında üç boyutlu olarak ifade edilebilir. Bunun için [3.1] ve [3.2] eşitliklerinde kısmi türev

açılımları yapılarak kartezyen koordinat sistemine (*x*, *y*, *z*) uyarlandığında altı denklem elde edilmiş olur.

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_x}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x\right) \quad [3.3]$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_y}\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y\right) \quad [3.4]$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_z}\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_y}{\partial x} - \sigma E_z\right) \quad [3.5]$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_x}\left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y}\right) \quad [3.6]$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_x}\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z}\right) \quad [3.7]$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu_x}\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\right) \quad [3.8]$$

Elektrik ve manyetik alan vektörlerinin Yee hücresi üzerinde bulunduğu konumlardan dolayı hesaplama zamanları da farklılık göstermektedir. Bir Δt zaman adımı hesaplama süresinde elektrik alan bileşenleri tam sayı zaman adımlarında $(0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t \ldots)$ hesaplanırken, manyetik alan bileşenleri yarı tam sayı zaman adımlarında $(\frac{1}{2}\Delta t, \frac{3}{2}\Delta t, \frac{5}{2}\Delta t \ldots)$ hesaplanarak farklılık göstermektedir. Bir FDTD uzay alanında hesaplama yapılırken, elektrik ve manyetik alan bileşenleri sadece zaman dikkate alınarak değil, aynı anda konumları da dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Bu sebeple Kartezyen koordinat sisteminde [3.3], [3.4, [3.5], [3.6], [3.7], [3.8] denklemleri zamana ve konuma bağlı olarak üç boyut için tekrar düzenlenirse:

$$E_x^{n+1}(i,j,k) = \frac{(2\varepsilon_x(i,j,k) - \Delta t\sigma_x(i,j,k)}{(2\varepsilon_x(i,j,k) + \Delta t\sigma_x(i,j,k)} E_x^n(i,j,k) + \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_x(i,j,k) + \Delta t\sigma_x(i,j,k))\Delta y} \times \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j-1,k) \right] - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_x(i,j,k) + \Delta t\sigma_x(i,j,k))\Delta z} \times \left[H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k-1) \right] \quad [3.9]$$

$$E_y^{n+1}(i,j,k) = \frac{(2\varepsilon_y(i,j,k) - \Delta t\sigma_y(i,j,k)}{(2\varepsilon_y(i,j,k) + \Delta t\sigma_y(i,j,k)} E_y^n(i,j,k) + \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_y(i,j,k) + \Delta t\sigma_y(i,j,k))\Delta z} \times \left[H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k-1) \right] - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_y(i,j,k) + \Delta t\sigma_y(i,j,k))\Delta x} \times \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-1,j,k) \right] \quad [3.10]$$

$$E_z^{n+1}(i,j,k) = \frac{2\varepsilon_z(i,j,k) - \Delta t\sigma_z(i,j,k)}{2\varepsilon_z(i,j,k) + \Delta t\sigma_z(i,j,k)} E_z^n(i,j,k) + \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_z(i,j,k) + \Delta t\sigma_z(i,j,k))\Delta x} \times \left[H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-1,j,k) \right] - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_z(i,j,k) + \Delta t\sigma_z(i,j,k))\Delta y} \times \left[H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j-1,k) \right] \quad [3.11]$$

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = \frac{2\mu_x(i,j,k) - \Delta t\sigma_x(i,j,k)}{2\mu_x(i,j,k) + \Delta t\sigma_x(i,j,k)} H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) + \frac{2\Delta t}{\left(2\mu_x(i,j,k) + \Delta t\sigma_x(i,j,k)\right)\Delta z} \times \left[E_y^n(i,j,k+1) - E_y^n(i,j,k)\right] - \frac{2\Delta t}{\left(2\mu_x(i,j,k) + \Delta t\sigma_x(i,j,k)\right)\Delta y} \times \left[E_z^n(i,j+1,k) - E_z^n(i,j,k)\right] \quad [3.12]$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = \frac{2\mu_y(i,j,k) - \Delta t\sigma_y(i,j,k)}{2\mu_y(i,j,k) + \Delta t\sigma_y(i,j,k)} H_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) + \frac{2\Delta t}{\left(2\mu_y(i,j,k) + \Delta t\sigma_y(i,j,k)\right)\Delta x} \times \left[E_z^n(i+1,j,k) - E_z^n(i,j,k)\right] - \frac{2\Delta t}{\left(2\mu_y(i,j,k) + \Delta t\sigma_y(i,j,k)\right)\Delta z} \times \left[E_x^n(i,j,k+1) - E_x^n(i,j,k)\right] \quad [3.13]$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = \frac{2\mu_z(i,j,k) - \Delta t\sigma_z(i,j,k)}{2\mu_z(i,j,k) + \Delta t\sigma_z(i,j,k)} H_z^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) + \frac{2\Delta t}{\left(2\mu_z(i,j,k) + \Delta t\sigma_z(i,j,k)\right)\Delta y} \times \left[E_x^n(i,j+1,k) - E_x^n(i,j,k)\right] - \frac{2\Delta t}{\left(2\mu_z(i,j,k) + \Delta t\sigma_z(i,j,k)\right)\Delta x} \times \left[E_y^n(i+1,j,k) - E_y^n(i,j,k)\right] \quad [3.14]$$

Elde edilen denklemlerde sırasıyla, n zaman adımı indeksini μ_x, μ_y, μ_z malzemenin manyetik geçirgenliğini $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ malzemenin elektrik geçirgenliğini, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ malzemenin iletkenlik katsayısını belirtmektedir.

3.1.1. Sayısal kararlılık ve dağılma

FDTD uzayı içinde bulunun Yee hücreleri sırasıyla, *x, y, z* koordinatları boyunca $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ boyutlarında bölünürler. Hücre boyutunun gereğinden büyük seçilmesi, problem çözümünde ilerleyen adımlarda sayısal dağılma sorunları neden olur. Çalışılan maksimum frekans değeri dikkate alınarak seçilen hücre boyutlarının, gelen elektromanyetik dalga sinyalinin bir dalga boyunu örnekleyecek kadar küçük olması gerekir. Hücre boyutu seçilirken maksimum dalga boyu λ_{max} dikkate alınarak denklem [3.15]' e göre seçilmelidir.

$$\frac{\lambda_{max}}{10} \geq \Delta x, \Delta y, \Delta z \geq \frac{\lambda_{max}}{20} \qquad [3.15]$$

Elektrik ve manyetik alan değerleri hesaplanırken, bu hücre boyutları dikkate alınarak bir zaman hesaplaması yapılır. Her bir hücre için zaman adımı hesaplama süresi Δt, belli sınırlar dahilinde hesaplanır. Δt'nin belirlenmesi, problemin doğru çözümü için oldukça önemli bir kriterdir. Dalga boyu (λ) dikkate alındığında, dalganın her bir zaman diliminde hücre boyutunu aşmadan hücrede kalabilmesi amacıyla Δt'nin yeterli uzunlukta seçilmesi gerekir. Bu seçim için CFL kriteri uygulanmalı ve Δt zaman adımı şu şekilde hesaplanmalıdır:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \qquad [3.16]$$

3.1.2. Sınır koşulları

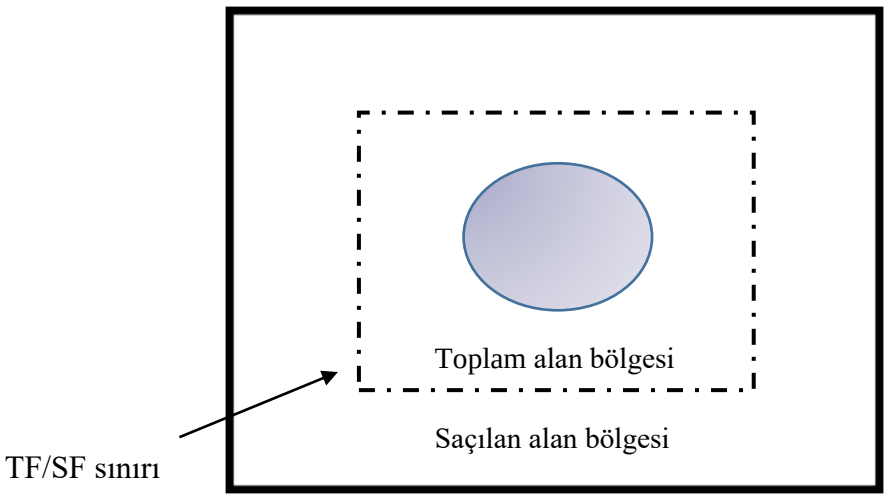
FDTD alanında açık uzayın tanımlamalarını yaparken, sonsuz büyüklükte bir alanı tanımlamak ve burada meydana gelen değişimleri sürekli olarak güncellemek mümkün değildir. Çünkü bu durum, gereğinden fazla işlem hacmi gerektirir. Bu nedenle FDTD alanı uygun koşullarda sınırlanır. Sınırlama işleminde FDTD alanının bittiği bölgeler önem arz etmektedir, çünkü sınır bölgelerinde meydana gelen küçük yansımalar bile tekrar FDTD hesap alanına dönerek bozulmalara yol açabilir. Bu yansımaların problem hesap alanına gelmeden sönümlenmesi gerekir ve bunun için soğurucu sınır koşulları gereklidir[46]. Zaman içinde çeşitli sınır koşulları geliştirilerek kullanıma sunulmuştur. Bunlardan bazılarını Mükemmel Elektrik İletken (PEC), Mükemmel Manyetik iletken (PMC), Mükemmel Eşleşen Katman (PML), Konvolüsyon Mükemmel Eşleşen Katman

(CPML) olarak sıralayabiliriz. CPML sınırı, FDTD uygulamaları içerisinde sıklıkla kullanılan sınır şartları arasında önemli bir yere sahiptir. Elektromanyetik dalganın FDTD uzayının duvarlarından yansıyarak tekrar problem alanına dönmesini engellemek amacıyla, ortam fark etmeksizin anizotropik, homojen, kayıplı, dağılmayan ortamlara uygulanabilirliği ile CPML emici sınır koşulu elektromanyetik dalgayı sönümlemede oldukça başarılıdır [47].

3.1.3. Kaynak seçimi

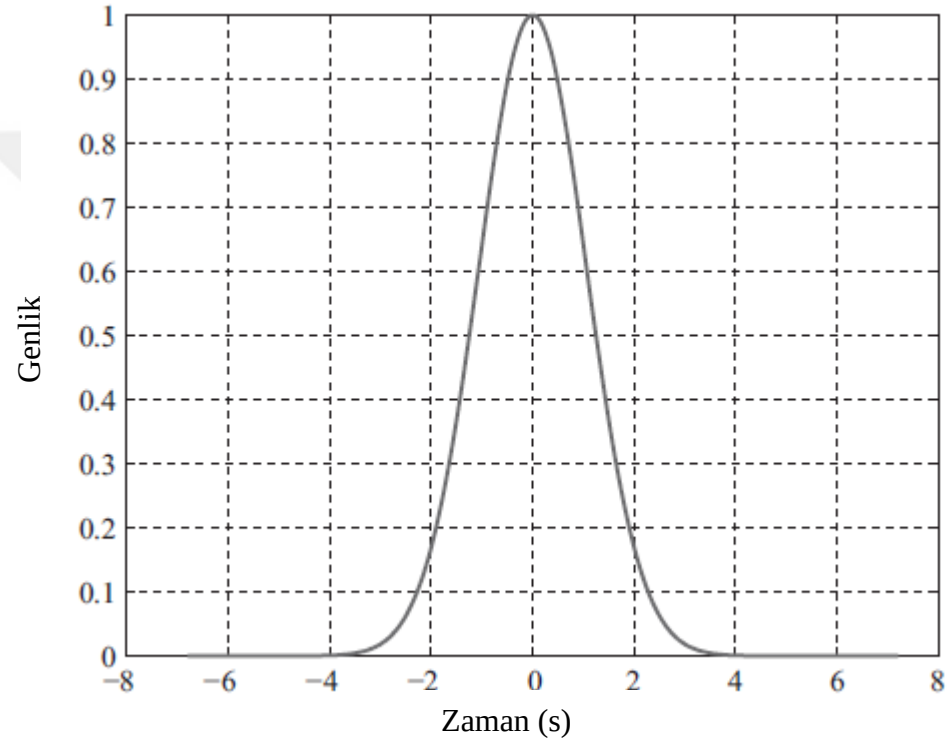
Elektromanyetik ekranlama, elektromanyetik kaynağın neden olduğu girişim dikkate alındığında yakın alan ve uzak alan bölgeleri olmak üzere iki bölgede gerçekleştirilebilir. EMI kaynağının kurban ile olan mesafesine göre bu bölgeler belirlenir. Uzak alan bölgesinde, kaynaktan yayılan elektromanyetik dalga düzlem dalga formundadır ve genliği, kurban ile kaynak arasındaki mesafeden ($\lambda/2\pi$) küçüktür. Eğer kaynak ile kurban arasındaki mesafe ($\lambda/2\pi$), kaynağın dalga boyundan küçükse, ekranlama yakın alan bölgesinde yapılır.

Yakın alan bölgesinde, elektrik ve manyetik alan bileşenleri ayrı ayrı hesaplanırken, uzak alan bölgesinde daha kolay bir çözüm olarak elektromanyetik düzlem dalga teorisi kullanılır [48]. Uzak alan bölge tanımlaması için kullanılan tekniklerden biri Taflove ve Umashankar'ın sunduğu toplam alan saçılan alan (TF/SF) tekniğidir[49]. Bu teknik, FDTD uygulamalarında büyük ve karmaşık problemlerin çözümü için oldukça yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Şekil 3.2'de, toplam alan ve saçılan alan bölgeleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2 TF/SF alan bölgelerinin tanımlandığı sınırları.

FDTD yöntemi ile ekranlama etkinliği benzetim çalışmaları yapılırken, incelenen problemin yapısına ve şekline bağlı olarak çeşitli elektromanyetik kaynak tanımlamaları yapılabilir. Problem analizi için uygun kaynak seçimi, sonuçların doğruluğunu etkiler. Yakın alan bölgesinde ekranlama etkinliği benzetimleri için tek bir frekansta çalışmak istenirse ve sürekli bir kaynağa ihtiyaç duyulursa, sinüzoidal kaynak kullanılabilir. Ancak daha geniş frekans spektrumunda ve uzak alan bölgesinde bir ekranlama etkinliği analizi için genellikle TF/SF sınırında bir Gauss düzlem dalgası tanımlaması yapılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilir.



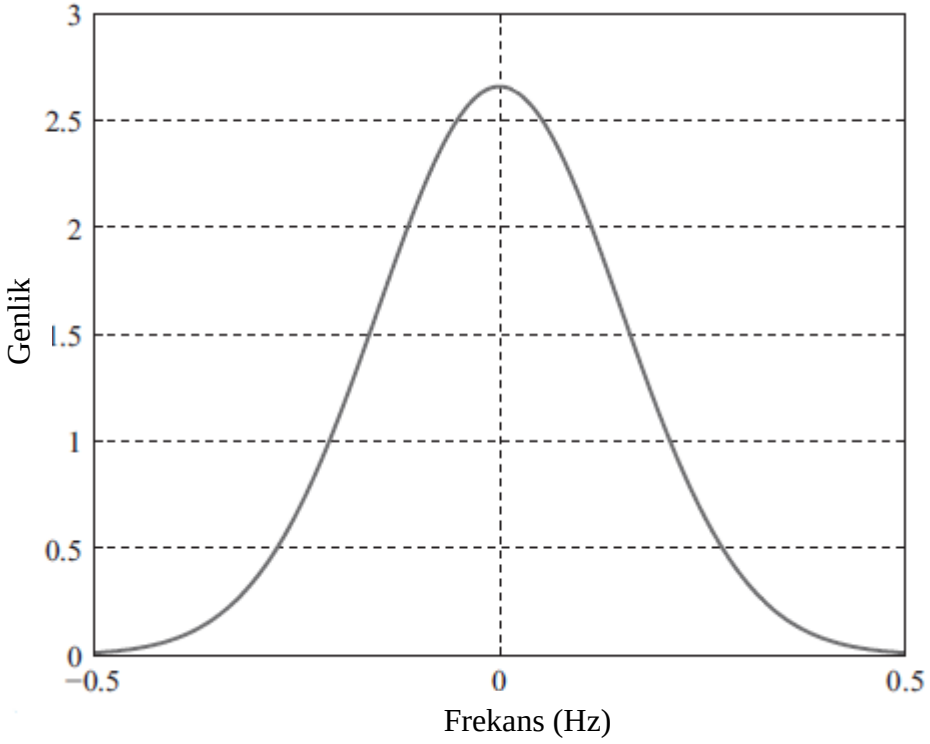
Şekil 3.3 Zamana karşılık Gauss dalgası.

$$f(t) = e^{-\frac{(t)^2}{\tau^2}} \qquad [3.17]$$

Örnek bir Gauss darbesi, Şekil 3.3'te görülmektedir. Gauss dalgasının, eşitlik [3.17]'de zamana bağlı olarak, matematiksel ifadesi verilmiştir. Burada τ parametresi Gauss dalga formunun zaman ve frekans alanında genişliğini belirler. Şekilde görüldüğü gibi, Gauss dalgasının zamana karşı en yüksek genliği sıfır noktasındadır. Ancak, FDTD uzayının başlangıç koşulları sıfır olduğu için, kaynak dalga formunun da sıfır zamanında başlangıç

değeri sıfır olmalıdır. Bunun için Gauss dalgası, zamanda kaydırılarak, hesaplama başlangıç zamanında değerinin sıfır veya ihmal edilebilecek kadar küçük olması sağlanır.

Gauss dalgasının Fourier dönüşümü yapılarak, çözülen problemin frekans cevabı elde edilebilir. Gauss darbesinin frekans alanındaki karşılığı da bir Gauss dalgasıdır[45].Şekil 3.4'te Gauss dalgasının, Fourier dönüşümünden sonra frekans alanındaki cevabı ve eşitlik [3.18]'de matematiksel ifadesi verilmiştir.



Şekil 3.4 Frekansa karşılık Gauss dalgası.

$$F(w) = \tau\sqrt{\pi}e^{-\frac{\tau^2}{t^2}} \qquad [3.18]$$

3.2. Hibrit Örtülü Açık Zaman Alanında Sonlu Fark Yöntemi (HIE-FDTD)

Geleneksel FDTD yöntemi, açıkça bir sonlu fark algoritmasına dayanır ve bu yöntem kullanıldığında CFL koşulunun karşılanması gerekir [4]. Bu yüzden FDTD yöntemi kullanılırken maksimum zaman adımı bir hücrenin minimum boyutu tarafından sınırlanır. FDTD yönteminde ince hücreleri doğru bir şekilde modellemek için adım aralığı, dalga boyuna kıyasla çok küçük olmalıdır. Hücre boyutlarını küçültmek, bazı problemlerde daha yüksek hassasiyet ve doğrulukta çözümler sunmakla birlikte uzun hesaplama sürelerine neden olur. Artan hücre sayısı daha çok bellek ve işlemci gücü gerektirir[50].

Pratikte birtakım problemler için (küçük açıklıklar, yama antenler, ince tabakalar, vb.) üç boyutta yapılan hesaplamalarda FDTD alanında, tüm yönlerde küçük hücre boyutlarına ihtiyaç duyulmayan problemler mevcuttur. Bir veya iki boyutta daha ince hücre boyutu gerektiren problemler için HIE-FDTD yöntemi sunulmuştur. Sunulan bu hibrit yöntemde, alan hesaplamaları için örtük açık fark denklemleri kullanılır ve zaman adımı boyutu, ince hücre boyutu sınırlamalarına bağlı olmaksızın belirlenir. Böylelikle CFL koşulu zayıflatılmış olur ve FDTD ile karşılaştırıldığında daha kısa sürede doğru sonuca ulaşılır. HIE-FDTD yöntemi ile çok ince hücre boyutu gerektiren problemler hesaplanabildiği için yüksek hesaplama verimliliği elde edilir[50], [51].

HIE-FDTD yöntemi için z yönündeki (Δz) hücre boyutu, Δx ve Δy'ye oranla oldukça küçük seçildiğinde, zaman adımı süresi ve elektromanyetik alan denklemleri şu şekilde elde edilir:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}}} \qquad [3.19]$$

HIE-FDTD yönteminde elektromanyetik alan hesaplama denklemleri:

$$E_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = E_z^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_z(i,j,k)\Delta y} \times [H_x^n(i,j,k) - H_x^n(i,j-1,k)] + \frac{\Delta t}{\varepsilon_z(i,j,k)\Delta x} \times \left[H_y^n(i-1,j,k) - (H_y^n(i,j,k)\right] \qquad [3.20]$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) - \frac{\Delta t}{\mu_z(i,j,k)\Delta x} \times \left[E_y^n(i+1,j,k) - E_y^n(i,j,k)\right] + \frac{\Delta t}{\mu_z(i,j,k)\Delta y} \times \left[E_x^n(i,j+1,k) - E_x^n(i,j,k)\right] \quad [3.21]$$

$$E_x^{n+1}(i,j,k) = E_x^n(i,j,k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_x(i,j,k)\Delta y} \times \left[H_z^n(i,j,k) - H_z^n(i,j-1,k)\right] + \frac{\Delta t}{2\varepsilon_x(i,j,k)\Delta z} \times \left[H_y^{n+1}(i,j,k) - H_y^{n+1}(i,j,k-1) + H_y^n(i,j,k) - H_y^n(i,j,k-1)\right] \quad [3.22]$$

$$E_y^{n+1}(i,j,k) = E_y^n(i,j,k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_y(i,j,k)\Delta x} \times \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-1,j,k)\right] + \frac{\Delta t}{2\varepsilon_y(i,j,k)\Delta z} \times \left[H_x^{n+1}(i,j,k) - H_x^{n+1}(i,j,k-1) + H_x^n(i,j,k) - H_x^n(i,j,k-1)\right] \quad [3.23]$$

$$H_x^{n+1}(i,j,k) = H_x^n(i,j,k) - \frac{\Delta t}{\mu_x(i,j,k)\Delta y} \times \left[E_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j+1,k) - E_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k)\right] + \frac{\Delta t}{2\mu_x(i,j,k)\Delta z} \times \left[E_y^{n+1}(i,j,k+1) - E_y^{n+1}(i,j,k) + E_y^n(i,j,k+1) - E_y^n(i,j,k)\right] \quad [3.24]$$

$$H_y^{n+1}(i,j,k) = H_y^n(i,j,k) - \frac{\Delta t}{\mu_y(i,j,k)\Delta x} \times \left[E_z^n(i+1,j,k) - E_z^n(i,j,k)\right] + \frac{\Delta t}{2\mu_y(i,j,k)\Delta z} \times \left[E_x^{n+1}(i,j,k+1) - E_x^{n+1}(i,j,k) + E_x^n(i,j,k+1) - E_x^n(i,j,k)\right] \quad [3.25]$$

HIE-FDTD yönteminde, geleneksel FDTD yönteminden farklı olarak $E_z \; ve \; H_z$ alanları $n+\frac{1}{2}, n+\frac{3}{2}, \ldots$ zaman adımlarında hesaplanırken, $E_{x,}E_y, H_x, H_y$ elektrik ve manyetik alan bileşenleri $n, n+1, n+2, \ldots$ tam sayı zaman adımlarında hesaplanmaktadır. Elektrik ve manyetik alanlar E_z ve H_z, eşitlik [3.20] ve [3.21]' de görüldüğü gibi açık bir şekilde hesaplanabilmektedir. Ancak, $E_x \; ve \; E_y$ elektrik alanlarının örtülü bir şekilde hesaplanması gerekir, çünkü eşitlik [3.22]'de görüldüğü gibi aynı zaman adımında henüz hesaplanmamış olan H_y^{n+1} alan değerine ihtiyacı vardır. Benzer şekilde, eşitlik [3.23]'de elektrik alan değerini hesaplamak için H_x^{n+1} alan değeri gereklidir. Örtülü hesaplama yapabilmek için eşitlik [3.25], eşitlik [3.22] içerisine, benzer şekilde eşitlik [3.24], eşitlik [3.23] içerisine yerleştirilerek LU faktorizasyonuna bağlı üç köşegenli matris çözümü yapılarak örtülü bir şekilde hesaplanır. Eşitlik [3.22] ve [3.25] belirtildiği gibi yeniden düzenlendiğinde;

$$
\begin{aligned}
-hie_{xx}(i,j,k) \times E_x^{n+1}(i,j,k+1) + [1 + 2 \times hie_{xx}(i,j,k)]E_x^{n+1}(i,j,k) \\
- hie_{xx}(i,j,k) \times E_x^{n+1}(i,j,k-1) \\
= E_x^n(i,j,k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_x(i,j,k)\Delta z} \times \left[H_y^n(i,j,k) - H_y^n(i,j,k-1)\right] \\
+ \frac{\Delta t}{\varepsilon_x(i,j,k)\Delta y} \times \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j-1,k)\right] \\
+ hie_{xx}(i,j,k) \\
\times [E_x^n(i,j,k+1) - 2 \times E_x^n(i,j,k) + E_x^n(i,j,k-1)] \\
- hie_{xz}(i,j,k) \\
\times \left[E_z^{n+\frac{1}{2}}(i+1,j,k+1) - E_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k+1)\right. \\
\left. - E_z^{n+\frac{1}{2}}(i+1,j,k) + E_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k)\right]
\end{aligned}
\qquad [3.26]
$$

Benzer şekilde eşitlik [3.24] ve [3.23] belirtildiği gibi düzenlendiğinde;

$$
\begin{aligned}
-hie_{yy}(i,j,k) \times E_y^{n+1}(i,j,k+1) + \left[1 + 2 \times hie_{yy}(i,j,k)\right] E_y^{n+1}(i,j,k) \\
- hie_{yy}(i,j,k) \times E_y^{n+1}(i,j,k-1) \\
= E_y^n(i,j,k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_y(i,j,k)\Delta z} \times [H_x^n(i,j,k) - H_x^n(i,j,k-1)] \\
+ \frac{\Delta t}{\varepsilon_y(i,j,k)\Delta x}\left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-1,j,k)\right] \\
+ hie_{yy}(i,j,k) \\
\times \left[E_y^n(i,j,k+1) - 2 \times E_y^n(i,j,k) + E_y^n(i,j,k-1)\right] \\
- hie_{yz}(i,j,k) \\
\times \left[E_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j+1,k+1) - E_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k+1)\right. \\
\left. - E_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j+1,k) + E_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k)\right]
\end{aligned}
\qquad [3.27]
$$

Burada;

$$hie_{xx}(i,j,k) = \frac{\Delta t^2}{4\varepsilon_x(i,j,k)\mu_y(i,j,k)(\Delta z)^2} \qquad [3.28]$$

$$hie_{xz}(i,j,k) = \frac{\Delta t^2}{2\varepsilon_x(i,j,k)\mu_y(i,j,k)\Delta x \Delta z} \qquad [3.29]$$

$$hie_{yy}(i,j,k) = \frac{\Delta t^2}{4\varepsilon_y(i,j,k)\mu_x(i,j,k)(\Delta z)^2} \qquad [3.30]$$

$$hie_{yz}(i,j,k) = \frac{\Delta t^2}{2\varepsilon_y(i,j,k)\mu_x(i,j,k)\Delta y \Delta z} \qquad [3.31]$$

olarak tanımlanır.

Eşitlik [3.26] ve [3.27]'de bilinenler eşitliğin bir tarafına, bilinmeyenler ise diğer tarafında yerleştirilerek düzenlenmiştir. Bilinmeyen E_x ve E_y elektrik alanlarını

hesaplamak için LU faktorizasyon işlemine göre matrisler düzenlenir ve tridiagonal matris kullanılarak hesaplama yapılır. Eşitlik [3.26]'nın hesaplanabilen katsayıları $(-hie_{xx}(i,j,k), (1+2\times hie_{xx}(i,j,k)), -hie_{xx}(i,j,k))$ sırasıyla üçgen matrisin alt köşegen, ana köşegen ve üst köşegen değerlerini oluşturur. Benzer şekilde aynı adımlar eşitlik [3.27] için de uygulanarak matris formu oluşturulur ve LU faktorizasyonu kullanılarak bilinmeyen alan değerleri örtülü bir şekilde hesaplanır. Tüm elektrik ve manyetik alan değeri hesaplamaları için FDTD alanının sınır etkilerini azaltmak amacıyla soğurucu özellikte konvolüsyon mükemmel uyumlu katman (CPML) kullanılmıştır.

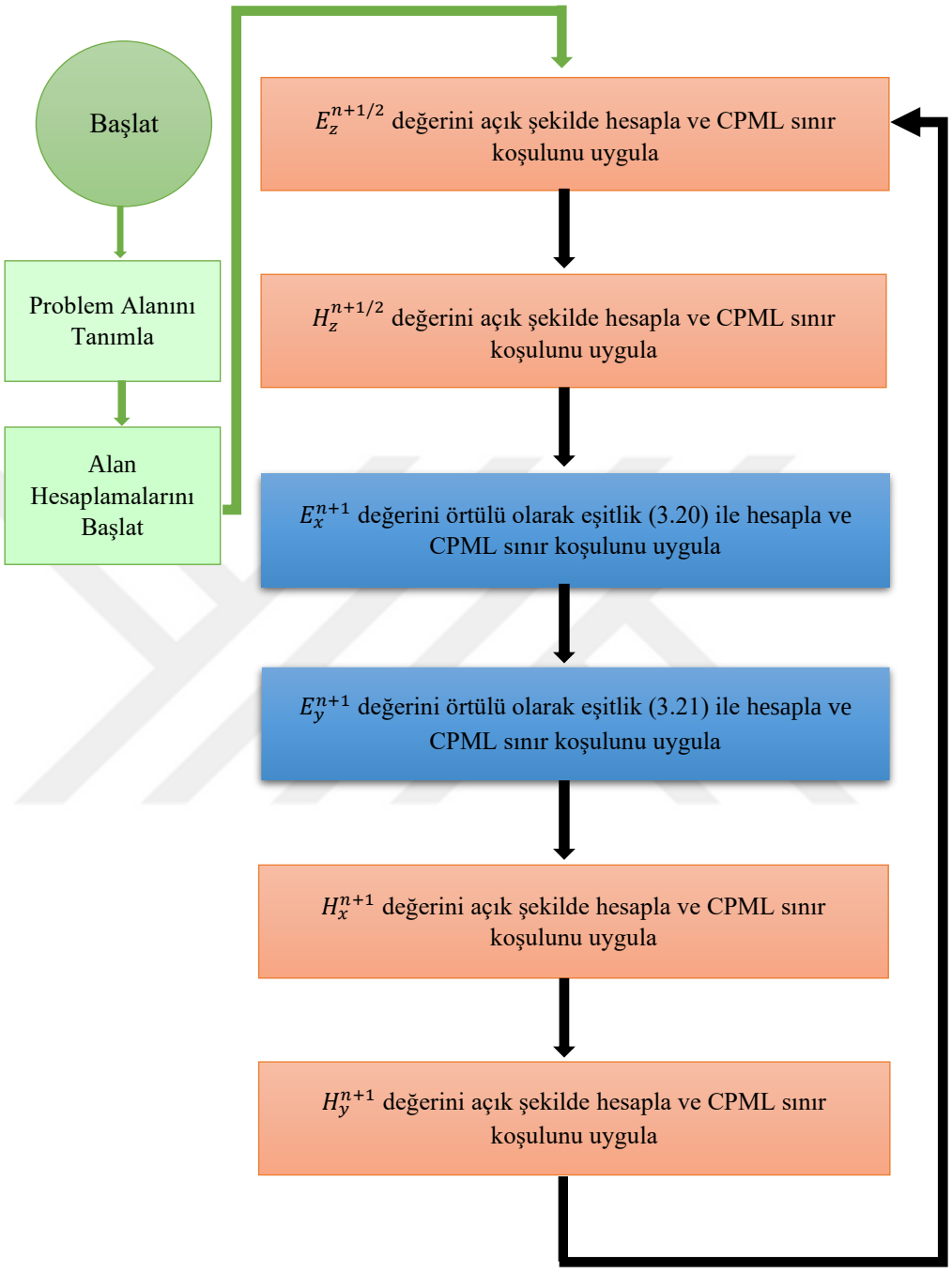
HIE-FDTD yöntemi kullanılarak hesaplanan metalik muhafazanın ekranlama etkinliği analizi için aşağıdaki adımlar izlenir:

1- Problem alanının tanımlanması için dielektrik sabiti (ε), manyetik geçirgenlik (μ), iletkenlik katsayısı (σ), zaman adımı (Δt), uygunluk koşulları (CFL kriteri), ağ geometrisi, elektrik ve manyetik alan değerleri, sınır koşulları gibi parametreler belirlenir.

2- Elektrik ve manyetik alan hesaplamaları ilk zaman adımında $(n+\frac{1}{2})$ başlatılır. Problemde metalik muhafazanın ince açıklık bulunan yüzü *z* yönünde seçilirse, alan hesaplamaları yapılırken *z* yönündeki elektrik ve manyetik alan parametreleri ilk zaman adımında açık bir şekilde hesaplanır. Daha sonra *x* ve *y* yönündeki elektrik alan değerleri $n+1$ zaman adımında örtük bir şekilde hesaplanır. Örtük hesaplama, $n+\frac{1}{2}$ zaman adımında hesaplanan elektrik ve manyetik alan değerlerini kullanarak LU faktörizasyonu ile gerçekleştirilir. Aynı zaman adımında *x* ve *y* yönündeki manyetik alan parametreleri açık bir şekilde doğrudan hesaplanır. Her alan hesaplaması adımında CPML soğurucu sınır koşulu, elektromanyetik dalganın FDTD uzayının duvarlarından yansıyarak problem alanına dönmesini engellemek amacıyla uygulanır.

3- Alan güncellemesi adımları, belirlenen toplam zaman adımı tamamlanana kadar sürekli olarak her adımda yinelenir.

4- Hesaplanan alan değerleri için Fourier dönüşümü yapılarak frekans alanı cevabı elde edilir ve EE parametresi, frekansa karşılık *dB* cinsinden ifade edilir. HIE-FDTD yöntemi için Şekil 3.5'te bir akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.5 HIE-FDTD yöntemi akış şeması.

3.2.1. LU ayrıştırması

LU ayrıştırması, lineer denklem çözümleri için kullanılan yöntemlerden biridir. HIE-FDTD yöntemi içinde, LU ayrıştırması üç köşegenli matris formu için uygulanır.

$$A=\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} \\ 0 & 0 & \dots & a_n & b_n \end{bmatrix}$$

Verilen A matrisinde, $b_1, \dots, b_n$ katsayıları bu matrisin ana diyagonalini oluşturur. Alt diyagonal katsayıları $a_2, a_3, \dots, a_n$ ve üst diyagonal katsayıları $c_1, \dots, c_n$ olarak ifade edilir. Üç diyagonalli bir matriste, ana diyagonal, üst diyagonal ve alt diyagonal katsayıları dışında bütün değerler sıfırdır. Üç diyagonalli bir matris için LU ayrıştırması şu şekilde uygulanır;

$$A=LU \qquad [3.32]$$

$$L=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ l_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & l_2 & 1 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & l_n & 1 \end{bmatrix} \quad U=\begin{bmatrix} v_1 & c_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & v_2 & c_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & \ddots & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & c_{n-1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & v_n \end{bmatrix}$$

L ve U matrislerini belirlerken şu adımlar uygulanır;

$b_1 = v_1 \;\Rightarrow\; v_1 = b_1$

$a_k = l_k v_{k-1} \Rightarrow l_k = a_k / v_{k-1}$

$b_k = l_k c_{k-1} + v_k \Rightarrow v_k = b_k - l_k c_{k-1}$ k=2, …n

LU ayrışımı yapılabilen matris için sistem çözümü yapılarak bilinmeyen değerler bulunabilir.

$Ax = f$ ya da $LUx = f$ olarak ifade edilir.

İki tane üçgen lineer matris sistemini çözmek için;

$Ly = f$ olursa $y = Ux$ olarak iki sistem şeklinde ayrılabilir. İlk olarak $Ly = f$ denklem sistemi çözülür, daha sonra bu çözüm yerine konularak Ux sisteminde x vektörü bulunur.

$Ly = f$ denklem sistemini çözmek için;

$y_1 = f_1$

$l_k y_{k-1} + y_k = f_k \Rightarrow y_k = f_k - l_k y_{k-1}$ k=2, …n

$Ux = y$ denklem sistemini çözmek için;

$v_n x_n = y_n \Rightarrow x_n = y_n / v_n$

$v_k x_k + c_k x_{k+1} = y_k \Rightarrow x_k = (y_k - c_k x_{k+1})/v_k$ k=2, …n

olur[52].

4. BULGULAR VE SONUÇLAR

Bu bölümde, metalik muhafazaların ekranlama etkinliği analizi için HIE-FDTD yöntemi kullanılarak MATLAB programlama dili üzerinde benzetimler yapılacaktır. Benzetim çalışmaları için dikdörtgen muhafaza kullanılacaktır. Bu muhafazanın kenar uzunlukları a (genişlik), b (derinlik) ve c (yükseklik) olmak üzere muhafazanın rezonans frekansı analitik olarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$F_{(m,n,p)} = \frac{c_o}{2}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \qquad [4.33]$$

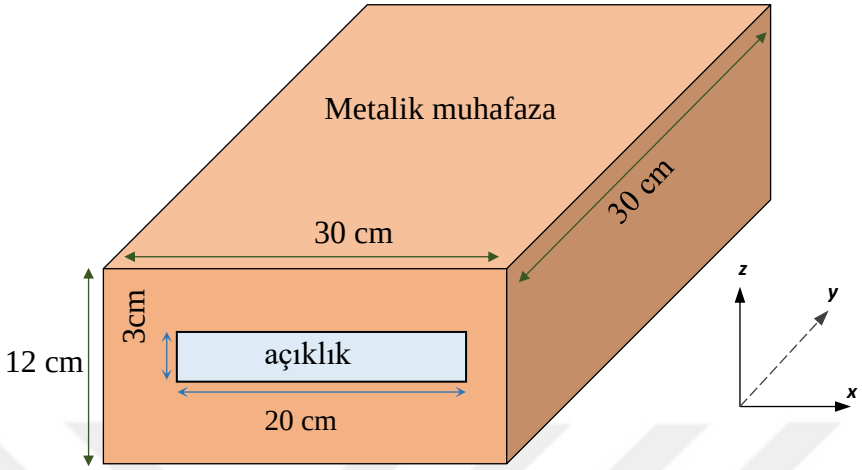
Burada c_o, elektromanyetik dalganın boş uzaydaki hızını temsil eder ve m, n, p tamsayıları, muhafazanın rezonans modlarını belirleyen mod tamsayılarıdır. Denklem [4.33] 'de görüldüğü gibi, metalik muhafazanın rezonans modunun frekansı, muhafaza boyutları ile ters orantılıdır.

4.1. FDTD Yöntemi ve HIE-FDTD Yönteminin Uyumluluğu

Benzetim çalışmalarında kullanılan dikdörtgen muhafazanın a, b, c uzunlukları sırasıyla 30cm, 30cm ve 12cm olarak alınmıştır. Muhafazanın tasarımı, en küçük boyutu z yönünde olacak şekilde yapıldığı için en düşük rezonans modları p=0 olan modlar olacaktır. Bu yüzden muhafazanın en düşük rezonans frekansına TM_{110} modu etkili olur. Tamamen kapalı 30x30x12cm^3 boyutlarında dikdörtgen muhafaza için en düşük rezonans frekansı 707 MHz olarak hesaplanır[36].

Kutu üzerinde ilk olarak 20x3cm^2 tek açıklık bölgesi tanımlanmış ve geleneksel FDTD ile HIE-FDTD yöntemleri kullanılarak yapılan benzetim sonuçları sunulmuştur. Her iki yöntemin de oldukça iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Benzetim çalışmaları için kullanılan dikdörtgen metalik muhafaza Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Metalik muhafazanın kenarları sıfır kalınlıklı ve mükemmel iletken tabaka olarak tasarlanmıştır. Muhafazanın diğer iki yöne göre çok ince hücre boyutuna sahip olduğu yüzey z ekseni boyuncadır ve muhafaza üzerinde z yönünde 20x3cm^2 alana sahip tek açıklık bulunmaktadır. Problem uzayının dağılmayan, doğrusal ve izotropik kayıpsız bir ortam olduğu varsayılmaktadır. Dikdörtgen metalik muhafaza, θ=90° ve ϕ=90° açılarında z polarizasyonlu Gauss dalgası

gönderilerek hem FDTD ile hem de HIE-FDTD yöntemleri ile incelenir. Ekranlama etkinliği 0.1-1 GHz frekans aralığında gözlemlenmektedir. Benzetim sırasında 3B problem uzayı, 2,5x3x0,5cm^3 boyutlarında hücrelere bölünmüştür.



Şekil 4.1 Dikdörtgen metalik ekranlama muhafazası.

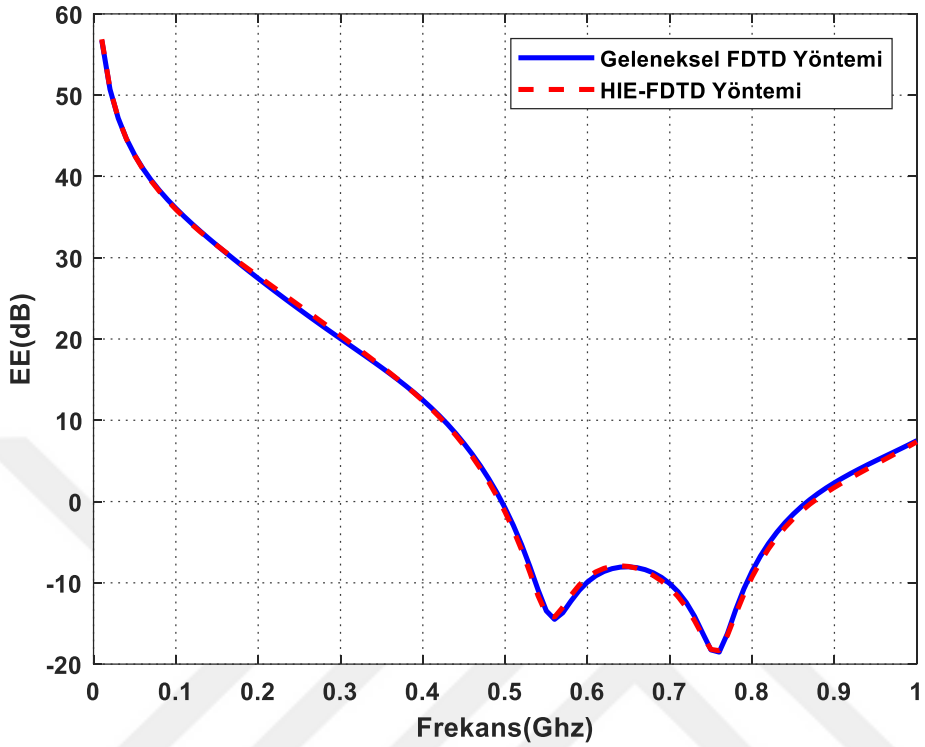
Her yönden 15 hücre hava boşluğu ve 10 hücre kalınlığında konvolüsyon mükemmel uyumlu katman (CPML), soğurucu sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Metalik muhafazanın merkez koordinatlarında (x=15cm, y=15cm ve z=6cm) bir P örnekleme noktası belirlenerek EE değerleri hesaplanmıştır. Problem hesaplama uzayının bir hücresi dx=2,5cm, dy=3cm, dz=0,25cm boyutlarından oluşmaktadır. Aynı zamanda, geleneksel FDTD ve HIE-FDTD yöntemi ile yapılan benzetimlerin zaman adımı ve hesaplama süreleri aşağıdaki karşılaştırma tablosunda verilmiştir.

Yöntem	**Hesaplama Zamanı (dk.)**	**Zaman Adımı Boyutu Δt (ps)**	**Zaman Adımı Sayısı**
FDTD	33.5	7.4424	15000
HIE-FDTD	12.4	57.6565	1937

Tablo 1 FDTD ve HIE-FDTD yöntemi ile hesaplama süresi karşılaştırma.

Tabloda verilen hesaplama zamanı, FDTD yöntemi ile yapılan çalışmalarda HIE-FDTD yöntemine göre yaklaşık %300 daha uzun sürede sonuçlanmıştır. Her iki yöntemle de aynı sonuca ulaşılmış olmasına rağmen, hesaplama zamanları arasındaki yaklaşık

%300'lük zaman farkı, HIE- FDTD yönteminin sadece doğruluğunu değil, aynı zamanda daha hızlı bir yöntem olduğunu da ortaya koymaktadır.

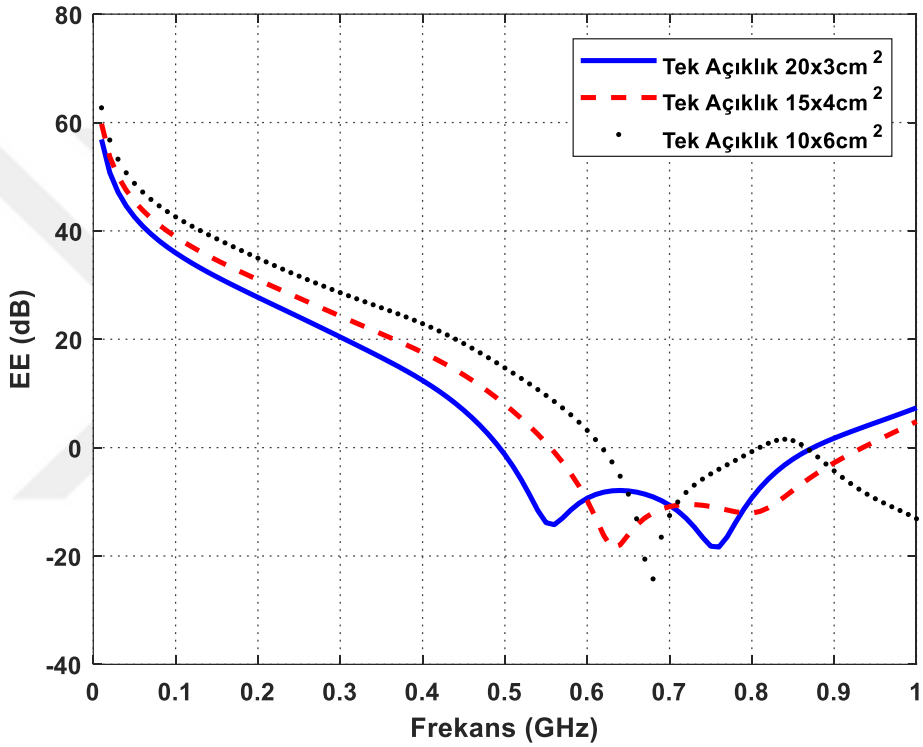


Şekil 4.2 Geleneksel FDTD ve HIE-FDTD yöntemi ile tek açıklıklı metal muhafazanın ekranlama etkinliği benzetim sonuçları

HIE-FDTD yönteminin doğruluğunu ispatlamak amacıyla geleneksel FDTD ve HIE-FDTD yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar, Şekil 4.2'de görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. 20x3cm^2 boyutunda tek açıklık ile EE hesaplaması her iki yöntemle yapılmış ve karşılaştırma sonucuna bakıldığında, geleneksel FDTD ve HIE-FDTD yöntemleri ile yapılan benzetim sonuçlarının tutarlı ve uyumlu olduğu görülmüştür.

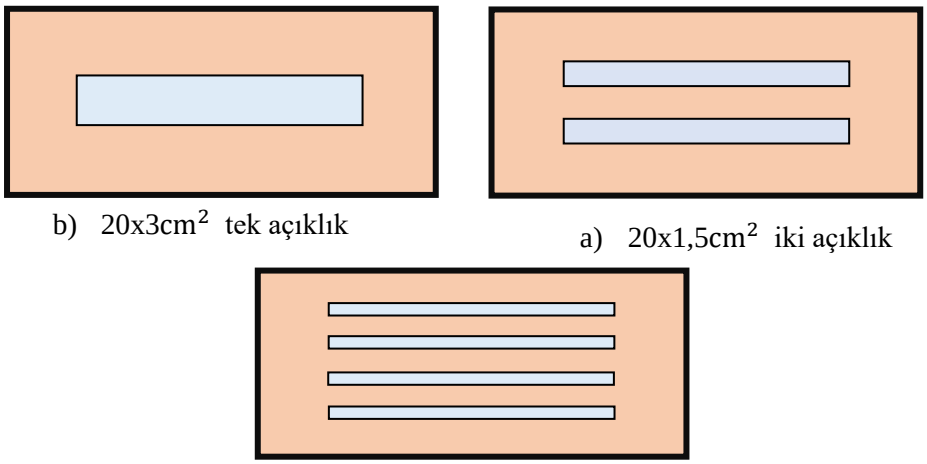
4.2. Farklı Boyutlarda Tek Açıklığın EE Üzerinde Etkisi

Farklı boyutlardaki açıklıkların z yüzeyinde bulunduğu metal muhafaza üzerinde, HIE-FDTD yöntemi kullanılarak ekranlama etkinliği analizi gerçekleştirilmiştir. Açıklıkların sırasıyla 20x3cm^2, 15x4cm^2 ve 10x6cm^2 olduğu göz önüne alındığında, Şekil 4.3'te görüleceği üzere, ekranlama etkinliğinin rezonans bölgesi dışında açıklık alanı sabit kalsa da açıklığın daralmasıyla arttığı görülmüştür. Açıklığın daralması ile elektromanyetik dalganın ekran içerisine nüfuz etmesi azaltılarak koruma etkisi iyileştirilmiştir.



Şekil 4.3 HIE-FDTD yöntemi ile metalik muhafaza üzerinde farklı boyutlarda tek açıklık ile EE'nin incelenmesi.

4.3. Farklı Boyutlarda Çoklu Açıklığın EE Üzerinde Etkisi

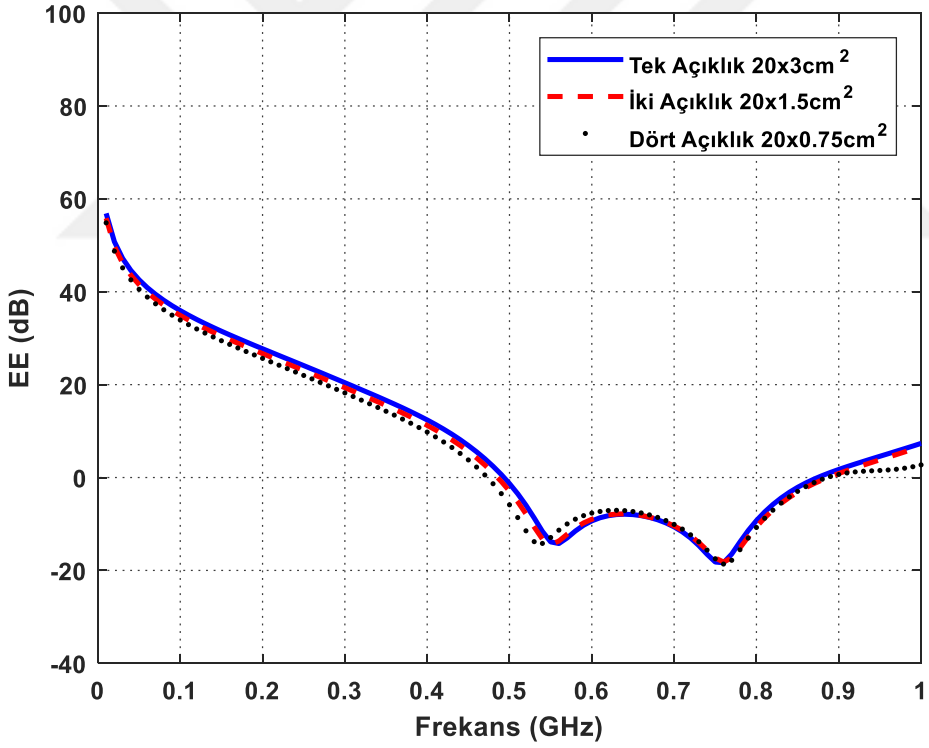


b) 20x3cm^2 tek açıklık

a) 20x1,5cm^2 iki açıklık

c) 20x0,75cm^2 dört açıklık

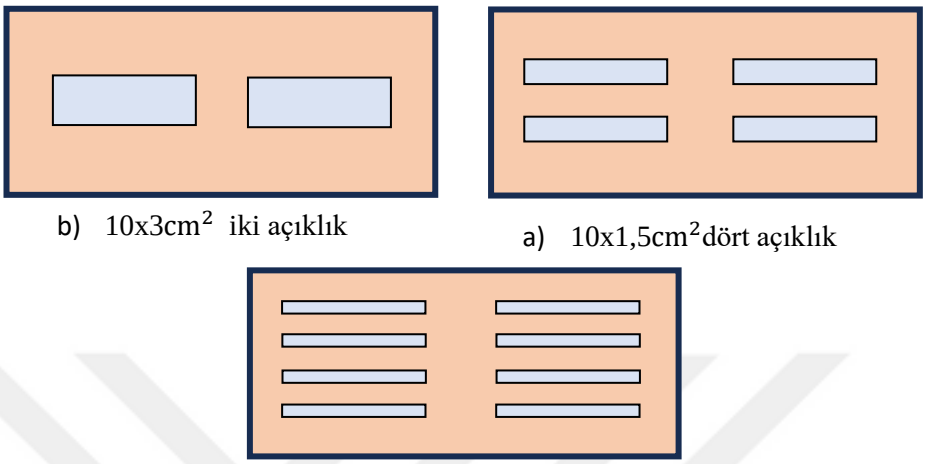
Şekil 4.4 Çoklu açıklıklara sahip metalik muhafazanın geometrik şekilleri.



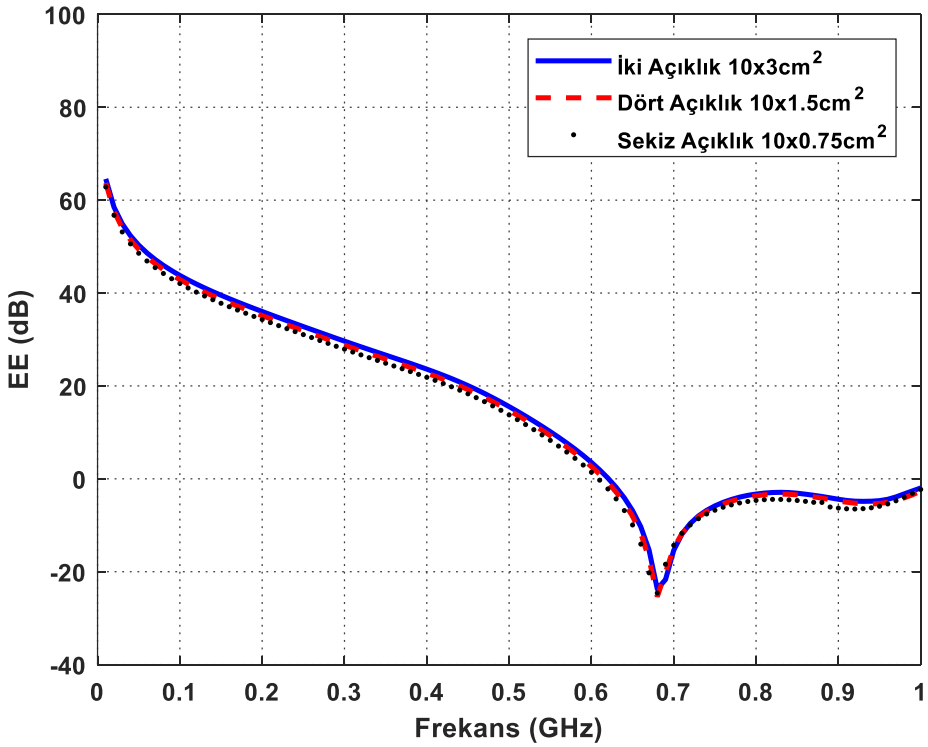
Şekil 4.5 Çoklu açıklıklara sahip metalik muhafazanın EE benzetimi sonuçları.

Ekranlama etkinliğini daha fazla gözlemleyebilmek için 20x3cm^2 alana sahip tek açıklık, metalik muhafazanın dikey yönünde farklı sayıda ve boyutta açıklıklara, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi bölünmüştür. Yapılan benzetim sonuçları, açıklık sayısı arttıkça

ekranlama etkinliği değerinin çok fazla değişmediğini göstermektedir. Açıklık sayısı artsa da, muhafaza üzerindeki toplam alan tek bir açıklığın alanına eşit olduğu için ekranlama verimliliğinde belirgin bir artış gözlemlenmemiştir. Her üç durumda da toplam alan $60cm^2$'dir. Çalışma sonuçları Şekil 4.5'te sunulmuştur.



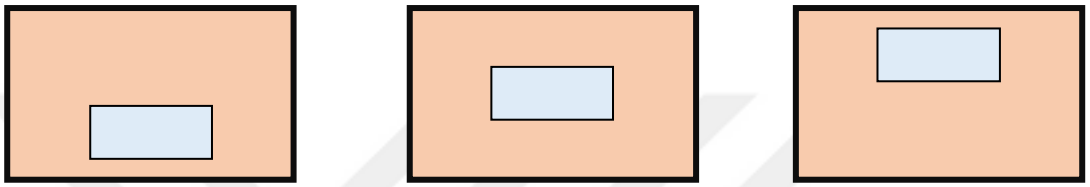
Şekil 4.6 Çoklu açıklıklara sahip metalik muhafazanın geometrik şekilleri.



Şekil 4.7 Çoklu açıklıklara sahip metalik muhafazanın EE benzetimi sonuçları.

Önceki çalışmaya benzer bir şekilde muhafaza üzerindeki açıklık sayısı ve boyutları hem yatay hem de dikey eksende, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi farklı şekillerde tasarlanarak analiz tekrarlanmıştır. Çalışma sonuçları Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, açıklık sayısı artsa da, açıklıkların toplam alanı iki açıklığın toplam alanına eşit olduğu için ekranlama etkinliğinde önemli bir değişme olmamıştır. Çalışma sonuçlarından anlaşılacağı üzere, metal muhafazanın ekranlama etkinliği açıklık sayısından etkilenmemektedir.

4.4. Açıklığın Farklı Bölgelerde Konumlandırılmasının EE Üzerinde Etkisi;

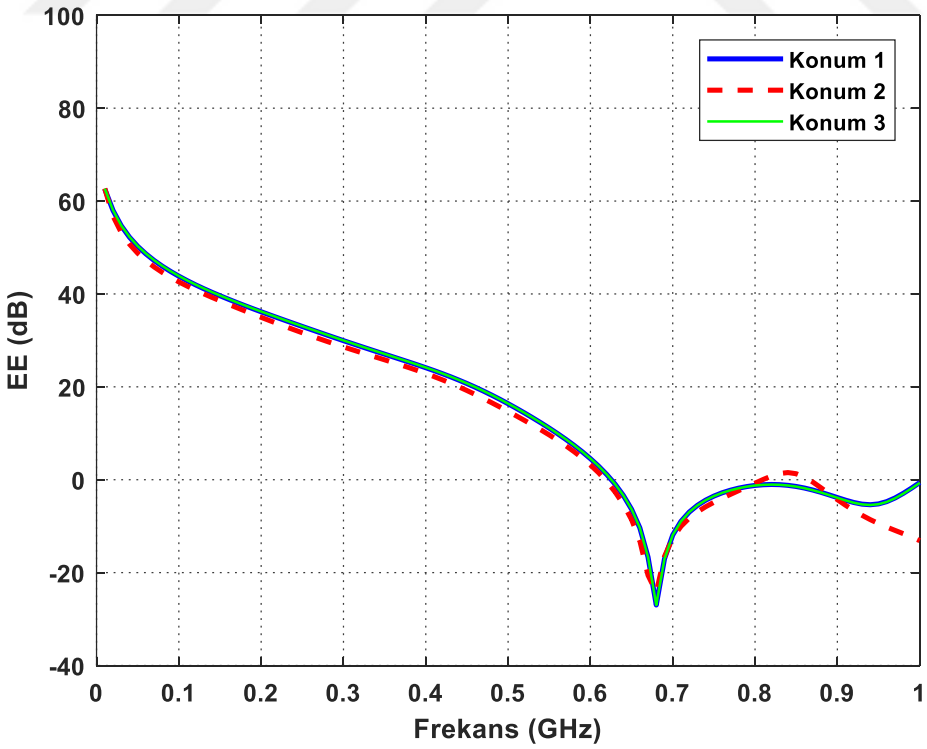


c) Konum 1: Açıklık alt kenarda

b) Konum 2: Açıklık ortada

a) Konum 3: Açıklık üst kenarda

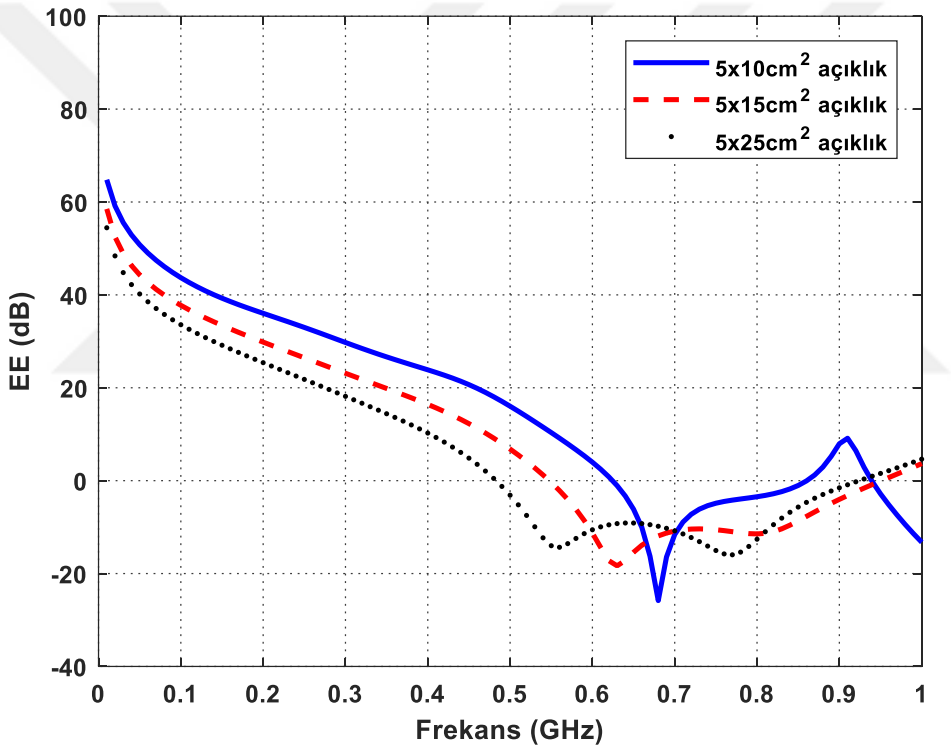
Şekil 4.8 Metal muhafaza üzerinde 10x6cm^2 boyutundaki tek açıklığın tanımlandığı konumlar.



Şekil 4.9 Farklı konumlarda tanımlanan açıklığın EE üzerindeki değişimi.

Açıklık konumunun EE üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 10x6cm^2'lik açıklık alanı Şekil 4.8'de olduğu gibi yatay olarak metal kutu üzerinde üç farklı konumda yerleştirilmiştir. Şekil 4.9'da benzetim sonuçları verilmiştir. EE değerleri karşılaştırıldığında en kötü durum olarak açıklığın metal kutunun ortasına yerleştirildiği durumdur. EE değeri rezonans frekansına kadar açıklığın alt veya üst kenarda olması ile karşılaştırıldığında, açıklık orta bölgedeyken daha düşük çıkmıştır. Sonuç olarak, kenar köşelerde bulunan açıklıkların EE değerlerinin, orta bölgede bulunan açıklığa göre daha verimli olduğu söylenebilir.

4.5. Açıklık Genişliğinin EE Üzerinde Etkisi

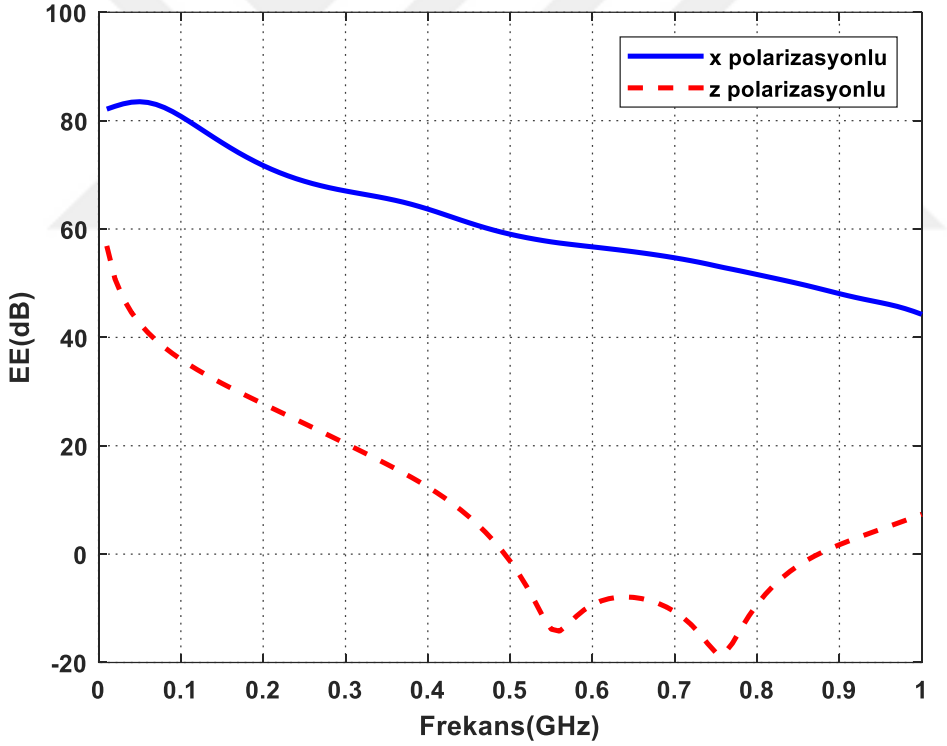


Şekil 4.10 Farklı açıklık genişliğinin EE üzerindeki etkisi.

Açıklık genişliğinin metalik muhafazanın EE değerindeki değişimlerini incelemek amacıyla, sırasıyla 5x10cm^2, 5x15cm^2, 5x25cm^2 boyutlara sahip 3 adet tek açıklığın ekranlama etkinliği analiz edilmiştir. Açıklık genişliğinin azaldıkça, elektromanyetik dalganın içeriye nüfuz etmesi zorlaşacağından dolayı ekranlama verimliliğinin artması beklenir. Şekil 4.10'da gösterilen frekansa karşı ekranlama etkinliği değerlerinde, açıklık genişliğinin arttıkça rezonans bölgesinin aşağı kaydığı ve aynı zamanda koruma değerinin düştüğü açıkça görülmektedir.

4.6. Farklı Polarizasyon Yönünün EE Üzerinde Etkisi

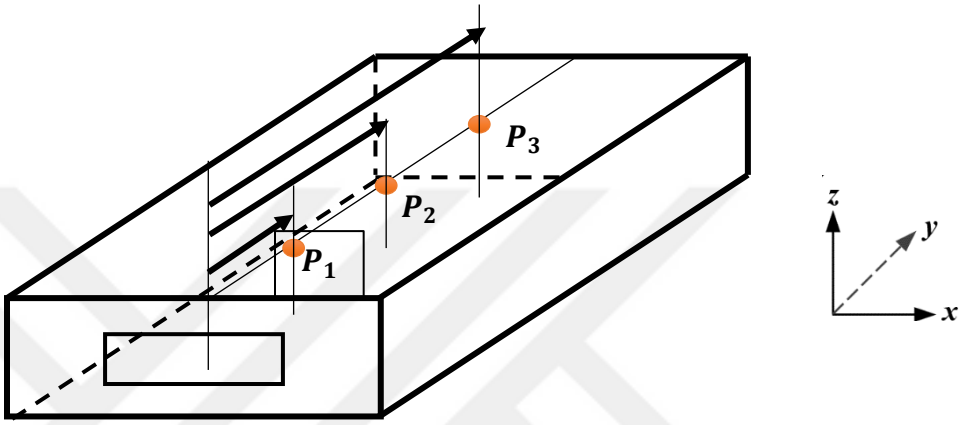
Farklı polarizasyonlarda gelen elektromanyetik dalganın dikdörtgen metalik muhafaza üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, üzerinde 20x3cm^2 alana sahip tek açıklık bulunan muhafaza için *x* ve *y* polarizasyonlu gelen dalganın ekranlama etkinliği benzetim çalışması yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.11'de sunulmuştur. Gelen dalga polarizasyonunun, açıklığın geniş kenarına dik olarak geldiği durumda ekranlama verimliliği diğer duruma göre düşük görünmektedir. Polarizasyon yönü *x* olarak belirlenip elektromanyetik dalga metalik kutu üzerine yönlendirildiğinde, EE değerlerinin oldukça yüksek olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Polarizasyon yönünün değişmesi, elektrik alanın muhafaza içerisine nüfuzunda azalmaya sebep olmuş, dolayısıyla ekranlama verimliliğinde artış gözlemlenmiştir.



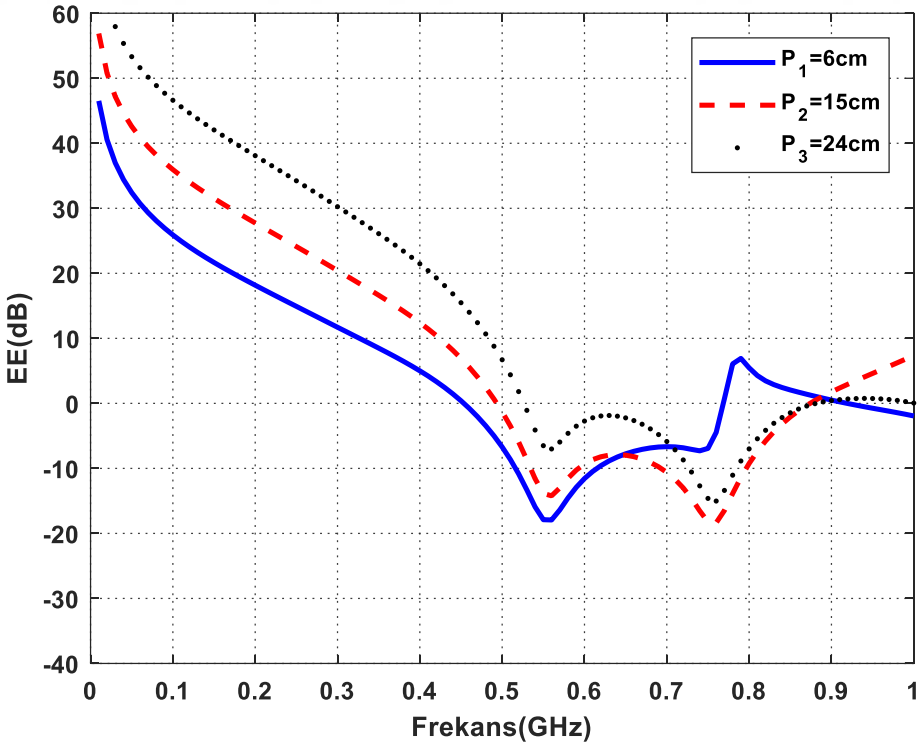
Şekil 4.11 Gelen dalganın farklı polarizasyonlarda olmasının EE üzerindeki etkisi.

4.7. Farklı Gözlem Noktalarının EE Üzerinde Etkisi

Metalik muhafazanın ekranlama etkinliği değerini ölçmek için, x=15cm, y=15cm ve z=6cm koordinatlarında bulunan P gözlem noktasının konumu y yönünde değiştirilmiştir. P_1=6cm, P_2=15cm, P_3=24cm olarak üç farklı P konumu Şekil 4.12'deki gibi belirlenmiştir. Şekil 4.13'de benzetim sonuçları sunulmuştur. 20x3cm^{2}açıklığa sahip metalik muhafazanın EE, gözlem noktasının açıklığa yaklaştıkça azaldığı gözlem noktasının açıklıktan uzaklaştıkça arttığı görülmüştür.

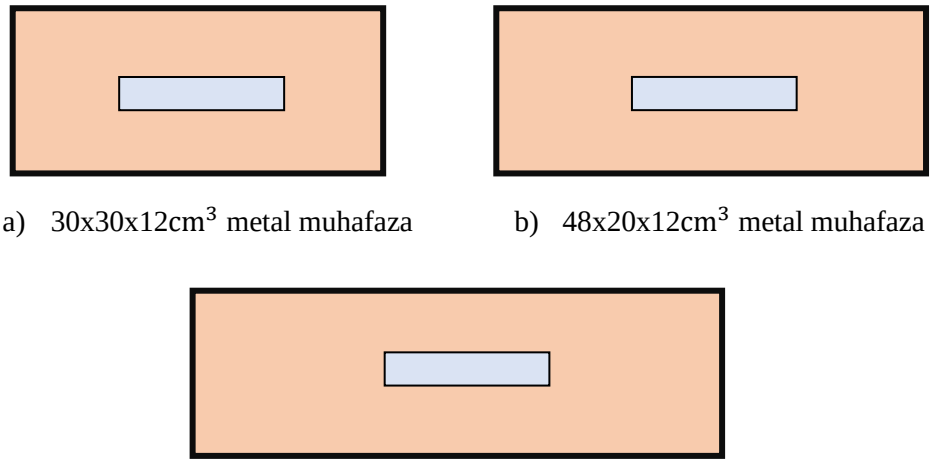


Şekil 4.12 Gözlem noktalarının metal muhafaza üzerindeki konumları



Şekil 4.13 Gözlem noktası z yönünde üç farklı konumda iken ekranlama etkinliği.

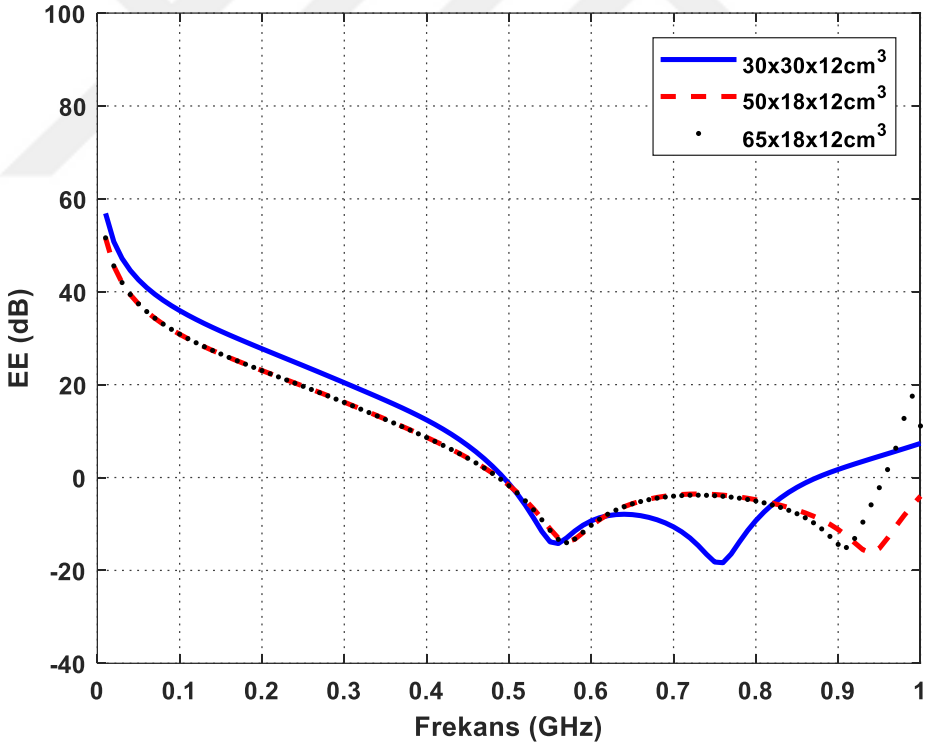
4.8. Kutu Boyutunun EE Üzerinde Etkisi



a) 30x30x12cm^3 metal muhafaza b) 48x20x12cm^3 metal muhafaza

c) 60x20x12cm^3 metal

Şekil 4.14 Üzerinde 20x3cm^2 tek açıklık bulunan farklı boyutlarda muhafazanın geometrik şekilleri.



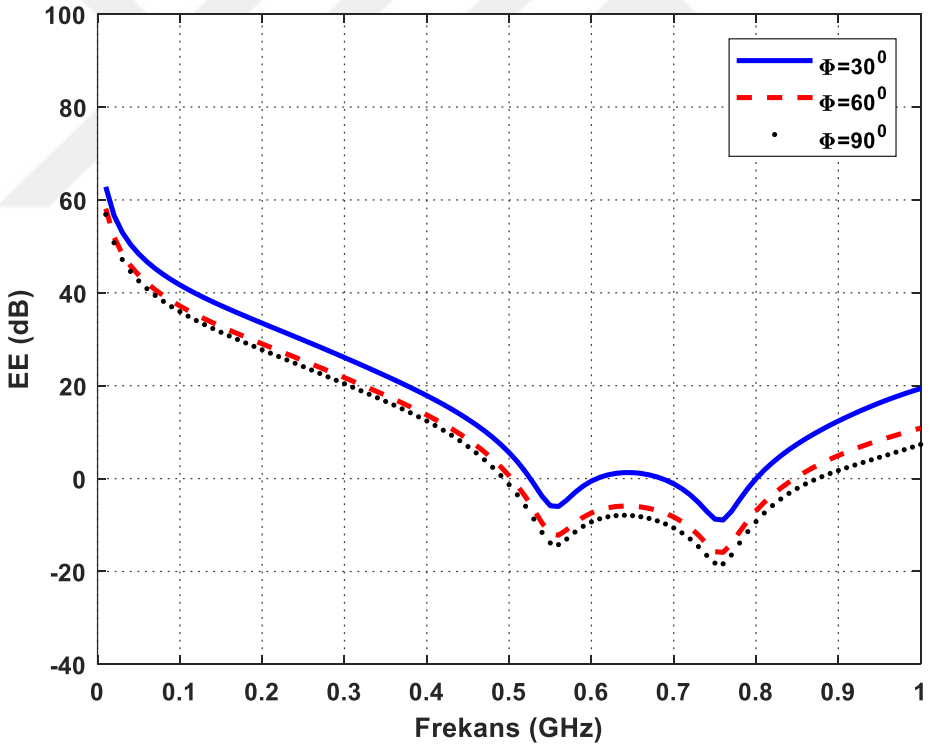
Şekil 4.15 Farklı boyutlarda metalik muhafaza kutusunun EE üzerindeki etkisi.

Metal muhafaza boyutlarının ekranlama verimliliği üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 3 farklı muhafaza boyutu tanımlanmıştır. Muhafaza üzerindeki 20x3cm^2 açıklık her kutu üzerinde orta bölgede olacak şekilde Şekil 4.14'de olduğu gibi yerleştirildi.

Analiz sonuçları Şekil 4.15'te sunulmuştur. Üç muhafaza da şekilde görüldüğü gibi iki rezonans değerine sahiptir. İlk rezonans tüm muhafazalarda yaklaşık aynı yerde oluşsa da kutu boyutunun büyümesiyle ikinci rezonans değeri yukarı doğru kaymıştır ve rezonans bölgesi kutu boyutlarıyla orantılı olarak genişlemiştir.

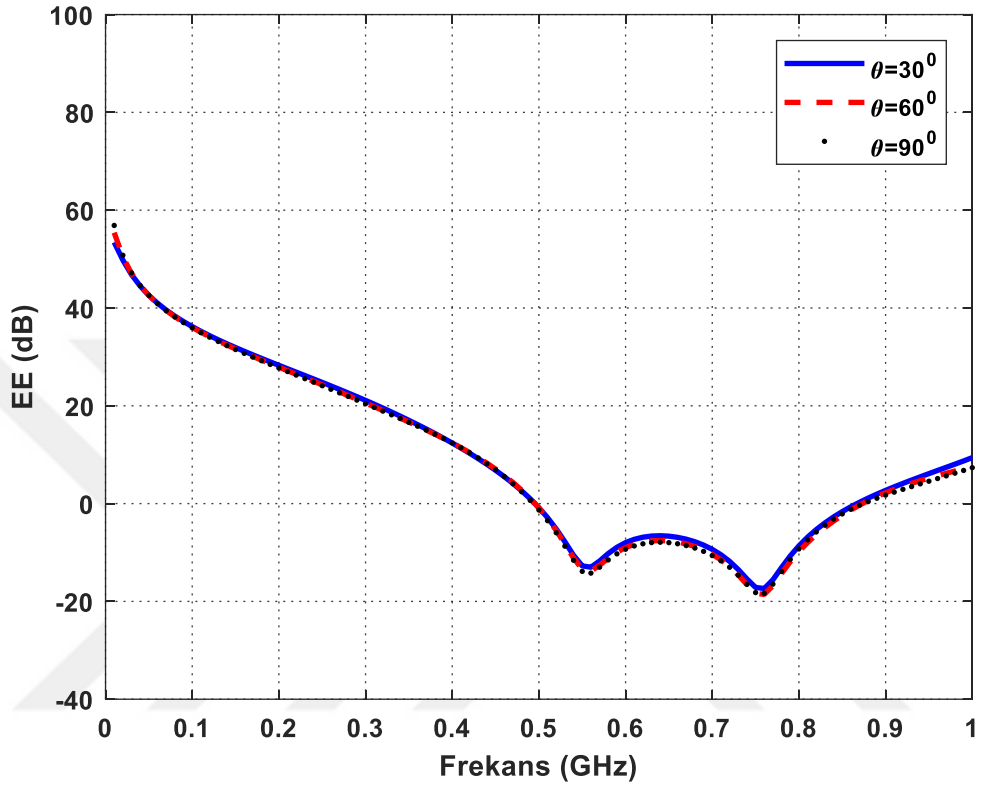
4.9. Farklı Gelen Dalga Açılarının EE Üzerinde Etkisi

Düzlem dalganın yayılma yönünün ve polarizasyon yöneliminin ekranlama etkinliği üzerindeki etkisini incelemek amacıyla ilk olarak düzlem dalga yayılma açısı θ=90^0 sabit tutularak üç farklı polarizasyon açısı (ϕ) tanımlanmıştır. Benzetim sonuçları Şekil 4.16'da sunulmuştur. Gelen dalganın polarizasyon açısının daralması ile elektromanyetik alan kutu içerisine doğrudan nüfuz edememiştir ve şekilden de anlaşılacağı üzere polarizasyon açısının azalması ile EE artmıştır.



Şekil 4.16 Gelen düzlem dalga polarizasyon açısının EE üzerindeki etkisi.

Gelen düzlem dalganın yayılma açısı değiştirilerek EE üzerindeki etkisi incelemek amacıyla ϕ=90^0 alınarak üç farklı (30^0-60^0-90^0) θ açısı tanımlanmıştır. Benzetim sonuçları Şekil 4.17'de sunulmuştur. Tanımlanan düzlem dalga yayılma açıları metalik muhafazanın ekranlama verimliliğinde çok fazla bir değişikliğe yol açmamıştır.



Şekil 4.17 Gelen düzlem dalga yayılma açısının EE üzerindeki etkisi.

5. SONUÇ

Ekranlama, elektromanyetik ekipmanları EM girişimden korumanın başlıca yollarından biridir. Ekranlama için kullanılan malzemenin iletkenliğinin iyi olması EM dalgayı ekran üzerinden yansıtarak, ekran içerisindeki ekipmanı girişimden korur. Metal muhafazalar iyi iletkenlik özellikleriyle ekranlama için yaygın kullanılır. Metal muhafazaların tasarımları yapılırken üzerlerinde havalandırma pencereleri, kablo giriş çıkış noktaları gibi birtakım açıklıklar olmak zorundadır. Bu tarz açıklıklar metal muhafazanın ekranlama verimliliğini etkiler ve bu yüzden metal muhafazaların ekranlama verimliliği değerleri bilinmelidir.

Bu tez çalışmasında üzerinde farklı boyutlarda ve sayılarda ince açıklık bulunan metal muhafazanın ekranlama etkinliğini hesaplamak için hibrit bir yöntem olan örtülü-açık zaman alanında sonlu farklar (HIE-FDTD) yöntemi kullanılmıştır. Bu hibrit yöntem, açıklığın bulunduğu yöndeki hücrelerin HIE-FDTD uzayında daha küçük hücre boyutu kullanılarak tasarlanmasını sağlar. HIE-FDTD yönteminde CFL kriteri hesaplanırken küçük hücre boyutu bulunan yön dikkate alınmadığı için, bu koşul zayıflatılmış olur ve zamandan tasarruf edilerek geleneksel FDTD yöntemine kıyasla daha kısa sürede sonuca ulaşılır.

İlk olarak bu yöntemin doğruluğunu ve uygulanabilirliği göstermek amacıyla tek açıklıklı muhafazanın EE parametresi geleneksel FDTD yöntemi ile hesaplanmıştır. Daha sonra aynı problem HIE-FDTD yöntemi ile hesaplanarak, sonuçlar karşılaştırılmış ve her iki sonucun birbiri ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

HIE-FDTD yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen benzetim sonuçlarında elde edilen verilere göre genel olarak, ekranlama etkinliği değerinin rezonans bölgesi etrafında en düşük olduğu ve muhafaza içerisindeki elektrik alan değerinin bu bölgede arttığını görülmektedir. Toplam açıklık alanı aynı kalırken açıklık sayısının artmasının EE üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Açıklık alanı daraldıkça ve açıklığın en-boy oranı azaldıkça, EE artmıştır. Bu durum, açıklığın içerisinden muhafazaya nüfuz eden elektrik alanın azalması sonucu gerçekleşir. Polarizasyon yönünün değişmesi ise EE'yi büyük oranda iyileştirmiştir. Muhafaza içerisindeki elektrik alanın örneklendiği gözlem noktasının konumu *y* yönünde değiştirilmiş ve gözlem

noktasının açıklığa yaklaştıkça EE'nin azaldığı, açıklıktan uzaklaştıkça EE'nin arttığı görülmüştür.

Benzetim süreleri üzerinden değerlendirildiğinde, HIE-FDTD yöntemi ile yapılan benzetim çalışmaları için geçen süre, geleneksel FDTD yöntemi ile yapılan benzetim süresinin yaklaşık %33'ü kadardır. Bu durum, HIE-FDTD yönteminin daha büyük zaman adımı boyutuna izin verdiği için geleneksel FDTD yöntemine göre daha yüksek bir verimlilik seviyesine sahip olduğunu ifade eder. Sonuç olarak HIE-FDTD algoritması kullanılarak iyi ekranlama performansına sahip ince açıklıklı metal muhafazalar tasarlanabilir.

KAYNAKLAR

[1] **Ganesan, R., & Kini, K. R.** (2003). Electromagnetic interference/compatibility (EMI/EMC) measurement. *IETE Technical Review*, 20(5), 415-424.

[2] **Park, Y. M., Lee, Y., Chung, Y. S., Cheon, C., & Jung, H. K.** (2009). Electromagnetic field penetration analysis of a rectangular aperture-backed cavity based on combination of electromagnetic topology and mode matching. Electromagnetics, 29(6), 447-462.

[3] **Gurevich, V.** (2017). The Issues of Electronic Equipment Grounding at the Power Facilities. *International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering (IJRSEEE)*, 3(1), 11-19.

[4] **Gravelle, L. B., & Wilson, P. F.** (1992). EMI/EMC in printed circuit boards-a literature review. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 34(2), 109-116.

[5] **Saini, P., Choudhary, V., Vijayan, N., & Kotnala, R. K.** (2012). Improved electromagnetic interference shielding response of poly (aniline)-coated fabrics containing dielectric and magnetic nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(24), 13403-13412.

[6] **Kondawar, S. B., & Modak, P. R.** (2020). Theory of EMI shielding. *In Materials for Potential EMI Shielding Applications* (pp. 9-25). Elsevier.

[7] **Gupta, T. K., Singh, B. P., Singh, V. N., Teotia, S., Singh, A. P., Elizabeth, I., ... & Mathur, R. B.** (2014). MnO 2 decorated graphene nanoribbons with superior permittivity and excellent microwave shielding properties. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(12), 4256-4263.

[8] **Robinson, M. P., Benson, T. M., Christopoulos, C., Dawson, J. F., Ganley, M. D., Marvin, A. C., ... & Thomas, D. W**. (1998). Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. I*EEE transactions on Electromagnetic Compatibility*, 40(3), 240-248.

[9] **ErbaS, C., & Kent, S.** (2003). Shielding effectiveness of a rectangular cavity with aperture between 1-3 GHz. *In 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2003. EMC'03. (Vol. 1, pp. 343-346). *IEEE*.

[10] **Li, M., Nuebel, J., Drewniak, J. L., DuBroff, R. E., Hubing, T. H., & Van Doren, T. P.** (2000). EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modeling and measurements. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 42(1), 29-38.

[11] **Cerri, G., De Leo, R., & Primiani, V. M.** (1992). Theoretical and experimental evaluation of the electromagnetic radiation from apertures in shielded enclosure. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 34(4), 423-432.

[12] **Jin, J. M., & Volakis, J. L.** (1990). A finite element-boundary integral formulation for scattering by three-dimensional cavity-backed apertures (No. *UMICH*-025921-10-T).

[13] **Kraft, C. H.** (1994, August). Modeling leakage through finite apertures with TLM. *In Proceedings of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility* (pp. 73-76). IEEE.

[14] **Khan, Z. A., Bunting, C. F., & Deshpande, M. D.** (2005). Shielding effectiveness of metallic enclosures at oblique and arbitrary polarizations. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 47(1), 112-122.

[15] **Park, Y. M., Lee, Y., Chung, Y. S., Cheon, C., & Jung, H. K.** (2008, July). Analysis of electromagnetic field penetration through apertures based on electromagnetic topology. In 2008 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (pp. 1-4). *IEEE*.

[16] **Namiki, T.** (1999). A new FDTD algorithm based on alternating-direction implicit method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques*, 47(10), 2003-2007.

[17] **Zhao, A.** (2002). More accurate and efficient unconditionally stable FDTD method. Electronics Letters, 38(16), 862-864.

[18] **Huang, B., Wang, G., Jiang, Y., & Wang, W.** (2003). A hybrid implicit-explicit FDTD scheme with weakly conditional stability. Microwave and optical technology letters, 39(2), 97-101.

[19] **Ruiz Cabello, M., Martín Valverde, A. J., Plaza, B., Frövel, M., Poyatos, D., R. Bretones, A., & G. García, S.** (2023). A Subcell Finite-Difference Time-Domain Implementation for Narrow Slots on Conductive Panels. *Applied Sciences*, 13(15), 8949.

[20] **Bethe, H. A.** (1944). Theory of diffraction by small holes. Physical review, 66(7-8), 163.

[21] **McDONALD, N. A.** (1987). Polynomial approximations for the transverse magnetic polarizabilities of some small apertures. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 35(1), 20-23.

[22] **McDONALD, N. A.** (1985). Polynomial approximations for the electric polarizabilities of some small apertures. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 33(11), 1146-1149.

[23] **Mendez, H. A.** (1978). Shielding theory of enclosures with apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, (2), 296-305.

[24] **Mendez, H. A**. (1970). On the theory of low-frequency excitation of cavity resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 18(8), 444-448.

[25] **Hill, D. A.** (2009). Aperture Excitation of Electrically Large, Lossy Cavities.

[26] **Arvas, E., & Harrington, R.** (1983). Computation of the magnetic polarizability of conducting disks and the electric polarizability of apertures. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 31(5), 719-725.

[27] **Johns, P. B., & Beurle, R. L.** (1971, September). Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix. *In Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* (Vol. 118, No. 9, pp. 1203-1208). IET Digital Library.

[28] **Huang, J.** (1995). Frequency domain transmission line matrix method and its applications to electromagnetic analysis (Doctoral dissertation).

[29] **Saguet, P.** (1989). The 3D transmission-line matrix method: Theory and comparison of the processes. International Journal of Numerical Modelling: *Electronic Networks, Devices and Fields*, 2(4), 191-201.

[30] **Chen, Z., & Ney, M. M.** (2008). On the relationship between the time-domain and frequency-domain TLM methods. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7, 46-49.

[31] **De Moerloose, J., Criel, S., De Smedt, R., Laermans, E., Olyslager, F., & De Zutter, D.** (1997, August). Comparison of FDTD and MoM for shielding effectiveness modelling of test enclosures. In IEEE 1997, EMC, Austin Style. *IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record* (Cat. No. 97CH36113) (pp. 596-601). *IEEE*.

[32] **Rajamani, V., Bunting, C. F., Deshpande, M. D., & Khan, Z. A.** (2006). Validation of modal/MoM in shielding effectiveness studies of rectangular enclosures with apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48(2), 348-353.

[33] **Clough, R. W.** (1960). The finite element in plane stress analysis. *ASCE Confer. On Electric Computation.*

[34] **Plevris, V., & Markeset, G.** (2018). Educational challenges in computer-based Finite Element Analysis and design of structures.

[35] **Carpes, W. P., Ferreira, G. S., Raizer, A., Pichon, L., & Razek, A.** (2000). TLM and FEM methods applied in the analysis of electromagnetic coupling. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(4), 982-985.

[36] **Hussein, K. F.** (2013). Spatial filter housing for enhancement of the shielding effectiveness of perforated enclosures with lossy internal coating: Broadband characterization. *International Journal of Antennas and Propagation*.

[37] **Lei, J. Z., Liang, C. H., & Zhang, Y.** (2007). Study on shielding effectiveness of metallic cavities with apertures by combining parallel FDTD method with windowing technique. *Progress In Electromagnetics Research*, 74, 85-112.

[38] **Chen, J., & Wang, J.** (2007). A three-dimensional semi-implicit FDTD scheme for calculation of shielding effectiveness of enclosure with thin slots. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 49(2), 354-360.

[39] **Rycroft, M. J.** (1996). Computational electrodynamics, the finite-difference time-domain method. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 15(58), 1817-1818.

[40] **Chen, J., Li, J., & Liu, Q. H.** (2017). Designing graphene-based absorber by using HIE-FDTD method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(4), 1896-1902.

[41] **Huang, B., Wang, G., Jiang, Y., & Wang, W.** (2003). A hybrid implicit-explicit FDTD scheme with weakly conditional stability. *Microwave and optical technology letters*, 39(2), 97-101.

[42] **Kaburcuk, F., & Elsherbeni, A. Z.** (2023). Sub-gridding FDTD Algorithm for 3D Numerical Analysis of EM Scattering and Radiation Problems. *Electromagnetic Science*, 1(4), 0040342-1.

[43] **Guo, J., Chen, J., Wang, J., & Zhang, A.** (2016). A new HIE-PSTD method for solving problems with fine and electrically large structures simultaneously. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 1397-1403.

[44] **Azizi, H., Tahar Belkacem, F., Moussaoui, D., Moulai, H., Bendaoud, A., & Bensetti, M.** (2014). Electromagnetic interference from shielding effectiveness of a rectangular enclosure with apertures–circuital approach, FDTD and FIT modelling. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 28(4), 494-514.

[45] **Elsherbeni, A. Z., & Demir, V.** (2015). The Finite-Difference Time-Domain in Electromagnetics (No. 10764). *SciTech Publishing Inc.*

[46] **Betz, V., & Mittra, R.** (1992). Comparison and evaluation of boundary conditions for the absorption of guided waves in an FDTD simulation. *IEEE Microwave and Guided wave letters*, 2(12), 499-501.

[47] **Roden, J. A., & Gedney, S. D.** (2000). Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS–PML for arbitrary media. *Microwave and optical technology letters*, 27(5), 334-339.

[48] **Geetha, S., Satheesh Kumar, K. K., Rao, C. R., Vijayan, M., & Trivedi, D. C**. (2009). EMI shielding: Methods and materials—A review. *Journal of applied polymer science*, 112(4), 2073-2086.

[49] **Umashankar, K., & Taflove, A.** (1982). A novel method to analyze electromagnetic scattering of complex objects. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, (4), 397-405.

[50] **Chen, J., & Wang, J.** (2007). A three-dimensional semi-implicit FDTD scheme for calculation of shielding effectiveness of enclosure with thin slots. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 49(2), 354-360.

[51] **Chen, J.** (2018). A review of hybrid implicit explicit finite difference time domain method. *Journal of Computational Physics*, 363, 256-267.

[52] **Turing, A. M.** (1948). Practical forms of type theory. *The Journal of Symbolic Logic*, 13(2), 80-94.