

**ÜZERİNDE AÇIKLIK BULUNAN YAPILARIN
EKRANLAMA ETKİNLİĞİ HESABI**

**CALCULATION OF SHIELDING EFFECTIVENESS
OF ENCLOSURES WITH APERTURE**

TUNÇ MURAT İLGAR

PROF. DR. BİRSEN SAKA

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak hazırlanmıştır.

2015

ETİK

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

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

beyan ederim.

30/06/2015

TUNÇ MURAT İLGAR

ÖZET

ÜZERİNDE AÇIKLIK BULUNAN YAPILARIN EKRANLAMA ETKİNLİĞİ HESABI

Tunç Murat İLGAR

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA

Haziran 2015, 62 Sayfa

Askeri sistemlerin ve günlük kullanılan elektronik cihazların istenildiği performansta, dışarıdan gelen elektromanyetik girişimlere olabildiğince az maruz kalarak çalışmaları açısından elektromanyetik uyumluluk oldukça önemli bir konudur. Bu tezde, üzerinde değişik biçimlerde açıklıklara sahip, alüminyumdan yapılmış dikdörtgen prizma ekranlama yapıları tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıların ekranlama verimlilikleri CST Microwave Studio programı kullanılarak hesaplanmış ve farklı açıklık şekillerine sahip yapıların aynı koşullar altında ekranlama etkinlikleri incelenmiştir. Bir sonraki aşamada üzerinde bir ve birden fazla açıklık bulunan ekranlama yapıları tasarlanmış ve tasarlanan her yapının İletim Hattı Modeli (İHM) oluşturularak ekranlama etkinlikleri hesaplanmıştır. Sonrasında alüminyum maddeden yapılan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısının kalınlığı artırılmış ve ön yüzünde oluşturulan dikdörtgen açıklığın içerisine ekranlama yapılarında bulunan zorunlu açıklıklar için yeni bir tasarım olan değişik genişliğe sahip iris yapıları yerleştirilmiştir. Yeni tasarlanan bu yapıların ekranlama verimlilikleri CST Microwave Studio programı ve İHM ile hesaplanmış ve sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik uyumluluk, İletim Hattı Modeli (İHM), Dalga kılavuzu filtreleri, İris, Açıklık, Ekranlama yapısı, Ekranlama verimliliği

ABSTRACT

CALCULATION OF SHIELDING EFFECTIVENESS OF ENCLOSURES WITH APERTURE

Tunç Murat İLGAR

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA

June 2015, 62 pages

For military systems and daily used electronic devices to function, electromagnetic interference coming from outside must be minimized as much as possible and therefore electromagnetic compatibility is an important subject. In this thesis, shielding structures (aluminum) with different aperture shapes have been designed. The structures' shielding effectiveness were simulated in CST Microwave Studio and in the same conditions, shielding effectiveness of the structures with different aperture shapes were studied. In the next stage of this thesis, the shielding structures with an aperture or apertures were designed, separately and calculation of shielding effectiveness were performed for every designed structure by using transmission line model. After all of this work, the thickness of the aluminum rectangular prism shielding structure with a rectangular aperture was increased and put new design irises with different widths in necessary apertures of the shielding structures. Calculations of shielding effectiveness for the newly designed structures were simulated and compared with each other by using CST Microwave Studio and Transmission Line Method (TLM).

Key Words: Electromagnetic compatibility, Transmission Line Model (TLM), waveguide filters, Iris, Aperture, Shielding structure, Shielding effectiveness

TEŐEKKÜR

Tez alıőmamın her aşamasında değerli katkı ve eleőtirileriyle yol gősteren, sonsuz sabrıyla beni her zaman alıőmaya teővik eden, tezin tamamlanmasında büyük emeği geçen danıőmanım Sayın Prof. Dr. Birsen SAKA'ya içtenlikle teőekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve asla emeklerinin karőtılıęını ödeyemeyeceğim annem Mesrure ve babam Tuncay İLGAR'a teőekkür ederim.

Son olarak, sabrı, nerileri, değerli yorumları ve yardımları için arkadaőtım zm Emre AŐIRIM'a teőekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. ÜZERLERİNDE AÇIKLIK BULUNAN DİKDÖRTGEN PRİZMA BİÇİMDEKİ EKLANLAMA YAPILARI.....	4
2.1. Problem Geometrisi ve Ekranlama Etkinliği	4
2.2 İletim Hattı Modeli (İHM) ile Üzerinde Açıklık Bulunan Ekranlama Yapılarının Ekranlama Verimliliklerinin Hesaplanması.....	8
3. EKLANLAMA ETKİNLİĞİ (VERİMLİLİĞİ) HESAPLAMALARI	15
3.1 Farklı Açıklık Şekillerinin Ekranlama Etkinliği Hesabı.....	15
3.2 Tekli ve Birden Fazla Açıklıklı Ekranlama Yapıları	18
3.2.1 Tek Dikdörtgen Açıklıklı Dikdörtgen Prizma Ekranlama Yapısı ile Tek Kare Açıklıklı Dikdörtgen Prizma Ekranlama Yapısı	18
3.2.2 Birden Fazla 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	24
3.2.2.1 Üzerinde Dört Tane 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklık Bulunan 1,5 mm Duvar Kalınlığına Sahip Dikdörtgen Prizma Şeklindeki Ekranlama Yapısı.....	26
3.2.2.2 Üzerinde Altı Tane 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklık Bulunan 1,5 mm Duvar Kalınlığına Sahip Dikdörtgen Prizma Şeklindeki Ekranlama Yapısı.....	29
3.2.2.3 Üzerinde Dokuz Tane 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklık Bulunan 1,5 mm Duvar Kalınlığına Sahip Dikdörtgen Prizma Şeklindeki Ekranlama Yapısı	31
3.2.2.4 Üzerinde On iki Tane 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklık Bulunan 1,5 mm Duvar Kalınlığına Sahip Dikdörtgen Prizma Şeklindeki Ekranlama Yapısı	34

3.2.3 Birden Fazla 15x15 mm ve 25x25 mm Boyutlarında Kare Açıklıklı Ekranlama Yapıları.....	36
3.2.4 Kare Açıklık Sayısının Artışı ile Ekranlama Etkinliğinin Azalışının İncelenmesi	42
3.3 Ekranlama Yapılarında Bulunan Zorunlu Açıklıklar İçerisinde İris Tasarımı	50
4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER.....	58
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	62

KISALTMALAR DİZİNİ

İHM

İletim Hattı Modeli

CST

Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi (Computer Simulation Technology)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 $a \times b \times d$ boyutlarında üzerinde bir tane açıklık bulunan dikdörtgen prizma ekranlama (perdeleme) yapısı.....	5
Şekil 2.2 Sonsuz uzunluktaki dalga kılavuzu	6
Şekil 2.3 Bir yüzeyinde açıklık bulunan ekranlama yapısının (Şekil 2. 1) iletim hattı modeli	8
Şekil 2.4 Ekranlama yapısının bir yüzeyinde bulunan açıklığın devre şekli.....	9
Şekil 2.5 İletim Hattı Modelinin Thevenin Eşdeğer Devre Modeli	11
Şekil 2.6 Şekil 3.4'te bulunan iletim hattı modelinin sadeleştirilmiş hali.....	12
Şekil 3.1 300x120x300 mm boyutlarında üzerinde tek açıklık bulunan ekranlama yapıları	15
Şekil 3.2 Farklı açıklık şekillerinin aynı boyutlardaki ekranlama yapısı (300x120x300 mm) üzerinde ayrı ayrı (a) kenar ve çap uzunlukları (b) alanları aynı olarak oluşturulduğunda sağladıkları ekranlama verimlilikleri.....	16
Şekil 3.3 Ekranlama yapısı üzerindeki oluşturulabilecek farklı havalandırma açıklıkları..	17
Şekil 3.4 Aynı özelliklerdeki ekranlama yapısı üzerinde ayrı ayrı oluşturulan kare ve dikdörtgen açıklıklı yapıların iletim hattı modeli ile yapılmış olan ekranlama verimlilik hesaplamalarının karşılaştırılması	18
Şekil 3.5 Aynı özelliklerdeki ekranlama yapısı üzerinde ayrı ayrı oluşturulan kare ve dikdörtgen açıklıklı yapıların CST Microwave programı ile yapılmış olan ekranlama verimlilik hesaplamalarının karşılaştırılması	20
Şekil 3.6 Aynı özelliklerdeki ekranlama yapısı üzerine yerleştirilen dikdörtgen açıklığa sahip koruma yapılarının farklı yöntemler kullanılarak yapılan ekranlama verimliliği hesaplamaları.....	22
Şekil 3.7 Aynı özelliklerdeki ekranlama yapısı üzerine yerleştirilen kare açıklığa sahip koruma yapılarının farklı yöntemler kullanılarak yapılan ekranlama verimliliği hesaplamaları.....	23
Şekil 3.8 Üzerinde birden fazla açıklık bulunan ekranlama yapısı	25
Şekil 3.9 Çoklu açıklığa sahip elektromanyetik girişimlerden korunma için tasarlanan yapının z eksenindeki görüntüsü	26
Şekil 3.10 Üzerinde dört tane kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı.....	27

Şekil 3.11 Üzerinde dört tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	27
Şekil 3.12 Üzerinde dört tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+10 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması	28
Şekil 3.13 Üzerinde dört tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30)$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	28
Şekil 3.14 Üzerinde altı tane kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı.....	29
Şekil 3.15 Üzerinde altı tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	30
Şekil 3.16 Üzerinde altı tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+10 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması	30
Şekil 3.17 Üzerinde altı tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	31
Şekil 3.18 Üzerinde dokuz tane kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı	32
Şekil 3.19 Üzerinde dokuz tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması	32
Şekil 3.20 Üzerinde dokuz tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+10 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması	33
Şekil 3.21 Üzerinde dokuz tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması	33
Şekil 3.22 Üzerinde on iki tane kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı.....	34
Şekil 3.23 Üzerinde on iki tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	35
Şekil 3.24 Üzerinde on iki tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+10 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması	35
Şekil 3.25 Üzerinde on iki tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması	36
Şekil 3.26 Üzerinde dört tane 15x15 mm boyutlarında kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı	37

Şekil 3.27 Üzerinde dört tane 15x15 mm boyutlarında kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	37
Şekil 3.28 Üzerinde dört tane 15x15 mm boyutlarında aralarında 10 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	38
Şekil 3.29 Üzerinde altı tane 15x15 mm boyutlarında kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı	38
Şekil 3.30 Üzerinde altı tane 15x15 mm boyutlarında aralarında 2 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	39
Şekil 3.31 Üzerinde altı tane 15x15 mm boyutlarında aralarında 2 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	40
Şekil 3.32 Üzerinde dört tane 25x25 mm boyutlarında kare açıklıklar bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı	41
Şekil 3.33 Üzerinde dört tane 25x25 mm boyutlarında aralarında 5 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	41
Şekil 3.34 Üzerinde dört tane 25x25 mm boyutlarında aralarında 5 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	42
Şekil 3.35 İkinci kuvveti ile sayısı arttırılan kare açıklıkların Elektromanyetik Ekranlama Yapıları (a) bir açıklıklı (b) iki açıklıklı (c) dört açıklıklı (d) sekiz açıklıklı	43
Şekil 3.36 Üzerinde farklı sayıda her biri 20x20 mm boyutlarında ve aralarında 10 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması	44
Şekil 3.37 51x51 mm alanda bir kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapısı.....	46
Şekil 3.38 51x51 mm alanda dört kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapısı.....	47
Şekil 3.39 51x51 mm alanda on altı kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapısı.....	47
Şekil 3.40 51x51 mm alanda farklı sayılarda kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapıları.....	48
Şekil 3.41 51x51 mm alanda farklı sayılarda kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapılarının $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması.....	49

Şekil 3.42 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan irisli açıklık	51
Şekil 3.43 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan iki irisli açıklık yapısının İletim Hattı Modeli	52
Şekil 3.44 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan 54 mm genişliğe sahip irisli açıklıklı kapalı kutu	52
Şekil 3.45 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan açıklık içerisinde 54 mm genişliğe sahip irisli kapalı kutunun ekranlama verimliliği hesaplaması	53
Şekil 3.46 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan 44 mm genişliğe sahip irisli açıklıklı kapalı kutu	53
Şekil 3.47 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan açıklık içerisinde 44 mm genişliğe sahip irisli kapalı kutunun ekranlama verimliliği hesaplaması	54
Şekil 3.48 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan 32 mm genişliğe sahip irisli açıklıklı kapalı kutu	54
Şekil 3.49 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan açıklık içerisinde 32 mm genişliğe sahip irisli kapalı kutunun ekranlama verimliliği hesaplaması	55
Şekil 3.50 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde dikdörtgen açıklıklı kapalı kutu	56
Şekil 3.51 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan açıklık içerisinde iris bulunan ve bulunmayan yapıların ekranlama etkinliklerinin karşılaştırması	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 İletim Hattı Modeli kullanılarak kare açıklıklı yapının ekranlama verimliliği hesabı.....	19
Çizelge 3.2 CST Programı kullanılarak kare ve dikdörtgen açıklıklı yapının ekranlama verimliliği hesabı karşılaştırması.....	21
Çizelge 3.3 Farklı yöntemler kullanılarak dikdörtgen açıklıklı yapının ekranlama verimliliği hesabı.....	22
Çizelge 3.4 Farklı yöntemler kullanılarak kare açıklıklı yapının ekranlama verimliliği hesabı.....	24
Çizelge 3.5 Üzerinde farklı sayıda her biri 20x20 mm boyutlarında aralarında 10 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için ekranlama verimliliği hesaplamalarının karşılaştırılması.....	44
Çizelge 3.6 Üzerinde farklı sayıda her biri 20x20 mm boyutlarında aralarında 10 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için ekranlama verimliliği hesaplamalarının karşılaştırılması.....	45
Çizelge 3.7 51x51 mm'lik alanda farklı sayılarda kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapıları ekranlama verimliliği hesaplamalarının karşılaştırılması.....	49
Çizelge 3.8 İrisli ve irissiz açıklıklı dikdörtgen prizma ekranlama yapıları için ekranlama etkinlik hesaplama sonuçları	57

1. GİRİŞ

Elektromanyetik Ekranlama, kapsadığı bölgeyi dış elektromanyetik alanın etkilerinden koruyan, ya da tam tersi, etrafındaki çevreyi içerisindeki alanın etkilerinden koruyan bir yapı olarak tanımlanır. Bu tip yapıların ne kadar verimli olduklarının tanımlanması için etkinliklerine bakılmalıdır. Bu etkinlik, ekranlama etkinliği ya da verimliliği olarak adlandırılır. Ekranlama etkinliği, ekranlama olmadan bir noktada vericiden alınan sinyalin, aynı noktada ekranlama varken alınan sinyale oranı olarak tanımlanabileceği gibi, bir noktada ekranlama yapısı yokken ki o noktadaki alanın (elektrik veya manyetik) büyüklüğünün aynı noktadaki ekranlama yapısı varken ki alanın (elektrik veya manyetik) büyüklüğüne oranı olarak da ifade edilebilir [1-2]. Ekranlama (perdeleme) yapıları, elektromanyetik dalgaların azaltılması için kullanılan, genellikle maliyeti düşük ve etkili koruma yapılarıdır. Bunlar, düz plakalar [3] veya üzerlerinde zorunlu havalandırma ve benzeri sebeplerden ötürü açıklık [4] bulunan kapalı kutulardan ve benzeri yapılardan oluşmaktadır.

Elektronik cihazların çalışması sırasında etrafındaki girişim nedeniyle oluşabilecek olumsuz etkilerin engellenmesi için oluşturulan ekranlama yapılarının etkin bir biçimde tasarlanması önemli problemlerden biridir. Tasarımı yapılacak koruma yapılarının, cihazların kullanılacakları yerlere özgü bir biçimde tasarlanması ekranlama etkinliğinin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Askeri ve sivil, birçok uygulamada kullanılan ekranlama yapılarının önemi yüksektir. Çünkü bu tip özel alanlarda kullanılacak elektronik cihazların çevreleriyle etkileşimleri, çevrelerine karşı etkileri ve çevrelerindeki cihazlardan gelen kasıtlı veya kasıtsız elektromanyetik dalgaların etkileri hesaba katılmadığında kullanılacak olan cihazlar istenildikleri gibi doğru ve etkili bir şekilde çalışamayacaklardır.

Olumsuz elektromanyetik etkilere karşı korunan yapıların üzerlerinde açıklıkların bulunması (havalandırma açıklıkları, kablo girişleri, düğme gibi) zorunludur. Zorunlu olan bu açıklıkların en iyi şekilde tasarlanabilmesi için açıklıklar farklı biçimlerde oluşturulabilir [5]. Farklı şekillere sahip açıklık modellerinin tasarlanmaları sırasında sağladıkları ekranlama etkinlikleri kadar yapıların yüzeylerine yerleştirilme kolaylığı da önemlidir.

Literatürde, kapalı bir kutudan oluşan ekranlama yapılarının etkinliklerinin hesaplanması M. P. Robinson tarafından yapılmıştır [4]. Robinson tarafından yapılan araştırma ve çalışmada üzerinde bir tane dikdörtgen açıklık bulunan kapalı dikdörtgen kutunun iletim hattı modeli oluşturulmuş ve bu iletim hattı modeli kullanılarak ekranlama yapısı içerisinde belirli bir noktada elektrik alan hesaplaması yapılmıştır. Yapılan bu hesaplama sonucunda iletim hattı modeli ile nümerik hesaplama yöntemleri ve gerçek koşullarda yapının gerçekleştirilmesiyle alınan ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiklerinde iletim hattı modelinin diğer yöntemlerle çok yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Robinson, 1996 yılında yapmış oldukları ilk çalışmadan iki yıl sonra daha önce yapmış olduğu çalışmanın devamı olarak, bir tane açıklığa sahip farklı boyut ve madde ile oluşturulmuş üzerinde açıklık bulunan kapalı kutu dikdörtgen ekranlama yapıları incelemiştir [6]. Ayrıca bu çalışmadan elektrik alan ekranlama etkinliği hesabına ek olarak manyetik alan ekranlama etkinliği hesabına da yer verilmiştir.

2004 yılında Jongjoo Shim tarafından hazırlanan çalışmada [7] birden fazla yüzeyi üzerinde açıklıklar bulunan kapalı dikdörtgen kutuların ekranlama verimlilikleri hesaplamaları yapılarak kutuların elektromanyetik dalgalardan koruma etkinlikleri incelenmiştir. Bu çalışmada Robinson'un oluşturmuş olduğu [6] iletim hattı modeli kullanılmış ve kullanılan model geliştirilerek [8-9] farklı yapılar için çalışmalar yapılmıştır. Farklı yapıların oluşturulması ve üzerlerinde çalışılmasının yanı sıra yapıya normal olarak gelen düzlem dalga ve açılı olarak gelen düzlem dalga kaynakları kullanılarak yapıların farklı koşullar altında sağladıkları ekranlama etkinlikleri incelenmiştir.

Literatürde, üzerlerinde açıklık bulunan ekranlama yapılarının ekranlama etkinliğini artırmak üzere yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Bunlardan dikkat çekici olanlardan birisi açıklıkların elektromanyetik dalga emici maddeler ve yansıma katsayısını artırıcı maddeler ile kaplanmasıdır [10]. Dalga emici maddelerin doğru ve uygun bir biçimde açıklık duvarlarının iç kısımları içerisinde yüzey bölgelerinde kullanılmasıyla önemli bir ekranlama verimliliği artışı sağlanabilir. Açıklıkların içerisini kaplamak için seçilebilecek maddeler manyetik ve dielektrik yapılı olabilirler. Manyetik ve dielektrik maddelerin aynı anda açıklıkların kaplanması için kullanılması ile birlikte yansıma katsayısını artırıcı bir

etki sağlanabilir. Bu Şekilde oluşturulacak yapılar ile iyi ekranlama verimliliği sonuçları elde edilebilir.

Bu tez çalıŐmasında elektronik cihazların maruz kaldıkları elektromanyetik alanların azaltılması için farklı biçimlerde tasarlanmış olan ekranlama yapıları incelenmiş ve incelenen yapıların ekranlama verimliliklerinin hesabı İletim Hattı Modeli (İHM) ve ticari bir program olan CST Microwave Studio® programı kullanılarak yapılmıştır. Ekranlama etkinliğini arttırmak için, açıklıkların biçimlerini deđiŐtirme ve açıklıkların kesim frekansı altında çalışan dalga kılavuzu olarak etkin biçimde tasarlanma yolları üzerinde çalışılmıştır.

Bu tezin ikinci bölümünde, ekranlama yapıları üzerlerindeki açıklıkların tasarlanması ve bu tasarımlar sırasında açıklıkların boyutları ile oynanarak kesim frekansı altında çalışılacak bir biçimde ayarlamalar yapılmasından ve ekranlama verimliliğini arttırabilecek yöntemlerden bahsedilmektedir.

Üçüncü kısımda ise tez aŐaması boyunca yapılan İHM ile yapılmış olan hesaplamalar ve bu hesaplamaların CST Microwave Studio® programı ile karşılaŐtırılmalarına ve tasarlanmış olan elektromanyetik ekranlama yapılarının ekranlama etkinlikleri karşılaŐtırmalarına yer verilmiştir.

Sonuçlar ve değerlendirme kısmına Bölüm 4'te yer verilmiştir.

2. ÜZERLERİNDE AÇIKLIK BULUNAN DİKDÖRTGEN PRİZMA BİÇİMDEKİ EKLANLAMA YAPILARI

2.1. Problem Geometrisi ve Ekranlama Etkinliği

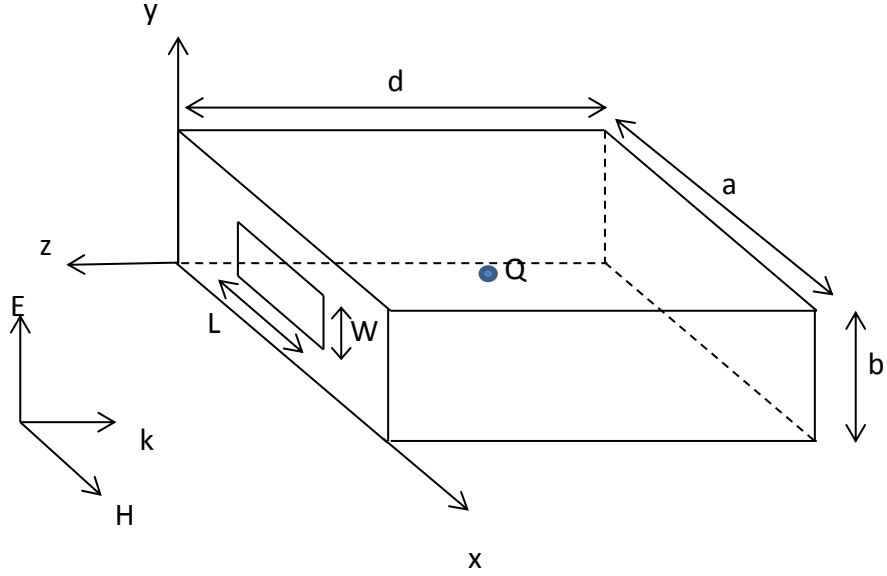
Ekranlama varken ve yok iken alıcıda ölçülen veya hesaplanan alan değerleri oranına ekranlama etkinliği adı verilir.

Çalışmalarımızda Şekil 2.1’de gösterilen içi hava dolu, alüminyum maddeden yapılmış ve düzlem dalga kaynağı ile aydınlatılan $a \times b \times d$ boyutlarındaki ön yüzünde açıklık veya açıklıklar bulunan dikdörtgen prizma ekranlama yapısı kullanılmıştır. Ekranlama etkinliği için olabilecek en kötü durumu gösterebilmek adına gelen dalga, açıklığa direk nüfuz edebilecek şekilde, yani açıklığa tam karşıdan gönderilmiştir. Şekil 2.1’de bulunan ekranlama yapısının elektrik alan ekranlama etkinliği hesaplaması için kullanılan formüle Eşitlik 2.1’de ve aynı şekilde manyetik alan ekranlama verimliliği hesaplaması için kullanılan formüle Eşitlik 2.2’de yer verilmiştir [1, 11].

$$SE_{dB}^E = -20 \log_{10} \left| \frac{E_{ekranlama\ yokken}(Q)}{E_{ekranlama\ varken}(Q)} \right| \quad (2.1)$$

$$SE_{dB}^H = -20 \log_{10} \left| \frac{H_{ekranlama\ yokken}(Q)}{H_{ekranlama\ varken}(Q)} \right| \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.1’de bulunan $E_{ekranlama\ yokken}$ ve $E_{ekranlama\ varken}$, Şekil 2.1’de gösterilen Q noktasında ekranlama yokken ve ekranlama varken yapılan elektrik alan ölçümlerini veya hesaplamalarını ifade etmektedir. Aynı şekilde, Eşitlik 2. 2’de bulunan $H_{ekranlama\ yokken}$ ve $H_{ekranlama\ varken}$, Şekil 2.1’de gösterilen Q noktasında ekranlama yokken ve ekranlama varken yapılan manyetik alan ölçümlerini veya hesaplamalarını ifade etmektedir.



Şekil 2.1 $a \times b \times d$ boyutlarında üzerinde bir tane açıklık bulunan dikdörtgen prizma ekranlama (perdeleme) yapısı

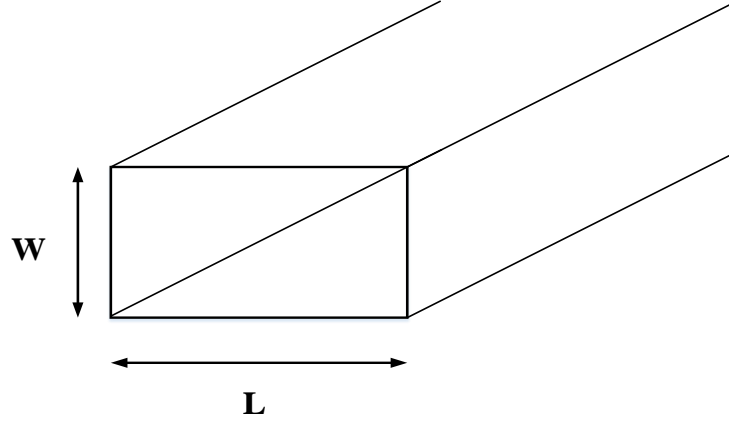
Şekil 2.1’de bulunan kapalı kutu ekranlama yapısının rezonans frekansı aşağıda bulunan eşitlikle hesaplanabilir.

$$f_{c,mnp} = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (2.3)$$

Burada, m ve n tam sayı değerleridir ve çalışılacak olan modun seçilmesinde kullanılmaktadır. μ ve ε ise, kutunun içerisindeki ortamın manyetik ve elektriksel geçirgenliğini ifade etmektedir. v ise dalganın faz hızıdır ve bizim hesaplamalarımızda kutunun içi hava olduğu için ışık hızına eşittir.

Elektromanyetik dalgalardan korunmak istenen elektronik cihazlar için tasarlanan iletken ekranlama yapıları üzerlerinde bir veya birden fazla açıklığının bulunması zorunludur. Çünkü korunmak istenilen elektronik cihaz veya yan yana bulunan birden fazla elektronik cihazlar çalışırken etrafa ısı yaymaktadırlar. Yayılan ısılardan kapalı kutu (ekranlama yapısı) içerisinde dış ortama aktarımı zorunludur. Oluşan bu zorunluluktan dolayı ekranlama yapıları üzerlerinde birden fazla açıklığın bulunması önem arz etmektedir.

Dalga kılavuzları elektromanyetik enerjiyi bir noktadan başka bir noktaya verimli bir biçimde iletmeye yarayan içi hava ya da dielektrik dolu yapılardır. Dalga kılavuzunda (Şekil 2.2) herhangi bir modun dalga şeklinde yayılabilmesi için çalışma frekansının kesim frekansından (f_c) büyük olması gerekir.



Şekil 2.2 Sonsuz uzunluktaki dalga kılavuzu

Bir dalga kılavuzunun boyutunun ayarlanması ve uygun bir biçimde değiştirilmesi ile kesim frekansı (Eşitlik 2.4) değiştirilebilir [12]. Şekil 2.2'deki dikdörtgen kesitli dalga kılavuzunun mn modunun kesim frekansı

$$f_{c,mn} = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2} \quad (2.4)$$

ile verilir. Burada v ışık hızını, W ve L dalga kılavuzunun boyutlarını, m ve n ise yayılan yada çalışılacak olan modu belirtmektedir.

Ekranlama yapılarının tasarımları sırasında, yapı üzerinde bulunan açıklıkların boyutları uygun bir biçimde ayarlanıp kesim frekansının altında çalışılabilecek açıklıklar yapılabilir ve ekranlama yapısına eklenirse dışarıdan içeriye nüfuz eden elektromanyetik dalga üzerinde ekstra bir zayıflama sağlanabilir ve bu da ekranlama yapılarında daha iyi bir verimlilik elde edilmesine yardımcı olabilmektedir. Çünkü kesim frekansı altında dalga kılavuzları elektromanyetik dalgaları iletememektedir ve bundan dolayı ekranlama yapıları üzerlerinde bulunan açıklıkların kesim frekansı iyi bir biçimde optimize edilirse içeri nüfuz edebilecek elektromanyetik alanların azalışı sağlanabilmektedir. Daha detaylı bir biçimde ifade etmek gerekirse, ekranlama yapılarında oluşturulan zorunlu açıklıkların boyutlarının korunma yapısına dışarıdan nüfuz edebilecek elektromanyetik dalganın frekansından yüksek bir kesim frekansı olacak bir şekilde ayarlanmasıyla, korunma yapısından içeri nüfuz edebilecek elektromanyetik dalga üzerinde bir azalış ve bundan ötürü ekstra ekranlama verimliliği sağlanması mümkün olabilmektedir.

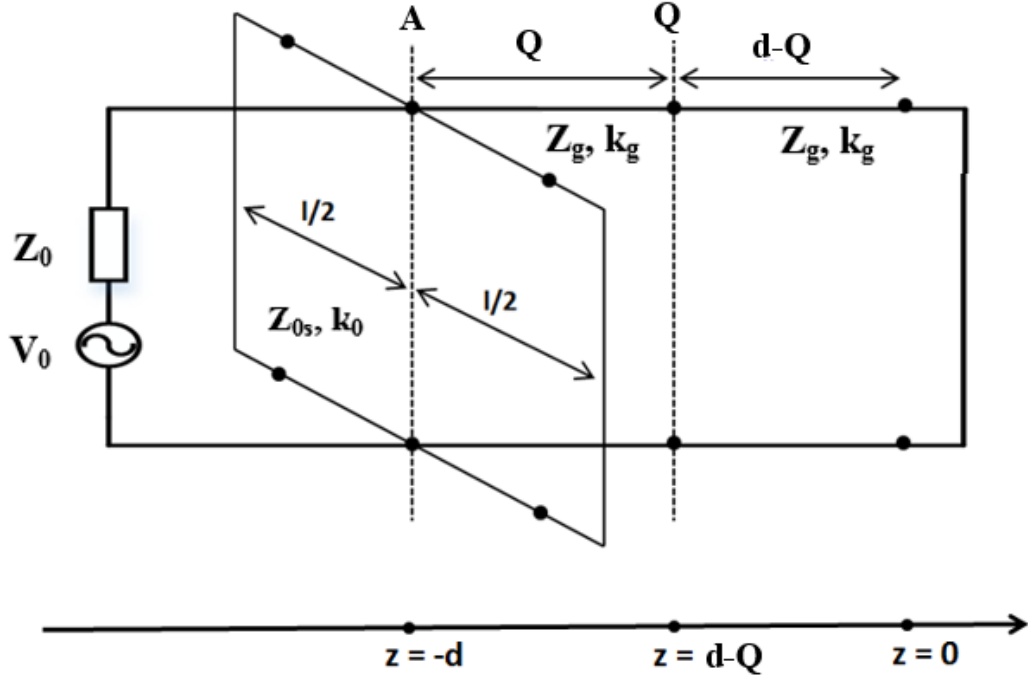
Açıklıkların şekillerinin ekranlama verimliliği üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerinin var olduğu bilinmektedir. Ayrıca açıklıkların ekranlama yapıları üzerlerinde uygun şekilde yerleştirilmelerinin de etkileri vardır. Çünkü yüzey alanı belirli olan bir bölgeye aynı sayıda farklı şekillere sahip açıklıkları yerleştirmekte sorun olabilir. Ekranlama yapıları üzerinde beşgen, altıgen, dairesel, kare ve dikdörtgen açıklıklar yer alabilirler. Aynı sayıda beşgen bir açıklığın sınırlı bir yüzeye sahip olan ekranlama yapısı üzerinde yerleştirilmesi zordur. Aynı sayıda altıgen ve dairesel havalandırma açıklığın yan yana alt alta sınırlı bir alana yerleştirilmesi, beşgen açıklığın aynı sınırlı bir yüzeye sahip olan bir bölgeye yerleştirilmesinden daha etkili ve kolaydır. Açıklıkların şekillerinin ekranlama verimlilikleri üzerinde gösterdikleri etkiler bu tezde 3. Bölümde hesaplama çalışmaları kısmında detaylıca belirtilmiştir.

Ekranlama yapılarının üzerlerinde oluşturulan açıklıkların sayılarının artışı ile korunma yapılarının içerisinden dışarıya doğru iletilen havanın hacmi birbirleriyle orantılı olarak artmaktadır. Yalnız açıklık sayılarının artışı ile ekranlama verimliliğinin azalışı doğru orantılıdır. Açıklık sayılarının artışı ile birlikte içeriye nüfuz eden elektromanyetik dalgaların yoğunluğu artmaktadır ve bundan ötürü ekranlama yapıları tasarlanırken üzerlerindeki açıklık sayılarına, doğru ve en etkin şekilde ekranlama sağlayacak bir biçimde karar verilmelidir.

Ekranlama yapıları tasarlanırken dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir konu da yapı üzerinde yer alacak açıklığın (dalga kılavuzunun) ve dolayısıyla ekranlama yapılarının kalınlığıdır. Korunma yapısının kalınlığının artışı, dış kaynaklardan gelebilecek ve içeri nüfuz edebilecek ya da korunma yapısının içerisindeki kaynaktan dışarı doğru yayılabilecek elektromanyetik dalgaların yoğunluğunun azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu durumun iki sebebi vardır. Birincisi, kalınlığı artan açıklığın (dalga kılavuzunun) içerisinden yol alan dalgalar kesim frekansının altında çalışılıyorken daha fazla bir kayba uğrayacaklardır. İkincisi ise, kalınlığı artan ekranlama yapısının duvarlarından içeriye iletilen elektromanyetik dalganın duvarlardan içeriye iletimi daha fazla engellenmektedir. Bunun sebebi ise yapıya gelen dalganın ekranlama yapısı oluşturulurken korunma yapısı için malzemenin ne seçildiği ile bağlantılı olarak yapı yüzeyinden geriye yansıyan dalganın oranı artabilmektedir ya da azalabilmektedir.

2.2 İletim Hattı Modeli (İHM) ile Üzerinde Açıklık Bulunan Ekranlama Yapılarının Ekranlama Verimliliklerinin Hesaplanması

İHM ile karmaşık yapılar (örneğin üzerinde açıklık bulunan ekranlama yapıları) basit devre yapısı şeklinde ifade edilebilirler. Şekil 2.1'de bulunan yapının İHM ile çözümü için gerekli olan eşdeğer devresi Şekil 2.3'teki gibi oluşturulmuştur [4].



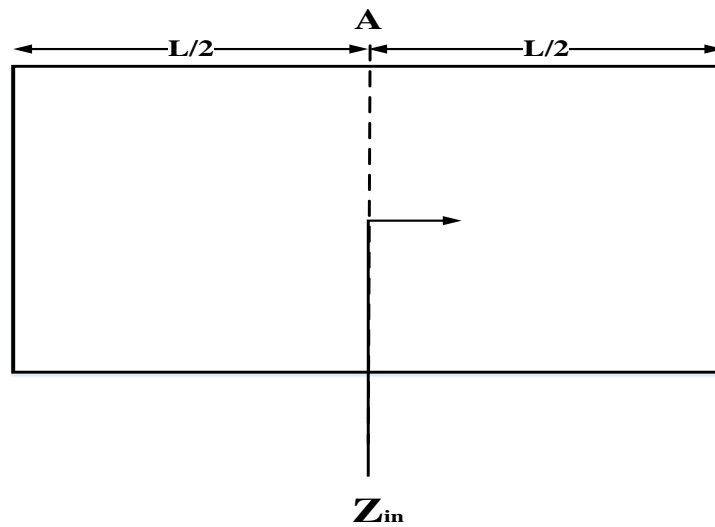
Şekil 2.3 Bir yüzeyinde açıklık bulunan ekranlama yapısının (Şekil 2.1) iletim hattı modeli

Şekil 2.3'te bulunan devreden gözlemlendiği üzere tasarlanmış olan üzerinde açıklık bulunan ekranlama yapısı eşdeğer devreye uyarlandığında devreye A noktasında paralel olarak eklenmektedir. Açıklığın modellemesinde eş düzlemlili şerit iletim hattı (coplanar strip transmission line) [13] yaklaşımı uygulanmıştır. Bu devrenin çözümünün yapılabilmesi için Şekil 2.3'te bulunan eşdeğer devrenin daha sade bir devre yapısına dönüştürülmesi ve bunun için ilk olarak açıklığın devreye empedans olarak eklenmesi gerekmektedir. Bu durumun çözümünde Eşitlik 2.5'ten [14] yararlanılmış ve açıklığı ifade eden iletim hattının giriş empedansı hesaplanmıştır.

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \frac{2\pi}{\lambda} L}{Z_0 + jZ_L \tan \frac{2\pi}{\lambda} L} \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5'te bulunan Z_0 boşluğun empedansını ifade ederken, λ ise dalga boyunu ifade etmektedir. L parametresi ise iletim hattının uzunluğu ve Z_L ise yük empedansını belirtmektedir.

Şekil 2.3'te bulunan devreye paralel olarak eklenen açıklığın devre yapısı ele alındığında (Şekil 2.5), açıklığın modellenmesi için gerekli olan empedans hesabı için devre tam ortadan ikiye ayırıp sağdan ve soldan bakılıp giriş empedansları hesaplanabilir. Şekil 2.3'de gösterilen açıklığın iletim hattı modelindeki devrenin empedansını bulmak için Eşitlik (2.5)'ten yararlanılmıştır. Açıklığın eşdeğer devresi incelendiğinde (Şekil 2.3) açıklığın kenarları mükemmel iletken olduğu için devrenin yük empedansı sıfırdır (kısa devredir ($Z_L=0$)). Şekil 2.3'te bulunan devre analiz edilirken ilk önce açıklığın eşdeğer devresinin çözümlenmesi gerekmektedir. Bunun için açıklığın iletim hattının A noktasından ikiye ayrılıp incelenmesi ve ikiye ayrılan kısımların birbirlerinin simetriği olmasından ötürü empedans hesabının yarısının alınması gerekmektedir (iki devrede birbirlerine paralel). Açıklığın empedans hesabı yapılırken mikroşerit iletim hattı modellemesinden yararlanılmıştır [13]. Açıklık, iletim hattına eklenirken yama olarak ele alınmış ve devreye eklemesinde mikroşerit olarak modellenmiştir. Mikroşerit modellemesinde açıklık ile ekranlama yapısının etkileşim faktörü olan (l/a)'da hesaba katılmıştır.



Şekil 2.4 Ekranlama yapısının bir yüzeyinde bulunan açıklığın devre şekli

Açıklığın empedansının hesaplanabilmesi için açıklığın içerisindeki ortamın karakteristik empedansının hesaplanması gerekmektedir. Bundan dolayı karakteristik empedansın hesabının yapılabilmesi için açıklığın etkin genişliğinin (w_e) [8, 13] hesabının yapılması gereklidir.

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right) \quad (2.6)$$

Açıklığın etkin genişliği hesaplandıktan sonra etkin genişliğin (w_e) kutunun genişliğine oranının [1] bulunması açıklığın içerisindeki ortamın karakteristik empedansının bulunmasındaki gerekli bir faktördür.

$$k_e = \frac{w_e}{b} \quad (2.7)$$

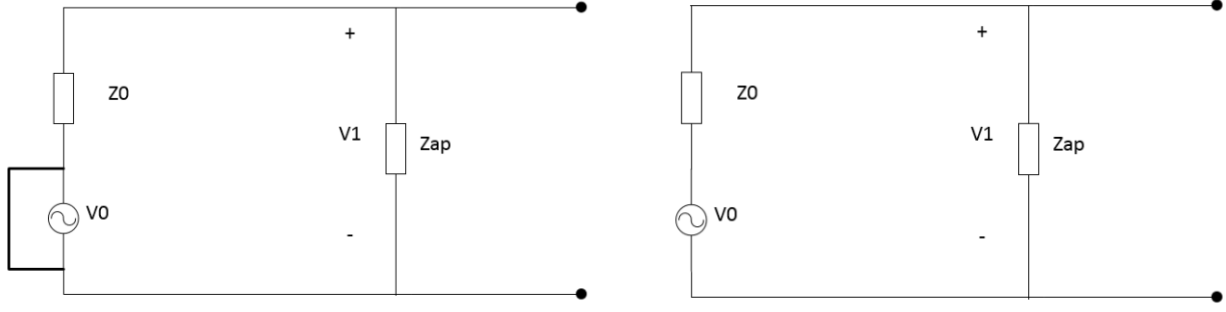
Eşitlik (2.6) ve Eşitlik (2.7) elde edildikten sonra açıklığın karakteristik empedansı [13] Eşitlik (2.8)'deki gibi bulunmaktadır.

$$Z_{0s} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \left(\frac{1 + \sqrt{1 - k_e^2}}{1 - \sqrt{1 - k_e^2}} \right) \right) \right]^{-1} \quad (2.8)$$

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} j Z_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} \quad (2.9)$$

Burada k_0 ve k_g , sırasıyla boş uzayda ve dalga kılavuzu içinde dalganın dalga sayısıdır. Elde edilen bu denklemler yardımı ile ekranlama yapısı üzerindeki açıklığın empedansı (Şekil 2.4'te $Z_{in} = Z_{ap}$) Eşitlik (2.9)'daki gibi ifade edilmiştir.

Açıklığın karakteristik empedansı kullanılarak empedans olarak ifade edildikten sonra Şekil 2.3'teki devre üzerindeki V_0 kaynağı kısa devre yapılmış ve devrenin Thevenin eşdeğer devresi (Şekil 2.5) elde edilmiştir. Yapılan bu işlemlerden sonra $V_I - Z_I$ 'in hesabı, yani oluşturulan Thevenin eşdeğer devresindeki Thevenin kaynak voltajı ve Thevenin empedansı (Thevenin eşdeğer devresinde bulunacak olan voltaj ve empedans değerleri) hesaplanmıştır.



Şekil 2.5 İletim Hattı Modelinin Thevenin Eşdeğer Devre Modeli

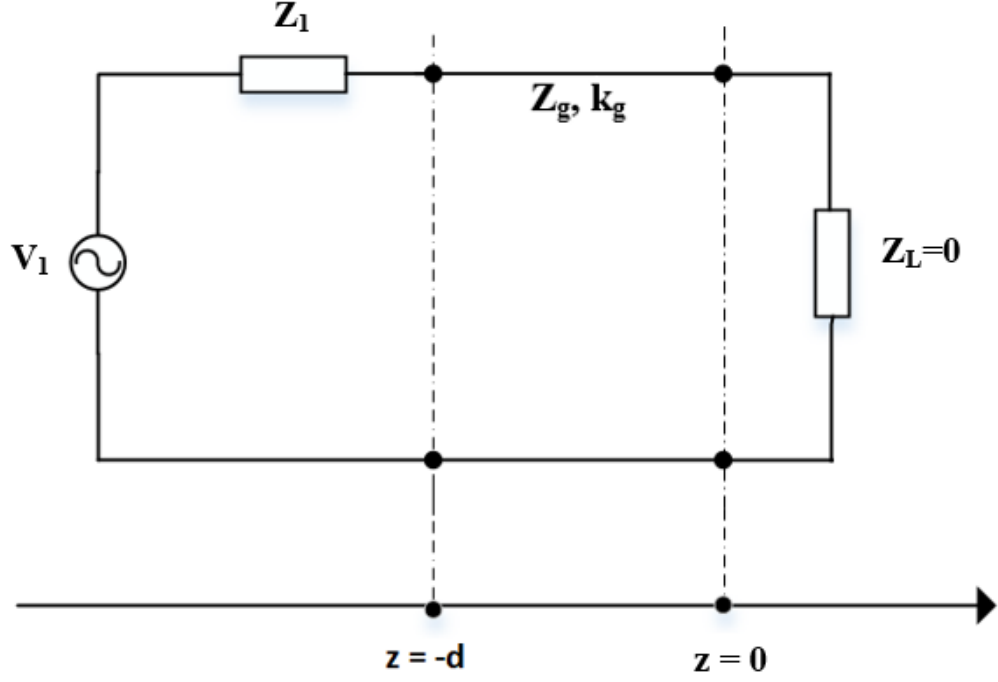
$$Z_1 = Z_{ap} || Z_0 \quad (2.10)$$

$$Z_1 = \frac{Z_0 Z_{ap}}{Z_{ap} + Z_0} \quad (2.11)$$

Z_1 'in hesaplaması yapıldıktan sonra V_1 voltajının hesabı Eşitlik (2.12)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır,

$$V_1 = V_0 \frac{Z_{ap}}{Z_{ap} + Z_0} \quad (2.12)$$

Thevenin eşdeğer devresinin oluşturulmasından sonra bulunan voltaj ve empedans değerleri devreye uygun bir biçimde Şekil 2.6'da gösterildiği gibi eklenmiştir.



Şekil 2.6 Şekil 3.4'te bulunan iletim hattı modelinin sadeleştirilmiş hali

Şekil 2.6'da sadeleştirilmiş devrede üzerinde seçilen herhangi bir noktada ($z = -d$ ile $z = 0$ arasında) voltaj hesaplaması yapılarak ekranlama etkinliğinin hesaplanabilmesi mümkündür. İletim hattı üzerindeki voltaj denkleminin genel ifadesi ($\beta = k_o =$ ortamın yayılım sabiti) [14]

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z} \quad (2.13)$$

Eşitlik (2.13)'te gösterildiği biçimde ifade edilmektedir. $V_0^+ e^{-j\beta z}$ ekranlama yapısına gelen dalgayı, $V_0^- e^{j\beta z}$ ise yapıdan geri yansıyan dalgayı yayılım yönüyle ve şiddetiyle birlikte ifade etmektedir.

İletim hattı üzerindeki belli bir noktada (z) voltaj değerinin hesaplanabilmesi için V_0^+ ve V_0^- [14] parametrelerinin bulunması gerekmektedir. Bu iki bilinmeyen değerlerinin hesaplanmasında Eşitlik (2.14), Eşitlik (2.15), Eşitlik (2.16) ve Eşitlik (2.17) kullanılmaktadır. Eşitliklerde kullanılan değişkenlerden olan V_0^+ , kaynak tarafındaki iletim hattına gelen voltajı, Z_{in} iletim hattı modelinde giriş empedansını, Z_g jeneratördeki empedansı, V_g ise kaynağın voltajını ifade etmektedir.

$$V_0^+ = V_g \frac{Z_{in}}{Z_g + Z_0} \frac{1}{(e^{-j\beta l} + \Gamma_l e^{-j\beta l})} \quad (2.14)$$

$$V_0^+ = V_g \frac{Z_0}{Z_g + Z_0} \frac{e^{-j\beta l}}{(e^{-j\beta l} + \Gamma_l \Gamma_g e^{-2j\beta l})} \quad (2.15)$$

$$\Gamma_g = \frac{Z_1 - Z_g}{Z_1 + Z_g} \quad (2.16)$$

burada Γ_l ve Γ_g , sırasıyla yükün ve devrenin girişinden bakıldığındaki gerilim yansımaya katsayılarıdır.

Eşdeğer devrenin sonundaki yük empedansı (Şekil 2.3) kutu mükemmel iletken olduğu için sıfırdır. Kutunun iletim hattı modelinde yük empedansı sıfır olduğu için yükün yansımaya katsayısı

$$\Gamma_l = -1 \quad (2.17)$$

olacaktır.

$$V_0^+ = V_1 \frac{Z_g}{Z_g + Z_1} \frac{e^{-jk_g d}}{(e^{-j\beta d} + \Gamma_l \Gamma_g e^{-2jk_g d})} \quad (2.18)$$

Γ_g ve Γ_l , Eşitlik (2.18)'de yerlerine konulduğunda (d , kutunun iletim hattının uzunluğu) Eşitlik (2.19) elde edilmektedir.

$$V_0^+ = V_1 \frac{Z_g e^{-jk_g d}}{Z_1 + Z_g + (Z_1 - Z_g) e^{-2jk_g d}} \quad (2.19)$$

V_0^+ 'nin ($V_0^- = \Gamma_l V_0^+$) bulunmasından sonra iletim hattı üzerindeki genel voltaj denklemi tekrar yazılırsa Eşitlik (2.20) elde edilmektedir.

$$V(z) = V_0^+ e^{-jk_g z} - V_0^+ e^{jk_g z} \quad (2.20)$$

Ekranlama etkinliğinin yapı içerisinde istenilen herhangi bir noktadaki değerinin hesap edilmesinin istenilmesi durumunda Eşitlik (2.20)'de z yerine Q (ekranlama verimliliğinin hesabının yapılacağı yapı içerisindeki nokta) noktasının sayısal değeri yazılırsa Q noktasındaki voltaj değeri bulunmaktadır. Ekranlama yapısının içerisinde, Q noktasındaki yük empedansı Z_0' 'dir. Bu sebepten dolayı, Q noktasındaki voltaj değeri $V_Q' = V_0/2$ dir. Elde edilen veriler ile ekranlama verimliliği Eşitlik (2.21)'ye göre hesaplanmaktadır (ekranlama yapısı olmadan ölçülen elektrik alan, ekranlama yapısı varken ki ölçülen elektrik alana bölünüp logaritması alındıktan sonra yirmi ile çarpılmaktadır).

$$SE = 20 \log |V'_Q/V_Q| \quad (2.21)$$

Tasarım yapılırken üzerinde tek açıklık bulunan yapının ekranlama verimliliğinin ve yaklaşık olarak hesaplama yöntemlerinden birisi de aşağıda verilen Henry Ott'un formülüdür [15].

$$SE_{dB} = 20 \log \left(\frac{\lambda}{2L} \right) \quad (2.22)$$

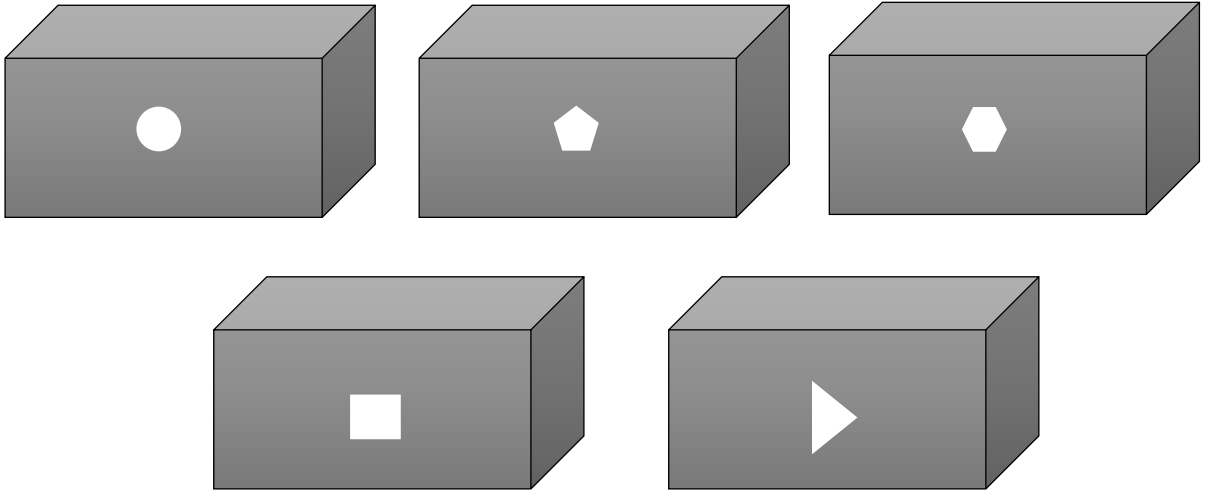
Bu formülde λ dalga boyunu, L ise açıklığın en uzun kenarını ifade etmektedir. Eşitlik (2.22)'in kullanımı ile yapılacak olan ekranlama verimliliği hesaplamaları kesin olamamaktadır. Çünkü bu formül ile sadece ince yapıların yaklaşık hesabı yapılabilmektedir.

3. EKLANLAMA ETKİNLİĞİ (VERİMLİLİĞİ) HESAPLAMALARI

Bu bölümde alüminyum maddeden oluşan dikdörtgen prizma ($a = d = 300$ mm, $b = 120$ mm boyutlarına ve 1,5 mm kalınlığa sahip) şeklindeki elektromanyetik ekranlama yapı üzerinde değişik açıklık olduğunda ekranlama etkinliği değişimi incelenmiştir. Tasarımı yapılan bu yapıların üzerine farklı şekillerde açıklık, birden fazla açıklık ve iris içeren açıklık yerleştirilerek ekranlama etkinliği hesaplamaları yapılmıştır.

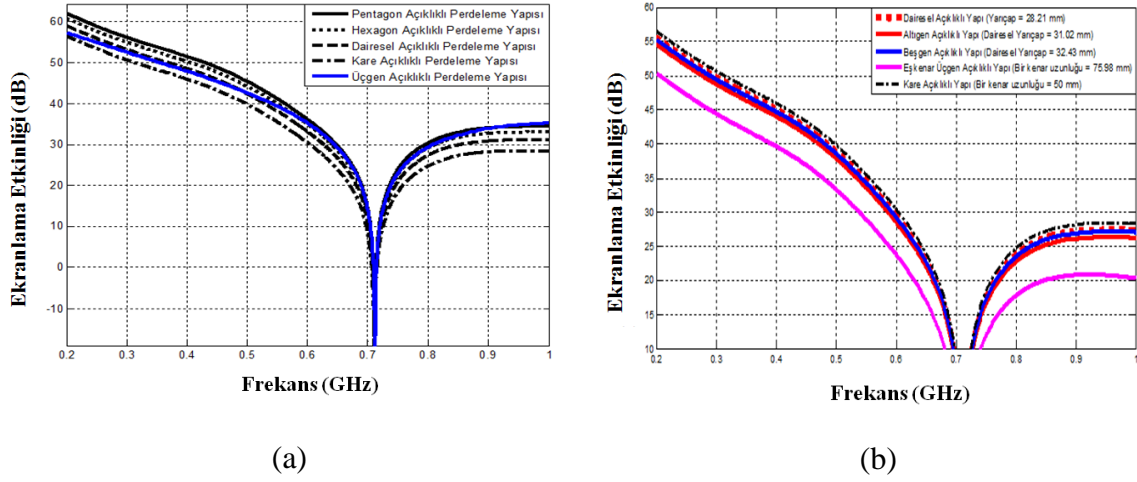
3.1 Farklı Açıklık Şekillerinin Ekranlama Etkinliği Hesabı

Elektromanyetik girişimlerden korunma yapıları üzerlerinde bir ya da birden daha fazla açıklık oluşturulması gerekebilmektedir. Oluşturulması gereken açıklık veya açıklıkların şekilleri beşgen, altıgen, üçgen, kare, dikdörtgen ve dairesel olabilir (Şekil 3.1). Bu kısımda farklı açıklık biçimlerinin ekranlama etkinliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 2.1'deki $a = d = 300$ mm, $b = 120$ mm boyutlarına ve 1,5 mm kalınlığa sahip dikdörtgen prizmanın ekranlama yapısı üzerine ayrı ayrı beşgen, altıgen, kare, üçgen ve dairesel açıklıklar yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1 300x120x300 mm boyutlarında üzerinde tek açıklık bulunan ekranlama yapıları

Üçgenin taban çapı, beşgen, altıgen ve çemberin çapları ile karenin bir kenar uzunluğu aynı olan açıklık şekillerinin ekranlama etkinlikleri CST Microwave programında Zaman Bölgesi Çözümleyicisi (Time Domain Solver) kullanılarak elde edilmiştir. Zaman Bölgesi Çözümleyicinin de, ağ tipi “Hexahedral” ve maksimum çözümleyici süresi, darbelerin sayısına (number of pulses: 15000) göre 15000 olarak ayarlanmıştır. CST programında çözümleyici ayarları yapıldıktan sonra her bir yapının ekranlama etkinlik hesaplamaları yapılmıştır. Yapıların elde edilen ekranlama etkinlik sonuçları ayrı ayrı incelendiğinde beklenildiği üzere aynı frekans aralığında her bir yapı için farklı ekranlama etkinlik değerleri gözlemlenmiştir. Şekil 3.2 (a)’da bulunan grafikte beşgen açıklıklı yapının ekranlama verimliliği siyah düz çizgiyle, altıgen açıklıklı yapının ekranlama verimliliği siyah noktalı çizgiyle, dairesel açıklıklı yapının ekranlama verimliliği siyah parçalı çizgiyle, kare açıklıklı yapının ekranlama verimliliği siyah noktalı-parçalı çizgiyle ve üçgen açıklıklı yapının ekranlama verimliliği düz mavi çizgi ile gösterilmiştir. Bu beş farklı açıklık şeklinin arasından ekranlama verimliliğini en iyi beşgen açıklığın sağladığı gözlemlenmektedir (Şekil 3.2 (a)).



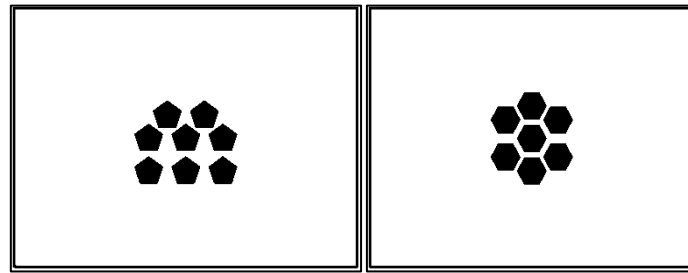
Şekil 3.2 Farklı açıklık şekillerinin aynı boyutlardaki ekranlama yapısı (300x120x300 mm) üzerinde ayrı ayrı (a) kenar ve çap uzunlukları (b) alanları aynı olarak oluşturulduğunda sağladıkları ekranlama verimlilikleri

Beşgen açıklığın ekranlama etkinliği incelendikten sonra, karşılaştırma yapılan bu beş açıklık şekli arasından en iyi sonucu veren altıgen açıklık şeklidir. Dahası, altıgen açıklığın sağlanmış olduğu ekranlama verimliliği beşgen açıklık için hesaplanmış olan ekranlama verimliliği sonuçlarına yakındır. Hesaplamalar sonucunda aralarında en fazla fark olduğu gözlemlenen açıklıklar beşgen ve kare açıklıklardır ve aralarında yaklaşık olarak 8 dB fark

vardır. Üçgen açıklıklı ekranlama yapısının ekranlama etkinliği hesaplama sonuçları 0 ile 1 GHz aralığında farklı frekanslarda diğer yapıların hesaplamaları ile karşılaştırıldığında zaman zaman daha iyi sonuçlar ve hatta rezonans frekansından sonra neredeyse beşgen açıklıklı yapının ekranlama etkinliği ile aynı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Yapılan hesaplamalara göre karşılaştırma yapılan bu beş açıklık arasından en kötü ekranlama etkinliği sağlayan açıklık şeklinin kare açıklık olduğu sonucuna varılmaktadır. Bunun sebebi olarak, kare açıklığın kenarı ile beşgen, altıgen ve dairesel açıklıkların çaplarının aynı seçilmesine rağmen sonuçlar incelendiğinde kare açıklığın elektromanyetik dalgaların geçmesine daha rahat izin veren daha fazla yüzey alanına sahip olması gösterilebilmektedir.

Şekil 3.2 (b)'de kapladıkları alanlar (2500 mm^2) aynı olan beşgen, altıgen, daire, kare ve üçgen açıklıkların elektromanyetik ekranlama yapısı üzerine ayrı ayrı yerleştirilmeleri sonucunda yapılan hesaplamalardan elde edilen verilerin karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Şekil 3.2 (b)'den de gözlemlendiği üzere aynı alanlara sahip açıklıklı yapıların sağlamış oldukları ekranlama etkinlikleri karşılaştırıldığında siyah noktalı çizgi ile ifade edilmiş olan $50 \times 50 \text{ mm}$ boyutundaki 2500 mm^2 alana sahip kare açıklığın daha iyi bir sonuç verdiği sonucuna varılmıştır. Belirtilmiş olan bu yapılar arasından en kötü ekranlama etkinliğine sahip yapının eflatun renkle belirtilmiş olan eşkenar üçgen açıklıklı yapının olduğu gözlemlenmektedir.

Elektromanyetik dalgalardan korunma yapıları üzerlerinde hangi açıklık şeklinin tercih sebebi olacağını belirlenmesi sırasında göz önüne alınabilecek tercih kriterlerinden birisi de yapı üzerine yerleştirilecek açıklığın geometrik olarak yerleştirilebilme kolaylığıdır.



Şekil 3.3 Ekranlama yapısı üzerindeki oluşturulabilecek farklı havalandırma açıklıkları

Aynı sayıdaki beşgen açıklık ile aynı sayıdaki altıgen açıklık bir ekranlama yapısının bir yüzeyine ayrı ayrı yerleştirilirken (Şekil 3.3) geometrik olarak düzgünlük göz önüne

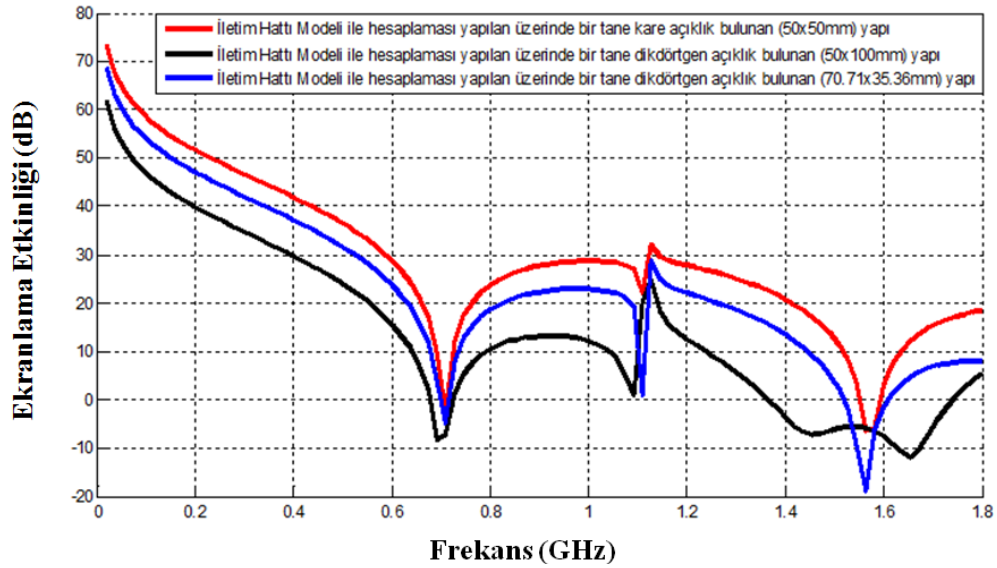
alınmalıdır. Şekil 3.3 incelendiğinde altıgen açıklığın geometrik olarak beşgen açıklığa göre sınırlı bir alana daha kolay bir biçimde düzgünce yerleştirilebileceği görülmektedir. Beşgen açıklığın, altıgen açıklıktan biraz daha iyi bir ekranlama verimliliği sağlamasına (Şekil 3.2) karşın sınırlı bir alana sahip yüzey üzerinde birçok açıklığın yerleştirilmesi gerekiyorsa geometrik olarak altıgen açıklıklar yan yana ve altı üslü daha iyi bir şekilde ve kolayca yerleştirilebilmelerinden ötürü tercih sebebi olabilmektedirler.

3.2 Tekli ve Birden Fazla Açıklıklı Ekranlama Yapıları

3.2.1 Tek Dikdörtgen Açıklıklı Dikdörtgen Prizma Ekranlama Yapısı ile Tek Kare Açıklıklı Dikdörtgen Prizma Ekranlama Yapısı

Ekranlama yapılması istenilen bölgeye özel olarak tasarım yapılması gerektiğinden kapalı kutu ekranlama yapıları (Şekil 2.1) üzerlerinde oluşturulabilecek farklı açıklık şekillerinden birisi de dikdörtgendir [4]. Dikdörtgen olarak oluşturulabilecek açıklık yapısı boyutlarına göre ekranlama etkinliğini değiştirebilmektedir.

Şekil 2.1’de bulunan 300x120x300 mm boyutlarındaki dikdörtgen prizma ekranlama yapısı üzerine yerleştirilen 50x50 mm boyutlarındaki bir kare açıklığın bir kenarı ile 50x100 mm boyutlarındaki dikdörtgen açıklığın W parametreleri eşittir. Bu iki farklı açıklığa sahip iki farklı ekranlama yapılarının etkinlikleri karşılaştırıldıklarında kare açıklıklı yapının etkinliği dikdörtgen açıklıklı yapıya göre daha fazla olmaktadır.



Şekil 3.4 Aynı özelliklerdeki ekranlama yapısı üzerinde ayrı ayrı oluşturulan kare ve dikdörtgen açıklıklı yapıların iletim hattı modeli ile yapılmış olan ekranlama verimlilik hesaplamalarının karşılaştırılması

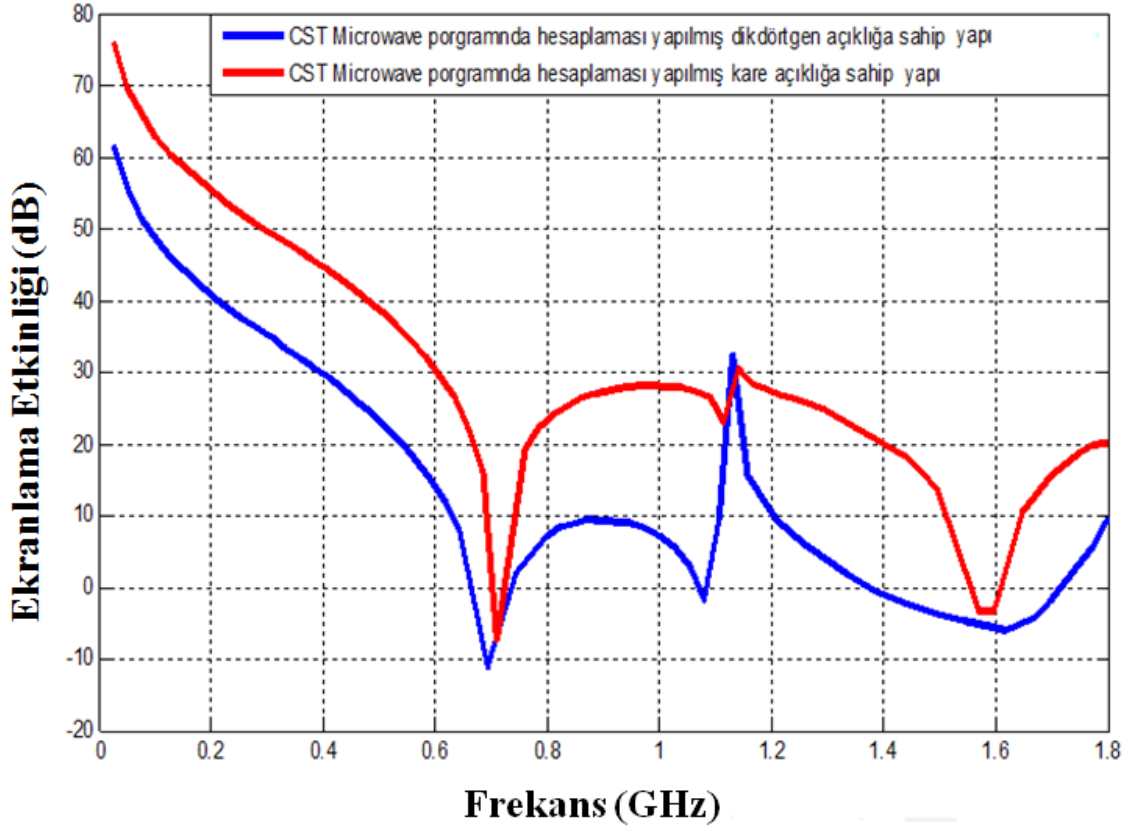
Şekil 3.4'teki hesaplamalar CST Microwave Studio programı kullanılarak yapılmıştır. Bu ve bundan sonraki üzerinde çalışılmış olan yapılar için CST programında Frekans Bölgesi Çözümleyicisi kullanılmıştır. Frekans Bölgesi Çözümleyicisinde, ağ tipi "Tetrahedrons" ve ağ yoğunluk kontrol özelliklerinden her dalga boyu adımı 4, en düşük adımların sayısı 10 olarak seçilmiştir. Şekil 3.4'te dikdörtgen açıklıklı yapının kare açıklıklı yapıya göre daha kötü etkinlik hesaplama sonuçları verdiği gözlemlenmektedir. Dikdörtgen açıklığa sahip yapının L uzunluğunun kare açıklıklı yapının L uzunluğundan daha fazla olmasından ötürü içeriye nüfuz eden elektromanyetik dalga daha fazladır. Bu hesaplamalara ek olarak dikdörtgen açıklık ve kare açıklıklı yapıların ekranlama verimlilikleri iletim hattı modeli ve CST Microwave Studio programı kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7).

Çizelge 3.1 İletim Hattı Modeli kullanılarak kare açıklıklı yapının ekranlama verimliliği hesabı

Frekans (GHz)	Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısının İletim Hattı Modeli Kullanılarak Hesaplanan Ekranlama Verimliliği	Dikdörtgen Açıklıklı (70.71x35.31mm) Ekranlama Yapısının CST Programı Kullanılarak Hesaplanan Ekranlama Verimliliği	Dikdörtgen Açıklıklı Ekranlama Yapısının İletim Hattı Modeli Kullanılarak Hesaplanan Ekranlama Verimliliği
0.46	39.04 dB	34.29 dB	26.6 dB
0.61	26.72 dB	21.69 dB	13.37 dB
0.98	28.67 dB	22.96 dB	12.63 dB
1.44	18.55 dB	7.38 dB	-6.66 dB
1.7	14.82 dB	6.54 dB	-7.24 dB

Şekil 3.4'te aynı en, ama farklı boy uzunluğuna sahip iki farklı açıklık (dikdörtgen ve kare) yapısına sahip aynı özelliklerdeki ekranlama yapıları için yapılmış olan hesaplama sonuçları 400 MHz frekansında incelendiğinde yaklaşık olarak 10 dB'lik bir fark olduğu gözlemlenmektedir. Bu farkın sebebi olarak dikdörtgen açıklığın boyutlarından ötürü içeriye daha fazla elektromanyetik dalga nüfuz etmesi olarak açıklayabiliriz.

Şekil 3.4'te iletim hattı modellemesi ile elde edilen sonuçlardan sonra aynı yapılar için CST Microwave programında ekranlama verimlilikleri hesaplamaları yapılmış ve Şekil 3.6'daki gibi belirtilen sonuçlar elde edilmiştir. Hem CST Microwave programında hem de oluşturulan iletim hattı modelinde ekranlama verimlilikleri hesaplaması yapılan iki farklı ekranlama yapısının (birisinde kare açıklık birisinde de dikdörtgen açıklık bulunmaktadır) sonuçları aynıdır. CST programı ile iletim hattı modelinin sonuçları karşılaştırıldığında iletim hattı modelinin oldukça doğru olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.5 Aynı özelliklerdeki ekranlama yapısı üzerinde ayrı ayrı oluşturulan kare ve dikdörtgen açıklıklı yapıların CST Microwave programı ile yapılmış olan ekranlama verimlilik hesaplamalarının karşılaştırılması

CST programında kare açıklık ve dikdörtgen açıklığa sahip iki farklı ekranlama yapısının yapılan hesaplamalar sonucunda sağlamış oldukları ekranlama verimlilikleri Şekil 3.5'te belirtildiği gibi 0 ile 1,8 GHz aralığında hesaplanmıştır. Yapılmış olan hesaplamalara göre kare açıklıklı yapının dikdörtgen açıklıklı yapıya göre (kare ve dikdörtgen açıklığın en uzunlukları eşittir ve boy uzunlukları farklıdır) daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Şekil 3.4'te İHM ile elde edilen sonuçlarla Şekil 3.5'te CST

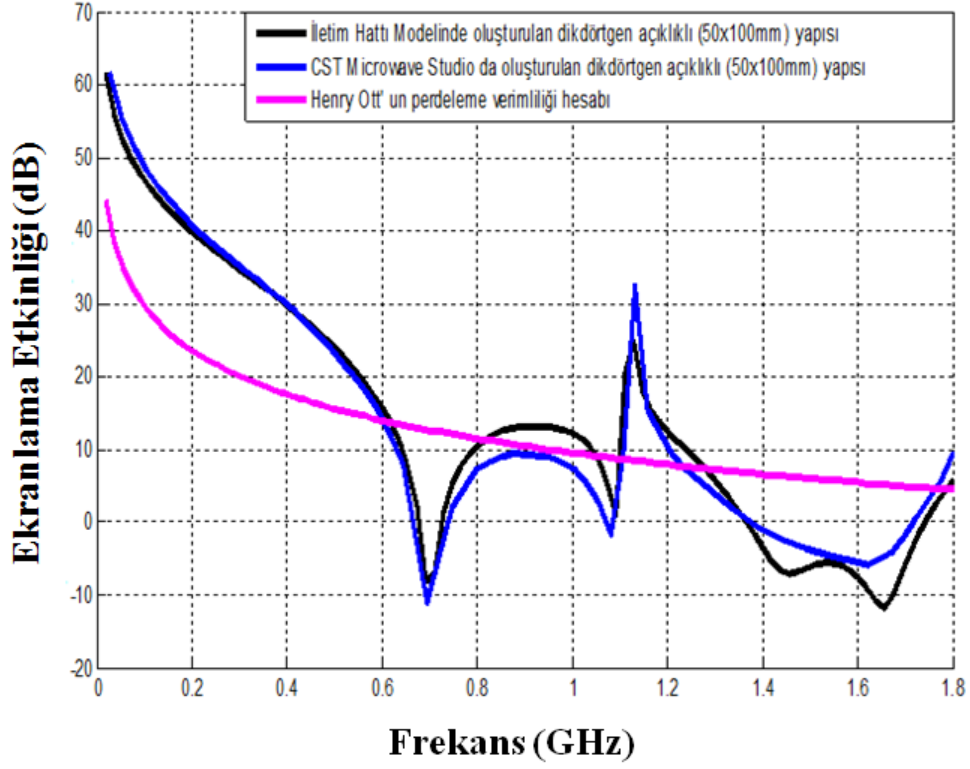
Microwave programında elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında CST programı ve İHM'nin benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

CST ve İHM ile ekranlama verimlilikleri hesaplanmış olan yapıların incelenmesinden sonra Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de CST ve İHM'nin kare ve dikdörtgen açıklıklı iki yapı için hesaplama sonuçları verilmiştir. Bu iki grafik incelendiğinde CST ve İHM'den elde edilen sonuçların uyduğu, ancak Henry Ott'un ekranlama verimliliğinin yaklaşık olarak hesabında kullanılan formülünün diğer iki hesaplama yönteminin (CST Microwave Studio ve İletim Hattı Modeli) sonuçları ile uyuşmadığı gözlemlenmiştir. Çünkü ekranlama verimliliği (etkinliği) için kullanılan Henry Ott'un formülü yaklaşık bir hesaplama içindir.

Çizelge 3.2 CST Programı kullanılarak kare ve dikdörtgen açıklıklı yapının ekranlama verimliliği hesabı karşılaştırması

Frekans (GHz)	Kare Açıklıklı	Dikdörtgen Açıklıklı
	Ekranlama Yapısının CST Programı Kullanılarak Hesaplanan Ekranlama Verimliliği	Ekranlama Yapısının CST Programı Kullanılarak Hesaplanan Ekranlama Verimliliği
0.46	41.51 dB	25.86 dB
0.61	29.52 dB	11.98 dB
0.98	28.07 dB	8.24 dB
1.44	17.88 dB	-2.33 dB
1.7	15.71 dB	-1.90 dB

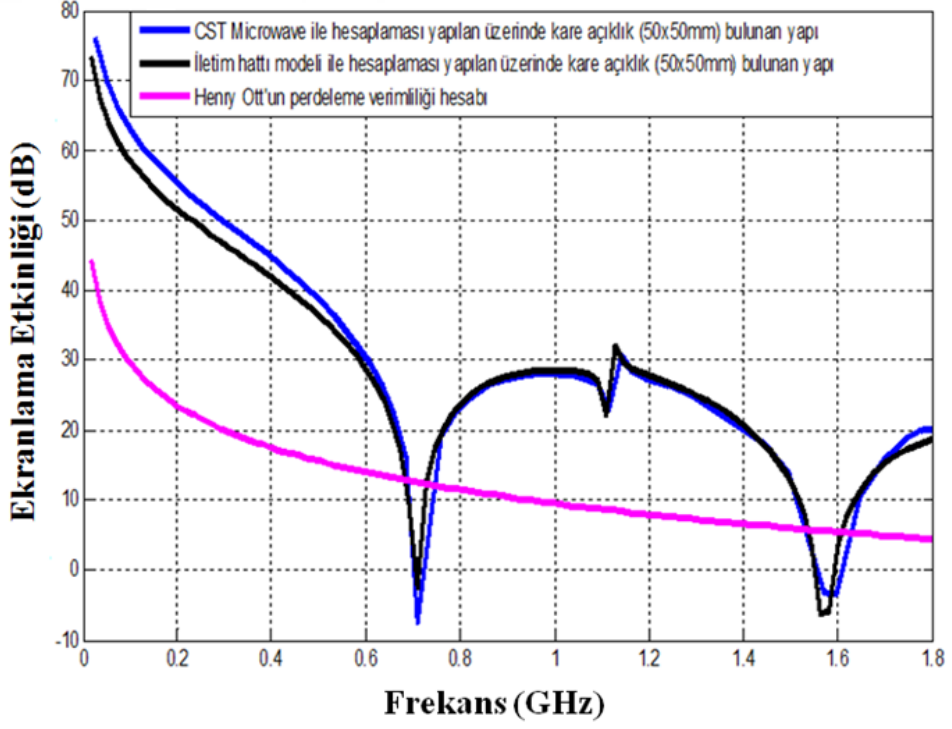
Hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerden belli frekanslarda örnekler alınıp Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3 oluşturulmuştur. Bu iki çizelge incelendiğinde CST Microwave programı ile oluşturulan İHM'nin verilerinin uyduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.6 Aynı özelliklerdeki ekranlama yapısı üzerine yerleştirilen dikdörtgen açıklıklı (50x100mm) sahip koruma yapılarının farklı yöntemler kullanılarak yapılan ekranlama verimliliği hesaplamaları

Çizelge 3.3 Farklı yöntemler kullanılarak dikdörtgen açıklıklı yapının ekranlama verimliliği hesabı

Frekans (GHz)	Dikdörtgen Açıklıklı Ekranlama Yapısının İletim Hattı Modeli Kullanılarak Hesaplanan Ekranlama Verimliliği	Dikdörtgen Açıklıklı Ekranlama Yapısının CST Programı Kullanılarak Hesaplanan Ekranlama Verimliliği	Dikdörtgen Açıklıklı Ekranlama Yapısının Henry Ott'un Formülü ile Hesaplanan Ekranlama Verimliliği
0.14	44.44 dB	45.89 dB	26.29 dB
0.2	39.8 dB	40.3 dB	23.52 dB
0.33	33.34 dB	33.33 dB	19.24 dB
0.95	8.92 dB	13.16 dB	10.03 dB
1.72	-1,66 dB	0.53 dB	4,8 dB



Şekil 3.7 Aynı özelliklerdeki ekranlama yapısı üzerine yerleştirilen kare açıklığa sahip koruma yapılarının farklı yöntemler kullanılarak yapılan ekranlama verimliliği hesaplamaları

Çizelge 3.4, İletim hattı modeli, CST Microwave ve Henry Ott'un ekranlama verimliliğinin yaklaşık hesabı için olarak kullanılan formülünden elde edilen veriler ile hazırlanmıştır ve Çizelge 3.4'teki veriler Şekil 3.7'de hesaplaması yapılmış ve grafik olarak ifade edilmiş sonuçlardan oluşmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde CST Microwave Studio programının ve İHM'nin sonuçlarının birbirleri ile uyuştukları söylenebilmektedir.

Çizelge 3.4 Farklı yöntemler kullanılarak kare açıklıklı yapının ekranlama verimliliği hesabı

Frekans (GHz)	Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısının İletim Hattı Modeli Kullanılarak Hesaplanan Ekranlama Verimliliği	Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısının CST Programı Kullanılarak Hesaplanan Ekranlama Verimliliği	Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısının Henry Ott'un Formülü ile Hesaplanan Ekranlama Verimliliği
0.51	35.85 dB	38.22 dB	15.91 dB
0.85	26.5 dB	26.52 dB	10.91 dB
0.93	28.42 dB	27.93 dB	10.2 dB
1.29	25.35 dB	24.9 dB	7.33 dB
1.7	14.82 dB	15.71dB	4.9 dB

Yapıların ekranlama etkinliklerinin hesaplamasından kullanılan Ott'un formülü, CST ve iletim hattı modelinde elde edilen sonuçlara göre çok detaylı ve gerçekçi sonuçlar veremediğinden CST ile iletim hattı modelinden elde edilen sonuçların güvenilirliğinin daha fazla olduğu sonucuna varılmaktadır.

3.2.2 Birden Fazla 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı

Gerçek hayatta ekranlama için tasarımı yapılan yapıların üzerlerinden tek bir açıklık yerine birden fazla sayıda açıklık yer almak zorundadır. Çünkü koruma yapısı içerisinde çalışan elektronik cihazların yaymış oldukları ısıların korunma yapısı dışarısına aktarımı mümkün olan en kısa sürede olması gerekmektedir. Bu sebepten ötürü elektromanyetik girişimlerden korunma yapıları üzerlerinde birden fazla sayıda açıklık bulunması genellikle bir zorunluluktur. Bu kısımda çoklu kare açıklıklı korunma yapısının incelenmesine ve sonuçlarına yer verilmiştir.

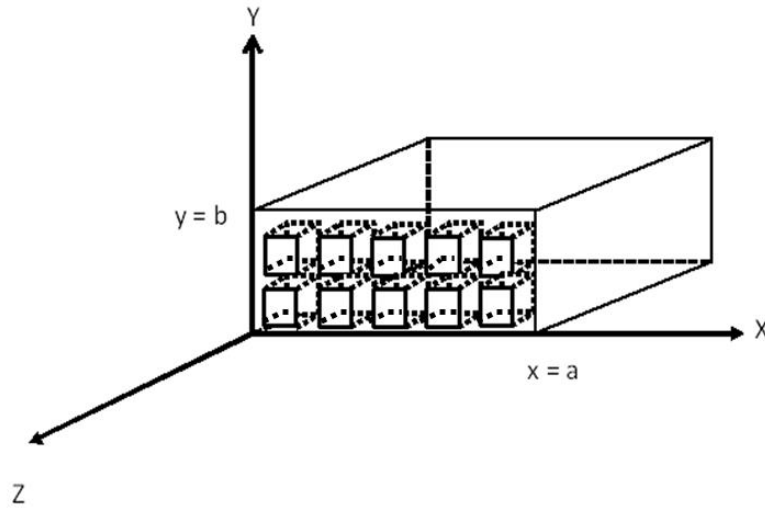
Oluşturulacak çoklu açıklıklı yapılarının (Şekil 3.8) iletim hattı modeli ile ekranlama verimlilik hesaplamalarının yapılabilmesi için tek açıklığa sahip yapılar için oluşturulmuş olan formüllerin yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda Eşitlik (2. 8) ve Eşitlik (2.9)'da belirtilmiş olan formüllerin güncellenmeleri gerekmektedir. Belirtilen formüllerin güncellenmesinin sebebi olarak elektromanyetik girişimlerden korunma için

tasarlanmış olan bir yapının aynı yüzeyine eklenen birden fazla açıklıkların iletim hattı modeli oluşturulurken birbirlerine paralel olarak gelmeleri ve bütün açıklıkların tek bir açıklık olarak düşünülüp çoklu açıklıkların tek açıklık gibi ifade edilmesi gerekliliği gösterilebilir.

Eşitlik (2.8) ve Eşitlik (2.9) üzerlerinde yapılması gereken yeni düzenlemenin tekli açıklık için hazırlanmış olan karakteristik empedans formülünün çoklu açıklıkların (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9) tek açıklık gibi ifade edilebileceği biçimde düzenlenmesi gerekmektedir (Eşitlik 3.1).

$$Z_{0s\text{çoklu}} = \frac{WL}{qk} mn Z_{0s} \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1), çoklu açıklıklı ekranlama yapıları için yeniden düzenlenen açıklığın karakteristik empedansını ifade etmektedir ve çoklu açıklıkların tek bir açıklık gibi ifade edilebilmesini sağlar. W ve L , her bir açıklığın boyutunu ifade ederken q ve k ise açıklıkların tek olarak ele alınmasından oluşan tek açıklık şeklini ifade etmektedir. m ve n parametreleri ise, yapının aynı yüzeyinde bulunan satır ve sütun sayısını belirtmektedirler.



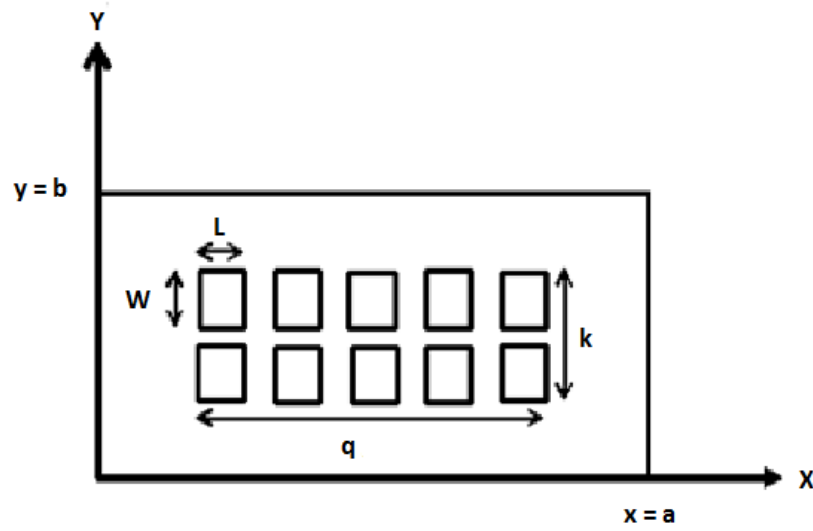
Şekil 3.8 Üzerinde birden fazla açıklık bulunan ekranlama yapısı

Bu işlemten sonra tek açıklık olarak ifade edilip dönüşümü yapılan çoklu açıklıkları iletim hattı modelinde tek açıklık olarak ifade edilirken birbirlerine paralel olarak devreye eklenmeleriyle Eşitlik (3.2) yazılabilir.. Eşitlik (3.2)'de bulunan $Z_{0s\text{çoklu}}$, birden fazla açıklığın tek bir açıklıkmış gibi ifade edilmesiyle oluşan yeni açıklığın içerisindeki karakteristik empedansı ifade etmektedir. Z_{ap} , aynı yüzeyde bulunan açıklıkların

birbirlerine paralel olmalarından ve tek bir açıklıkmiş gibi ifade edilmelerinden dolayı m ve n parametrelerine bölünmektedir (m : satır sayısı, n : sütun sayısı). $Z_{0s\text{çoklu}}$ ise birden fazla açıklığın tek açıklık olarak ele alınmasından sonra hesaplanan arada küçük alüminyum plakalarında bulunduğu karakteristik empedans hesabıdır.

$$Z_{ap} = \frac{1}{(mn)} \frac{1}{2} \frac{l}{a} j Z_{0s\text{çoklu}} \tan \frac{k_0 q}{2} \quad (3.2)$$

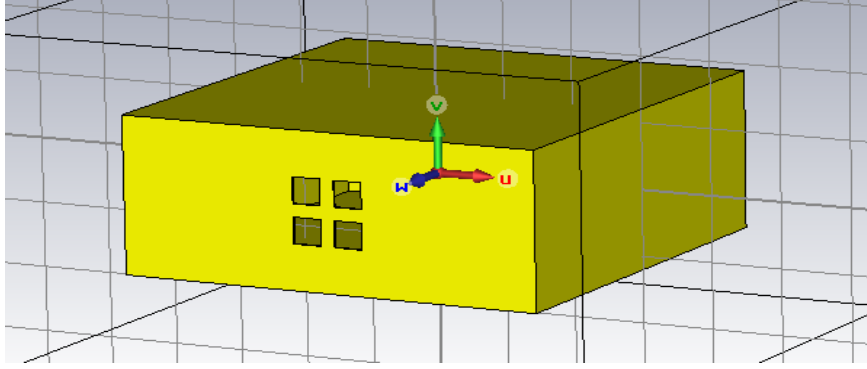
Eşitlik (3.1) ve Eşitlik (3.2)'in bulunması ile birden fazla açıklıklı yapıların ekranlama verimliliklerinin iletim hattı modeli ile hesaplanması mümkün olur.



Şekil 3.9 Çoklu açıklığa sahip elektromanyetik girişimlerden korunma için tasarlanan yapının z eksenindeki görüntüsü

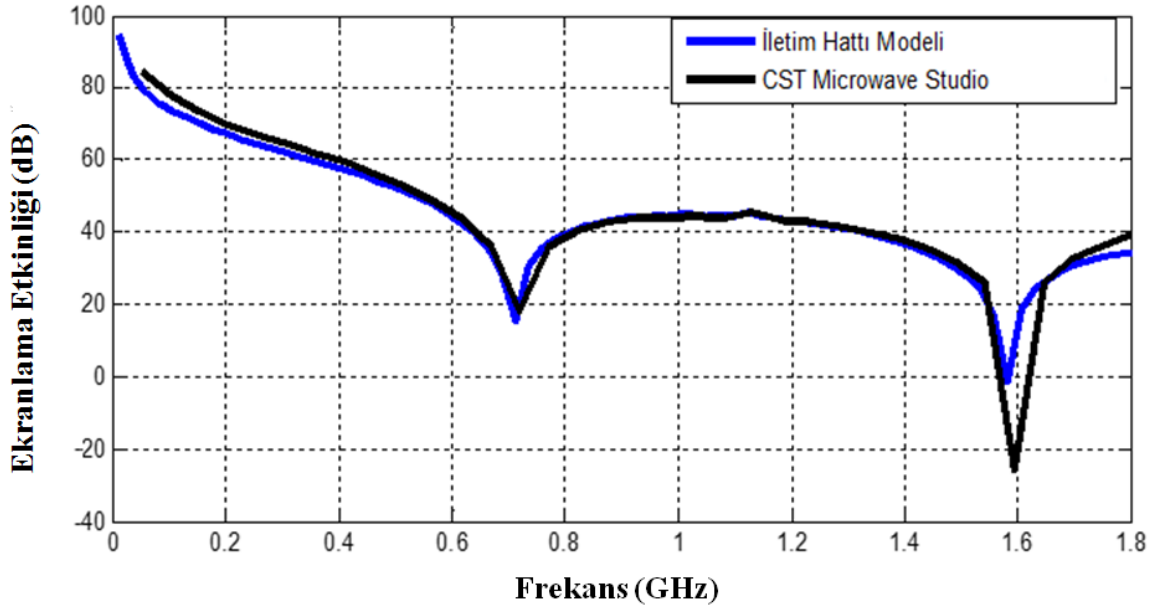
3.2.2.1 Üzerinde Dört Tane 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklık Bulunan 1,5 mm Duvar Kalınlığına Sahip Dikdörtgen Prizma Şeklindeki Ekranlama Yapısı

Dikdörtgen prizma şeklindeki ($a = d = 300$ mm, $b = 120$ mm boyutlarına ve 1,5 mm kalınlığına sahip) ekranlama yapısının bir yüzeyi üzerine dört tane kare biçiminde açıklık yerleştirilmiştir ve yerleştirilen bu açıklıklarının her birinin bir kenar uzunluğu 20 mm ve aralarındaki mesafe 10 mm'dir.



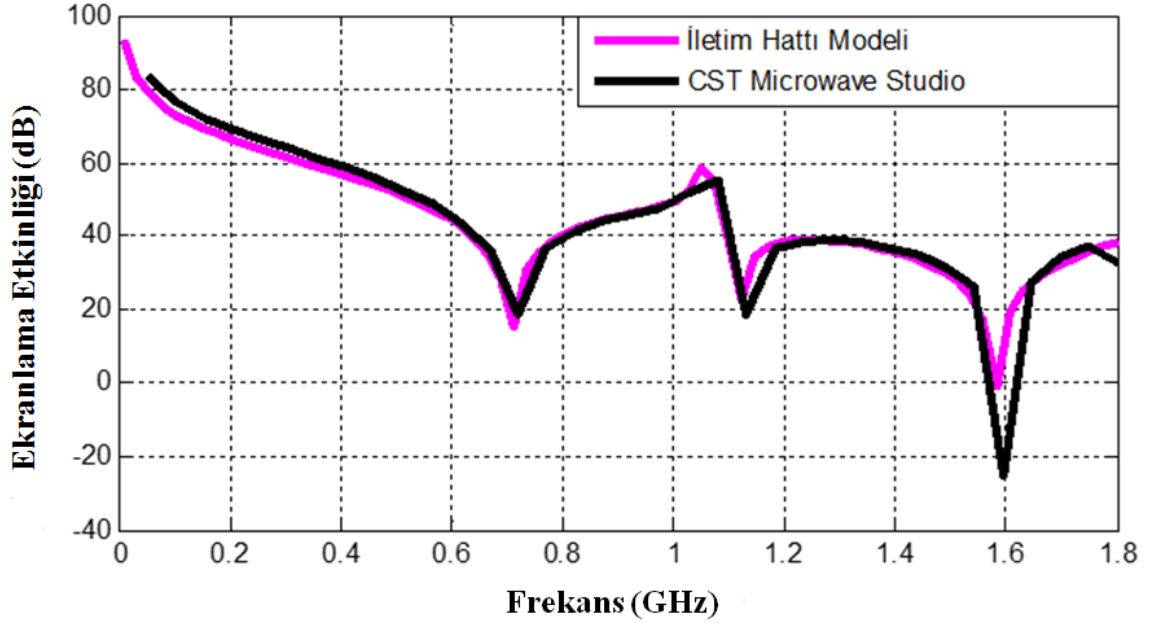
Şekil 3.10 Üzerinde dört tane kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı

Şekil 3.10’da bulunan yapı için ekranlama verimliliği hesaplamaları kutu içerisinde çeşitli noktalarda yapılmış ve Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’te olduğu gibi elde edilen sonuçlar grafikler ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde CST Microwave Studio ve İHM ile oluşturulan yapının eşdeğer devresinden elde edilen hesaplama sonuçlarının birbirleri ile uyduğu gözlemlenmiştir.



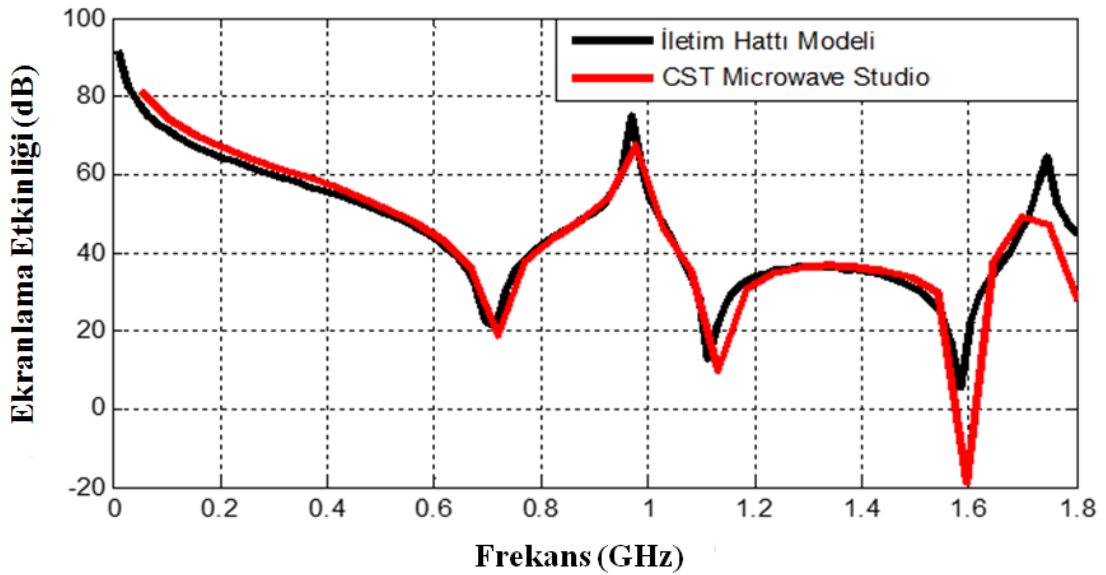
Şekil 3.11 Üzerinde dört tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

Ekranlama yapısının tam orta noktasında hesaplaması yapılan ekranlama verimliliğinden sonra yapının ön yüzeyinde bulunan açıklığa biraz daha yakın bir noktada ekranlama verimliliği hesaplaması yapılmış ve Şekil 3.12’de belirtildiği gibi ifade edilmiştir.



Şekil 3.12 Üzerinde dört tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+10 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

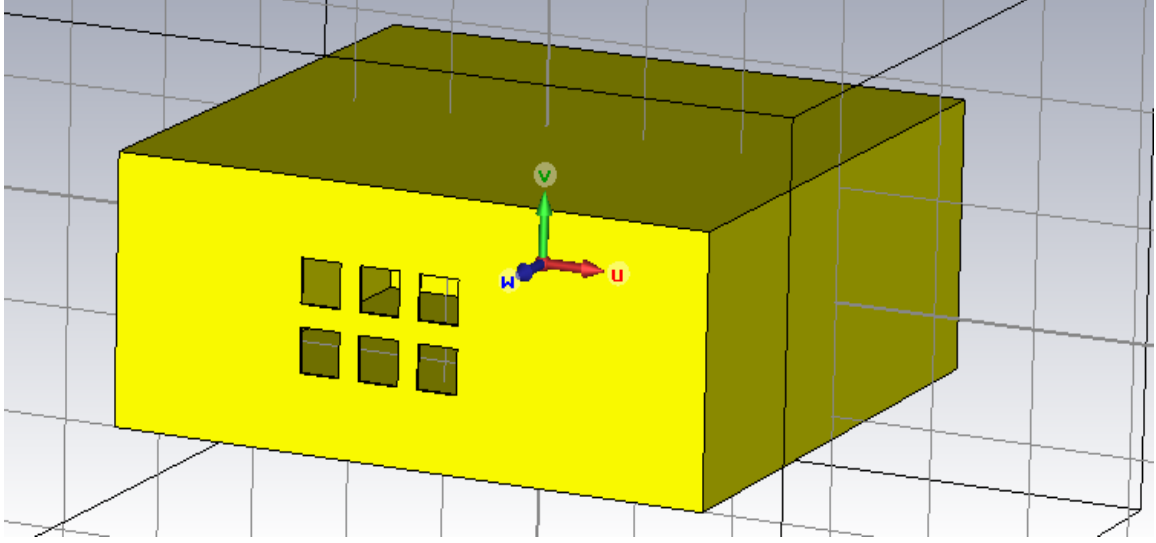
Şekil 3.12 incelendiğinde hesaplama yapılan noktanın yeri değiştirildiğinde yapının oluşturulan eşdeğer devresi üzerinden hesaplanan ekranlama verimliliği ve CST Microwave Studio programı ile yapılan hesaplamaların birbirleri ile uyduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.13 Üzerinde dört tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30)$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

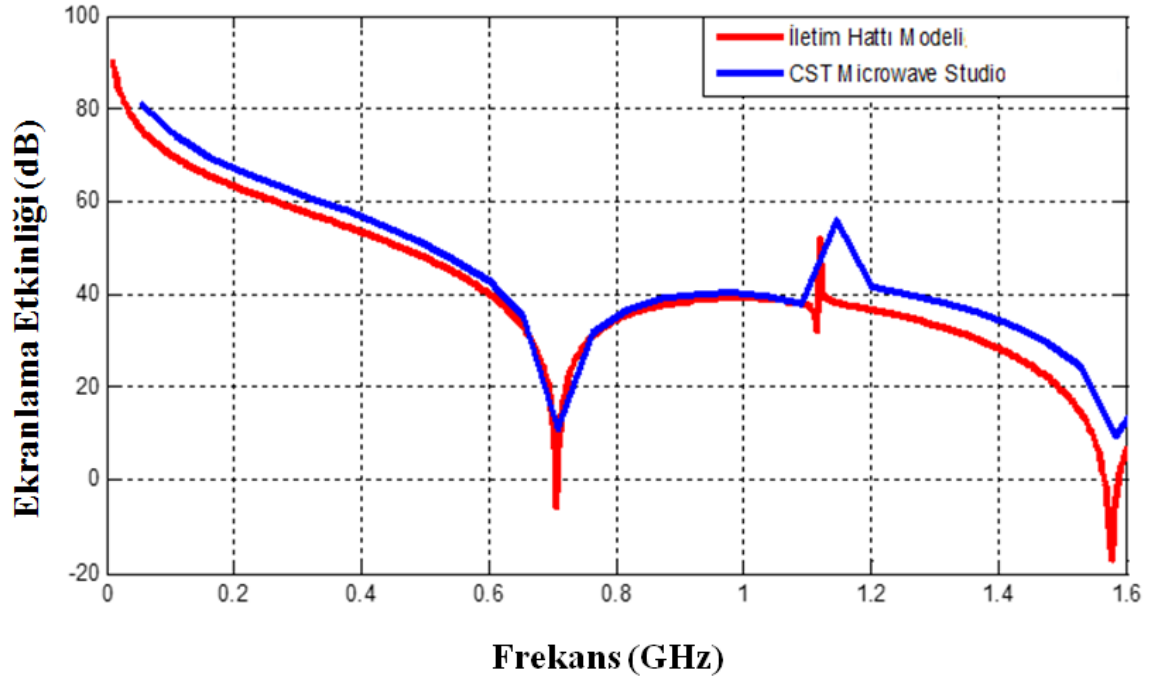
3.2.2.2 Üzerinde Altı Tane 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklık Bulunan 1,5 mm Duvar Kalınlığına Sahip Dikdörtgen Prizma Şeklindeki Ekranlama Yapısı

Dikdörtgen prizma şeklindeki ($a = d = 300$ mm, $b = 120$ mm boyutlarına ve ve kutunun kalınlığı 1,5 mm) ekranlama yapısının bir yüzeyi üzerine altı tane kare biçiminde açıklık yerleştirilmiştir ve yerleştirilen bu açıklıklarının her birinin bir kenar uzunluğu 20 mm ve aralarındaki mesafe 10 mm'dir.

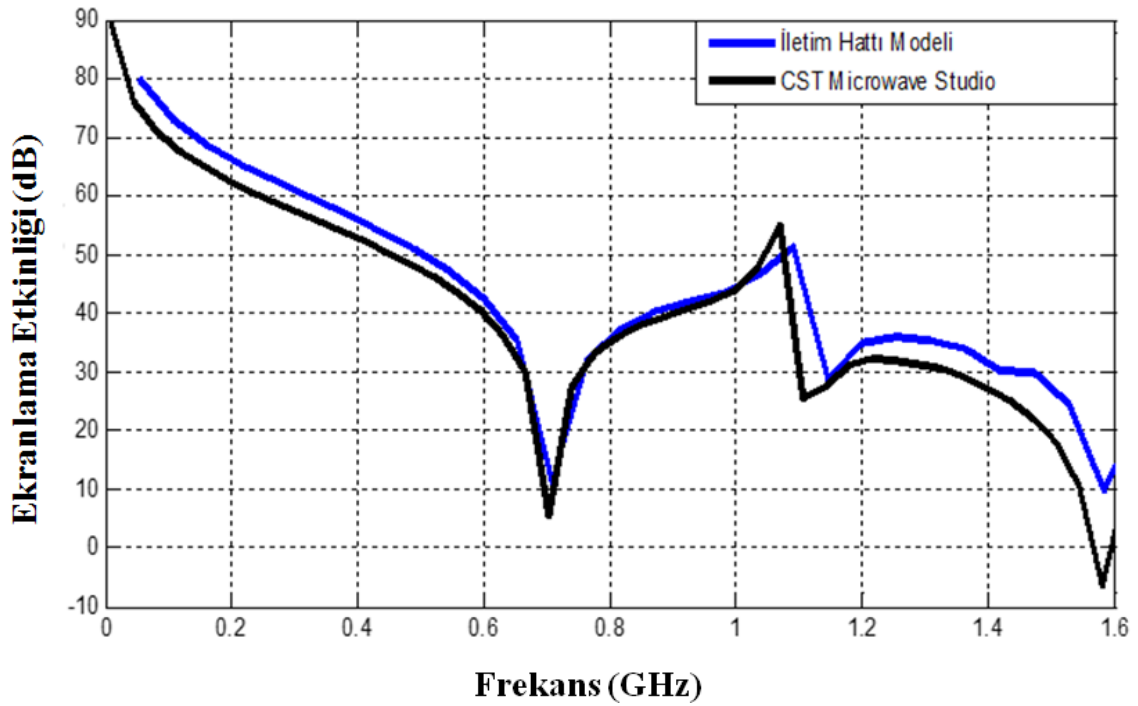


Şekil 3.14 Üzerinde altı tane kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı

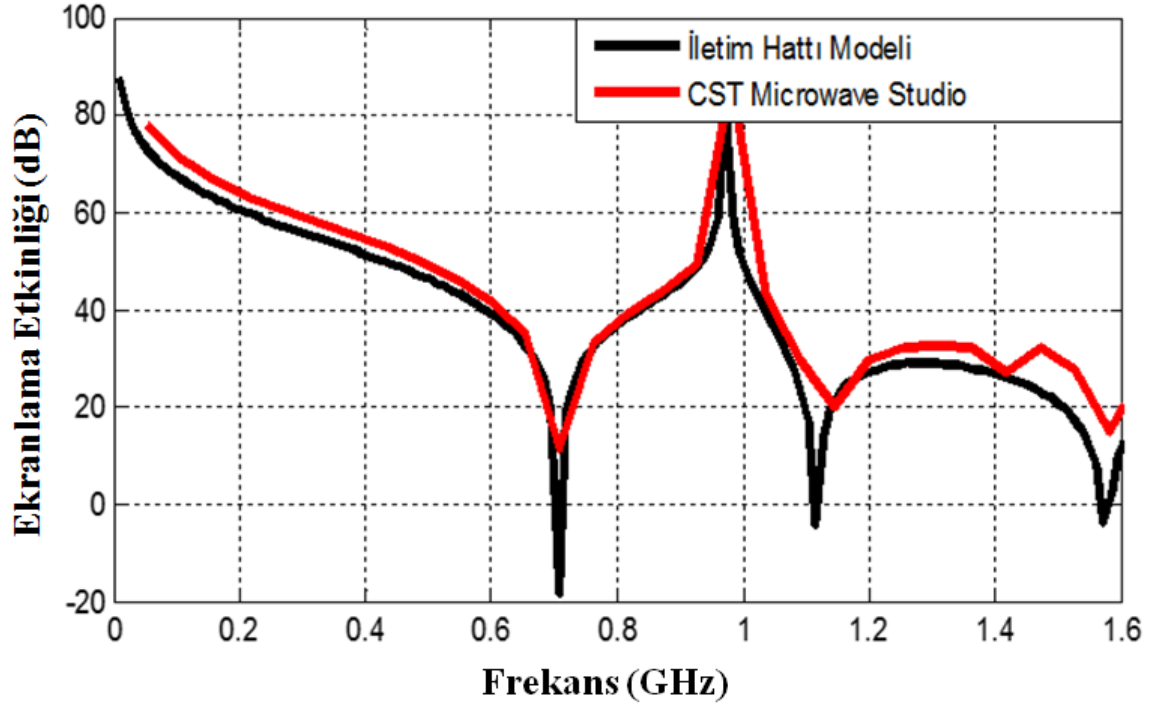
Şekil 3.14'te bulunan ekranlama yapısı için farklı noktalarda ekranlama verimlilikleri Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında kullanılmış olan iki farklı hesaplama yönteminin sonuçlarının birbirleri ile uyuştukları gözlemlenmiştir



Şekil 3.15 Üzerinde altı tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması



Şekil 3.16 Üzerinde altı tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+10 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

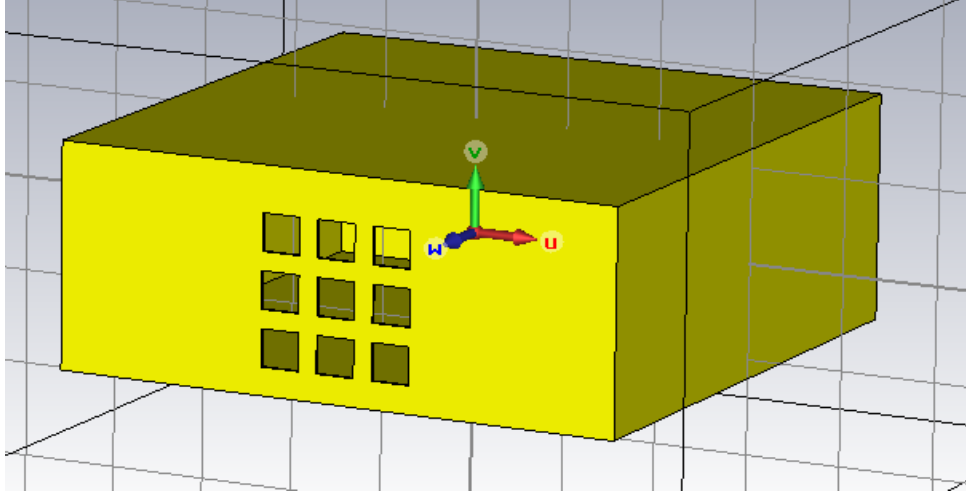


Şekil 3.17 Üzerinde altı tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

CST Microwave programında rezonans frekanslarının hesaplanması sırasında bazı farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklı değer hesaplamalarının sebebi program içerisinde kullanılan frekans tanım bölgesi çözümleyicisi ile çözüm yapılırken alınan örnek miktarı olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların hesaplanması ve bu sonuçların grafiklerinin oluşturulması sırasında program içerisinde en uygun örnekleme miktarının seçilmesine özen gösterilmiştir.

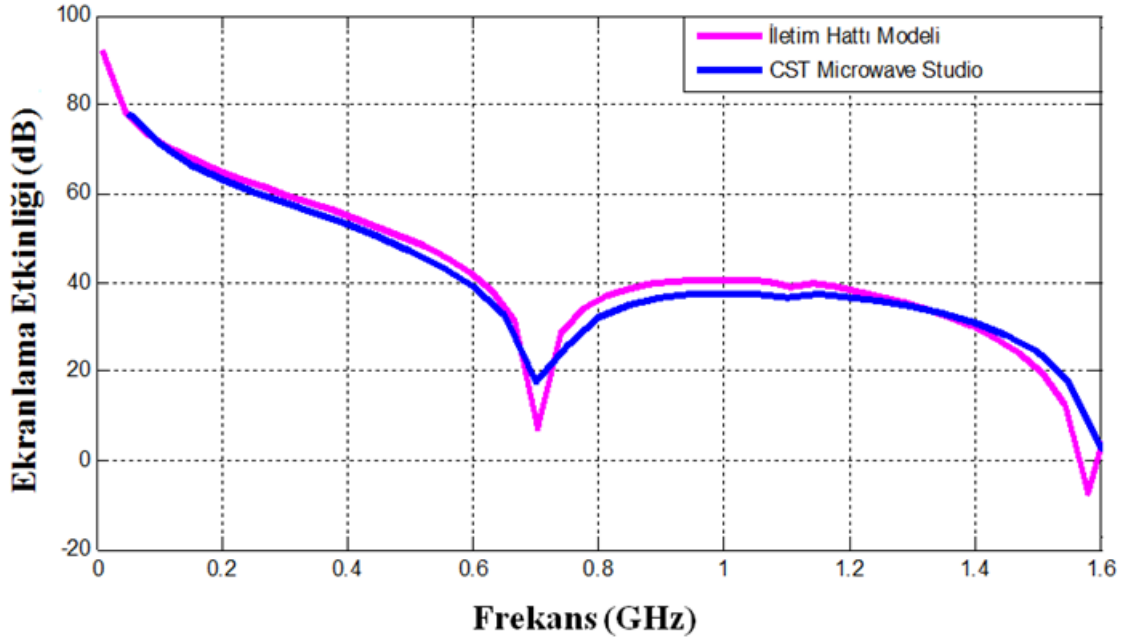
3.2.2.3 Üzerinde Dokuz Tane 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklık Bulunan 1,5 mm Duvar Kalınlığına Sahip Dikdörtgen Prizma Şeklindeki Ekranlama Yapısı

Dikdörtgen prizma şeklindeki ($a = d = 300$ mm, $b = 120$ mm boyutlarına ve kutunun kalınlığı 1,5 mm) ekranlama yapısının bir yüzeyi üzerine dokuz tane kare biçiminde açıklık yerleştirilmiştir (Şekil 3.18). Yerleştirilen bu açıklıklarının her birinin bir kenar uzunluğu 20 mm ve aralarındaki mesafe 10 mm'dir.



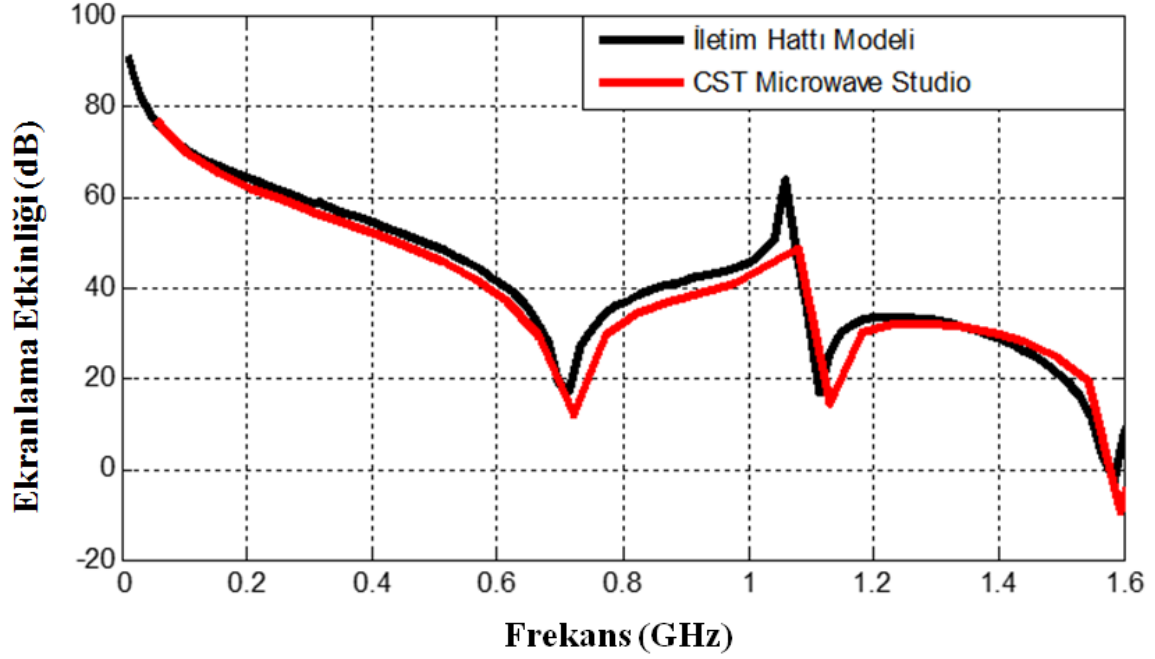
Şekil 3.18 Üzerinde dokuz tane kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı

Şekil 3.18’de bulunan ekranlama yapısı için kutu içerisinde farklı noktalarda ekranlama verimlilikleri Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında kullanılmış olan iki farklı hesaplama yönteminin sonuçlarının birbirleri ile uyduğu gözlemlenmiştir.

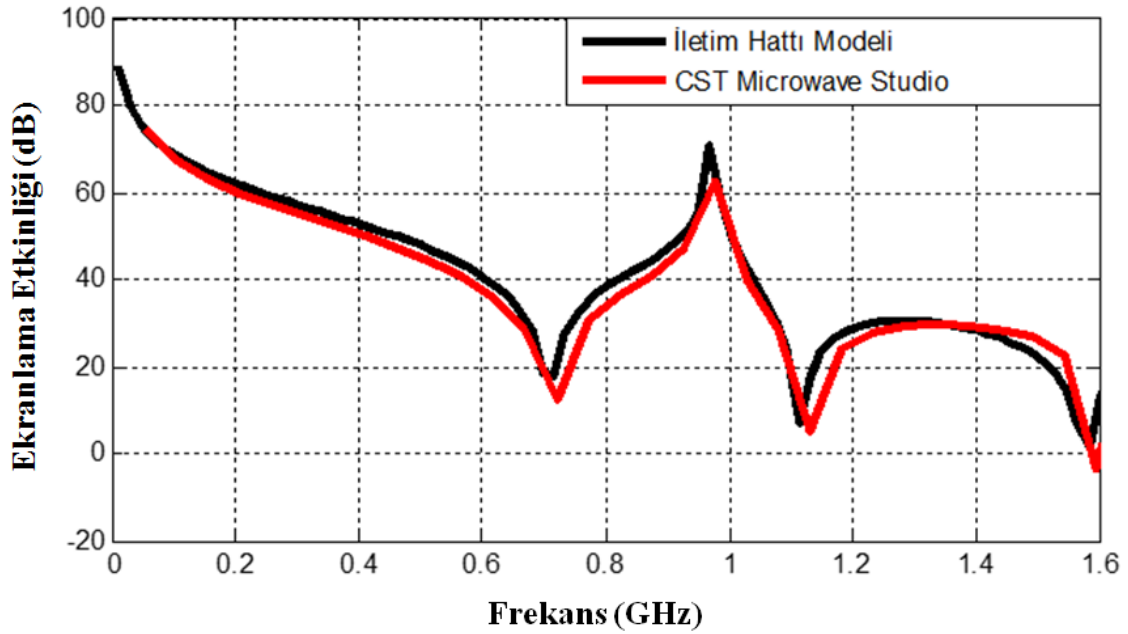


Şekil 3.19 Üzerinde dokuz tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

Şekil 3.19’da CST Microwave Studio ve iletim hattı modeli ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Elde edilen bu veriler incelendiğinde iki yöntem sonuçlarının iyi bir biçimde uyduğu, grafiklerin özelliklerinin benzer olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.20 Üzerinde dokuz tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+10 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

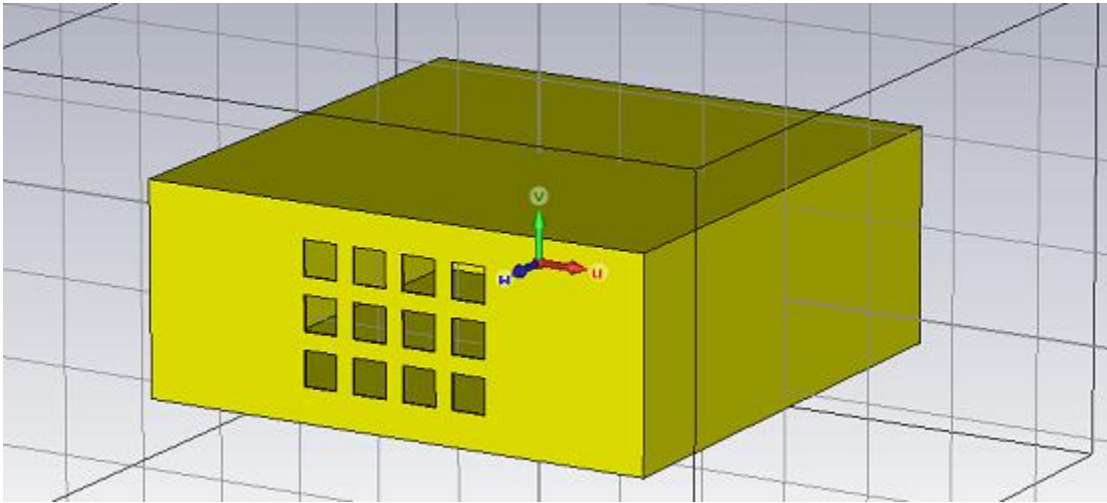


Şekil 3.21 Üzerinde dokuz tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

CST Microwave programında rezonans frekanslarının hesaplanması sırasında bazı farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklı değer hesaplamalarının sebebi program içerisinde kullanılan frekans tanım bölgesi çözümleyicisi ile çözüm yapılırken alınan örnek miktarı olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların hesaplanması ve bu sonuçların grafiklerinin oluşturulması sırasında program içerisinde en uygun örnekleme miktarının seçilmesine özen gösterilmiştir.

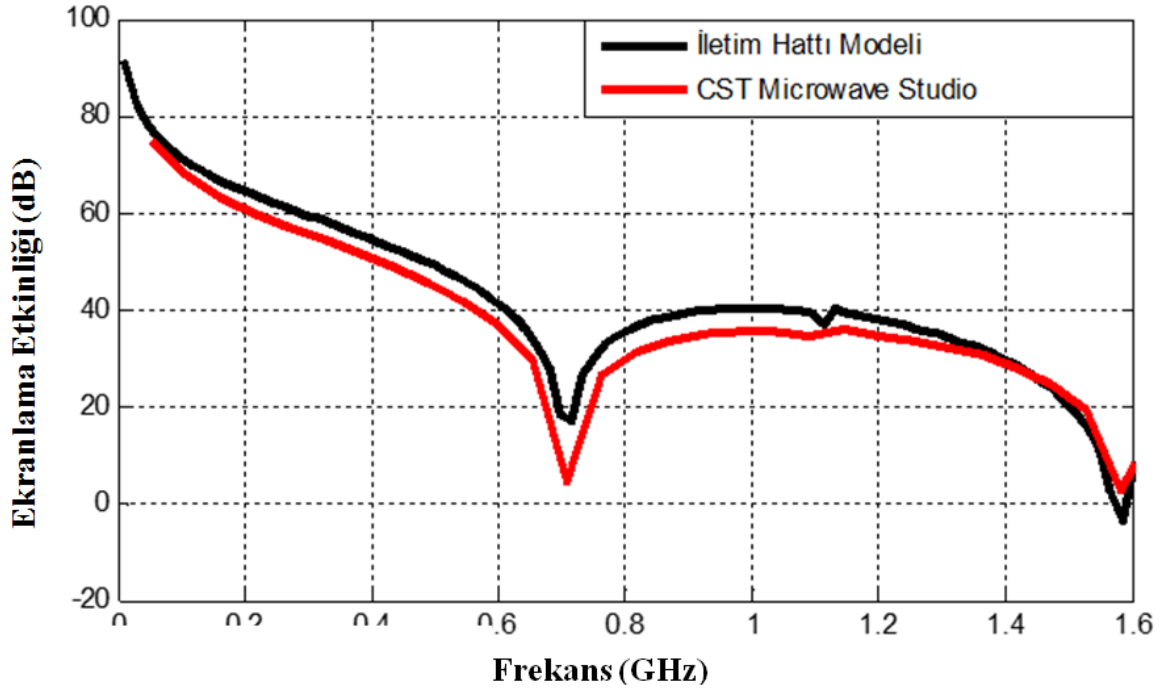
3.2.2.4 Üzerinde On iki Tane 20x20 mm Boyutlarında Kare Açıklık Bulunan 1,5 mm Duvar Kalınlığına Sahip Dikdörtgen Prizma Şeklindeki Ekranlama Yapısı

Şekil 3.22’de gösterildiği üzere ($a = 300$ mm, $b = 120$ mm ve $d = 300$ mm) dikdörtgen prizma biçiminde üzerinde on iki tane kare açıklık bulunan bir ekranlama yapısı oluşturulmuştur. Bu ekranlama yapısının maddesi alüminyum ve gelen alan düzlem dalga olarak belirlenmiştir. Yapılan işlemlerden sonra İHM ve CST Microwave programı ile yapının ekranlama verim hesabı yapılmıştır.

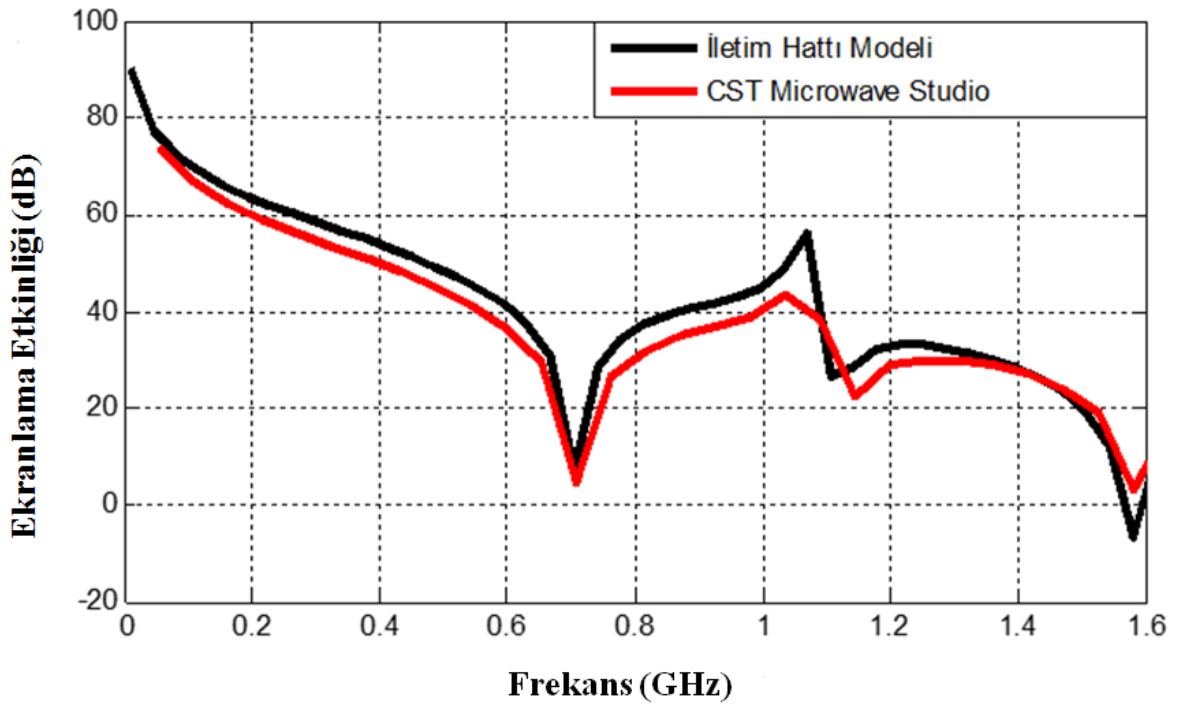


Şekil 3.22 Üzerinde on iki tane kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı

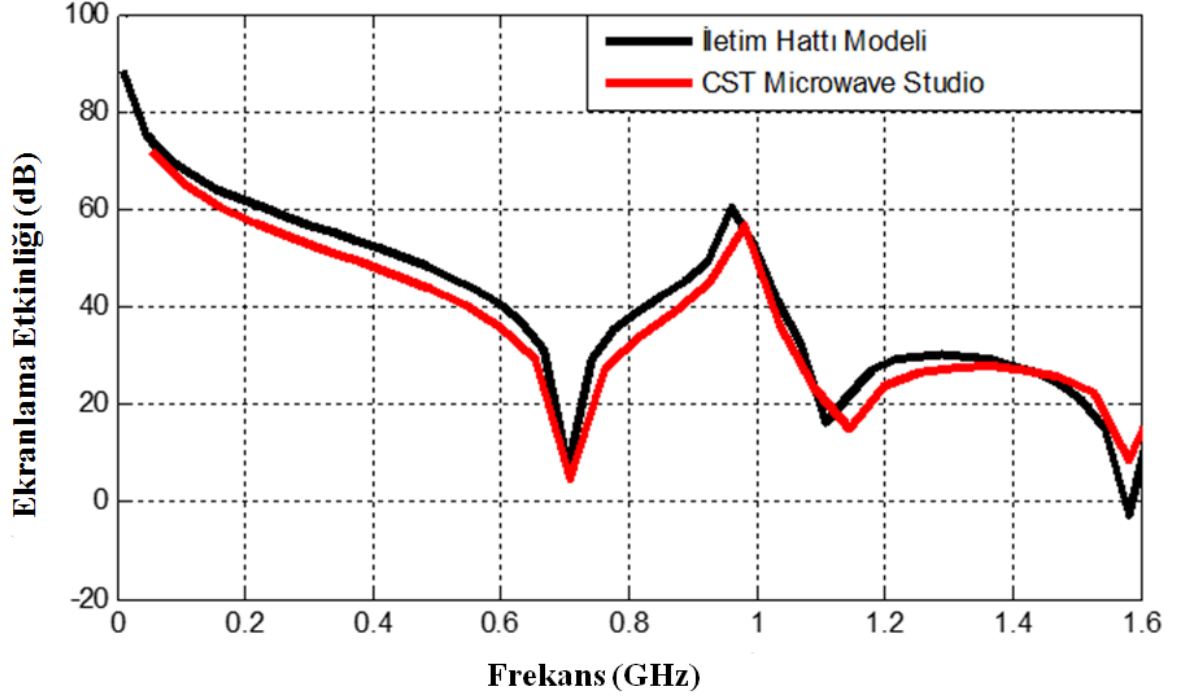
Yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde İHM ve CST Microwave Studio programlarının sonuçları birbirleri ile uyumaktadır.



Şekil 3.23 Üzerinde on iki tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması



Şekil 3.24 Üzerinde on iki tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+10 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması



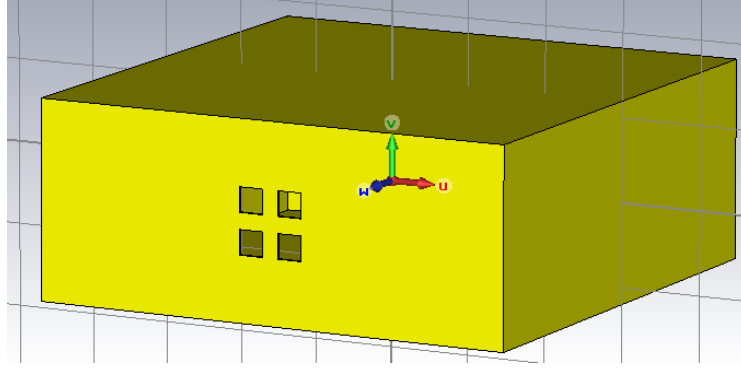
Şekil 3.25 Üzerinde on iki tane kare açıklık bulunan ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30$ mm) noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

Şekil 3.23, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de ifade edilmiş olan grafikler incelendiğinde CST Microwave Studio programından ve İHM ile elde edilen ekranlama verimliliği hesaplama değerlerinin birbirleri ile iyi bir biçimde uyduştukları gözlemlenmektedir.

3.2.3 Birden Fazla 15x15 mm ve 25x25 mm Boyutlarında Kare Açıklıklı Ekranlama Yapıları

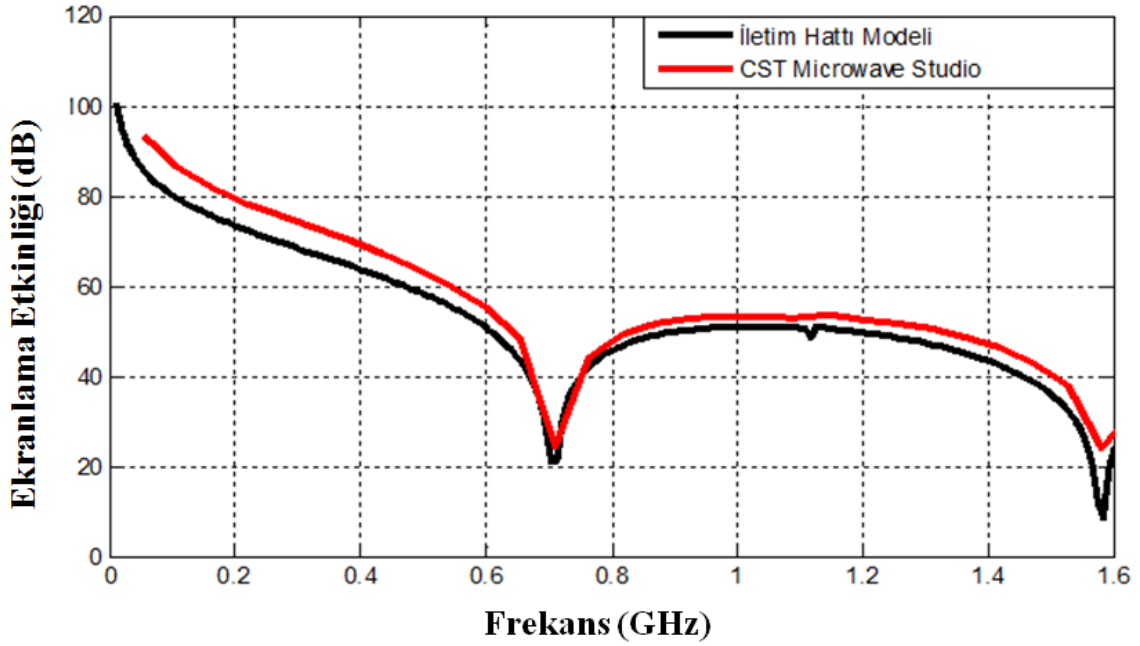
Bir önceki kısımda aralarında 10 mm olan birden fazla 20x20 mm boyutlarına kare açıklıklara sahip dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapıları tasarlanmış ve oluşturulmuş olan yapıların ekranlama etkinlikleri hesaplanmıştır. Bu kısımda ise, kare açıklığın boyutları, aralarındaki mesafeler değiştirilmiş ve oluşturulan yeni yapılar için ekranlama etkinlik hesaplamaları yapılmıştır.

İlk olarak aralarında 10 mm mesafe bulunan 15x15 mm boyutlarına sahip olan kare açıklıktan dört tane oluşturulmuş ve $a = 300$ mm, $b = 120$ mm, $d = 300$ mm, $t = 1,5$ mm boyutlarına sahip olan bir ekranlama yapısı üzerine yerleştirilmişler (Şekil 3.26).



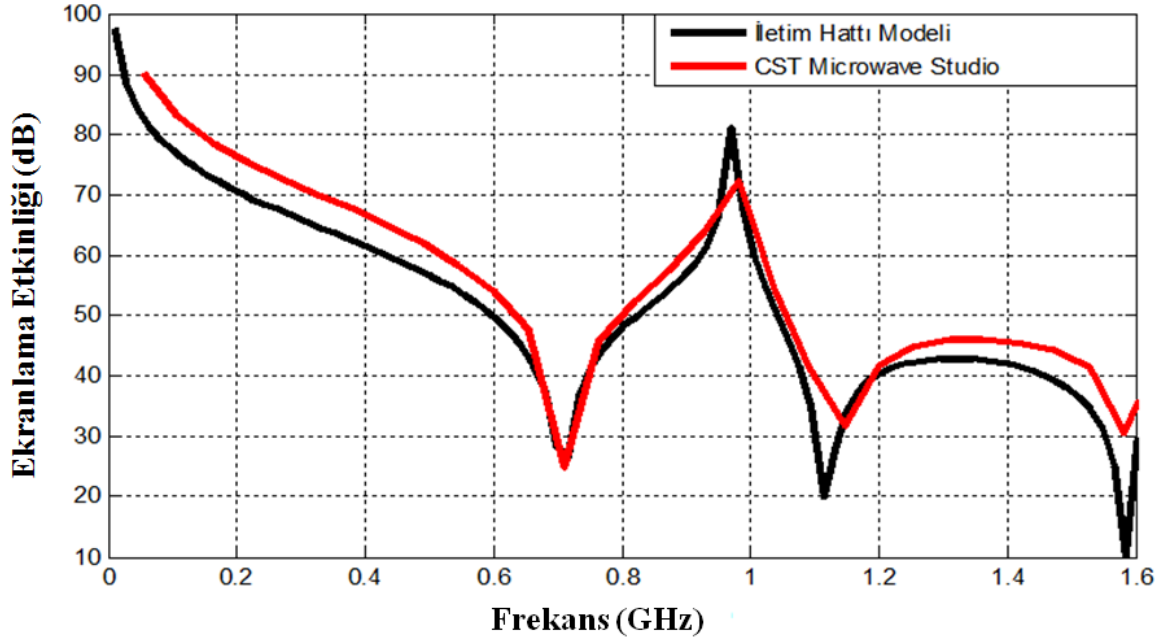
Şekil 3.26 Üzerinde dört tane 15x15 mm boyutlarında kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı

Bu işlemten sonra yapının (Şekil 3.26) ekranlama etkinliği CST Microwave Studio ve İHM ile kutunun tam ortasında ve kutunun tam orta noktasından açıklığa doğru 30 mm ilerideki bir noktada ayrı ayrı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.27’de olduğu gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.27 Üzerinde dört tane 15x15 mm boyutlarında kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

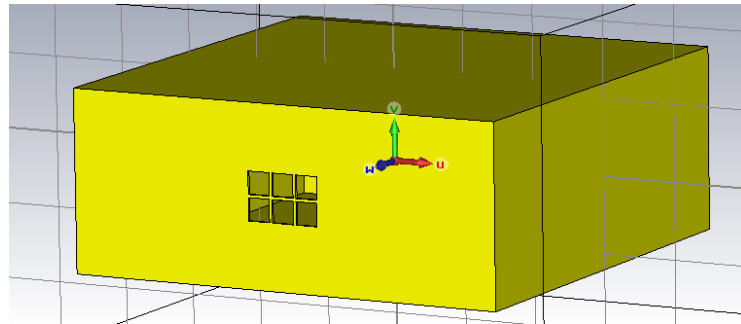
Şekil 3.27’de bulunan grafik incelendiğinde iki farklı ekranlama verimliliği hesaplama yönteminin birbirlerine yakın ve benzer sonuçlar verdikleri gözlemlenmektedir.



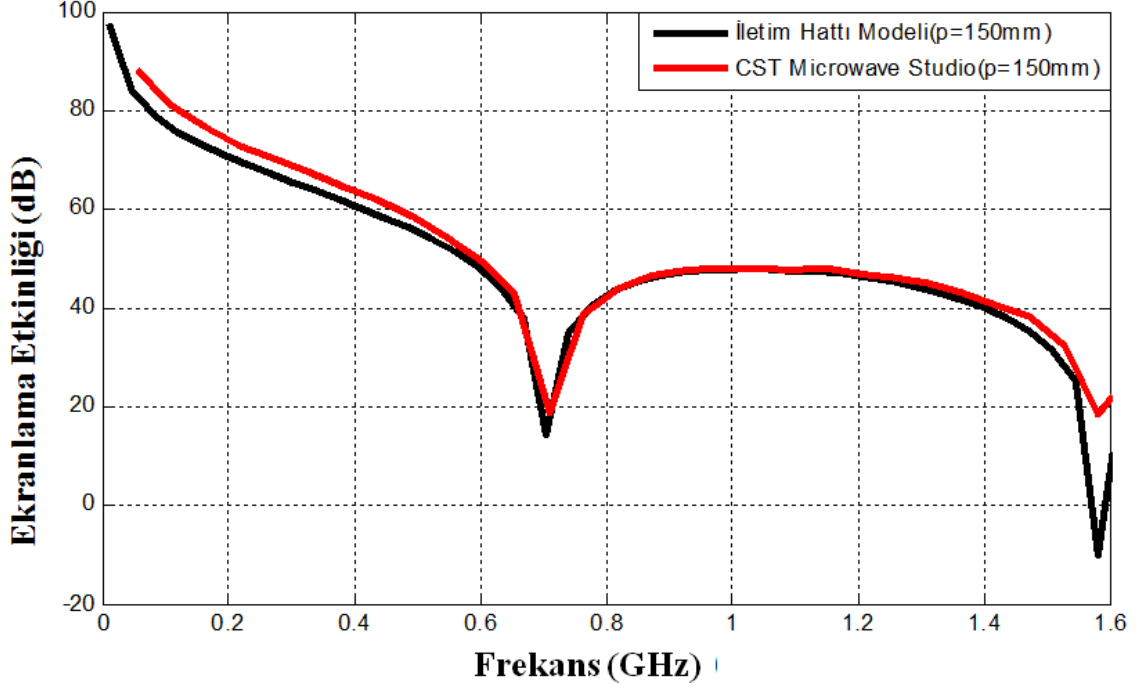
Şekil 3.28 Üzerinde dört tane 15x15 mm boyutlarında aralarında 10 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

Şekil 3.28’de gösterilen grafik, Şekil 3.26’da bulunan kutunun tam orta noktasından açıklığa doğru 30 mm ilerideki bir noktada ekranlama verimliliği hesaplamasını ifade etmektedir. İki farklı yapının verimliliğini hesaplama yönteminin sonuçları birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir.

15x15 mm boyutlarına sahip dört tane kare açıklıklı ekranlama yapısının verimliliğinin hesaplanmasından sonra yine aynı boyutlara sahip aralarında 2 mm mesafe bulunan altı tane kare açıklıklı ekranlama yapısı oluşturulmuştur (Şekil 3.29).



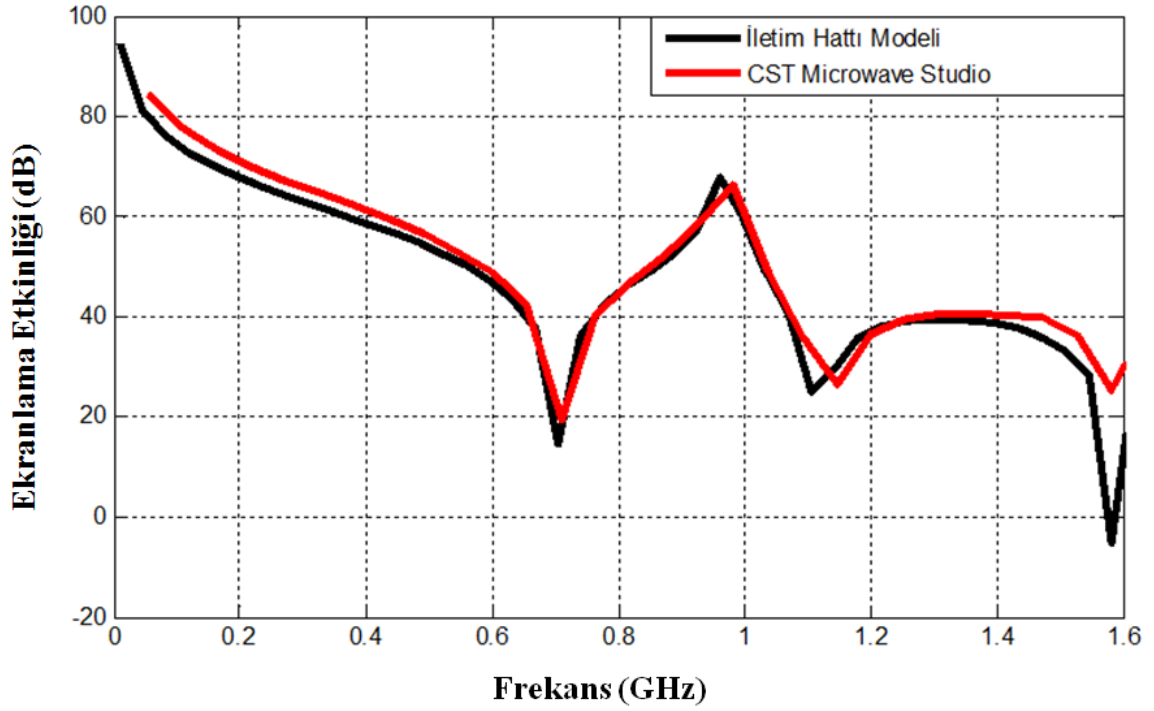
Şekil 3.29 Üzerinde altı tane 15x15 mm boyutlarında kare açıklık bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı



Şekil 3.30 Üzerinde altı tane 15x15 mm boyutlarında aralarında 2 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

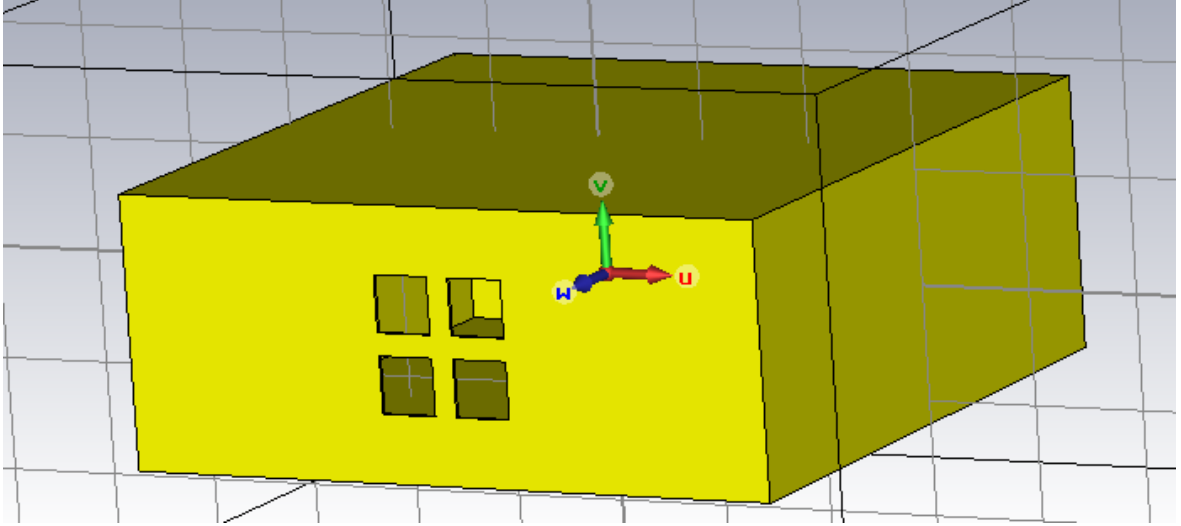
Şekil 3.30'daki grafik, aralarında 2 mm mesafe bulunan 15x15 mm boyutlarında altı tane kare açıklığa sahip ekranlama yapısını ifade etmektedir. Şekil 3.30 incelendiğinde, ekranlama verimliliği hesabı için kullanılan iki farklı yöntemin vermiş oldukları sonuçların birbirleri ile benzedikleri gözlemlenmektedir.

Şekil 3.30'da ekranlama yapısının tam orta noktasında yapılan ekranlama verimliliği hesabından sonra, açıklıklara yakın bir noktada Şekil 3.31'deki gibi ekranlama verimliliği hesabı yapılmıştır.



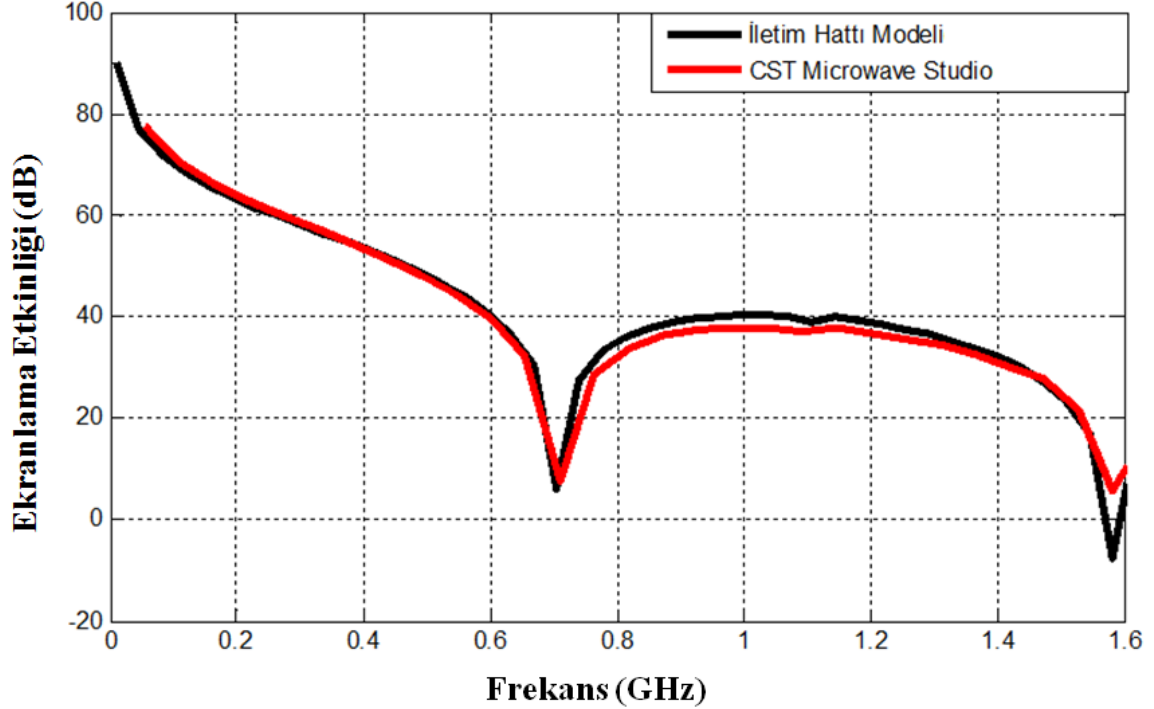
Şekil 3.31 Üzerinde altı tane 15x15 mm boyutlarında aralarında 2 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30 \text{ mm})$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

Bu kısımda 15x15 mm boyutlarındaki birden fazla kare açıklıklı iki yapının incelenmesinden sonra her bir karenin boyutu artırılmış ve 25x25 mm olarak ayarlanmıştır. Her bir kare açıklık arasındaki mesafe 5 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan bu işlemden sonra Şekil 3.32'de bulunan yapı oluşturulmuş ve oluşturulan yapının ekranlama etkinliği hesaplaması kutunun tam ortasında ve açıklığa yakın olacak bir noktada yapılmıştır. Kutu içerisinde farklı noktalarda yapılan ekranlama etkinliği hesaplamaları ile farklı noktadaki etkinliğin incelenmesi istenmektedir.



Şekil 3.32 Üzerinde dört tane 25x25 mm boyutlarında kare açıklıklar bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı

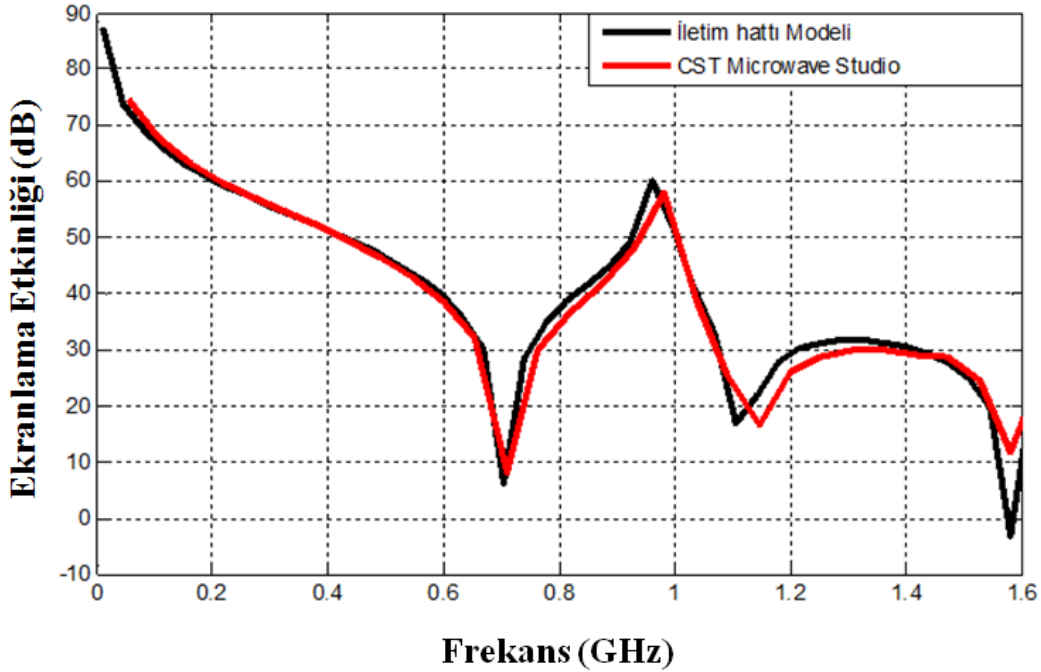
Şekil 3.33'te belirtildiği üzere 0 ile 1,6 GHz aralığında Şekil 3.32'de bulunan ekranlama yapısının tam orta noktasında iki farklı yöntem ile ekranlama etkinliği hesaplanmış olan değerler verilmiştir ve iki farklı yöntemin sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.33 Üzerinde dört tane 25x25 mm boyutlarında aralarında 5 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

Elde edilen değerler ve Şekil 3.33 incelendiğinde iki hesaplama yönteminin benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir.

Şekil 3.33'te bulunan ekranlama yapısının tam orta noktasında hesaplanan ekranlama verimliliğinden sonra kutunun tam orta noktasından açıklığa doğru 30 mm ilerideki bir noktada ($Q(a/2, b/2, (-d/2)+30$ mm)) ekranlama verimliliği hesabı yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 3. 34'deki grafik üzerinde gösterilmiştir.



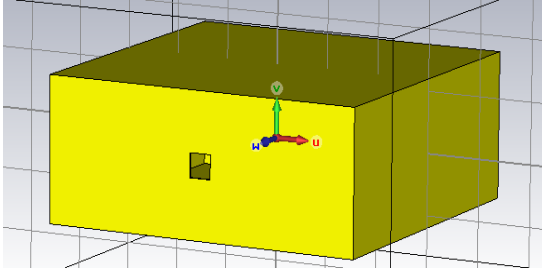
Şekil 3.34 Üzerinde dört tane 25x25 mm boyutlarında aralarında 5 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2)+30$ mm) noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

3.2.4 Kare Açıklık Sayısının Artışı ile Ekranlama Etkinliğinin Azalışının İncelenmesi

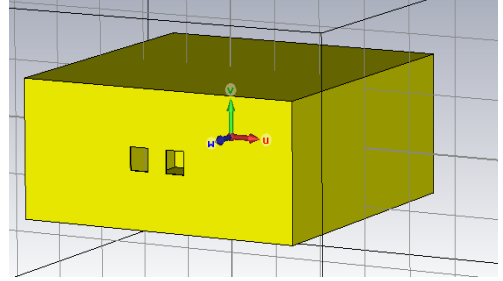
Bu kısımda ekranlama yapısı üzerinde farklı boyutlardaki kare açıklığın sayısı 2'nin kuvveti ($2^0, 2^1, 2^2$ ve 2^3) ile orantılı olacak bir biçimde arttırılmış ve Ekranlama Verimliliğinin yaklaşık olarak hesaplanmasında kullanılan Henry Ott'un formülünün (Eşitlik (3.3), n parametresi açıklık sayısını ifade etmektedir [15].) sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler ile ifade edilmiş ve boyutların değişimi ile birlikte ekranlama etkinliğinin değişimi incelenmiştir.

$$-10 \log_{10} n \quad (3.3)$$

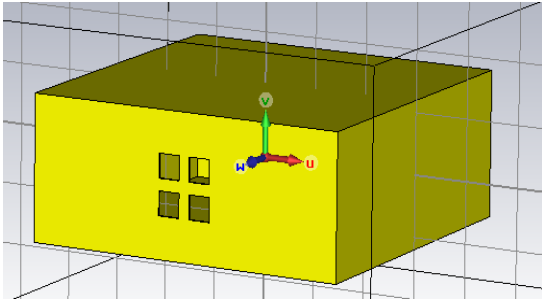
Şekil 3.35'te ifade edilmiş olan her biri $20 \times 20 \text{ mm}$ boyutlarındaki dört tane kare açıklık yapısına sahip elektromanyetik ekranlama yapıları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yapıların ekranlama etkinliklerinin hesabı yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.



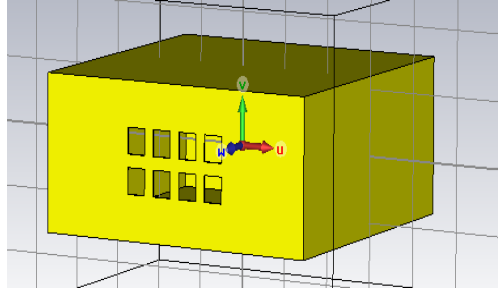
(a)



(b)



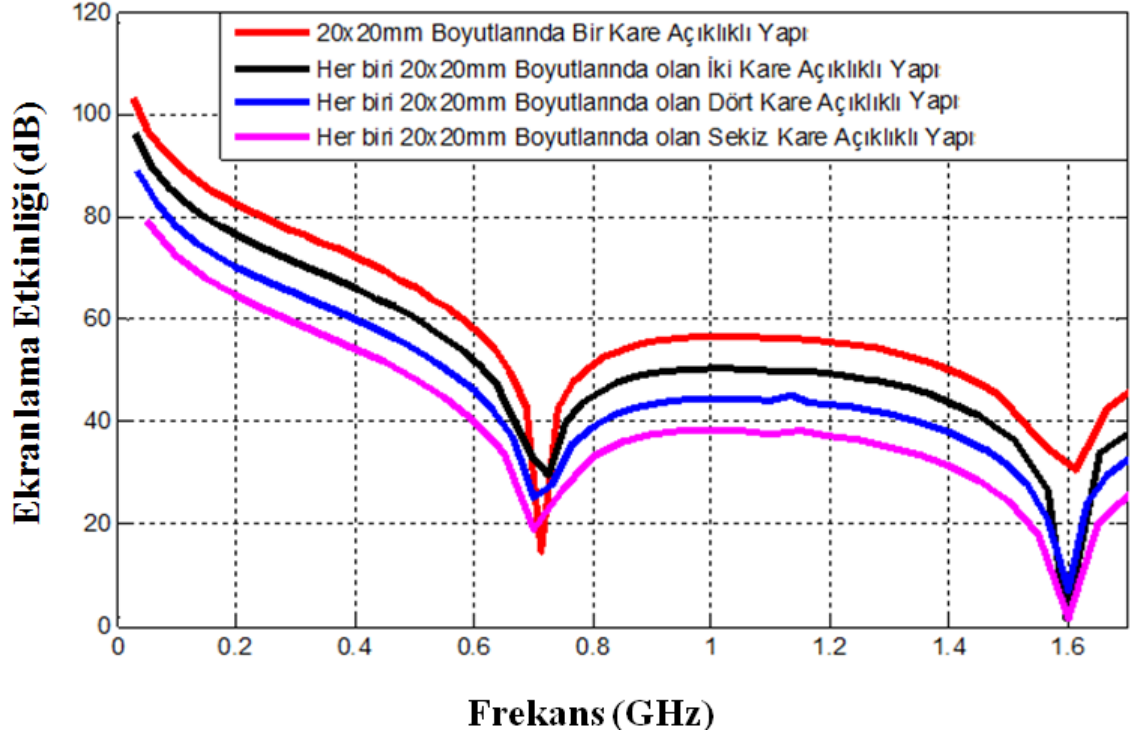
(c)



(d)

Şekil 3.35 İkinci kuvveti ile sayısı arttırılan kare açıklıkların Elektromanyetik Ekranlama Yapıları (a) bir açıklıklı (b) iki açıklıklı (c) dört açıklıklı (d) sekiz açıklıklı

Şekil 3.35'te bulunan yapıların ekranlama verimliliği hesaplama sonuçları Şekil 3.36'da verilmiş ve yapıların ekranlama etkinliği sonuçları aralarındaki farklar karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.36 Üzerinde farklı sayıda her biri 20x20 mm boyutlarında ve aralarında 10 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

Çizelge 3.5 Üzerinde farklı sayıda her biri 20x20 mm boyutlarında aralarında 10 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için ekranlama verimliliği hesaplamalarının karşılaştırılması

Frekans (GHz)	Bir Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	İki Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	Dört Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	Sekiz Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı
0.4	72.28 dB	65.72 dB	60.06 dB	54.28 dB
0.9	55.6 dB	49.42 dB	43.45 dB	37.46 dB
1.0	56.64 dB	50.4 dB	44.42 dB	38.33 dB
1.8	51.8 dB	43.9 dB	37.84 dB	28.88 dB

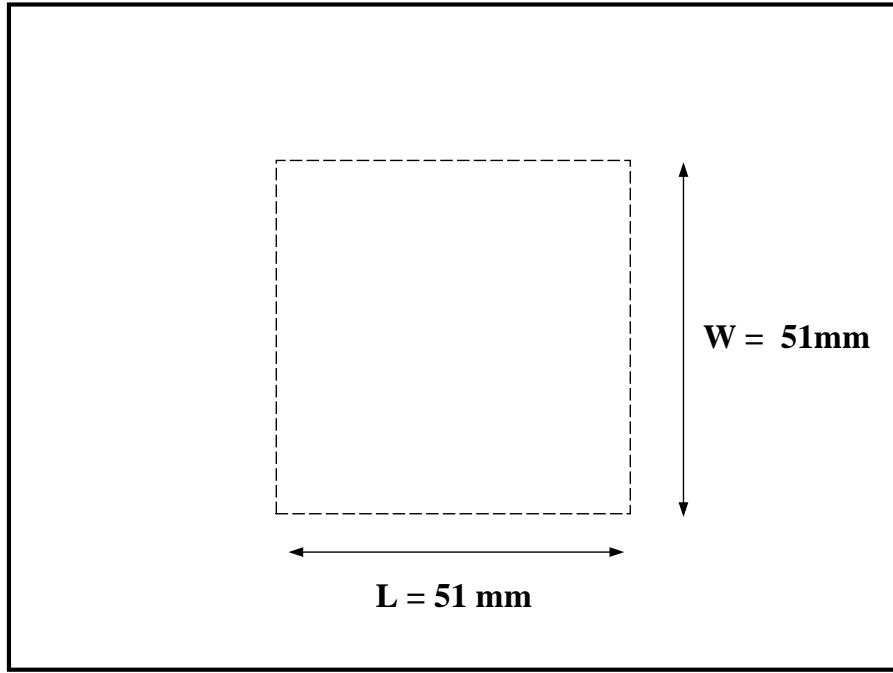
Eşitlik (3.3)'te bulunan formülde ikinin kuvveti ile açıklık sayısı artırılıp gerekli hesaplamalar yapıldığında her bir açıklık yapısının (1, 2, 4 ve 8 kare açıklıklı yapı) ekranlama verimliliği değerleri arasında 3 dB azalma olması beklenmektedir. Çizelge 3.5 incelendiğinde yapılan İHM ve CST Microwave Programında yapılan hesaplamalara göre azalma miktarı 6.06 dB ile 8.96 dB arasında değişmektedir. Çizelge 3.6'da kare açıklığın artışı ile birlikte her biri arasında ekranlama verimliliği farkı daha detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.6 Üzerinde farklı sayıda her biri 20x20 mm boyutlarında aralarında 10 mm mesafe bulunan kare açıklıklı ekranlama yapısı için ekranlama verimliliği hesaplamalarının karşılaştırılması

Frekans 1.8 GHz	Bir Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	İki Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	Dört Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	Sekiz Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı
Bir Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı		7.9 dB	13.96 dB	22.92 dB
İki Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	7.9 dB		6.06 dB	15.02 dB
Dört Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	13.96 dB	6.06 dB		8.96 dB
Sekiz Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	22.92 dB	15.02 dB	8.96 dB	

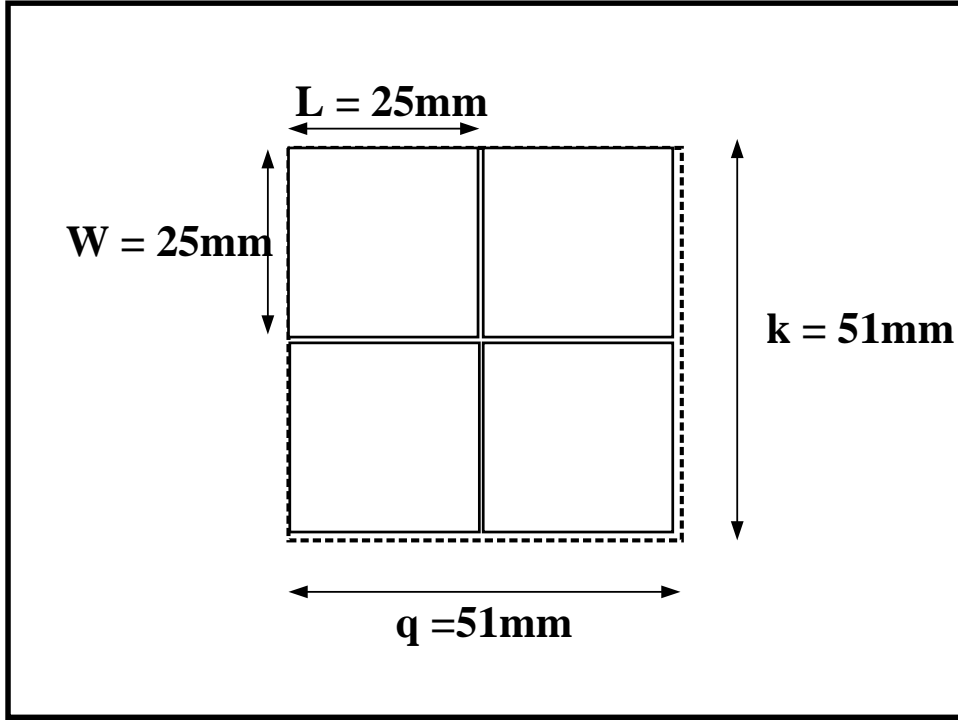
Şekil 3.35'te belirtilmiş olan yapıların üzerlerinde bulunan açıklık sayıları ikinin kuvveti ile atırıldıktan sonra ekranlama verimliliklerinin hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplanan değerler arasında oluşan farklar Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Yapılan bu işlemlerden sonra 51x51 mm boyutlarına sahip bir bölgeye sırasıyla bir kare (Şekil 3.37), dört kare (Şekil 3.38) ve on altı kare (Şekil 3.39) açıklık yerleştirilerek yapıların ekranlama verimlilik hesaplama işlemleri yapılmıştır.

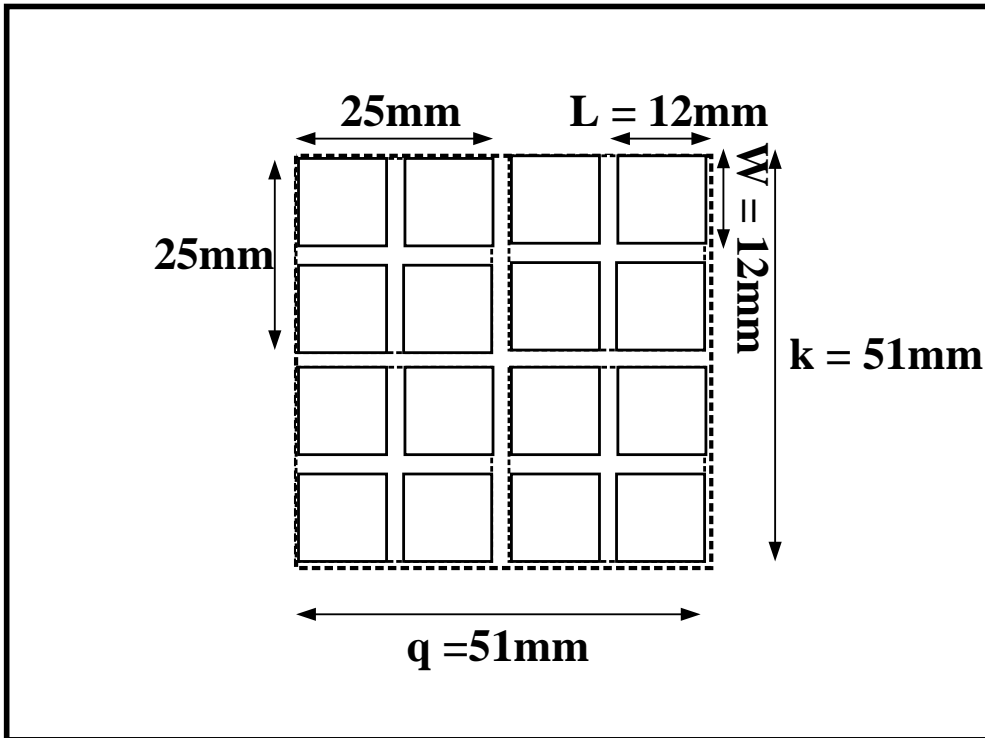


Şekil 3.37 51x51 mm alanda bir kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapısı

Birden fazla açıklıklı yapılarda her bir kare açıklık arasında 1mm mesafe olacak şekilde açıklıkların yerleştirilme işlemleri yapılmıştır. 51x51 mm sınırlarına sahip bölgeyi sürekli daha fazla parçalara ayırarak içerisinde daha fazla açıklık oluşturulmuş ve daha sonra yapıların ekranlama verimliliği hesaplama işlemleri yapılmıştır.

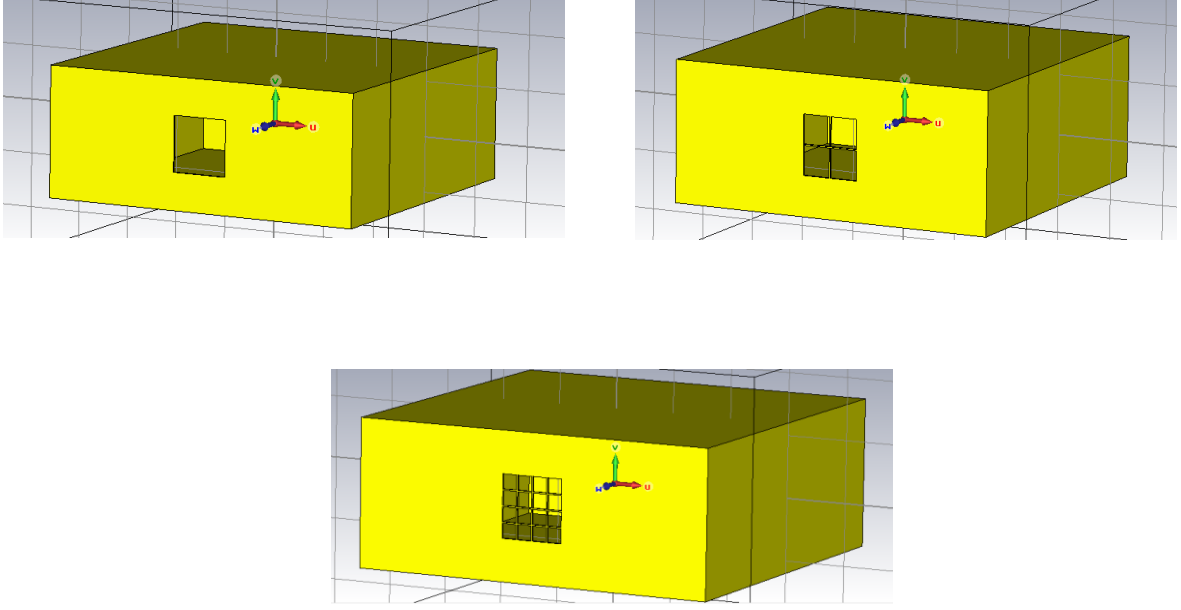


Şekil 3.38 51x51 mm alanda dört kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapısı



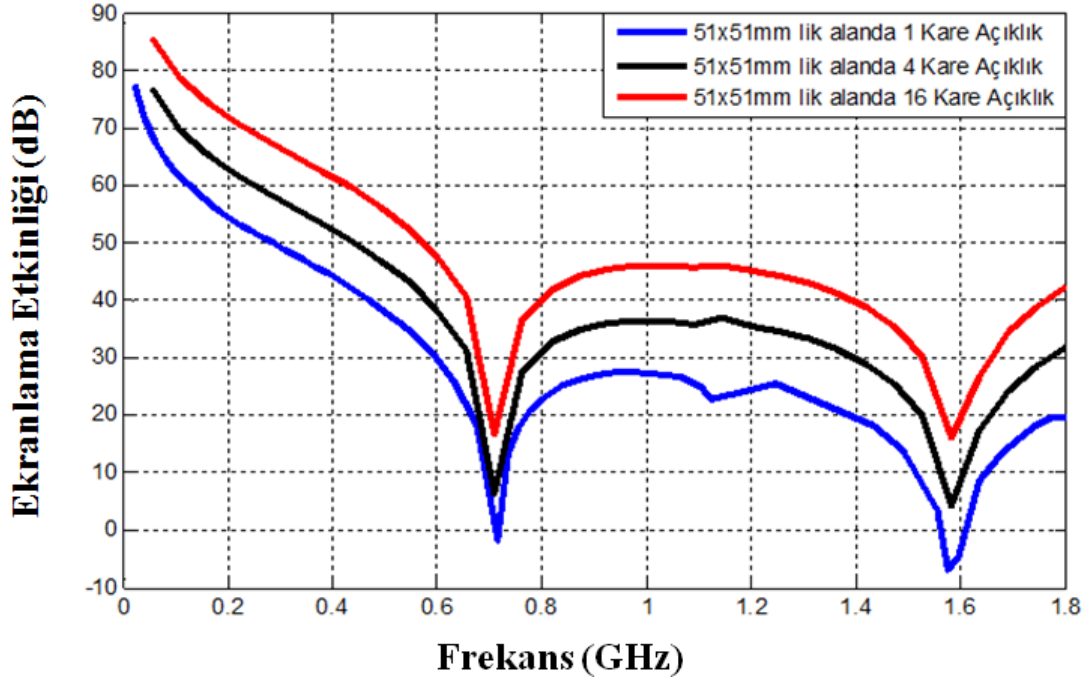
Şekil 3.39 51x51 mm alanda on altı kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapısı

Şekil 3.37, Şekil 3.38 ve Şekil 3.39'un tasarımı yapıldıktan sonra CST Microwave Studio programında oluşturulmuş (Şekil 3.40) ve ekranlama etkinlik hesaplamaları Şekil 3.41'de gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 3.40 51x51 mm alanda farklı sayılarda kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapıları

Şekil 3.41'de bulunan hesaplama verilerinin karşılaştırılmasına Çizelge 3.7'de yer verilmiştir. 51x51 mm'lik alanda farklı sayıda kare açıklık yerleştirilmiştir. Aynı alan içerisine birden fazla kare açıklık yerleştirildiğinde her bir karenin kesim frekansı artmakta ve bu sebepten ötürü zayıflama katsayısında da (attenuation constant) artış gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, aynı alan içerisine tek kare yerleştirmek ile aynı alan içerisine, aralarında alüminyum malzeme kalacak şekilde birden fazla kare açık yerleştirmek arasında kesim frekansı farkı vardır. Kesim frekansı arttıkça zayıflama katsayısı ve dolayısıyla ekranlama verimliliği de artmaktadır.



Şekil 3.41 51x51 mm alanda farklı sayılarda kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapılarının $Q(a/2, b/2, (-d/2))$ noktasında ekranlama verimliliği hesaplaması

Çizelge 3.7 incelendiğinde Henry Ott'un formülü ile yapılan hesaplamalarda 1 kare açıklık ve 4 kare açıklıklı yapılar arasında yaklaşık olarak 6 dB'lik bir fark olması beklenirken yapmış olduğumuz hesaplardan gözlemlendiği üzere 8.62 dB'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.7 51x51 mm'lik alanda farklı sayılarda kare açıklıklı elektromanyetik ekranlama yapıları ekranlama verimliliği hesaplamalarının karşılaştırılması

Frekans 0.4 GHz	Bir Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	Dört Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	On Altı Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı
Bir Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı		8,62 dB	17,75 dB
Dört Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	8,62 dB		9,13 dB
On Altı Kare Açıklıklı Ekranlama Yapısı	17,75 dB	9,13 dB	

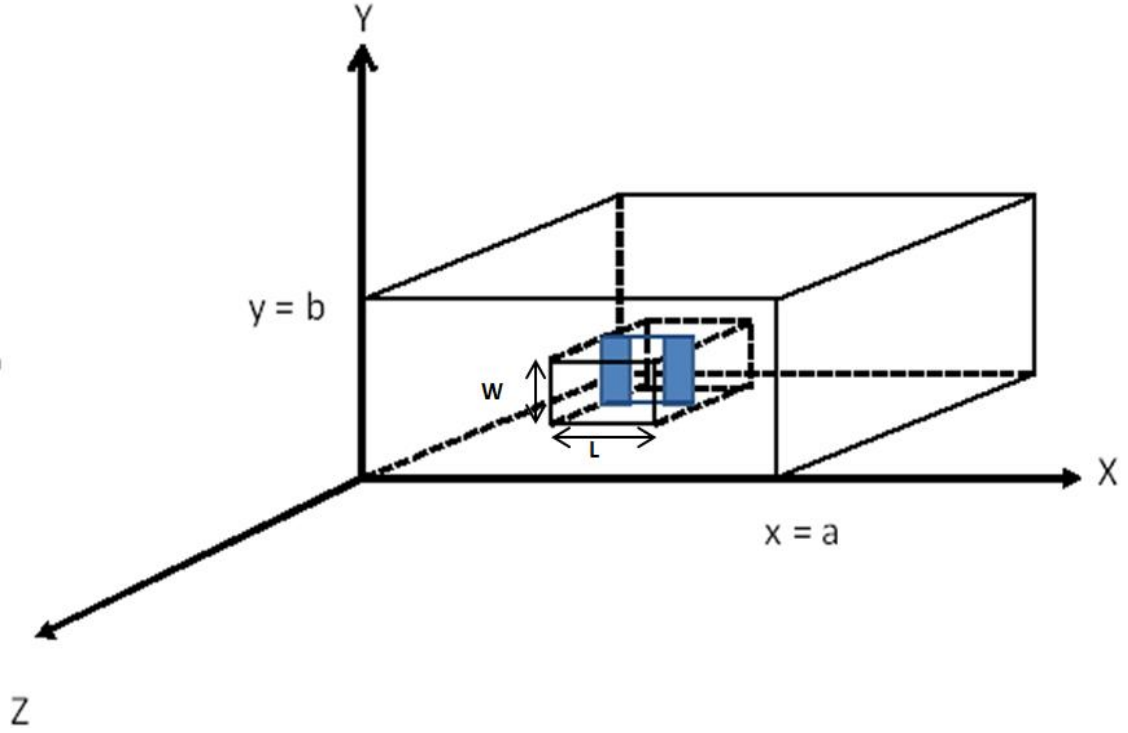
Aynı şekilde 1 kare açıklık ve 16 kare açıklıklı yapılar arasında yaklaşık olarak 12 dB'lik bir fark olması beklenirken Çizelge 3.7'den gözlemlendiği üzere 17.75 dB'lik bir fark olduğu gerekli hesaplamalar ile bulunmuştur.

3.3 Ekranlama Yapılarında Bulunan Zorunlu Açıklıklar İçerisinde İris Tasarımı

Literatürde, daha önce sadece dalga kılavuzlarına uygulanmış ve bizim geliştirmiş olduğumuz iletim hattı modeli ile ekranlama yapılarında bulunan açıklıklara da uygulanabilecek olan yapılardan birisi irisli dalga kılavuzu filtreleridir [19]. Dalga kılavuzlarının iç kısımlarına yerleştirilen iletilen plakalar (irisler) açıklıkların içerisinden geçen elektromanyetik dalgaların baskılanmasını sağlamaktadır.

Sadece dalga kılavuzları için tasarlanan iris filtreleri ile ilgili göze çarpan çalışmalardan birisi olan Shengxian Li'nin [16] çalışmasıdır. Bu makalede bant geçiren filtre gibi tasarlanan irisli dalga kılavuzları üzerlerinde çalışılmıştır.

Tezin bu kısmında, üzerinde zorunlu açıklık bulunan yapıların ekranlama etkinliğini yada verimliliğini artırmak için açıklık içerisine iris yapısı yerleştirilmesi probleminden ve bu yapının ekranlama etkinliğinin İHM ile hesaplanmasından bahsedeceğiz. Yaptığımız çalışmada 0.1 mm kalınlığa sahip iki plaka konularak iris yapısı oluşturulmuştur. Bu iris yapısı sayesinde istenmeyen elektromanyetik dalgaların bir kısmı engellenerek yapının ekranlama etkinliği artırılabilir. Şekil 3.42'de açıklığın iç kısmına bir adet iris yerleştirildiğinde problem geometrisi gösterilmiştir.

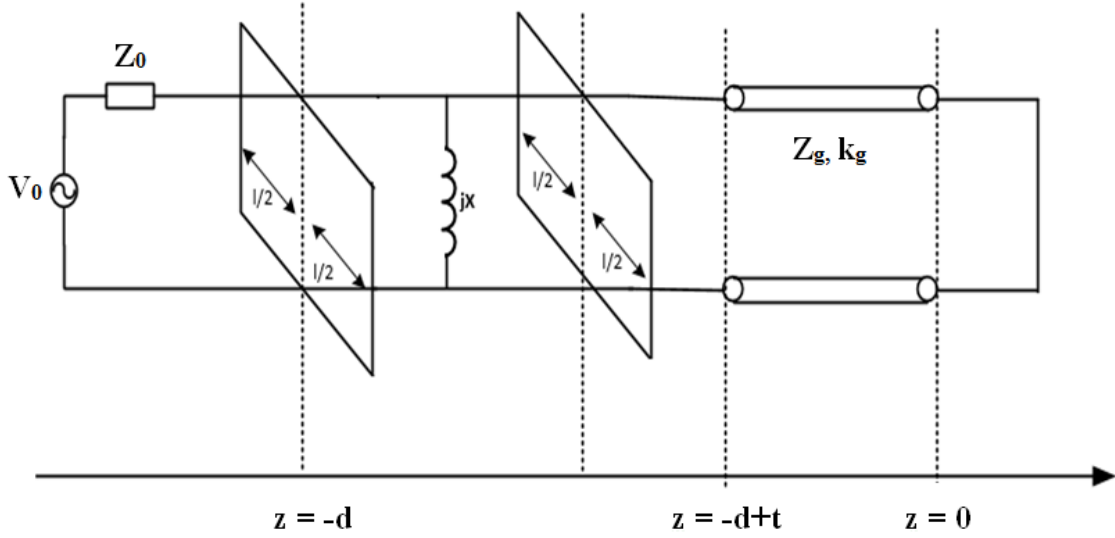


Şekil 3.42 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan irisli açıklık

Şekil 3.42’de gösterilen yapıda bulunan irisli açıklığın boyutları değiştirilerek içeriye nüfuz eden elektromanyetik girişimlerin etkileri düşürülebilir. Yalnız irisli açıklığı artırılırken yapı içerisinden dışarıya doğru giden sıcak hava geçişinin büyük ölçüde azaltılmaması ve bunun için irisli açıklıklarının uygun biçimde ayarlanması gerekmektedir.

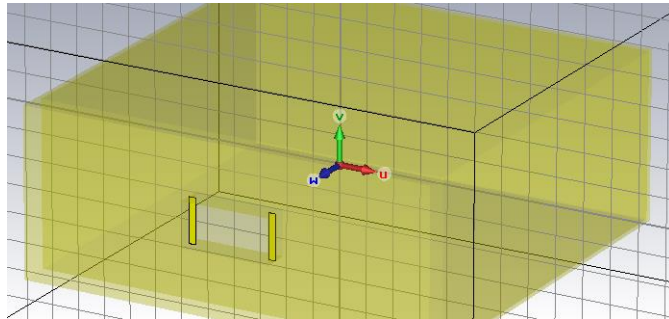
Bizim yapmış olduğumuz çalışmalar içerisinde açıklığı modellemek için kullanmış olduğumuz İHM yöntemini irisli açıklık içinde kullanabiliriz. Çünkü içerisine irisli yerleştirilen bir açıklığın sadece genişliği değişmektedir ve yine içeriden dışarıya dışarıdan içeriye elektromanyetik girişimlerin geçmesine olanak sağlayabilecek bir açıklık bulunmaktadır. Bu durumdan ötürü irisli yerleştirildikten sonra yine bir açıklık olacağı için daha önce yapmış olduğumuz modellemeler bu kısımda da geçerli olmaktadır. Şekil 3.42’de bulunan devrenin iletim hattı modeli Şekil 3.43’te bulunan devre gibi oluşturulmuştur.

Şekil 3.43’te bulunan devrede açıklığın içerisine yerleştirilen irisli devreye modellemesinde devreye bobin [17, 18] olarak gelmektedir ve 20 mm boyutlarında olan açıklığı iki parçaya bölmektedir. Bu nedenden dolayı Şekil 3.43’ten gözlemlenebileceği üzere iki tane açıklıklı modellemesi yapılmalıdır.



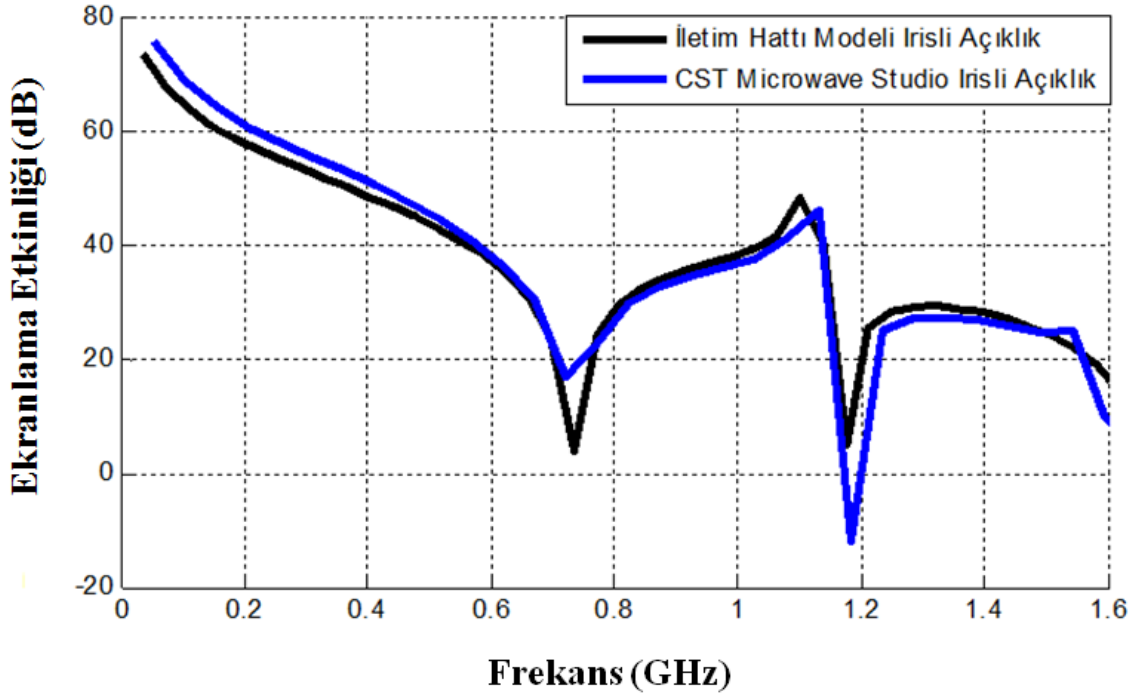
Şekil 3.43 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan iki irisli açıklık yapısının İletim Hattı Modeli

İlk olarak $a = d = 300$ mm, $b = 120$ mm boyutlarına $t = 20$ mm kalınlığından alüminyum maddeden yapılmış bir kutu oluşturulmuştur (Şekil 3.44). Oluşturulan ekranlama yapısının bir yüzeyine $W = 32$ mm ve $L = 64$ mm olan bir dikdörtgen açıklık yerleştirilmiştir. Gelen dalga açıklığa dik olarak gelmektedir ve elektrik alan vektörü y yönündedir. Açıklığın içerisine 54 mm genişliğinde iris yapısı yerleştirilmiştir (Şekil 3.44) ve açıklık içerisinde iris bulunan elektromanyetik ekranlama yapısının ekranlama verimliliği hesaplanmıştır (Şekil 3.45).



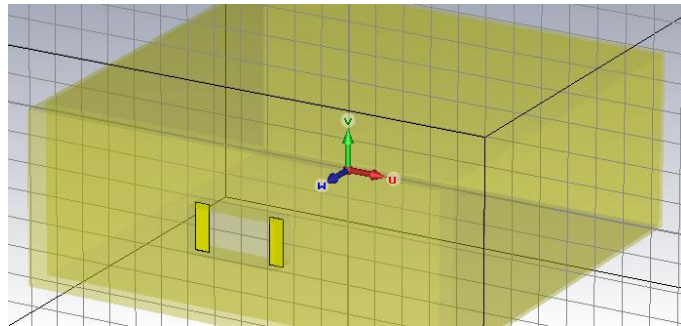
Şekil 3.44 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan 54 mm genişliğe sahip irisli açıklıklı kapalı kutu

Hesaplaması yapılmış olan ve Şekil 3.45’deki grafikte gösterilen ekranlama verimliliği sonuçları incelendiğinde iki farklı yöntemle hesaplanmış olan değerlerin birbirlerine benzer sonuçlar verdikleri gözlemlenmiştir.



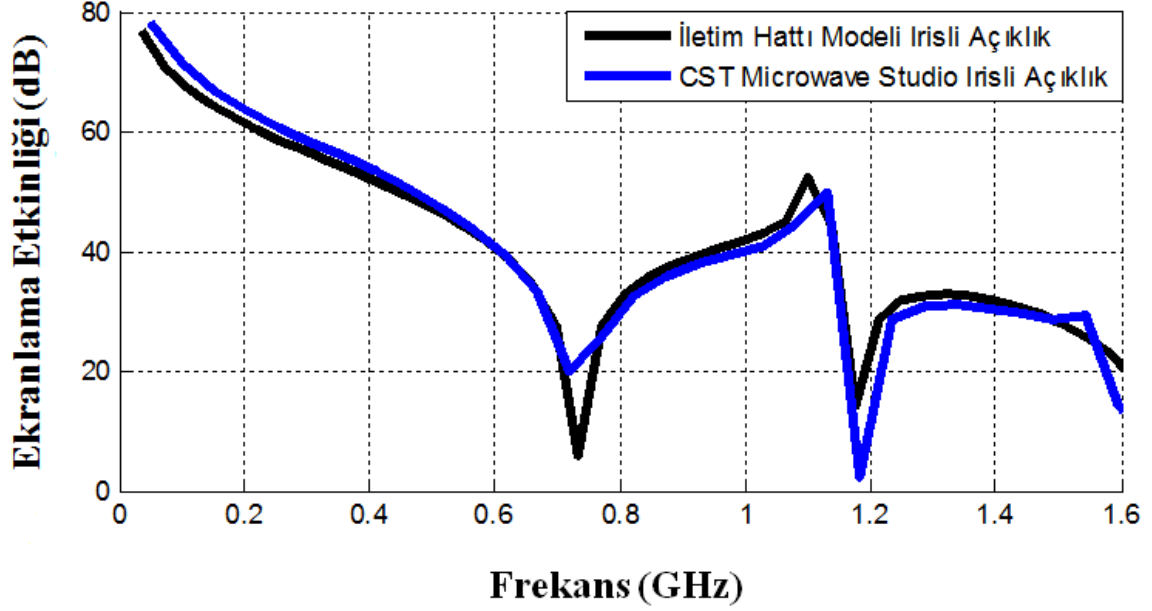
Şekil 3.45 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan açıklık içerisinde 54 mm genişliğe sahip irisli kapalı kutunun ekranlama verimliliği hesaplaması

Yapılan bu işlemten sonra açıklığın içerisinde bulunan irisin genişliği 54 mm’den 44 mm’ye düşürülmüş ve tekrar ekranlama verimliliği hesaplaması yapılmıştır.



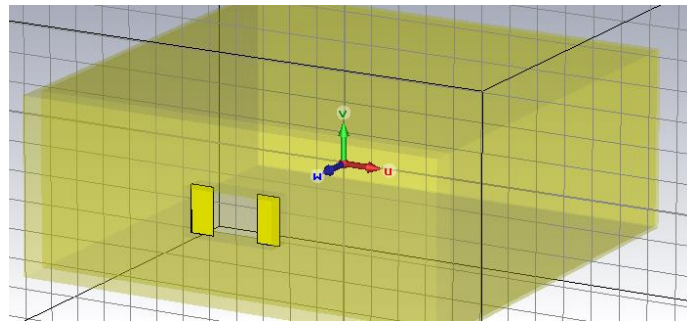
Şekil 3.46 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan 44 mm genişliğe sahip irisli açıklıklı kapalı kutu

Şekil 3.46’da bulunan yapı için yapılan ekranlama verimliliği hesaplamasına Şekil 3.47’de yer verilmiştir. İki farklı yöntem ile yapılmış olan hesaplamaların birbirleri ile uyuştukları gözlemlenmektedir.



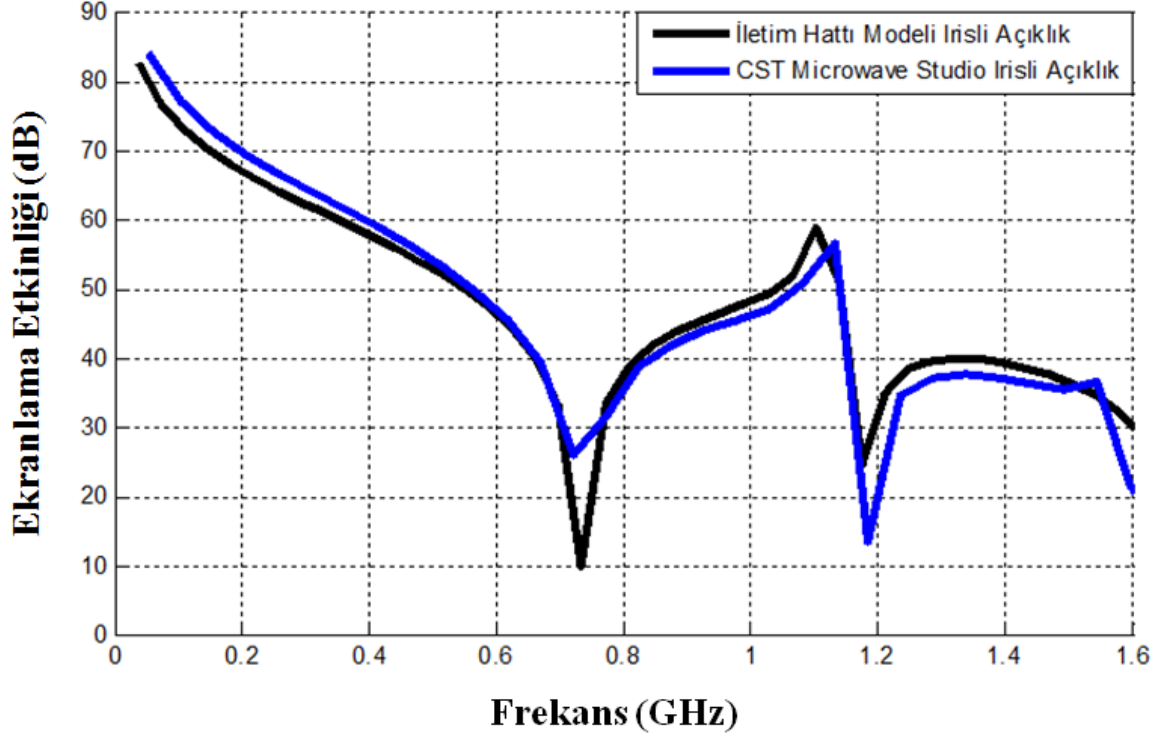
Şekil 3.47 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan açıklık içerisinde 44 mm genişliğe sahip irisli kapalı kutunun ekranlama verimliliği hesaplaması

Şekil 4.46’da bulunan 44 mm’lik genişliğindeki irisli açıklığa sahip dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısının tasarımından ve ardından ekranlama etkinliğinin hesaplamasından sonra açıklığın içerisinde yer alan sıfır kalınlığa sahip irisin genişliği 32 mm’ye düşürülmüştür (Şekil 3.48).



Şekil 3.48 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan 32 mm genişliğe sahip irisli açıklıklı kapalı kutu

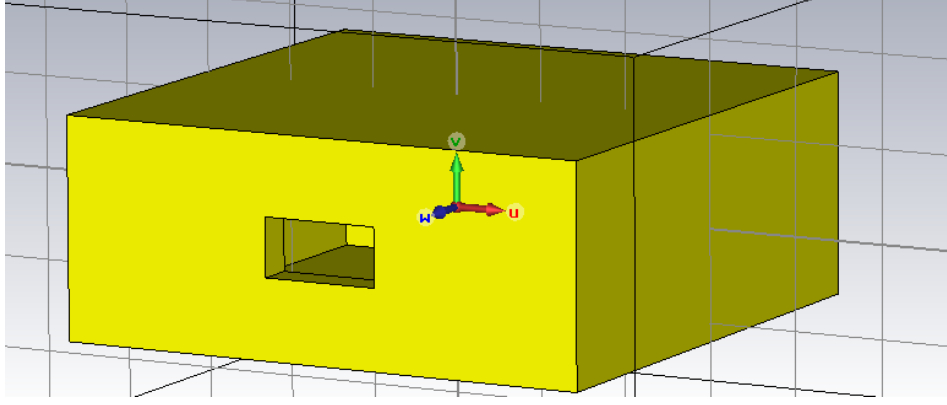
Şekil 3.48’de oluşturulan açıklık içerisindeki 32mm’lik genişliğe sahip irisli ekranlama yapısının CST Microwave Studio ve iletim hattı modeli ile hesaplaması yapılan ekranlama verimliliğinin sonuçlarına Şekil 3.49’da yer verilmiştir.



Şekil 3.49 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan açıklık içerisinde 32 mm genişliğe sahip irisli kapalı kutunun ekranlama verimliliği hesaplaması

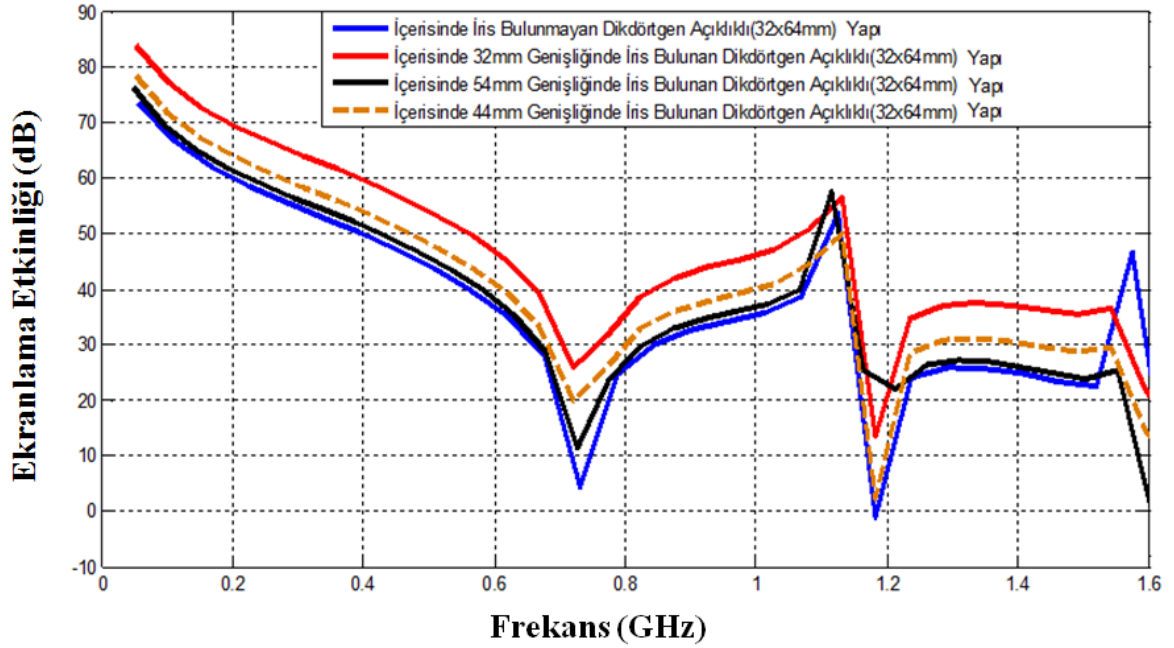
Şekil 3.49’deki veriler incelendiğinde iki farklı yöntem kullanılarak yapılan hesaplamaların birbirleri ile benzediği sonucuna varılmaktadır.

Şekil 3.50’de 300x120x300 mm boyutlarında 20 mm kalınlığında üzerinde 32x64 mm en ve boy ölçülerine sahip içerisi boş olan bir dikdörtgen açıklıklı dikdörtgen prizma ekranlama yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 3.50 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde dikdörtgen açıklıklı kapalı kutu

Şekil 3.50’de bulunan içerisi boş olan açıklıklı koruma yapısının ekranlama verimliliği ile Şekil 3.50’deki açıklıklı aynı boyutlara sahip ama açıklık içerisinde farklı genişliklerde irisler bulunan ekranlama yapılarının ekranlama verimlilikleri Şekil 3.51’de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.51 Dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapısı üzerinde bulunan açıklık içerisinde iris bulunan ve bulunmayan yapıların ekranlama etkinliklerinin karşılaştırması

Şekil 3.51’de farklı açıklıklı dikdörtgen prizma ekranlama yapıları için elde edilen hesaplama sonuçları gösterilmektedir. Grafikten de gözlemlenebildiği üzere içerisi boş

olan yapı ile içerisinde farklı genişliklerde iris yerleştirilen aynı yapılar arasında ekranlama etkinlikleri farkları vardır. Bu farkların daha net olarak gözlemlenebilmesi için elde edilen bazı sonuçlara Çizelge 3.8’de yer verilmiştir.

Çizelge 3.8 İrisli ve irissiz açıklıklı dikdörtgen prizma ekranlama yapıları için ekranlama etkinlik hesaplama sonuçları

Frekans (GHz)	Açıklığın içerisinde İris Olmayan Ekranlama Yapısı	Açıklığın içerisinde 32mm Genişliğinde İris Olan Ekranlama Yapısı	Açıklığın içerisinde 44mm Genişliğinde İris Olan Ekranlama Yapısı	Açıklığın içerisinde 54mm Genişliğinde İris Olan Ekranlama Yapısı
0.29	55.14 dB	64.86 dB	59.2 dB	56.57 dB
0.62	35.14 dB	45.14 dB	39.33 dB	36.34 dB
0.9	32.56 dB	42.90 dB	36.94 dB	33.78 dB
1.35	25.69 dB	37.41 dB	30.93 dB	26.9 dB

Çizelge 3.8 incelendiğinde içerisinde iris olmayan açıklık ile içerisinde belli bir genişliğe sahip iris olan dikdörtgen prizma şeklindeki ekranlama yapılarının ekranlama verimlilikleri arasında belirgin bir fark vardır. Açıklığın içerisinde iris yerleştirilmiş olan yapıların, açıklığın içerisi boş olan yapıya göre daha iyi ekranlama etkinliği sağladıkları gözlemlenmektedir.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışması kapsamında alüminyum maddeden oluşan, düzlem dalga ile aydınlatılan ve üzerlerinde farklı şekillerde tasarlanmış açıklık ve açıklıklar bulunan elektromanyetik ekranlama yapılarının ekranlama etkinliklerinin hesaplamaları yapılmıştır.

Farklı açıklıklara sahip tasarlanmış olan ekranlama yapılarının etkinlik hesaplamaları ticari bir program olan CST Microwave Studio programı ve yapıların iletim hattı modelleri oluşturularak yapılmıştır.

İlk olarak, farklı tek açıklık (beşgen, altıgen, dairesel, kare ve üçgen) şekillerine sahip ekranlama yapıları için ekranlama verimlilik hesaplamaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

İkinci aşamada, bir önceki aşamada tek açıklıklı ekranlama yapısı olarak verimlilik hesaplaması yapılan 50x50 mm boyutlarındaki kare açıklıklı elektromanyetik dalgalardan korunma yapısının açıklık bulunan yüzeyindeki kare açıklık sayısı karenin boyutları ve aralarındaki mesafeler sabit tutularak artırılmıştır. Oluşturulan yapıların ekranlama verimlilikleri iki farklı yöntem (CST Microwave Studio [20] ve İletim Hattı Modeli [21]) ile hesaplanarak karşılaştırılmalar yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda iki farklı yöntemin birbirlerine yakın ve benzer sonuçlar verdikleri gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasının son aşamasında ise, ekranlama yapısının bir yüzeyine bir tane açıklık yerleştirilmiş ve bu açıklık içerisine farklı genişliklerde iris yapıları konmuştur. İris yapılarının ekranlama yapılarına eklenmeleri yeni bir yöntemdir ve bunun için sadece açıklık için tasarlanmış olan iletim hattı modelinin düzenlenmesi gerekmiştir. İrisli açıklık için iletim hattı modelinde yapılan düzenlemelerden sonra CST Microwave Studio ve düzenlenmiş olan iletim hattı modeli kullanılarak oluşturulmuş olan yapıların ekranlama verimliliklerinin hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde iki farklı yöntem ile yapılan hesaplamaların birbirleri ile benzer oldukları gözlemlenmiştir.

Çalışmalar sırasında elde edilen sonuçların karşılaştırmaları incelendiğinde iletim hattı modelinin doğru bir biçimde çalıştığı ve tatmin edici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. İletim hattı modeli ile yapılabilecek ekranlama verimliliği hesaplamalarının diğer bir önemli avantajı ise hızlı bir şekilde hesaplama sonuçları vermesidir.

Gelecekteki çalışmalarımız için açıklık ve açıklıkların iç kısımlarını farklı manyetik ve dielektrik maddeler ile kaplayarak oluşturulacak yapıların ekranlama verimliliklerinin artırılması için gerekli çalışmaların yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] IEEE Electromagnetic Compatibility Society, *IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures*, IEEE, New York, **2007**
- [2] Donohoe, J. P. , www.ece.msstate.edu/~donohoe/ece4323shielding.pdf (Haziran, **2015**).
- [3] Schulz, R. B., Plantz, V. C., and Brush, D. R., Shielding Theory and Practice, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 30, no. 3, pp. 187–201, **1988**
- [4] Robinson, M. P., Turner, J. D., Thomas, D. W. P., Dawson, J. F., Ganley, M. D., Marvin, A. C., Porter, S. J., Benson, T. M., and Christopoulos, C., Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture, *Electronic Letters*, vol. 32, no. 17, pp. 1559–1560, **1996**
- [5] Lee, K., Cheong, Y., Hong, I., Yook, J., Quality, D., Agency, A., and C. Engineering, Design Equation of Shielding Effectiveness of Honeycomb, Proceedings of ISAP2005 vol. 1, pp. 19–22, **2005**
- [6] Robinson, M. P., Benson, T. M., Christopoulos, C., Dawson, J. F., Ganley, M. D., Marvin, A. C., Porter, S. J. and Thomas, D. W. P., Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, no. 3, pp. 240–248, **1998**
- [7] Shim, J., Shielding Effectiveness of Rectangular Enclosures with Apertures on Multiple Sides, **2004**
- [8] Wadell, B. C., *Transmission Line Design Handbook*, Artech House, Massachusetts, **1991**
- [9] Hong, Jia-Sheng and Lancaster, M. J. , *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, Wiley, New York, Chapter 4, **2001**
- [10] Almalkawi, M., Bunting, C., Devabhaktuni, V., and Sebak, A. R., Waveguide Tubes Coated with Inhomogeneous Lossy Materials for Superior Shielding Above and Below Cutoff Frequency, *IEEE Magn. Lett.*, vol. 3, pp. 3–6, **2012**
- [11] Celozzi, S. , Araneo, R. , Lovat, G., *Electromagnetic Shielding*, John Wiley & Sons, New Jersey, **2008**
- [12] Balanis, A. C, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York, Chapter 8, **1989**

- [13] Garg, R., Bahl, I.J. and Bozzi, M., *Microstrip lines and Slotlines(Third Edition)*, Artech House, Chap. 7, **2013**
- [14] Pozar, D. M., *Microwave Engineering(Fourth Edition)*, Wiley, New York, 76-90, **2012**
- [15] Ott, H., *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems(Second Edition)*, Wiley, New York, 188-189, **1988**
- [16] S. X. Li, J. M. Fu, and X. Wu, Rectangular waveguide band pass filter with capacitive coupling iris, *Piers 2008 Hangzhou Prog. Electromagn. Res. Symp. Vols I li, Proc.*, vol. 0, no. 1, pp. 337–341, **2008**
- [17] Matthaei, G.L., Young, Y. And Jones, E.M.T., *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House, New Jersey, **1980**
- [18] Marcuvitz, N. , *Waveguide Handbook*, Dover Publications, New York, **1951**
- [19] Kodali, P. , *Engineering Electromagnetic Compatibility*, IEEE Press, New York, **1996**
- [20] CST, <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>.
- [21] MATLAB R2013a, Massachusetts: The MathWorks Inc., **2013**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Tunç Murat İLGAR
Doğum Yeri : Yenimahalle/ANKARA
Medeni Hali : Bekar
E-posta : tmilgar@baskent.edu.tr
Adresi : Kardelen Mahallesi, Ulıırmak Sitesi, 2047. Sokak 12/10
Batıkent Ankara

Eğitim

Lisans : Başkent Üniversitesi
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi

Yabancı Dil ve Düzeyi

YDS: 81.25

İş Deneyimi

Başkent Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Deneyim Alanları

Elektromanyetik Uyumluluk, Elektromanyetik Teori, Analog ve Sayısal Kontrol Teorisi ve Sayısal Mantık Tasarımı

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

URSI AT-RASC 2015 (Gran Canaria, Kanarya Adaları, İspanya)