

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK TERAZİLERİN BAĞIŞIKLIK TESTLERİ İÇİN
TEM HÜCRESİ TASARIMI VE UYGULAMASI**

**YAHYA AKDAĞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2020**

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRONİK TERAZİLERİN BAĞIŞIKLIK
TESTLERİ İÇİN TEM HÜCRESİ TASARIMI VE
UYGULAMASI**

YAHYA AKDAĞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. SERKAN AKSOY

GEBZE
2020

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**DESIGN AND APPLICATION OF A TEM
CELL FOR IMMUNITY TESTS OF
ELECTRONIC SCALES**

YAHYA AKDAĞ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. SERKAN AKSOY

GEBZE
2020



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/12/2019 tarih ve 2019/55 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 17/01/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Elektronik Terazilerin Bağışıklık Testleri İçin TEM Hücresi Tasarımı ve Uygulaması'nın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

Prof. Dr. Serkan AKSOY
(TEZ DANIŞMANI) :

Prof. Dr. Oleg TRETAKOV :

Doç Dr. Fatih ERDEN :

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Prof. Dr. Ümit DEMİR
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Elektronik cihazların testleri için üretici firmalar her yıl laboratuvar kiralarna on binlerce dolar harcamaktadır. Bu maddi harcamalar yanında randevu tarihlerini beklerken kaybolan zaman ve kısıtlı test zamanları ile kayıplar katlanarak artmaktadır. Bu kayıpların önüne geçme fikri bu tez çalışması için temel teşvik unsuru olmuştur.

Bu tez çalışmasında elektromanyetik bağışıklık test standartları ve eski elektromanyetik bağışıklık test sonuçları incelenerek tasarlanması hedeflenen TEM hücresi için temel tasarım parametreleri belirlenmiştir.

TEM hücresi tasarımı ile ilgili gerekli literatür araştırması yapılarak, bu araştırma çıktıları ile teorik temeller kapsamında tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Belirlenen değerler simülasyon sonuçları ile desteklenerek prototip üretimi yapılmış, üretilen TEM hücresi AR-GE ortamında gerekli uygunluk testlerinden geçirilmiştir. Bağışıklık testlerinden kalan eski terazi kartlarına bağışıklık testleri tekrar uygulanarak, eski bağışıklık test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Elektromanyetik bağışıklık testi için tasarlanan bu TEM hücresinin ön test ortamı olarak kullanıma uygun olduğu sergilenmiştir.

Anahtar Kelimeler: TEM Hücresi, Elektromanyetik Bağışıklık, Elektromanyetik Uyumluluk, Elektronik Teraziler.

SUMMARY

Every year companies spend tens of thousands of dollars on laboratory rents for testing electronic devices. Besides these financial expenses, the time wasted while waiting for the appointment dates and the limited test times increase exponentially the losses. The main incentive for this thesis is the idea of preventing these losses.

In this thesis, electromagnetic immunity test standards and older versions of electromagnetic immunity tests have been examined and basic design parameters have been determined for the intended TEM cell.

Necessary literature research related to TEM cell design has been made and design parameters have been updated by using theoretical basis.

The updated values were supported by simulation results and prototypes were produced, applied the necessary measurement tests to the TEM cell which produced, immunity tests are re-applied to old failed electronic scale cards and results are compared.

The results show that this TEM cell which is designed for electromagnetic immunity test, is suitable for use as a pre-test environment.

Keywords: TEM Cell, Electromagnetic Immunity, Electromagnetic Compatibility, Electronic Scales.

TEŞEKKÜR

BaŐta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiğbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalıŐmanın oluŐmasının yolunu açan danıŐmanım Prof. Dr. Serkan Aksoy'a, bütün çalıŐmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaŐan değerli iŐ arkadaşlarıma ve göstermiŐ oldukları desteklerinden dolayı sevgili ailem ve ailem saydıklarıma en içten teŐekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. BAĞIŞIKLIK TEST STANDARTLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	4
2.1. Uluslararası Test Standartları	4
2.2. Onaylı Kuruluşlarda Yapılan Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	5
3. TEM HÜCRESİ TASARIMI	6
3.1. TEM Hücresine Teorik Yaklaşım	7
3.1.1. Paralel Plaka İletim Hattı	7
3.1.1.1. TEM Modu	8
3.1.1.2. TM ve TE Modu Kesim Frekansı	9
3.1.2. Karakteristik Empedans	9
3.1.2.1. Sonsuz Plaka Karakteristik Empedansı	10
3.1.2.2. Sonlu Plaka Karakteristik Empedansı	11
3.2. Karakteristik Empedans için Sayısal Doğrulama	12
3.3. TEM Hücresi Mekanik Tasarımı	13
3.4. TEM Hücresi Simülasyonu	15
4. TEM HÜCRESİ ÜRETİMİ	20
4.1. Septum Hazırlanması	20
4.2. Dış Plakalar	21
4.3. Sistemin Birleştirilmesi	21
5. TEM HÜCRE TESTLERİ	23
5.1. Test Ortamının Hazırlanması	23
5.1.1. İşaret Üreteci	24

5.1.2. AM RF İşaret Yükselteci	25
5.1.3. Yakın Alan Problemleri	25
5.2. Doğrulama Testleri	26
5.2.1. S_{21} için Yapılan Ölçümler	26
5.2.2. Elektrik Alan Dağılımı Ölçümleri	27
5.3. Elektromanyetik Bağışıklık Testlerinin Tekrarlanması	30
5.4. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	33
6. SONUÇLAR	35
6.1. TEM Hücre Performansı Yorumlaması	35
6.2. Bağışıklık Deneyleri Yorumlaması	36
6.3. Gelecekte Planlanan Çalışmalar	36
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	39
EKLER	40

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

EMC	: Elektromanyetik uyumluluk
EMI	: Elektromanyetik bağışıklık
TEM	: Enine elektromanyetik
TE	: Enine elektrik
TM	: Enine manyetik
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
AR-GE	: Araştırma ve geliştirme
OIML	: Uluslararası Yasal Metroloji Örgütü
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
GHz	: Gigahertz
MHz	: Megahertz
KHz	: Kiloherz
AM	: Genlik modülasyonu
e	: Doğrulama skala aralığı
∇_t^2	: Laplasyen operatörü
$E(x, y, z)$: Elektrik alan ifadesi
$e(x, y)$: Enine elektrik alan ifadesi
f_c	: Kesim frekansı
ϵ	: Dielektrik geçirgenlik
μ	: Manyetik geçirgenlik
η_0	: Boşluk için empedans
c_0	: Boşluk için ışık hızı
β	: Yayılım sabiti
p	: Güç (Watt)
C_E	: Elektrik alan şiddeti için bölgeye özel düzeltme katsayısı
v_p	: Faz hızı
d	: Septum yüksekliği
w	: Septum genişliği

w_g	: Dış plaka genişliği
d_p	: Hücre sonu yüksekliği
w_p	: Hücre sonu septum genişliği
$w_{p,g}$: Hücre sonu dış plaka genişliği
L	: Doğrusal dış plaka uzunluğu
L_p	: Eğimli taraf dış plaka uzunluğu
RF	: Radyo frekansı
$VSWR$: Gerilim duran dalga oranı
TG	: Takip jeneratör
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Açık ve kapalı TEM hücresi.	6
3.2: Paralel plaka yapısı.	7
3.3: Sıralı sonlu paralel düzlemsel plaka yapısı.	10
3.4: Model kapasite yapısı.	11
3.5: Sayısal olarak hesaplanan model ve simülasyon Z grafiği.	12
3.6: Farklı d değerleri için simülasyon Z grafiği.	13
3.7: TEM hücre modeli.	14
3.8: TEM hücre simülasyon modeli.	16
3.9: S_{11} için simülasyon sonucu.	16
3.10: S_{21} için simülasyon sonucu.	17
3.11: $VSWR$ için simülasyon sonucu.	17
3.12: Sütun kullanılarak geliştirilen tasarım ve elektrik alan ölçümü alınan hatlar.	18
3.13: Sütunlarla tasarlanmış yapı için S_{11} simülasyon sonuçları.	18
3.14: Septuma farklı uzaklıktaki hatlarda elektrik alan dağılımları mavi $2d/5$, kırmızı $3d/5$, sarı $4d/5$.	19
4.1: Tasarlanan septum.	21
4.2: Üretilen dış plaka.	21
4.3: Montajı tamamlanan TEM hücresinin yandan ve üstten görünümü.	22
5.1: Bağışıklık testleri için hazırlanan test ortamı.	24
5.2: RİGOL DSA815 TG spektrum analizörü.	25
5.3: TEKBOX TBMDA1 modülasyonlu yükselteç.	25
5.4: RIGOL NFP-3 yakın alan prob takımı.	26
5.5: Spektrum analizör ile yapılan S_{21} ölçümü.	27
5.6: Elektrik alan ölçümü için kullanılan NFP-3-P1 yakın alan probu.	27
5.7: Elektrik alan ölçümü için kullanılan NFP-3-P2 yakın alan probu.	28

5.8:	NFP-3-P1 yakın alan probu ile (0,0) konumunda ölçüm.	28
5.9:	NFP-3-P1 yakın alan probu ile (0,5) konumunda ölçüm.	29
5.10:	NFP-3-P1 yakın alan probu ile (7,0) konumunda ölçüm.	29
5.11:	NFP-3-P1 yakın alan probu ile (5,4) konumunda ölçüm.	29
5.12:	Test altında doğru şekilde çalışan devre kartı.	32
5.13:	Test altında bozulan devre kartının 210 MHz – 270 MHz bandında ki değeri.	32
5.14:	Test altında bozulan devre kartının 390 MHz – 450 MHz bandında ki değeri.	32
5.15:	Test altında 870 MHz – 930 MHz bandında, sıfır takibine rağmen bozulan devre kartı.	33

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Onay için gerekli test koşulları.	4
2.2: Tasarlanacak TEM hücreсі parametreleri.	5
3.1: Tasarlanan TEM hücreсі boyutları.	15

1. GİRİŞ

Elektronik cihazlar, günlük hayatımızın her anında aktif olarak rol almaktadır. Hem eğlence sektöründe hem günlük uğraşlarımızda hem de sağlık sektöründe bize sağladıkları kolaylıklar ve imkânlar sayesinde artık vazgeçilmez duruma gelmişlerdir. Bu cihazların ideal ortamda sürdürdüğü performansı, her anımızda talep etmekteyiz. Ama çevresel etkenler yüzünden bu her zaman mümkün değildir. Gerek iklim koşulları, gerek diğer elektronik cihazların çalışması sırasında yaydıkları elektromanyetik dalgalar bazen performans kayıplarına neden olmakta, bazen de çalışan sistemi tamamen bozmaktadırlar [1].

Aynı ortamda çalışan elektronik cihazların, beraber çalıştıkları müddetçe birbirlerinin performans ve çalışma fonksiyonlarına zarar vermemesi için dünya genelinde standart çalışmaları yapılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda bilim enstitüleri ve uluslararası mühendislik organizasyonları konu ile ilgili çeşitli kılavuz ve standartlar hazırlamıştır [2]-[6]. Örneğin, Uluslararası Yasal Metroloji Örgütü (OIML), otomatik olmayan elektronik teraziler için hazırladığı standartlarda [6], elektromanyetik bağışıklık (EMI) konusunda, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Enstitüsünün (IEEE) hazırladığı standartları temel almaktadır [5], [6].

Elektronik devre tasarımı ve son ürün geliştirme aşamalarında, bahsi geçen standartlara uyum için çalışmalar yapılmakla beraber, bu çalışmaların sonuçları her aşamada onaylı kuruluşlarca teyit ettirilemeyecek kadar pahalı ve zaman alan süreçler olduğu için AR-GE laboratuvarlarında çalışan mühendisler için bir test sistemi düzenlenmesi kritik önem taşımaktadır. Fakat test senaryolarında kullanılan yankısız odaların ciddi maliyetleri ve kapladıkları alan doğru tercih olmalarına engel olmaktadır.

Masaüstü bir sistem olarak kullanabileceğimiz TEM hücreleri gerek maliyetleri açısından gerekse ihtiyaç duydukları enerji bakımından, AR-GE ortamı için ideal bir EMC test düzeneği olarak kullanılabilir [7], [8], [9], [20].

Bu tez çalışmasında, daha önce onaylı laboratuvarlarda test ettiğimiz elektronik terazi kartları için, TEM hücresi tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan TEM hücresi ile test senaryoları tekrarlanmıştır. TEM hücresi ile yapılan deney sonuçları, daha önce onaylı laboratuvarlardan alınan sonuçlar ile kıyaslanmış ve performans değerlendirmesi yapılmıştır.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Elektronik cihazların elektromanyetik uyumluluk standartlarına uyması gerek insan sağlığı açısından gerekse cihazın verimli çalışması açısından çok önemlidir. Her elektronik cihaz gibi elektronik teraziler de çevresel elektromanyetik etkilerle bozulabilirler. Bu durumun önüne geçebilmek adına cihazların elektronik donanım ve kutu tasarımları yapılırken elektromanyetik bağışıklık için ciddi çalışmalar ve araştırmalar yapılmaktadır. Anti-statik kutu tasarımları, haberleşme kanalları üzerinde kullanılan izolatör devreleri, işaret entegreleri çevresindeki metal kafes tasarımları (Faraday kafesi) vb. önlemler bunlardan bazılarıdır. Bu çalışmalar ürünün pazara çıkma süresini geciktirmekle beraber üretim maliyetlerini de artıran çalışmalardır. Ayrıca elektromanyetik uyumluluk testleri genellikle dışarıdan temin edildiği için tasarım mühendislerinin detaylı test imkanları yok denecek kadar azdır. Araştırma ve üretim maliyetlerini azaltmak için, hangi önlem ne kadar faydalı sorusunun cevabını en hızlı şekilde almak büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasındaki temel amaç, onaylı elektronik terazilerin uymak zorunda olduğu, ışınım yollu elektromanyetik bağışıklık testlerini [2], [6] AR-GE ortamında gerçekleştirmek için açık TEM hücresi tasarımı yapmak [14], tasarımı yapılan açık TEM hücresini üretmek ve bu açık TEM hücresi ile ilgili testleri yapmaktır. Böylece yapılan testler onaylı test kurumunda tekrarlanıp, tasarlanan açık TEM hücresinin sonuçları ile karşılaştırılarak performansı ve AR-GE ortamında kullanılabilirliği değerlendirilecektir.

Bu tez çalışması için yapılan araştırmalar ile elektromanyetik uyumluluk standartları daha iyi anlaşılmıştır. Tasarımı yapılan açık TEM hücresi test ortamı ile, dışarıdan karşılanan test ihtiyacı azaltılmıştır. Böylece zaman kayıpları ve maliyet asgari tutara indirilmiştir. Donanım geliştirmesi yapan mühendis, istediği ortamda, tasarlanan yeni prototip elektronik kart ile testi yineleyebilme ve kontrollü deney yapabilme imkanına erişmiştir (ulaşılabilirlik en üst seviyeye gelmiştir). Bunların yanında, tasarlanan açık TEM hücresi kullanılarak, tasarım aşamasındaki ürünün elektromanyetik yayılım testleri de AR-GE ortamında gerek modüler olarak gerekse son ürün olarak yapılabilecektir.

Gelecekte bu çalışma sadece elektronik teraziler ile sınırlı kalmayıp, ihtiyaç duyulan başka cihazlar için, farklı frekans ve dalga genlikleri için tekrarlanabilir.

Tezin ilk bölümünde; ihtiyaçlar gözden geçirilerek, TEM hücresinin çalıştırılması hedeflenen frekans/güç aralığı belirlenmiş, bu sırada yapılan ihmaller ve varsayımlar açıklanmıştır. Bu bölümde ihtiyaçlar belirlenmiş ve planlama yapılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde; TEM hücresi tasarımı ile ilgili yapılan seçimleri, kullanılan teorik bilgileri ve analitik hesaplamaları içermektedir. Genel olarak teorik planlama aşamasının detaylı olarak anlatıldığı kısım ikinci bölümdür.

Tezin üçüncü bölümünde; TEM hücresi tasarımı gerçekleştirilmesi sırasındaki üretim aşamalarını, karşılaşılan zorlukları ve yapılan geliştirmeleri/düzenlemeleri içermektedir. Genel olarak, mekanik tasarım ve atölye çalışmalarından bahsedilen kısım üçüncü bölümdür.

Tezin dördüncü bölümünde; üretilen TEM hücresinin geçerliliği, homojenliği ve teorik hesaplamalar ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması açıklanmıştır. Genel olarak üretilmek istenen ile elde edilen ürün arasındaki performans değerlendirmesi yapılan bölüm dördüncü bölümdür.

Tezin beşinci bölümünde; üretilen TEM hücresi kullanılarak, elektronik teraziler için ışınlama yolu ile gelen manyetik dalga bağışıklığı testlerinin [6] yapılması ve elde edilen sonuçların onaylı test kuruluşundan alınan sonuçlar ile karşılaştırılması açıklanmıştır. Genel olarak TEM hücresi ile yapılan testlerden ve performans değerlendirilmesinden bahsedilen bölüm beşinci bölümdür.

2. BAĞIŞIKLIK TEST STANDARTLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde TEM hücresi ile yapılacak testler için, OIML tarafından belirlenen ışıyım yollu elektromanyetik bağışıklık test standartları [5], [6] incelenmiş, onay alınmış eski terazi modelleri için daha önce yapılan test raporları değerdendirilmiş ve standartlar konusunda esneklik gösterilebilecek koşullar belirlenmiştir. Böylece TEM hücresinin çalışması beklenen frekans aralığı ve istenen manyetik dalga şiddetine karar verilmiştir.

2.1. Uluslararası Test Standartları

Dünya çapında ölçüm standartlarını belirleyen Uluslararası Yasal Metroloji Örgütü (OIML), otomatik olmayan teraziler için ışıyım yollu elektromanyetik dalgaya bağışıklık standartlarını [6], IEEE'nin test prosedürüne [5] bağlamıştır. Bu bağlamda elektromanyetik test koşulları ve kabul edilebilir sonuçlar Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Onay için gerekli test koşulları.

Frekans aralığı	80 MHz – 2.000 MHz
Alan şiddeti	10 V/m
Modülasyon tekniğı	% 80 AM, 1 KHz, sinüs dalgası
Kabul edilebilir taksimat değışimi	e

Tablo 2.1 de görülen e sembolü, ışıyım yollu elektromanyetik bağışıklık testi sırasındaki kabul edilebilir ağırlık ölçümü bozulmasını simgelemekte olup, tasarlanan terazinin özelliklerine göre sayısal değeri değışmektedir. Örnek vermek gerekirse, maksimum 30 kg kapasiteli, 6000 taksimat hassasiyetli bir terazi için e değeri 5 gramdır. Test sırasında, terazide ölçülen ağırlık değeri değışiminin e 'den büyük olması durumunda test başarısız sayılıp, teraziye ticari alım satım işlemlerinde kullanılabilmesi konusunda onay verilmez.

e 'nin sayısal değeri için detaylı tanımlamalar ve özel durum açıklamaları, terazinin hassasiyet ve maksimum çeker gibi özelliklerine göre OIML R 76-1 kodlu

dosyada detaylı olarak yapılmış olup, terazinin yazılım geliştirme aşamasında referans alınan doküman yine bu dosyadır.

2.2. Onaylı Kuruluşlarda Yapılan Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Daha önce yapılan test sonuçları incelendiğinde (EK A) elektromanyetik kaynaklı bozulmaların, 220 – 250 MHz bandında, 680 – 730 MHz bandında, 1.14 – 1.24 GHz bandında ve 2.4 – 2.6 GHz bandında yoğunlaşmış olduğu gözükmektedir.

Diğer bölgesel bozulmalar e' 'den küçük olduğu ve onay koşullarını sağladığı için dikkate alınmamıştır. Aynı sebeple 2.4 – 2.6 GHz bandındaki değişim her ne kadar önemli olsa da, test bandının dışında kaldığı için dikkate alınmamıştır.

Bu bağlamda tasarlanacak TEM hücresinin 220 MHz ile 1.25 GHz arasında ve homojen olarak 10 V/m alan şiddeti oluşturacak şekilde tasarlanması hedeflenmiştir.

Buna göre uluslararası kurumlarca belirlenen standartlar [2], [6] ve daha önce teraziler için yapılan testler göz önüne alındığı zaman, AR-GE ortamında test ihtiyacını karşılamak için tasarlanacak olan TEM hücresinin sağlanması beklenen şartlar Tablo 2.2'de gösterildiği gibidir. Test alanı olarak 50 mm × 100 mm × 100 mm seçilmiştir. Bunun sebebi referans tasarım olarak kullandığımız elektronik terazi kart boyutunun bu alandan daha küçük olmasıdır.

Tablo 2.2: Tasarlanacak TEM hücresi parametreleri.

Frekans aralığı	220 MHz – 1.250 MHz
Alan şiddeti	10 V/m
Test Alanı	50 mm × 100 mm × 100 mm

3. TEM HÜCRESİ TASARIMI

TEM hücresi ile bizi ilk tanıştıran kişi, 1974'teki yayını ile Myron L. Crawford'dur [11]. Bugünlerde oldukça yaygın olarak kullanılan TEM hücreleri, elektromanyetik uyumluluk testleri ile birlikte canlı hücre çalışmalarında da kullanılmaktadır. Günümüzde açık TEM hücresi, kapalı TEM hücresi, tek portlu TEM hücresi, iki portlu TEM hücresi gibi farklı türler vardır. Bütün TEM hücrelerinin ortak dezavantajı, test alanlarıdır. Hacim olarak büyük elektronik cihazlar için hala yankısız odaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Teraziler için uygulayacağımız elektromanyetik bağışıklık testleri sırasında, test uygulanan cihaz göz ile takip edileceği için, çift portlu açık TEM hücresi modeli tercih edilecektir. Çift portlu açık TEM hücreleri genellikle 1 GHz altında çalışmak için tercih edilse dahi, 2 GHz bandında kullanımına dair uygulamalar mevcuttur [21]. Tek portlu TEM hücreleri ise kapalı model olarak çoğunlukla yüksek frekanslarda kullanılmaktadırlar.

Çift portlu TEM hücresinin açık ve kapalı olmak üzere 2 temel tasarımı vardır. Şekil 3.1'de açık ve kapalı TEM hücrelerinin örnekleri gösterilmektedir. Bunlar dışında farklı yapılarda TEM hücre tasarımları da mevcuttur [22].



Şekil 3.1: Açık ve kapalı TEM hücresi.

En basit TEM hücre modeli; 3 paralel levha ile yapılabilir. Orta levhadan uygulanan modüle işaret bir yük üzerinde harcanarak üst ve altta bulunan levhalar üzerinden devre sonlandırılır.

Ortada bulunan septum üzerine işaret uygulandığı sırada üst ve altta bulunan paralel alüminyum levhalar toprak gibi davranır. Septum ve alüminyum levhalar arasında bir manyetik alan oluşturulur.

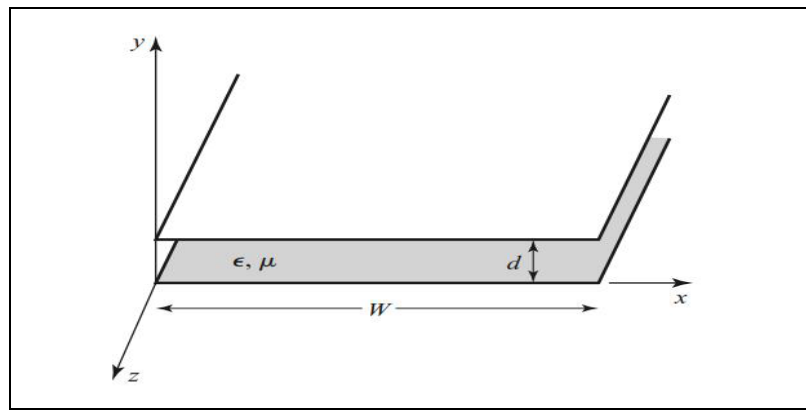
Levhalar arasında bulunan boşluk, levhaların uzunluğu, levhaların genişliği, levhaların ve ortamın iletkenliği, uygulanan işaretin gücü gibi değişkenler kullanılarak ideal test ortamı tanımlanır.

3.1. TEM Hücreesine Teorik Yaklaşım

TEM hücresi basit anlamda, iki sonlu paralel levha kullanılarak oluşturulan bir dalga kılavuzudur. İhtiyaç duyulan test alanı için gerekli levha genişliği ve uzunluğunu bulmak ve paralel levhaların karakteristik empedanslarını hesaplamak üzere Maxwell denklemleri kullanılmaktadır.

3.1.1. Paralel Plaka İletim Hattı

Şekil 3.2’de TEM modunu uyaran paralel plakalı bir iletim hattı gösterilmiştir. Burada w ve l sırası ile yatay ve dikey boyutları, ϵ (F/m) ve μ (H/m) ise paralel plakalar arasındaki ortamın elektromanyetik parametrelerini tanımlar. Bu ortam kayıpsız ($\delta = 0$) olarak ele alınmıştır.



Şekil 3.2: Paralel plaka yapısı.

TEM hücresi için sadece TEM modu uyarılmalı, diğer dalga modlarının yayılmasını önlemek için çalışılmalıdır.

3.1.1.1. TEM Modu

TEM modu çözümü için tanımlanan bir potansiyel $\psi(x, y)$ üzerinden

$$\nabla_t^2 \psi(x, y) = 0 \quad (3.1)$$

olmak üzere Laplace denklemi kullanılır [12]. Burada ∇_t^2 enine Laplasyen operatörü olup, potansiyelin sağladığı sınır koşulları

$$\psi(x, 0) = 0 \quad (3.2)$$

$$\psi(x, d) = V_0 \quad (3.3)$$

olarak ifade edilir [12]. $y = 0$ düzleminde, $0 \leq x \leq w$ eşitliğini sağlayan herhangi bir x konumu toprak hattı üzerinde olacağı için potansiyel değişimine sebep olmayacaktır ve Denklem (3.2) sonucu korunacaktır. Benzer durum (potansiyelin, koşulları sağlayan x konumundan bağımsız olması) $0 \leq y \leq d$ eşitliğini sağlayan herhangi bir y konumu için de geçerlidir. Bu sınır koşullarını sağlayan herhangi bir y konumu için potansiyel ($(0 \leq x \leq w)$ ve $(0 \leq y \leq d)$ için)

$$\psi(x, y) = V_0 \frac{y}{d} \quad (3.4)$$

olarak bulunur [12]. Böylece potansiyelin tanımına göre enine elektrik alan

$$\bar{e}(x, y) = -\nabla_t \psi(x, y) = -\frac{V_0}{d} \hat{y} \quad (3.5)$$

denkleminde gösterilen ifadeyi alır [12].

$k_z = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$ olduğu durumda toplam elektrik alan, $e^{-jk_z z}$ yayılma yönüne bağlı kısmı ile çarpılan enine bağımlı kısmıdır. Bu durumda toplam elektrik alan ifadesi

$$\bar{E}(x, y, z) = \bar{e}(x, y)e^{-jk_z z} = -\frac{V_0}{d} e^{-jk_z z} \hat{y} \quad (3.6)$$

olarak gösterilir [12].

3.1.1.2. TM ve TE Modu Kesim Frekansı

TM ve TE modu kesim frekansları

$$f_{c,TM} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{n}{2d\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (3.7)$$

$$f_{c,TE} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{n}{2d\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (3.8)$$

olmak üzere aynıdır [12]. Burada ε ve μ sırasıyla boşluk için dielektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri ve n mod sayısını gösterir.

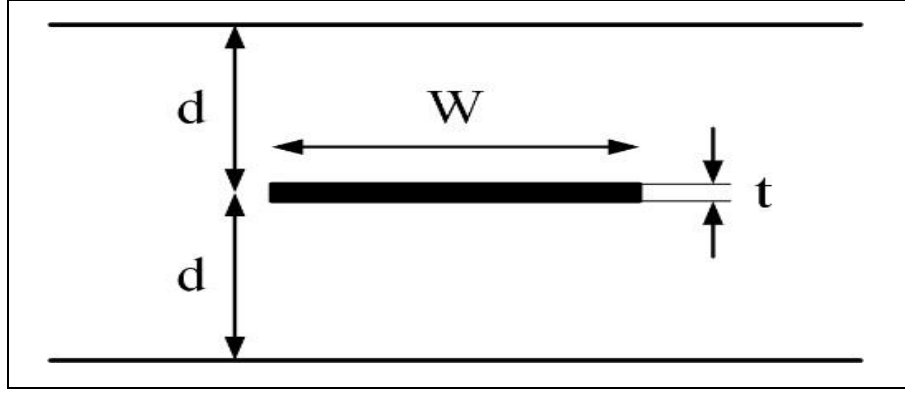
TEM hücrelerinde, TEM harici dalga modlarının yayılması istenmediğinden, çalışma frekansı dominant (ilk) modun kesim frekansının altında olacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu kapsamda $n = 1$ için dominant mod frekansı

$$f_{c_1,TM} = f_{c_1,TE} = \frac{1}{2d\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (3.9)$$

olarak bulunur.

3.1.2. Karakteristik Empedans

Şekil 3.3'de gösterilen sıralı sonlu paralel düzlemsel plaka yapısının karakteristik empedansı, eşleşen bir iletim hattına sahip olmak için önemlidir. Bu amaçla ilk olarak plaka kenarlarına yakın bölgede doğru olmasa da karakteristik empedans $\partial/\partial x = 0$ varsayımını kullanarak hesaplanır. Daha sonra sonlu plakaların saçak kapasitesini açıklayan yarı deneysel bir model kullanılarak model geliştirilir.



Şekil 3.3: Sıralı sonlu paralel düzlemsel plaka yapısı.

3.1.2.1. Sonsuz Plaka Karakteristik Empedansı

Enine boyutta keyfi bir yapının karakteristik empedansı, Z_0

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.10)$$

olarak verilir [12]. Burada L ve C birim uzunluk için öz indüktans (H/m) ve öz kapasitansı (F/m) gösterir. TEM dalga yayılımı iletim hattı için kullanılırsa [13], faz hızı, v_p (m/sn)

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (3.11)$$

olarak bulunur. Faz hızının ışık hızı olduğu ortam için

$$Z_0 = \frac{1}{v_p C} = \frac{1}{c_0 C} \quad (3.12)$$

denklemini elde edilir. Burada $c_0 \cong 3 \cdot 10^8$ m/sn olarak boşluktaki ışık hızıdır.

Paralel düzlemin kapasitesi, saçak kapasite etkileşimlerini düşünmeden

$$C = \frac{\epsilon_0 W}{d} \quad (3.13)$$

olarak yazılır [12]. Burada w ve d , Şekil 3.3'te görüldüğü üzere düzlem genişliği ve yüksekliğidir.

Sıralı paralel plakalar için kapasiteler paraleldir. Bu yüzden kapasite iki kat olur ve empedans kapasitenin yarısı üzerinden hesaplanır. Boşluk için empedans $\eta_0 = Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 376 \Omega$ [14] olduğu durum için sonsuz sıralı paralel plakalarda karakteristik empedans

$$Z = \frac{Z_0 d}{2w} \quad (3.14)$$

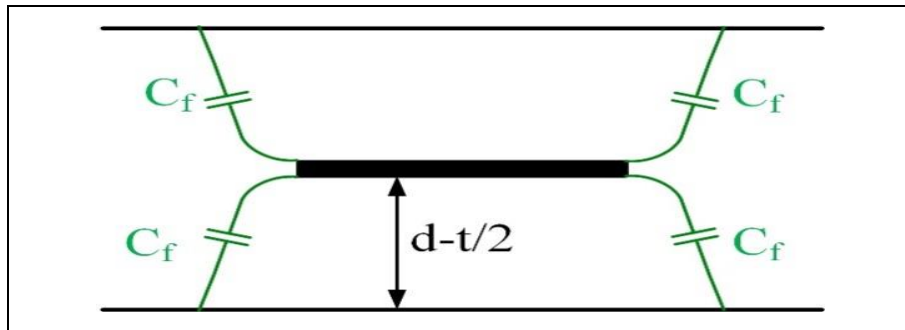
denklemini ile gösterilebilir.

3.1.2.2. Sonlu Plaka Karakteristik Empedansı

Sonlu plaka nedeni ile karakteristik empedansa saçak kapasitelerin etkisi hesaplanmalı, daha önce Denklem 3.30 kullanılarak hesaplanan kapasite değeri yeniden hesaplanmalı, Şekil 3.4'te görülen modeli dikkate alırsak, bir kenar için kapasite C_f ve septum kalınlığı t olmak üzere, tüm sistemin kapasitesi

$$C = \frac{\epsilon_0 w}{d \left(1 - \frac{t}{2d}\right)} + 4C_f \quad (3.15)$$

denklemindeki gibi tekrar oluşturulur.



Şekil 3.4: Model kapasite yapısı.

Benzer şekilde Denklem (3.12) mevcut durum için tekrar hesaplanırsa, sıralı sonlu paralel plaka iletim hattı için karakteristik empedans

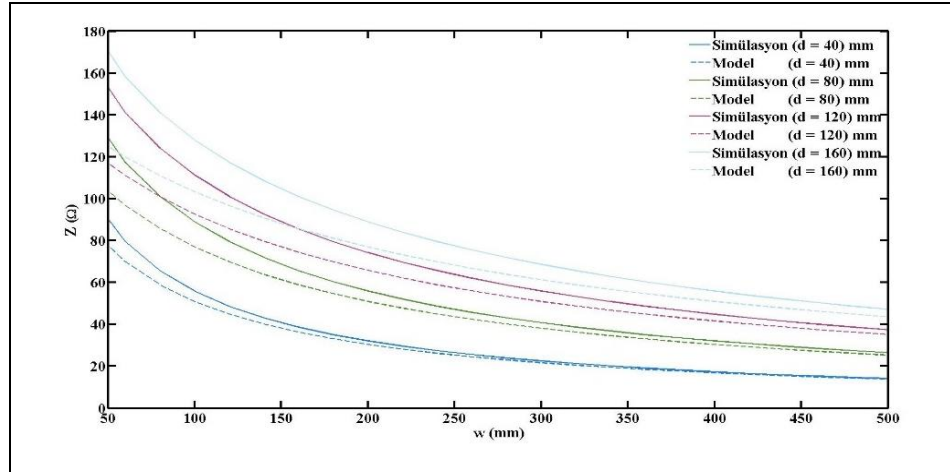
$$Z = \frac{Z_0/4}{\frac{w}{2d \left(1 - \frac{t}{2d}\right)} + \frac{C_f}{\epsilon_0}} \quad (3.16)$$

olarak bulunur.

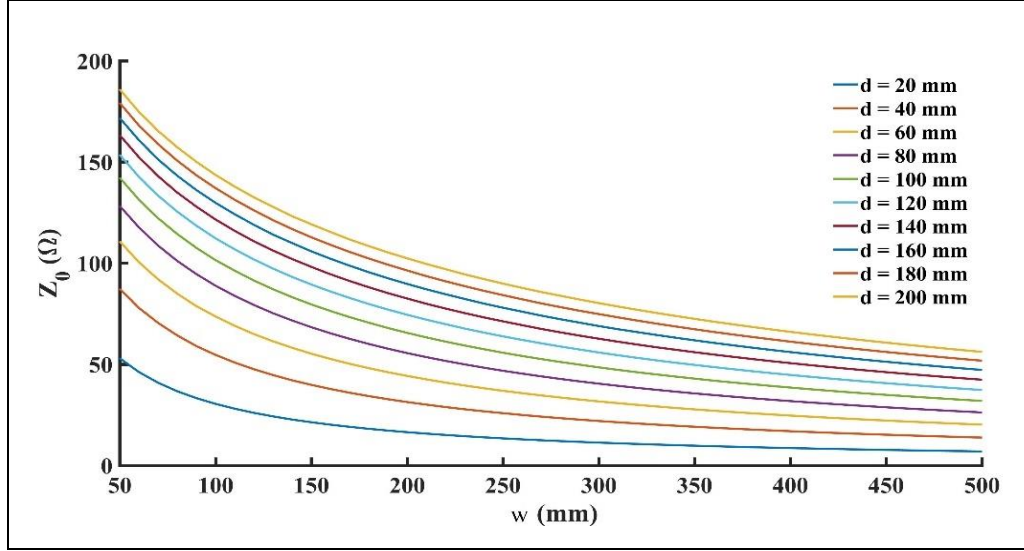
C_f değeri 0.053 pf/cm ve Z_0 boşluk için 376 Ω olarak kabul edilmiştir [14]. C_f kapasitenin model yapısına bağlı olup, sınırlı w ve d tasarım parametreleri için geçerlidir [18].

3.2. Karakteristik Empedans için Sayısal Doğrulama

Denklem (3.16) kapsamında C_f 'yi bulmak için, iletim hattının birim uzunluğu başına denk gelen kapasiteyi hesaplayan bir simülasyon çalışması yapılarak, Denklem (3.12) üzerinden karakteristik empedans hesaplanmıştır. Bu hesaplama ANSYS HFSS Maxwell 2D kullanarak yapılmıştır. Böylece Denklem (3.16)'nın karakteristik empedans için doğruluğu incelenmiştir.



Şekil 3.5: Sayısal olarak hesaplanan model ve simülasyon Z grafiği.

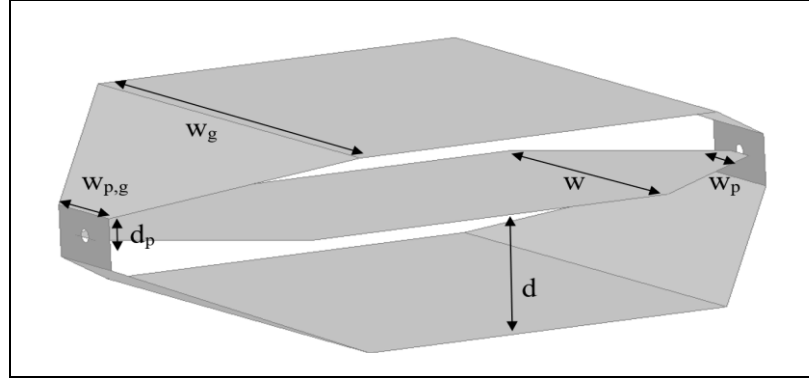


Şekil 3.6: Farklı d değerleri için simülasyon Z grafiği.

Şekil 3.5 farklı parametreler için tekrarlanan simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara göre, d yüksekliğinin 160 mm ve 120 mm değerleri için, w genişliğinin 250 mm'den büyük olması durumunda simülasyon ve model sonuçları birbirine benzemektedir. d yüksekliğinin 160 mm olduğu durumda, w genişliğinin 150 mm'ye kadar inmesi model/simülasyon benzerliğini bozmamaktadır. Ayrıca Şekil 3.6'da d ve Z arasındaki ilişki, tekrarlanan simülasyon sonuçları ile daha detaylı olarak görülmektedir.

3.3. TEM Hücresi Mekanik Tasarımı

Test edilecek ekipman hücre içine yerleştirildiğinde, septum ile dış plakalar arasında sabit bir elektrik alan elde etmek için, TEM hücresinin boyutları ekipmandan en az 3 kat daha fazla olmalıdır [15]. Tablo 2.2'de test ortamını tanımlarken, ihtiyaç duyulan test bölgesine $5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda hücre içi en az 15 cm yükseklik (d), 30 cm genişlik (w) ve 30 cm uzunluk (L) şeklinde olmalıdır.



Şekil 3.7: TEM hücre modeli.

Denklem (3.16) kullanılarak, en düşük $VSWR$ sağlayan $Z = 50 \Omega$ olacak şekilde TEM hücresinin ortasındaki ve sonundaki septum genişliği belirlenmelidir [19]. Hücresinin merkezinde septum olarak kullanılacak bakır levha 1 mm'den daha ince olacak, diğer ölçülere göre çok küçük olan bu değer $t = 0$ cm olarak kabul edilmiştir. Septum yüksekliği $d = 15$ cm olarak, standart SMA bağlantı portu kullanmak için hücre sonunda yüksekliği $d_p = 1.5$ cm ve hücre sonunda septum genişliği w_p 3.8 cm olarak ele alınmıştır. Bu başlangıç parametrelerine göre, Denklem (3.16) kullanılarak hücre merkezinde septum genişliği $w = 38.5$ cm olarak belirlenmiştir.

Teoriye benzetim sonuçlarına yaklaşmak için alt ve üst plakaların septum genişliğinden daha büyük olması gerekir [14]. Ancak inşaa kısıtlamaları ve kullanım faydaları için dış plaka genişliği $w_g = 54$ cm olarak uygulanmıştır. Daha iyi bir dönüş kaybına sahip olmak için plaka genişliği ve büküm açısı önemlidir, bu nedenle 30 derecelik bir eğim ile büküme karar verilmiştir.

TEM hücresinde yüksek rezonans frekansları da simülasyonda kontrol edilmelidir. İstenen frekans aralığında çalışan bir TEM hücresi tasarımı için, rezonans frekansları, çalışma bandı üst limiti olan 1.25 GHz'den yüksek olması gerekmektedir, bu sayede dalga modları birbirleri ile etkileşime giremeyeceklerdir [12].

Şekil 3.7'da görülen, belirlenen kriterlere göre karar verilen ölçüler, Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Tasarlanan TEM hücresi boyutları.

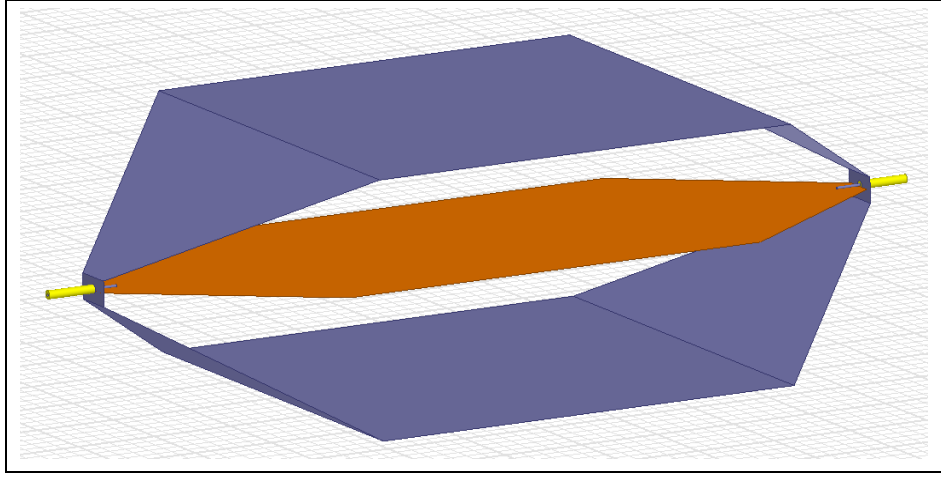
Parametre Adı	Parametre	Değer (cm)
Septum Yüksekliği	d	15
Septum genişliği	w	38.5
Dış Plaka genişliği	w_g	54
Hücre Sonundaki Yükseklik	d_p	1.5
Hücre Sonunda Septum Genişliği	w_p	3.8
Hücre Sonunda Dış Plaka Genişliği	$w_{p,g}$	5
Doğrusal Dış Plaka Uzunluğu	L	54
Eğimli Dış Plaka Uzunluğu	L_p	23.4

Bu ölçülere karar verilirken ilk kriter, TEM hücresinin örnek kart testleri için ihtiyaçları karşılayacak kadar büyük olması ve kullanılacak konnektör için yeterli montaj alanı sağlayabilmektir.

3.4. TEM Hücresi Simülasyonu

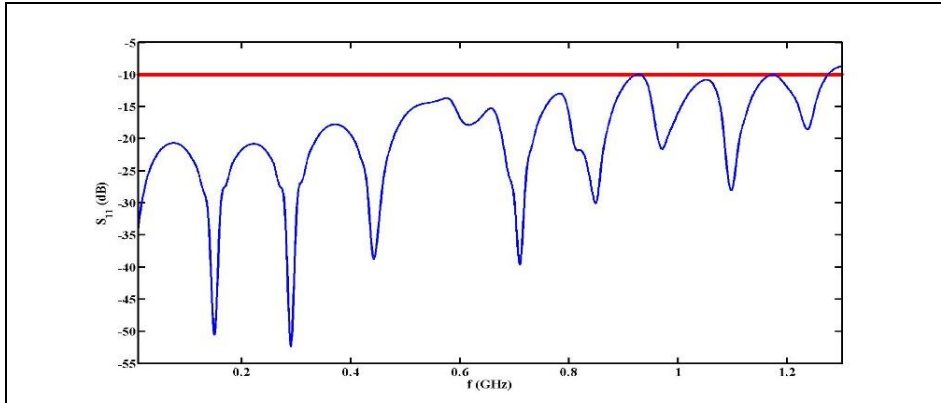
Tasarım aşamasında belirlenen boyutlar kullanılarak tasarlanan TEM hücresi simülasyon modeli (Şekil 3.8) için ANSYS HFSS simülasyon programı kullanılarak S_{11} , S_{21} ve $VSWR$ sonuçları için benzetimi yapılmıştır. S_{11} TEM hücresine uygulanan sinyalin, sinyal uygulanan porta geri yansımaları olup, 0'dan uzak olması istenir. S_{21} ise TEM hücresine uygulanan sinyalin diğer porttan okunması olup, 0'a yakın olması istenir. S_{21} 'in alabileceği en iyi değer 0'dır.

TEM hücresi giriş ve çıkışları tasarlanan 50Ω koaksiyel bağlantı noktaları üzerinden yapılmış ve simülasyon daha önce belirlenen 1.25 GHz frekansı üzerinde gerçekleştirilmiştir.



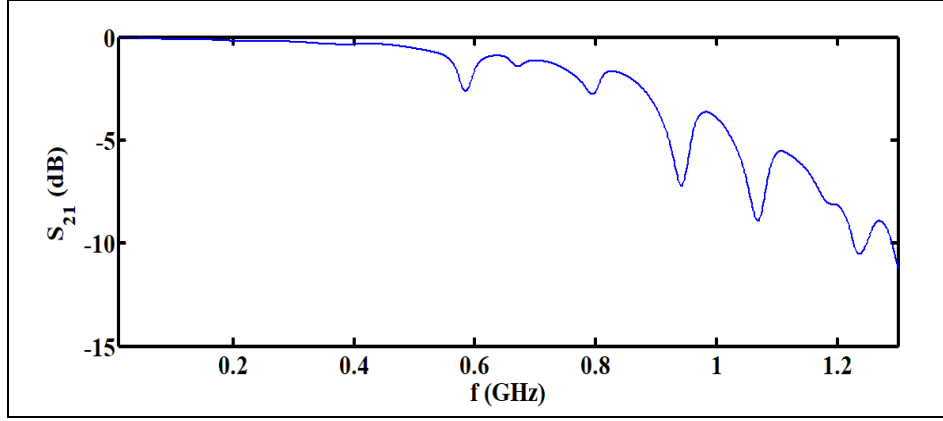
Şekil 3.8: TEM hücre simülasyon modeli.

S_{11} iletilen RF işaretin girişe geri yansımaları hakkında bize bilgi vermektedir [17]. Şekil 3.9’da görüldüğü üzere S_{11} çalışmak istenen frekans bölgesinde -10 dB den daha az olup, frekansın artması ile yükselen bir ortalamaya sahip olmaktadır. S_{11} ’in -10 dB’den küçük olması yeterli olarak değerlendirilir.



Şekil 3.9: S_{11} için simülasyon sonucu.

S_{21} ’i kullanarak iletim hattının kayıpları hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür [17]. Şekil 3.10’da görüldüğü üzere S_{21} çalışmak istenen frekans bölgesinde 0 dB ile -10 dB arasında olup, 1.25 GHz’den sonra -10 dB’in altına düşmektedir. Sonuç kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir.



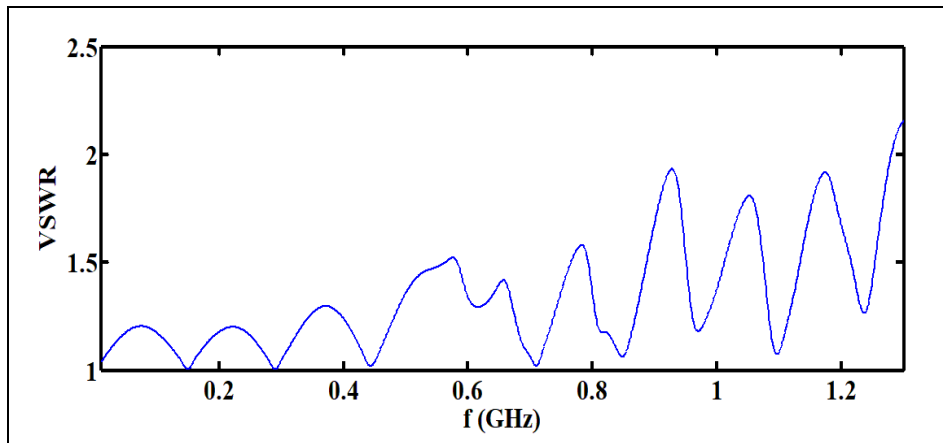
Şekil 3.10: S_{21} için simülasyon sonucu.

İletim hattındaki yansımaları gösteren, duran dalga oranı ($VSWR$) olup

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.17)$$

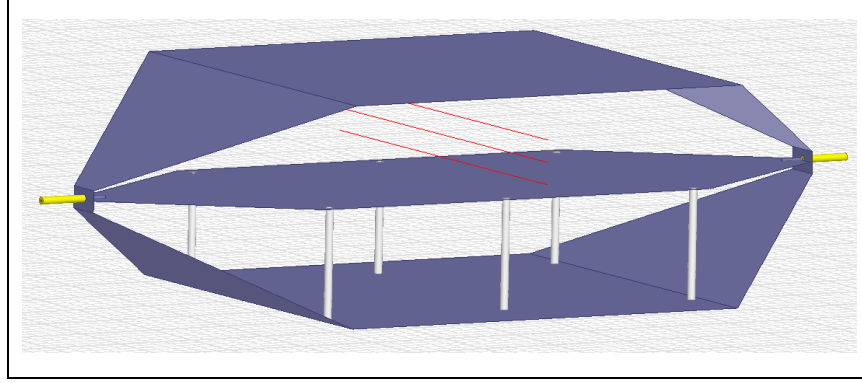
denklemini ile hesaplanır. Denklemdaki Γ sembolü S_{11} parametresi ile ilgili olarak yansıma katsayısını ifade eder. En küçük ve en ideal $VSWR$ değeri 1 olup, yansıyan dalganın hiç oluşmaması durumunu gösterir [16].

Şekil 3.11 de görüldüğü üzere frekansın artması ile $VSWR$ yükselmektedir. Fakat çalışma bölgesi olarak belirlediğimiz 80 MHz – 1.25 GHz bandında $VSWR$ değeri 2'nin altında kalmakta ve bu değer iletilen RF işaretin % 10'undan daha düşüktür. Bu seviye kabul edilebilir düzey olarak değerlendirilebilir [16].



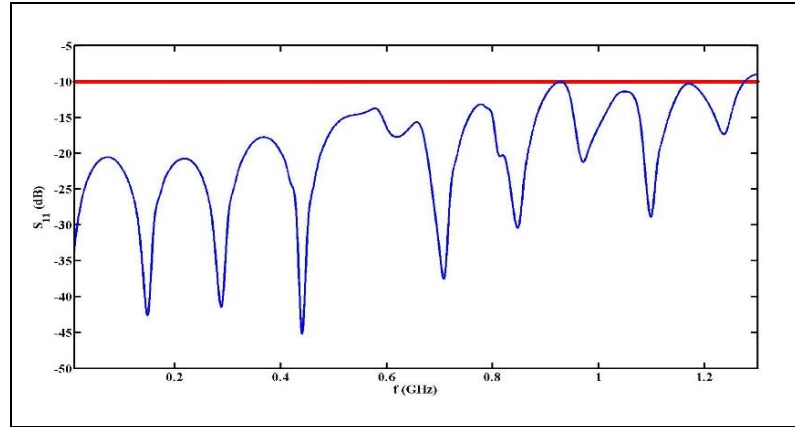
Şekil 3.11: $VSWR$ için simülasyon sonucu.

Sağlam bir yapıya sahip olmak ve TEM hücresinin fiziksel yapısını korumak için septum ve dış paralel plakalar arasında dielektrik sütunlar kullanılır. Bu sütunlar ile yapılan tasarım Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Sütun kullanılarak geliştirilen tasarım ve elektrik alan ölçümü alınan hatlar.

Sütun kullanılarak geliştirilen tasarım için tekrarlanan S_{11} simülasyon sonuçları Şekil 3.13’de görüldüğü gibidir. Bu sonuçlar, Şekil 3.9’de görünen, sütun kullanılmayan tasarımın sonuçları ile genel itibariyle benzer olduğundan, kabul edilebilir olarak değerlendirilir.

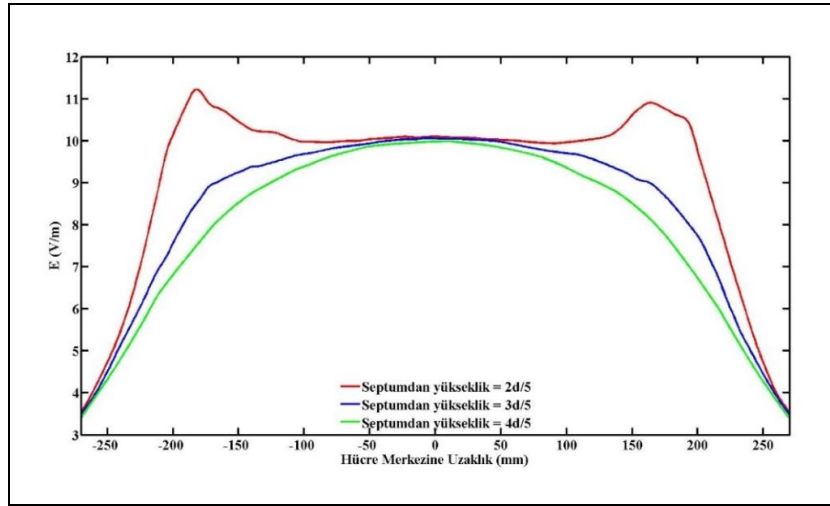


Şekil 3.13: Sütunlarla tasarlanmış yapı için S_{11} simülasyon sonuçları.

TEM hücresi tasarımında diğer bir önemli konu da septum ile dış levhalar arasında oluşan elektrik alanın, farklı bölgelerde aynı şiddette ya da mümkün olduğunca benzer değerlerde, yani homojen olmasıdır.

Şekil 3.12 de kırmızı hatlar olarak görülen 3 farklı yükseklik bölgesi için, 500 MHz frekansında 50Ω olarak belirlenen TEM hücresinin girişinden 1.58 V,

25 mW işaret uygulanması ve 50Ω 'luk sonlandırma direnci kullanılarak yapılan elektrik alan dağılım simülasyonu sonuçları Şekil 3.14'de görülmektedir. Buna göre TEM hücresinin merkezine olan uzaklığı ± 50 mm iken elektrik alan 10 V/m de sabittir. Merkeze olan uzaklık arttıkça elektrik alan şiddeti de yavaşça azalmaktadır. Merkeze olan uzaklık ± 100 mm olduğunda bile değişim 1 dB den azdır. Bu durum elektrik alan homojenliğinin kabul edilebilir seviyede olduğunu gösterir.



Şekil 3.14: Septuma farklı uzaklıktaki hatlarda elektrik alan dağılımları mavi $2d/5$, kırmızı $3d/5$, sarı $4d/5$.

İhtiyaçlar üzerinden belirlenen TEM hücresi boyutları, teorik yaklaşım ve bilgisayar destekli simülasyon programları ile kesinleştirilerek, Tablo 3.1'de verilmiştir.

Simülasyon sonuçlarının da gösterdiği üzere, belirlenen boyutlarda tasarım kabul edilebilir olup, ihtiyacı karşılayacak bir TEM hücresi için gerekli koşulları sağlamaktadır. İhtiyaçları belirtirken koşul olarak belirlediğimiz $5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ test bölgesi için, $80 \text{ MHz} - 1.25 \text{ GHz}$ frekans bandında 10 V/m elektrik alan şiddeti sağlanmış olup, üretilecek TEM hücresi elektronik terazilerin elektromanyetik bağışıklık testleri için yeterli olacaktır.

4. TEM HÜCRESİ ÜRETİMİ

Daha önce ihtiyaçlar ve teoriye dayandırarak karar verilen Tablo 3.1'deki boyutlar kullanılarak tasarlanan TEM hücresinin üretimini;

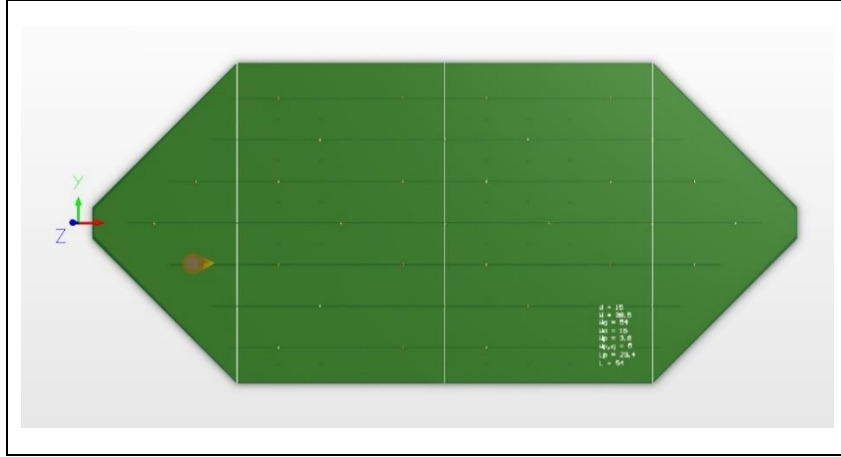
- i) Bakır plaka kullanarak septumun kesilmesi ve konnektörlerin lehimlenmesi,
- ii) Paslanmaz çelik kullanılarak dış plakaların kesimi ve bükümü,
- iii) Üretilen parçaların birleştirilmesi

olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirdik.

TEM hücresinin birleştirilmesi için sadece vidalar kullanılmış, böylece gerekli görülmesi durumunda tekrar parçalarına ayrılabilir ve bu halde saklanabilir olması sağlanmıştır.

4.1. Septum Hazırlanması

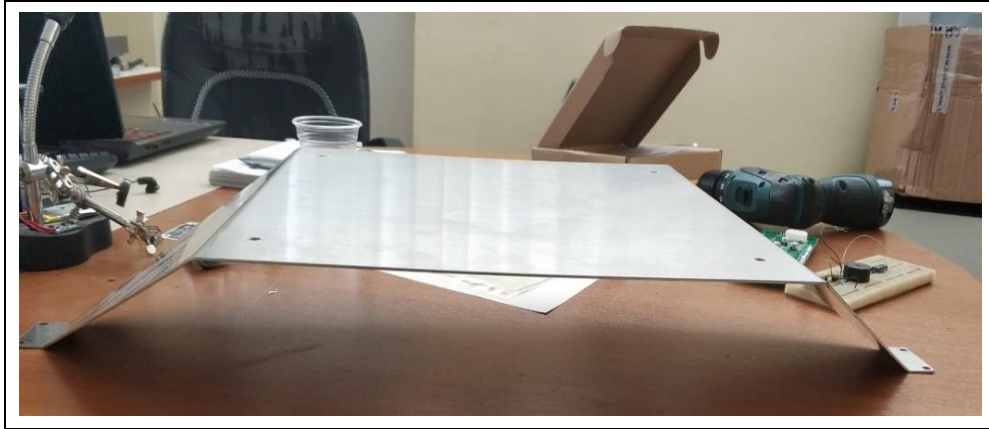
Septum olarak güçlü bir iletken olan bakır levha kullanımı tercih edilmiş, ancak yumuşak yapısı ve bozulmaya müsait olması sebebiyle onun yerine aynı şartları sağlayacak çift tarafı bakır kaplı PCB kullanılmıştır. Elektronik kart üretiminde kullanılan FR-4 septuma sağlam bir yapı verirken, FR-4'ün üst ve alt katında bulunan bakır plakalar istenilen iletim görevini üstlenecektir. Delikler ile birbirine bağlanan üst ve alt plakalar tek bir bakır plaka gibi davranacaktır. Septum levhasının iki ucuna konnektörleri lehimlenmiş, bu konnektörlerden birinden bağışıklık testi için gerekli RF sinyal uygulanırken diğer konnektöre bağlanan yük ile alt-üst plakalar birbirine bağlanacak, septum ve plakalar arasında potansiyel fark oluşturulacaktır. Bu konnektörler işaret üreticine bağlanıp gerek duyulan güçte işaret TEM hücreğine sağlanacaktır. Diğer uçta bulunan konnektör ile bir yük üzerinden devre sonlandırılacaktır.



Şekil 4.1: Tasarlanan septum.

4.2. Dış Plakalar

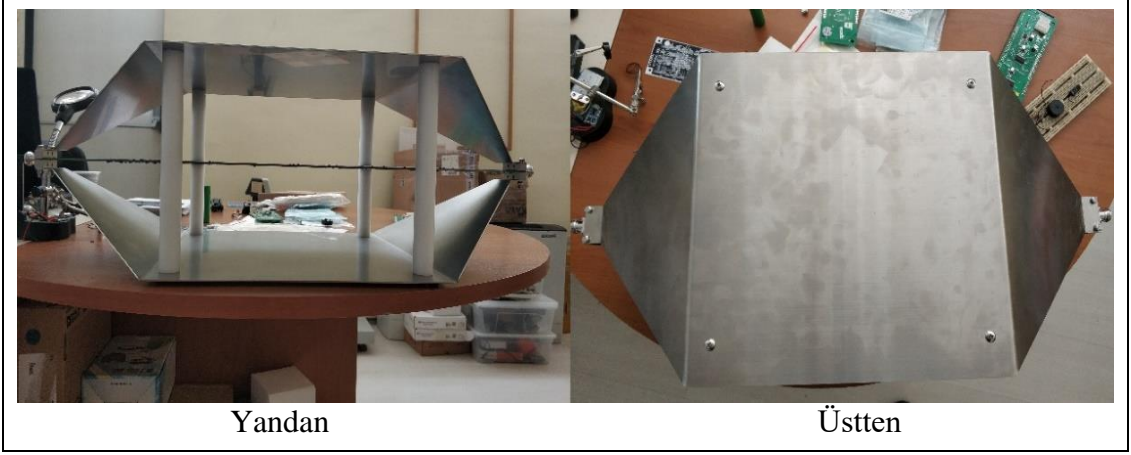
Dış plakaların üretiminde, TEM hücresinin kullanım sırasındaki fiziksel deformasyonlara dayanıklılığının fazla olması için sert yapıda olan paslanmaz çelik kullanılmıştır. Malzemenin istenilen boyutlarda kesimi lazer kesim makinesi ile yapılmış, büküm makinesi ile 30 derecelik eğim verilmiştir.



Şekil 4.2: Üretilen dış plaka.

4.3. Sistemin Birleştirilmesi

Hazırlanan septum ve dış plakaların montajı yapılarak TEM hücresi test etmeye hazır hale getirilmiştir. 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen ayaklar ile yapı güçlendirilmiştir.



Şekil 4.3: Montajı tamamlanan TEM hücresinin yandan ve üstten görünümü.

5. TEM HÜCRE TESTLERİ

Teorik hazırlıklar ve bilgisayar destekli simülasyonlardan elde edilen sonuçlar kullanılarak üretilen TEM hücresinin, bağışıklık testlerinde kullanmadan önce genel çalışma durumu incelenmelidir. Bunun için simülasyon programını kullanarak hesaplanan S_{11} , S_{21} parametrelerini ve üretilen elektrik alan dağılımını üretilen TEM hücresi üzerinde ölçülerek sonuçlar karşılıklı kontrol edilmelidir.

Ardından; üretilen TEM hücresi kullanılarak belirlenen frekans bandında elektromanyetik bağışıklık testleri tekrarlanıp, elde ettiğimiz sonuçlar ile onaylı kurumlardan aldığımız sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Bu iki aşamada elde edilen sonuçlar eğer tutarlı ise, tasarlanan TEM hücresinin doğru çalıştığı sergilenmiş olacak ve bundan sonra ki ön testlerin ARGE ortamında yapılabilmesi sağlanacaktır.

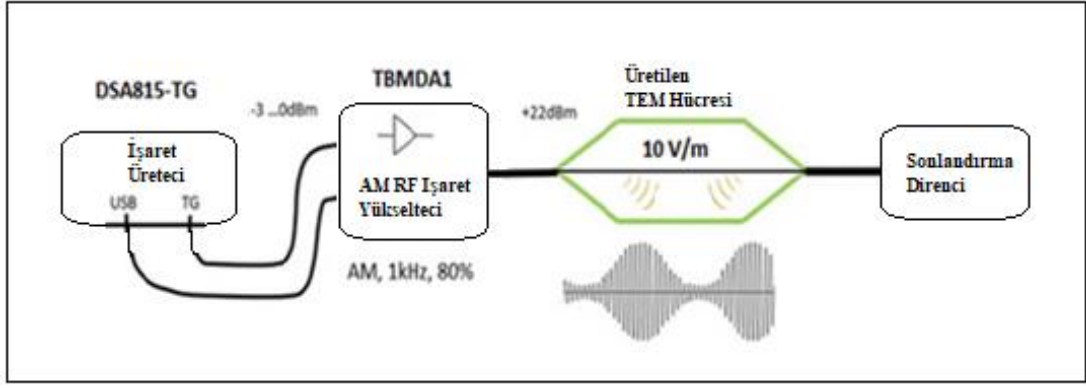
5.1. Test Ortamının Hazırlanması

Sertifikasyon amaçlı onaylı kurumlarda yapılacak elektromanyetik bağışıklık testlerine hazırlık için, ön kontrol testlerinin yapabileceği bir test ortamına ihtiyaç duyulur. Bu test ortamının hazırlanması ile ön kontrol testlerinin yapılabilmesi mümkün olacaktır.

Şekil 5.1’de verilen test ortamını kurmak için 3 temel ekipmana (EK B) ihtiyaç duyulur. Bunlar;

- i) İşaret üretici,
- ii) AM RF işaret yükseltici,
- iii) TEM hücresi için sonlandırma direncidir.

Ek olarak; elektronik kart üzerindeki komponentlerin ayrı ayrı elektrik alana maruz kaldığında verdikleri tepkileri görmek için, farklı büyüklüklerdeki yakın alan problemleri kullanılacaktır.



Şekil 5.1: Bağımsızlık testleri için hazırlanan test ortamı.

5.1.1. İşaret Üreteci

Elektromanyetik bağımsızlık testlerinin yapılacağı frekans bandında elektromanyetik dalgaları üretmek için işaret üretici olarak Şekil 5.2’de gösterilen RİGOL DSA815-TG (EK B) model spektrum analizörü kullanılmıştır. Bu ölçüm cihazının tercih edilmesinin dört temel sebebi var. Bunlar;

- i) 9 KHz – 1.5 GHz çalışma bölgesi,
- ii) Kendi üzerindeki dahili RF işaret üretici bulunması,
- iii) Bilgisayar bağlantısı ile kontrol kolaylığı,
- iv) S parametrelerini ölçebilmesi

olarak sıralanabilir.

Bağımsızlık testlerini yapmak için S parametrelerinin ölçülmesine ihtiyaç duyulmasa da TEM hücresinin teoriye uygunluk testleri ve tez konusu olmayan yayılım testleri için basit işaret üretici yerine bu özelliklerin hepsini barındıran bir spektrum analizörü tercih edilmiştir.



Şekil 5.2: RIGOL DSA815 TG spektrum analizörü.

5.1.2. AM RF İşaret Yükselteci

RF işaret üretici olarak spektrum analizörün RF çıkışı kullanılır. Fakat işaret gücünün yetersiz olması ve RF çıkışının modülasyonu olmaması sebebiyle harici olarak bir AM modülasyonu özelliği olan RF yükselteciye ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için TEKBOX markasının TBMDA1 (EK B) model RF yükselteci kullanılmıştır. Bu cihaz RF işaret çıkışını standartlarda istenen % 80 AM, 1 KHz, sinüs işareti haline getirerek 10 V/m için gerekli olan ekstra gücü sağlayacaktır.



Şekil 5.3: TEKBOX TBMDA1 modülasyonlu yükselteç.

5.1.3. Yakın Alan Problemleri

Hem TEM hücresinin çalışması beklenen frekans bandı ve bölgelerde doğru çalışıp çalışmadığını kontrol etmek için, hem de lokal olarak yapılacak elektromanyetik uyumluluk testleri için yakın alan problemlerine ihtiyaç duyulur. Bu

testler için Şekil 5.4’de gösterilen RIGOL marka NFP-3 RF model yakın alan problemleri kullanılmıştır. Böylece farklı büyüklükteki antenler sayesinde farklı büyüklükteki komponentlerin testleri daha hassas olarak gerçekleştirilebilecektir.



Şekil 5.4: RIGOL NFP-3 yakın alan prob takımı.

5.2. Doğrulama Testleri

Elektromanyetik bağışıklık testlerini tekrarlamadan önce, tasarlanan TEM hücresi için S_{21} ve hücre içerisinde test alanı olarak belirlenen bölgedeki elektromanyetik yayılımı kontrol ederek, tasarım ve simülasyon arasında uyumsuzluklar olup olmadığı kontrol edilmiştir. S_{21} ölçümleri için sadece spektrum analizörü kullanılırken, elektrik alan dağılımını ölçmek için yakın alan probu kullanılmıştır.

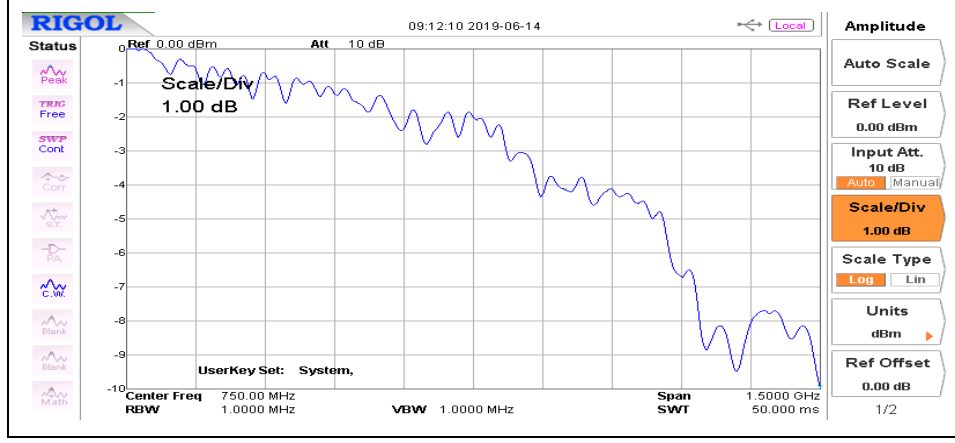
İlk aşamanın tasarımı desteklemesinden sonra belirlenen frekans bandında bağışıklık testleri tekrarlanarak TEM hücresi için ikinci bir doğrulama yapılmıştır.

Bu sonuçlar doğrultusunda tasarlanan TEM hücresinin, sonraki tasarımlar için kullanılabilmesine karar verilmiştir.

5.2.1. S_{21} için Yapılan Ölçümler

S_{21} ölçümleri için spektrum analizör kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 5.5’te verilmiştir. Ölçümler 1.5 GHz frekansına kadar yapılmış olup, ölçüm sonuçları bu frekans bandında 0 dB ile -10 dB arasında kalmaktadır. Grafik kapsamında ölçüm ve simülasyon sonuçları benzer olup prototipleşen tasarımın geçerliliğini destekler niteliktedir.

Bu grafik ayrıca çalışma bölgesinde herhangi etkin bir rezonans olayı oluşmadığını göstermektedir [23]. Bu sebeple, donanımsal olarak iyileştirme çalışmasına gerek görülmemiştir.



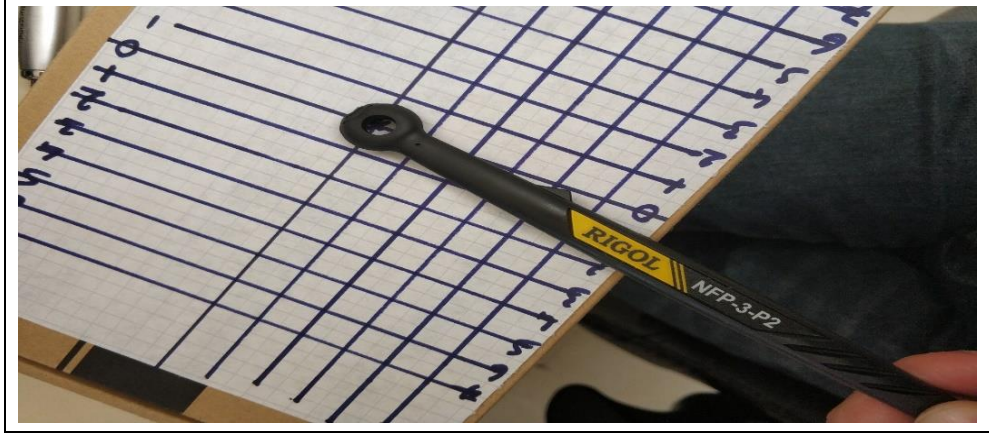
Şekil 5.5: Spektrum analizör ile yapılan S_{21} ölçümü.

5.2.2. Elektrik Alan Dağılımı Ölçümleri

TEM hücre içerisindeki elektrik alan dağılımı $x - y$ düzleminde farklı konumlar için ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de görülen iki farklı açıklıktaki yakın alan probu ile tekrarlanıp sonuçlar karşılaştırılmıştır.



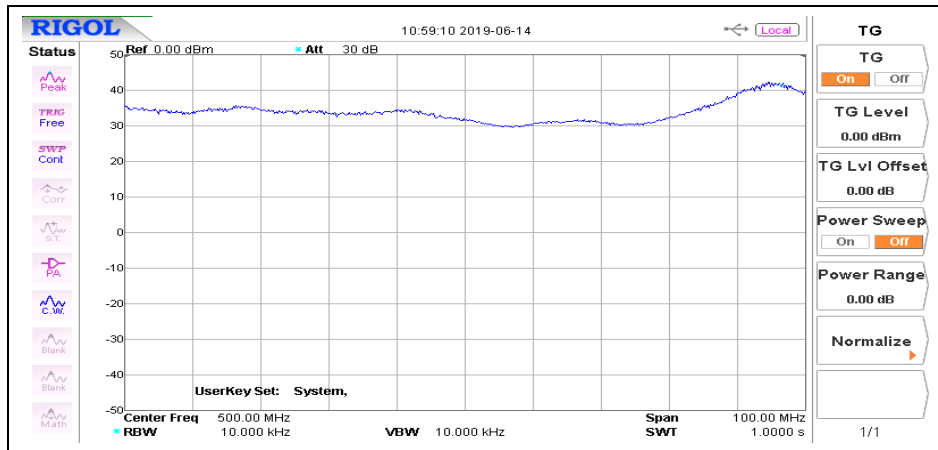
Şekil 5.6: Elektrik alan ölçümü için kullanılan NFP-3-P1 yakın alan probu.



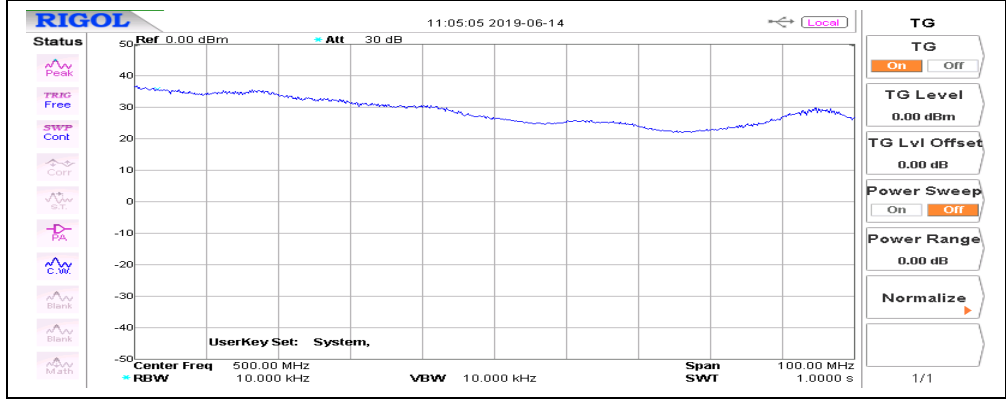
Şekil 5.7: Elektrik alan ölçümü için kullanılan NFP-3-P2 yakın alan probu.

Kullanılan yakın alan problarından NFM-3-P2 kodlu ürün yaklaşık 1 cm^2 bir bölgeyi kaplarken NFP-3-P1 kodlu ürün 4 cm^2 bir bölgeyi kaplamaktadır. Bu ölçümler sırasında merkez olarak (0,0) konumu belirlenip, portların doğrultusu x eksenini, açık bölge y eksenini olarak kabul edilmiştir.

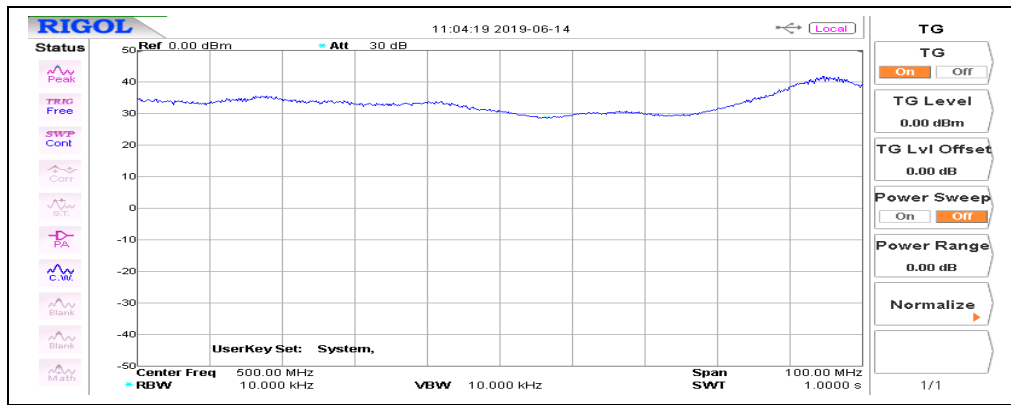
Yapılacak elektrik alan ölçümlerini Şekil 3.14'te gösterilen elektrik alan dağılım simülasyonu sonuçları ile karşılaştırabilmek için ölçümler 450 MHz – 550 MHz bandında alınmıştır. Farklı konumlarda alınan ölçüm sonuçları Şekil 5.8 ve Şekil 5.11 arasında gösterilmiş olup, davranış genel itibari ile birbirine benzerdir.



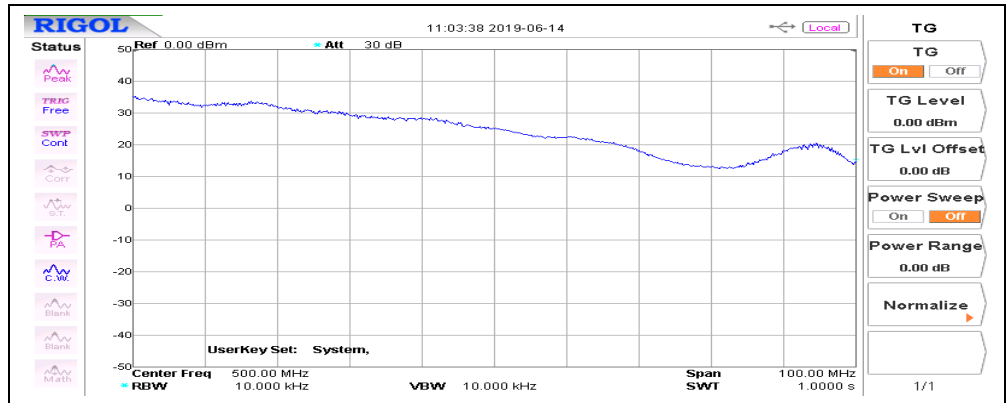
Şekil 5.8: NFP-3-P1 yakın alan probu ile (0,0) konumunda ölçüm.



Şekil 5.9: NFP-3-P1 yakın alan probu ile (0,5) konumunda ölçüm.



Şekil 5.10: NFP-3-P1 yakın alan probu ile (7,0) konumunda ölçüm.



Şekil 5.11: NFP-3-P1 yakın alan probu ile (5,4) konumunda ölçüm.

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da görüldüğü üzere, x eksenindeki yer değiştirme elektrik alanda küçük bir değişime sebep olurken, y eksenindeki hareket test bölgesi sınırlarına gelince daha büyük değişime sebep olmaktadır. Bu durum daha önce sonsuz plakalar için yapılan varsayımın, sonlu plakalarda kullanılmasının sonucu olan ve beklenen bir bozulmadır.

Yine y eksenini sınırı boyunca x eksenini hareketleri merkezden uzaklaşma durumunda elektrik alan zayıflaması artmaktadır.

NFP-3-P2 yakın alan probu kullanılarak tekrarlanan testlerde sonuçlar, NFP-3-P1 yakın alan probu ile yapılan ölçüm sonuçlarına benzer olduğundan, grafiksel sonuçlar eklenmemiştir.

Elde ettiğimiz sonuçlara göre test bölgesi olarak belirlediğimiz alandaki elektrik alan dağılımı, belirlenen frekans bandında homojene yakın olup, kullanılan test cihazlarının toleransları göz önünde bulundurulduğunda onaysız olan ön testler için yeterli görülmüştür. Bu bağlamda prototip üretimi yapılan TEM hücresi kullanıma uygun olarak kabul edilmiştir.

5.3. Elektromanyetik Bağışıklık Testlerinin Tekrarlanması

TEM hücresi simülasyonunda, ANSYS HFSS simülasyon programı sonuçlarına göre 10 V/m elektrik alan şiddetini sağlamak için 25 mW gücüne ihtiyaç duyulmuştur. Burada analitik hesaplama aşamasında

$$E = \frac{V}{d} = \frac{\sqrt{pZ}}{d} \quad (5.1)$$

denklemini kullanılmıştır [14]. Bu denklemde E , hücre merkezindeki elektrik alan şiddetini, p ise TEM hücresine uygulanan sinyal gücünü göstermektedir. Sonsuz paralel levhalar için kullanılan bu denklem yapısı, pratik uygulamada alana özel C_E düzeltme katsayısı ile

$$E = \frac{\sqrt{pZ}}{d} C_E \quad (5.2)$$

denklemine dönüştürülerek kullanılmıştır [14]. Daha önce Denklem (3.16) kullanılarak karar verilen TEM hücresi boyutları ve bu değerler kullanılarak yapılan Şekil 3.5'teki simülasyon sonuçları ile $Z = 50 \Omega$ 'dur. TEM hücresinin girişinden 22 dB şiddetinden sinyal uygulandığında Şekil 5.8'de görüldüğü üzere 33 dB'lik bir ölçüm alınmaktadır. Denklem 5.2 kullanılarak $C_E = 1$ olan simülasyon ve ölçüm

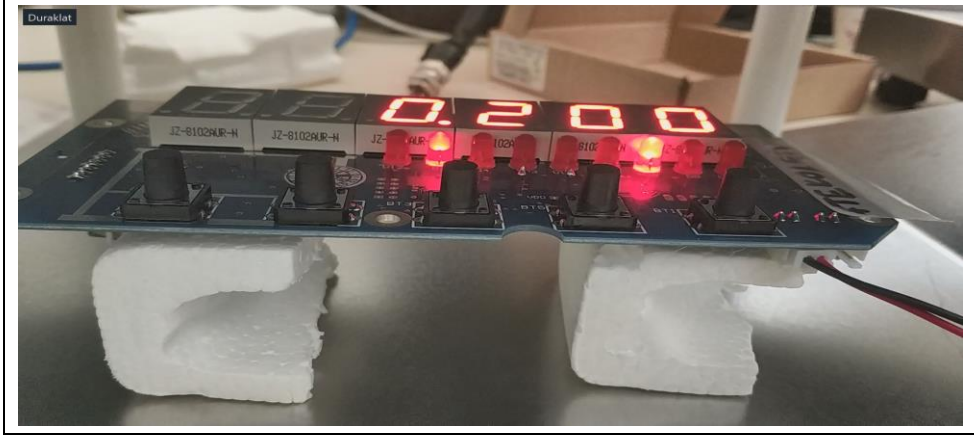
sonuçları eşitlendiğinde, ölçüm alınan deney düzeneği için $C_E = 3.55$ olarak bulunur. Bulunan bu değer hücre içerisindeki konum, aktif çalışma frekansı gibi parametrelere dolaylı yollardan bağlıdır ve bazı sapmalara uğrayabilir.

Denklem (5.2) düzenlenerek, istenen elektrik alan için ihtiyaç duyulan güç

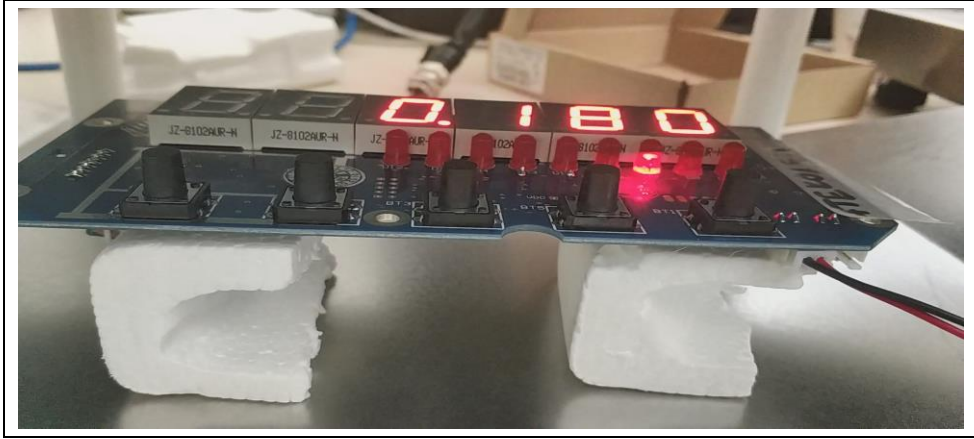
$$p = \frac{\left(\frac{Ed}{C_E}\right)^2}{Z} \quad (5.3)$$

formülü ile hesaplanır. Deney düzeneğinde kayıplar olacağı bilindiğinden, bu kayıpları tolere etmek için Denklem (5.3), $E = 15 \text{ V/m}$ olarak çözümlenmiştir. TEM hücresi merkezinde $E = 15 \text{ V/m}$ elektrik alan elde etmek için TEM hücresi girişine 8.03 mW (9.05 dBm) gücünde işaret uygulanması gerektiği hesaplanmıştır. Bu amaç için kullanılan TBMDA1 yükselteci 1.5 GHz 'in altında $+22 \text{ dBm}$ kazanç sağlamaktadır. Takip üreticinin çıkışı $\pm 3 \text{ dBm}$ toleranslı olmasına rağmen ideal koşul varsayımı ile takip üreticini -13 dBm çıkışa ayarlanıp Şekil 5.1'deki test devresi kurulmuştur.

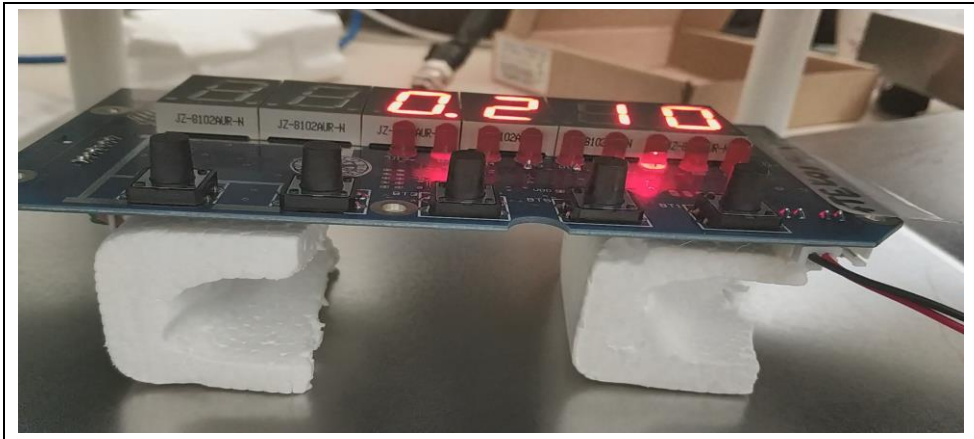
Onaylı kurumlarda yapılan testlerde başarısız olan elektronik kartlar, hata verdikleri frekans bantları arasından rastgele seçilen bazı frekans bölgelerinde tekrar teste sokularak, hataların tekrar ettiği Şekil 5.12 – Şekil 5.14'te görülmüştür. Test senaryosu, kefe üzerine 200 gr 'lık bir ağırlık yerleştirilerek daha önce belirtilen frekans bandında ($220 \text{ MHz} - 1.250 \text{ MHz}$) elektronik kartı 10 V/m şiddetinde elektrik alana maruz bırakmak ve bozulmaları gözlemlemektir. Test sırasında dengenin kaybolması kabul edilebilir olup, aktif test senaryosu için $e = 5 \text{ gr}$ olan bir taksimatlık ağırlık ölçümü bozulması elektronik terazi kartının elektromanyetik bağışıklık testinde başarısız yapar [6].



Şekil 5.12: Test altında doğru çalışan örnek devre kartı.

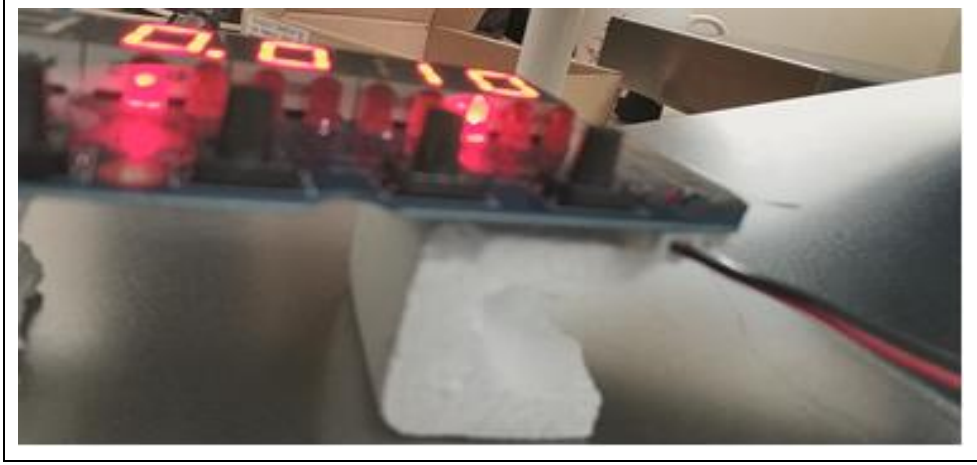


Şekil 5.13: Test altında bozulan devre kartının 210 MHz – 270 MHz bandında ki değeri.



Şekil 5.14: Test altında bozulan devre kartının 390 MHz – 450 MHz bandında ki değeri.

Terazi kefesi boş iken, ağırlık tartımı için kullanılan analog sensor olan yük hücresinden alınan ölçüm sonucu ortam sıcaklığı, nem gibi çevresel etkenlerden dolayı değişime uğrar. Bu değişime karşı terazi yazılımında sıfır takibi dediğimiz bir mod geliştirilmiştir. Bu mod, eğer bahsedilen etkenler kaynaklı değişim saniyede $d/2$ 'den küçükse, terazinin sıfır noktasını bu yeni değere kaydırır. $d = 5$ gr olan terazi ile yapılan testlerde sıfır takibi aktif olmasına rağmen bozulma Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.15: Test altında 870 MHz – 930 MHz bandında, sıfır takibine rağmen bozulan devre kartı.

5.4. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

TEM hücresi kullanılarak yapılan ölçümleri,

- i) Simülasyon ölçümleri ile TEM hücresi ölçümlerinin karşılaştırılması,
 - S_{21} karşılaştırılması,
 - Elektrik alan dağılımı karşılaştırması,
- ii) Bağımsızlık testlerinin tekrarlanması ve sonuçların karşılaştırılması

olarak gruplandırırsak;

Şekil 3.10'da gösterilen S_{21} simülasyon sonucu ile Şekil 5.5'de gösterilen S_{21} ölçüm sonucu büyük oranda benzer olmakta, farkların kullanılan malzemelerin ideal olmamasından ve çevresel etkenlerden kaynaklandığı söylenebilmektedir.

Şekil 3.14'te gösterilen farklı yükseklikler için yapılan elektrik alan simülasyonlarının sonucu, Şekil 5.8'de gösterilen hücre merkezi ve Şekil 5.9'da gösterilen (0,5) konumunda alınan ölçüm sonuçları arasındaki değişimi destekler niteliktedir. Şekil 5.10'da görülen (7,0) konumunda alınan ölçüm sonuçları, Şekil 5.9'a göre merkeze uzaklık daha fazla olmasına rağmen, Şekil 5.8'e daha çok benzemektedir ve kayıplar daha azdır. Bunun sebebi; açık kenarların, hesaplama aşamasında yapılan varsayımları geçersiz kılmasıdır. Kenar kapasiteleri daha etkin hale gelmektedir. Bu bozulma beklenen bir durumdur. Bu değişimi en aza indirmek için üst ve altta bulunan dış plakalar ve septum daha geniş tasarlanabilir.

Bu ölçüm sonuçları kullanılarak belirlenen C_E parametresi ve diğer tasarım parametreleri kullanılarak yapılan güç–elektrik alan dönüşümleri, elektromanyetik bağışıklık testlerinin tekrarı ile ispatlanmıştır. Seçilen frekans bantlarında tekrarlanan testlerin neredeyse tamamında, onaylı testlerde karşılaşılan bozulmalar tekrar etmiştir.

6. SONUÇLAR

Elektronik terazi kartı boyutlarına göre karar verilen test alanı ve teorik bilgiler kullanılarak TEM hücresi boyutları belirlenmiştir. Bu boyutlar kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları, TEM hücresi için karar verilen boyutları desteklemektedir. Bu bilgiler ışığında üretilen TEM hücresi ile yaptığımız deney sonuçları, onaylı test kuruluşlarından elde edilen sonuçlar ile büyük oranda benzer olup, AR-GE ortamında yapılacak ön testler için yeterli düzeyde olduğu görülmektedir.

Ayrıca tez kapsamında olmadığından bahsedilmeyen, elektronik terazilerin uygunluğu için gerekli elektromanyetik yayılım testleri de tekrarlanmıştır. Bu test sonuçları da onaylı kurumlarda yapılan test sonuçlarına büyük oranda benzerlik göstermektedir.

6.1. TEM Hücre Performansı Yorumlaması

Yakın alan problemleri kullanılarak, TEM hücre içindeki farklı bölgeler için frekans değişimine bağlı elektrik alan şiddeti ölçüm sonuçları Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da gösterildiği gibidir.

Şekil 5.8'de gösterildiği üzere, hücre merkezindeki frekans değişimine bağlı olarak elektrik alan şiddetinde ± 5 dB' den az bir dalgalanma görülmektedir. İşaret üreticinin ± 3 dB'lik değişimi düşünüldüğünde bu fark kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 5.9'de gösterildiği üzere, hücre merkezinden açık kenarlara doğru ilerledikçe elektrik alan şiddeti değişimi artmakta ve ± 8 dB'e kadar çıkmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak, ilk kurulum anında bu dalgalanmadan en az şekilde etkilenecek sistemler geliştirilebilir.

Şekil 5.10'da gösterildiği üzere, kapalı kenarlara doğru hareket elektrik alan değişimini etkilememekte, ± 5 dB tolerans iddiası sağlanmaktadır. Merkezde olduğu gibi bu değişim kabul edilebilir bir dalgalanmadır.

6.2. Bağışıklık Deneyleri Yorumlaması

Tekrarlanan bağışıklık testlerinde, onaylı laboratuvarında ağırlık değişimi görülen bütün bölgelerde aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum dışında, bazı bölgelerde ağırlık değişimi olmamasına rağmen denge durumunun bozulduğu grlmştir. Bunun sebebi, deneylerde TEM hücresine uygulanan işareti, 15 V/m elektrik alan şiddeti sağlayacak şekilde belirlenmiş olmasıdır. Bu sayede kritik bölgeler de tespit edilebilmiştir.

6.3. Gelecekte Planlanan alışmalar

Tasarlanan TEM hücresi, elektromanyetik uyumluluk için gerekli elektromanyetik bağışıklık testleri yanı sıra, elektromanyetik yayılım testleri için de kullanılabilir. TEM hücresi kullanılarak herhangi bir kusurlu yayılım için var-yok kararı verilebilir. Yayılım olması durumunda, yakın alan problemleri kullanılabilir, hata lokal olarak tespit edilebilir. Bu lokal tespitler sayesinde çözümler çok daha hızlı olup, ürünün pazara çıkma süresi en aza indirilerek potansiyel müşteri kaybı da azaltılabilir. Böylece rakiplerin bir adım önüne geçilebilir.

Bu test ortamı kullanılarak AR-GE merkezlerine sertifikasyon öncesindeki birçok elektromanyetik uyumluluk test prosedürlerini kendi bünyesinde yapabilmek yeteneği kazandırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Armstrong K., (2002), "New guidance on EMC and safety for machinery manufacturers", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 680-685, Minneapolis, MN, USA, 19-23 August.
- [2] IEC, (2006), Testing and measurement techniques, Radiated radio frequency electromagnetic field immunity test, IEC 61000-4-3, International Electrotechnical Commission.
- [3] IEC, (2005), Integrated circuits-Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz-Part 2: Measurement of radiated emissions-TEM cell and wideband TEM cell method, IEC 61967-2:2005, International Electrotechnical Commission.
- [4] IEC, (2010), Integrated circuits-Measurement of electromagnetic immunity-Part 2: Measurement of radiated immunity-TEM cell and wideband TEM cell method, IEC 62132-2:2010, International Electrotechnical Commission.
- [5] IEC, (2011), Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-21: Testing and measurement techniques-Reverberation chamber test methods, IEC 61000-4-21:2011, International Electrotechnical Commission.
- [6] OIML, (2006), Non-automatic weighing instruments-Metrological and technical requirements-Tests, OIML R 76-1, International Organization of Legal Metrology.
- [7] Bentz S., (1996), "Use of the TEM cell for compliance testing of emissions and immunity, an IEC perspective", Proceedings of Symposium on Electromagnetic Compatibility, 43-47, Santa Clara, CA, USA, 19-23 August.
- [8] Sathyamurthy S., (2003), "Immunity measurements using strip transmission lines and family of TEM cells", 8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 261-268, Chennai, India, 18-19 December.
- [9] Christopoulos C., (2007), "Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility", 2. Edition, CRC Press.
- [10] Kantartzis N. V., Tsiboukis T. D., (2008), "Modern EMC Analysis Techniques Volume II: Models and Applications", Morgan & Claypool.
- [11] Crawford M. L., (1974), "Generation of standard EM fields using TEM transmission cells", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 16 (4), 189-195.

- [12] Pozar D. M., (2009), "Microwave Engineering", 3. Edition, John Wiley & Sons.
- [13] Cheng D. K., (1989), "Field and Wave Electromagnetics", 2. Edition, Addison-Wesley.
- [14] Satav S. M., Agarwal V., (2008), "Do-it-yourself fabrication of an open TEM cell for EMC pre-compliance", IEEE EMC Society Newsletter, 218 (2), 66-71.
- [15] Boriraksantikul N., (2008), "A TEM cell design to study electromagnetic radiation exposure from cellular phones", Master Thesis, University of Missouri-Columbia.
- [16] Web 1, (2019), <http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php>, (Erişim Tarihi: 11/06/2019).
- [17] Web 2, (2019), <http://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>, (Erişim Tarihi: 12/06/2019).
- [18] Chechetkin V., Korotkov A., Golubenko E., Sychugov E., Smirnov P., (2019), "Investigation of the characteristics of the TEM cell model", Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, Yekaterinburg, Russia, 25-26 April.
- [19] Wen L., Yalin G., Jin L., (2016), "Three new strip-line TEM cells in EMC test", IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology, Harbin, China, 20-22 August.
- [20] Ambati B. N., Botsa V. R., Munaka S. K., Bandaru S., (2018), "Modeling, simulation & validation of TEM cell for short pulse sensor Verification", 15th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility, Bengaluru (Bangalore), India, 13-16 November.
- [21] Paffi A., Liberti M., Fratta F., Apollonio F., Merla C., Pinto R., Lovisolo G., (2012), "A TEM cell system for in vivo exposure at 2.45 GHz", 6th European Conference on Antennas and Propagation, Prague, Czech Republic, 26-30 March.
- [22] Fei D., Mi W., Donglin S., (2005), "A design of new twin TEM cells", IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Beijing, China, 8-12 August.
- [23] Wen S., Zhang J., Lv Y., (2015), "The optimization design of septum in TEM cells for IC EMC Measurement", 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, Hangzhou, China, 4-7 November.

ÖZGEÇMİŞ

Yahya AKDAĞ 1991 yılında Trabzon’da doğdu. 2009 yılında başladığı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2014 yılında başarıyla tamamlayarak, aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2013 yılından beri farklı firmalarda Elektronik AR-GE mühendisi olarak çalışan Yahya AKDAĞ, 2015 yılından bu yana Tüm Elektronik Mühendislik firmasında AR-GE mühendisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

EK A: Onaylı Kurumlarda Yapılan Yankısız Oda Bağışıklık Testleri

rev: v2		Test yükü: 200	Maks çeker: 6	Test ünitesi: 9							
1	Test yönü - önden bakınca (sağ) (sol) (ön) (arka)	Sinyal Yönü (Yatay) (Dikey)	Tarih:								
2	Test yönü - önden bakınca (sağ) (sol) (ön) (arka)	Sinyal Yönü (Yatay) (Dikey)	Tarih:								
3	Test yönü - önden bakınca (sağ) (sol) (ön) (arka)	Sinyal Yönü (Yatay) (Dikey)	Tarih:								
Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)
1	200,1	1.711410		1		1.711410		1		1.711410	
1		1.728525		1		1.728525		1		1.728525	
1.010000		1.745810		1.010000		1.745810		1.010000		1.745810	
1.020100		1.763268	200	1.020100		1.763268		1.020100		1.763268	
1.030301		1.780901		1.030301		1.780901		1.030301		1.780901	
1.040604	200	1.798710	200,1	1.040604		1.798710		1.040604		1.798710	
1.051010	200,1	1.816697		1.051010		1.816697		1.051010		1.816697	
1.061520		1.834864		1.061520		1.834864		1.061520		1.834864	
1.072135		1.853212	200	1.072135		1.853212		1.072135		1.853212	
1.082857		1.871744		1.082857		1.871744		1.082857		1.871744	
1.093685		1.890462		1.093685		1.890462		1.093685		1.890462	
1.104622		1.909366		1.104622		1.909366		1.104622		1.909366	
1.115668	200,7	1.928460	199,5	1.115668		1.928460		1.115668		1.928460	
1.126825	201,4	1.947745	199,6	1.126825		1.947745		1.126825		1.947745	
1.138093	202,3	1.967222	199,7	1.138093		1.967222		1.138093		1.967222	
1.149474	203,6	1.986894	199,8	1.149474		1.986894		1.149474		1.986894	
1.160969	206,6	2.006763		1.160969		2.006763		1.160969		2.006763	
1.172579	208,6	2.026831	199,9	1.172579		2.026831		1.172579		2.026831	
1.184304		2.047099		1.184304		2.047099		1.184304		2.047099	
1.196147	206,9	2.067570		1.196147		2.067570		1.196147		2.067570	
1.208109	206,4	2.088246		1.208109		2.088246		1.208109		2.088246	
1.220190	202,4	2.109128		1.220190		2.109128		1.220190		2.109128	
1.232392		2.130220		1.232392		2.130220		1.232392		2.130220	
1.244716	201,6	2.151522		1.244716		2.151522		1.244716		2.151522	
1.257163	200,1	2.173037		1.257163		2.173037		1.257163		2.173037	
1.269735		2.194768		1.269735		2.194768		1.269735		2.194768	
1.282432		2.216715		1.282432		2.216715		1.282432		2.216715	
1.295256	200,9	2.238882		1.295256		2.238882		1.295256		2.238882	
1.308209	201,0	2.261271		1.308209		2.261271		1.308209		2.261271	
1.321291	201,4	2.283884		1.321291		2.283884		1.321291		2.283884	
1.334504	201,0	2.306723		1.334504		2.306723		1.334504		2.306723	
1.347849	200,9	2.329790		1.347849		2.329790		1.347849		2.329790	
1.361327	200,8	2.353088		1.361327		2.353088		1.361327		2.353088	
1.374941	200,4	2.376619		1.374941		2.376619		1.374941		2.376619	
1.388690		2.400385		1.388690		2.400385		1.388690		2.400385	
1.402577		2.424389		1.402577		2.424389		1.402577		2.424389	
1.416603	200,2	2.448633		1.416603		2.448633		1.416603		2.448633	
1.430769		2.473119		1.430769		2.473119		1.430769		2.473119	
1.445076		2.497850		1.445076		2.497850		1.445076		2.497850	
1.459527		2.522829		1.459527		2.522829		1.459527		2.522829	
1.474123		2.548057		1.474123		2.548057		1.474123		2.548057	
1.488864		2.573538		1.488864		2.573538		1.488864		2.573538	
1.503752		2.599273		1.503752		2.599273		1.503752		2.599273	
1.518790				1.518790				1.518790			
1.533978	200,2			1.533978				1.533978			
1.549318	200,4			1.549318				1.549318			
1.564811				1.564811				1.564811			
1.580459				1.580459				1.580459			
1.596263				1.596263				1.596263			
1.612226	200,2			1.612226				1.612226			
1.628348				1.628348				1.628348			
1.644632				1.644632				1.644632			
1.661078	199,9			1.661078				1.661078			
1.677689	199,8			1.677689				1.677689			
1.694466	199,2			1.694466				1.694466			

Tablo A1.1: 08.02.2016 tarihli, 1 GHz – 2 GHz frekans bandında 10 V/m elektrik alan şiddeti altında 200 gr ile yapılan testlerin göz takibi sonuçları

rev: v2	Test yükü:	100gr	Maks çekme:	30kg	Test ünitesi:	SRP (Intensiv)				
Terazi yönü - önden bakınca		(sağ)	(sol)	(ön)	(arka)	Sinyal Yönü	(Hata)	(Dikey)	Tarih:	20.06.17
Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)	
1		138.28197		241.41401		421.46296		735.79417		
80		139.66479		243.82815	+14	425.67759		743.15211	-0.5	
80.80000		141.06143		246.26644	+15	429.93436		750.58363		
81.60800		142.47205		248.72910	+12	434.23370		758.08947		
82.42408		143.89677		251.21639	+15	438.57604		765.67036		
83.24832		145.33574		253.72855	14	442.96180		773.32706		
84.08080		146.78909		256.26584	15	447.39142		781.06033		
84.92161		148.25698		258.82850	12	451.86533		788.87094		
85.77083		149.73955		261.41678	10	456.38399		796.75965		
86.62854		151.23695		264.03095	10	460.94783		804.72724		
87.49482		152.74932		266.67126	8	465.55731		812.77452		
88.36977		154.27681		269.33797	8	470.21288		820.90226		
89.25347		155.81958		272.03135	5	474.91501		829.11128		
90.14600		157.37778		274.75167	5	479.66416		837.40240		
91.04746		158.95155		277.49918	3	484.46080		845.77642		
91.95794		160.54107		280.27418	2	489.30541		854.23419		
92.87752		162.14648		283.07692	1.5	494.19846		862.77653		
93.80629		163.76794		285.90769	1.5	499.14045		871.40429		
94.74435		165.40562		288.76676	1	504.13185		880.11834	-1	
95.69180		167.05968		291.65443		509.17317		888.91952		
96.64872		168.73028		294.57098		514.26490		897.80871		
97.61520		170.41758		297.51668	1	519.40755		906.78680	-1.5	
98.59136		172.12176		300.49185	0.5	524.60163		915.85467	-1.5	
99.57727		173.84297		303.49677		529.84764		925.01322	-1	
100.57304		175.58140		306.53174		535.14612		934.26335	-0.5	
101.57877		177.33722		309.59706		540.49758		943.60598	"	
102.59456		179.11059		312.69303		545.90256		953.04204	"	
103.62051		180.90170		315.81996		551.36158		962.57246	-1	
104.65671		182.71071		318.97816	0.5	556.87520		972.19819	-1	
105.70328		184.53782		322.16794		562.44395		981.92017	-1	
106.76031		186.38320		325.38962		568.06839		991.73937	-0.5	
107.82791		188.24703		328.64351		573.74907		1001.65676	-0.5	
108.90619		190.12950		331.92995		579.48656				
109.99525		192.03079		335.24925	0.5	585.28143				
111.09521		193.95110		338.60174	0.5	591.13424				
112.20616		195.89061		341.98776	0.5	597.04558				
113.32822		197.84952		345.40763		603.01604				
114.46150		199.82802		348.86171		609.04620				
115.60612		201.82630		352.35033		615.13666				
116.76218		203.84456		355.87383		621.28803				
117.92980		205.88300		359.43257	-1	627.50091				
119.10910		207.94183		363.02690	-1.5	633.77592				
120.30019		210.02125		366.65716		640.11368				
121.50319		212.12146		370.32374		646.51482				
122.71822		214.24268		374.02697	-2	652.97996				
123.94541		216.38511		377.76724		659.50976				
125.18486		218.54896	+1	381.54492	-1	666.10486				
126.43671		220.73445	2	385.36036		672.76591				
127.70108		222.94179		389.21397	-2	679.49357				
128.97809		225.17121		393.10611	-1.5	686.28850				
130.26787		227.42292	-2.5	397.03717	-0.5	693.15139				
131.57055		229.69715	3.5	401.00754		700.08290				
132.88625		231.99412	7	405.01762		707.08373				
134.21511		234.31406	7	409.06779		714.15457				
135.55726		236.65720	+10	413.15847		721.29611				
136.91284		239.02378	+12	417.29006		728.50908				

Tablo A1.2: 20.06.2017 tarihli, 80 MHz - 1 GHz frekans bandında 10 V/m elektrik alan şiddeti altında 200 gr ile yapılan testlerin göz takibi sonuçları

REV. VZ	1	Test yükü:	Maks çekir:	Test ünitesi:	Sinyal Yönü (Yatay) (Dikey)	Tarih:					
	1	200,5	30kg	BND	(Dikey)	20.06.17					
	2	200,5	30kg	BND	(Dikey)	20.06.17					
	3	200,5	30kg	BND	(Dikey)	20.06.17					
Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)
1		1.711410		1		1.711410		1		1.711410	
		1.728525				1.728525	//			1.728525	
1.010000	200	1.745810	200,0	1.010000	200,5	1.745810		1.010000		1.745810	
1.020100		1.763268		1.020100		1.763268	//	1.020100		1.763268	
1.030301		1.780901		1.030301		1.780901		1.030301		1.780901	
1.040604	//	1.798710	199,0	1.040604	//	1.798710		1.040604		1.798710	
1.051010		1.816697		1.051010		1.816697	//	1.051010		1.816697	
1.061520	//	1.834864		1.061520		1.834864		1.061520		1.834864	
1.072135		1.853212	199,0	1.072135		1.853212	//	1.072135		1.853212	
1.082857		1.871744	198,0	1.082857		1.871744		1.082857		1.871744	
1.093685		1.890462		1.093685	//	1.890462	//	1.093685		1.890462	
1.104622	//	1.909366	199,5	1.104622		1.909366	199,0	1.104622		1.909366	
1.115668		1.928460		1.115668		1.928460		1.115668		1.928460	
1.126825		1.947745	199,0	1.126825	//	1.947745		1.126825		1.947745	
1.138093	//	1.967222	199,5	1.138093		1.967222	200	1.138093		1.967222	
1.149474		1.986894		1.149474	200,0	1.986894		1.149474		1.986894	
1.160969		2.006763	200,0	1.160969		2.006763	199,0	1.160969		2.006763	
1.172579		2.026831	198,5	1.172579		2.026831		1.172579		2.026831	
1.184304	200,5	2.047099		1.184304		2.047099		1.184304		2.047099	
1.196147		2.067570	196,5	1.196147	//	2.067570	200,5	1.196147		2.067570	
1.208109		2.088246		1.208109		2.088246	//	1.208109		2.088246	
1.220190		2.109128		1.220190		2.109128		1.220190		2.109128	
1.232392		2.130220	198,0	1.232392	//	2.130220	199,0	1.232392		2.130220	
1.244716	//	2.151522	197,8	1.244716		2.151522		1.244716		2.151522	
1.257163		2.173037		1.257163		2.173037	198,0	1.257163		2.173037	
1.269735		2.194768	199,0	1.269735		2.194768		1.269735		2.194768	
1.282432		2.216715		1.282432		2.216715		1.282432		2.216715	
1.295256		2.238882	199,0	1.295256	//	2.238882	199,5	1.295256		2.238882	
1.308209	//	2.261271		1.308209		2.261271		1.308209		2.261271	
1.321291		2.283884		1.321291		2.283884	200	1.321291		2.283884	
1.334504		2.306723		1.334504	//	2.306723		1.334504		2.306723	
1.347849		2.329790	197,5	1.347849		2.329790		1.347849		2.329790	
1.361327		2.353088	195,0	1.361327		2.353088	//	1.361327		2.353088	
1.374941	//	2.376619	198,0	1.374941		2.376619		1.374941		2.376619	
1.388690		2.400385	196,5	1.388690	//	2.400385	//	1.388690		2.400385	
1.402577		2.424389	197,0	1.402577		2.424389		1.402577		2.424389	
1.416603	//	2.448633	196,5	1.416603		2.448633		1.416603		2.448633	
1.430769		2.473119	198	1.430769	//	2.473119	//	1.430769		2.473119	
1.445076		2.497850	199,0	1.445076		2.497850		1.445076		2.497850	
1.459527		2.522829	199,0	1.459527	//	2.522829	199,5	1.459527		2.522829	
1.474123		2.548057		1.474123		2.548057		1.474123		2.548057	
1.488864	//	2.573538	200,5	1.488864	//	2.573538	199,0	1.488864		2.573538	
1.503752	200,0	2.599273		1.503752		2.599273		1.503752		2.599273	
1.518790				1.518790				1.518790			
1.533978				1.533978				1.533978			
1.549318				1.549318	//			1.549318			
1.564811	200,5			1.564811				1.564811			
1.580459	//			1.580459	//			1.580459			
1.596263				1.596263				1.596263			
1.612226				1.612226	//			1.612226			
1.628348				1.628348				1.628348			
1.644632				1.644632	//			1.644632			
1.661078	//			1.661078				1.661078			
1.677689				1.677689				1.677689			
1.694466				1.694466	//			1.694466			

Tablo A1.3: 20.06.2017 tarihli, 1 GHz – 2.6 GHz frekans bandında 10 V/m elektrik alan şiddeti altında 200 gr ile yapılan testlerin göz takibi sonuçları

rev: v2	Test yükü:	200gr	Maks çekir:	30kg	Test ünitesi:	(Intusi) SEP			
Terazi yönü - önden bakınca (sağ) (sol) (arka)		Sinyal Yönü (yatay) (Dikey)		Tarih:		20.06.17			
Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)
1		138.28197		241.41401		421.46296		735.79417	
80		139.66479	0.5	243.82815	1	425.67759		743.15211	-1
80.80000		141.06143	0.5	246.26644	1	429.93436		750.58363	-0.5
81.60800		142.47205	0.5	248.72910	0.5	434.23370		758.08947	-0.5
82.42408		143.89677		251.21639	"	438.57604		765.67036	-0.5
83.24832		145.33574		253.72855	1	442.96180		773.32706	-0.5
84.08080		146.78909		256.26584	1	447.39142		781.06033	0.5
84.92161		148.25698	0.5	258.82850	"	451.86533		788.87094	-
85.77083		149.73955	-	261.41678	2	456.38399	-0.5	796.75965	-
86.62854		151.23695	-	264.03095	0.5	460.94783		804.72724	-
87.49482		152.74932		266.67126	"	465.55731		812.77452	-
88.36977		154.27681		269.33797	2	470.21288		820.90226	-
89.25347		155.81958		272.03135	0.5	474.91501	-0.5	829.11128	-
90.14600		157.37778	-	274.75167	-	479.66416		837.40240	-
91.04746		158.95155		277.49918		484.46080		845.77642	-
91.95794		160.54107		280.27418		489.30541		854.23419	-
92.87752		162.14648		283.07692		494.19846		862.77653	-
93.80629		163.76794		285.90769		499.14045	-1	871.40429	-
94.74435		165.40562		288.76676		504.13185	-0.5	880.11834	-1
95.69180		167.05968		291.65443		509.17317	-1	888.91952	-1
96.64872		168.73028		294.57098		514.26490		897.80871	-1
97.61520		170.41758		297.51668		519.40755	-1	906.78680	π
98.59136		172.12176		300.49185		524.60163		915.85467	-0.5
99.57727		173.84297		303.49677		529.84764		925.01322	4
100.57304		175.58140		306.53174		535.14612	-0.5	934.26335	-
101.57877		177.33722		309.59706		540.49758		943.60598	-
102.59456		179.11059		312.69303		545.90256		953.04204	-
103.62051		180.90170		315.81996		551.36158		962.57246	-
104.65671		182.71071		318.97816		556.87520		972.19819	-
105.70328		184.53782		322.16794		562.44395		981.92017	-
106.76031		186.38320		325.38962		568.06839		991.73937	-
107.82791		188.24703		328.64351		573.74907		1001.65676	-
108.90619		190.12950		331.92995		579.48656			
109.99525		192.03079		335.24925		585.28143			
111.09521		193.95110		338.60174		591.13424			
112.20516		195.89061		341.98776		597.04558			
113.32822		197.84952		345.40763		603.01604			
114.46150		199.82802		348.86171		609.04620	-0.5		
115.60612		201.82630		352.35033	-0.5	615.13666	-1		
116.76218		203.84456		355.87383		621.28803	-1		
117.92980		205.88300		359.43257		627.50091	-1		
119.10910		207.94183		363.02690	-1	633.77592	-1		
120.30019		210.02125		366.65716	4	640.11368	-0.5		
121.50319		212.12146		370.32374	4	646.51482	4		
122.71822		214.24268		374.02697	-0.5	652.97996	4		
123.94541		216.38511		377.76724	-0.5	659.50976	4		
125.18486		218.54896		381.54492	-	666.10486	-0.5		
126.43671		220.73445		385.36036	-	672.76591	-1		
127.70108		222.94179		389.21397		679.49357			
128.97809		225.17121	-	393.10611		686.28850			
130.26787		227.42292	-	397.03717		693.15139			
131.57055		229.69715	0.5	401.00754		700.08290			
132.88625		231.99412	0.5	405.01762		707.08373			
134.21511		234.31406	-	409.06779		714.15457			
135.55726		236.65720	-	413.15847		721.29611			
136.91284		239.02378	-	417.29006		728.50908			

Tablo A1.4: 20.06.2017 tarihli, 80 MHz – 1 GHz frekans bandında 10 V/m elektrik alan şiddeti altında 200 gr ile yapılan testlerin göz takibi sonuçları

rev: v2	1	Test yükü:	200,5	Maks çekme:	30kg	Test ünitesi:	OND	Sinyal Yönü (Yatay) (Dikey)	Tarih:	20.06.17	
	2	Terazi yönü:	Önden bakınca (sağ) (sol)	Önden bakınca (sağ) (sol)	Ön (arka)	Test ünitesi:	OND	Sinyal Yönü (Yatay) (Dikey)	Tarih:	20.06.17	
	3	Test yükü:		Maks çekme:		Test ünitesi:		Sinyal Yönü (Yatay) (Dikey)	Tarih:		
		Terazi yönü:	Önden bakınca (sağ) (sol)	Önden bakınca (sağ) (sol)	Ön (arka)	Test ünitesi:		Sinyal Yönü (Yatay) (Dikey)	Tarih:		
rekans(MHz)	Hata (123gr)	rekans(MHz)	Hata (123gr)	rekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)
1		1.711410	200,0	1		1.711410		1		1.711410	
1.010000	200,0	1.728525		1	200	1.728525	11	1		1.728525	
1.020100		1.745810	11	1.010000		1.745810		1.010000		1.745810	
1.030301	11	1.763268		1.020100	11	1.763268	11	1.020100		1.763268	
1.040604		1.780901		1.030301		1.780901		1.030301		1.780901	
1.051010	4	1.798710	11	1.040604	11	1.798710	11	1.040604		1.798710	
1.061520		1.816697		1.051010		1.816697		1.051010		1.816697	
1.072135	11	1.834864	199,5	1.061520		1.834864	11	1.061520		1.834864	
1.082857		1.853212		1.072135	11	1.853212	199,5	1.072135		1.853212	
1.093685	11	1.871744		1.082857		1.871744		1.082857		1.871744	
1.104622		1.890462	11	1.093685		1.890462	198,5	1.093685		1.890462	
1.115668	11	1.909366	199,0	1.104622		1.909366	192,0	1.104622		1.909366	
1.126825		1.928460		1.115668		1.928460		1.115668		1.928460	
1.138093		1.947745	199,5	1.126825		1.947745		1.126825		1.947745	
1.149474	11	1.967222		1.138093	11	1.967222	199,5	1.138093		1.967222	
1.160969		1.986894	11	1.149474		1.986894		1.149474		1.986894	
1.172579		2.006763	11	1.160969		2.006763	11	1.160969		2.006763	
1.184304	11	2.026831	199,0	1.172579		2.026831		1.172579		2.026831	
1.196147	11	2.047099	199,5	1.184304		2.047099	199,5	1.184304		2.047099	
1.208109		2.067570	11	1.196147	11	2.067570		1.196147		2.067570	
1.220190		2.088246	11	1.208109		2.088246	200	1.208109		2.088246	
1.232392	11	2.109128	11	1.220190	200,5	2.109128		1.220190		2.109128	
1.244716		2.130220	199,5	1.232392		2.130220	199,0	1.232392		2.130220	
1.257163	11	2.151522	11	1.244716	200,0	2.151522		1.244716		2.151522	
1.269735		2.173037	199,5	1.257163		2.173037	199,0	1.257163		2.173037	
1.282432		2.194768	199,0	1.269735		2.194768	199,5	1.269735		2.194768	
1.295256		2.216715	199,0	1.282432	11	2.216715	199,5	1.282432		2.216715	
1.308209	11	2.238882		1.295256		2.238882		1.295256		2.238882	
1.321291		2.261271	199,5	1.308209	11	2.261271	199,5	1.308209		2.261271	
1.334504		2.283884		1.321291		2.283884	199,5	1.321291		2.283884	
1.347849	11	2.306723	200	1.334504		2.306723	199,5	1.334504		2.306723	
1.361327		2.329790		1.347849	11	2.329790	199,0	1.347849		2.329790	
1.374941		2.353088	11	1.361327		2.353088	199,5	1.361327		2.353088	
1.388690		2.376619	11	1.374941		2.376619	199,5	1.374941		2.376619	
1.402577		2.400385		1.388690		2.400385	199,5	1.388690		2.400385	
1.416603	11	2.424389	11	1.402577	11	2.424389	199,5	1.402577		2.424389	
1.430769		2.448633		1.416603		2.448633	199,0	1.416603		2.448633	
1.445076		2.473119		1.430769		2.473119	199,5	1.430769		2.473119	
1.459527	200,0	2.497850	11	1.445076	11	2.497850	199,5	1.445076		2.497850	
1.474123		2.522829	11	1.459527		2.522829	199,0	1.459527		2.522829	
1.488864		2.548057		1.474123		2.548057		1.474123		2.548057	
1.503752	11	2.573538		1.488864		2.573538		1.488864		2.573538	
1.518790		2.599273		1.503752	11	2.599273		1.503752		2.599273	
1.533978		1.518790		1.518790		1.518790		1.518790		1.518790	
1.549318	200,5	1.533978		1.533978		1.533978		1.533978		1.533978	
1.564811		1.549318	11	1.549318	11	1.549318		1.549318		1.549318	
1.580459	11	1.564811		1.564811		1.564811		1.564811		1.564811	
1.596263		1.580459		1.580459		1.580459		1.580459		1.580459	
1.612226	11	1.596263		1.596263		1.596263		1.596263		1.596263	
1.628348	200,0	1.612226	11	1.612226	11	1.612226		1.612226		1.612226	
1.644632		1.628348		1.628348		1.628348		1.628348		1.628348	
1.661078		1.644632	11	1.644632	11	1.644632		1.644632		1.644632	
1.677689		1.661078		1.661078		1.661078		1.661078		1.661078	
1.694466	11	1.677689		1.677689		1.677689		1.677689		1.677689	
		1.694466	11	1.694466	11	1.694466		1.694466		1.694466	

Tablo A1.5: 20.06.2017 tarihli, 1 GHz – 2.6 GHz frekans bandında 10 V/m elektrik alan şiddeti altında 200 gr ile yapılan testlerin göz takibi sonuçları

rev: v2	Test yükü:	200gr		Maks çeker:	30kg		Test ünitesi:	GND	
Terazi yönü - önden bakınca	Sağ (sol) (ön) (arka)	Sinyal Yönü (Yatay) (Dikey)	Tarih:	20.06.17					
Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)
1		138.28197		241.41401		421.46296		735.79417	
80		139.66479		243.82815		425.67759		743.15211	
80.80000		141.06143	//	246.26644	197,0	429.93436	//	750.58363	199,0
81.60800	199,5	142.47205		248.72910	196,5	434.23370		758.08947	
82.42408		143.89677		251.21639	196,5	438.57604	4	765.67036	
83.24832		145.33574		253.72855		442.96180		773.32706	//
84.08080	//	146.78909	//	256.26584	196,5	447.39142		781.06033	
84.92161		148.25698	199,0	258.82850	197,0	451.86533	//	788.87094	
85.77083	//	149.73955		261.41678		456.38399		796.75965	//
86.62854		151.23695	198,0	264.03095		460.94783	//	804.72724	199,5
87.49482		152.74932		266.67126	196,5	465.55731		812.77452	
88.36977		154.27681	199,0	269.33797		470.21288	-	820.90226	199,0
89.25347		155.81958		272.03135		474.91501	//	829.11128	
90.14600		157.37778	199,5	274.75167	195,5	479.66416		837.40240	//
91.04746	//	158.95155		277.49918		484.46080		845.77642	
91.95794		160.54107		280.27418	197,0	489.30541	//	854.23419	199,5
92.87752		162.14648		283.07692		494.19846		862.77653	199,0
93.80629		163.76794		285.90769	195,5	499.14045		871.40429	
94.74435		165.40562	//	288.76676	200,0	504.13185		880.11834	//
95.69180		167.05968		291.65443		509.17317	//	888.91952	
96.64872	//	168.73028		294.57098		514.26490		897.80871	//
97.61520		170.41758		297.51668	201,0	519.40755		906.78680	
98.59136		172.12176		300.49185		524.60163	200,	915.85467	//
99.57727	200	173.84297	//	303.49677	204,5	529.84764		925.01322	
100.57304	199,5	175.58140		306.53174		535.14612	200,5	934.26335	//
101.57877	//	177.33722		309.59706	200	540.49758		943.60598	199,5
102.59456		179.11059	//	312.69303		545.90256	201,0	953.04204	
103.62051		180.90170		315.81996		551.36158	200	962.57246	
104.65671	200,0	182.71071		318.97816	200	556.87520	199,5	972.19819	//
105.70328		184.53782		322.16794		562.44395		981.92017	
106.76031	199,5	186.38320	//	325.38962	199,5	568.06839	199,0	991.73937	//
107.82791		188.24703		328.64351		573.74907		1001.65676	//
108.90619	//	190.12950		331.92995		579.48656			
109.99525		192.03079		335.24925	//	585.28143			
11.09521		193.95110		338.60174		591.13424	199,0		
12.20616		195.89061		341.98776		597.04558			
13.32822	200,0	197.84952		345.40763		603.01604			
14.46150	199,5	199.82802	//	348.86171		609.04620	199,0		
15.60612		201.82630		352.35033		615.13666			
16.76218		203.84456		355.87383	199,5	621.28803			
17.92980		205.88300		359.43257	199,0	627.50091	199,5		
19.10910	//	207.94183		363.02690		633.77592			
20.30019		210.02125		366.65716	198,5	640.11368			
21.50319		212.12146		370.32374		646.51482	199,5		
22.71822		214.24268	//	374.02697	//	652.97996			
23.94541		216.38511		377.76724	199,0	659.50976			
25.18486		218.54896		381.54492		666.10486	//		
26.43671	//	220.73445		385.36036		672.76591			
27.70108		222.94179		389.21397	//	679.49357	199,0		
28.97809		225.17121		393.10611	199,5	686.28850	199,5		
30.26787		227.42292		397.03717		693.15139			
31.57055		229.69715	//	401.00754		700.08290			
32.88625		231.99412	199,0	405.01762		707.08373	//		
34.21511		234.31406		409.06779	199,5	714.15457			
35.55726		236.65720	199,5	413.15847		721.29611	//		
36.91284	//	239.02378	199,0	417.29006	//	728.50908			

Tablo A1.6: 20.06.2017 tarihli, 80 MHz – 1 GHz frekans bandında 10 V/m elektrik alan şiddeti altında 200 gr ile yapılan testlerin göz takibi sonuçları

Frekans (MHz)	Hata (123gr)	Frekans (MHz)	Hata (123gr)	Frekans (MHz)	Hata (123gr)	Frekans (GHz)	Hata (123gr)	Frekans (GHz)	Hata (123gr)
1		138.28197	hata m	241.41401		421.46296		735.79417	.4
50	503.3	139.66479		243.82815		425.67759		743.15211	
80.80000	1999.90000	141.06143		246.26644		429.93436		750.58363	
81.60800		142.47205		248.72910		434.23370		758.08947	
82.42408		143.89677		251.21639		438.57604	503.2	765.67036	.5
83.24832		145.33574		253.72855		442.96180		773.32706	
84.08080		146.78909		256.26584		447.39142		781.06033	
84.92160		148.25698		258.82850		451.86533	503.3	788.87094	
85.77088		149.73953		261.41678	lct normal	456.38399		796.75965	
86.62854		151.23695		264.03095		460.94783		804.72724	
87.49482		152.74932		266.67126		465.55731		812.77452	
88.36977		154.27681		269.33797		470.21288		820.90226	
89.25347		155.81958		272.03135		474.91501		829.11128	
90.14600		157.37778		274.75167		479.66416		837.40240	
91.04746		158.95155		277.49918	lct hatalı	484.46080		845.77642	
91.95794		160.54107		280.27418		489.30541		854.23419	
92.87752		162.14648		283.07692		494.19846		862.77653	
93.80629		163.76794		285.90769		499.14045		871.40429	
94.74435		165.40562		288.76676		504.13185		880.11834	
95.69180		167.05968		291.65443		509.17317		888.91952	
96.64872		168.73028		294.57098		514.26490		897.80871	503.6
97.61520		170.41758		297.51668	lct normal	519.40755		906.78680	
98.59136		172.12176	lct hatalı	299.49185		524.60163		915.85467	
99.57727		173.84297		303.49677		529.84764		925.01322	.5
00.57304		175.58140		306.53174		535.14612		934.26335	
01.57877		177.33722		309.59706	lct hatalı	540.49758		943.60598	
02.59456		179.11059		312.69303		545.90256		953.04204	
03.62051		180.90170		315.81996		551.36158		962.57246	
04.65671		182.71071		318.97816		556.87520		972.19819	.4
05.70328		184.53782		322.16794		562.44395		981.92017	
06.76031		186.38320		325.38962		568.06839		991.73937	
07.82791		188.24703		328.64351		573.74907		1001.65676	
08.90619		190.12950		331.92995		579.48656			
09.99525		192.03079		335.24925	lct normal	585.28143			
11.09521		193.95110		338.60174		591.13424			
12.20616		195.89061		341.98776		597.04558			
13.32822	Ranget	197.84952		345.40763		603.01604			
14.46150	Arka 4 Raet	199.82802		348.86171		609.04620			
15.60612	Arka 4 Raet	201.82630	normal	352.35033		615.13666			
16.76218		203.84456		355.87383		621.28803			
17.92980		205.88300		359.43257		627.50091			
19.10910		207.94183		363.02690		633.77592			
20.30019		210.02125		366.65716		640.11368			
21.50319		212.12146		370.32374		646.51482			
22.71822		214.24268		374.02697		652.97996			
23.94541		216.38511		377.76724		659.50976			
25.18486		218.54896		381.54492		666.10486			
26.43671		220.73445		385.36036		672.76591			
27.70108		222.94179		389.21397		679.49357			
28.97809		225.17121	lct hatalı	393.10611	.503.1	686.28850	503.1		
30.26787		227.42292		397.03717		693.15139			
31.57055		229.69715		401.00754		700.08290			
33.88625		231.99412		405.01762		707.08373	503.2		
34.21511		234.31406		409.06779		714.15457			
35.55726		236.65720		413.15847		721.29611	503.3		
36.91284		239.02378		417.29006		728.50908			

Tablo A1.7: 07.02.2018 tarihli, 80 MHz – 1 GHz frekans bandında 10 V/m elektrik alan şiddeti altında 500 gr ile yapılan testlerin göz takibi sonuçları

Revizyon	Test Yürütücü	200gr.	Maks Çekim:	30kg	Test Ünitesi:	(Yatay) SKP	Tarih:		
Terazi Yönü - Ölçüm Bakırca	(sağ) (sol) (ön) (arka)	Sinyal Yönü	(Yatay) (Dikey)						
Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(MHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)	Frekans(GHz)	Hata (123gr)
1		138.28197		241.41401	3gr	421.46296		735.79417	
80		139.66479		243.82815		425.67759		743.15211	
80.80000		141.06143		246.26644		429.93436	0.5	750.58363	
81.60800		142.47205	0.5	248.72910	6	434.23370	0.5	758.08947	
82.42408		143.89677	0.5	251.21639	5	438.57604	0.5	765.67036	
83.24832		145.33574	0.5	253.72855	5	442.96180	0.5	773.32706	
84.08080		146.78909	0.5	256.26584	4.5	447.39142	0.5	781.06033	
84.92161	0.5	148.25698	0.5	258.82850	4.5	451.86533	0.5	788.87094	
85.77083	0.5	149.73955	0.5	261.41678	4.5	456.38399	0.5	796.75965	
86.62854	0.5	151.23695	0.5	264.03095	4.5	460.94783	0.5	804.72724	
87.49482	0.5	152.74932	0.5	266.67126	3.5	465.55731	0.5	812.77452	
88.36977	0.5	154.27681	0.5	269.33797	0.5	470.21288	0.5	820.90226	
89.25347	0.5	155.81958	0.5	272.03135	0.5	474.91501	0.5	829.11128	
90.14600	0.5	157.37778	0.5	274.75167	0.5	479.66416	0.5	837.40240	
91.04746	0.5	158.95155	0.5	277.49918	0.5	484.46080	0.5	845.77642	
91.95794	0.5	160.54107	0.5	280.27418	0.5	489.30541	0.5	854.23419	
92.87752	0.5	162.14648	0.5	283.07692	0.5	494.19846	0.5	862.77653	
93.80629	0.5	163.76794	0.5	285.90769	0.5	499.14045	0.5	871.40429	
94.74435	0.5	165.40562	0.5	288.76676	0.5	504.13185	0.5	880.11834	
95.69180	0.5	167.05968	0.5	291.65443	0.5	509.17317	0.5	888.91952	
96.64872	0.5	168.73028	0.5	294.57098	0.5	514.26490	0.5	897.80871	-0.5
97.61520	0.5	170.41758	0.5	297.51668	0.5	519.40755	0.5	906.78680	-1.5
98.59136	0.5	172.12176	0.5	300.49185	0.5	524.60163	0.5	915.85467	-1
99.57727	0.5	173.84297	0.5	303.49677	0.5	529.84764	0.5	925.01322	-1.5
100.57304	0.5	175.58140	0.5	306.53174	0.5	535.14612	0.5	934.26335	-1
101.57877	0.5	177.33722	0.5	309.59706	0.5	540.49758	0.5	943.60598	-1
102.59456	0.5	179.11059	0.5	312.69303	0.5	545.90256	0.5	953.04204	-1
103.62051	0.5	180.90170	0.5	315.81996	0.5	551.36158	0.5	962.57246	-1
104.65671	0.5	182.71071	0.5	318.97816	0.5	556.87520	0.5	972.19819	-1
105.70328	0.5	184.53782	0.5	322.16794	0.5	562.44395	0.5	981.92017	-1
106.76031	0.5	186.38320	0.5	325.38962	0.5	568.06839	0.5	991.73937	-1
107.82791	0.5	188.24703	0.5	328.64351	0.5	573.74907	0.5	1001.65676	-1
108.90619	0.5	190.12950	0.5	331.92995	0.5	579.48656	0.5		
109.99525	0.5	192.03079	0.5	335.24925	0.5	585.28143	0.5		
111.09521	0.5	193.95110	0.5	338.60174	1.5	591.13424	0.5		
112.20616	0.5	195.89061	0.5	341.98776	0.5	597.04558	0.5		
113.32822	0.5	197.84952	0.5	345.40763	0.5	603.01604	0.5		
114.46150	0.5	199.82802	0.5	348.86171	0	609.04620	0.5		
115.60612	0.5	201.82630	0.5	352.35033	0	615.13666	0.5		
116.76218	0.5	203.84456	0.5	355.87383	0	621.28803	0.5		
117.92980	0.5	205.88300	0.5	359.43257	0	627.50091	0.5		
119.10910	0.5	207.94183	0.5	363.02690	-1	633.77592	0.5		
120.30019	0.5	210.02125	0.5	366.65716	-1	640.11368	0.5		
121.50319	0.5	212.12146	0.5	370.32374	-1.5	646.51482	0.5		
122.71822	0.5	214.24268	0.5	374.02697	-3	652.97998	0.5		
123.94541	0.5	216.38511	0.5	377.76724	-3	659.50976	0.5		
125.18486	0.5	218.54896	0.5	381.54492	-3	666.10486	0.5		
126.43671	0.5	220.73445	0.5	385.36036	-2	672.76591	0.5		
127.70108	0.5	222.94179	0.5	389.21397	-1	679.49357	0.5		
128.97809	0.5	225.17121	0.5	393.10611	-1	686.28850	0.5		
130.26787	0.5	227.42292	0.5	397.03717	0	693.15139	0.5		
131.57055	0.5	229.69715	0.5	401.00754	0	700.08290	0.5		
132.88625	0.5	231.99412	0.5	405.01762	0	707.08373	0.5		
134.21511	0.5	234.31406	0.5	409.06779	0	714.15457	0.5		
135.55726	0.5	236.65720	0.5	413.15847	0	721.29611	0.5		
136.91284	0.5	239.02378	0.5	417.29006	0	728.50908	0.5		

Tablo A1.8: 07.02.2018 tarihli, 80 MHz – 1 GHz frekans bandında 10 V/m elektrik alan şiddeti altında 200 gr ile yapılan testlerin göz takibi sonuçları

EK B: Kullanılan Ekipmanların Teknik Bilgileri

DSA800/DSA800E Series Spectrum Analyzer

Frequency

Frequency				
	DSA815	DSA832E	DSA832	DSA875
Frequency range	9 kHz to 1.5 GHz	9 kHz to 3.2 GHz	9 kHz to 3.2 GHz	9 kHz to 7.5 GHz
Frequency resolution	1 Hz			

Internal Reference Frequency				
	DSA815	DSA832E	DSA832	DSA875
Reference frequency	10 MHz			
Accuracy	$\pm[(\text{time since last calibration} \times \text{aging rate}) + \text{temperature stability} + \text{calibration accuracy}]$			
Initial calibration accuracy	<1 ppm			
Temperature stability	0°C to 50°C, reference to 25°C			
Aging rate	<2 ppm/year	<2 ppm/year	<0.5 ppm	<1 ppm/year

Frequency Readout Accuracy	
Marker resolution	span/ (number of sweep points - 1)
Marker uncertainty	$\pm(\text{frequency indication} \times \text{reference frequency accuracy} + 1\% \times \text{span} + 10\% \times \text{resolution bandwidth} + \text{marker resolution})$

Frequency Counter	
Resolution	1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz
Uncertainty	$\pm(\text{frequency indication} \times \text{reference frequency accuracy} + \text{counter resolution})$

Frequency Span	
Range	0 Hz, 100 Hz to maximum frequency of instrument
Uncertainty	$\pm\text{span}/ (\text{number of sweep points} - 1)$

SSB Phase Noise	
	20°C to 30°C, $f_c = 1 \text{ GHz}$

Şekil B1.1: DSA815-TG frekans çözünürlüğü ve bant genişliği bilgi sayfası.

Tracking Generator (Option)

TG Output			
	DSA815	DSA832	DSA875
Frequency range	100 kHz to 1.5 GHz	100 kHz to 3.2 GHz	100 kHz to 7.5 GHz
Output level range	-20 dBm to 0 dBm	-40 dBm to 0 dBm	
Output level resolution	1 dB		
Output flatness	relative to 50 MHz		
	± 3 dB (nom.)		

Şekil B1.2: DSA815-TG takip üretici modülü bilgi sayfası.

Performance Specifications

Frequency	
Frequency Range	30 MHz to 3 GHz

Terminal Type	
Terminal Type	SMB (M)
Adaptor	N (M)-BNC (F)
RF Cable	BNC (M)-SMB (F), 1000 mm
Terminal and Adaptor Impedance	50 Ω

General Specifications	
Dimensions	260 mm \times 190 mm \times 30 mm (with package)
Weight	0.425 kg (with package)
Operating Temperature	0°C to 50°C
Storage Temperature	-20°C to 70°C

Şekil B1.3: NFP-3 yakın alan prob takımı bilgi sayfası.

Modulated Wideband Driver Amplifier

Application:

general purpose gain block
signal source for immunity testing, driving near field probes
signal source for immunity testing, driving TEM Cells

Features:

CW amplifier (modulation off)
1 kHz, 80% AM modulation
1 kHz, 50% duty cycle pulse modulation
217 Hz, 12.5% duty cycle pulse modulation

2 Electrical Specifications

Technical Data:

Input: 50 Ohm, SMA female
Output: 50 Ohm, SMA female
Nominal supply Voltage: 5V, typ. 235mA, Mini-USB-B connector
Maximum supply voltage: 5.5V
Maximum input power: +9dBm
1dB output compression point @ 40MHz: +21.5dBm
1dB output compression point @ 2 GHz: +22.5dBm
3rd order output intercept point @ 40 MHz: +39dBm
3rd order output intercept point @ 2 GHz: +42dBm
Reverse isolation S12: -45dB
Noise Figure: 3 ... 4 dB
Internal modulation frequency AM: 1 kHz $\pm 10\%$
Internal modulation frequencies PM: 1 kHz $\pm 10\%$, 217 Hz $\pm 20\%$
Duty cycle, PM: 50% $\pm 10\%$ @ 1 kHz; 12.5% $\pm 20\%$ @ 217 Hz

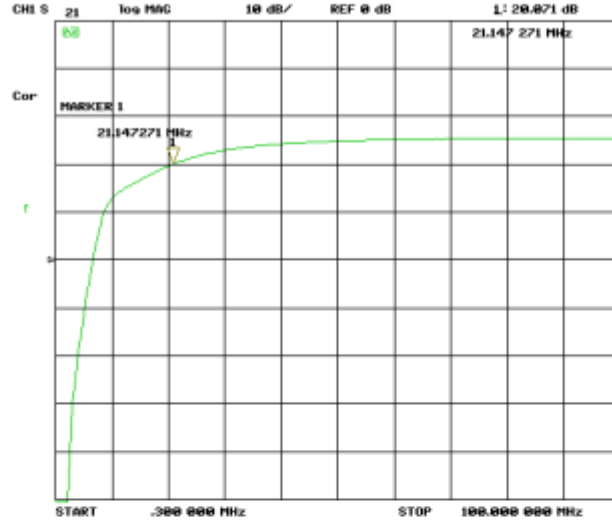
Gain:

25 MHz	50 MHz	100 MHz	500 MHz	1 GHz	1.5 GHz	2 GHz	2.5 GHz	3 GHz
21.6 dB	24.9 dB	25.5 dB	25.6 dB	24.9 dB	24.1 dB	22.2 dB	22.8 dB	25.8 dB

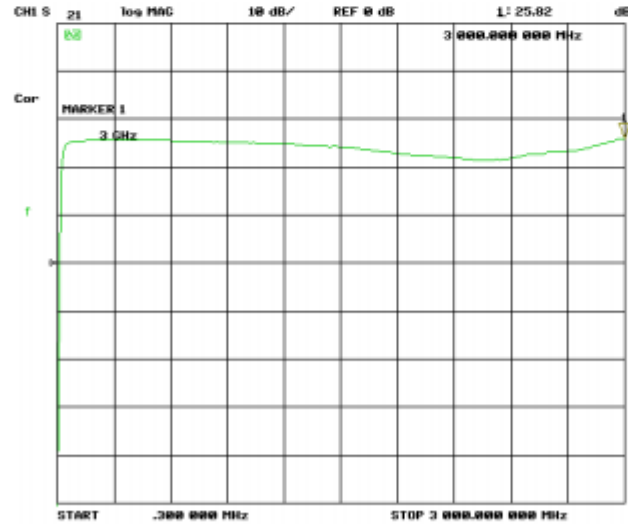
Table 1 – TBMDA1 gain

Şekil B1.4: TBMDA1 geniş bant modülasyonlu yükselteci bilgi sayfası.

Modulated Wideband Driver Amplifier



Picture 3 – TBMDA1, gain, 300 kHz – 100 MHz, lin.



Picture 4 – TBMDA1, gain, 300 kHz – 3 GHz, lin.

Şekil B1.5: TBMDA1 geniş bant modülasyonlu yükseltici kazançları sayfası.

Termination Load Technology Manual

1. **Model:**BC-TE25-01

2. **Product Name:** RF Termination Load

3. **Description:**

Frequency	DC~3GHz
Connector	N-male
VSWR	≤ 1.2
Power	25W
Impedance	50 Ω
Temperature Range	-55 $^{\circ}$ C ~ +125 $^{\circ}$ C

4. **Picture :**



Tolerance : $\pm 2\%$

Şekil B1.6: İşaret sonlandırma yükü bilgi sayfası.

EK C: Tasarım Aşamasında Kullanılan Standartlar

B.3.5 Immunity to radiated electromagnetic fields

The test consists of exposing the EUT to specified electromagnetic fields.

Test equipment: See IEC 61000-4-3 [13]

Test set-up: See IEC 61000-4-3 [13]

Test procedure: See IEC 61000-4-3 [13]

Before any test, stabilize the EUT under constant environmental conditions.

The EUT shall be exposed to electromagnetic fields of the strength and character as specified by the severity level.

The test shall be performed with one small test load only.

Test severity: Frequency range: 80 MHz-2 000 MHz

Note: For instruments having no mains or other I/O ports available so that the test according to B.3.6 cannot be applied, the lower limit of the radiation test is 26 MHz.

Field strength: 10 V/m

Modulation: 80 % AM, 1 kHz, sine wave

Maximum allowable variations: The difference between the weight indication due to the disturbance and the indication without the disturbance either shall not exceed e or the instrument shall detect and react to a significant fault.

Reference: [13]

Şekil C1.1: OIML R 76-1 EMI test standartları bilgi sayfası.