

**AÇIK/KAPALI FORMA SAHİP TEM HÜCRE TASARIMI
VE DÜZLEM MALZEMELERİN EKSPANLAMA
ETKİNLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ**

**OPEN/CLOSED FORMED TEM CELL DESIGN AND
MEASUREMENT OF SHIELDING EFFECTIVENESS OF
PLANAR MATERIALS**

ESRA NURGÜN

PROF. DR BİRSEN SAKA TANATAR

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2024

ÖZET

AÇIK/KAPALI FORMA SAHİP TEM HÜCRE TASARIMI VE DÜZLEM MALZEMELERİN EKLANLAMA ETKİNLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ

Esra NURGÜN

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Ağustos 2024, 99 Sayfa

Hızla gelişmekte olan teknoloji ile birlikte askeri ve sivil uygulamalarda kullanılan elektronik cihazların gereken performansta ve aynı zamanda dışarıdan gelen elektromanyetik girişimlere olabildiğince az maruz kalarak çalışma gereksinimi, elektromanyetik uyumluluk açısından önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektromanyetik uyumluluğun elektronik dünyasında bu kadar önemli olması, beraberinde elektromanyetik girişimlere karşı da yeterli ve gerekli önemleri alma konusunu gündeme getirmiştir. Ekranlama; elektromanyetik girişimleri engellemek için kullanılan bir yöntemdir. Ekranlama etkinliği ölçümlerinde ekran malzemesinin büyüklüğü ve şekli ile birlikte zaman ve malzeme maliyeti, çalışma frekans bandı, kullanım kolaylığı gibi parametrelerin dikkate alınması gerekir. Bu çalışma kapsamında ilk olarak iletim yoluyla ekranlama etkinliği yöntemini benimseyen tek bir TEM hücresinin eş iki parça halinde kullanılması ile ortaya çıkan ayrık TEM (TEM-t) hücrelerinin alt ve üst toprak plakalarının açısız değişimlerinin ölçüm hassasiyetine olan etkisi incelenmiştir; devamında ise TEM hücresinin bir iletim hattının canlı ucunu temsil eden merkez plakasının (septum) boyutsal farklılıklarının ölçüm doğruluğuna olan etkisi üzerinde durulmuştur. Tüm bu denemelerde CST Microwave Studio programı kullanılmış, farklı boyutsal özelliklere sahip bu

yapıların aynı koşullar altında ekranlama etkinlikleri incelenmiştir. Bir sonraki aşamada ise yapılan simülasyon sonucu elde edilen optimum boyutsal özellikli yapının üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretimi sağlanmıştır. Üç boyutlu baskı için PLA malzemesi kullanılarak plastik türevi TEM hücre örnekleri oluşturulmuş, elde edilen örnekler farklı iletken yapılar kullanılarak kaplanmıştır. Kaplanan nihai ürünün yansıma ve iletim karakteristiği Vektör Ağ Analizörü vasıtasıyla ölçülmüş, teorik ve pratik sonuçlar birbiri ile kıyaslanmıştır.

Bir sonraki aşamada TEM hücresi düzlemsel olarak ikiye ayrılarak (TEM-t) ara bölgeye yerleştirilen düzlemsel malzemelerin iletim hattına olan etkisi incelenmiştir. Üç farklı yöntem için simülasyon çalışılıp; ilkinde septum hariç tutularak hücrenin yarısına kadar yükleme yapılmış, ikincide septum hariç tutularak tam yükleme yapılmış, sonuncusunda ise septumu da katarak yükleme yapılarak sonuçlar incelenmiştir. En uygun yöntem belirlenerek elde edilen düşük maliyetli ve yüksek performanslı TEM-t hücresinin malzeme yüklü iken gösterdiği performans, yani S-parametrelerindeki değişim incelenmiştir. Bu yöntem sayesinde S-parametrelerinde gözlemlenen değişim referans alınarak ekran malzemesi olarak kullanılacak düzlemsel yapıların seçimi kolaylıkla yapılabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Uyumluluk, Ekranlama, Ekranlama Etkinliği (Verimliliği), Düzlem Malzemeler, TEM Hücresi, TEM-t Hücresi

ABSTRACT

OPEN/CLOSED FORMED TEM CELL DESIGN AND MESAUREMENT OF SHIELDING EFFECTIVENESS OF PLANAR MATERIALS

Esra NURGÜN

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

August 2024, 99 Pages

With rapidly developing technology, the need for electronic devices used in military and civilian applications to operate at the required performance and at the same time with as little exposure to external electromagnetic interference as possible, emerges as an important issue in terms of electromagnetic compatibility. The fact that electromagnetic compatibility is so important in the electronics world has brought to the agenda the issue of taking adequate and necessary precautions against electromagnetic interference. Shielding; It is a method used to prevent electromagnetic interference, and the introduction of small-sized shielding structures, which are frequently preferred due to their ease of use and cost-effectiveness, emerges as an important development point in this field. Within the scope of this study, firstly, the effect of angular changes of the bottom and top soil plates on the measurement sensitivity of flanged TEM (TEM-t) cells, which are created by using a single TEM cell in two identical parts, which adopt the method of shielding efficiency through conduction, was examined; Subsequently, the effect of the dimensional differences of the central plate (septum) of the TEM cell, which

represents the live end of a transmission line, on the measurement accuracy is emphasized. CST Microwave Studio program was used in all these experiments, and the shielding effectiveness of these structures with different dimensional properties was examined under the same conditions. In the next stage, the structure with optimum dimensional properties obtained as a result of the simulation was produced using a three-dimensional printer. Plastic derived TEM cell samples were created using PLA material for three dimensional printing, and the obtained samples were coated using different conductive structures. The reflection and transmission characteristics of the final coated product were measured by means of a Vector Network Analyzer, and theoretical and practical results were compared with each other.

In the next stage, the TEM cell was divided into two planar (TEM-t) and the effect of planar materials placed in the intermediate region on the transmission line was investigated. Simulations were run for three different methods; in the first one, the cell was loaded up to halfway, excluding the septum, in the second one, the septum was fully loaded, and in the last one, the septum was included and the loading was done and the results were examined. The most suitable method was determined and the performance of the low-cost and high-performance TEM-t cell obtained when the material was loaded, i.e. the change in S-parameters, was examined. Thanks to this method, the selection of planar structures to be used as screen materials can be easily made by taking the observed change in S-parameters as reference.

Keywords: Electromagnetic Compatibility, Shielding, Shielding Effectiveness, Planar Materials, TEM Cell, TEM-t Cell.

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	Error! Bookmark not defined.
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Ekranlama.....	2
1.1.1. Ekranlama Etkinliği	2
1.1.2. Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri.....	3
1.2. Amaç ve Kapsam	4
2. EKLANLAMA ETKİNLİĞİ TEORİSİ.....	7
2.1. Ekranlama Etkinliği.....	7
2.2. Dalga Empedansı, Yakın Alan ve Uzak Alan	10
3. EKLANLAMA ETKİNLİĞİ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	15
3.1. MIL-STD-285 Metodu Ölçüm Yöntemi	15
3.2. Çift Modlu Karıştırma Odası	16
3.3. Yankılı Odada Delikli TEM Hücresi	17
3.4. Çiftli TEM Hücresi	17
3.5. Ayrık (Bölünmüş) TEM Hücresi (TEM-t Hücresi).....	19
3.6. Dairesel Koaksiyel Tutucular.....	20
3.7. Çift Odalı Test Fikstürü (ASTM ES7-83)	21
4. TEM HÜCRESİ TASARIMI, HESAPLAMALAR VE ÖLÇÜMLER.....	22
4.1. TEM Hücresi Nedir?.....	22
4.2. TEM Hücresi Tasarım Parametreleri.....	23
4.2.1. Boyutsal Özellikler ve Karakteristik Empedans (İletim Hattı Empedansı)	24
4.2.2 Yüksek Mertebe Modları, Kesim Frekansı, Rezonans Frekansı	27

4.2.3 Elektrik Alan Dağılımı	28
4.2. TEM (TEM-t) Hücresi Tasarımı ve Açık Optimizasyonu	29
4.2.1 Açık Forma Sahip TEM Hücresinin Modellenmesi	30
4.2.2. Kapalı Forma Sahip TEM Hücresinin Modellenmesi	44
4.3. Eğri Uyumlama ile Kapalı TEM Hücresi için Dip Noktası Formülasyonu	49
4.4. Septum Optimizasyonu	51
4.4.1. Çoklu Basamak (Merdiven) Modeli Simülasyonu	53
4.4.2. Parçalı Doğrusal Model Simülasyonu	55
4.5. Tasarlanan Model için Elektrik ve Manyetik Alanlar	60
4.6 Optimal Model için Ekran Malzemesi Simülasyonu	61
5. TEM HÜCRESİ ÜRETİMİ VE ÖLÇÜMÜ	65
5.1. TEM Hücresi Üretimi	65
5.1.1. Farklı Boyutlarda Model Baskısı	65
5.1.2. Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) Yöntemi ile Bakır Kaplama	66
5.1.3. Bakır Folyo İle Kaplama	67
5.1.4. Alüminyum İletken Bantla Kaplama – Büyük TEM-t Hücresi	69
5.1.5. Alüminyum İletken Bantla Kaplama – Küçük TEM-t Hücresi	70
5.2. TEM (TEM-t) Hücresi Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları	71
5.2.1 Malzeme Yüksüz Durum için TEM-t Hücre Performansları	71
5.2.3. Malzeme Karakteristiği Ölçümleri	76
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	81
7. KAYNAKLAR	84
EKLER	88
EK 1 – Üretim Süreci Boyunca Kullanılan Cihaz ve Malzemeler	88
EK 2 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu	Error! Bookmark not defined.
ÖZGEÇMİŞ	Error! Bookmark not defined.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Ekran Muhafazasının Kullanım Şekilleri a) Emisyonu Tutan Ekran, b) Emisyondan Koruyan Ekran [3].....	7
Şekil 2.2. Schelkunoff ekranlama modeli [10].....	9
Şekil 2.3. Işıma kaynağına yakın alan bölgeleri.....	11
Şekil 2.4. Dipol bir kaynaktan bulunan mesafeye bağlı dalga empedansındaki değişim.	13
Şekil 3.1. MIL-STD-285 Standardına göre ekranlama etkinliği ölçümü.	15
Şekil 3.2. Çift modlu karıştırma odası altyapısı ile ekranlama etkinliği ölçümü.	16
Şekil 3.3. Çiftli TEM hücresinde ekranlama etkinliği ölçümü.	18
Şekil 3.4. TEM-t Hücresi [3].....	19
Şekil 3.5. Sürekli İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu [12].....	20
Şekil 3.6. Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu [3].....	21
Şekil 4.1. TEM hücresi örnekleri.	22
Şekil 4.2. Kapalı (a) ve açık (b) TEM hücreleri [1].	23
Şekil 4.3. (a) TEM hücresinin tepeden görünümü; (b) TEM hücresinin port hizasından önden görünümü; (c) TEM hücresinin yandan görünümü [27].	25
Şekil 4.4. TEM hücresi için septum boyut detayı [26].....	26
Şekil 4.5. TEM hücresi içerisinde elektromanyetik alan dağılımı [33].	29
Şekil 4.6. Boş ve ekran malzemesi yüklü TEM-t hücresi.	30
Şekil 4.7. TEM hücresi CST Studio Suite çizim aşamaları.	31
Şekil 4.8. Bir TEM hücresi için kesitler.....	34
Şekil 4.9. (a) Bir TEM hücresi için birim uzunluk başına kapasitans $C_0 \epsilon_0$ eğrisi [29], (b) Tasarlanan TEM hücresi için kesişim noktası.	35
Şekil 4.10. SMA port modeli.	38
Şekil 4.11. SMA port modelinde elektrik ve manyetik alanlar.	38
Şekil 4.12. Bir iletim hattında alan çizgileri [37].....	39
Şekil 4.13. Literatürde açık bir TEM hücresi için verilen S_{11} örneği [27].....	40
Şekil 4.14. SMA port modeli ile CST Simülasyon programından elde edilen S_{11} . 40	
Şekil 4.15. Literatürde açık bir TEM hücresi için verilen S_{21} örneği [27].....	41
Şekil 4.16. SMA port modeli ile CST Simülasyon programından elde edilen S_{21} . 41	
Şekil 4.17. Açık TEM hücresinde en kısa-en uzun açı gösterimleri, (a) 120.33° , (b) 131.44°	43

Şekil 4.18. Açık TEM hücresinde farklı açılar için S11 Değerleri.....	43
Şekil 4.19. Açık TEM hücresinde farklı açılar için S21 Değerleri.....	43
Şekil 4.20. Kapalı TEM hücresi.	44
Şekil 4.21. Kapalı TEM hücresinde farklı açılar için S11 değerleri.....	45
Şekil 4.22. Kapalı TEM hücresinde farklı açılar için S21 değerleri.....	46
Şekil 4.23. Açık ve kapalı TEM hücresinde farklı açılar için S11 değerleri.	47
Şekil 4.24. Açık ve kapalı TEM hücresinde farklı açılar için S21 değerleri.	47
Şekil 4.25. Kapalı TEM hücresi optimal iki uzunluk için S11.....	48
Şekil 4.26. Kapalı TEM hücresi optimal iki uzunluk için S21.....	48
Şekil 4.27. Kapalı TEM hücresi hassas parametrizasyon için S11.....	49
Şekil 4.28. Kapalı TEM-t hücresi hassas parametrizasyon için S11.	50
Şekil 4.29. Klasik üçgen formda septum (nihai model, $w=15.5\text{cm}$).....	51
Şekil 4.30. Klasik üçgen formda septum için S11.....	51
Şekil 4.31. Klasik üçgen formda septum için S21.....	52
Şekil 4.32. İki farklı formda septum modeli; (a) Çoklu basamak, (b) parçalı doğrusal.	52
Şekil 4.33. Merdiven formda (çoklu basamak) septum modeli.....	54
Şekil 4.34. Merdiven formda septum için S11.	54
Şekil 4.35. Merdiven formda septum için S21.	55
Şekil 4.36. Nihai septum modeli için parametrize segment tasarımı.	56
Şekil 4.37. Farklı segment en/boy değerlerinde parçalı doğrusal model için S11. .	58
Şekil 4.38. Farklı segment en/boy değerlerinde parçalı doğrusal model için S21. .	58
Şekil 4.39. Nihai septum modeli.....	59
Şekil 4.40. Nihai septum modeli için maksimum S11.....	59
Şekil 4.41. Nihai septum modeli için minimum S21.....	59
Şekil 4.42. CST Studio Suite programında tasarlanan TEM hücresi için elektrik ve manyetik alan çizgileri.....	60
Şekil 4.43. FR4 malzemesi için TEM-t hücresinde 3 farklı yerleşim.	61
Şekil 4.44. FR4 malzemesi için TEM-t hücresinde üç farklı yerleşim durumunda S11.	62
Şekil 4.45. FR4 malzemesi için TEM-t hücresinde üç farklı yerleşim durumunda S21.	62
Şekil 5.1. İlk üretilen TEM hücre yapısı.....	66
Şekil 5.2. $\frac{1}{2}$ oranında küçültülerek üretilmiş TEM-t hücre yapısı.....	66

Şekil 5.3. Buhar biriktirme yöntemi ile bakır kaplanmış TEM hücre kuponu.	67
Şekil 5.4. Vaksis Vakum Sistemi TEM hücre kaplama parametreleri.	67
Şekil 5.5. Kaplanmış, ½ oranında küçültülmüş, üretilmiş TEM-t hücresi.	68
Şekil 5.6 (a) Bakır folyo ile kaplanmış TEM hücresinde iletkenlik ölçümü, (b) Bakır folyo ile kaplanmış TEM hücresinde kaplama problemi.	69
Şekil 5.7. Bazı parçaları kaplanmış, kıyasla büyük, üretilmiş TEM-t hücresi.	69
Şekil 5.8. Alüminyum bant ile kaplanmış büyük TEM-t hücresinde iletkenlik ölçümü.	70
Şekil 5.9. Alüminyum bant ile kaplanmış küçük TEM-t hücresi ve septum tutucu ayaklar.	71
Şekil 5.10. Alüminyum bant ile kaplanmış küçük ve büyük TEM-t hücreleri ve septum tutucu ayaklar.	71
Şekil 5.11. Alüminyum bant ile kaplanmış iki TEM-t hücresinde iletim ve yansıma ölçümü.	72
Şekil 5.12. Küçük TEM-t hücresinde S11 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.	73
Şekil 5.13. Küçük TEM-t hücresinde S21 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.	73
Şekil 5.14. Küçük TEM-t hücresinde S11/S21 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları. ..	74
Şekil 5.15. Büyük TEM-t hücresinde S11 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.	75
Şekil 5.16. Büyük TEM-t hücresinde S21 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.	75
Şekil 5.17. Büyük TEM-t hücresinde S11/S21 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları. ..	76
Şekil 5.18. TEM-t hücresinin çeşitli malzemeler ile yüklenmesi.	77
Şekil 5.19. TEM-t hücresi 3 farklı yalıtkan malzeme ile yüklü iken ölçülen S21 değerleri.	78
Şekil 5.20. TEM-t hücresi 2 farklı iletken malzeme ile yüklü iken ölçülen S21 değerleri.	79
Şekil 5.21. 100 mikron kalınlığında kâğıt yüklü TEM-t hücresi için ölçüm ve simülasyon sonuçları.	80
Şekil 5.22. 1mm kalınlığında FR4 yüklü TEM-t hücresi için ölçüm ve simülasyon sonuçları.	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. TEM Hücresi için seçilen tasarım parametreleri.	32
Çizelge 4.2. Simülasyon için seçilen malzemelerin karakteristik özellikleri.	37
Çizelge 4.3. Açık TEM hücresinde açı denemeleri.	42
Çizelge 4.4. Kapalı TEM hücresinde açı denemeleri	45
Çizelge 4.5. Septum parametrizasyonunda duvar blokları için boyut formülü.	57
Çizelge 4.6. Septum parametrizasyonu için denemesi yapılan farklı boyut değerleri.	57



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	Elektrik alan
H	Manyetik alan
P	Güç
dB/W	desibel/watt
Q	Kalite faktörü
η	Dalga empedansı
η_0	Boş uzayın dalga empedansı (377Ω)
ϵ	Elektriksel geçirgenlik
σ	İletkenlik
r, θ, ϕ	Küresel koordinat sistemi parametreleri
δ	Deri kalınlığı
μ	Manyetik geçirgenlik
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar

3D	3 boyutlu
DC	Doğru Akım
EMG	Elektromanyetik Girişim
EMU	Elektromanyetik Uyumluluk
FBB	Fiziksel Buhar Biriktirme
FM	Frekans Modülasyonu
FR4	Bağıl yalıtkanlık sabiti 4.3 olan alttaş
GTEM	GHz frekanslar için tasarlanmış TEM hücresi
RF	Radyo Frekans
SE (EE)	Shielding Effectiveness (Ekranlama Etkinliği)
SMA	DC-18 GHz frekans bandında çalışan RF konektör
TEM	Transverse Elektrik ve Manyetik
TEM Hücresi	TEM modu iletimi yapan iletim hattı
TEM-t Hücresi	TEM modu iletimi yapan bölünmüş iletim hattı
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio (Duran Dalga Oranı)
Wi-Fi	Wireless Fidelity (Kablosuz İletişim/Transfer)

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler elektronik cihazların daha yüksek frekanslarda ve daha hızlı çalışmasını; aynı zamanda da olabildiğince küçük ve kolay taşınabilir olmasını gerekli kıldı. Bütün bu gelişmeler sayesinde; Bluetooth, Wi-Fi, FM vb. özellikli mobil bir cep telefonu örneği gibi, tek bir cihaz farklı birçok fonksiyonu yerine getirebilir hale geldi. Birbirinden bağımsız cihazların tek bir cihaza entegrasyonu ile ortaya çıkan bu çok fonksiyonlu cihazlar hem kendi içlerinde hem dış ortamları ile ciddi elektromanyetik girişim (EMG) problemlerini de bir araya getirmiştir [1].

Özellikle 2. Dünya savaşı sırasında savaşın hararetine istinaden, elektromanyetik uyumluluk ihtiyacı gözetilmeden kurulan sistemler özellikle savaş uçakları ve savaş gemilerinde probleme yol açmıştır. Bunun üzerine 1960’larda NASA, uzay sistemi projelerinde elektromanyetik girişime yönelik çalışmalara başlamış; peşinden 1970’lerde sayısal elektronik sistemlerinin ani ve hızlı gelişimi ile elektromanyetik uyumluluk bir sistemin göz ardı edilemez ihtiyacı olarak ortaya çıkmıştır [2].

Günlük hayatta da rastlanabilecek bu durum, özellikle askeri sistemler için kritik bir öneme sahiptir. Bu sebeple askeri alanda kullanılan elektronik cihazların elektromanyetik uyumlu olarak tasarlanıp üretilmesi oldukça önemlidir. Bu tür cihazların piyasaya çıkmadan önce ulusal ve uluslararası standartlara göre EMG/EMU uygunluğunun test edilmesi, incelenmesi ve cihazların kendi iç ve dış referanslarına karşı oluşabilecek girişim olasılığının önlenmesi gerekir [1].

“Bir sistemin veya cihazın elektromanyetik uyumlu olabilmesi için; kendi içinde girişime neden olmaması, diğer cihazlarda veya sistemlerde girişime neden olmaması ve diğer cihazlardan veya sistemlerden gelen yayınlara karşı duyarlı olmaması gerekmektedir. Bu doğrultuda, elektromanyetik uyumluluğu sağlayabilmek adına çeşitli çalışmalar yapılmaktadır ve bu çalışmaların etkinliğini değerlendirebilmek için farklı ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir” [3]. TEM hücre yapıları bu yöntemlerden bir tanesidir.

1.1. Ekranlama

Ekranlama; kart, devre ya da cihaz düzeyinde iki ortamı birbirinden elektromanyetik alanda izole etmek olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle ekranlama; kapsadığı bölgeyi dışarıdaki elektromanyetik alandan koruyan, ya da dış çevreyi içerisindeki alanın etkilerinden koruyan bir yapı olarak tanımlanabilir [4]. Elektromanyetik girişim yaratan yayıcı ile izolasyon isteri olan bölge arasına iletken bir engel yerleştirilerek, elektromanyetik yayıcının etkisi azaltılabilir [3]. Ekranlama terimi yerine elektrik-elektronik mühendisliğinde kalkanlama terimi de yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.1.1. Ekranlama Etkinliği

“Ekranlama etkinliği, elektromanyetik girişim kaynağı ile izole edilmek istenen ortam arasında ekranlama malzemesi var iken ölçülen alan şiddetinin, yok iken ölçülen alan şiddetine oranı olarak tanımlanmaktadır” [3].

Elektromanyetik girişime neden olan alanlar, yayıcı kaynağın cinsine ve yer aldığı bölgeye bağlıdır. İhtiyacı bu açıdan değerlendirmek için problemi iki farklı durum ile ele almak gerekmektedir: elektromanyetik bağışıklık ve elektromanyetik yayılım. Elektromanyetik bağışıklık isterini çoğunlukla iletişim sağlayıcı hatlar, radyo-televizyon vericileri ve yıldırım gibi uzak alan kaynaklarının neden olduğu elektromanyetik girişimler kapsamaktadır. Bu tip problemlerde çözüm için uzak alan ekranlama etkinliği verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Burada girişim kaynağı olan alanlar düzlem dalgalarıdır. Elektromanyetik yayılım problemleri ise genellikle, daha sınırlı bir alanda görülen ekranlama malzemesine yakın iç kaynaklı problemlerdir. “Yakın alan ölçümlerinde hem yüksek empedans hem de düşük empedans dalgaları dikkate alınmaktadır” [3].

Bahsi geçen tüm bu girişim ve yayılım problemlerinin çözümü için çeşitli ekranlama etkinliği ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir.

1.1.2. Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri

Elektronik ürünlerin çalışması sırasında oluşturdıkları girişim nedeniyle ortaya çıkan olumsuz etkilerin engellenmesi için oluşturulan ekranlama yapılarının etkin bir biçimde tasarlanması gerekmektedir. Tasarımı yapılacak ekranlama yapılarının, ürünün kullanılacağı yere özgü bir biçimde tasarlanması ve toleranslara uygun olarak üretilmesi daha iyi bir ekranlama etkinliğinin sağlayacaktır [4].

“Ekranlama etkinliği ölçme yöntemleri, “İletim Yolu ile Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri” ve “Işıma Yolu ile Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri” olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. 1956 yılında ışıma yoluyla yayınım metodu kullanılarak MIL-STD- 285 standardı yayınlanmıştır [5]. Daha sonra bu standart 1997 yılında yerini IEEE STD-299 standardına bırakmıştır” [3].

Işıma yolu ile yapılan ekranlama etkinliği ölçümlerinde başta ışımayı sağlayan ya da ışımayı alan uygun yapıda ve frekansta antenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemde iki alternatif şekilde problem tespiti yapılabilir. İlki ekranlı oda yöntemi olup burada alıcı anten ve alıcı ölçüm cihazı oda dışına konumlandırılırken; yayıcı anten ve sinyal üretici oda içinde kalmakta, ölçümü yapılacak ekran malzemesi ise oda duvarındaki bir açıklığa yerleştirilmektedir. İkinci yöntem olan boş uzay yönteminde ise yansısız bir test odasında alıcı-verici antenler ile ekran malzemesi birlikte konumlandırılarak ölçüm alınmaktadır.

Nispeten daha küçük boyutlardaki malzemelerin ekranlama etkinliği ölçümlerinde ise kullanım kolaylığı ve düşük maliyet oluşturması sebebiyle iletim yolu ile yayınım prensibine dayalı yöntemlerin kullanımı ön plana çıkmıştır. Her bir yöntemin öne çıkan veya kısıt yaratan noktaları; başta frekans bandı olmak üzere, tekrarlanabilirlik, dinamik alan, test edilecek ekran örneği için hazırlık/ölçüm süresi ve yöntemi ile büyük ölçüde ilişkilidir [6].

Ekranlı bir ortamda eş dağılımlı elektromanyetik dalgaların bir TEM hücresi içerisinde oluşturulması fikri ilk olarak 1974 yılında National Bureau Standardı için Prof. Myron L.

Crawford tarafından ortaya atıldı [7]. Crawford; bu problemin çözümünü iletim yolu ile uzak alan ekranlama etkinliği yöntemini benimseyen yeni bir teknik olarak tanımlamıştır. Bu yöntemde enine elektromanyetik dalgalar, genişletilmiş bir 50 ohm iletim hattı üzerinde iletilmektedir. TEM hücresi, standart eş eksenli konektörlere uyum sağlamak üzere iki uca doğru sivrilene dikdörtgen eş eksenli iletim hattından meydana gelir [3]. Bu yapı elektrik alan prob kalibrasyonu ile elektrik alan bağışıklık ve yayılım ölçümlerinde kullanılabilmektedir [2].

İlk olarak 1983 yılında dairesel eş eksenli iletim hattı yapısı üzerinde düzlemsel malzemelerin, elektromanyetik ekranlama etkinliği ölçümlerinde kullanılan test yöntemlerini içeren ASTM ES7-83 standardı yayınlanmıştır. Daha sonra bu standart 1989 yılında ASTM D4935 olarak güncellenmiştir. Tekrar 1999 yılında ASTM D4935 standardında bazı düzenleme ve değişiklikler yapılmış olup en son 2010 yılında güncellenerek ASTM D4935-10 adı ile yayınlanmıştır [3].

Yayınlanan bu standartlarda dairesel eş eksenli iletim hattı yapısı üzerinde durulsa da bu yaklaşım dikdörtgen eş eksenli iletim hattı yapısında da uygulanabilir. TEM hücresi, ASTM ES7-83 standardında kesintisiz bir eş eksenli iletim hattı olarak gösterilmiştir. ASTM D4935 standardında ise, TEM hücresi üst üste birleştirilmiş iki eşit parçadan oluşan kesintili bir iletim hattı yapısındadır. Bu yapı TEM-t hücresi olarak isimlendirilmektedir. TEM-t hücresi yapı olarak bir adet düzlemsel iç iletken (canlı uç) ve uçlara doğru sivrilene konektörlerde birleşen iki tane dış toprak yüzeyinden meydana gelmektedir [3].

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı, elektronik ürünlerin elektromanyetik girişim (EMG) ve elektromanyetik uyumluluk (EMU) testleri için kullanılan küçük boyutlu bir TEM-t hücresinin yansıma ve iletim özelliklerinin en iyilenmesine yönelik çözümleri simülasyon ortamında incelemek ve elde edilen optimal çözüm senaryosunda TEM-t hücresinin üretimini sağlayarak sonuçları kıyaslamaktır.

Yürütülen çalışmada 1 GHz kesim frekansında ve bu frekansın sınırlandığı boyutlarda açık ve kapalı TEM-t hücreleri CST simülasyon programında tasarlanmıştır [8]. Tasarım aşamasında TEM-t hücresinin yansıma ve iletim özelliklerinin en iyilenmesine yönelik septum ve alt-üst toprak plakalarının boyutsal ve açısal çeşitli değişim modelleri üzerinde çalışılmıştır.

Literatürde özellikle septum etkinliği üzerine yürütülen çalışmalar mevcut olup, TEM-t hücresinin toprak plakalarının eğim açılarının hücre performansına etkileri üzerine yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürde karşılaşılan septum tasarım iyileştirme önerileri bu çalışma içerisinde yapılan simülasyon denemeleri ile incelenmiştir. Toprak plakaların eğim açıları ise değiştirilerek optimum açısal performans eldesi için farklı durumlar incelenmiştir. Burada literatürde de benzer özellik gösteren yansıma karakteristiğinin MATLAB ortamında bir eğriye uyumlandırma formülasyonu da çalışılmıştır [9].

Bir sonraki aşamada model üzerinde elde edilen yüksek performanslı TEM-t hücresinin üretim sürecine odaklanılmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi küçük boyutlu TEM-t hücrelerinin tercih edilme sebeplerinden biri ve belki de en önemlisi maliyettir. Bu bakış açısından yola çıkarak üretim sürecinin maliyetini de düşürebilecek bir alternatif olarak 3 boyutlu yazıcılar ile plastik malzeme kullanılarak üretimi tamamlayıp, uygun iletkenlik ve düşük yüzey direncine sahip bir malzeme ile ürünü iletken hale getirmeye odaklanılmıştır. Bu aşamada biri diğerinin boyutsal olarak $\frac{1}{2}$ oranında küçültülmüş 2 farklı TEM-t hücresinin optimal açılardaki simülasyonu yenilenmiş ve performans farkı görülmemiştir. Akabinde açısal özellikleri ve septum yapısı ortak ancak boyutsal olarak farklı bu iki yapı 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Üretim sürecinde yine aynı cihaz ve aynı malzeme kullanılmıştır. Bir sonraki aşamada ise ortaya çıkan bu plastik TEM-t hücrelerinin farklı iletkenlik özelliği taşıyan malzemeler ile kaplanması için incelemeler yapılmıştır. İlk alternatif olarak Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemi ile kaplama denemesi için üretilen TEM-t hücresi ile aynı boyut ve özellikte kupon ürün kullanılarak kaplama denemesi gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığa ve basınca bağlı ürün özelinde eğilme/bükülmeler gözlemlenmesi sonucu bu yöntem ile ilerlenemeyeceği gözlemlenmiştir. İkinci bir alternatif olarak EMU/EMG laboratuvarlarında sıklıkla

kullanılan yüksek iletken özellikli alüminyum bant kullanılarak kaplama yöntemi incelenmiştir. Bu bant görece büyük ebatlı TEM-t hücresinde kullanılmış ve elde edilen ürünün yansıma ve iletim katsayıları (S-Parametreleri) Vektör Ağ Analizör'ü yardımıyla ölçülerek elde edilen pratik sonuçlar simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır. Görece daha küçük ebatlı TEM-t hücresi için ise alternatif bir yüzey kaplayıcı olarak bakır folyo denenmesine karar verilmiştir. Folyonun hücre yüzeyine yapışabilmesi için çift taraflı bant kullanılarak kaplama yapılmıştır. Elde edilen ürünün iletim ve yansıma katsayıları (S-Parametreleri) yine Vektör Ağ Analizör'ü ile ölçülmüş, elde edilen pratik sonuçlar simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Küçük boyutlu ve bakır kaplı ürünün performans analizleri sonucu aynı ebatlı ürünün tekrar yüksek iletken özellikli alüminyum bant kullanılarak da üretimi sağlanmıştır. Elde edilen her bir TEM-t hücre yapılarının pozitif ve negatif yönde fark yaratan özellikleri çalışılmıştır.

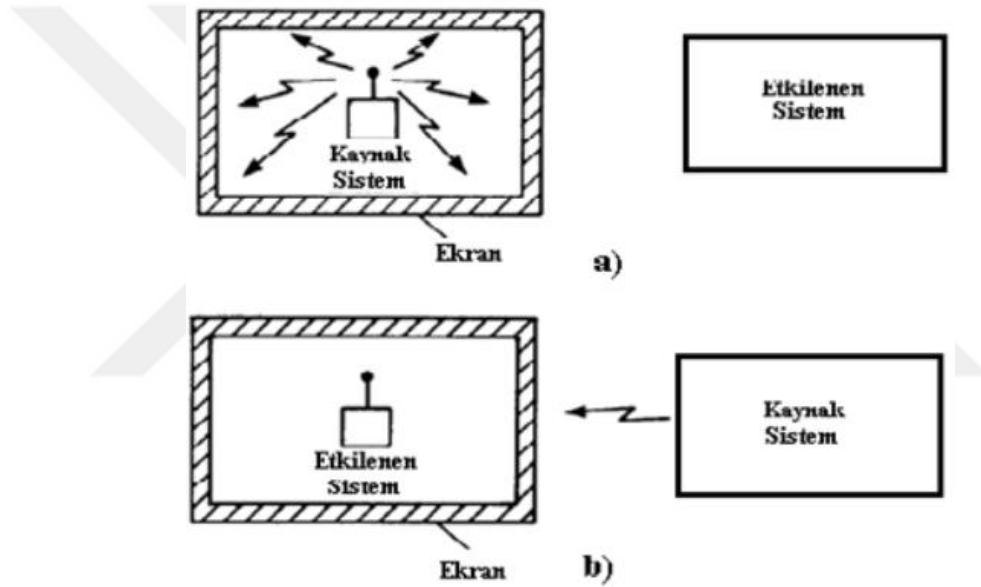
Paralelde simülasyon ortamında ise düzlemsel malzemelerin TEM-t hücresine yerleşim şeklinin ölçüm sonuçlarına etkisi incelenmiştir. İlk denemede ölçümü yapılacak düzlemsel malzeme septumu bölmeyecek şekilde TEM-t hücresinin yarısına kadar yerleştirilmiş, ikincide yine septumu bölmeden iki parça halinde yerleştirilmiş, son denemede ise septumu da dahil ederek tek parça olarak yerleştirilmiştir. Simülasyonda 100 mikron kalınlığında FR4 malzemesi kullanılmıştır.

Çalışmanın devamında üretimi ve iletken kaplaması yapılan alüminyum yüksek iletken özellikli bantla kaplı, küçük boyutlu TEM-t hücresi ile bazı düzlemsel malzemelerin ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Burada kâğıt ve FR4 için gerçek ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca kot kumaşı, alüminyum folyo ve gümüş katkılı malzemelerin de aynı TEM-t hücresi ile ölçümleri yapıp analiz edilmiştir.

2. EKRANLAMA ETKİNLİĞİ TEORİSİ

Ekranlama yapıları, elektromanyetik dalgaların azaltılması için kullanılan, genellikle maliyeti düşük ve etkili koruma yapılarıdır [4].

Ekranlama, iki temel amaca hizmet etmek üzere kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, bir elektronik donanımın çalışma durumunda dışarıya sinyal yaymasını engellemek; ikincisi ise elektronik sistemlerin dışarıdan gelen muhtemel girişim kaynaklarına karşı duyarlılığını düşürmektir.



Şekil 2.1. Ekran Muhafazasının Kullanım Şekilleri a) Emisyonu Tutan Ekran, b) Emisyondan Koruyan Ekran [3].

Bu şekilde kaynak ile etki altındaki sistemin arasına iletken bir engel yerleştirilmesi ile elektromanyetik kaynağın etkisi azaltılabilir. Bu işlem ekranlama olarak ifade edilir.

2.1. Ekranlama Etkinliği

Bir malzemenin elektromanyetik radyasyona karşı koruma mekanizması Schelkunoff modeliyle açıklanmaktadır. 1938'de empedanslı elektromanyetik dalga kavramından geliştirilen bu konseptte, boş uzaydaki bir elektromanyetik dalganın sonsuz düz bir

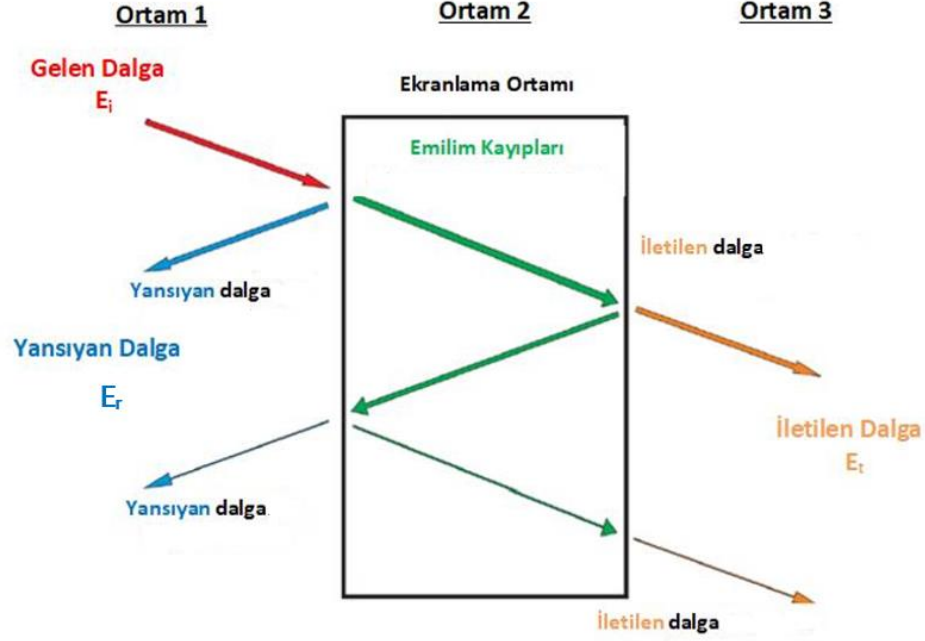
koruyucu ortam tabakasına çarptığı modelin şematik temsili Şekil 2.2’de gösterilmektedir.

Gelen dalga E_i 'nin yansıyan dalga E_r haline gelen kısmı, 2 nolu ortam yüzeyinin yansıma katsayısına bağlıdır. Geriye kalan kısım ise, $e^{-d/\delta}$ faktörü kadar zayıflatılarak malzeme içerisinde taşınır. Burada δ , ortam 2'nin deri kalınlığı; d ise ortam 2'nin malzeme kalınlığıdır. “Ekran malzemesine giren bir elektromanyetik dalganın genliğinin %37’sine düşmesi için gereken mesafeye o ekranın deri kalınlığı denir” [3].

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi ortam 2'den çıkış noktasında ise başka bir yansıma/iletim senaryosu meydana gelir. Bu noktada ise malzemenin çıkış duvarından yansıyan dalga tekrar materyalin içinden geri döner, iletilen kısım ise nihai E_t 'nin oluşmasına sebep olur. Görüldüğü gibi malzemenin içinde birden fazla yansıma durumu meydana gelir ve her biri kendi içinde toplanarak E_r ve E_t dalgalarını oluşturur. Burada 2 nolu ortamın içindeki zayıflama nedeniyle çıkış katındaki yansımalar ve iletimler çok azalır. Ortam 2'nin et kalınlığı δ 'dan büyükse, çıkış katındaki yansımaların değerleri çok küçük olacağından bu değerlerin E_r ve E_t ’ye katkıları ihmal edilebilir.

Deri kalınlığı değeri, δ , ekranlama malzemesinin elektriksel özellikleriyle bağlantılıdır. Bu bağ σ iletkenlik ve μ manyetik geçirgenlik ile ifade edilebilir olup, eşitlik (2.1)’de tanımlandığı gibidir. Deri kalınlığı aynı zamanda çalışma frekansına da bağlıdır: frekans arttıkça deri kalınlığı azalır ve dolayısıyla etkili bir ekranlama için kullanılacak malzemenin kalınlığı azalır.

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \sigma \mu)} \quad (2.1)$$



Şekil 2.2. Schelkunoff ekranlama modeli [10].

Daha önce de bahsedildiği gibi ekranlama etkinliği (SE), herhangi bir malzemenin bir elektromanyetik dalgayı ne kadar iyi zayıflattığını tanımlamak için kullanılır. Bu etkiyi ölçmenin kabul edilen yöntemi, söz konusu malzemenin her iki tarafındaki elektrik alan kuvvetinin basitçe ölçülmesidir.

Şekil 2.2’de gösterilen durum düşünüldüğünde 2 nolu ortamın sol tarafındaki alan gücünün, sağ tarafındakinden ($E_i > E_t$) daha yüksek olacağı aşıkardır. Bunu ifade etmenin basit ve kabul edilen bir yolu da bu iki nicelik arasındaki oranı hesaplamaktır. Ekranlama etkinliği; elektrik alan şiddeti E , manyetik alan şiddeti H veya güç yoğunluğu S şeklinde verilebilir. Genellikle ekranlama etkinliği, desibel cinsinden ve aşağıdaki formüllerle ifade edilir.

$$SE_{dB}^E = 20 \log_{10} \left(\frac{|E_i|}{|E_t|} \right) \quad (2.2)$$

$$SE_{dB}^H = 20 \log_{10} \left(\frac{|H_i|}{|H_t|} \right) \quad (2.3)$$

$$SE_{dB}^P = 10 \log_{10} \left(\frac{S_i}{S_t} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.4)$$

Burada SE^E , SE^H ve SE^P sırasıyla elektrik alan, manyetik alan ve güç ekranlama etkinliğidir. E_i , H_i , S_i değerleri Şekil 2.2'deki gelen dalga E_i 'ye eşdeğer olan ve ekranlama yokken elde edilen referans ölçümleridir. E_t , H_t , S_t ise Şekil 2.2'de iletilen E_t dalgasına eşdeğer olan ve ekran varken alınan ölçümlerdir.

P_{out} ve P_{in} ise, bir test ürününün sırasıyla ekran varken ve ekran yokken ölçülen güç değerleridir. Ekranlama etkinliğini hesaplayabilmek için kullanılabilen bu güç ölçüm yöntemi, ekranlama ölçümlerinde hem malzeme kaplama hem de hücre kaplama düzeneklerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2. Dalga Empedansı, Yakın Alan ve Uzak Alan

“Elektromanyetik ekranlama, yakın alan ekranlama bölgesi ve uzak alan ekranlama bölgesi olmak üzere iki bölgeden oluşur. Elektromanyetik düzlem dalga teorisi genellikle uzak alanda elektromanyetik ekranlama için uygulanır” [3].

Herhangi bir ekranlama malzemesinin ekranlama etkinliği, söz konusu malzemenin yansıma ve zayıflama katsayılarının bir fonksiyonu olup, iletilen dalganın genliğine bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi bir malzeme içerisinde elektromanyetik dalganın zayıflaması $e^{-d/\delta}$ ile tanımlanmaktadır.

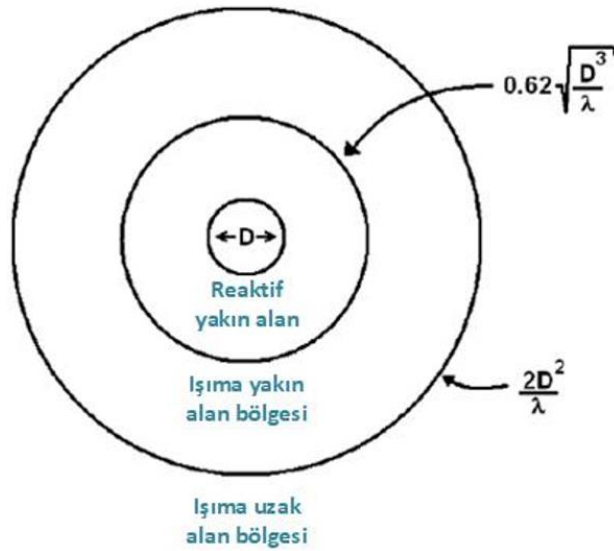
Bir elektromanyetik dalganın (η) dalga empedansı Maxwell denklemlerinin düzlem dalga çözümünden ortaya çıkıyor olup örneğin z yönünde ilerleyen, x yönünde elektrik alan, y yönünde manyetik alanı olan bir düzlem dalga için Formül 2.5'teki gibi verilebilir.

$$\eta = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.5)$$

Burada E_x ve H_y sırasıyla elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin büyüklükleridir. Bunlar kendi içinde birbirlerine dik olup dalganın yayılma yönüne normaldir. Boş uzayda

dalga empedansı $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$ olur.

Bu ilişki yalnızca elektromanyetik dalganın tam olarak oluştuğu uzak alan bölgesi olarak bilinen bölgede geçerlidir. Kaynağın bir elektrik dipol anten olduğunu ve kaynağa olan gözlem mesafesinin R olduğunu varsayarsak, uzak alanın tanımı (Fraunhofer bölgesi olarak da bilinir) $\frac{2D^2}{\lambda}$ mesafesi ile belirlenir. Rayleigh Aralığı (R) olarak da bilinen bu değer $\frac{1}{R}$ ve bu değer eksponansiyel katlarına bağlı olup, Maxwell denklemlerinin çözümlerindeki $\frac{1}{R^2}$ ve daha yüksek terimler yok denecek kadar küçük olduğundan, hesaplamalarda ihmal edilebilir. Bir ışıma modelinin çeşitli bölümleri Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Burada D ; söz konusu yayıcı antenin en büyük boyutudur [11].



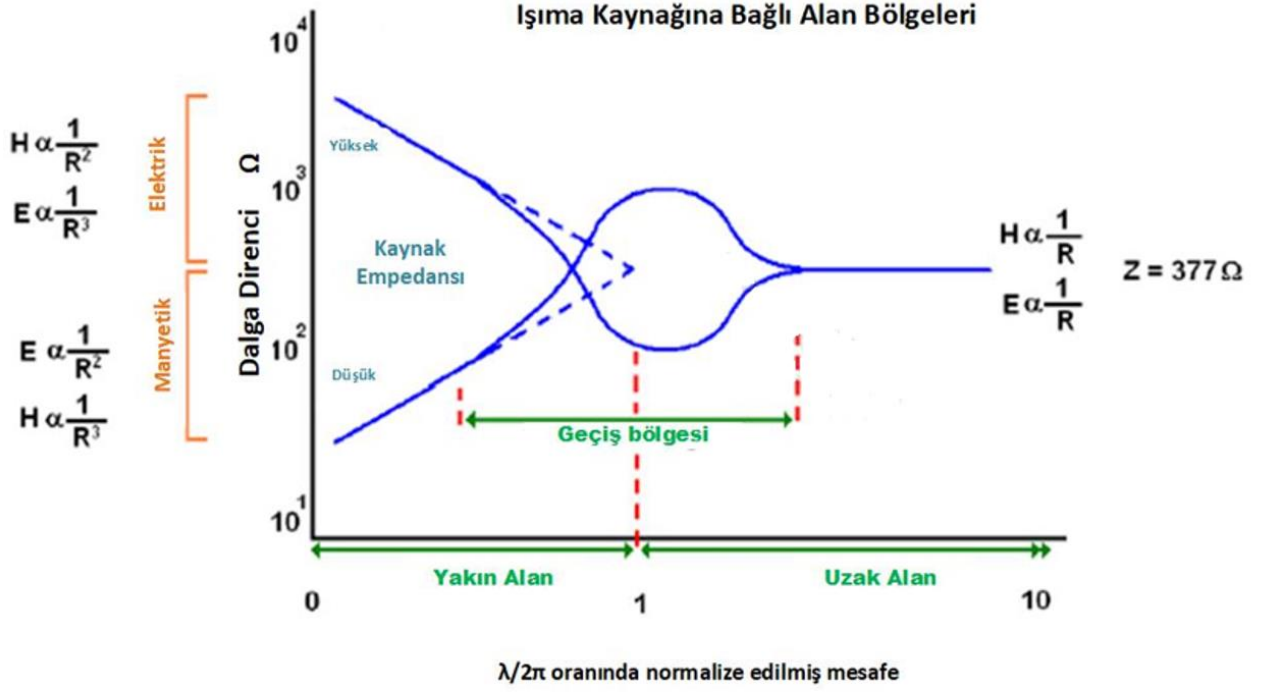
Şekil 2.3. Işıma kaynağına yakın alan bölgeleri.

Yakın ve uzak alan bölgeleri arasındaki sınır da anten boyutundan bağımsız olarak $\frac{\lambda}{2\pi}$ değeri ile verilmektedir. “Bu formül, yakın alandan uzak alana geçişin başladığını ifade etmek adına genel bir ifade olarak kabul görmektedir” [3]. Bu noktada yakın alan bölgesinde herhangi bir frekansta yayın yapan bir antenin, daha yüksek frekanslara çıktıkça bir uzak alan kaynağına dönüşebildiği ifade edilebilir [12]. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi uzak alan durumunun tam olarak oluşabilmesi için öncelikle bir geçiş bölgesi oluşması gerekmektedir.

Uzak alan tanımının içinde, kaynak (bir çift kutuplu anten) ile aradaki mesafenin, manyetik alanlar için $\frac{1}{R^2}$ büyüklüğünde ve elektrik alanlar için ise $\frac{1}{R^3}$ büyüklüğünde bir orana bağlı olmadığı bir yakın alan bulunur. Bir döngü anten için, elektrik alan $\frac{1}{R^2}$; manyetik alan ise $\frac{1}{R^3}$ bağımlılığına sahiptir.

Yakın alan bölgesi ise reaktif yakın alan (antene en yakın) ve yayılan yakın alan (veya Fresnel) bölgeleri olarak ikiye ayrılıyor olup aralarındaki sınır noktası $D > \lambda$ olduğu durumda $0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ formülü ile bulunur.

Sonuç olarak ortamda bir elektrik dipol bulunduğu durumda dalga empedansı $\frac{1}{R}$ ile orantılı olup 377Ω 'dan büyüktür. Manyetik döngü durumunda ise empedans R ile orantılıdır ve genellikle 377Ω 'dan küçüktür. Denklemlerden türetilen bu durum Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Bu $\frac{1}{R}$ bağımlılığının korunabilmesi için tüm ölçümlerin uzak alanda yapılması gerekir. Bu durum özellikle yankısız odalarda kullanıldığında odanın çalışma hacmiyle ilgilidir. Yakın alanda ise, malzemenin ekranlama etkinliğinin manyetik koruma ve elektrik koruma için ayrı ayrı dikkate alınması gerekir; yani bu durum kaynağın manyetik (düşük dalga empedansı) veya elektrik (yüksek dalga empedansı) olmasına bağlıdır [10].



Şekil 2.4. Dipol bir kaynaktan bulunan mesafeye bağlı dalga empedansındaki değişim.

Yayılma yönü r olup; θ yönünde elektrik alanı, ϕ yönünde manyetik alanı olan bir dalga için elektrik alan enine bileşeninin büyüklüğünün manyetik alan enine bileşenine büyüklüğüne oranı dalga empedansı olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta = \frac{E_{\theta}}{H_{\phi}} \quad (2.6)$$

Bir düzlem dalganın kayıplı bir ortamda yayılması durumunda ise dalga empedansı,

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2.7)$$

olarak ifade edilir. Burada ϵ ortamın elektrik geçirgenliği; μ ortamın manyetik geçirgenliği ve σ ortamın iletkenliğidir. Uzak alan yaklaşımında bir elektromanyetik dalganın, elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirlerine dik olup her iki bileşen de dalganın ilerleme yönüne de diktir. Bu iki bileşen, enine elektromanyetik (TEM) dalgaları meydana getirmekte olup; TEM dalgalarının dalga empedansı bulunduğu ortamın öz empedansına eşittir.

Bilindiği gibi boş uzayın (havanın) öz empedansı $\eta_0 = 377\Omega$ 'a eşittir. Yalıtkan ortamlar ($\sigma \ll j\omega\epsilon$) için ise dalga empedansı frekanstan bağımsızdır ve $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ formülü ile ifade edilir. İletken ortamlar için $\sigma \gg j\omega\epsilon$ ise dalga empedansı (bir diğer ifade ile ekran empedansı) artık frekansa bağımlı olup η ;

$$\eta = \sqrt{j\omega \frac{\mu}{\sigma}} \quad (2.8)$$

$$|\eta| = \left| \sqrt{j\omega \frac{\mu}{\sigma}} \right| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \sqrt{f} \quad (2.9)$$

olarak ifade edilir. Burada $\mu = \mu_0\mu_r$ ve $\sigma = \sigma_r\sigma_r$ olup; μ_0 havanın manyetik geçirgenliği, μ_r bağıl manyetik geçirgenlik, σ_0 bakırın iletkenliği, σ_r ise bağıl iletkenlik olarak adlandırılır [13].

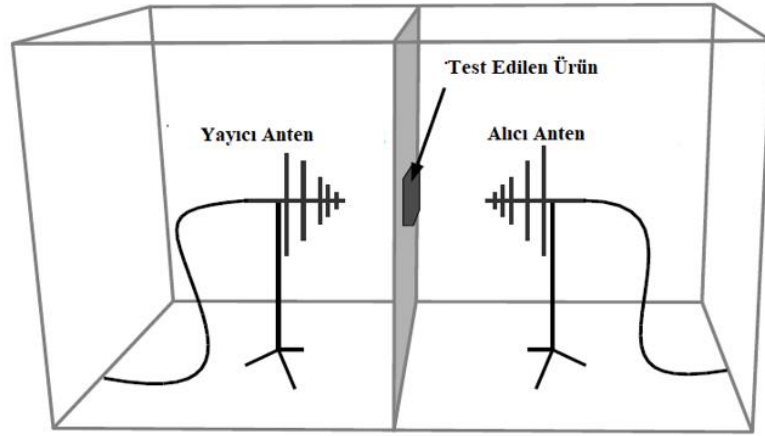
“Yakın alan bölgesinde ise dalga empedansı elektromanyetik girişim kaynağının karakteristiğine ve bu kaynağın gözlem noktasına olan mesafesine bağlıdır. Yüksek akım ve düşük voltaj kaynağı var ise manyetik alan etkindir ve dalga empedansı $\eta < 377\Omega$ olur. Yüksek voltaj ve düşük akım kaynağı var ise elektrik alan etkindir ve dalga empedansı $\eta > 377\Omega$ olarak ifade edilir” [3].

Bu noktada, yakın ve uzak alan durumlarına ilişkin yukarıdaki tartışmanın boş alandaki yayılımlar için geçerli olduğunu, bir muhafaza içindeki davranışın farklı olduğunu belirtmek gerekir. Kapalı bir muhafaza içinde ise hücrenin duvarlarından yansıyan dalgaları ihmal edebilmek için belirli bir mesafenin (genellikle $\frac{\lambda}{4}$ olarak belirtilir) olması gerekmektedir [10].

3. EKLANLAMA ETKİNİĞİ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

3.1. MIL-STD-285 Metodu Ölçüm Yöntemi

Ekranlama etkinliği ölçümlerinin temeli 1956'dan itibaren Amerikan askeri standardı MIL-STD-285'ti [5]. Standart artık yürürlükten kaldırılmıştır ancak bu türden temele dayalı geliştirilmiş yöntemler yeni standartların gelişmesini sağlamıştır. Yöntem, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, ortak bir duvarı olan iki ekranlı odaya ihtiyaç duyar. Bu duvarda test nesnelerinin monte edildiği bir açıklık bulunmaktadır. Bir odada verici anten, diğer odada ise alıcı anten bulundurulur; birbirlerine doğru ve birbirlerinden eşit uzaklıkta olacak şekilde yönlendirilir. Verici anten sabit güçte iletim yapmakta olup alıcı anten ise açıklığa monte edilmiş test nesnesi varken ve yokken aktarılan gücü ölçer. Bu ölçümler arasındaki fark, test nesnesinin araya girme kaybıdır. MIL-STD-285'e göre yapılan ölçümler geçmişte iletken özellikteki koruyucu malzemeleri ve iletken contaların performansını incelemek için kullanılmıştır. Yöntemin en temel dezavantajları, ölçülen araya girme kaybının anten yerleşimine ve ekranlanmış odalar içindeki elektromanyetik dalganın yansımalarına bağlı olmasıdır. Bu durum tekrarlanabilirliğin zor olmasına sebep olur [15].



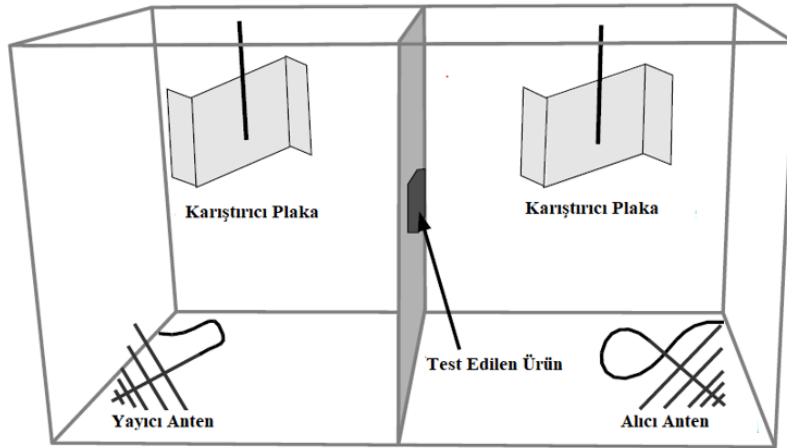
Şekil 3.1. MIL-STD-285 Standardına göre ekranlama etkinliği ölçümü.

MIL-STD-285'teki yöntemin geliştirilmiş versiyonları, bölmelerde emici malzemenin kullanılmasıyla yansıma sorunlarının en aza indirilmesi amacıyla geliştirilmiştir. MIL-STD-285'teki yöntemin geliştirilmiş bu versiyonu, 1997'deki IEEE-STD-299

standardında da bulunabilir [16]. Bu yöntemin frekans aralığı ise birkaç MHz'den 18 GHz'e kadardır [17].

3.2. Çift Modlu Karıştırma Odası

Çift modlu karıştırma odası veya ikili yankılanma odası yöntemi olarak adlandırılan bu ölçüm yöntemi İsveç Savunma Araştırma Ajansı FOI ile ABD'deki Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından ilk kez ortaya konmuştur [17]. Test nesnelerinin montajı için bir açıklığa sahip ortak bir duvarı bulunan, yan yana iki modlu karıştırma odası kullanır. Şekil 3.2'deki mod karıştırmalı oda, içinde çok sayıda mod içeren elektromanyetik alanlar oluşturmak için mod karıştırma düzenine sahip korumalı bir yapıdır. Mod karıştırma düzeneği, mekanik bir çark veya belli periyotlarla döndürülebilen yüksek iletkenliğe sahip benzer bir yapı olabilir [15].



Şekil 3.2. Çift modlu karıştırma odası altyapısı ile ekranlama etkinliği ölçümü.

Odalardaki çok modlu elektromanyetik alanın genliği, basit yapılı bir güç yükselteci kullanılarak artırılabilir. 1 Watt'lık çıkış gücüne sahip bir yükselteç, odanın kalite faktörüne (Q) bağlı olarak, 100 Volt/m veya daha fazla elektrik alan oluşturmak için kullanılabilir [18].

Bu altyapı ile farklı elektromanyetik ortamlarda farklı ölçümler elde edilecek şekilde bir 'mod karıştırma' mekanizması ortaya konmuş olur. Karıştırma mekanizması hücrede

sürekli değişen bir elektromanyetik ortama neden olduğundan farklı mod durumları için yapılabilecek ölçümlerde kolaylıkla kullanılabilir. Bu yapı, ölçümleri önemli ölçüde kolaylaştırır. Örneğin antenlerin nereye yerleştirildiği burada kritik değildir. Buradaki en büyük dezavantajlardan ilki mod karıştırmayı kontrol etmek için kullanılan ekipmanın pahalı olmasıdır. İkinci büyük dezavantaj ise bu yöntemin, test nesnesinin belirli bir yönden belirli bir alan polaritesine özellikle duyarlı olup olmadığını göstermemesidir [15]. Yöntem için alt frekans sınırı yaklaşık 500 MHz'dir ve bu değer odanın en küçük boyutuna bağlıdır (bir oda içindeki en küçük mesafe, en düşük frekansın dalga boyunun yedi katı olmalıdır, yani 500 MHz için dört metreden fazla mesafe gerekir) [19].

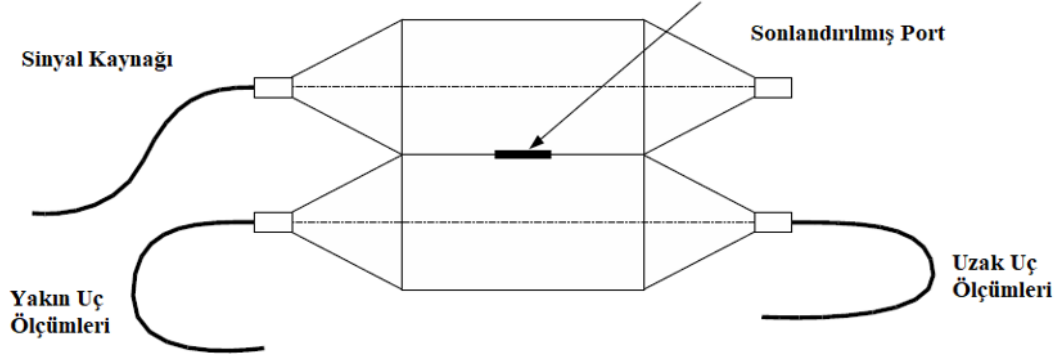
3.3. Yankılı Odada Delikli TEM Hücresi

Bu yöntem, tek modlu karıştırma odası yönteminden türetilmiş olup aynı mantıktan faydalanan bir yöntemdir [17]. Oda içinde bir verici anten ve alıcı olarak da delikli bir TEM hücresi yer almaktadır [17]. Verici antenin ve TEM hücresinin konumu kritik değildir ancak anten TEM hücresinin doğru yönlendirilmemesi ve TEM hücresi duvarlara ve diğer yansıtıcı nesnelere yakın olmamalıdır [15].

TEM hücresi dikdörtgen bir eş eksenli iletim hattının genişletilmiş bir bölümüdür. Ölçümü yapılacak numune, TEM hücresindeki bir açıklığın üzerine monte edilir. Daha sonra antenle bir elektromanyetik alan oluşturulur ve TEM hücresinin bağlanan bir alıcı, numunedeki sızıntıyı ölçmek için kullanılır. Kullanılabilir frekans aralığı 200 MHz ile 1 GHz arasında olup, bu yapının dinamik alanı ise yaklaşık 100 dB'dir [20].

3.4. Çiftli TEM Hücresi

Delikli TEM hücresi mantığından yola çıkan ancak daha ucuz olan bir diğer yöntem, ikili TEM hücre yöntemidir [17]. Burada iki TEM hücresi Şekil 3.3'teki gibi "bindirme" şeklinde birbirine bağlanmıştır.



Şekil 3.3. Çiftli TEM hücresinde ekranlama etkinliği ölçümü.

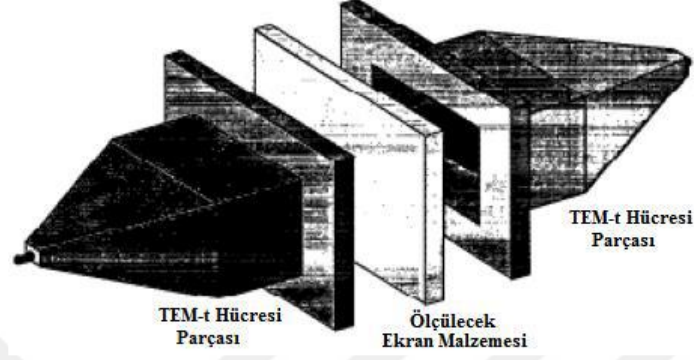
TEM hücreleri ortak duvardaki bir açıklık yoluyla birbirlerine bağlanır. Bu ölçüm yönteminin en önemli özelliği, bu yapı sayesinde yakın alan ekranlama etkinliği ölçümlerinin elde edilebilmesidir.

4 portlu bu TEM hücresinin bir portu sinyal kaynağına bağlanır, bir portu ise 50 Ω terminasyonla sonlandırılır. İkinci yarıdaki TEM hücresi ise sırasıyla elektrik alan ve manyetik alan ölçümlerinin yapılabileceği iki çıkışa sahiptir. Ölçümler sırasında hücrenin ortasındaki açıklık incelenen numune ile kapatılır. Referans ölçüm (ekran malzemesi yokken) ve ekran malzemesi ile birlikte gerçekleştirilen ölçümler karşılaştırılır ve ekranın etkinliği belirlenir.

Bu yöntemin en temel dezavantajı, elektrik alanının polarizasyonunun numuneye normal olmasıdır [17]. Yöntemin en can alıcı özelliği ise ikinci yarıdaki TEM hücresinin her iki ucunda alınan güç ölçümleri ile hem elektrik hem de manyetik alan ekranlamasının aynı anda gözlemlenebilmesidir. Böylece, ikili TEM hücresi hem yüksek hem de düşük empedanslı yakın alan ekranlama etkinliğini simule edebilmektedir [21]. Bu yöntemin çalışma frekans aralığı 1 MHz ile 200 MHz arasında olup dinamik alanı yaklaşık 60 dB'dir [15].

3.5. Ayrık (Bölünmüş) TEM Hücresi (TEM-t Hücresi)

TEM hücresinin diğer bir kullanımı bölünmüş TEM hücresidir, buna dikdörtgen bölünmüş iletim hattı tutucusu da denir [17].



Şekil 3.4. TEM-t Hücresi [3].

Bölünmüş TEM hücresi, dairesel eş eksenli tutucular gibi 50Ω 'luk hattan meydana gelir ve sıradan bir TEM hücresi gibi iki yarı eş parçadan oluşur. Ölçümü yapılacak iletken ekran numunesi eş parçaların tam ortasına yerleştirilir. Hücrenin numune tarafından kısa devre yapması için hem merkez iletkenin (septum) hem de dış iletkenin her iki tarafta numuneyle iyi temas etmesi gerekir. Ekranlama etkinliği hesabı için biri malzemesiz (referans) biri malzemeli olmak üzere iki ölçüm gereklidir. Referans ölçümler malzeme olmadan doğrudan iki hücre parçasının birbirine direkt bağlantısı ile gerçekleştirilir. “Referans ölçüm ve ekran malzemesi ile birlikte gerçekleştirilen ölçüm karşılaştırılır ve ekranın etkinliği belirlenir” [3].

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{S_{21,R}}{S_{21,L}} \right| \quad (3.1)$$

Burada $S_{21,R}$ ve $S_{21,L}$ sırasıyla referans ve ekran malzemesi bulunduğu durumlarda yapılan ölçümler sonucunda bulunan saçılma parametreleridir (araya girme kayıplarıdır).

Bu yöntemde ayrıca TEM hücresinin alıcı yarısı, manyetik alan koruma verimliliğini ölçmek için modifiye edilebilir. Bir döngü anteni, duvarında 90 derece açılı reflektör bulunan bir kutuyla birleştirilir. Döngü anteni, döngünün dörtte üçü kutunun içinde ve

dörtte biri kutunun dışında olacak şekilde reflektörün içine monte edilir. Bir ölçüm yapılırken reflektörlü ve çeyrek döngü antenli duvar, yarım TEM hücresi ve aradaki numune ile birleştirilir. Bu yöntemin frekans aralığı 1 MHz ila 1 GHz (H alanı için 1 MHz ila 400 MHz) ve dinamik aralık yaklaşık 70-80 dB'dir [15].

3.6. Dairesel Koaksiyel Tutucular

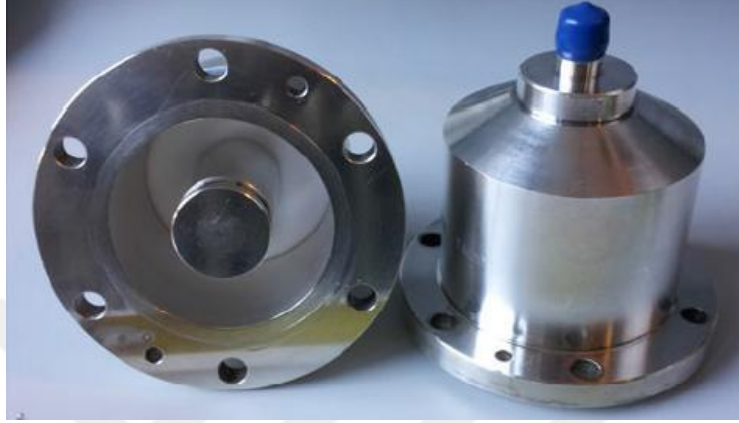
Bu test yapılarının oldukça farklı iki versiyonu bulunmaktadır. İlki Sürekli İletken Dairesel Koaksiyel Tutucu olup bu yapı standart 50Ω koaksiyel konektöre uyacak şekilde konik uçlara sahip, genişletilmiş bir 50Ω koaksiyel iletim hattıdır. Ölçülecek numunenin, hücrenin iç ve dış iletken arasına sığacak ve dolayısıyla iletim hattını kısaltacak şekilde halka şeklinde bir rondela formuna sahip olması gerekir. Sürekli iletken test fikstürü, ASTM-ES7 hücresi olarak da biliniyor olup DC ila 1 GHz çalışma frekansı aralığına ve 90-100 dB dinamik alana sahiptir [15].



Şekil 3.5. Sürekli İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu [12].

İkinci yapı ise Ayrık İletken Dairesel Koaksiyel Tutucu olup bu versiyon ASTM-D4935 standardında anlatılmıştır. “Bu yöntem ASTM-ES7 yönteminin temas problemini ortadan kaldırmak üzere yapılan çalışmaların sonucunda geliştirilmiştir. ASTM-ES7 yönteminin en kritik noktası test edilen ekran malzemesinin sürekli iletken dairesel eş eksenli tutucu ile elektriksel olarak temas halinde olmasıdır. ASTM-D4935 hücresinin temel amacı ise ayrık iletken bir yapıda elektriksel temas oluşturmada doğru bir ekranlama etkinliği

ölçümü sağlamaktır. Bu yapı temel olarak, kesintili bir iç iletken ve bağlantı noktaları bulunan bir dış yapıdan oluşmaktadır. Test hücresi iki parçalı ayrık eş eksenli dalga kılavuzu yapısındadır” [3]. Bu; test numunelerinin montajını kolaylaştırır. Malzemenin hem referans ölçümü hem de gerçek ölçümü için test numunelerine ihtiyaç vardır [15].



Şekil 3.6. Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu [3].

Referans ölçümü için merkez iletkenler arasına disk şeklinde küçük bir parça, dış iletkenler arasına ise pul şeklinde büyük bir parça yerleştirilir. Gerçek ölçümde, fikstürün iki yarısı arasına disk şeklinde büyük bir parça yerleştirilmiştir. Bu yöntem, merkez ve dış iletken arasındaki bölge hariç, hücrenin iki parçası arasındaki mesafeyi ve malzemeyi sabit tutar. Dış iletken, hücrenin iki yarısı arasında iyi bir kapasitif bağlantı sağlamak için flanşlarla donatılmıştır [15]. Araya girme kaybı, büyük disk örneğinin ölçümü ile referans ölçümü arasındaki fark olarak hesaplanır. Bu yapı 1 MHz ila 1.8 GHz frekans aralığına ve 90-100 dB dinamik aralığa sahiptir [17].

3.7. Çift Odalı Test Fikstürü (ASTM ES7-83)

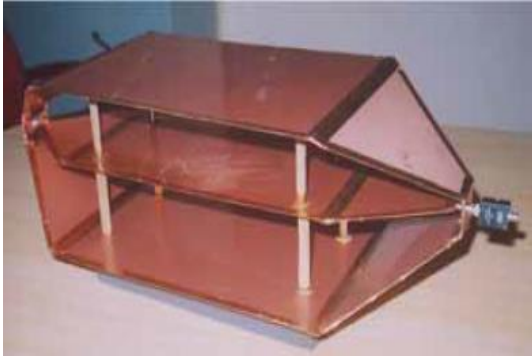
Bu yapı iki bölüme ayrılmış bir kutudan oluşuyor olup her bölümün iç kısmına sabitlenmiş kendi anteni vardır. Numune malzemeden bir tabaka iki bölüm arasına sıkıştırılır ve malzeme içindeki aktarım ölçülür. Referans olarak antenler arasındaki iletim, numune yokken ölçülür. Bu ölçümlerden ekranlama verimliliği, araya girme kaybı değeri hesaplanır. Test yöntemi 100 kHz'den 1 GHz'e kadar olan frekanslar için kullanılabilir olup ve 80 dB'lik bir dinamik alana sahiptir [15].

4. TEM HÜCRESİ TASARIMI, HESAPLAMALAR VE ÖLÇÜMLER

4.1. TEM Hücresi Nedir?

TEM Hücresi; elektronik cihazların elektromanyetik uyumlu olarak tasarlanıp üretilmesi ve bu isterin test edilmesi adına yapılan çalışmaların etkinliğini değerlendirebilmek için kullanılan bir ölçüm aracıdır.

- Kullanım yerine göre açık-kapalı formlarda olabilir.
- Ucuz, hafif, iyi iletken ve kolay işlenebilir oluşu sebebiyle üretimlerinde Bakır, Alüminyum ya da PCB levhalar tercih edilir.
- Genellikle laboratuvar çalışmalarında, özellikle küçük RF birimlerin (komponent, modül, pcb, vb) EMU/EMG testlerinde ve biyolojik çalışmalarda tercih edilir [22,23].
- Daha büyük birimlerin testlerinde daha kompleks yapıdaki GTEM hücreleri kullanılır [5,24].



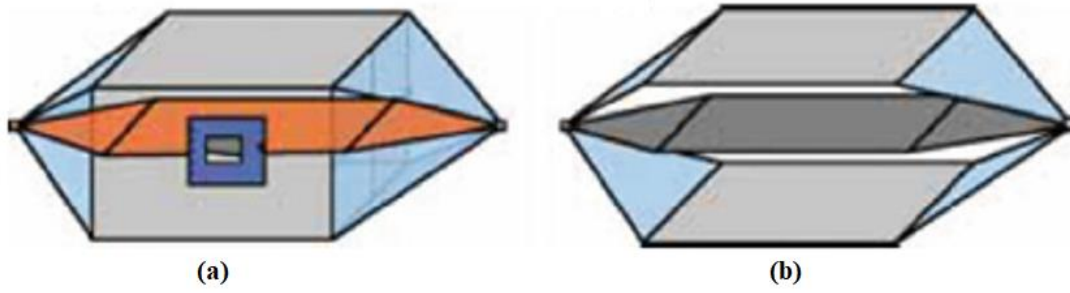
Şekil 4.1. TEM hücresi örnekleri.

TEM iletim hücresi (TEM hücresi), küçük RF cihazlarının EMG/EMU testlerinde ve biyolojik örneklerin RF radyasyon testlerinde yaygın olarak kullanılan bir elektromanyetik uyumluluk test cihazı türüdür. Çalışma frekansı DC'den birkaç GHz'e kadar olabilir [25].

Başka bir deyişle bir TEM hücresi; dikdörtgen bir koaksiyel iletim hattıdır. İki paralel topraklama plakasından ve dielektrik malzeme olarak hava ile merkezi bir iletken oluşur. Elektromanyetik alanlar bu toprak plakaları arasında oluşur [1]. TEM hücresinin içerisinde yayılan elektromanyetik dalgalar enine dalgalardır [3]. Çekirdek plaka ile alt plaka arasındaki tasarım açısı çok küçük olduğu için, çekirdek plakadaki küresel dalgaya bir düzlem dalga olarak yaklaşılabılır. Bir TEM hücresi genellikle şu bölümlerden oluşur: konektörler, geçiş kısmı ve RF hat [7].

4.2. TEM Hücresi Tasarım Parametreleri

Yapısına bağlı olarak TEM hücresi açık ve kapalı tiplere ayrılabilir. Hangi hücrenin kullanılacağını seçimi uygulamaya, ilgilenilen frekansa ve test edilen malzemenin boyutuna bağlıdır [25].



Şekil 4.2. Kapalı (a) ve açık (b) TEM hücreleri [1].

Genel olarak, TEM hücresinin boyutu artırıldığında, kullanılabilir frekans aralığı azalır. Herhangi bir TEM hücresinin çalışma bant genişliğindeki kısıtlanmanın ana nedeni, TEM modunun yayılmasını etkileyen yüksek dereceli modların rezonansıdır. Hücrede ilgili kesme frekanslarının ötesinde yayılan daha yüksek dereceli modlar, konik bölümlerin neden olduğu yansımalara duyarlı olur [7].

Literatür araştırmaları sadece TEM modunun yayıldığı frekanslarda eş dağılımlı elektrik alan yaratılabildiğini göstermektedir. Bu tarz ölçüm hücrelerinde dalgaların çalışma frekans aralığını belirleyen en önemli faktörlerden birisi de hücrenin mekaniksel boyutlarıdır. Genel olarak bir TEM hücresi tasarımında,

- kullanılabilir test alanını olabildiğince büyük ve etkin kullanılabilir ebatlarda yapabilmek,
- çalışma bant aralığını yükselterek bant sonunu olabildiğince yukarı çekmek,
- yansımaya bağlı kayıpları en aza indirterek ve gerilim duran dalga oranı değerini küçültmek,
- mekanik model içinde dalga karakteristiğinin eş dağılım özelliğini en üst düzeye çıkarmak en temel tasarım hedefleridir [3, 26].

Bu gözle tasarlanacak bir TEM hücresinde ise temel tasarım kriterleri,

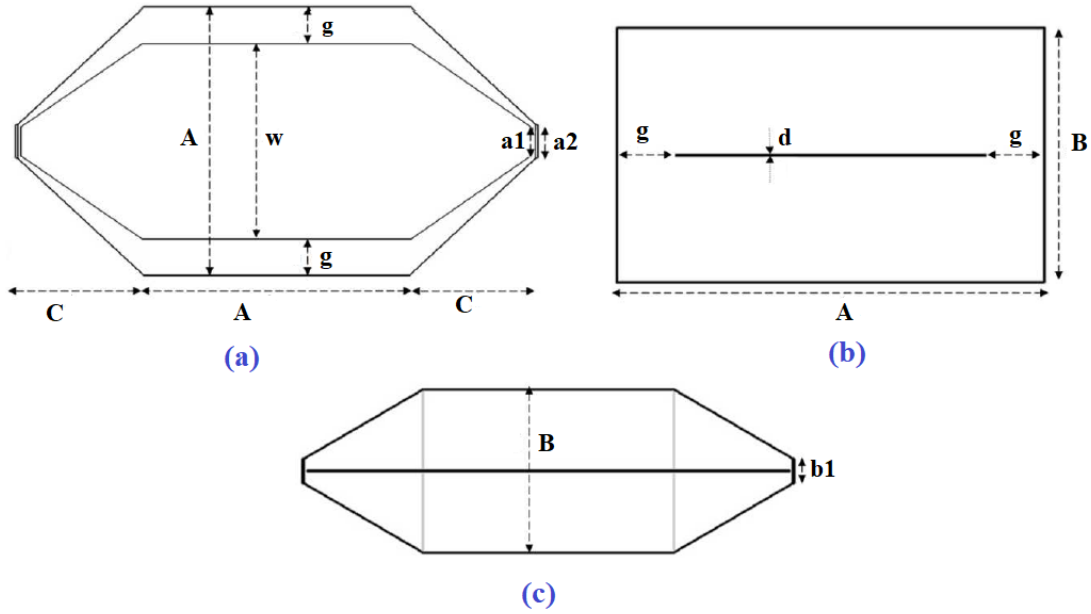
- karakteristik empedans,
- rezonans frekansları,
- yüksek mertebe yayılım modları,
- boyutlar ve kullanılabilir maksimum alana bağlıdır [27].

4.2.1. Boyutsal Özellikler ve Karakteristik Empedans (İletim Hattı Empedansı)

Bir TEM hücresi dikdörtgen prizmatik formda oluşturulmuş bir iletim hattı olup, standart koaksiyel konektörlere uyum sağlayacak şekilde her iki uca doğru sivrileşerek piramit bir yapı ile sonlanır. Bu iletim hattı ve devamındaki sivrileşen piramit yapı, uzunluğu boyunca minimum geri yansıma (S_{11} , S_{22}) sağlayabilmek adına, 50Ω değerinde nominal karakteristik empedansa sahiptir [28]. Piramit uçlar, hücrenin iletim hattı ile her iki uçtaki konektörleri arasında 50Ω karakteristik empedansa uyumluluk sağlanabilmesi için geçişi sağlamaktadır. Bu kısımlar kademeli olarak iki uca doğru sivrilmeli ve TEM modundaki düzensizliği engellemek için yeterli uzunlukta olmalıdır. Genel olarak her iki uçtaki piramit kısımların toplam uzunluğunun, TEM hücresinin uzunluğunun yarısı olması önerilmektedir [20]. Bu şekilde iki portlu bir iletim hattı oluşturulmuş olup, uygun sinyal alıcı/verici cihazlar vasıtasıyla hattın yansıma ve iletim özellikleri tespit edilebilir.

Bir TEM hücresinin farklı boyutlardan görünümü Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Temelde iki iletken plaka kullanılarak oluşturulan bu sistem sayesinde test bölgesi olarak kullanılan alanda TEM modu oluşturulabilir. Burada bahsi geçen bu iletken plakalar iletim hattının toprak yüzeyleri olarak işlevselleşmiştir. Merkezi iletken plaka septum ise

iletim hattının canlı ucu olarak işlev görür ve üst ve alt iletkenler arasında ortada olacak şekilde tasarlanır. Gerekli ve uygun tasarımlar elde edilebildiği durumlarda elektromanyetik uyumluluk testleri için septumun konumu, daha büyük bir test bölgesine izin verecek şekilde düzenlenebilir [20].



Şekil 4.3. (a) TEM hücresinin tepeden görünümü; (b) TEM hücresinin port hizasından önden görünümü; (c) TEM hücresinin yandan görünümü [27].

Şekil 4.3.'te,

g : septum ile yan toprak plakaları arasındaki mesafe,

d : septum kalınlığı,

A : TEM hücresinin dikdörtgensel gövde genişliği,

B : TEM hücresinin yüksekliği,

C : piramit yapının genişliği ($A/2$),

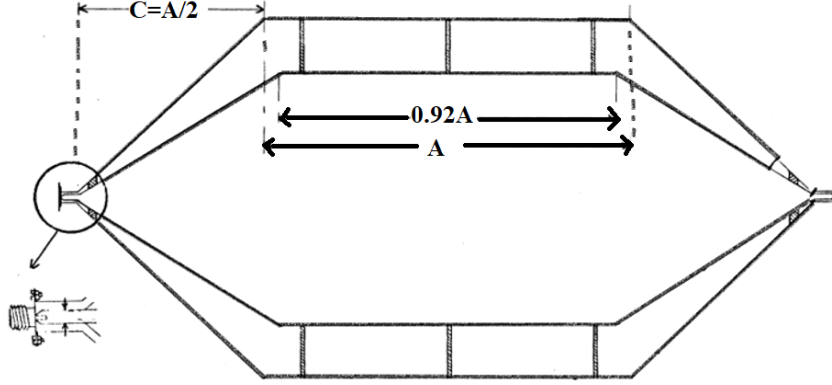
w : orta plaka (septum) genişliği,

a_1 : orta plaka (septum) bitiş noktası genişliği,

a_2 : üst ve alt paralel plakaların bitiş noktası genişliği,

b_1 : orta plaka (septum) yüksekliği (genellikle $= a_1$) olarak gösterilmiştir.

Öte yandan boyutsal hassasiyetler için ek bir kriter daha bulunmaktadır. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi septum ana gövde uzunluğunun ana plakaların gövde uzunluğunun 0.92 katı olması gerekmektedir.



Şekil 4.4. TEM hücresi için septum boyut detayı [26].

Bir TEM hücresinin fiziksel boyutları onun karakteristik empedansına direkt bağlıdır [1]. Bir dikdörtgen eş eksenli iletim hattının karakteristik empedansı Z_0 , iletim hattının birim uzunluğu başına dağıtılmış kapasitans cinsinden ifade edilebilir [3]. TEM hücresinin karakteristik empedansının (deneysel modelleme yaklaşımı ile birlikte) boyutsal özellikleri ile bağlantısı formül 4.1 ile verilebilir [1, 27, 29, 30, 31]:

$$Z_0 \cong \frac{\eta_0}{4 \left[\frac{A}{B} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\sinh \left(\frac{\pi g}{B} \right) \right) \right] - \frac{\Delta C}{\epsilon_0}} \quad (\text{ohm}) \quad (4.1)$$

Burada,

$\eta_0 = 120\pi$, ohm cinsinden boş uzayın ve havanın öz empedansı,

$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$, metre başına Farad cinsinden havanın elektriksel geçirgenliği,

A : TEM hücresinin dikdörtgensel gövde genişliği,

B : TEM hücresinin yüksekliği,

g : septum ile yan toprak plakaları arasındaki mesafe,

$\frac{\Delta C}{\epsilon_0}$: septum köşeleri ve hücre yan duvarları arasındaki saçaklanma kapasitansı.

Formül 4.1’de açık TEM hücreleri tasarlanıyorsa [1] veya A/B oranı 1’den büyükse [27]

$\frac{\Delta C}{\varepsilon_0}$ değeri ihmal edilebilir.

4.2.2 Yüksek Mertebe Modları, Kesim Frekansı, Rezonans Frekansı

Bir TEM hücresinde TE modlarının oluşmaya başladığı frekans noktasına kadar TEM modu baskın moddur ve enerji temel olarak TEM modu ile taşınır [27]. Yani düşük frekanslarda sadece TEM modu etkin olup 50Ω hat boyunca sadece bu mod yayılır [24]. Genel olarak, herhangi bir TE modu için kesim frekansı formül 4.2’deki gibi şu şekilde ifade edilir:

$$f_c(TE_{mn}) = \frac{c\sqrt{m^2B^2+n^2A^2}}{2AB} \quad (4.2)$$

Burada,

c : ışık hızı (300.000 km/s),

A : TEM hücresinin dikdörtgensel gövde genişliği,

B : TEM hücresinin yüksekliğidir.

Bu durumda bir TEM hücresinde ilk yüksek mertebe modu olan TE_{10} ’ın kesim frekansı,

$$f_c(TE_{10}) = \frac{c}{2A} \quad (4.3)$$

olarak belirlenir, yani sadece hücrenin A boyuna bağlıdır.

Eğer hücre içerisinde yüksek mertebe modları yayılmaya başlarsa, her bir modun vektörel toplamı oluşmaya başlayacağından hücre içindeki alan dağılımı karmaşılaşmaya başlar. Bu yapılan ölçümlerde daha karmaşık ve istenmeyen durumların ortaya çıkması demektir ve görüldüğü gibi sadece boyutsal özelliklere bağlıdır [26, 32].

Bir diğ er istenmeyen durum ise hem boyuta hem y uksek çalışma frekanslarına bağı oluşan rezonans modlarıdır. Hücrenin bir boyutsal değeri (A), dalga boyunun belli orandaki katları ile örtüştüğünde rezonans durumu ortaya çıkar [27].

$$f_R(TE_{mnp}) = \sqrt{f_{c_{mn}}^2 + \left(\frac{cp}{2L_{mn}}\right)^2} \quad (4.4)$$

Burada,

p : yarım dalga boyu katları (1,2,3,...),

c : ışık hızı (300.000 km/s),

L_{mn} : TEM hücresinin etkin uzunluğu ($A+x_{mn}$),

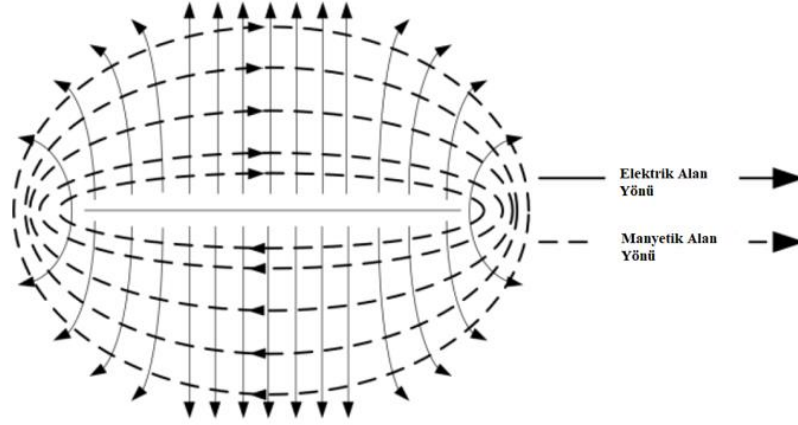
x_{mn} : ampirik olarak belirlenen katsayıdır (TE₀₁ modu için 0.80 iken TE₁₀ için 0.50'tir) [27].

Bu noktadan hareketle bir TEM hücresi, hücrenin fiziksel ölçümlerine göre belirlenen, 0 Hz'den (DC) belirli bir kullanılabilir frekansa kadar çalışır [1]. Bu yaklaşımla daha büyük ebatlı TEM hücrelerinin daha düşük çalışma frekans bandına sahip olacağı ifade edilebilir [27].

4.2.3 Elektrik Alan Dağılımı

TEM hücresi esesen modifiye olmuş bir koaksiyel hat olup temel çalışma prensibi, koaksiyel bir hat içindeki elektromanyetik alan dağılımına benzer şekilde i  ve dış iletkenler arasında enine bir elektromanyetik dalga üretmektir [33].

Elektrik alan, TEM hücresinin merkezine yakın bölgede dikey olarak; yatay düzlemde ise sağ ve sol tarafa doğru ilerledikçe yatay olarak polarize olur. Hücreye herhangi bir porttan RF güç gönderildiğinde, paralel plakalar ile merkezi iletken plaka olan septum arasında eş dağılımlı bir elektromanyetik alan oluşturulur [3].



Şekil 4.5. TEM hücresi içerisinde elektromanyetik alan dağılımı [33].

Burada TEM hücresinin çalışma alanının merkez noktasında ölçülen elektrik alan şiddeti (V/m) de hesaplanabilir [33, 34].

$$E = \frac{\sqrt{Z_0 P_r}}{(B-d)/2} \quad (4.5)$$

Burada,

Z_0 : TEM hücresinin karakteristik empedansı ($50\Omega \pm 5\Omega$),

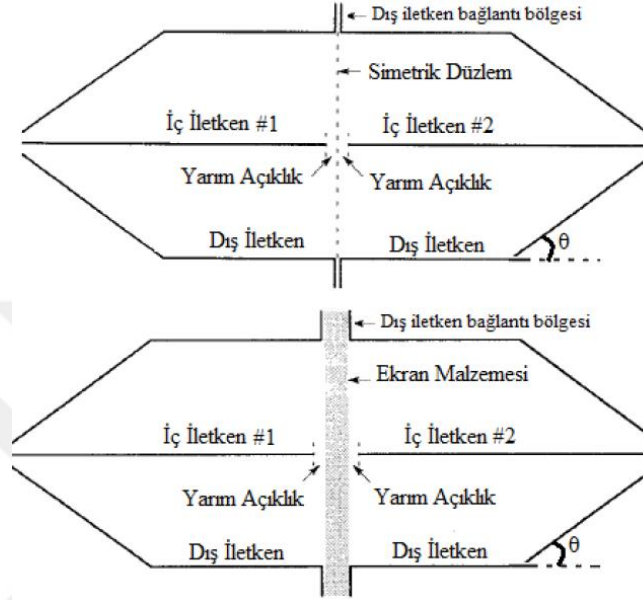
P_r : septum iletkeni üzerinden akan güç (W),

$(B - d)/2$: septum ile paralel üst/alt iletken arasındaki mesafedir (m).

4.2. TEM (TEM-t) Hücresi Tasarımı ve Açı Optimizasyonu

Bir TEM-t hücresi, sahip olduğu boyutsal ve RF özellikleri sayesinde düzlemsel malzemelerin karakterizasyonu için kullanılabilir. Hücre; boş halde ve ekran malzemesi ile yüklü iken araya girme kayıpları ölçülür, elde edilen araya girme kaybı yani genlik değerleri arasındaki fark ölçümü yapılan düzlemsel malzemenin ekranlama kapasitesini ifade etmektedir [3].

Ekranlı alanların etkinliği, kullanılan malzemenin iletkenliğine bağlıdır. Bir TEM-t hücresi bu noktada iletken katkılı görece ince formdaki düzlemsel malzemelerin ölçümleri için oldukça uygundur. Bu tür malzemeler hafif oluşları, kullanım kolaylıkları, tasarımda sağladığı özgürlükler ve kullanılacağı bölgeye kolay entegre edilebilmeleri nedeniyle cazip görünmektedir [3].

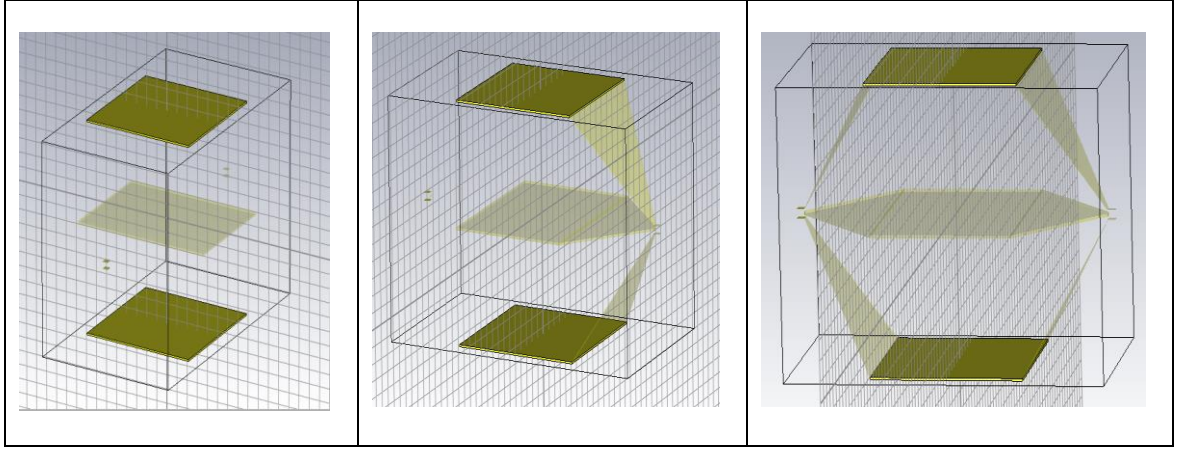


Şekil 4.6. Boş ve ekran malzemesi yüklü TEM-t hücresi.

4.2.1 Açık Forma Sahip TEM Hücresinin Modellenmesi

Başlangıç noktası olarak ilk simülasyon için açık TEM hücresi üzerinde çalışılmasına karar verilmiştir. Tasarım kolaylığı, parametrelerin netleşmesi ve literatürde çoğunlukla açık TEM hücrelerinin tercih edilmesi sebebiyle bu yol izlenmiştir. İlk aşama çizimlerde CST Studio Suite Programında Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de gösterilen değerler ışığında tasarım yapılmıştır. CST Studio Suite programı frekans ekseninde hücreyi tetrahedral (dört yüzlü) hücrelere bölerek FEM nümerik metodu ile çözümleme yapmaktadır [35].

Bu çalışmada, TEM hücresi tasarım parametreleri belirlenirken daha önce yapılan çalışmalarda belirlenen boyutlardan yola çıkılmıştır [4,15].



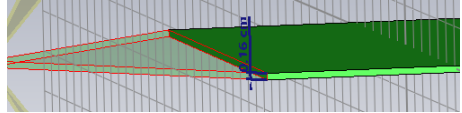
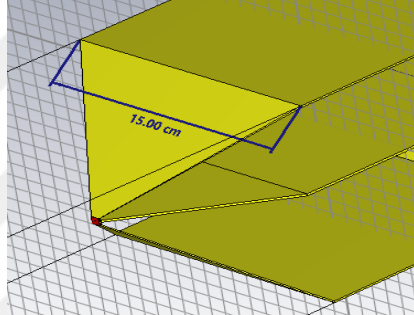
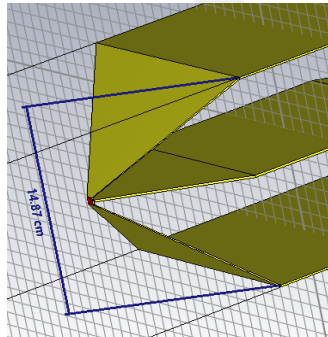
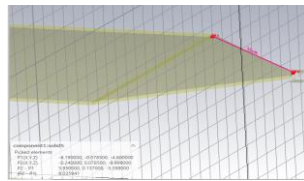
Şekil 4.7. TEM hücresi CST Studio Suite çizim aşamaları.

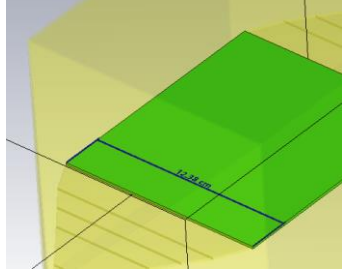
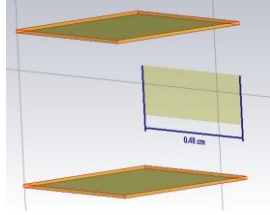
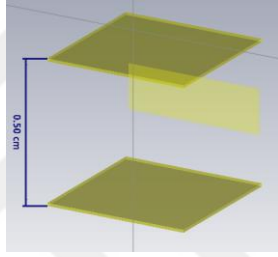
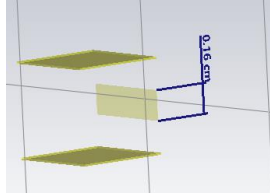
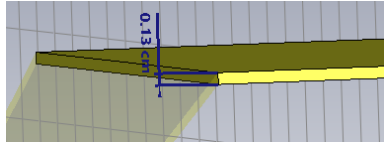
Şekil 4.7’de gösterildiği gibi tasarım; ilk olarak eşdeğer alt/üst plakaların ve septumun oluşturulması; akabinde ise her iki yönde ve eş uzaklıkta port yüzeylerinin çizimi ve son olarak da alt/üst plakalardan ve septumdan portlara uzatılan üçgen plakaların oluşturulması ile tamamlanmıştır.

Ayrıca simülasyon boyunca çalışmanın nihai aşamasında üretim ihtimali varsayımı ile alüminyum malzeme ile çalışılmıştır. Alüminyum; kolay işlenebilirliği, maliyet ve kullanım etkin oluşu ve ayrıca yüksek iletkenliği sayesinde bu tarz maliyet düşürme odaklı ya da laboratuvar çalışmaları için sıklıkla tercih edilmektedir.

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de belirtilen değerler ışığında açık bir TEM hücresinin tasarımı CST Studio Suite ortamında yapılmıştır.

Çizelge 4.1. TEM Hücresi için seçilen tasarım parametreleri.

TEM Hücresi Tasarım Parametreleri	CST Studio Suite Tasarım Programı Değerler	Gösterim
g	1.31 cm	-
d	0.16 cm	
A	15 cm	
B	14.87 cm	
C	5.40 cm	

w	12.38 cm	
a_1	0.48 cm	
a_2	0.50 cm	
b_1	0.16 cm	
<i>GND Plaka Kalınlığı</i>	0.13 cm	

Bu aşamada tasarımsal bir zorluk yaşanmamıştır. Belirtilen parametreler ışığında model oluşturulmuştur. Bir sonraki aşamada farklı port özellikleri seçimi ile simülasyon sonuçları incelenecektir.

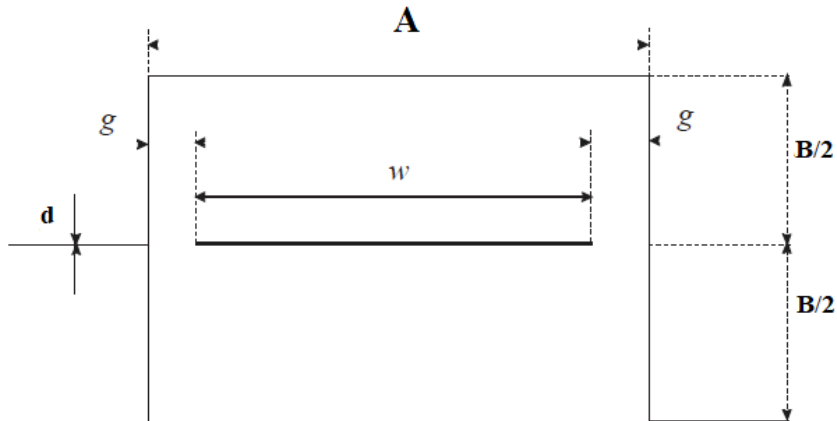
Bir TEM hücresinin ilk yüksek mertebeye modu olan TE_{10} 'ın kesim frekansı bu model üzerinde belirtilen ölçüler dahilinde ($A=15\text{cm}$) Formül 4.3 üzerinden:

$$f_c(TE_{10}) = \frac{c}{2A} = \frac{0.3 \times 10^9}{2 \times 15 \times 10^{-2}} = 1 \text{ GHz}$$

1 GHz olarak hesaplanmıştır. Bu noktadan hareketle modellenen hücrenin 1 GHz'den daha düşük bir frekans bandı boyunca sadece TEM modu aktifken etkin çalışabildiği düşünülmüş simülasyonlar DC ile 1 GHz bandı boyunca yapılmıştır.

4.2.1.1. Karakteristik Empedans Hesabı

Çizelge 4.1'de verilen parametreler ışığında simülasyon ortamında tasarımı yapılan TEM hücresi için karakteristik empedans hesaplaması ile bu tasarımın bir iletim hattı yapısına uygunluğunu teyit edebiliriz. Oluşturulan yapının karakteristik empedansının 50Ω 'a yakın olması gerekmektedir.



Şekil 4.8. Bir TEM hücresi için kesitler.

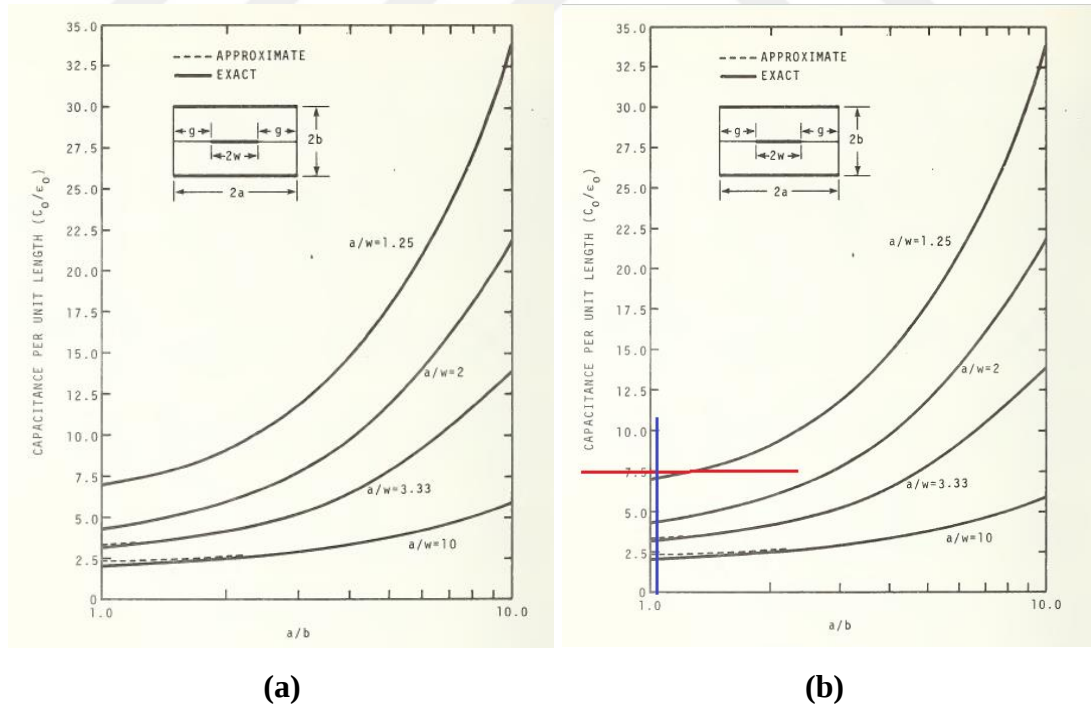
Literatürde karakteristik empedansın, Z_0 , bir iletim hattının birim uzunluğu başına düşen dağıtılmış kapasitans (distributed capacitance, C_0) olarak da tanımlanabildiği verilmiştir [29].

$$Z_0 \cong \frac{1}{vC_0} \quad (4.6)$$

Burada v ışık hızını temsil etmekle birlikte, 4.6'daki formül, 4.7'deki gibi de yazılabilmektedir [29].

$$Z_0 \cong \frac{\eta_0}{C_0/\epsilon_0} \cong \frac{\eta_0}{4\left[\frac{A}{B} - \frac{2}{\pi} \ln\left(\sinh\left(\frac{\pi g}{B}\right)\right)\right] - \frac{\Delta C}{\epsilon_0}} \quad (4.7)$$

Ayrıca kaynak [29]; 4.7 nolu formülü bir TEM hücresinin karakteristik empedansını Çizelge 4.1'de verilen A , B ve w boyutlarına bağlı olarak hesaplanabilen bir grafiğe dönüştürmüştür. Şekil 4.9'daki grafik üzerinde x ekseninde TEM hücresinin Şekil 4.8'de verilen A/B oranı; y ekseninde TEM hücresinin Şekil 4.8'de verilen A/w oranı hesaplanarak kesişim noktası bulunursa, tasarlanan TEM hücresinin de karakteristik empedansına kolaylıkla ulaşılabilir.



Şekil 4.9. (a) Bir TEM hücresi için birim uzunluk başına kapasitans ($\frac{C_0}{\epsilon_0}$) eğrisi [29], (b)

Tasarlanan TEM hücresi için kesişim noktası.

Şekil 4.9'daki (b) grafiğinde tasarımı yapılmış TEM hücresi için A/B ve A/w kesişim noktası gösterilmiştir. Grafiği okuyarak elde edilen $\left(\frac{C_0}{\epsilon_0}\right)$ değeri formül 4.7'de yerine koyulursa tasarlanan hücrenin karakteristik empedansı kolaylıkla hesaplanabilir.

Çizelge 4.1'deki veriler ışığında; $\frac{A}{B} \cong 1.00$ ve $\frac{A}{w} \cong 1.21$ olarak hesaplanmakta olup; elde edilen kesişim değeri $\frac{C_0}{\epsilon_0} \cong 7.5$ 'tir. Buradan hareketle tasarlanan TEM hücresi için karakteristik empedans:

$$Z_0 \cong \frac{\eta_0}{C_0/\epsilon_0} \cong \frac{120\pi}{7.5} \cong \frac{377}{7.5} \cong 50.2 \Omega \text{ olarak bulunmuştur.}$$

4.2.1.2. Farklı Port Etkileri

Bir iletim hattının iletim performansı hem iletim kaybı hem de giriş ve çıkış yansıma kayıpları ışığında anlaşılabilir. İki portlu bir iletim hattı ortasından hayali olarak kesildiğinde boyutsal olarak birbirinin yansıma örüntüsüne sahipse S_{21} ve S_{12} değerlerinin kendi içinde benzer olup; minimum kayıpla sinyali iletebilmesi beklenir. Aynı yapının yansıma karakteristiği ise bize hattın 50Ω ile ne kadar eşlendiği bilgisini verir. Burada S_{11} ve S_{22} giriş ve çıkış yansıma kayıplarının -10 dB'nin ($VSWR=2$) altında olması beklenir. Daha yüksek değerler sinyalin büyük kısmının iletilmeden geri yansıdığına yani 50Ω 'dan farklı değerlere eşlendiğini işaret eder. Bu da yüksek kayıplı, yüksek yansımali yani doğru çalışmayan bir iletim hattı demektir. TEM hücresinin de modifiye edilmiş bir iletim hattı olduğunu düşünürsek simülasyonlar boyunca elde edilen yansıma ve iletim kayıpları bize hücrenin doğru parametrelerle tasarlanıp tasarlanmadığını ifade edecektir.

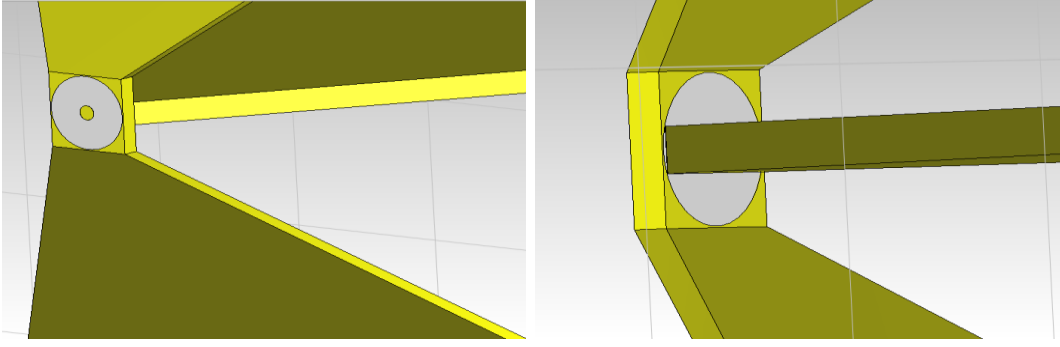
Simülasyonun ilk adımında açık TEM hücresinin şematığı oluşturulmuş, sinyali hücreye ne şekilde iletmek ve özellikle giriş-çıkış portlarını nasıl tasarlamak gerektiği konusu üzerinde durulmuştur. Yapılan farklı port denemeleri sonucunda beklenen yansıma iletim karakteristiğinin sağlanabilmesi için koaksiyel yapıda bir port modelinin yapıya entegrasyonunun gerekliliği ortaya çıkmıştır [33, 26]. Port uyumsuzluğunun giderilmesi

amacıyla uygun frekans bandında çalışabilen bir konektör olan SMA konektörün ebatları kullanılarak uygun bir port modeli geliştirilmiştir. Elde edilen model Şekil 4.10’da verilmiştir.

Simülasyonda, SMA konektör gövde malzemesi TEM hücresi gövde malzemesi ile aynı olup (alüminyum), dielektrik dolgu malzemesi için kristalize kurşun cam seçilmiştir. Kristalize cam ürünlerinde kalsiyum oranı daha düşük olup kurşun oranı daha yüksektir. Ayrıca bu cam bazı alanlarda ekranlama malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Ek olarak CST Studio Suite simülasyon programında SMA RF konektör modeli üzerinde SMA canlı uç (seal) malzemesi kayıplı altın (lossy gold) seçilmiştir. CST Studio Suite programı üzerinde koşturulan simülasyonlar boyunca kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri Çizelge 4.2’te verilmiştir.

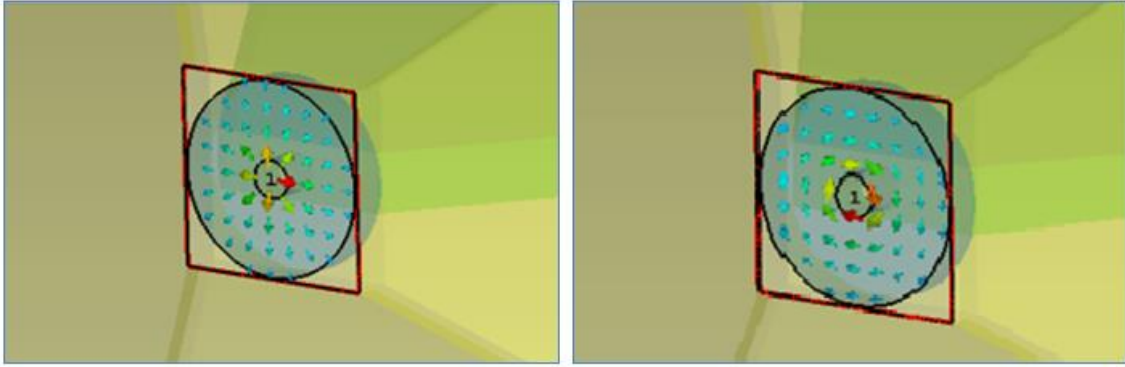
Çizelge 4.2. Simülasyon için seçilen malzemelerin karakteristik özellikleri.

	Alüminyum	Altın	Kristalize Kurşun Cam (Lead Glass)
Simülasyonda kullanıldığı bölge:	TEM hücresi gövde ve septum	SMA konektör canlı uç	SMA konektör dielektrik dolgu malzemesi
Tip	Kayıplı metal	Kayıplı metal	Dielektrik
Epsilon (ϵ)	ϵ_0	ϵ_0	$6\epsilon_0$
Mu (μ)	μ_0	μ_0	μ_0
Elektriksel İletkenlik	3.56e+07 S/m	4.56e+07 S/m	1e-12 S/m
Rho (ρ)	2700 kg/m ³	19320 kg/m ³	4200 kg/m ³
Isıl İletkenlik	237 W/K/m	314 W/K/m	-
Young Modülü (Elastikiyet/Gerilme Katsayısı)	69 kN/mm ²	78 kN/mm ²	62.7 kN/mm ²



Şekil 4.10. SMA port modeli.

Modelleme sonrası ilk olarak portların elektrik ve manyetik alan karakteristiği incelenmiştir.

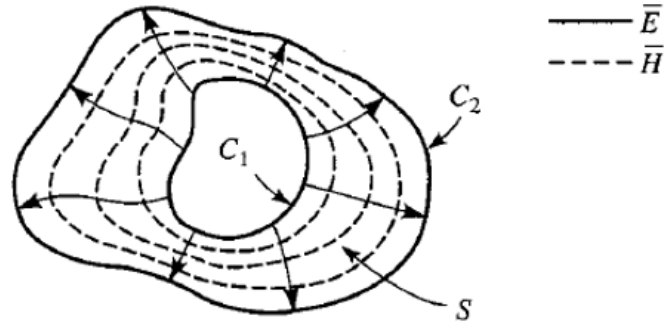


(a) Elektrik alan

(b) Manyetik alan

Şekil 4.11. SMA port modelinde elektrik ve manyetik alanlar.

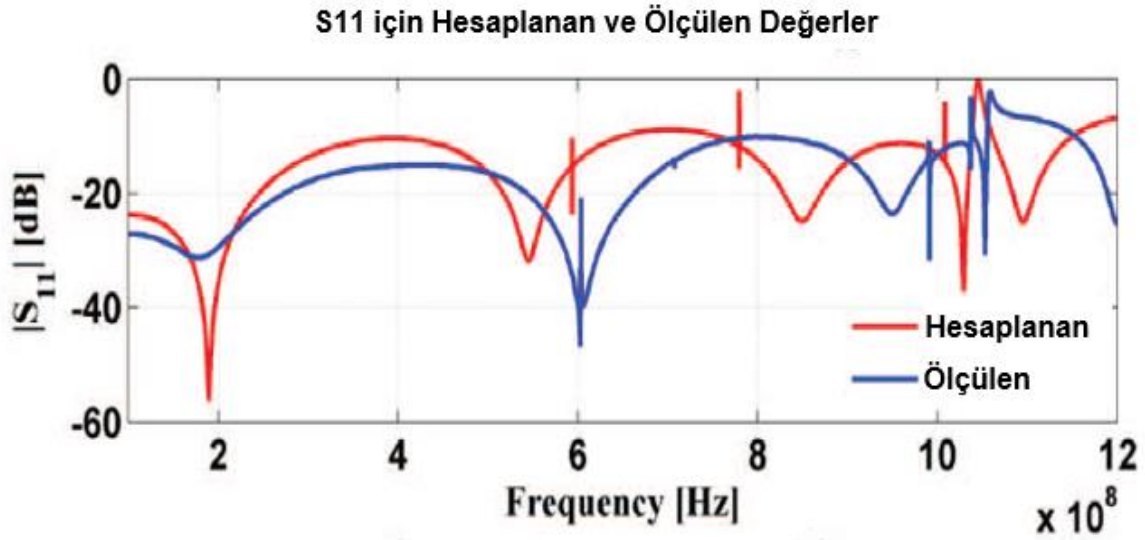
Sonlu bir iletim hattının kesit alanı üzerinde oluşan elektrik ve manyetik alanların Şekil 4.11'deki gibi dağılım göstermesi beklenmektedir [37]. Yapılan simülasyon ile birlikte oluşturulan port üzerinde elektrik ve manyetik alanların devre teorisine uygun şekilde dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir.



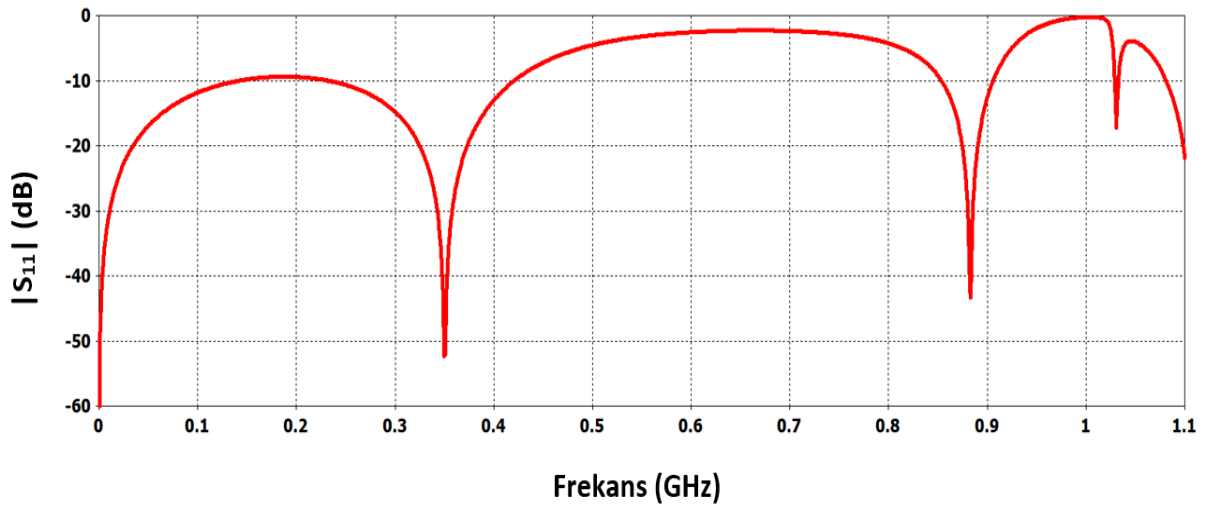
Şekil 4.12. Bir iletim hattında alan çizgileri [37].

Portlarda oluşan elektromanyetik yayılımın uygunluğu teyit edildikten sonra tekrar hücrenin iletim ve yansıma özellikleri incelenmiştir. Bu noktada elde edilen göstergeler tezin geri kalan kısmı için önemli bir aşamayı temsil etmektedir. Yapılan SMA port modelleme çalışması ile düşük yansımali ve kayıplı bir iletim hattı karakteristiği elde edilmiştir. Edinilen sonuçlar literatürdeki örnekler ile tutarlı bulunmuştur [1, 7, 27, 30].

Şekil 4.13, literatür araştırmaları sonucunda elde edilen açık bir TEM hücresinde S11 giriş geri yansıma karakteristiği için ölçüm ve simülasyon sonuçlarını göstermektedir [27]. Şekil 4.14'te ise CST simülasyon ortamında tasarımı yapılan açık TEM hücresinin S11 simülasyon grafiği verilmiştir. Literatür örneği incelendiğinde TEM hücresinin geri yansıma karakteristiğinde çalışma frekans bandı boyunca bazı noktalarda S11'in dip yaptığı, bant sonuna doğru yansımanın arttığı ve dolayısıyla iletimin kötüleştiği, ayrıca S11'in -10 dB (VSWR=2.0.) civarında olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.14'ten görüleceği gibi benzer bir durum tasarımı yaptığımız TEM hücresinin S11 cevabında da bulunmaktadır. Aynı şekilde bant boyu dip noktalar bulunmakta, iletim performansı bant sonuna doğru daha kötüleşmektedir. Bizim elde ettiğimiz simülasyon sonucu literatür örneğinden farklı olarak sadece 450 MHz bandına kadar uygun bir S11 performansı göstermektedir. Şekil 4.13'de verilen örnek karakteristik literatürde farklı çalışmalarda da bulunmaktadır [1, 7].

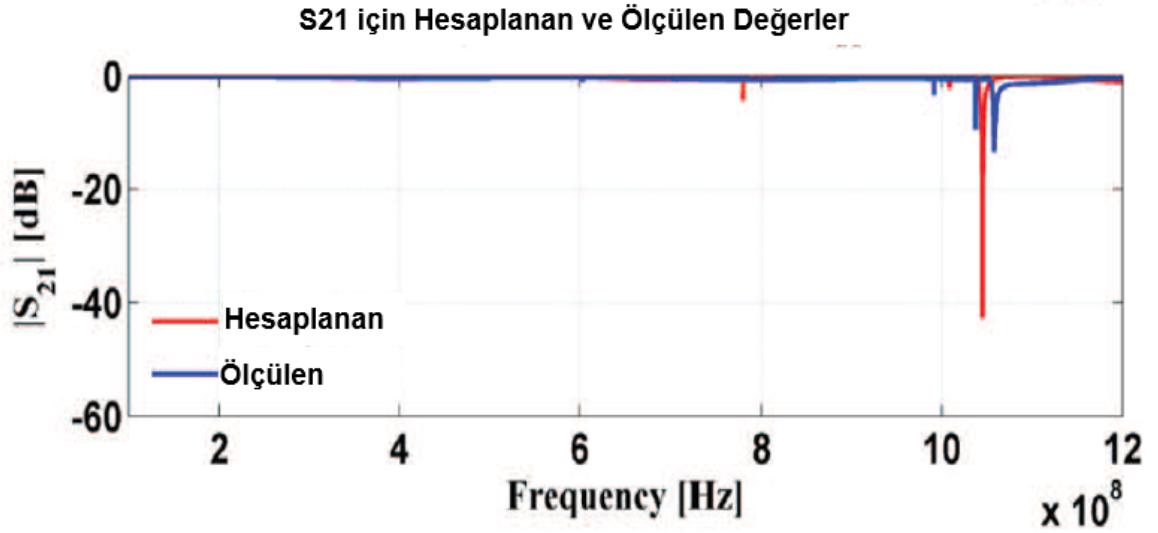


Şekil 4.13. Literatürde açık bir TEM hücresi için verilen S11 örneği [27].

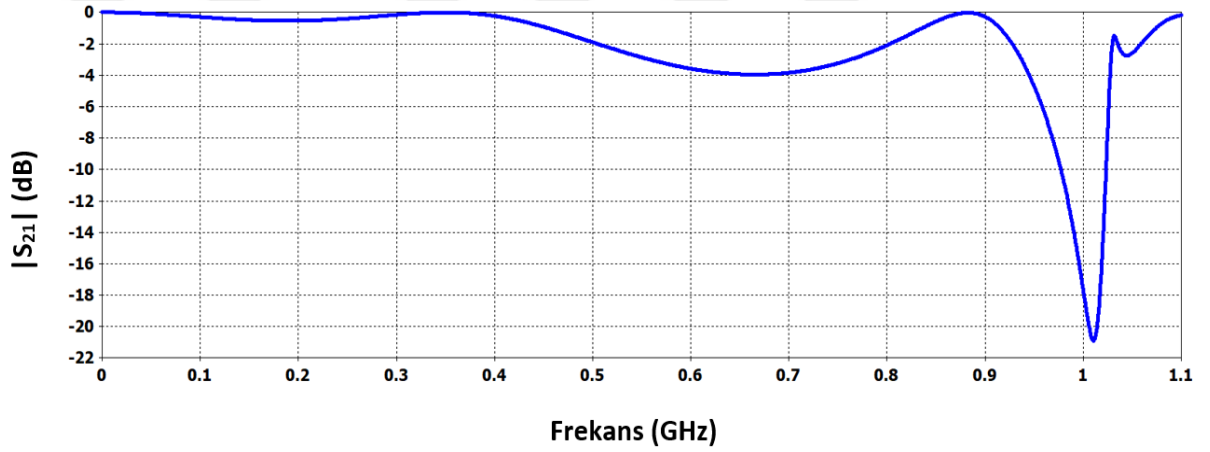


Şekil 4.14. SMA port modeli ile CST Simülasyon programından elde edilen S11.

Benzer bir değerlendirme S21 grafikleri için de yapılabilir. Şekil 4.15'te literatürde örneği bulunan bir açık TEM hücresinin S21 ölçüm ve simülasyon sonucu [27]; Şekil 4.16'da ise tasarımı yapılan açık TEM hücresinin simülasyon sonucu verilmektedir. Her iki şekil incelendiğinde benzer olarak bant sonunda iletim kaybının küçük bir bölge boyunca arttığı ancak genel olarak 0 dB'ye yakın değerlerde bir iletim kaybı karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.15'te verilen örnek karakteristik literatürde farklı çalışmalarda da bulunmaktadır [7].



Şekil 4.15. Literatürde açık bir TEM hücresi için verilen S21 örneği [27].



Şekil 4.16. SMA port modeli ile CST Simülasyon programından elde edilen S21.

Bu noktadan itibaren elde edilen simülasyon sonuçları tasarlanan TEM hücresinin frekans bandı boyunca cevabının literatür örnekleri ile uyumlu olduğunu ancak iletim ve yansıma değerlerinde iyileşme yapma ihtiyacı olduğunu ortaya koymaktadır. Tasarlanan TEM hücresinin yükseliş açısı ve septum yapısal düzenlemeleri ile sonuçlarda iyileştirme yapılması hedeflenmiştir.

4.2.1.3. Açı Optimizasyonu

Bu çalışmanın temel hedeflerinden biri, TEM hücrelerinde yükseliş açılarının hücre içerisindeki alan dağılımına, dolayısıyla da iletim hattının performansı üzerine etkilerini

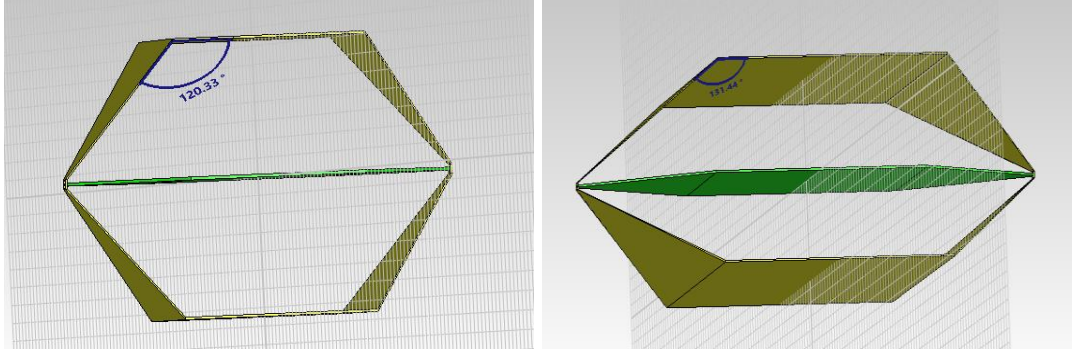
görmektir. Açık bir TEM hücresi üzerinde yapılan ilk denemelerin nispeten başarılı sonuçlar vermesi üzerine farklı açısal değişimlerin hücrenin temel karakteristiğine olan etkileri incelenmiştir. Tüm açısal boyutlandırmalarda TEM hücresinin toplam büyüklüğü sabit tutulmuş; septum ve gövdeye ait alt-üst plakaların uzunlukları değiştirilerek farklı yükseliş açıları oluşturulmuştur.

Çizelge 4.3. Açık TEM hücresinde açı denemeleri.

Septum Ana Plaka (W) Uzunluğu (cm)	Dış Açı (°)	İç Açı (°)	İlgili Grafik (Şekil 4.18- Şekil 4.19)
25	131.44	48.56	
20	129.66	50,34	
16	127.27	52,73	
15	126.46	53,54	
14	125,54	54,46	
10	120.33	59,67	

Yapılan denemelerde TEM hücresinin seçilen boyutsal değişimine bağlı olarak yansıma ve iletim karakteristiklerinin de bu değişimi takip eden tutarlı bir dalga formu oluşturduğu gözlemlenmiştir.

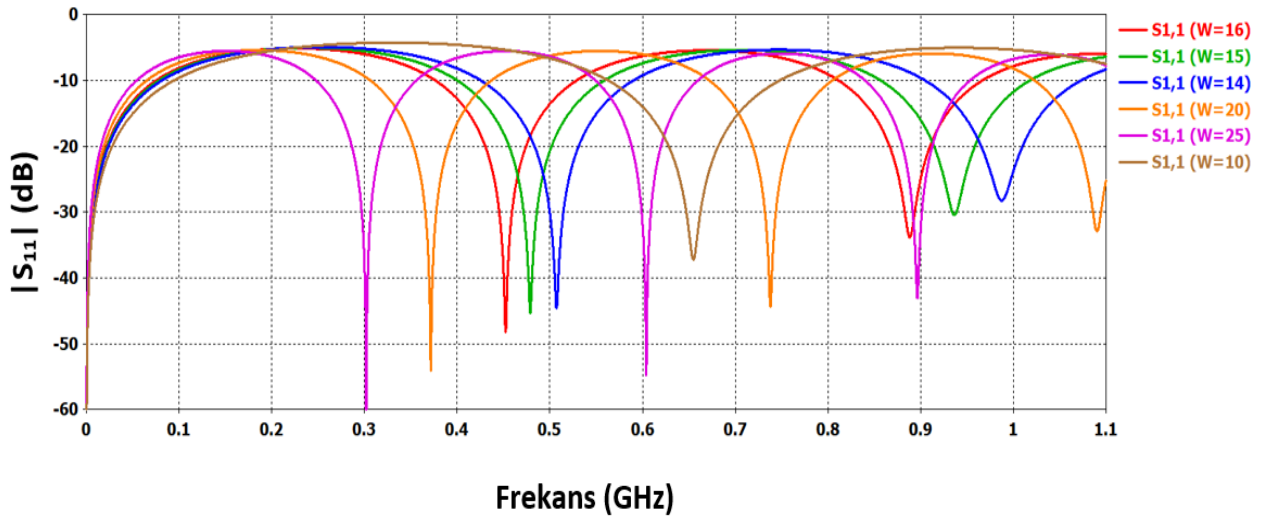
TEM hücresinin iç açısı büyüdükçe yani hücre daha dikleştikçe kayıp daha artmakta yansıma da buna bağlı olarak kötüleşmektedir. Aynı durumun çok dar iç açılara sahip yani yayvan TEM hücreleri için de geçerli olduğu görülmektedir. Bu noktada açısal olarak en uygun değerin belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.



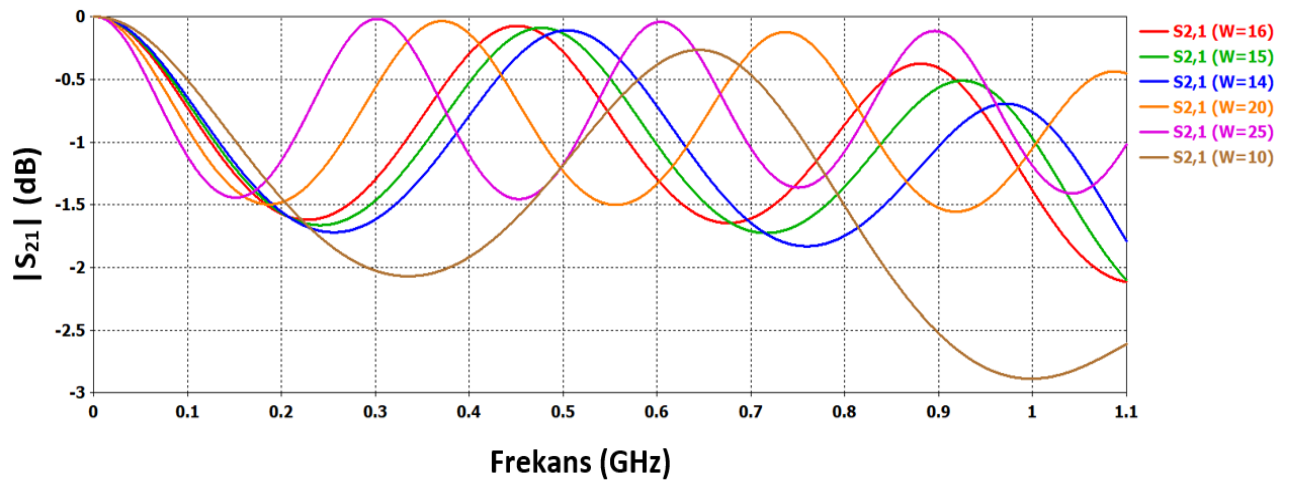
(a)

(b)

Şekil 4.17. Açık TEM hücresinde en kısa-en uzun açı gösterimleri, (a)120.33°,
(b)131.44 °.



Şekil 4.18. Açık TEM hücresinde farklı açılar için S11 Değerleri.



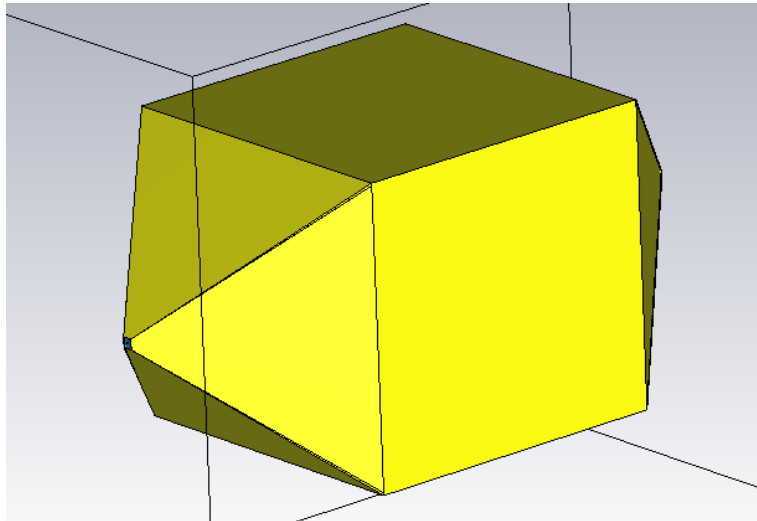
Şekil 4.19. Açık TEM hücresinde farklı açılar için S21 Değerleri.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 incelendiğinde bu tasarım örneği için optimal olarak belirlenebilecek septum genişliklerinin 14cm ile 16cm arasında değişebileceği söylenebilir. Şekil 4.19’da her ne kadar kayıplar tolere edilebilir gibi görünse de Şekil 4.18’deki geri yansımaların hala olması gerekenden yüksek değerde olduğu gözlemlenmektedir. Bir sonraki aşamada kapalı TEM hücresinin tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Burada yan duvarların da modele ekleniyor oluşu daha kayıpsız bir iletim hattı oluşturmaya neden olacaktır.

4.2.2. Kapalı Forma Sahip TEM Hücresinin Modellenmesi

Kapalı bir TEM hücresi Şekil 4.20’deki gibi yan duvarları da kapatılmış açık bir TEM hücresi formudur. Dolayısıyla açık TEM hücresi modeli üzerinde CST’de bulunan ‘Create Loft’ fonksiyonu ile yan duvarlar kolaylıkla oluşturulabilir.

Kapalı TEM hücreleri kullanılarak herhangi bir malzemenin ekranlama karakteristiğini ölçmenin iki yolu vardır. İlkinde Şekil 4.6’daki gibi hücre tam ortadan bölünerek düzlemsel malzemeler araya yerleştirilir (Şekil 4.6), ikincisinde ise ölçümü yapılacak uygun boyutlu bir ürün (düzlemsel veya değil) septum üzerine gövdede açılan bir pencere aracılığıyla yerleştirilir (Şekil 4.2).



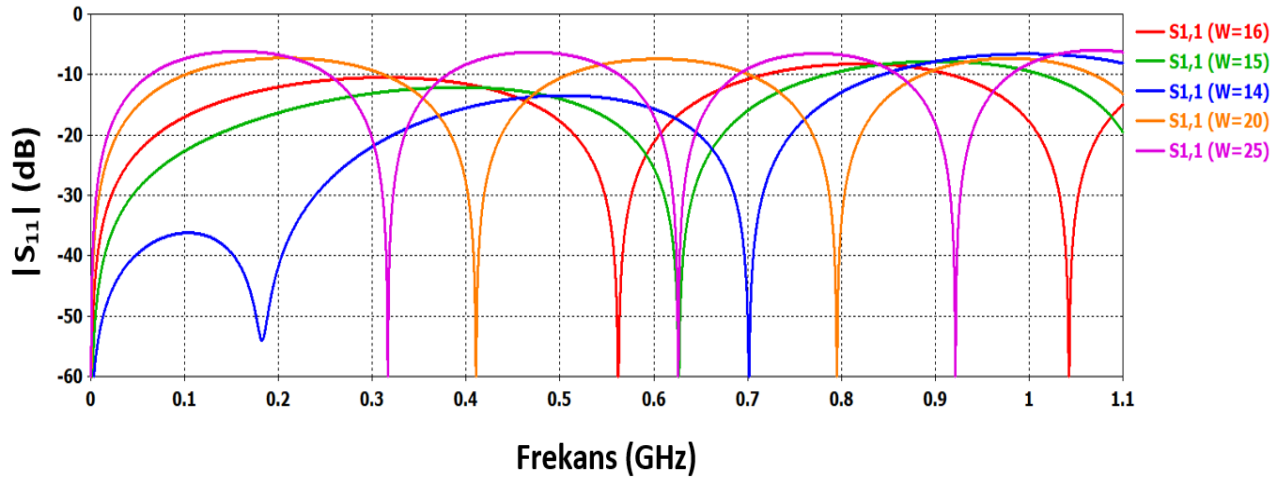
Şekil 4.20. Kapalı TEM hücresi.

4.2.2.1. Açı Optimizasyonu

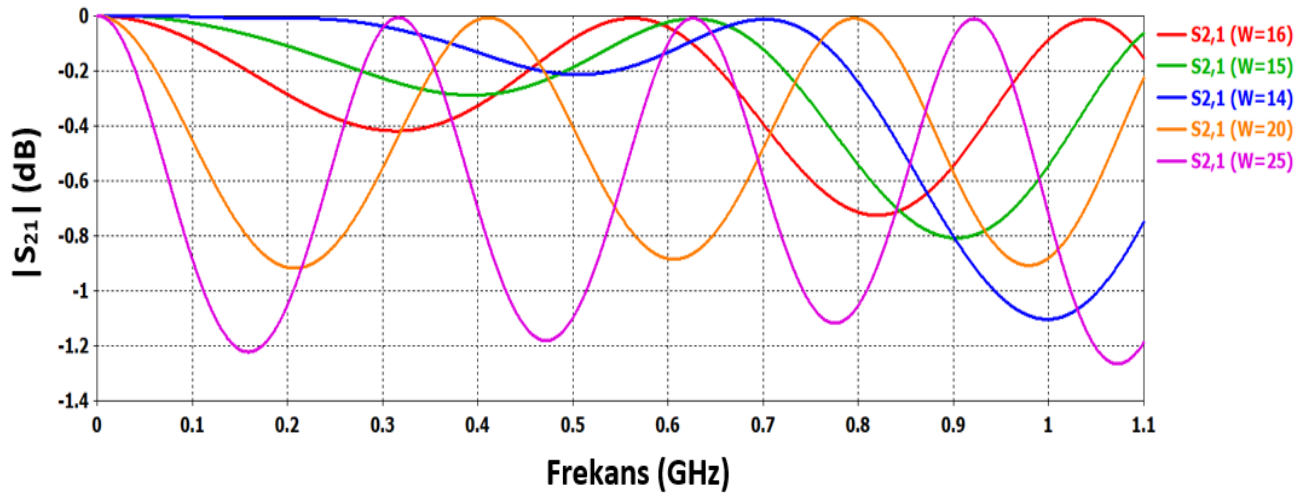
Açık TEM hücresinde elde edilen veriler ışığında benzer septum uzunlukları için kapalı TEM hücresi için de simülasyonlar yapılmıştır. Genel olarak seçilen tüm uzunluklar (açılar) için kapalı TEM hücresinin açık TEM hücresine göre beklenildiği şekilde daha iyi bir iletim ve yansıma karakteristiği gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4. Kapalı TEM hücresinde açı denemeleri

Septum W Uzunluğu (cm)	Dış Açı (°)	İç Açı (°)	İlgili Grafik (Şekil 4.21- Şekil 4.22)
25	131.44	48.56	■
20	129.66	50,34	■
16	127.27	52,73	■
15	126.46	53,54	■
14	125,54	54,46	■
10	Anlamsız, yapılmadı.	Anlamsız, yapılmadı.	-



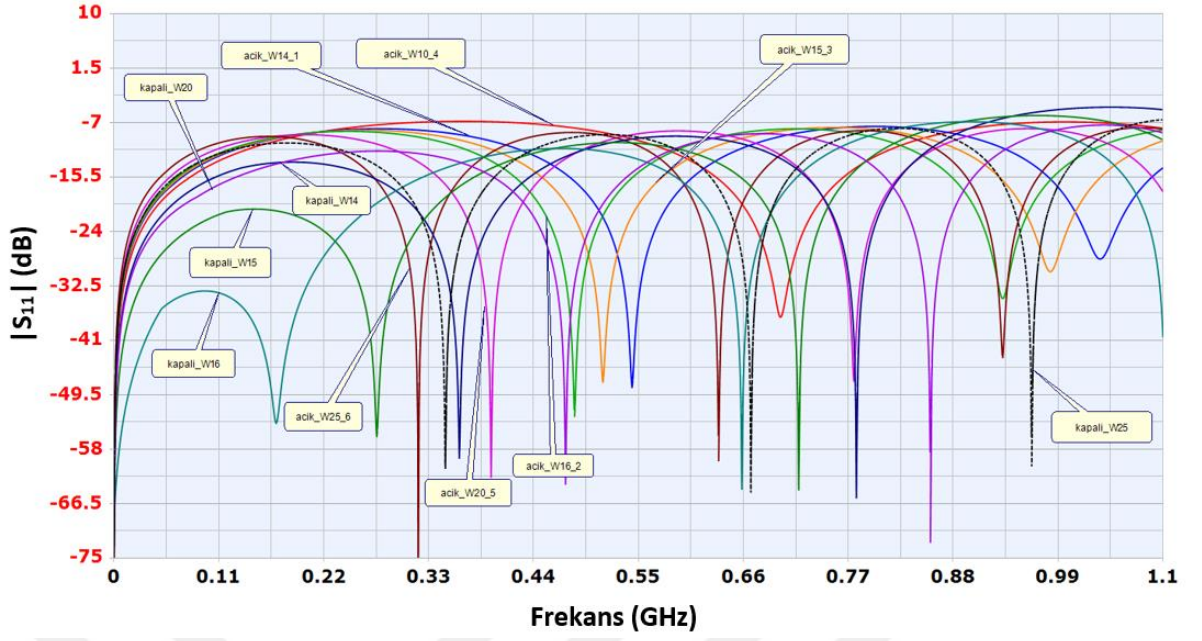
Şekil 4.21. Kapalı TEM hücresinde farklı açılar için S11 değerleri.



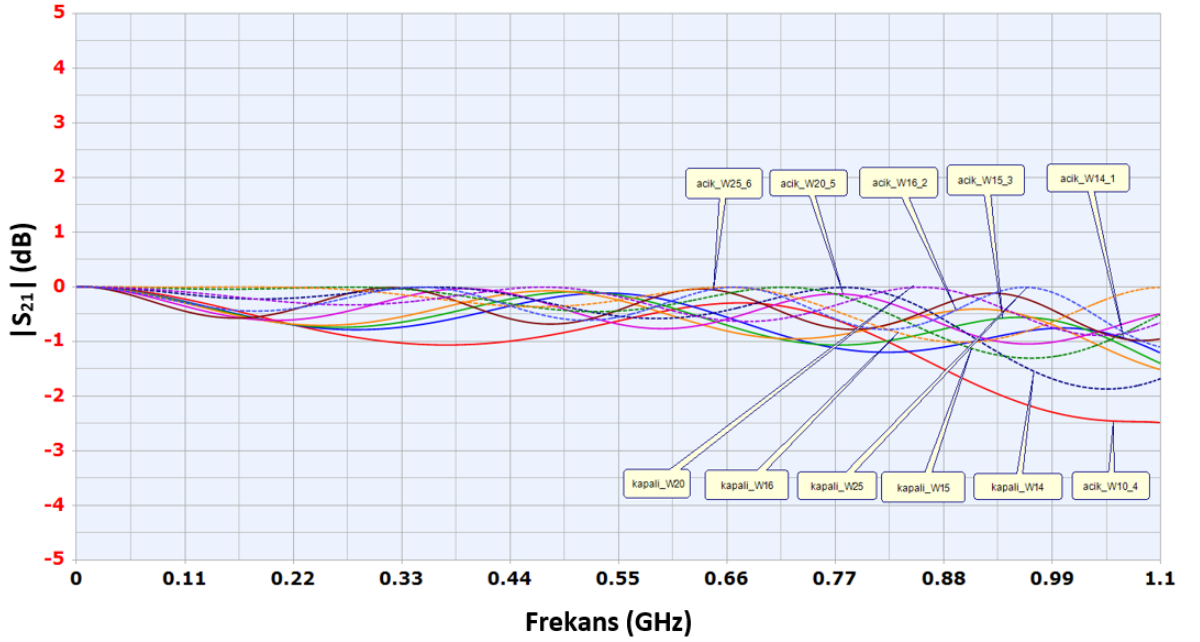
Şekil 4.22. Kapalı TEM hücresinde farklı açılar için S21 değerleri.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 incelendiğinde açık TEM hücresinde oldukça benzer formda S-parametrelerine sahip ve beklenildiği gibi daha az kayıplı bir iletim hattı örneği olduğu gözlemlenmektedir. Kapalı simülasyonların başka bir özelliği daha dar açılara sahip dik hücrelerde uygun iletim ve yansıma performansı oluşturamadığıdır. Yine çok geniş açılarda da yansıma bir noktadan sonra yükselişe geçmekte, kayıplar da buna bağlı olarak artmaktadır. Bu tasarım örneğinde aynı açık hücrelerde olduğu gibi kapalı hücrelerin de belirli bir açı aralığında çalışabilir olduğu söylenebilir.

Hem açık hem kapalı hücrelerin benzetimi yapılan her bir ölçü (açı) değeri için kıyaslama grafikleri oluşturulmuştur. Bu noktada Keysight Pathwave RF Synthesis (Geneyss) programı kullanılmıştır [38].

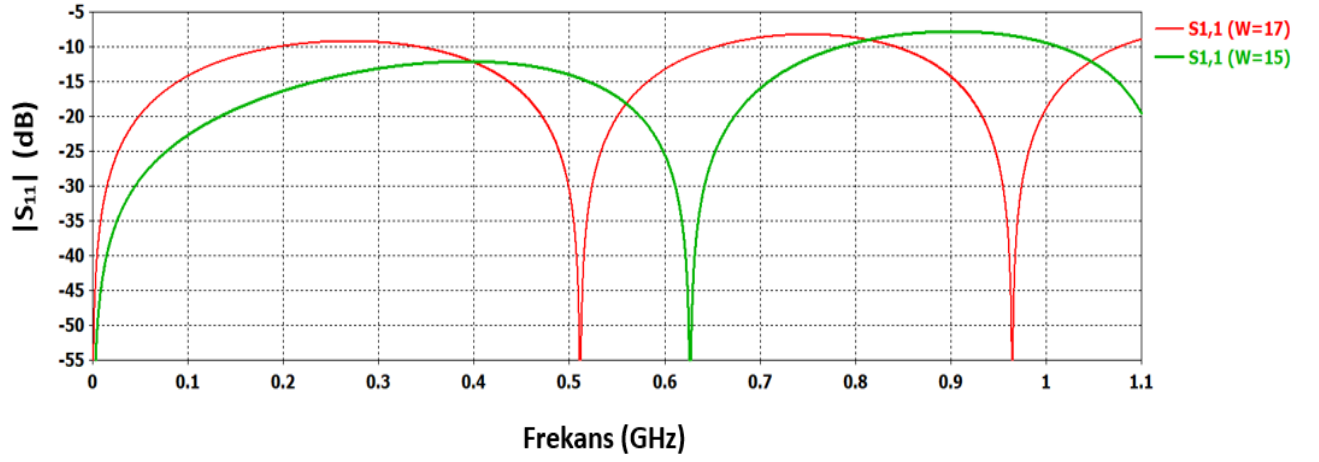


Şekil 4.23. Açık ve kapalı TEM hücresinde farklı açılar için S11 değerleri.

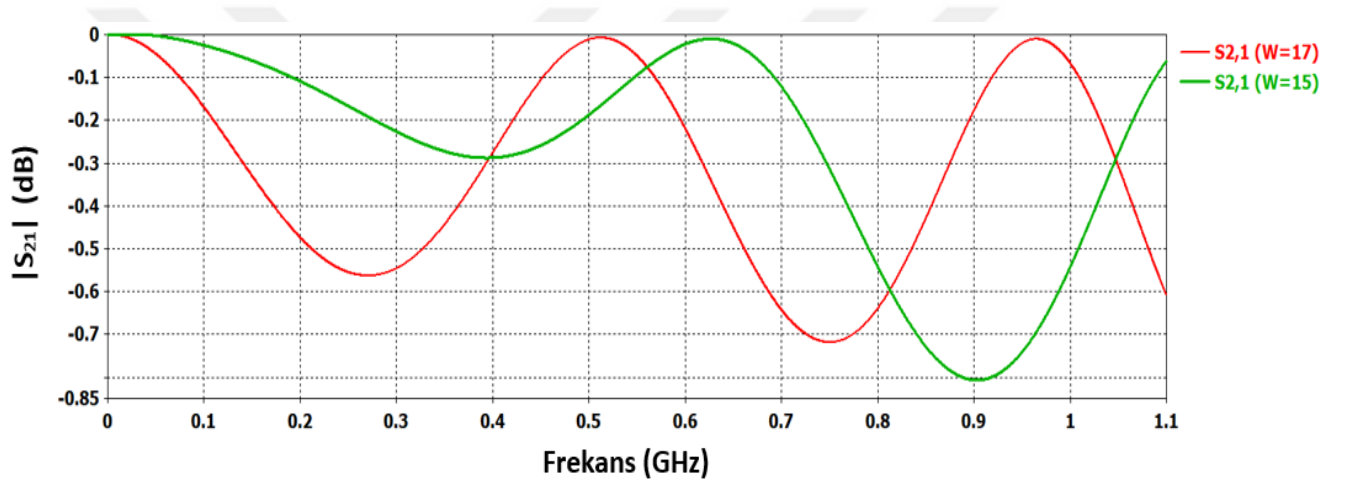


Şekil 4.24. Açık ve kapalı TEM hücresinde farklı açılar için S21 değerleri.

Tüm bu veriler ışığında kapalı bir TEM hücresi için en uygun karakteristikte olduğu düşünülen iki değer seçilmiş ($w=15$ ■ ve $w=17$ ■), bu iki örnek üzerinden çalışmalara devam edilmiştir (Bakınız Şekil 4.25 ve Şekil 4.26).



Şekil 4.25. Kapalı TEM hücresi optimal iki uzunluk için S11.



Şekil 4.26. Kapalı TEM hücresi optimal iki uzunluk için S21.

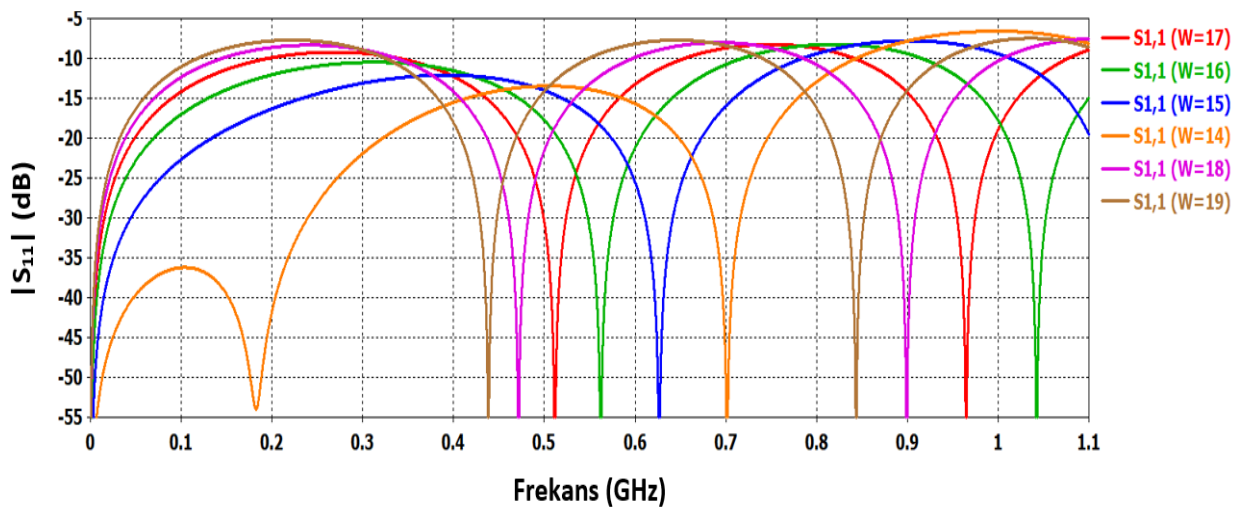
Şekil 4.14'te verilen S11 grafiği Şekil 4.25 ile kıyaslandığında yapılan açısal iyileştirmelerin 400 MHz'e kadar olan çalışma bandını 800 MHz'e kadar genişlettiği gözlemlenebilir. Aynı durum S21 grafikleri için de geçerli olup Şekil 4.16 ile Şekil 4.26 incelendiğinde S21 kayıp değerlerinde önemli ölçüde azalma olduğu, aynı zamanda hücrenin bant boyu eşdeğer bir kayıp performansı gösterecek şekilde tasarlanabildiği görülmektedir. S21 için beklenen kayıp değerinin olabildiğince küçük yani 0 dB'ye yakın olması gerekmektedir. Şekil 4.26'da bu değer bant içerisinde maksimum -0.8 dB'ye kadar düşmektedir. Literatürde benzer çalışmalarda bu değer birkaç dB'ye kadar düşebildiği gözlemlenmiştir [7].

Bu sonuçla beraber, literatürde benzer karakteristik gösteren TEM hücrelerine [1, 7, 27, 30] yakın performansta ve aynı dalga formunda kapalı bir TEM hücresi için simülasyonun başarı ile yapıldığı söylenebilir.

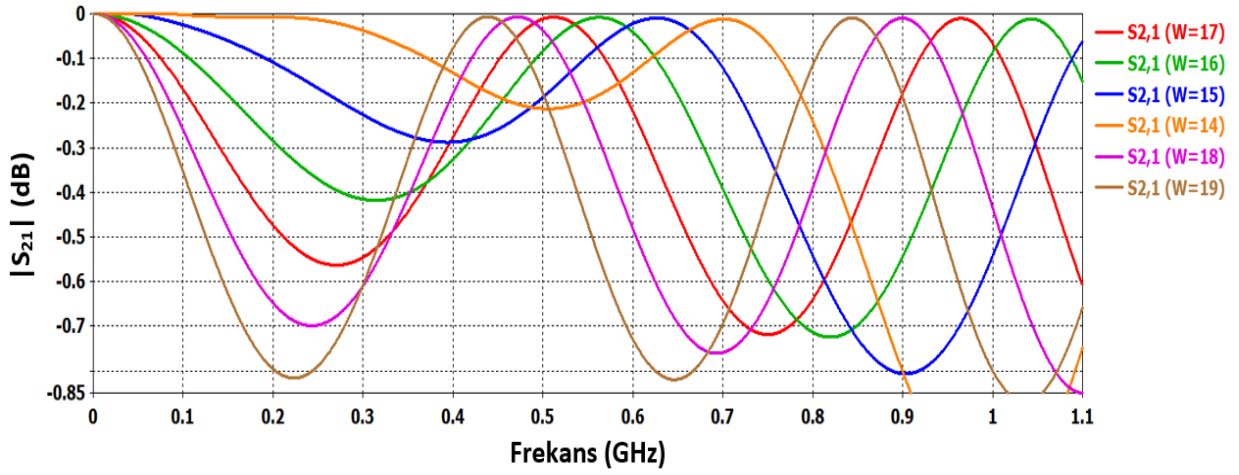
4.3. Eğri Uyumlama ile Kapalı TEM Hücresi için Dip Noktası Formülasyonu

Açısal değişimlerin hücre performansına etkisini görmek için bu noktaya kadar daha geniş aralıklar (Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4) ile denemeler yapılmıştır. Bu noktadan itibaren ise her bir açının denk geldiği septum uzunluğunun etkisini daha hassas olarak ölçümlemek için ise belirlenen dar aralık içinde daha küçük adımlara ayırarak denemeler yapılmıştır.

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’den görüleceği gibi w değerinin (septum ana gövde uzunluğu) optimal olarak değerlendirildiği dar bir aralıkta simülasyon daha küçük adımlara ayrılarak yapılmış; elde edilen şekillerde w uzunluğundaki her bir değişimin TEM hücresinin S -parametre cevabında frekans bandı boyunca kayıklığa sebep olduğu gözlemlenmiştir. w boyutunun kademeli olarak artışı, S_{11} ve S_{21} frekans cevabında benzer dalga formunun oluştuğunu (belirli bir w aralığı boyunca) ancak bu formun bant boyunca belirli bir frekans değeri kadar kayarak ilerlediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.27. Kapalı TEM hücresi hassas parametrizasyon için S_{11} .



Şekil 4.28. Kapalı TEM-t hücresi hassas parametrizasyon için S11.

Burada hücrenin S11 cevabının bant boyunca belli noktalarda dip yaptığı ve bu noktaların uzunluk ile direkt bağlantılı olduğu görülmektedir. Bu dip noktalarda yansımalar çok küçülmekte ve hücre mükemmel iletim yapmaya başlamaktadır. Bu noktaların uzunluk ile olan bağlantısını çıkarabilmek için MATLAB ortamında bir eğri uyumlama fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu formül ile S11'in dip yaptığı noktaların frekans değeri hesaplanabilmektedir. Sırası ile birinci ve ikinci dip noktalar için bulunan eğri uyumlama fonksiyonları formül 4.8 ve formül 4.9'da verilmiştir.

$$f_{notch1} = (5.49)w^2 - (233.67)w + 2894.80 \quad (4.8)$$

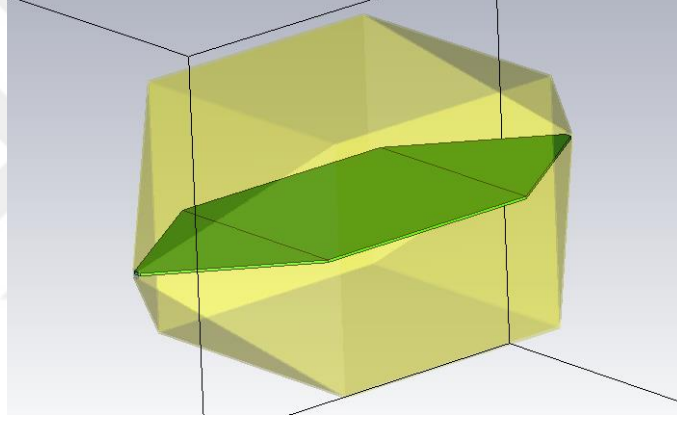
$$f_{notch2} = (5.30)w^2 - (251.72)w + 3711.70 \quad (4.9)$$

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'den görülebileceği gibi $w=14$ cm ve $w=19$ cm arasında hücrenin frekans cevabı benzer olup bu ölçüler dışına çıkıldığında dip noktalar değişmeye başlamaktadır. Bu iki değer arasında olduğu sürece elde edilen eğri uyumlama işlemi sonucunda ikinci dereceden bir fonksiyon ile hücrenin S11'nin dip frekans noktaları septum ana gövde uzunluğuna bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

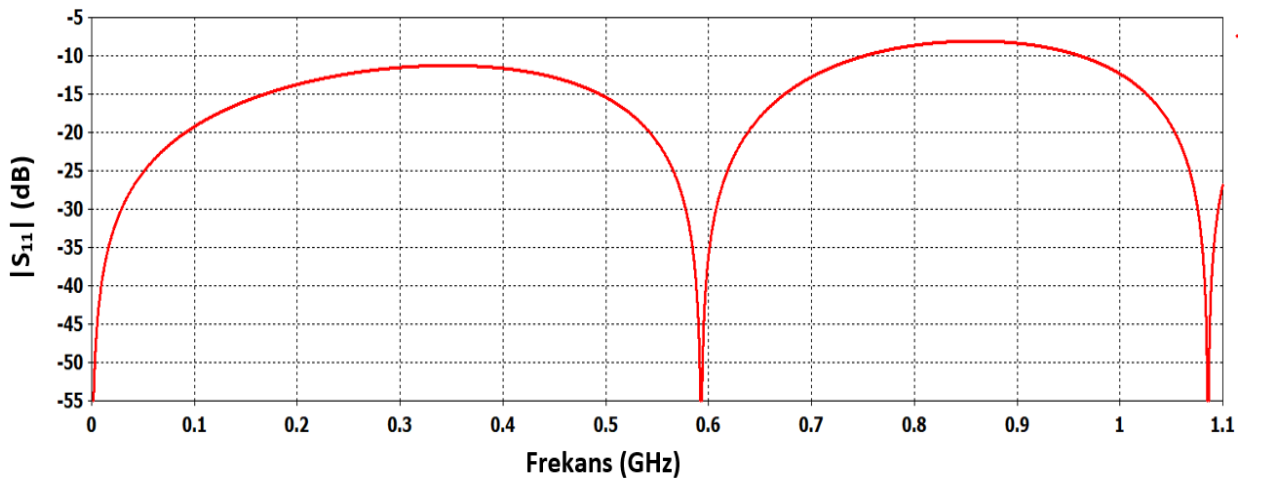
4.4. Septum Optimizasyonu

TEM hücrelerinin temel eksikleri sınırlı çalışma alanı ve üst frekans sınırıdır. Hücre içinde yüksek mertebe modların yayılmaya başladığı nokta hücrenin üst çalışma frekansı olarak ifade edilir. Bu frekans noktası hücrenin fiziksel boyutlarına direkt bağlı olduğundan hücrenin koaksiyel port modeli de dahil olmak üzere en küçük dikdörtgen parçası dahi 50Ω 'a eşlenme konusunda önemli yere sahiptir [39].

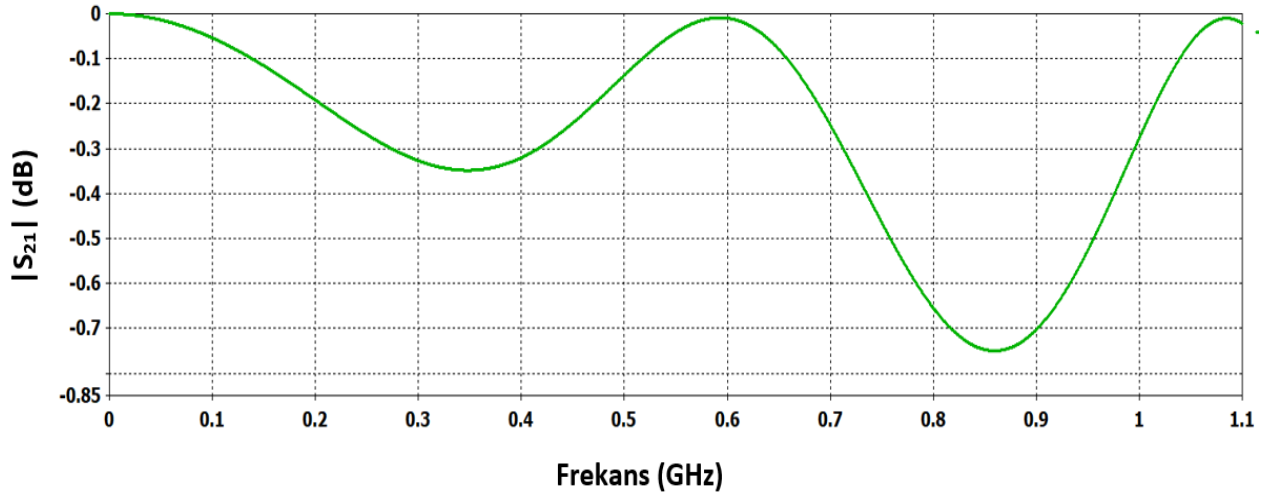
Bu noktaya kadar yapılan tüm optimizasyon işlemleri sonrası elde edilen maksimum performanslı TEM hücresi modeli (Şekil 4.29) ve modele ait S-parametreleri Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de verilmiştir. Nihai model üzerinde w septum gövde genişliği 15.5 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.29. Klasik üçgen formda septum (nihai model, w=15.5cm).



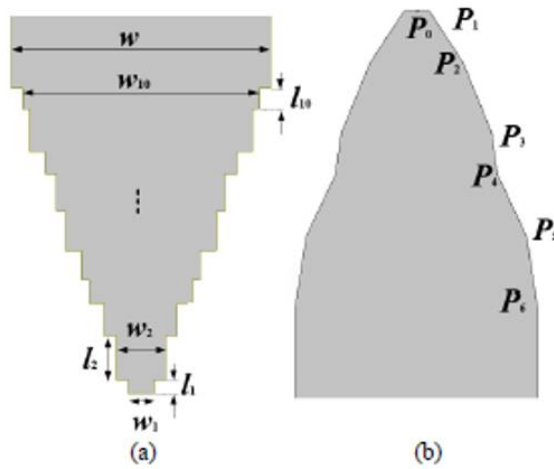
Şekil 4.30. Klasik üçgen formda septum için S11.



Şekil 4.31. Klasik üçgen formda septum için S21.

Son yıllarda TEM hücreleri üzerine yapılan çalışmalarda bazı yeni yöntemler de geliştirilmiştir. Bunlar, temelde septumun tasarımı için ortaya atılan analitik modeller üzerine kuruludur [39].

Bir TEM hücresinde 50Ω 'a eşlenmenin eksik oluşu yapı boyunca duran dalgaların oluşmasına neden olur. Bu, hücre içerisinde elektrik alan dağılımının eşit olmayacağı anlamına gelir, yani elektromanyetik alanın genliği hücrenin farklı noktalarında değişiklik gösterir. Eşleme; hücrede bant genişliğinin artırılması yani septumun yeniden şekillendirilmesiyle mümkün olup bu amaçla iki farklı yöntem ortaya konmuştur. Bu yöntemlerden biri “Çoklu Basamak” modeli, diğeri ise “Parçalı Doğrusal” modeldir [39].



Şekil 4.32. İki farklı formda septum modeli; (a) Çoklu basamak, (b) parçalı doğrusal.

4.4.1. Çoklu Basamak (Merdiven) Modeli Simülasyonu

Çok adımlı sivrilme yapısına sahip bir TEM hücresi septumu tasarlamak için 10 adımlı bir basamak modeli oluşturulması önerilmektedir [39]. Ancak bu şekilde bir tasarım yapmanın çok temel bir zorluğu bulunmaktadır. Burada her bir basamak ayrı bir iletim hattı olup bu segmentlerin karakteristik empedansı Z_k ; her bir segmentin genişlik ve yüksekliğine bağlıdır. Temelde her bir segmentin her iki yüzünün 50Ω 'a eşlenmiş olması gerektiği için segmentlerin karakteristik empedansı Z_k 'nın da 50Ω 'a eşit olması gerekir [35].

Bir k segmentinin karakteristik empedansı;

$$Z_k = \frac{V_k}{I_k} = \frac{-\int_s^0 \overline{E_k} \cdot d\overline{l}}{\oint \overline{H_k} \cdot d\overline{l}} \quad (4.10)$$

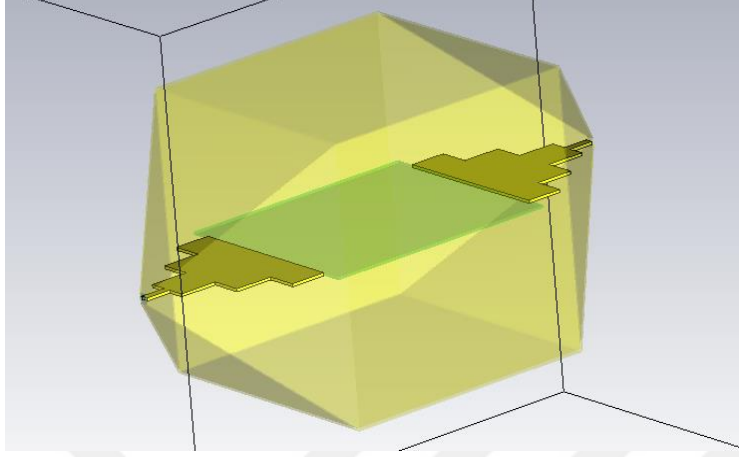
şeklinde hesaplanabilir. Burada V_k ve I_k sırasıyla septum ile dış gövde arasındaki gerilim ve septumdan akan akımdır. I_k formülden de görüleceği gibi septum etrafında manyetik alanın yol boyunca integrali ile elde edilebilir. Bu durumda formül;

$$Z_k = \eta_0 f(h_k, w_k) \quad (4.11)$$

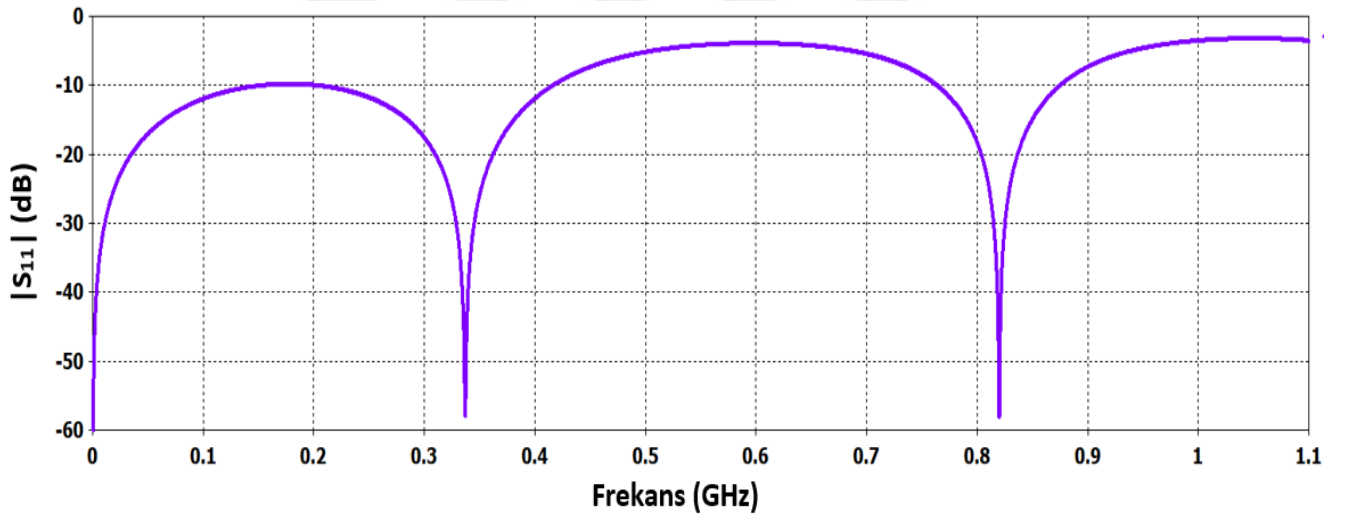
şeklinde yazılabilir. Burada η_0 boş uzayın karakteristik empedansı, h_k segment yüksekliği, w_k ise segment genişliğidir. f ise yapıdaki elektromanyetik alanın dağılımına bağlı olan doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Bu nedenle bir TEM hücresi tasarlanırken septum boyutları tüm Z_k empedansları 50Ω 'a eşit olacak şekilde belirlenmelidir [35].

Kendi hücre modelimiz üzerinde ise bu verilerden yola çıkarak basit bir çok basamaklı septum modeli geliştirilmiştir. Yapılan çeşitli modellemeler sonrası performans anlamında yakalanabilen en iyi durum 4 basamaklı olup, bu tasarımda her bir geçiş aynı oranda küçültülerek çıkış portuna uyumlandırılmıştır. Şekil 4.33'te merdiven formda septum için örnek bir model verilmiştir. Literatürde de belirtildiği gibi her bir segmentin tasarımı 50Ω uyumlandırma gerektirmektedir. Modelleme sonrası elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde klasik üçgen formda elde edilen yansıma ve iletim değerlerinden

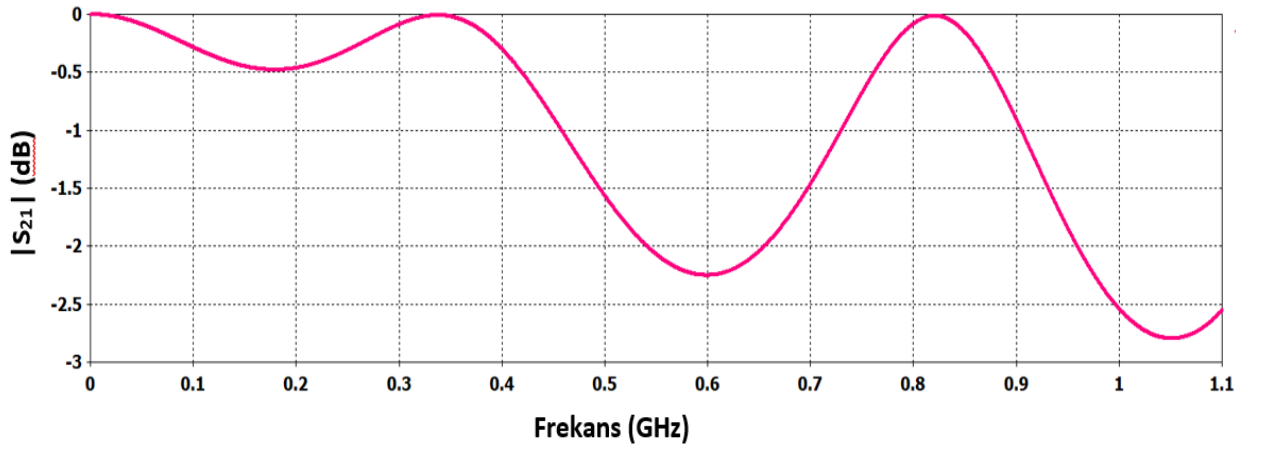
daha kötü sonuçlar ortaya çıkmıştır. Klasik üçgen forma göre iletim kaybı bant boyunca ortalama -0.5 dB'lerden -2.5 dB'lere kadar düşmüştür.



Şekil 4.33. Merdiven formda (çoklu basamak) septum modeli.



Şekil 4.34. Merdiven formda septum için S11.



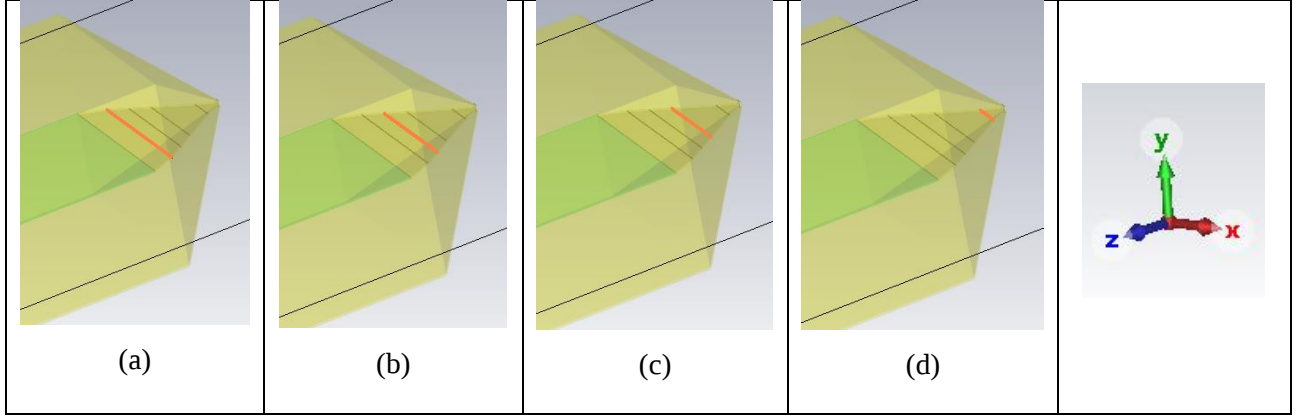
Şekil 4.35. Merdiven formda septum için S21.

Bir sonraki aşamada ise literatürde tavsiye edilen ikinci analitik model olan “Parçalı Doğrusal Model” için simülasyonlar yapılmıştır.

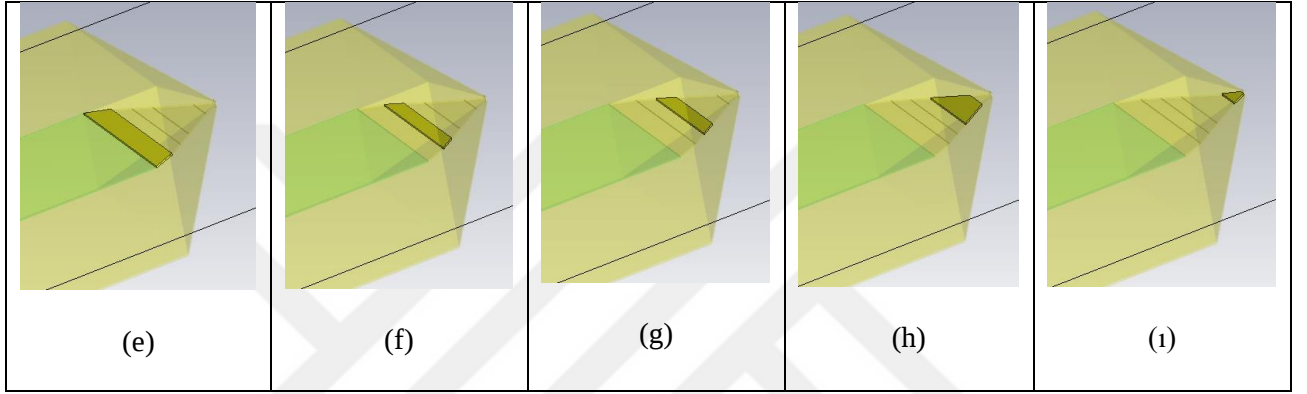
4.4.2. Parçalı Doğrusal Model Simülasyonu

Bu model de yine çoklu basamak modeli ile benzer olarak yapının tüm segmentlerini 50Ω’a uyumlandırma temeli üzerine kurulmuştur. Bu sivriltme yönteminde septumun kenarında birkaç nokta seçilir ve her nokta komşu noktalara düz çizgilerle bağlanır [35].

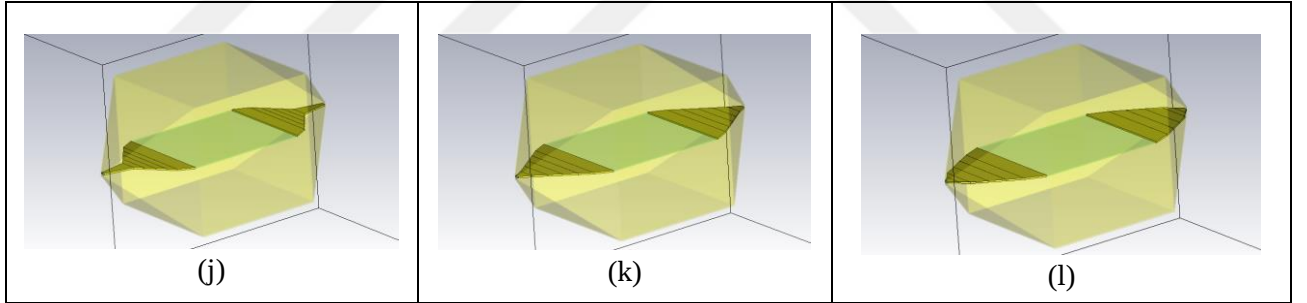
Önerilen modellerde segment sayısı 5 olarak belirtilmiştir [35, 39]. Bu noktadan hareketle 5 segmentli yapıda bir septum tasarlanmıştır; her bir segmentin boyu ve genişliği parametrik olarak tanımlanmıştır. Bu tasarım için ilk adım olarak CST Studio Suite programında Şekil 4.36’nın (a), (b), (c) ve (d) adımlarında olduğu gibi septum ana gövdesinin sağ ve sol taraflarına 4’er adet ince duvar blokları oluşturulmuştur. Kalınlık olarak septum ana gövde kalınlığı (y eksen) tüm bloklar için aynı girilmiş, blokların x (genişlik) ve z (kalınlık) eksenindeki boyutları için parametrik değerler atanmıştır. Sonrasında (e), (f), (g), (h) ve (i) adımlarında gösterildiği şekilde CST Studio Suite programının “Create Loft” fonksiyonu kullanılarak duvarlar arası geçiş blokları oluşturulmuştur. (j), (k), (l) adımlarında ise farklı parametrik durumlar için oluşan segment örnekleri verilmiştir.



(a), (b), (c), (d) 4 farklı konumda segment geçiş noktaları



(e), (f), (g), (h), (i) Geçiş noktalarına uzatılan parametrize septum parçaları



(j), (k), (l), Farklı parametrik durumlar için oluşan segment örnekleri

Şekil 4.36. Nihai septum modeli için parametrize segment tasarımı.

Şekil 4.36'nın (a), (b), (c) ve (d) adımlarında gösterilen duvar yapıları için farklı boyut değerlerinde denemeler yapılmıştır. Bu boyutlar CST Studio Suite programına Çizelge 4.5'teki formüllerle entegre edilmiştir. Bu formüllerde verilen w ve A boyutları Şekil 4.3'te verilen TEM hücre parametreleri olup x ve z değerleri ise bu 4 duvar bloğunun sırasıyla x ve z eksenlerindeki parametrik değerlerini ifade etmektedir.

Çizelge 4.5. Septum parametrizasyonunda duvar blokları için boyut formülü.

	x eksen boyutu	z eksen boyutu
Kullanılan parametrizasyon formülü:	$\left(\frac{w}{2}x\right)$	$\left(\frac{A}{2} + \frac{A}{2}z\right)$

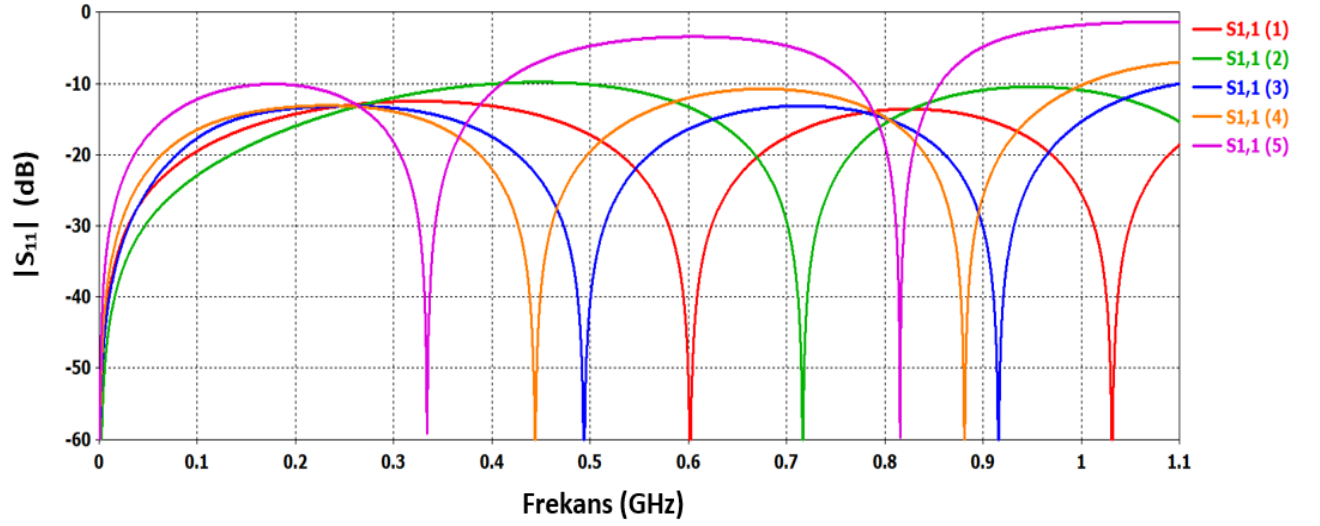
Yapılan simülasyonlar sonucunda hem birbirine en yakın hem de anlamlı S-parametrelerinin elde edildiği x ve z parametreleri için girilen değerler Çizelge 4.6’da; bu değerler ışığında ortaya çıkan RF performans grafikleri ise Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de verilmektedir.

Çizelge 4.6. Septum parametrizasyonu için denemesi yapılan farklı boyut değerleri.

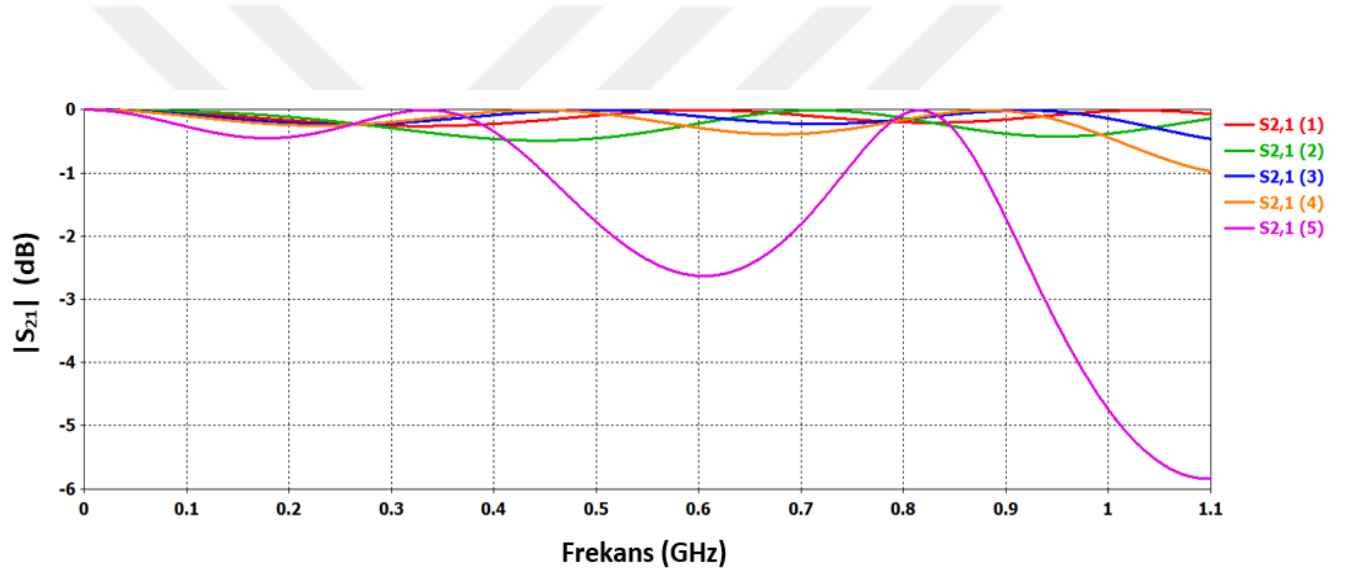
	x (cm)	z (cm)				
(a) duvarı :	0.834	0.15	0.16	0.16	0.17	0.20
(b) duvarı :	0.667	0.25	0.30	0.31	0.33	0.35
(c) duvarı :	0.5	0.35	0.45	0.48	0.50	0.55
(d) duvarı :	0.167	0.55	0.78	0.80	0.83	0.85
Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'deki ilgili grafik no:		5	4	3	1	2

Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de görülebileceği gibi 1(■), 2(■) ve 3(■) numaralı grafikler için yansıma ve iletim özellikleri beklenen noktaya başarıyla ulaşmıştır. Bu üç tasarım içerisinde 1(■) numaralı grafiğe ait parametreler bant boyunca en iyi S-parametre cevabını vermektedir. Parçalı doğrusal model yöntemi ile yapılan modelleme sayesinde klasik üçgen formda tasarlanmış septum modeline kıyasla çalışma bandı boyunca özellikle S21 değerinde 0.5 dB’ye varan iyileşme gözlemlenmektedir (Bakınız Şekil 4.31 ve Şekil 4.41).

Çizelge 4.6, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’deki sonuçlardan elde edilen veriler klasik üçgen formu septum modeline göre parçalı doğrusal modelin seçilen bazı parametreler için S-parametre cevabının kötüleştiğini, bazı parametreler için ise iyileştiğini göstermektedir.

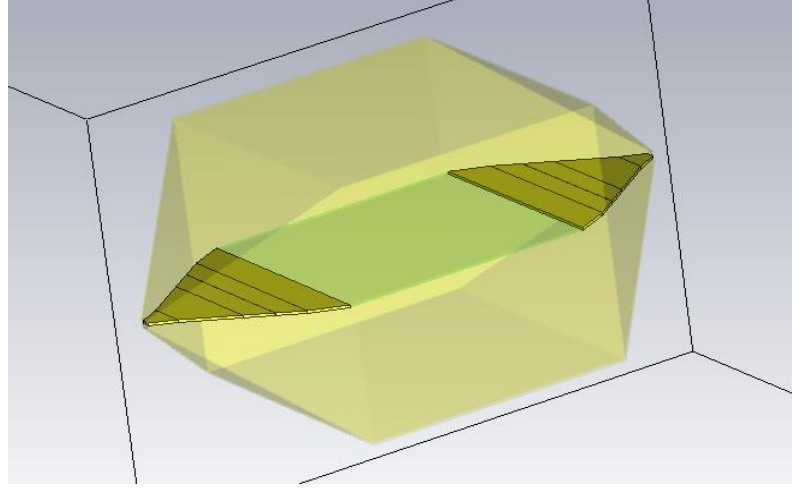


Şekil 4.37. Farklı segment en/boy değerlerinde parçalı doğrusal model için S11.

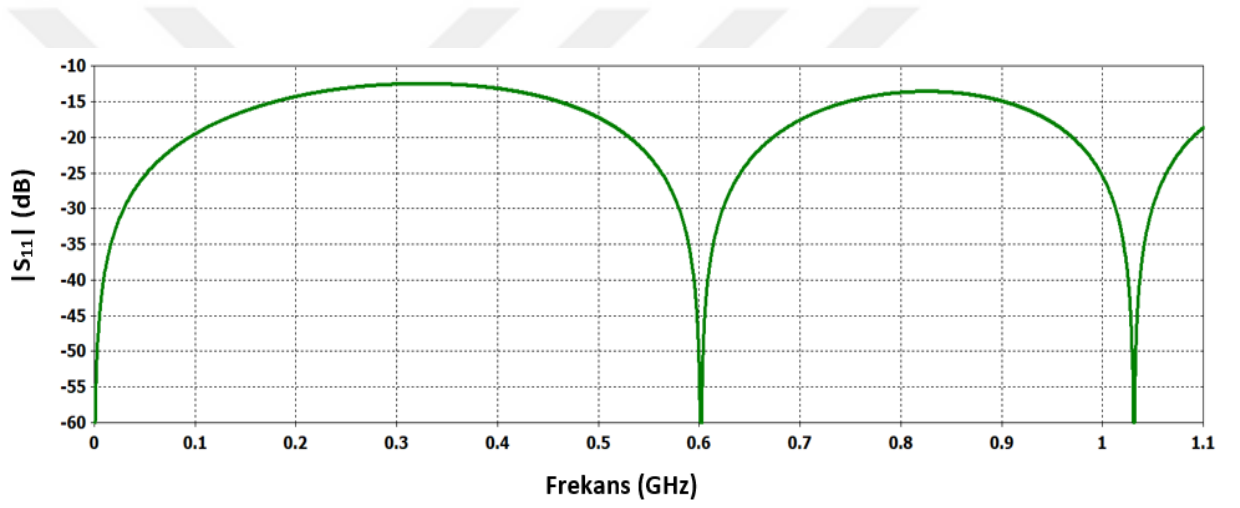


Şekil 4.38. Farklı segment en/boy değerlerinde parçalı doğrusal model için S21.

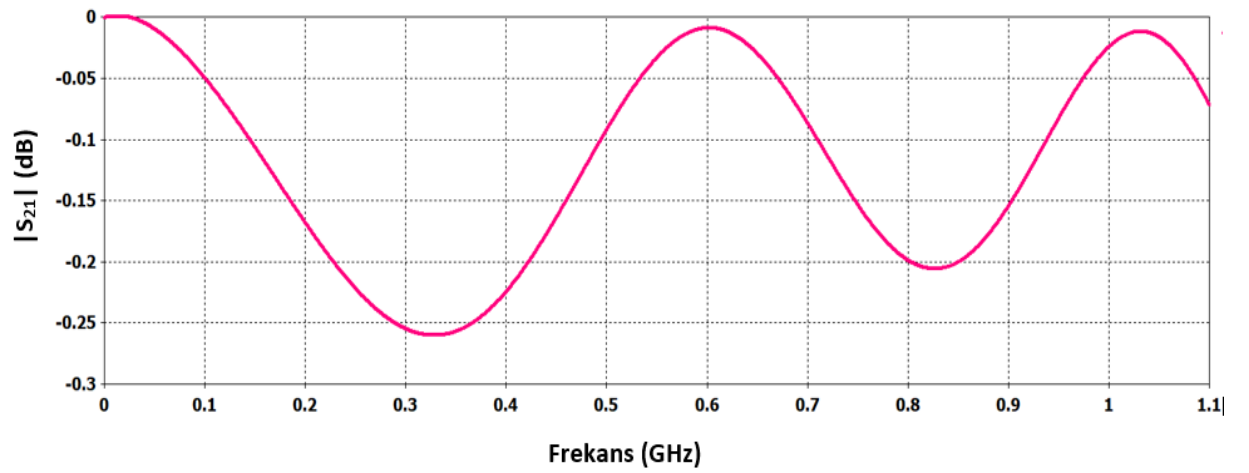
Yapılan tüm çalışmalar ışığında nihai bir TEM hücresi modeli; doğrusal parçalı bir septum modeli ve SMA port modeli entegrasyonu ile tamamlanmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları bant boyu maksimum 0.26 dB kayıp (S_{21}/S_{12}) ve -12.47 dB geri yansıma (S_{11}/S_{22}) değeri ile uygun bir iletim hattı tasarlanabildiğini göstermektedir. Bu modele ait sonuçlar Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de verilmektedir.



Şekil 4.39. Nihai septum modeli.



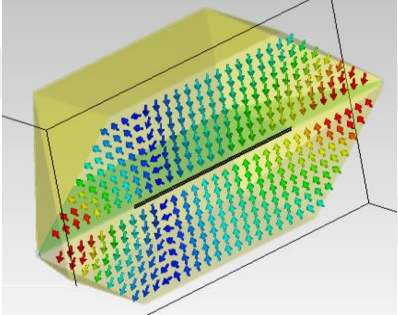
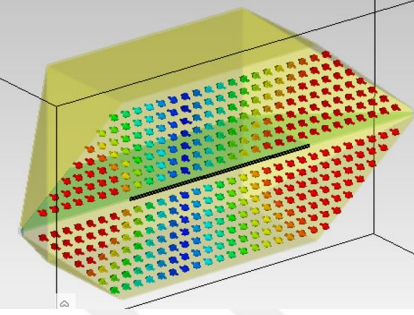
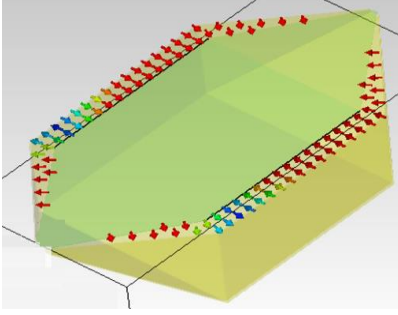
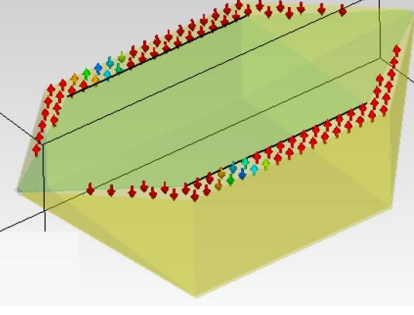
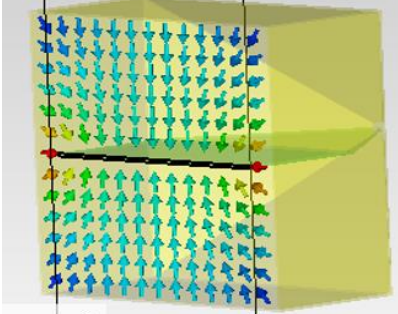
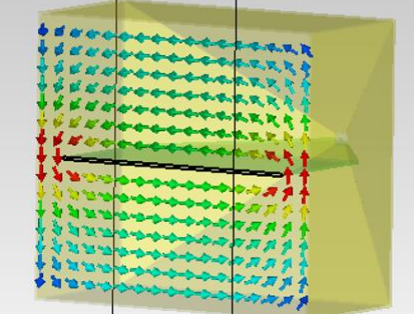
Şekil 4.40. Nihai septum modeli için maksimum S11.



Şekil 4.41. Nihai septum modeli için minimum S21.

4.5. Tasarlanan Model için Elektrik ve Manyetik Alanlar

Şekil 4.42’de CST Studio Suite programında tasarımı yapılan TEM hücreesine ait elektrik ve manyetik alana ait alan vektörleri ve şiddetleri gösterilmektedir. Daha sıcak renkler daha yüksek alan şiddetini ifade etmektedir. TEM hücresi tasarımında temel olarak elektrik ve manyetik alan vektörlerinin z kesiti alındığında septum etrafında homojen bir alan dağılımına sahip olması beklenmektedir [35, 36]. Şekil 4.42’de elde edilen alan dağılımları literatürdeki örnekleri [35, 36] ile tutarlı sonuçlar vermekte olup, bu adım bir tasarım doğrulama adımı olarak değerlendirilebilir.

	ELEKTRİK ALAN ÇİZGİLERİ	MANYETİK ALAN ÇİZGİLERİ
X- Düzleminde Kesit		
Y- Düzleminde Kesit		
Z- Düzleminde Kesit		

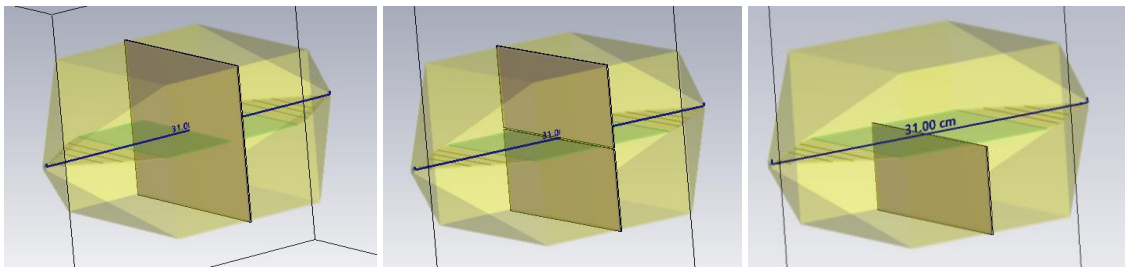
Şekil 4.42. CST Studio Suite programında tasarlanan TEM hücresi için elektrik ve manyetik alan çizgileri.

4.6 Optimal Model için Ekran Malzemesi Simülasyonu

Bu noktada Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de tasarımı ve simülasyon sonuçları verilen optimal model bir TEM-t hücresi olarak ortadan ikiye bölünerek düzlemsel bir malzeme ile yüklenip simülasyon ortamında bu ekran malzemesinin bant boyunca tepkisi incelenebilir. Elde edilen S21 değeri simülasyonu yapılan düzlemsel malzemenin iletkenlik seviyesini; dolayısıyla ekran malzemesi olarak kullanılabilirliğini ortaya koyacaktır.

Bu simülasyonlarda iletken olmamasına rağmen karakteristik özelliği bilinen FR4 malzemesi ile ilk denemler yapılmıştır. FR4 bilindiği gibi elektrik ve elektronik dünyasında en çok baskı devre kartlarının üretiminde kullanılmaktadır. Kararlı bir yalıtım sağlaması, pürüzsüz, dayanıklı ve kolay işlenebilir oluşu sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. FR4’ün bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4.3$ ’tür.

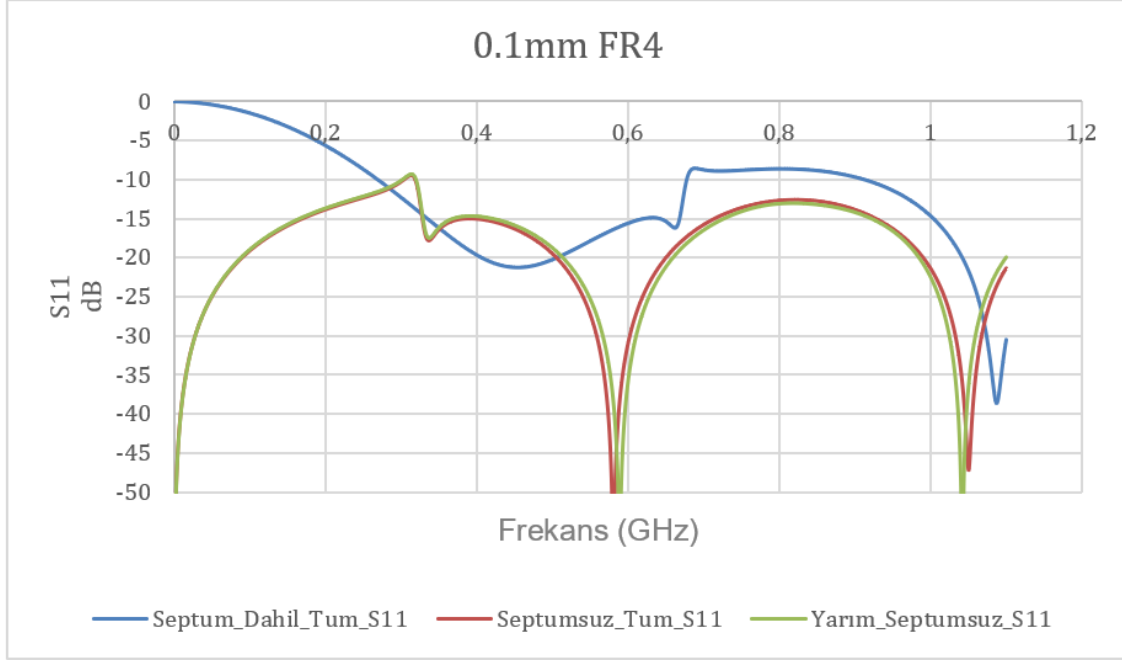
Yapılan simülasyonlarda 3 çeşit yerleşim denenmiştir. İlkinde hücrenin tam ebadında ve septumu da bölecek şekilde; ikincide septumda herhangi bir bozulma yapılmadan 2 eş parça şeklinde, sonuncusunda ise septumu bozmadan yarım boyutlu malzeme ile yerleşim yapılmıştır.



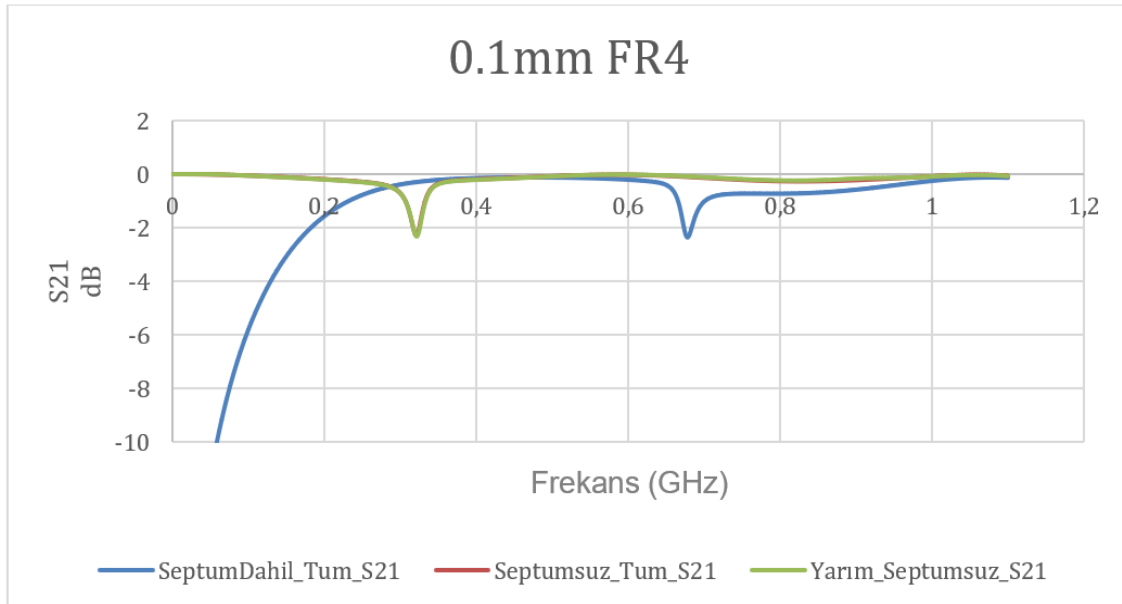
Şekil 4.43. FR4 malzemesi için TEM-t hücresinde 3 farklı yerleşim.

Elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.44 ve Şekil 4.45) septumun dahil olmadığı durumlarda tam ya da yarım boyutlu malzeme yerleşimlerinin benzer sonuçları olduğu gözlemlenmiştir.

Optimal ve yüksüz (boş) bir TEM-t hücresinin S_{11} değerinin sıfıra yakın olduğu düşünülürse yüklü bir TEM-t hücresinde elde edilen S-parametre karakteristiği ölçümü yapılan malzemenin ne kadar yansıtıcı ya da geçirgen olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.44. FR4 malzemesi için TEM-t hücresinde üç farklı yerleşim durumunda S_{11} .



Şekil 4.45. FR4 malzemesi için TEM-t hücresinde üç farklı yerleşim durumunda S_{21} .

Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'ten de anlaşılacağı üzere herhangi bir malzeme karakteristiği ölçümü için septumun da ölçümlere dahil edilmesi gerekmektedir. Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'te sadece bu durumda bant başında küçük de olsa bir değişim olduğu gözlenmektedir. Diğer türlü FR4'ün havaya yakın olarak bilinen dielektrik sabiti hücre içinde bulunan havadan çok da farklı olmayan minimal bir değişim ortaya koymuştur.

Burada iki dielektrik malzemenin (FR4 ve hava) sınır noktası için iletim ve yansıma katsayılarının hesabı yapılabilir. Literatürde iki dielektrik sınırı için yansıma ve iletim katsayıları formül 4.12 ve formül 4.13 ile ifade edilmiştir [22].

$$S_{11} = S_{22} = \Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (4.12)$$

$$S_{21} = S_{12} = T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (4.13)$$

Bölüm 2.2'de yalıtkan ortamlar için ($\sigma \ll j\omega\epsilon$) dalga empedansının frekanstan bağımsız olduğunu ve $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ formülü ile ifade edildiğini belirtmiştik. Burada FR4 için

$\eta_{FR4} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$; hava için ise η_0 olarak belirtilebilir [37]. Formül 4.12 ve formül 4.13'te FR4 ve hava için η değerlerini yerine koyarak hesaplama yapabiliriz:

$$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{\frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} - \eta_0}{\frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} + \eta_0} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1 - \sqrt{4.3}}{1 + \sqrt{4.3}} = -0.3 \quad (4.14)$$

$$20\log_{10}(-0.3) = -10.45 \text{ dB}$$

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{2 \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}}}{\frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} + \eta_0} = \frac{2}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} = \frac{2}{1 + 2.074} = 0.65 \quad (4.15)$$

$$20\log_{10}(0.65) = -3.74 \text{ dB}$$

Formül 4.14 ve formül 4.15'ten elde edilen değerler hava ve FR4 sınır koşullarında iletilen ve yansıyan dalga oranlarını ortaya koymaktadır. Görüldüğü gibi hücre içerisine yerleştirilen FR4 malzemesi -10 dB geri yansıma kaybı ve -3.74 dB iletim kaybı ile gelen dalganın iletimini sağlamaktadır.



5. TEM HÜCRESİ ÜRETİMİ VE ÖLÇÜMÜ

Son yıllarda yaygınlığı gittikçe artan 3 boyutlu yazıcılarla plastik malzemeler kullanılarak üretilen yapılar, birçok alanda kolaylık ve düşük maliyet cazibesi sebebiyle teknoloji ve sanayide sıklıkla tercih edilir durumdadır.

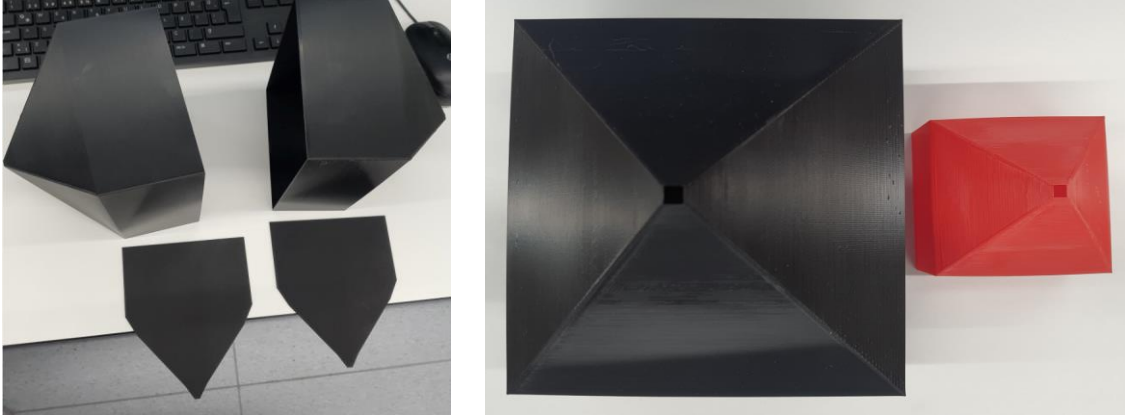
Yapılan literatür taramalarında bu çalışma kapsamında yürüttüğümüz şekilde TEM hücresi örneklerine çok az rastlanmıştır. EMU alanında çalışan teknolojik merkezlerde, üniversitelerin bu alanda yaptığı çalışmalarda, tasarlanan, üretilen TEM hücre yapılarının direkt olarak iletkenliği yüksek metal malzemelerden yapıldığı gözlemlenmiştir.

5.1. TEM Hücresi Üretimi

5.1.1. Farklı Boyutlarda Model Baskısı

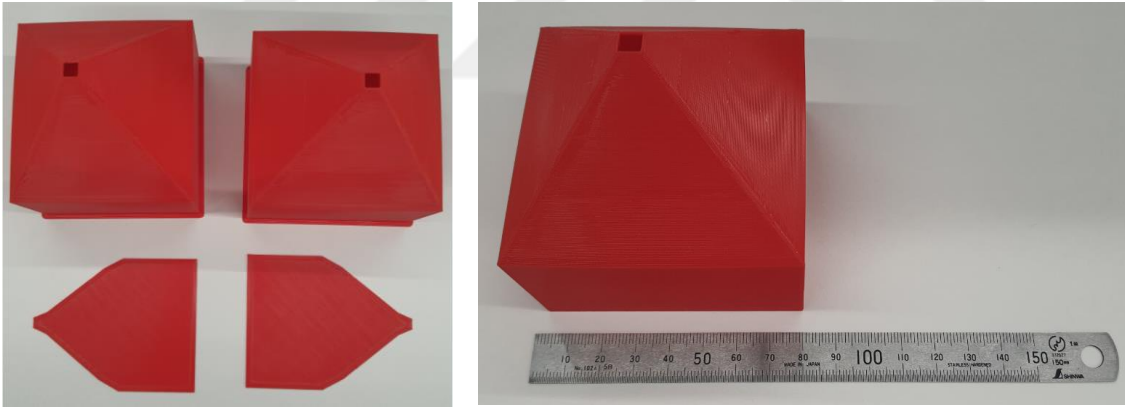
TEM hücresinin üretim aşamasında Raise 3D Pro3 Plus marka 3 boyutlu yazıcı [40]; üretim malzemesi olarak ise Raise 3D Premium PLA Filament [41] kullanılmıştır. Üretim sonrası elde edilen malzemenin yüzey düzlüğü kontrol edilmiş; herhangi bir zımparalama ihtiyacı gözlemlenmemiş, akabinde kaplama sürecine geçilmiştir.

İlk üretim sürecinde Şekil 5.1’de gösterilen siyah renkli, kıyasla daha büyük ebatlara sahip hücrenin baskısı yapılmıştır. Ürün boyutları Çizelge 4.2’de verildiği gibi olup ürünün CST Studio Suite ortamında çizilen gövde modeli Şekil 4.20’de, septum modeli ise Şekil 4.39’da verildiği gibidir. Bu ürün, bir sonraki aşamada yüksek iletkenlik değerine sahip alüminyum bant [42] kullanılarak kaplanmıştır.



Şekil 5.1. İlk üretilen TEM hücre yapısı.

İkinci aşama üretim sürecinde tüm boyutlar $\frac{1}{2}$ oranında azaltılarak kıyasla daha küçük ebatlara sahip yeni bir hücre üretimi yapılmıştır. Kullanılan filamentler her iki ürün için de aynı seçilmiştir. Bu üretim sonrası elde edilen ürün ise bir sonraki aşamada bakır folyo [45] ve çift taraflı yapışkan bant [44] kullanılarak kaplanmıştır.

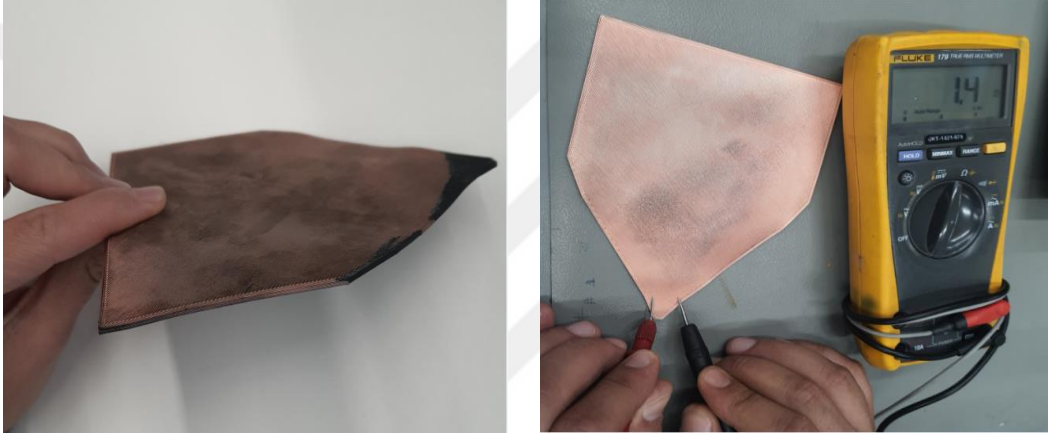


Şekil 5.2. $\frac{1}{2}$ oranında küçültülerek üretilmiş TEM-t hücre yapısı.

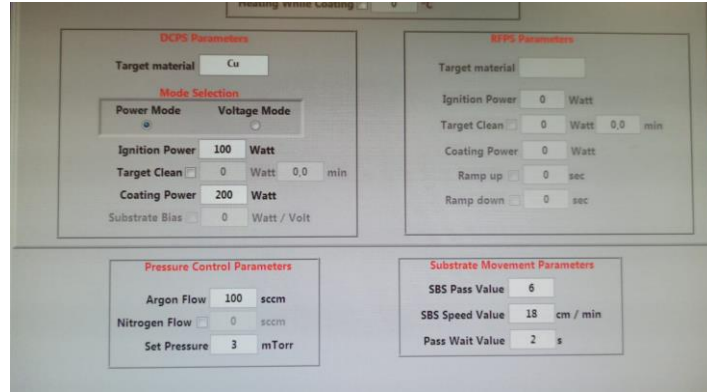
5.1.2. Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) Yöntemi ile Bakır Kaplama

Bu bölümde üretimi tamamlanan plastik TEM hücre yapısının özellikle İnce Film (İF) aygıt üretim süreçlerinde kullanılan Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) yöntemi ile iletken materyal ile kaplanma denemesi yapılmıştır. Çalışma sırasında VAKSİS firmasına ait MİCKS-VK-1304 model buhar biriktirme cihazı [43] kullanılmıştır.

İlk aşamada tüm hücrenin kaplanması yerine kupon denemeler ile ilerlemenin uygun olduğunu değerlendirerek TEM hücre yapısının sadece belli bir kısmına uygulama yapılmıştır. Uygulama sırasında 400 nm kalınlığında bakır (Cu) tohum tabakası kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda ise Cu aşındırma işleminin TEM hücresinin üretim malzemesine ve kalınlığına uygun olmadığı gözlemlenmiştir. Temiz oda koşullarında yapılan bu kaplama sonucunda Şekil 5.3'te gösterildiği gibi kupon ürünün iletkenliğinin uygun olduğu ancak TEM hücre malzeme yapısında sıcaklık ve basınca bağlı boyutsal tahribatlar olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple bu yöntem ile ilerlemekten vazgeçilmiştir.



Şekil 5.3. Buhar biriktirme yöntemi ile bakır kaplanmış TEM hücre kuponu.



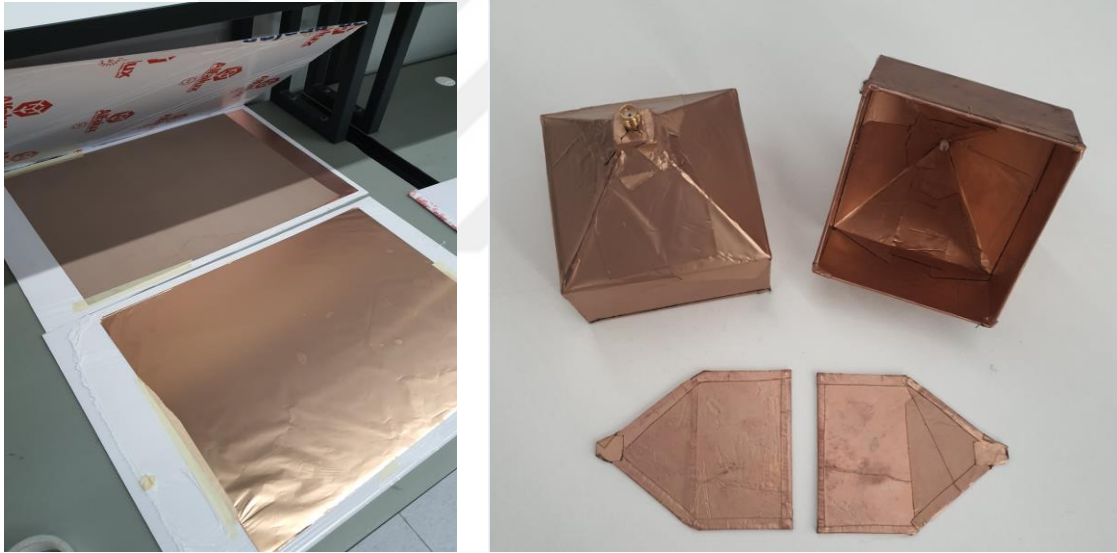
Şekil 5.4. Vaksis Vakum Sistemi TEM hücre kaplama parametreleri.

5.1.3. Bakır Folyo İle Kaplama

Bu kaplama yönteminde boyutsal olarak daha küçük ebatlarda basımı yapılan TEM hücresi seçilmiş; Holders Technology firmasının üretimini yaptığı ve özellikle elektronik

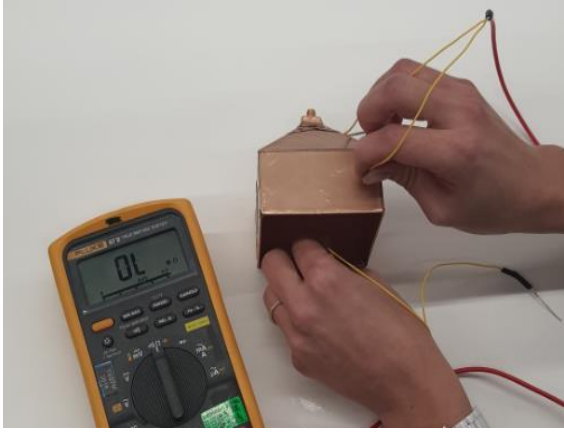
PCB üretimleri için önerdiği bakır folyo [45] kullanılmıştır. Folyonun yaprak halinde kullanımı uygun olmadığından hücre yüzeyine tutunabilmesi için 3M firmasının çift taraflı bantları [44] kullanılmıştır. SMA konektör olarak modellenen portlar için ise Huber Suhner firmasına ait 4 vida delikli ve flanşlı konektör [46] seçilmiştir.

Kaplama süreci başta hücrenin boyutsal özellikleri olmak üzere kullanılan çift taraflı bandın yapışma kuvvetinden kaynaklanan zorluklar sebebiyle zor olmuş ve uzun sürmüştür. Kullanılan çift taraflı bant karakteristik olarak yüksek bir tutunma kuvvetini garanti etmektedir. Buna istinaden ufak bir ekleme dahi yapmak/sökmek kaplama sürecini zorlaştırmıştır. Tüm zorluklara rağmen nihai olarak tam kaplanabilen bir hücre yapısı oluşturulmuştur.

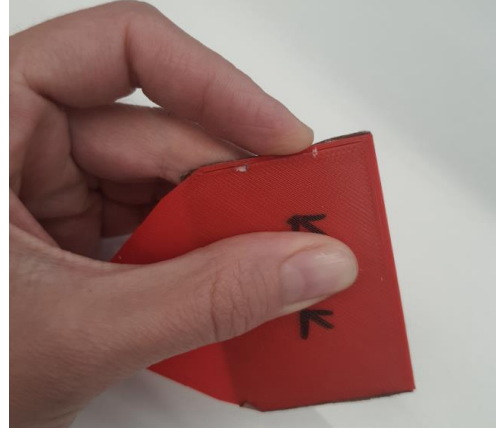


Şekil 5.5. Kaplanmış, $\frac{1}{2}$ oranında küçültülmüş, üretilmiş TEM-t hücresi.

Bu kaplama sürecinde atlanılan bir nokta tüm çalışmaların sonucunda etkili olmuştur. Her ne kadar kullanılan alüminyum bantlarla eşdeğer bir kaplama yapılması hedeflense de hücre boyutlarının getirdiği kısıtlamalar parçalı kaplama gerekliliği doğurmuştur. Kullanılan çift taraflı bandın elektriksel özellikleri göz önünde bulundurulmadığından hücre üzerindeki her bir ekleme noktasında iletkenlik kaybolmuştur. Dolayısıyla hücrenin gövdesi kendi içinde; septumu kendi içinde düzgün bir iletkenlik göstermemektedir. Bu çalışma bu anlamda sonraki çalışmalar için öğretici olmuştur.



(a)

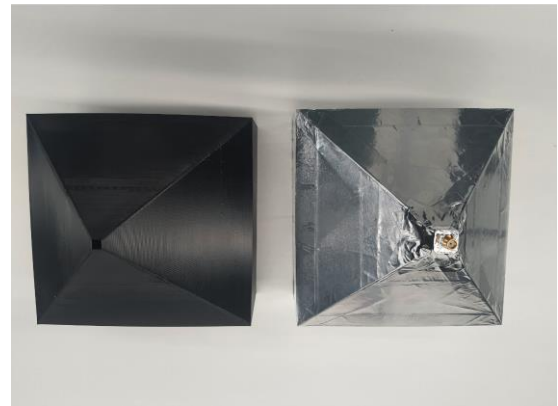
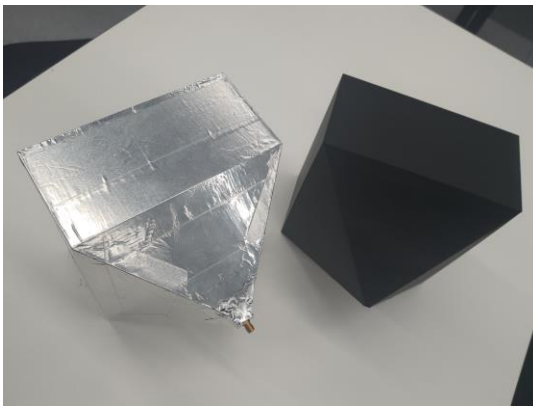


(b)

Şekil 5.6 (a) Bakır folyo ile kaplanmış TEM hücresinde iletkenlik ölçümü, (b) Bakır folyo ile kaplanmış TEM hücresinde kaplama problemi.

5.1.4. Alüminyum İletken Bantla Kaplama – Büyük TEM-t Hücresi

Bu kaplama işleminde görece 2 kat büyük ebatlı TEM-t hücresinin alüminyum bantla kaplanması yoluna gidilmiştir. Şekil 5.7’de kaplama öncesi ve kaplama sonrası TEM-t hücre parçalarının örnekleri verilmiştir. Seçilen alüminyum bant 0.0016 ohms/m^2 değerinde yüzey direncine sahip olup; 50.8 mm kalınlığında ve her iki yüzeyinde de yüksek iletkenlik gösterebilme özelliğine sahiptir [42, EK]. EMU/EMG uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. SMA konektör olarak modellenen portlar için ise Huber Suhner firmasına ait 4 vida delikli ve flanşlı konektörü [46] seçilmiştir.



Şekil 5.7. Bazı parçaları kaplanmış, kıyasla büyük, üretilmiş TEM-t hücresi.

Bu kaplama yöntemi için büyük boyutlu TEM-t hücresinin seçilmiş olması özellikle dar alanların kaplanması açısından büyük oranda kolaylık sağlamıştır. Şekil 5.8’de en büyük parçanın gövdesi üzerinde yapılan kısa devre ölçümü verilmiştir. Işımanın yani sinyal iletiminin kalitesi iletkenlik ile doğrudan bağlı olduğu için bu iletkenlik ölçümü daha sonra yapılacak RF ölçümler için bir ön test olma özelliği göstermektedir.



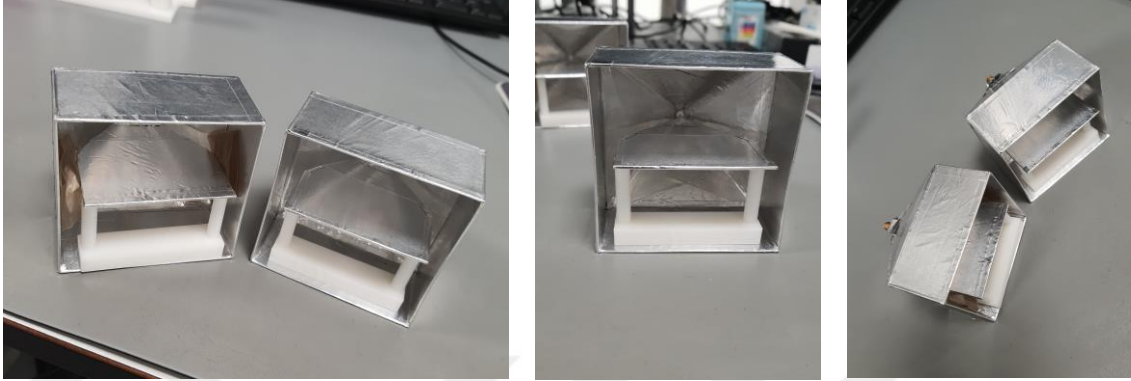
Şekil 5.8. Alüminyum bant ile kaplanmış büyük TEM-t hücresinde iletkenlik ölçümü.

5.1.5. Alüminyum İletken Bantla Kaplama – Küçük TEM-t Hücresi

EMU/EMG laboratuvarlarında sıklıkla kullanılan Parker marka alüminyum bant [42] kullanarak kapladığımız büyük TEM-t hücresi kendi içinde önemli ölçüde iletkenlik sağlamıştır. Bu noktadan hareketle daha pratik olabileceği düşüncesi ile aynı kaplama yöntemi ile ancak daha küçük ebatlı hücreden üretmenin düzlemsel malzeme ölçümlerinde daha kolay kullanılabilir olacağı değerlendirilmiştir.

Bu amaçla bakır kaplama için kullanılan daha küçük ebatlı hücre modeli ile tekrar 3 boyutlu basım yapılmış, bu hücre de alüminyum bant kullanılarak kaplanmıştır. SMA konektör olarak ise yine öncekiler ile aynı parça numaralı ürün [46] kullanılmıştır.

Bu aşamada ek olarak hücre gövde ve septum üretiminde kullanılan aynı plastik filament kullanılarak septumu tutmaya yardımcı olması amacıyla hücre içi ayaklar da üretilmiştir. Bu tip ayakların kullanımının literatürde örnekleri de bulunmaktadır [7].

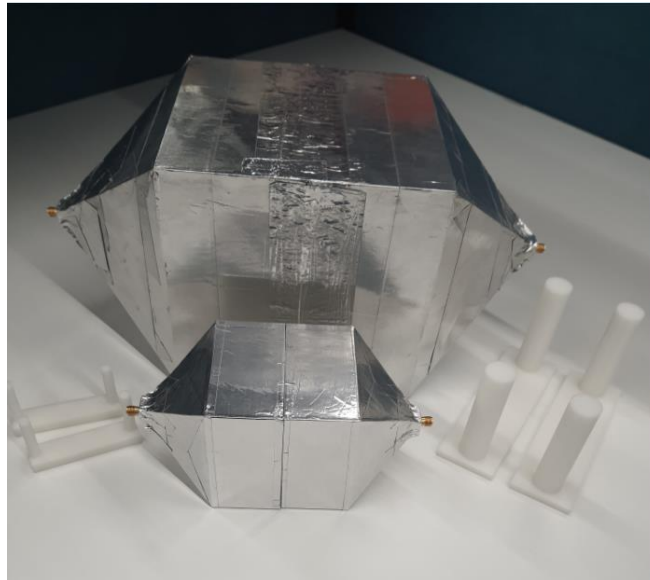


Şekil 5.9. Alüminyum bant ile kaplanmış küçük TEM-t hücresi ve septum tutucu ayaklar.

5.2. TEM (TEM-t) Hücresi Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları

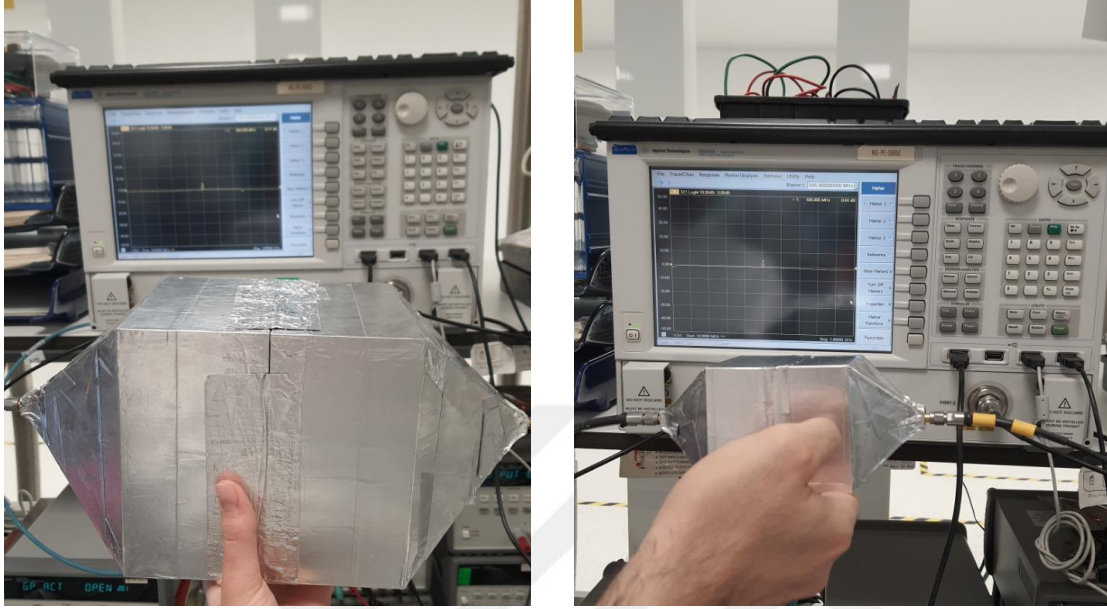
5.2.1 Malzeme Yüksüz Durum için TEM-t Hücre Performansları

Bu aşamada simülasyonları, optimizasyonları, üretimi, kaplaması ve ön iletkenlik testi yapılan TEM-t hücrelerinin bir iletim hattı olarak RF performansı incelenmiştir.



Şekil 5.10. Alüminyum bant ile kaplanmış küçük ve büyük TEM-t hücreleri ve septum tutucu ayaklar.

Testler öncesi DC-1 GHz aralığında, 0 dBm giriş gücünde, 4001 noktada, Keysight Technologies N5242 model Vektör Ağ Analizörü ile 2 port kalibrasyon yapılmıştır.



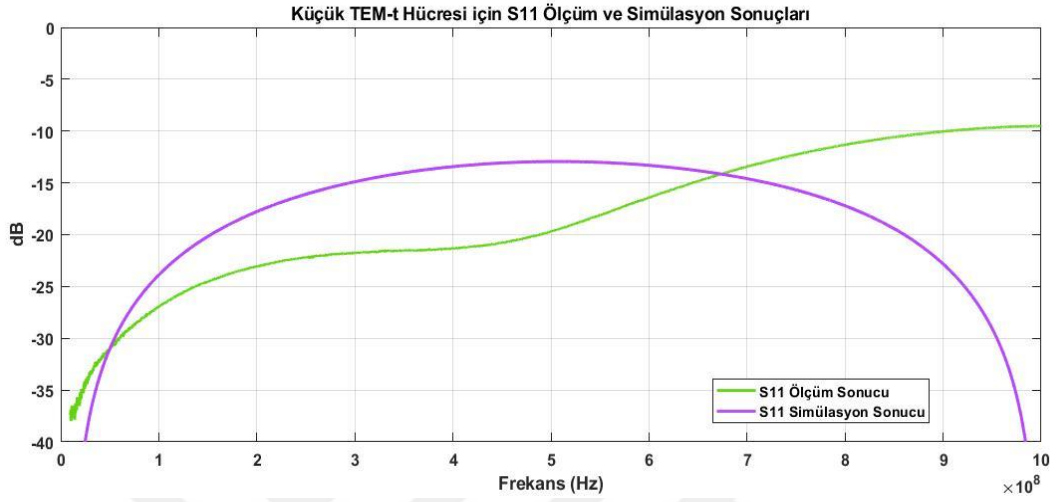
Şekil 5.11. Alüminyum bant ile kaplanmış iki TEM-t hücresinde iletim ve yansıma ölçümü.

Vektör Ağ Analizöründen elde edilen “.s2p” dosyaları verileri MATLAB programı ile anlamlı bir veri dizisine dönüştürülmüş; elde edilen S11 giriş geri dönüş kaybı ve S21 araya girme kayıpları her iki TEM-t hücresi için Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de grafikleştirilmiştir.

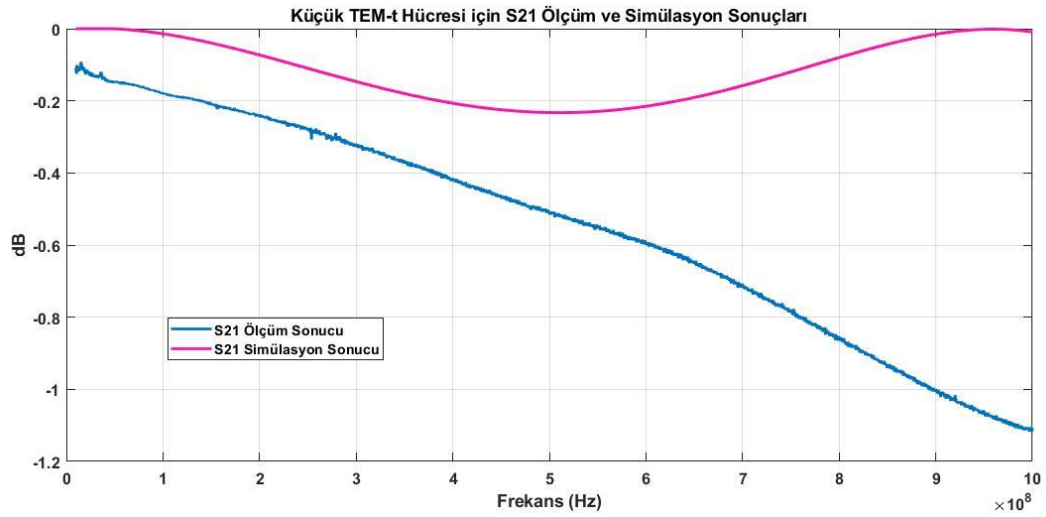
Ayrıca burada kıyaslama amacıyla büyük ve küçük TEM-t hücresinin CST Studio Suite programı üzerinden elde edilen S-parametre simülasyon sonuçları da verilmiştir.

Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 küçük TEM-t hücresi için S11 ve S21 sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5.12’de verilen S11 grafikleri, malzeme yüksüz durum için tasarımı ve üretimi yapılan TEM-t hücresinin bir iletim hattı olarak bant boyu -10 dB’nin altında geri dönüş kaybı olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5.13’te verilen S21 araya girme kayıpları ise literatürdeki örnekler ile uyumlu olup [1, 7, 27], bant sonuna doğru maksimum -1 dB’ye yakın değerlerde çıkmaktadır. Bunun da TEM hücresinde araya

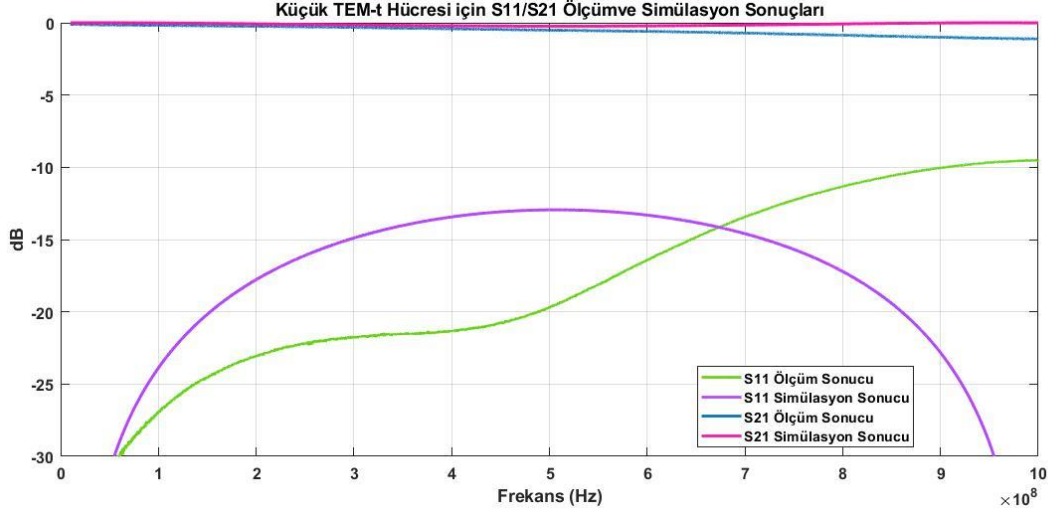
yerleştirilen düzlemsel malzeme sonrası hücre yarılarının açık devre görmesi, kullanılan SMA konektör kaybı ve kaplama sırasında oluşmuş olabilecek kaplama hatalarına bağlı olarak ortaya çıktığı söylenebilir.



Şekil 5.12. Küçük TEM-t hücresinde S11 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.



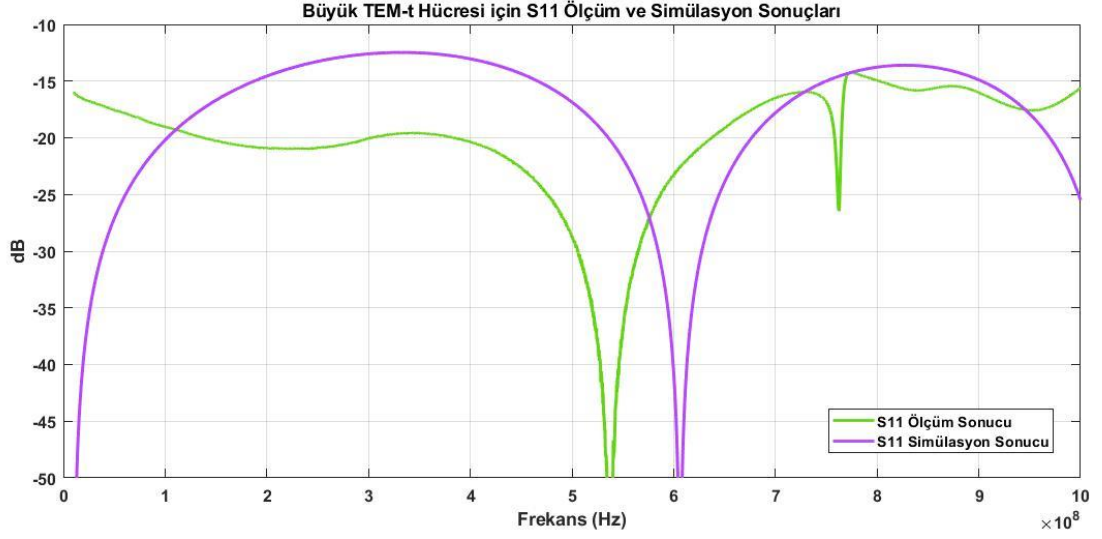
Şekil 5.13. Küçük TEM-t hücresinde S21 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.



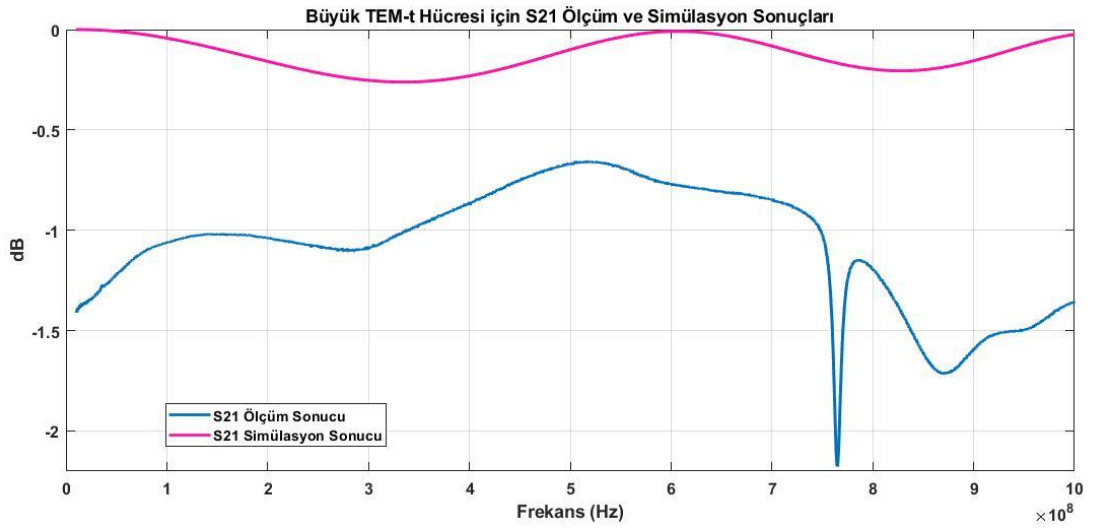
Şekil 5.14. Küçük TEM-t hücresinde S11/S21 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.

Büyük TEM-t hücresi için ise simülasyon ve ölçüm sonuçları grafikleri Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de verilmiştir. Şekil 5.15’teki S11 grafiği incelendiğinde geri yansıma değeri için simülasyonda gözlemlenen dip noktasının, ölçüm adımı da hala var olduğu ve 700-800 MHz kadar kaydığı gözlemlenmiştir. Bu durum Bölüm 4.2.1.2’de detaylıca verilmiştir. Şekil 5.15’te verilen S11 ölçüm sonucunun da yine literatürdeki çalışma örnekleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmektedir [1, 7, 27, 30]. S11 ölçüm eğrisi incelendiğinde özellikle bant başında ilk 500 MHz boyunca -15 dB/-20 dB’nin altında değerler elde edilmiştir.

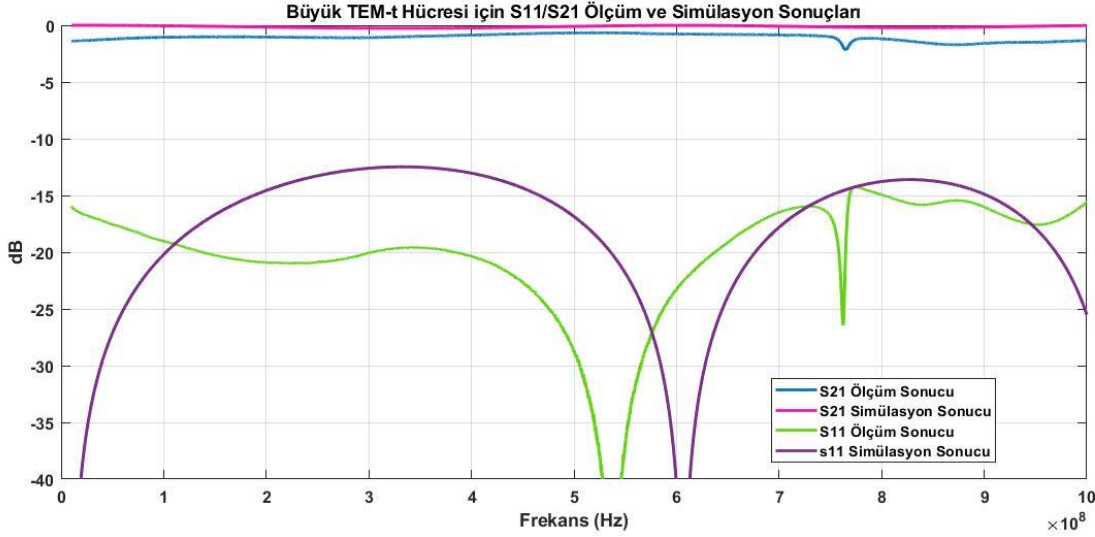
Büyük TEM-t hücresi için Şekil 5.16’daki S21 grafikleri incelendiğinde ise ölçüm ve simülasyon sonuçları arasında bant boyu ortalama 1 dB fark olduğu gözlemlenmektedir. Burada dikkat çeken başka bir durum ise ölçüm sonuçlarında ortaya çıkan tek frekanstaki rezonans noktasıdır. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da 750 MHz civarında enerjinin farklı bir moda geçerek depolandığı ve o tek noktada farklı bir iletim karakteristiği olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin üretim toleransından, kaplama sırasında oluşan hatalara bağlı olarak eş gerilim noktalarının kaybolmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Aynı durumun küçük TEM hücresinde oluşmaması, yapıların büyüdükçe rezonans modların daha fazla ortaya çıkıyor olması olarak açıklanabilir (Bknz. Formül 4.2).



Şekil 5.15. Büyük TEM-t hücresinde S11 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.



Şekil 5.16. Büyük TEM-t hücresinde S21 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.



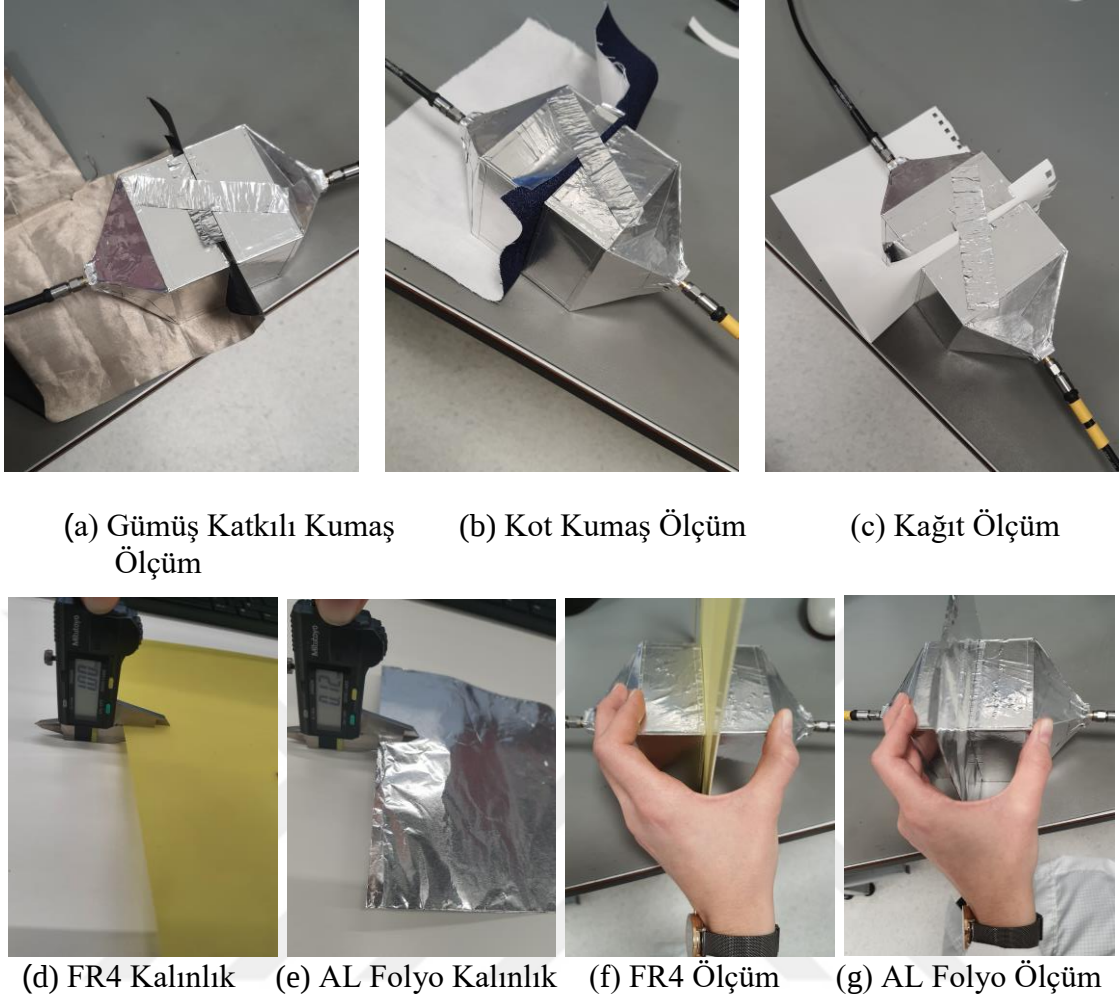
Şekil 5.17. Büyük TEM-t hücresinde S11/S21 Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları.

Gerçek ölçümlerde üretim toleransları, kaplama kalitesi, konektör bağlantı doğruluğu gibi nedenlerle simülasyon değerlerinden daha fazla kayıp ve daha fazla geri yansıma oluşması beklenmektedir. Bu yaklaşımla uyumlu olarak elde edilen ölçüm ve simülasyon grafikleri yüksüz durumda her iki TEM-t hücresinin de ilgili bant boyunca uygun bir iletim hattı karakteristiği gösterdiğini ve düzlemsel malzemelerin ekranlama etkinliği ölçümü için kullanılabilir olduğunu göstermektedir [1, 7, 27].

5.2.3. Malzeme Karakteristiği Ölçümleri

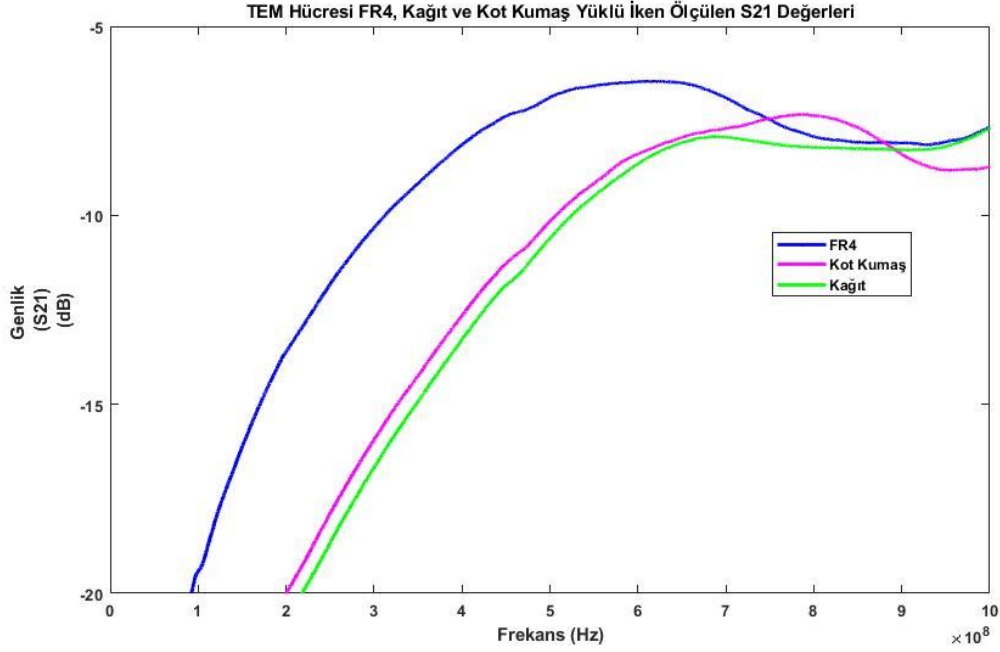
Bu aşamada üretilip kaplanan, boş halde performansı doğrulanan küçük boyutlu TEM-t hücresi kullanılarak çeşitli malzemeler için ekranlama etkinliği ölçümleri hem simülasyon ortamında hem gerçek ölçüm yapılarak incelenmiştir. Küçük TEM-t hücresinin ebatsal olarak kullanımı daha uygun bulunduğundan bu ürün ile devam edilmiştir.

Teoride ekranlama etkinliği ölçümü için yüklü ve yüksüz durumda ölçümler alınıp fark değeri hesaplanmalıdır. Burada TEM-t hücresinin yüksüzken elde edilen kayıp değeri oldukça küçük olduğundan (ortalama 1 dB) ihmal edilmiş, direkt yüklü hali referans alınarak ekranlama performansı bu değer üzerinden değerlendirilmiştir.



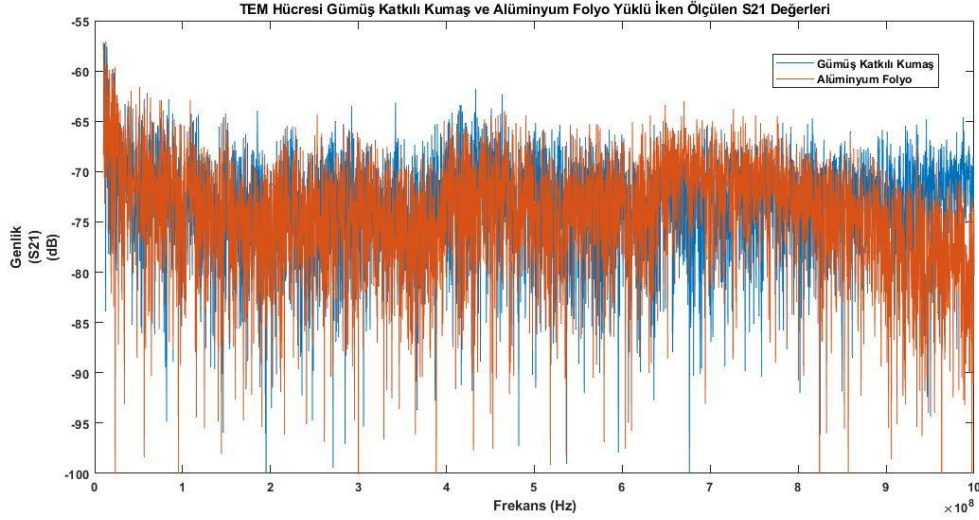
Şekil 5.18. TEM-t hücresinin çeşitli malzemeler ile yüklenmesi.

Vektör Ağ Analizör'ü ile yapılan ölçümler sonucunda teorik olarak beklenen sonuçlara uyumlu grafikler elde edilmiştir. Şekil 5.19'da görülebileceği gibi kot kumaş, FR4 ve kâğıt ölçümleri bant boyu birkaç dB kayıp yaratmakta yani gelen sinyali yansıtmakta yetersiz kalmaktadır. Kâğıdın bağıl dielektrik katsayısı $\epsilon_r = 2.31$ olup yalıtkandır, dolayısıyla burada malzemenin bir ekranlama sağlaması beklenmemektedir. Elde edilen sonuç da bu yaklaşımla tutarlı görünmektedir. Aynı yaklaşım kot kumaş ve FR4 için de geçerli olup burada da iyi bir ekranlama beklemek anlamlı değildir. Aynı zamanda ölçüm sonuçları, Şekil 4.45'teki septum dahil iken yapılan simülasyon sonuçları grafiği ile benzer frekans tepkisi göstermektedir. Oluşan kayıp değerlerinin canlı hattın bölünmesinden ve ortaya çıkan endüktanstan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.19. TEM-t hücresi 3 farklı yalıtkan malzeme ile yüklü iken ölçülen S21 değerleri.

Ancak durum iletken özellik gösteren bir malzemenin ölçümüne geldiğinde yaklaşım değişmelidir. Burada elde edilen ölçümlerde S21 karakteristiği üzerinde gördüğümüz maksimum kayıp bize ekranlama için kullanılabilir özellikte malzeme seçimi için bilgi vermektedir. TEM hücresinin tam ortasına iletken bir malzeme koymak canlı uç görevi üstlenen septum ile dış toprak plakalarını birbirine kısa devre edilmesi anlamına gelir. Şekil 5.20’de gümüş katkılı malzeme ve alüminyum folyo ölçümlerinden görülebileceği gibi her ikisinden de minimum 55-60 dB kayıp elde edilmiştir. Bu durum bize kullanım alanına, ekranlama etkinlik yeterliliğine bağlı olarak tercihen bu malzemelerin ekran malzemesi olarak kullanılabilir olduğunu işaret etmektedir. Sonuçların gürültülü oluşunun ise canlı hattın toprak ile kısa devre oluşu ve ortaya çıkan kapasitanstan kaynaklandığı düşünülmektedir.



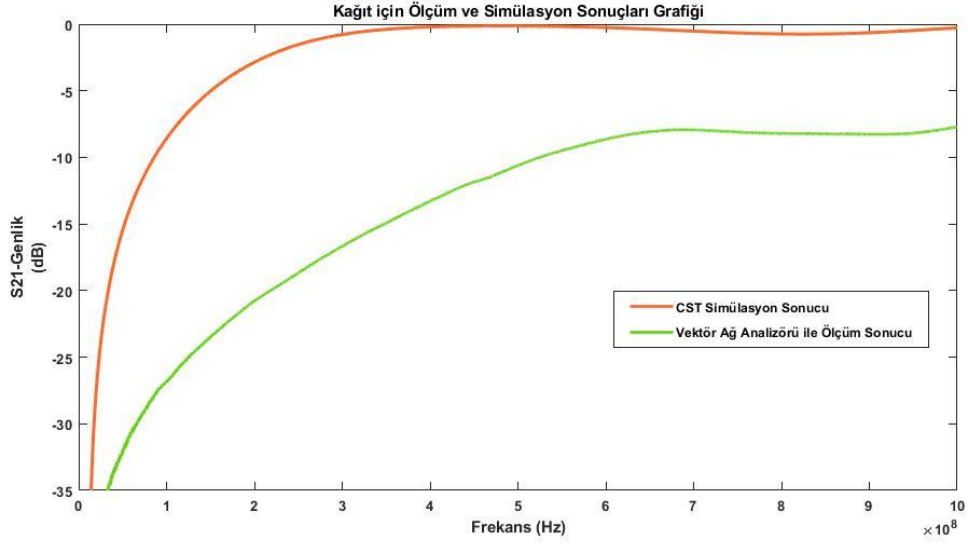
Şekil 5.20. TEM-t hücresi 2 farklı iletken malzeme ile yüklü iken ölçülen S21 değerleri.

Bir başka açıdan ölçümleri değerlendirmek için ise malzeme yüklü TEM-t hücresi için ölçüm ve simülasyon sonuçlarının kıyaslaması yapılmıştır. Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de kâğıt ve FR4 yüklü hücre ölçümü için simülasyon ve ölçüm sonuçları aynı grafikte toplanmıştır. Burada beklenen bölüm 5.2.1’de de anlatıldığı gibi gerçek ölçüm kayıplarının simülasyona göre daha fazla olmasıdır. Kâğıt için ölçülen S21 kayıp değeri bant boyu maksimum 5.5 dB-6 dB; FR4 için ise bant boyu maksimum 4 dB civarındadır. FR4 için elde edilen ölçüm sonucu hesaplamalar ile elde edilen S21 sonucu (Formül 4.15) ile tutarlı görünmektedir. Aynı hesaplamayı kâğıt için de yaptığımızda 2 dB teorik kayıp gözlemlenmesi beklenmektedir (Formül 4.16).

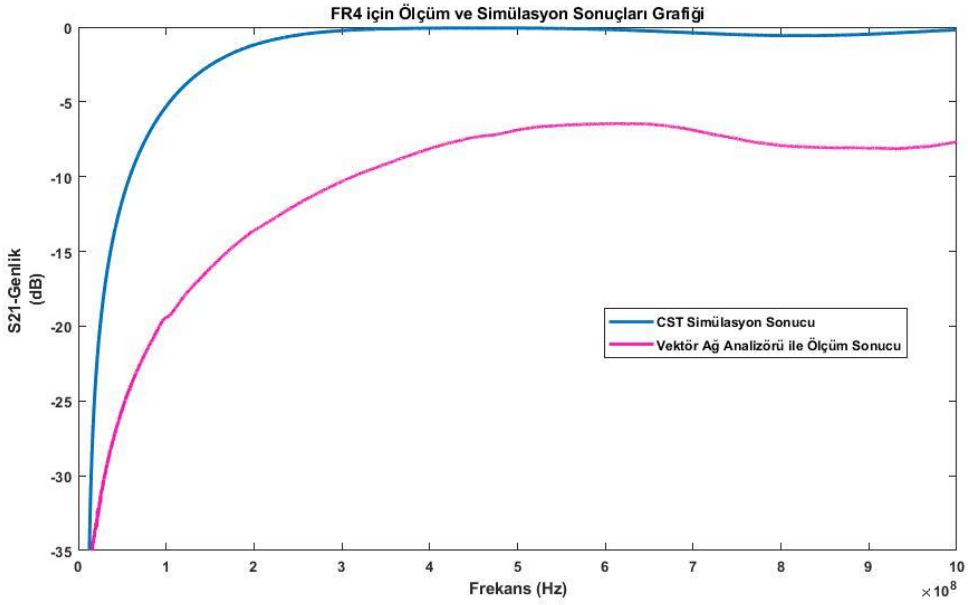
$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{2 \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}}}{\frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} + \eta_0} = \frac{2}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} = \frac{2}{1 + 1.51} = 0.794 \quad (4.16)$$

$$20\log_{10}(0.794) = -2.00 \text{ dB}$$

Gerçek ölçümler sırasında ortaya çıkan ekstra kayıpların üretilen TEM-t hücresinin toleransına bağlı olarak karşılıklı örtüşme zafiyetinden, SMA konektörün bağlantı hassasiyetinden, septumun hücre içindeki muhtemel kayıklığından gibi sebeplerle ortaya çıkabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 5.21. 100 mikron kalınlığında kâğıt yüklü TEM-t hücresi için ölçüm ve simülasyon sonuçları.



Şekil 5.22. 1mm kalınlığında FR4 yüklü TEM-t hücresi için ölçüm ve simülasyon sonuçları.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Sunulan tez çalışması kapsamında TEM hücrelerinin tasarım ve üretim süreçlerini optimize edebilmek amacıyla çeşitli simülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmada temel olarak açık ve kapalı forma sahip TEM hücresinin alt-üst toprak plaka eğimlerinin ve canlı uç görevi gören septum plakasının boyutsal değişiminin hücrenin temel iletim karakteristiği ile olan bağlantısı incelenmiştir. Ayrıca giriş-çıkış port optimizasyonu için çeşitli port denemeleri yapılarak 18 mil seal (canlı uç) modellenmiş, portlar SMA adaptör modeline uygun şekilde adapte edilmiştir. Elde edilen sonuçlar hücrenin yansıma ve iletim performansını ifade eden S-Parametre değerleri ışığında değerlendirilip, en yüksek performansa sahip optimal tasarımın üretimi yapılmıştır. Üretim sürecinin kolaylık ve maliyet etkisi de göz önünde bulundurularak Raise 3D Pro Plus marka 3 boyutlu yazıcıda aynı PLA malzemesi kullanılarak 3 farklı boyutta ürün üretimi yapılmıştır. Kullanılan PLA filamentler yine Raise 3D firmasının ürettiği yüksek kalite plastiklerdir. Bir sonraki aşamada kaplama prosesleri üzerine yoğunlaşıp, temelde 3 farklı kaplama yöntemi denenmiştir. İlk kaplama yöntemi olan Fiziksel Buhar Biriktirme yönteminde Vaksis Micks cihazında kupon ürünler bakır ile kaplanıp yüksek iletkenlik gösterebilmesine rağmen malzeme karakteristiği gereği boyutsal değişime uğramıştır. Bu yöntem ile devam edilemeyeceği değerlendirilip ikinci yöntem olan alüminyum bant ile kaplama yöntemi denenmiştir. Bu denemede ilk olarak görece $\frac{1}{2}$ oranında daha büyük kapalı TEM-t hücresi seçilmiş, hem boyutu hem de bantın kullanım kolaylığı sağlaması sebebiyle hızlı ve kolay kaplama sağlanabilmiştir. Burada EMU/EMG laboratuvarlarında sıklıkla tercih edilen Parker marka yüksek iletkenlik/düşük yüzey direnci özellikli özel bir bant tercih edilmiştir. Nihai ürünün Vektör Ağ Analizörü ile yapılan S-Parametre ölçümlerinde ise simülasyon sonuçları ile tutarlı yansıma ve iletim özelliği sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen ürün düşük iletim kaybına, aynı zamanda düşük yansıma özelliğine sahiptir. Bir sonraki adımda ise görece $\frac{1}{2}$ oranında küçük ancak birebir fiziksel özelliklere sahip kapalı TEM-t hücresi bakır folyo ve çift taraflı bant kullanılarak kaplanmıştır. Burada Holders Technology firmasının üretimi olan 18 mikron kalınlığında bakır folyo kullanılmıştır. Hücre boyutu ve folyo-bant kullanımı gereği alüminyum kaplanan hücreye göre üretim süreci daha uzun sürmüştür. Multimetre ile gövdeden alınan bazı omaj ölçümlerinde yüksek değerlere rastlanmıştır. Bu durumun kullanılan çift taraflı bantın yalıtkanlık katması ve çok ek parça ile kaplama yapma kaynaklı olabildiği düşünülmüştür.

Bir sonraki adımda bakır folyo ile kaplanan küçük ebatlı hücrenin ölçülecek düzlemsel malzemeler için de daha pratik olacağı düşünüldüğünden aynı boyutta ancak yine EMU/EMG uygulamalarına özel seçilen yüksek iletkenlik özelliği gösteren Parker marka alüminyum bant ile kaplanmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu özelliklerde yeni bir hücre üretimi yapılmıştır. Ölçümler canlı hattın uzunluğu ve dolayısıyla kaybı azaldığından bu ürünün 2 kat büyük ebatlı TEM-t hücresinden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ölçülecek tüm düzlemsel malzemeler için bu yapının kullanılmasına karar verilmiştir.

Paralelde ise TEM-t hücrelerinde düzlemsel malzemelerin iletim hattına olan etkisi incelenmiştir. 3 farklı yöntem için simülasyon çalışılıp; ilkinde septum hariç tutularak hücrenin yarısına kadar yükleme yapılmış, ikincide septum hariç tutularak tam yükleme yapılmış, sonuncusunda ise septumu da katarak yükleme yapılarak sonuçlar incelenmiştir.

Çalışmanın son aşamasında ise düzlemsel bazı malzemelerin üretilen TEM-t hücresine yüklenmesi ile malzeme tanıma ve karakterize etme adımına geçilmiştir. Bu nokta bu tez çalışması kapsamında yapılan tüm araştırma, üretme ve öğrenme adımlarının en can alıcı adımını temsil etmektedir. Elde edilen düşük maliyetli ve yüksek performanslı TEM-t hücresinin malzeme yüklü iken gösterdiği performans, yani S-parametrelerindeki değişim, ölçüm malzemesinin ne kadar yansıtıcı ya da ne kadar geçirgen özellikte olduğunu ortaya koymaktadır.

TEM-t hücresi yüksüzken bant boyunca kabaca 0.5-1 dB arasında değişen bir kayıp karakteristiği göstermektedir. Buradan hareketle malzeme yüklü iken ölçülen kayıp (S₂₁) değerinin her bir frekans noktasına karşılık gelen değerinin, hücre yüksüzken karşılık gelen S₂₁ kayıp değeri (0.5-1 dB) arasındaki fark bize malzemenin kaç dB kadar RF sinyali zayıflattığı bilgisini vermektedir. Bu yöntem sayesinde ekran malzemesi olarak kullanılacak düzlemsel yapıların seçimi kolaylıkla yapılabilmektedir.

İlerleyen çalışmalarda, başta ürettiğimiz plastik TEM-t hücresinin bağlantı ve ölçüm zafiyetlerini gidermeye yönelik çalışmalar yapılabilir. Ürünün plastik malzeme ile üretiminden kaynaklı hafif oluşu Vektör Ağ Analizör'ü ile yapılan ölçümlerde bağlantı ve tutuşta zorluklar ortaya koymuştur. Ek olarak özellikle septumun literatürdeki örneklerde olduğu gibi giriş-çıkış portu ile bütünsel olarak üretilmemesi ya da SMA konektörün canlı ucunun septuma lehimlenememesi ölçümler sırasında en temel üretim problemini oluşturmuştur.

Başka bir bakış açısından ileriki bir çalışmada hücrelerin iç kısmına TEM modundaki iletimi arttırmak için RF emici malzemeler yerleştirilebilir. Emici malzemeler, yüksek mertebe modlarının iletiminin engellenmesini ve dolayısıyla kesim frekansının yükselmesini sağlar. Ayrıca başka bir alternatif olarak açık TEM hücresinde etkinlik çalışması yapılabilir. Burada ortaya çıkan yansıma ve iletim kayıpları iyileştirme üzerine yoğunlaşılabilir. Kaplama malzemesi olarak spreyci iletken boya gibi farklı yapılar değerlendirilebilir. Maliyet düşürücü farklı yöntemler kıyaslanabilir ya da kullanım kolaylıklarına yönelik çözümler çalışılabilir. Ayrıca yakın zamanda ortaya konulan yarı-analitik modeller ile eğimli septum tasarımı çalışılarak septum optimizasyonu üzerinde durulabilir [30].

7. KAYNAKLAR

- [1] K. Satyaprasad, P. Siva Kumar and N. Deepika Rani, Design and Validation of Transverse Electromagnetic (TEM) Cell for Measurement of Pulsed Transients, Springer Nature Singapore Pte Ltd. G. Panda et al. (eds.), Microelectronics, Electromagnetics and Telecommunications, Lecture Notes in Electrical Engineering 521, **2019**.
- [2] P. L. Kotwal, G. Verma and Dr. P. K. Katti, Effect of Electromagnetic Compatibility and Interference on Electrical Gadgets, International Journal of Management, Technology And Engineering, **2018**.
- [3] S. Kayık, Düzlem Malzemelerin Ekranlama Özelliklerinin Ölçümü için TEM Hücre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2018**.
- [4] T. M. Ilgar, Üzerinde Açıklık Bulunan Yapıların Ekranlama Etkinliği Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2015**.
- [5] Standards Committee of the IEE Electromagnetic Compatibility Society, MIL- STD-285, IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures, IEEE, **1956**.
- [6] A. Tamburrano, D. Desideri, A. Maschio, Coaxial Waveguide Methods for Shielding Effectiveness Measurement of Planar Materials Up to 18 GHz, IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no. 6, **2014**.
- [7] A.A. Takach, F. Ndagijimana, J. Jomaah, M. Al-Husseini, 3D-Printed Low-Cost and Lightweight TEM Cell, 2018 International Conference on High Performance Computing & Simulation, 16-20 July, Orleans, France, **2018**.
- [8] CST Studio Suite, Dassault Systemes, **2022**.
- [9] MATLAB R2019b, Massachusetts: The MathWorks Inc., **2019**.
- [10] R. Armstrong, Measurement Of Shielding In Electrically Large Metallic Enclosures, Doctoral Thesis, Department of Electronics, University of York, February, **2013**.
- [11] R. Paul Clayton, Introduction to Electromagnetic Compatibility, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, **2006**.
- [12] P. F. Wilson, T. MA. Mark, Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials : Part-1 Far Field Source Simulation, IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, vol. 30, no. 3, 239- 250, **1988**.
- [13] H. W. Ott, Noise Reduction Techniques In Electronic Systems, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, **1988**.
- [14] C.Yıldız, F. Çalışkan Frühling, G. Demirel, Designing Transverse Electromagnetic (TEM) Cell, The Third International EMC Conference, İstanbul, Turkey, **2015**.

- [15] U. Lundgren, Characterization of Components and Materials for EMC Barriers, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology Department of Computer Science and Electrical Engineering Division of EISLAB, **2004**.
- [16] Standards Committee of the IEE Electromagnetic Compatibility Society, IEEE Std 299-1997, IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures, IEEE, **1997**.
- [17] X. Wang, X. Kong, S. Jiang, L. Kong, W. Lin, B. Bian, A Wideband Open TEM cell to Measure the Frequency Response of a Frequency Selective Surface, IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology, **2020**.
- [18] J. P. Quine, Characterization and Testing of Shielding Gaskets at Microwave Frequencies, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 09-13 August, Dallas, TX, USA, **1993**.
- [19] V. Agarwal, M. S. Sandeep, Do It Yourself Fabrication Of An Open TEM Cell For EMC Pre-compliance, IEEE Transactions, 66-71, **2008**.
- [20] M. L. Crawford, Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. Emc-16, no. 4, November, **1974**.
- [21] P. F. Wilson, T. MA. Mark, Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials : Part-2 Near Field Source Simulation, IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, vol. 30, no. 3, 251-259, **1988**.
- [22] G. R. Rani, Dr. G.S.N. Raju, Transmission and Reflection Characteristics of Electromagnetic Energy in Biological Tissues, International Journal of Electronics and Communication Engineering, ISSN 0974-2166 Volume 6, Number 1, pp. 119-129, **2013**.
- [23] M. Koohestani, M. Ramdani, P. Besnier, J. Levant, R. Perdriau, Perturbations of Electric and Magnetic Fields Due to the Presence of Materials in TEM Cells, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol 62, No 4, August **2020**.
- [24] H. Spiegelhaar, E. V. Heyden, The Mode Stirred Chamber- A Cost Effective EMC Testing Alternative, Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 14-18 August, Atlanta, GA, USA, **1995**.
- [25] H. Rahman, P. K. Saha, J. Dowling, T. Curran, Shielding Effectiveness Measurement Techniques For Various Materials Used For Emi Shielding, IEE Colloquium on Screening of Connectors, Cables and Enclosures, 17 January, London, UK, **1992**.
- [26] U. Lundgren, Analysis of Printed Antenna Structures using the Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) Method, Lulea University of Technology Department of Computer Science and Electrical Engineering Division of EISLAB, **2001**.
- [27] C. Iftode, S. Miclaus, Design and Validation of a TEM Cell Used for Radiofrequency Dosimetric Studies, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 132, 369-388, **2012**.

- [28] S. Geetha, K. K. Satheesh Kumar, R. K. Rao Chepuri, EMI Shielding: Methods and Materials-A Review, Wiley Interscience, **2009**.
- [29] J. C. Tippet, D. C. Chang, Radiation Characteristics Of Dipole Sources Located Inside a Rectangular Coaxial Transmission Line, Electromagnetic Division Institute for Basic Standards National Bureau of Standards Boulder Colorado, January, **1976**.
- [30] G. Giannetti, C. Spindelberger, H. Arthaber, Simple Semianalytical Septum Design for Improved Matching in Open TEM Cells, Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, Vol. 6, No. 1, March, **2024**.
- [31] V. Chechetkin, A. Korotkov, E. Golubenko, E. Sychugov, P. Smirnov, Investigation of the Characteristics of the TEM Cell Model, Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), **2019**.
- [32] S. Güler, S. Yenikaya, G. Yılmaz, Elektronik Ekipman Koruyucu Kutusunun Ekranlama Etkinliği Analizi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 25, Sayı 3, DOI: 10.17482/uumfd.749570, **2020**.
- [33] Y. Gu, Z. Zhou, M. Sheng, Design and Development of a TEM Cell up to 1 GHz, 6th Global Electromagnetic Compatibility Conference, **2020**.
- [34] K. Ma, Y. Hu, W. Wang, H. Niu, X. Tang, Y. Cui, Design of Radio-Frequency Electromagnetic Field Radiated Immunity Automatic Test System in GTEM Cell Based on Labview, 2nd Asia Symposium on Signal Processing (ASSP), **2021**.
- [35] M. Arezoomand, M. K. Meybodi, N. Noori, Design and Implementation of a TEM Cell with Piecewise Linear Tapering, International Journal of Information & Communication Technology Research, 1 March, **2017**.
- [36] K. Malaric, J. Bartolic, Design of a TEM-Cell with Increased Usable Test Area, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, TÜBİTAK Academic Journals, Vol: 11-No:2, **2003**.
- [37] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc, **2012**.
- [38] Pathwave RF Synthesis (Geneyss), Keysight Technologies **2021**.
- [39] M. Arezoomand, M. K. Meybodi, N. Noori, Design of a TEM Cell Using Both Multi-Step and Piecewise Linear Tapering, 8th International Symposium on Telecommunications, 27-28 September, **2016**.
- [40] Anonim, Raise 3D Pro3 Plus 3 Boyutlu Yazıcı, <https://www.raise3d.com/products/raise3d-pro3-plus-3d-printer/> (Erişim tarihi: 22 Temmuz 2024).
- [41] Anonim, Raise 3D Premium PLA 3 Boyutlu Yazıcı Filamenti, <https://www.raise3d.com/products/raise3d-premium-pla-filament/> (Erişim tarihi: 22 Temmuz 2024).

- [42] Anonim, Parker CCJ-18-201-200 Alüminyum Bant, <https://ph.parker.com/us/en/product/cho-foil-emi-shielding-foil-and-fabric-tape-with-conductive-adhesive/ccj-18-201-0200> (Erişim tarihi: 22 Temmuz 2024).
- [43] Anonim, Vaksis Micks FBB Vakum Proses Sistemi, <http://www.vaksis.com/?mod=detail&id=12> (Erişim tarihi: 22 Temmuz 2024).
- [44] Anonim, 3M 9088 - Çift Taraflı Bant, https://technicaldatasheets.3m.com/en_US?pif=410 (Erişim tarihi: 22 Temmuz 2024).
- [45] Anonim, Holders Technology 18 µm Bakır Folyo, <https://ww2.holderstechnology.com/wp-content/uploads/2014/11/ED-Copper-Foil-uk102010.pdf> (Erişim tarihi: 22 Temmuz 2024).
- [46] Anonim, Huber Suhner SMA Flanşlı Konektör, https://www.mouser.com.tr/ProductDetail/HUBER%2BSUHNER/23_SMA-50-0-21-111_NE?q=Cv1v43EOJprl0VShBHNlag%3D%3D (Erişim tarihi: 22 Temmuz 2024).

EKLER

EK 1 – Üretim Süreci Boyunca Kullanılan Cihaz ve Malzemeler

1. RAISE 3D PRO3 PLUS – 3 Boyutlu Yazıcı Teknik Özellikleri

Technical Specifications

Printer	Pro3		Pro3 Plus	
Build Volume (W × D × H)	Single Extruder Print	Dual Extruder Print	Single Extruder Print	Dual Extruder Print
	300 × 300 × 300 mm	255 × 300 × 300 mm	300 × 300 × 605 mm	255 × 300 × 605 mm
Machine Size (W × D × H)	620 × 626 × 760 mm		620 × 626 × 1105 mm	
Electrical	Power Supply Input Power Supply Output	100-240 V AC, 50/ 60 Hz 230 V @ 3.3 A 24 V DC, 600 W		
General	Print Technology	FFF		
	Print Head System	Dual-head with electronic lifting system		
	Filament Diameter	1.75 mm		
	XYZ Step Size	0.78125, 0.78125, 0.078125 micron		
	Print Head Travel Speed	30-150 mm/s		
	Build Plate	Flexible Steel Plate with BuildTak		
	Max Build Plate Temperature	120°C		
	Heated Bed Material	Silicone		
	Build Plate Leveling	Mesh-leveling with Flatness Detection		
	Filament Run-out Sensor	Available		
	Supported Materials	PLA/ ABS/ HIPS/ PC/ TPU/ TPE/ PETG/ ASA/ PP/ PVA/ Nylon/ Glass Fiber Infused/ Carbon Fiber Infused/ Metal Fill/ Wood Fill		
	Layer Height	0.01-0.25 mm		
	Nozzle Diameter	0.4 mm (Default), 0.2/ 0.6/ 0.8/ 1.0 mm (Available)		
	Max Nozzle Temperature	300°C		
	Connectivity	Wi-Fi, LAN, USB port, Live camera		
	Noise Emission (Acoustic)	< 55 dB (A) when building		
	Operating Ambient Temperature	15-30°C, 10-90% RH non-condensing		
Storage Temperature	-25°C to +55°C, 10-90% RH non-condensing			
Filter	HEPA filter with activated charcoal			
EVE Smart Assistant	Available			
Software	Slicing Software	IdeaMaker		
	Supported File Types	STL/ OBJ/ 3MF/ OLTP		
	Supported OS	Windows/ macOS/ Linux		
	Machine Code Type	GCODE		
Printer Controller	User Interface	7-inch Touch Screen		
	Network	Wi-Fi, Ethernet		
	Power Loss Recovery	Available		
	Screen Resolution	1024 × 600		
	Motion Controller	Atmel ARM Cortex-M4 120MHz FPU		
	Logic Controller	NXP ARM Cortex-A9 Quad 1 GHz		
	Memory	1 GB		
	Onboard Flash	16 GB		
	OS	Embedded Linux		
	Ports	USB 2.0 × 2, Ethernet × 1		



enquiry@raise3d.eu

www.raise3d.eu

Stationsplein 45 Unit A4.004 3013AK Rotterdam, the Netherlands

2. RAISE 3D PREMIUM PLA – 3D Yazıcı PLA Filament Teknik Özellikleri

Raise3D Premium PLA Technical Data Sheet

Raise3D Premium PLA is a premium PLA designed for all desktop FDM/FFF printers. It ensures consistent extrusion and prevents nozzle jams.

Physical Properties¹

Property	Testing Method	Typical Value
Density (g/cm ³ at 21.5 °C)	ASTM D792 (ISO 1183, GB/T 1033)	1.2
Glass transition temperature (°C)	DSC, 10 °C /min	62.3
Vicat Softening temperature (°C)	ASTM D1525 (ISO 306 GB/T 1633)	62.7
Melt index (g/10 min)	210 °C, 2.16 kg	6.0
Melting temperature (°C)	DSC, 10 °C/min	150.9

Note:

Tested with 3D printed specimen of 100% infill.

Mechanical Properties¹

Property	Testing Method	Typical Value
Young's modulus (MPa, X - Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	2681 ± 215
Tensile strength (MPa, X - Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	40 ± 1
Elongation at break (% , X - Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	2.5 ± 0.6
Bending modulus (MPa, X - Y)	ASTM D790 (ISO 178, GB/T 9341)	2700 ± 154
Bending strength (MPa, X - Y)	ASTM D790 (ISO 178, GB/T 9341)	68 ± 2
Impact strength (KJ/m ² , X - Y)	ASTM D256 (ISO 179, GB/T 1043)	13.4 ±1.2
Tensile strength (MPa, Z)	ASTM D638 (ISO527, GB/T 1040)	36 ± 5
Young's modulus (MPa, Z)	ASTM D638 (ISO527, GB/T 1040)	2551 ± 335
Elongation at break (% , Z)	ASTM D638 (ISO527, GB/T 1040)	6.0 ± 2.4

Note:

All testing specimens were printed under the following conditions:



nozzle temperature = 210 °C, printing speed = 45 mm/s, build plate temperature = 25 °C, infill = 100%
All specimens were conditioned at room temperature for 24h prior to testing.

Recommended Printing Conditions¹

Parameter	Recommended Setting
Nozzle temperature (°C)	190 - 220
Recommended build surface	BuildTak®, Blue Tap
Build plate temperature (°C)	30-60
Model cooling fan	Turned on
Printing speed (mm/s)	30 - 70
Retraction distance (mm)	1 - 3
Retraction speed (mm/s)	30 - 60
Recommended environmental temperature (°C)	Room temperature - 45
Threshold overhang angle (°)	45
Recommended support materials	Raise3D Premium PVA
Other Comments	
Premium PLA can be printed under conditions similar to most other PLA filaments	

Note:

Based on 0.4 mm nozzle and ideaMaker. Printing conditions may vary with different nozzle diameters.



3. VAKSIS MICKS FBB Vakum Proses Sistemi

MiCKS

Homepage > Products > PVD Systems

Architectural Glass Coating System. Vaksis MiCKS platform is composed of prismatic vacuum chambers and involve the magnetron sputtering technique on glass panes or large wafers. It is mostly used for low-e coatings, anti-reflection coatings, electrochromic coatings, transparent conductive oxide coatings, nitride resistors, high conductivity coatings, etc.

Technical Specifications

Other

Ultimate Vacuum Pressure	≤ 5x10 ⁻⁸ Torr
Substrate Size	up to 30x30 cm
Substrate Heating	max. 400°C
Cooling	Where necessary
Deposition Mode	Upward/Downward
Number of Sources	Up to 10
Loading	Using Load Lock Chamber
Control	Fully Automatic

4. PARKER CCJ-18-201-200 Alüminyum Bant Teknik Özellikleri

CHO-FOIL® and CHO-FAB® - Product Information

Table 1

PROPERTIES								
Property	Test Method	Typical Values						
		CHO-FOIL						CHO-FAB
Part Number Prefix	-	CCH	CCE	CCJ	CCK	CCD	CAD	CFT
Foil/Fabric Type	-	1 oz. RA Copper	1 oz. Embossed RA Copper	Aluminum	1 oz. Tin-Plated Copper	1 oz. RA Copper	Aluminum	Nickel-Plated Silver
Foil/Fabric Thickness, mils (mm)	-	1.4 (0.0354)	1.4 (0.0354)	2 (0.0508)	1.6 (0.0406)	1.4 (0.0354)	2 (0.0508)	5 (0.127)
Adhesive Type	-	Electrically Conductive, Pressure Sensitive Acrylic						
Adhesive Thickness, mils (mm)	-	1.5 (0.0381)				2 sides: 1.5 each (0.0381 each)		1.5 (0.0381)
Total Thickness, mils (mm)	-	2.9 (0.0737)	4* (0.1102)	3.5 (0.0889)	3.1 (0.0787)	4.4 (0.11180)	5 (0.127)	6.5 (0.165)
Temperature Range, °F (°C)	-	-40 to 400 (-40 to 205)						-40 to 250 (-40 to 121)
Electrical Resistance, ohms/in ² (ohms/cm ²)	MIL-STD-202C Method 303	<0.003 (<0.0005)	<0.003 (<0.0005)	<0.010 (<0.0016)	<0.003 (<0.0005)	<0.010 (<0.0016)	<0.010 (<0.0016)	<0.200 (<0.031)
Flame Resistance	UL 510	-	-	-	-	-	-	N/A
	UL 94 V-0	PASS	**MEETS	PASS	PASS	MEETS	MEETS	-
Adhesion to Aluminum oz./in. (ppil) (N/m)	ASTM D1000	>40 (2.5) (438)						
NASA Outgassing	ASTM E595	0.04(0.00)	0.09(0.00)	0.17(0.02)	0.11(0.02)***	Not Tested	Not Tested	1.44(0.02)
Shelf Life from Date Of Shipment when stored at 70°F ± 20 and 50% ± 20 relative humidity		2 years	2 years	2 years	2 years	2 years	2 years	2 years

* Embossing adds 1.1 mils

** Parker Chomerics internal test procedure

*** The CCK product is pure tin plated copper foil per ASTM B565, and may be subject to "Tin Whiskering".

Ordering Procedure:

Refer to Tables 2 and 3. All CHO-FOIL and CHO-FAB tapes are available in standard 18 yard (16.5 m) or 36 yard (32.9 m) rolls or die-cut custom configurations. Replace XX with 18 or 36 for length in yards. See table 3 for the code for WWW. Call Parker Chomerics Applications Engineering Group at 781 935 4850 for assistance with a custom configuration.

Table 2

PART NUMBER	TAPE DESCRIPTION	MAXIMUM ROLL WIDTH IN INCHES
CCH-XX-101-WWWW	Copper foil, conductive adhesive version	24
CCH-XX-301-WWWW	Copper foil, non-conductive adhesive version	24
CCE-XX-101-WWWW	Copper foil, conductive adhesive, embossed	12
CCJ-XX-201-WWWW	Aluminum foil, conductive adhesive	24
CCK-XX-101-WWWW	Tin plated copper foil, conductive adhesive	24
CCD-XX-101-WWWW	Copper foil, conductive adhesive 2 sides	12
CAD-XX-201-WWWW	Aluminum foil, conductive adhesive 2 sides	24
CFT-XX-101-WWWW	Ni/Ag taffeta fabric, conductive adhesive	24
CRS-XX-101-WWWW	Ni/Ag rip-stop fabric, conductive adhesive	17

CHO-FOIL® and CHO-FAB® - Product Information

Table 3

TYPICAL TAPE WIDTHS (WWWW) inch (mm)					
0050	0100	0150	0200	0300	0400
0.5 (12.7)	1.0 (25.4)	1.5 (38.1)	2.0 (50.8)	3.0 (76.2)	4.0 (103)

Custom widths available up to 24 inches (61 cm) except CFT which is up to 17 inches (43.18 cm).

Slit rolls are available through Parker Chomerics and their authorized distributors. [Order here.](#)

NOTE: The following table represents actual experimental test data taken according to Parker Chomerics internal test procedures. This data differs from Table 1 due to differences in test methods.

Table 4

TEST DATA									
Test	Test Method	CCH	CCE	CCJ	CCK	CCD	CAD	CFT	CRS
Initial Surface Resistivity (SR) (milliohms)*	CHO-TP-57***	<2	<2	<2	<2	N/A	N/A	<100	<100
Initial Through Resistivity (TR) (milliohms)*	CHO-TP-57***	<3	<3	<35	<2	<15****	<100****	<100	<100
Initial Peel Strength in oz./in. (ppi) (N/m)	ASTM D1000	44.8 [2.8] (490)	44.8 [2.8] (490)	51.2 [3.2] (560)	46.4 [2.9] (508)	48 [3] (525)	70.4 [4.4] (710)	44.8 [2.8] (490)	44.8 [2.8] (490)
Initial Taber Abrasion Surface Resistivity (SR) (milliohms)	CHO-TP-57***	<6	<3	<6	<9	N/A	N/A	<100	<100
Heat Aging 185°F (85°C)/ 168 hrs.	SR (milliohms)* TR (milliohms)* Peel, oz./in. (ppi) (N/m)**	CHO-TP-57*** CHO-TP-57*** ASTM D1000	<10 <16 57.6 [3.6] (630)	<2 <3 62.4 [3.9] (683)	<20 <22 76.8 [4.8] (840)	<2 <7**** 67.2 [4.2] (735)	N/A <60**** 73.6 [4.6] (805)	<100 <150 78.4 [4.8] (840)	<100 <150 59.2 [3.7] (648)
Heat Aging 250°F (121°C)/ 168 hrs.	SR (milliohms)* TR (milliohms)* Peel, oz./in. (ppi) (N/m)**	CHO-TP-57*** CHO-TP-57*** ASTM D1000	<10 <70 57.6 [3.6] (630)	<3 <3 59.2 [3.7] (648)	<20 <23 75.2 [4.7] (823)	<2 <2 51.2 [3.2] (560)	N/A <3**** 70.4 [4.4] (770)	<100 <150 84.8 [5.3] (928)	<100 <150 43.2 [2.7] (473)
Heat Aging Humidity 95% RH/ 185°F (85°C)/	SR (milliohms)* TR (milliohms)* Peel, oz./in. (ppi) (N/m)**	CHO-TP-57*** CHO-TP-57*** ASTM D1000	N/A N/A N/A	N/A N/A N/A	N/A N/A N/A	<2 <2 78.4 [4.9] (858)	N/A <115**** 78.4 [4.9] (858)	N/A <150**** 84.8 [5.3] (928)	<100 <150 46.4 [2.9] (508)
Salt fog corrosion/ 168 hrs.	SR (milliohms)* TR (milliohms)* Peel, oz./in. (ppi) (N/m)**	CHO-TP-57*** CHO-TP-57*** ASTM D1000	N/A N/A N/A	N/A N/A N/A	N/A N/A N/A	<2 <2 76.8 [4.8] (840)	N/A <275**** 62.4 [3.9] (683)	N/A <600**** 80 [5] (875)	<100 <1000 33.6 [2.1] (368)
Tabor abrasion 500 gram weight, CS-10 wheel, 500 cycles	SR (milliohms)*	CHO-TP-57***	<3	<5	<2	<6	N/A	N/A	<175

N/A = Not Applicable

*All measurements of surface resistivity made at ambient temperature with tapes mounted on tinned copper substrate, except for taber abrasion where a plastic substrate was used.

** 90° peel strength tests were done on an Instron at 2 inches per minute with tapes on a 2024 aluminum substrate.

*** CHO-TP-57 available from Chomerics on request.

**** Through resistivity measurements of double sided adhesive tapes done with tapes Ranged between 2024 aluminum substrates.

parker.com/chomerics

CHOMERICS and CHO-FOIL and CHO-FAB is a registered trademark of Parker Hannifin Corporation. © 2022

CHOCS1011 July 2022



ENGINEERING YOUR SUCCESS.

5. HOLDERS TECHNOLOGY - 18 µm Bakır Folyo Teknik Özellikleri

— Holders Technology —

ED Copper Foil

Product description

ED Copper foil is a high purity IPC Grade 3 electrodeposited HTE copper foil.

The outer face of the foil is semi-matt and the inside surface is matt grey. This side has been specially treated to optimize adhesion to Pre-Preg. The foil is coated with a chemical anti-tarnish finish to protect the surfaces against oxidation and corrosion.

Application

ED Copper foil is used for foil lamination of multilayer printed circuit boards.

The enhanced elongation property of CIMCU copper foil is beneficial for thermal reliability of multilayer designs.

Ordering information

ED Copper foil is available from Holders in standard thicknesses of 18, 35 and 70 µm. Other thicknesses and/or copper foil types are available on request.

ED Copper foil is supplied in production ready cut panels to customers requirements, in packs of 100 pieces.

It can also be supplied, on request, according to customers requirements, with punched tooling holes as required and packaged "shiny-shiny" rather than stacked.

Product characteristics ED Copper Foil

Parameter	Unit	Product			IPC	
		18 μm	35 μm	70 μm	Specification IPC 4562	Test method IPC TM-650
Copper Content	%	99,8	99,8	99,8	-	-
Area weight	oz/ft²	1/2	1	2	(a) 1.2.5, table1-1	2.2.12
	g/m²	145 - 153	285 - 295	575 - 585	(b) 3.4.4	
Copper roughness [R _a]	μm	0,2 - 0,4			3.5.6	2.2.17
	μ.inch	8,0 - 16,0				
Treatment roughness [R _a]	μm	6,0 - 8,0	7,0 - 10,0	9,0 - 12,0	3.4.5	2.2.17
	μ.inch	236 - 315	276 - 394	354 - 472		
RT Tensile Strength [Transverse at RT]	Kg/mm²	32 - 40			3.5.2	2.4.18
HT Tensile Strength [Transverse at 180 °C]	Kg/mm²	> 20			3.5.1	2.4.18
RT Elongation [Transverse at RT °C]	%	3 - 10			3.5.3	2.4.18
HT Elongation [Transverse 180 °C]	%	3 - 10			3.5.3	2.4.18
Peel Strength (RT) on FR-4 ⁽¹⁾	kg/cm²	> 1,4	> 1,8	> 2,1	3.5.4	2.4.8
Anti-Oxidant	-	Good	Good	Good	-	-

⁽¹⁾ Construction with a thickness of ≥ 0,5 mm

The above statements are based on our present knowledge. Our statements should not be interpreted as a guarantee of characteristics. The use of our products by our customers is subject to a variety of conditions, therefore each user of the material should make his own tests to determine the material's suitability for his own particular use. No liability for consequential damage will be accepted in any case. This data-sheet replaces any previous data sheets.

ED COPPER FOIL-UK Revision: October 2010

6. 3M 9088 - Çift Taraflı Bant Teknik Özellikleri



Double sided adhesive tape 9088-200

Product Data Sheet

April 2015

Supersedes: January 2015

Product Description

Double sided adhesive tape with polyester carrier
Modified acrylic adhesive

Key Features

- High adhesion to nearly every high and low surface energy substrates
- High initial tack
- All purpose tape
- Good UV resistance
- High shear and temperature resistance
- Easy handling and converting due to polyester carrier

Application ideas

- Self-adhesive mounting of furniture trim, sealing profiles and cable ducts.
- Bonding and mounting of sales displays and billboards.
- Fixing of decorative trims and emblems.

Construction

Adhesive	Modified Acrylic
Adhesive side open face ¹	0,094 mm
Carrier	PET 0,012 mm, transparent
Adhesive back side ²	0,094 mm
Total thickness without liner	0,20 mm
Liner	Glassine paper (94g/m ²) 0,08 mm, white

¹The open face side is visible, when unwinding the roll.

²The back side is visible after removal of the liner.

Callipers are average values.

Calculation of the adhesive calliper is based on an average density of 1.012 g/ cm³.

Temperature resistance	Short term (minutes, hours): 150°C
	Long term (days, weeks): 90°C

Physical properties and performance characteristics

Adhesion to stainless steel acc. to Finat FTM1 (after 72 h at room temp, angle: 180°, Haul-off speed: 300 mm/min., 05 mm PET-Film)	11.5 N/cm
Adhesion to ABS acc. to Finat FTM1 (after 72 h at room temp, angle: 180°, Haul-off speed: 300 mm/min., 05 mm PET-Film)	10.6 N/cm
Adhesion to Polycarbonate acc. to Finat FTM1 (after 72 h at room temp, angle: 180°, Haul-off speed: 300 mm/min., 05 mm PET-Film)	8.5 N/cm
Adhesion to Polypropylen acc. to Finat FTM1 (after 72 h at room temp, angle: 180°, Haul-off speed: 300 mm/min., 05 mm PET-Film)	11.2 N/cm
Static shear resistance to stainless steel acc. to Finat FTM8 (at room temperature)	>10,000 min
Static shear resistance to stainless steel acc. to Finat FTM8 (at 90°C)	>10,000 min

Storage	Store at 16°C - 25°C and 40-65% relative humidity in original carton
----------------	--

Shelf Life	12 months from date of shipment
-------------------	---------------------------------

Precautionary Information	Refer to product label and Material Safety Data Sheet for health and safety information before using the product. For information please contact your local 3M Office. www.3M.com
----------------------------------	---

For Additional Information	To request additional product information or to arrange for sales assistance, call..... Address correspondence to: 3M
-----------------------------------	--

7. HUBER SUHNER -SMA Flanşlı Konektör Teknik Özellikleri

Data Sheet

HUBER+SUHNER

Coaxial Panel Connector 23_SMA-50-0-21/111_N

Description

Straight panel receptacle jack, flange mount

Interface standards

IEC 60169-15_MIL-STD-348A/310_CECC 22110



Technical Data

Electrical Data

Impedance	50 Ω
Interface frequency max.	18 GHz

Mechanical Data

Number of matings	500
Weight	0.0026 kg

Environmental Data

Operating temperature	-65 °C to 125 °C
2011/65/EU (RoHS - including 2015/863 and 2017/2102)	compliant

Material Data

Piece Parts	Material	Surface Plating
Centre contact	Copper Beryllium Alloy	Gold Plating (Nickel underplated)
Outer contact	Copper Beryllium Alloy	Gold Plating (Nickel underplated)
Body	Copper Beryllium Alloy	Gold Plating (Nickel underplated)
Insulator	PFA / PTFE	

Related Documents

Catalogue drawing	DCA-00010321
-------------------	--------------

Ordering Information

Single package	23_SMA-50-0-21/111_NE
----------------	-----------------------