

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AÇIK SAHADA EMC ANTENİ KALİBRASYONLARININ
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ, SAHA DOĞRULAMASI VE ÖLÇÜM
BELİRSİZLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlkcan COŞKUN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AÇIK SAHADA EMC ANTENİ KALİBRASYONLARININ
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ, SAHA DOĞRULAMASI VE ÖLÇÜM
BELİRSİZLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İlkcan COŞKUN
(518111050)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU

HAZİRAN 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518111050 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İlkcan COŞKUN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AÇIK SAHADA EMC ANTENİ KALİBRASYONLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ, SAHA DOĞRULAMASI VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Cevdet IŞIK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Osman Hilmi KOÇAL
Yalova Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **04 Haziran 2015**

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince, bilgi, tecrübe ve pozitif yaklaşımı ile bana yardımcı olan ve yoğun dönemlerinde bile zaman ayırarak çalışmamı yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU'na, görev yapmakta olduğum kurumum Türk Standardları Enstitüsü'ne, TSE Gebze Elektroteknik Laboratuvarı ve kendi birimim olan TSE Gebze Kalibrasyon Müdürlüklerine ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman olduğu gibi tez çalışmam sırasında da manevi desteklerini hiç bir zaman esirgemeyerek yanımda olan ve beni cesaretlendiren sevgili babam, annem ve kardeşlerime teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2015

İlkcan COŞKUN
Mekatronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xv
ACIK SAHADA EMC ANTENİ KALİBRASYONLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ, SAHA DOĞRULAMASI VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ	xvii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	1
1.2 Türk Standardları Enstitüsü.....	1
1.3 Literatür Araştırması ve Standartlar	3
1.4 Elektromanyetik Uyumluluk-EMU (Electromagnetic Compatibility-EMC).....	6
1.5 Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) Antenleri.....	12
1.6 Metroloji, Kalibrasyon ve Ölçüm Belirsizliği.....	21
1.6.1 Metroloji ve metroloji ile ilgili organizasyonlar	21
1.6.3 Ölçüm belirsizliği.....	28
1.6.3.1 A tipi ölçüm belirsizliği hesabı	31
1.6.3.2 B tipi ölçüm belirsizliği hesabı	33
1.7 EMC Antenlerinin Kalibrasyonunun Önemi ve Birimler	38
2. ÖLÇÜM SAHASI, EKİPMANLARI VE YÖNTEMLERİ.....	41
2.1 TSE Açık Saha Test Alanı (ASTA)	41
2.2 Ölçümlerde Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar, Ölçüm Koşulları.....	42
2.1 Kalibrasyon Metodu ve Ölçümlerin Alınışı	49
3. ACIK SAHA TEST ALANININ (ASTA) KALİBRASYON YETERLİLİĞİ İÇİN DOĞRULANMASI (SAHA VALİDASYONU)	57
4. EMC ANTENİ KALİBRASYONLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	65
4.1 3 Anten ile Standart Saha Metodu.....	65
4.1.1 Bikonik anten kalibrasyonu	65
4.1.2 Log-Periyodik anten kalibrasyonu	71
4.2 Bilinen Anten ile Standart Saha Metodu	76
4.2.1 Bikonik anten kalibrasyonu	76
4.2.2 Log-periyodik anten kalibrasyonu	77
4.3 Özdeş Antenler ile Standart Saha Metodu	78
5. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ.....	81
5.1 Model Fonksiyonun Oluşturulması	82
5.2 Belirsizlik Bileşenlerinin İncelenmesi	86
5.2.1 Spektrum analizörün genlik ölçüm hatasından kaynaklı belirsizlik	86

5.2.1.1 Kalibrasyon sertifikası genlik ölçüm belirsizliği	86
5.2.1.2 Kalibrasyon sertifikası sapmalarından kaynaklı belirsizlik	87
5.2.1.3 Yıllık kayma (drift) değeri	87
5.2.1.4 Sıcaklık değişiminden kaynaklı belirsizlik	87
5.2.2 Ayrık Frekans Metodu frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik.....	88
5.2.2.1 Spektrum analizör frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik.....	89
5.2.2.2 İşaret üretici frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik	91
5.2.3 İşaret üretici genlik kararlılığı	93
5.2.4 Zayıflatıcıların duran dalga oranları kaynaklı belirsizlik (u_{VSWR})	93
5.2.5 Sistem, yerleşim hataları ve ölçüm sahası etkilerinden kaynaklı belirsizlik (u_{site}).....	95
5.2.6 Gürültülü işaretin gürültüye oranı (Signal plus noise to noise ratio) kaynaklı hatalar (u_n)	96
5.2.7 Zayıflatıcıların sıcaklık kararlılığı ve güç hassasiyetleri (u_{att})	98
5.2.8 Ölçümlerin tekrarlanabilirliği.....	99
5.2.9 Etkisi ihmal edilen diğer bileşenler	100
5.3 Birleştirilmiş Belirsizliğin Oluşturulması.....	102
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR.....	111
EKLER.....	117
ÖZGEÇMİŞ.....	143

KISALTMALAR

EMI	: Electromagnetic Interference
EMC	: Electromagnetic Compatibility
EMU	: Elektromanyetik Uyumluluk
ASTA	: Açık Saha Test Alanı
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
ISO	: International Organization for Standardization
IEC	: International Electrotechnical Commission
ANSI	: American National Standards Institute
SAE	: Society of Automotive Engineers
CISPR	: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
SSM	: Standart Saha Metodu
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
BİLGEM	: Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi
UEKAE	: Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü
NPL	: National Physical Laboratory
FCC	: Federal Communication Commission
RE	: Radiated Emission
RS	: Radiated Susceptibility
CE	: Conducted Emission
CS	: Conducted Susceptibility
GTEM	: Gigahertz Transverse Electromagnetic
TEM	: Transverse Electromagnetic
DDO	: Duran Dalga Oranı
SWR	: Standing Wave Ratio
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio
RL	: Return Loss
SI	: Système International
BIPM	: Bureau International des Poids et Mesures
EURAMET	: European Association of National Metrology Institutes
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
ILAC	: International Laboratory Accreditation Cooperation
EA	: European Accreditation
TÜRKAK	: Türk Akreditasyon Kurumu
OIML	: International Organization of Legal Metrology
MSGM	: Metroloji ve Standardizasyon Genel Müdürlüğü
WELMEC	: European Cooperation in Legal Metrology

CGPM	: Conférence Générale des Poids et Mesures
CEN	: European Committee for Standardization
CENELEC	: European Committee for Electrotechnical Standardization
ISQ	: International System of Quantities
CGS	: Centimetre-Gram-Second System
PDF	: Probability Density Function
GUM	: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
RF	: Radio Frequency
GSCF	: Geometry-Specific Correction Factor
NSA	: Normalized Site Attenuation
DKD	: Deutscher Kalibrierdienst
TAC	: Test Altındaki Cihaz
AF	: Anten Faktörü
SSM	: Standard Site Method (Standart Saha Metodu)
SNR	: Signal to Noise Ratio
SA	: Site Attenuation

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Student dağılımı ile normal dağılımı dengeleme faktörleri.....	32
Çizelge 1.2 : Kapsam faktörleri ve güvenilirlik düzeyleri.....	37
Çizelge 2.1 : Ölçümlerde kullanılan temel cihazlar.....	44
Çizelge 2.2 : Ölçümlerde kullanılan yardımcı cihazlar	45
Çizelge 2.3 : Frekansa göre $E_d^{\max}$ değerleri	53
Çizelge 3.1 : Saha doğrulaması için kullanılan antenler.....	58
Çizelge 3.2 : Saha doğrulaması ölçüm sonuçları (30 MHz-100 MHz)	61
Çizelge 3.3 : Saha doğrulaması ölçüm sonuçları (120 MHz-300 MHz)	62
Çizelge 3.4 : Saha doğrulaması ölçüm sonuçları (400 MHz-1000 MHz)	63
Çizelge 4.1 : Bikonik anten kalibrasyonu için kullanılan antenler (3 Anten ile SSM)	66
Çizelge 4.2 : Bikonik anten kalibrasyonu için alınan 1 çevrim ölçüm sonuçları-3 Anten ile SSM (30 MHz-100 MHz).....	69
Çizelge 4.3 : Bikonik anten kalibrasyonu için alınan 1 çevrim ölçüm sonuçları-3 Anten ile SSM (120 MHz-300 MHz).....	70
Çizelge 4.4 : Bikonik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM).....	71
Çizelge 4.5 : Log-periyodik anten kalibrasyonu için kullanılan antenler.....	73
Çizelge 4.6 : Log-periyodik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM)	74
Çizelge 4.7 : Log-periyodik anten kalibrasyonu için alınan 1 çevrim ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM).....	75
Çizelge 4.8 : Bikonik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (Bilinen Anten ile SSM)	76
Çizelge 4.9 : Log-periyodik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (Bilinen Anten ile SSM).....	77
Çizelge 4.10 : Özdeş Antenler ile SSM anten kalibrasyonu için kullanılan antenler	78
Çizelge 4.11 : Özdeş Antenler ile SSM anten kalibrasyonu sonuçları ve üretici değerleri	80
Çizelge 5.1 : 30 MHz için örnek tekrarlanabilirlik ölçümleri	100
Çizelge 5.2 : Anten kalibrasyonu ölçüm belirsizliği bütçesi (SA)	104
Çizelge 5.3 : Anten kalibrasyonu ölçüm belirsizliği bütçesi	108

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Elektromanyetik enerji transferinin 4 alt grubu	10
Şekil 1.2 : Bir cihazda elektromanyetik girişim yolları.....	10
Şekil 1.3 : Ekranlı odada tipik bir bağışıklık deneyi düzeneği	11
Şekil 1.4 : TSE Gebze Elektroteknik Müdürlüğü'ne ait Yarı-Yansız Oda	12
Şekil 1.5 : EMC testlerinde sıkça kullanılan antenler [44].....	13
Şekil 1.6 : Çubuk anten ve ışıma diyagramı.....	14
Şekil 1.7 : Tipik bir anten için ışıma diyagramı	17
Şekil 1.8 : Anten faktörü.....	20
Şekil 1.9 : Kütle için metrolojide ölçüm standartları hiyerarşisi	24
Şekil 1.10 : Ülkelerin kalite altyapıları için önemli unsurlar.....	25
Şekil 1.11 : Metroloji ile ilgili organizasyonlar.....	25
Şekil 1.12 : Dikdörtgen Dağılım.....	33
Şekil 1.13 : Üçgen Dağılım	34
Şekil 1.14 : U Dağılım.....	35
Şekil 2.1 : TSE Açık Saha Test Alanı (ASTA)	42
Şekil 2.2 : Açık Saha Test Alanı.....	42
Şekil 2.3 : Kontrol odasından bir görünüş	43
Şekil 2.4 : Ölçüm ekipmanlarından 10 dB zayıflatıcı.	44
Şekil 2.5 : Sayısal sıcaklık ve nem ölçer/kaydedici.....	45
Şekil 2.6 : 01/03/2015 tarihinde bikonik anten kalibrasyonu için saha zayıflaması ölçümü sırasında ASTA'da çevre şartları (R&S HK 116 (verici), R&S HK 116 ³ (alıcı) kombinasyonda)	46
Şekil 2.7 : 11/03/2015 tarihinde log-periyodik anten kalibrasyonu için saha zayıflaması ölçümü sırasında ASTA'da çevre şartları (R&S HL 223 (verici), R&S HL 562E (alıcı) kombinasyonda)	47
Şekil 2.8 : Kontrol odasında örnek sıcaklık ve nem kaydı	47
Şekil 2.9 : Dijital hassas açı ölçer.....	48
Şekil 2.10 : Lazer mesafe ölçer.....	49
Şekil 2.11 : Saha zayıflaması ölçümlerinin alınışı [2].....	50
Şekil 2.12 : 3 farklı anten çiftini kullanarak 3 saha zayıflaması ölçümü [2]	52
Şekil 3.1 : NSA ölçümleri için 5 konum (üstten görünüş) [3].....	59
Şekil 3.2 : NSA ölçümleri için 5 konum [3].....	60
Şekil 3.3 : Teorik NSA - Ölçümlerle Hesaplanan NSA.....	60
Şekil 4.1 : Bikonik anten kalibrasyonu saha ölçümlerinden bir görünüş	67
Şekil 4.2 : Bikonik anten kalibrasyonundan bir kesit.....	68
Şekil 4.3 : Bikonik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM).....	71
Şekil 4.4 : Log-periyodik anten saha ölçümlerinin alınışı.....	72
Şekil 4.5 : Log-periyodik anten kalibrasyonundan bir görünüş.....	72
Şekil 4.6 : Log-periyodik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM)..	74

Şekil 4.7 : SSM (3 Anten) - SSM (Bilinen Anten) – R&S HK116 Bikonik Anten Kalibrasyonu.....	76
Şekil 4.8 : SSM (3 Anten) - SSM (Bilinen Anten) – R&S HL223 Log-Periyodik Anten Kalibrasyonu.....	78
Şekil 4.9 : Rohde&Schwarz HZ-13 Dipol Anten Seti.....	79
Şekil 5.1 : 5 konum için NSA standart sapması.....	96
Şekil 5.2 : Spektrum analizörden bir ölçüm görüntüsü	97

SEMBOL LİSTESİ

$VSWR$	: Duran dalga oranı
Γ	: Yansıma katsayısı
RL	: Dönüş kaybı
R_r	: Işıma direnci
AF	: Anten faktörü
E	: Elektrik alan
G_r	: Anten kazancı
A_e	: Etkin yüzey
x_i	: Ölçüm sonucu
$\bar{x}$	: Ölçüm sonuçlarının ortalaması
s_{x_i}	: Deneysel standart sapma
u	: Ölçüm belirsizliği
U	: Genişletilmiş ölçüm belirsizliği
c_i	: Duyarlılık katsayısı
k	: Kapsam faktörü
n	: Ölçüm sayısı
u_A	: A tipi ölçüm belirsizliği
u_B	: B tipi ölçüm belirsizliği
u_C	: Birleştirilmiş ölçüm belirsizliği
σ	: Standart sapma
μ	: Ölçülen büyüklüğün gerçek değeri
u_{At}	: t dağılımı ile belirlenen standart sapma
γ	: Serbestlik derecesi
p	: Güvenilirlik düzeyi
$t_{\gamma,p}$	: Student dağılımı ile normal dağılımı dengeleme faktörü
E_D^{max}	: Verici antenden R büyüklüğündeki mesafede maksimum alan değeri
V_{direct}	: Doğrudan ölçüm (genlik)
V_{site}	: Saha ölçümü (genlik)
A	: Saha zayıflaması
f_M	: Frekans (MHz)
d	: Antenler arası yatay mesafe
h_1	: Verici anten yüksekliği
h_2	: Alıcı anten yüksekliği
A_N	: Normalize edilmiş saha zayıflaması.
ΔF_{TOT}	: Kuplaj faktörü
$GSCF$	: Geometri kaynaklı düzeltme faktörü
AF_T	: Verici anten anten faktörü
AF_R	: Alıcı anten anten faktörü
δ	: Ölçüm parametre hataları
f_c	: Merkez frekans
f_s	: Span değeri

a_t	: Birim sıcaklıktaki zayıflama değışimi
Δt	: Sıcaklık değışimi
r	: Korelasyon katsayısı
SNR	: Signal-to-Noise Ratio
β	: Kablo zayıflatma değışimi

AÇIK SAHADA EMC ANTENİ KALİBRASYONLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ, SAHA DOĞRULAMASI VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

ÖZET

Üretilen her elektriksel, elektronik veya elektrik/elektronik kısmı bulunan cihazın başka cihazlara, ortama ya da insan sağlığına zararlı elektromanyetik girişim sinyalleri yayıp yaymadığı, ya da başka cihazlardan ya da ortamdan gelebilecek girişimlere karşı kendi özelliklerini ne kadar koruyabildiği EMC (Elektromanyetik Uyumluluk) testleri ile belirlenir. EMC testlerinin önemli elemanlarından biri ise EMC antenleridir.

EMC antenlerinin özellik ve kalitesini belirleyen birçok parametre bulunmakla beraber, anten faktörü bu parametrelerin en önemlilerinden biridir. Antenlere ait anten faktörü değerleri EMC testlerinin doğruluğu, güvenilirliği ve kalitesi açısından son derece önemlidir. Anten faktörü değerlerinin güncelliği ise periyodik kalibrasyonlar ile sağlanır.

EMC anteni kalibrasyonu aslında antenin anten faktörü ölçümünü ifade etmektedir. Bu noktada, ölçümün yetkin bir laboratuvar tarafından yapıp sertifikalandırılması ve periyodik olarak kalibrasyon takibinin yapılması gerekmektedir. Anten faktörü olarak üretici değerlerinin kullanılması, uzun vadede hataları da beraberinde getirmektedir. Çünkü, geçen sürede antenler de kullanım veya başka sebeplerden değişim geçirmektedir. Bu noktada, güncel durumun ortaya konması önem arz etmektedir. Kalibrasyon ile güncel değerler elde edildiği gibi, kalibrasyonları periyodik olarak takip edilen bir antenin, uzun vadeli davranışı tespit edilerek bir nevi künyesi de oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada EMC antenlerinin Türk Standartları Enstitüsü bünyesinde bulunan Açık Saha Test Alanı'nda kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesi hedeflenmiş, açık sahadaki bu kalibrasyonlara ait ölçüm belirsizliği hesabı yapılmaya çalışılmıştır. Öncelikle sahanın kalibrasyon yeterliliği tartışılmış ve ANSI C63.4-2014 standardına göre saha doğrulaması yapılarak kalibrasyon yeterliliği test edilmiştir. Sonuçlar, sahanın kalibrasyonlara uygun olduğunu göstermiş ve bu aşamadan sonra kalibrasyonlar üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. ANSI C63.5-2006 standardına göre 30 MHz-1 GHz frekans bandında bikonik, log-periyodik ve dipol antenlerle kalibrasyonlar gerçekleştirilmiştir. Standartta yer alan "Standart Saha Metodu" kullanılmış ve bu metodun alt metotları olarak nitelendirilebilecek ve bu çalışmaya özel olarak 3 Anten ile Standart Saha Metodu, Bilinen Anten ile Standart Saha metodu ve Özdeş Antenler ile Standart Saha Metodu olarak adlandırılan yöntemler uygulanmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları üzerinde sebep-sonuç ilişkisi kurularak öngörüler ortaya konulmuştur.

Çalışmada, 3 Anten ile Standart Saha Metodu ve Bilinen Anten ile Standart Saha Metodu, bikonik ve log-periyodik antenler üzerinde karşılaştırıldığında sonuçların farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Bu farklılıkların, Bilinen Anten ile Standart Saha Metodu'nda bilinen anten olarak kullanılan antenin son sertifikasından çalışma

zamanına kadar olan dönemde anten faktörlerinin değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum, 3 Anten ile Standart Saha Metodu'nun daha doğru ve güvenilir sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Özdeş Antenler ile Standart Saha Metodu mevcut bulunan yarım-dalga dipol setlerle uygulandığında, elde edilen değerlerin bu antenlerin üretiminden uzun yıllar geçmesine rağmen, üretici değerleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Ölçüm belirsizliği çalışması bu çalışmanın önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Kalibrasyonların açık sahada yapılıyor olması ve kontrol odasının iklimlendirme teşkilatının bulunmaması, çokça ölçüm belirsizliği bileşeni olmasına sebebiyet vermiş, çalışma içerisinde bu bileşenler incelenerek ölçüm belirsizliği hesaplanmıştır. Ölçüm belirsizliği bütçesi oluşturulmuş, baskın ve ihmal edilebilir parametreler ortaya konmaya çalışılmıştır. Ölçüm belirsizliği 3 anten ile Standart Saha Metodu için hesaplanmış, GUM ve EA-4/02 dökümanlarına uygun olarak hazırlanmıştır.

Ölçüm belirsizliğinde en baskın etkenin saha ve sistem kaynaklı etkiler olduğu görülmüştür. Ölçümde kullanılan cihazların frekans özelliklerinin belirsizliğe katkısının ise çok düşük, hatta ihmal edilebilecek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

EMC ANTENNA CALIBRATIONS IN OPEN AREA, SITE VALIDATION AND UNCERTAINTY OF MEASUREMENT

SUMMARY

It is so important to determine the level of electromagnetic interferences (EMI) which an electric/electronic device produces or the level of the resistance of a device to the electromagnetic interferences, since electromagnetic interferences can be harmful to devices, ambients or people. This can be determined by electromagnetic compatibility (EMC) tests. EMC antennas are an important part of EMC Tests, especially for radiated emission and immunity tests. EMC Antennas have various parameters such as polarization, beamwidth, gain, Voltage-Standing-Wave-Ratio (VSWR), phase center, impedance, antenna factor etc.

Antenna factor is one of the important parameters among these parameters of EMC antennas, also. It is crucial to know antenna factors exactly and clearly to maintain EMC test quality, accuracy and reliability. At this point, the calibration of EMC antennas is critical. The antenna factor values of manufacturers are often inadequate. Using manufacturer antenna factor values may cause some errors in EMC tests, since some changes may occur for antenna between manufacturing time and using time. So, periodic calibrations of EMC antennas are critical to obtaining current antenna factor values. Actually, “the calibration of an antenna” means measuring the antenna factors of that antenna. In addition to obtaining current antenna factor values, the long-term behaviour of an antenna can be revealed by periodic calibrations. For calibration quality, calibration staff qualifications, calibration laboratory and its infrastructure are very substantial.

In the introduction part of this thesis, some basic information about Open-Area Test Site (OATS), Turkish Standard Institute, EMC tests, metrology, calibration, the uncertainty of measurement, the importance of EMC antenna calibration and measurement units is available. Review of the literature and standards on the subject takes place in this part, also.

In this study, it is aimed that EMC antenna calibrations to be performed in Open-Area Test Site of Turkish Standard Institute with measurement uncertainty calculations. Initially, it was important to determine the convenience of the site for calibrations. To determine this, ANSI C63.4-2014 standard was used. Normalized Site Attenuation (NSA) tests were performed over a volume of the site. Normalized Site Attenuation values are basically obtained by subtracting antenna factors of antennas from site attenuation values. After determining normalized site attenuation values by measurements and calculations, the theoretical normalized site attenuation values and measured normalized site attenuation values are compared. At the end of the tests, it was revealed that the site was convenient for the calibration of EMC antennas. It was so crucial, because a calibration in an inconvenient site is inaccurate.

After NSA tests and determining the convenience of the site, antenna calibration studies were initiated. Antenna calibrations were performed for biconical, log-periodic

and tuned dipoles and for a frequency band from 30 MHz to 1 GHz. ANSI C63.5-2006 standard was used for calibration studies. “Standard Site Method” of ANSI C63.5-2006 Standard is the main method in this study. The applied points which differ from the standard in the scope of this study are expressed in the related parts of this study. All site attenuation measurements were taken in the same measurement geometry (horizontal distance between antennas: 10 m, transmitting antenna height : 2 m, receiving antenna height : 1 m-4 m, horizontal polarization). To determine site attenuation values, discrete frequency method was used.

Standard Site Method was implemented with its sub-methods. These sub-methods are specifically named in the scope of this study as “Standard Site Method with Three Antennas”, “Standard Site Method with Known Antenna”, “Standart Site Method with Identical Antennas”. These methods were compared and some comments were made on the results.

In the study, the results of Standard Site Method with Three Antennas and Standard Site Method with Known Antenna were compared on both biconical and log-periodic antennas. The results showed some differences with each other. It is thought to have originated from the antenna factor changes of “the known antenna” between last calibration time and working time. This shows Standard Site Method with Three Antennas is more accurate and reliable than Standart Site Method with Known Antenna.

When Standart Site Method with Identical Antennas was implemented with half-wave dipole sets, the results and the manufacturer values were so similar although it has been many years since the production.

Air temperature and relative humidity in Open-Area Test Site (OATS) were measured and stored by digital temperature and humidity gauge during the calibration processes. In addition, air pressure and wind speed were measured by digital pressure gauge and anemometer. In the control room, temperature and relative humidity were measured and stored by analogue temperature and relative humidity gauge during the calibration process.

The uncertainty of measurement study is an important part of this study. There are a lot of uncertainty parameters because of open area conditions and a control room without air conditioning system. These parameters were analyzed in detail and the measurement uncertainty was calculated for Standart Site Method with Three Antennas. The measurement uncertainty budget has been built. Overall calculations of measurement uncertainty were made in accordance with GUM and EA-4/02 documents. Warm-up times of all devices are taken into account.

The calculations showed that the most dominant factor was site and system effects. Therefore, it can be said that site qualifications have significant effect on the calibration of antennas in open field. The other dominant factor of measurement uncertainty was spectrum analyzer amplitude based factors. The calculated uncertainty contribution of the frequency characteristics of the devices that were used in the measurements were very small comparing to other uncertainty components. So, it was determined that it can be neglected. Three site attenuation measurement uncertainty values were very close to each other. The components which have negligible effect on measurement uncertainty were explained in the study.

The calibration certificates of the antennas which calibrated in this study are located in Annex-A. Also, the calibration certificates of some devices that were used in calibration processes are located in Annex-B.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç

Bu çalışmanın amacı Türk Standardları Enstitüsü Deney ve Kalibrasyon Merkezi Başkanlığı Gebze Kalite Kampüsü'nde elektromanyetik uyumluluk testleri ve ölçümleri için kurulmuş olan Açık Saha Test Alanı (ASTA) üzerinde elektromanyetik uyumluluk antenlerinin kalibrasyonlarını gerçekleştirebilmek, bu sahada yapılacak kalibrasyonların bilimsel temelde altyapısını hazırlamak, bilimsel ve endüstriyel çalışmalarda bu sahanın kullanılmasını sağlayarak ülkemiz açısından katma değer sağlamaktır. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında açık saha test alanının kalibrasyonlar için uygunluğunun değerlendirilmesi açısından saha doğrulaması (validasyonu) yapılacak, elektromanyetik uyumluluk antenlerinin farklı metotlarla kalibrasyonlarının nasıl gerçekleştirilebileceği, yapılan kalibrasyonlardaki ölçüm belirsizlikleri detaylı olarak incelenecektir. Ölçüm sonuçları karşılaştırılarak çıkarımlar elde edilmeye çalışılacaktır.

TSE bünyesindeki ASTA uzun bir süre önce kurulmuş, ülkemizde az sayıdaki açık alan elektromanyetik ölçüm sahalarından biridir. TSE EMC laboratuvarında yarı-yansız odanın kurulması ile kullanım oranı düşmüş olan bu sahanın kullanımını artırmak, ülkemiz açısından bilimsel ve endüstriyel metroloji anlamında katkı sağlayacak olması sebebiyle önemlidir. Bu çalışmada Açık Saha Test Alanı bundan sonra ASTA kısaltmasıyla kullanılacaktır.

1.2 Türk Standardları Enstitüsü

Türk Standardları Enstitüsü; 18.11.1960 tarih ve 132 sayılı kanun ile kurulmuş, her türlü ürün, madde, usul ve hizmet standartlarını oluşturmak amacıyla olan, şu an Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın ilgili kuruluşu konumunda bir kuruluştur. Kamu kurumu niteliğinde olan enstitü, özel hukuk hükümlerine göre yönetilmekte olup, tüzel kişiliği haizdir. Kısa adı ve markası TSE'dir. TSE ülkemizin kendi içinde ve uluslararası alanda rekabet gücünü artırmak ve ticaretini kolaylaştırmak,

milletimizin refah standardını yukarı çekmek amacıyla; standardizasyon, muayene ve gözetim, uygunluk değerlendirme/belgelendirme, deney ve kalibrasyon faaliyetlerini sürdürmektedir. TSE, bu çalışmaları tarafsız, bağımsız, etkin ve güvenilir şekilde yürütme misyonu; ulusal, bölgesel ve uluslararası alanda tercih edilen, yönlendirici ve lider bir kuruluş olma vizyonu ile gerçekleştirmektedir. TSE tarafından kabul edilen standartlar Türk Standardı şeklinde adlandırılarak, ülkemizin her alanda standardizasyonuna katkıda bulunmaktadır. İhtiyari olan bu standartlar, standardın ilgili olduğu bakanlığın onayı ile zorunlu hale getirilebilir. Bir standardın zorunlu kılınabilmesi için Türk Standardı olması gerekmekte olup, bu zorunlu kılınan standartlar Resmi Gazete’de yayımlanır [1].

Türk Standardları Enstitüsü her türlü standardın hazırlanması veya hazırlatılması, bu hazırlanan veya hazırlatılan standartların tetkik edilmesi ve uygun görülenlerin Türk Standardı olarak kabul edilmesi görevlerini yürütür. TSE, kabul edilen standartları yayımlar, uygulanmalarının teşvik edilmesini sağlar ve zorunlu kılınması düşünülen standartları ilgili bakanlığın onayına sunar. Kamu sektörü ve özel sektörün istekleri değerlendirilerek standartlar veya projeler hazırlanır, ilgili konularda görüş bildirilir. Standardizasyon ve standartlar konusunda bilimsel, teknik inceleme ve araştırmalar yapmak, uluslararası alandaki çalışmaları takip etmek, diğer ülkelerin standart kurumları ve standart konusunda faaliyet gösteren uluslararası kuruluşlarla iletişim ve işbirliğini sağlamak yine TSE’nin görevleri arasında yer almaktadır. TSE, üniversite ve diğer bilimsel/teknik kurum ve kuruluşlarla işbirliği yapar, standardizasyon konusunda yayımlar ve standart arşivleri oluşturur [1].

Ülkemizde standardizasyonun yerleşmesi ulusal çıkarlar açısından kritik öneme sahiptir. Bu noktada TSE önemli bir konumda yer almaktadır. TSE, ülkemizde standardizasyonun ve standart bilincinin yerleşmesi ve gelişmesi amacıyla, kalifiye personeller yetiştirir, kurs ve seminerler düzenler. TSE, standartlar üzerine araştırmalar yaparak, ihtiyari standartların uygulanmasını kontrol etmek; deney, metroloji ve kalibrasyon konularında araştırma ve geliştirme yapmak ve kamu ve özel sektörün taleplerini yerine getirmek amacı ile laboratuvarlar kurmuş olup, yurt ve dünyadaki gelişmeler çerçevesinde ilgili alanlarda yeni laboratuvarlar kurmaya devam etmektedir. Kamu ve özel sektörün talepleri doğrultusunda teknik çalışmalar yapmakta ve raporlar üretmektedir. Standartlara uygun ve kaliteli üretimi teşvik amaçlı çalışmalar yapmakta, ilgili doküman ve belgeleri düzenlemektedir [1].

1.3 Literatür Araştırması ve Standartlar

Bu çalışmada faydalanılacak temel kaynaklar ANSI C63.5-2006 [2] ve ANSI C63.4-2014 [3] standartlarıdır. ANSI 63.5-2006 standardından elektromanyetik uyumluluk antenleri kalibrasyon metot ve işlemleri için, ANSI C63.4-2014¹ standardından ise ASTA'nın doğrulanması için faydalanılmıştır. Ayrıca, ANSI C63.7-2015² [4], ANSI C63.6-1996 [5] ve ANSI C63.2-2009 [6] standartlarından da yardımcı standartlar olarak faydalanılmıştır.

EMC anten kalibrasyonları için ANSI C63.5-2006 dışında SAE ARP958D:2003 [7] standardı da çokça kullanılmaktadır. Ayrıca saha validasyonu için CISPR 16-1-5:2014 [8] standardı saha validasyonlarında detaylı olarak analizler ve temelde eşdeğer devre mantığından hareketle teorik hesaplamalar ile ölçümleri karşılaştırma şeklinde bir doğrulama kriteri sunan bir standarddır. ANSI C63.5-2006'nın atıf yaptığı “Standard Field Method” ve “Standard Transmitting Loop Method” adlı EMC anteni kalibrasyon metotlarını içeren IEEE Std 291-1991 (arşiv standart) önemli bir kaynaktır [9]. Yine ANSI C63.5-2006'nın atıf yaptığı “Standard Antenna Method” konusunda R.G. Fitzgerald [10] ve H.E. Taggart ve J.L. Workman [11] tarafından oluşturulan çalışmalar ile ANSI/IEEE Standard 149-1979 [12] standardı önem arz etmektedir.

Standartların dışında Albert A. Smith, Jr.'ın, “Standard-Site Method for Determining Antenna Factors” adlı makalesinde açık sahada saha zayıflaması ölçümlerinden faydalanılarak antenleri kalibre etmek amaçlanmıştır. Standart Saha Metodu olarak tanımlanan metotta, ölçüm sonuçlarının doğruluğu sahanın kalitesiyle ilişkilendirilmiştir. ANSI C63.5-2006'da yer alan standart saha metodunun temellerini oluşturan bu çalışmada, 30 MHz - 1 GHz frekans aralığında anten faktörlerinin Standart Anten Metodu kullanılarak uygun ve uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir [13].

ANSI C63.4-2014'te yer alan normalize edilmiş saha zayıflaması terimini ileri süren Albert A. Smith, Jr. , Robert F. German ve James B. Pate'in “Calculation Site Attenuation From Antenna Factors” adlı makalesinde anten faktörlerine dayanan bir

¹ Çalışma başlangıcında standardın 2009 versiyonu [14] bulunmakla beraber, 2014 güncellemesiyle gelen değişiklikler incelenerek tez çalışması da güncel standarda uygun hale getirilmiştir.

² Çalışma başlangıcında standardın 2005 versiyonu [15] bulunmakla beraber, 2015 güncellemesiyle gelen değişiklikler incelenmiş, tez çalışmasını etkileyecek yeni bir durum ortaya çıkmadığı anlaşılmıştır.

saha zayıflaması modeli ortaya konmuştur. ANSI C63.4-2014'te yer alan saha zayıflaması ölçümlerinden, kullanılan antenlerin anten faktörlerinin çıkarılmasıyla elde edilen değer olan ve "Normalized Site Attenuation" olarak adlandırılan kavramın temeli bu makale ile ortaya konmuştur. Yatay ve dikey polarizasyonlarda, yakın mesafede yatay olarak yerleştirilmiş antenlerde, karşılıklı kuplaj etkileri tartışılmıştır. Anten Faktörlerine dayanarak saha zayıflamaları ölçümlerinde 30 MHz- 1 GHz frekans aralığında birçok farklı saha, anten ve geometrik yerleşimde ölçüm sonuçları ve teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca antenlerin karşılıklı empedanslarından karşılıklı kuplaj değeri düzeltmeleri hesaplanmıştır. Saha zayıflamasının anten faktörleriyle ilişkilendirilmesi geniş band antenlerin avantajlarından faydalanılmasını sağlamakta ve bir yandan da ölçüm işlemlerini kolaylaştırmaktadır. Böylece, daha kısa sürede, daha modern cihazlar ile saha doğrulamasının yapılabileceği ortaya konmuştur [16].

J. B. Berry, J. B. Pate ve A. N. Knight'in "Variations in Mutual Coupling Correction Factors for Resonant Dipoles Used in Site Attenuation Measurements" çalışmasında resonant dipol antenlerde ANSI C63.4 normalize edilmiş saha zayıflaması ölçümlerine düzeltme faktörlerinin eklenmesi gerekliliğinden bahsedilerek, 3 m uzaklıkta, yatay ve dikey polarizasyonda saha zayıflamalarının tahminine yönelik yeni bir metot sunulmuştur. Bu çalışma da ANSI C63.4'e katkıda bulunan bir çalışma olmuştur [17].

Yine D. N. Heirman'in "Definitive Open-Area Test Site Qualifications" [18] ve "Vertical Site Attenuation - A Necessity" [19] çalışmaları ile J. B. Pate'in "Potential Measurement Errors due to Mutual Coupling Between Dipole Antennas and Radio Frequency Absorbing Material in Close Proximity" [20] çalışması da ANSI C63.4'e katkıda bulunan diğer çalışmalardandır.

M. J. Salter ve M. J. Alexander'in "EMC Antenna Calibration and the Design of An Open-field Site" makalesinde 30 MHz - 1 GHz arasında açık alan test sahası dizaynı tartışılmıştır. Saha özelliklerinin tespitinde belirsizliklerin öneminden dolayı, primer standart olarak kullanılan antenlerin hesaplanabilir anten faktörleri olması gerekliliği üzerinde durulmuş, standart dipol antenin dizaynı, balun devresinin s-parametre karakterizasyonu tanıtılarak, antenlerin kalibrasyonu tartışılmıştır [21].

Akira SUGIURA, Takao MORIKAWA, Kunimasa KOIKE, Katsushige HARIMA ortak çalışmasında standart saha metodu matris sunumları ile ifade edilmiş, ölçümler

sırasında antenlere bağı olmayan kablo ve diğr ilişkili cihazlar tarafından oluşturulan efektif yük empedansının Standart Saha Metodu (SSM) anten faktörünü etkilediğı ortaya konmuştur. Gerçek yük koşullarında anten faktörünü belirlemek için ek bir çevrim gerektiğı ve SSM'nin yüksekliğe bağı anten faktörlerine sahip antenlerde kullanılabilir olmadığı üzerinde durulmuştur [22].

E. L. Bronaugh ve J. D. M. Osburn'un "Measuring EMC Antenna Factors in the GHz Transverse Electromagnetic Cell" çalışmasında EMC ölçümlerinde kesinlik ve doğruluğun artışına bağı olarak, anten faktörlerinin yeni bir yöntemle GHz çapraz elektromanyetik hücrede karşılaştırmalı ölçümlerle elde edilmesi ve yöntemin yeterliliğı tartışılmaktadır [23].

M. J. Alexander, M. J. Salter, D. G. Gentle, K. P. Holland'ın "Advances in Measurement Methods and Reduction of Measurement Uncertainties Associated with Antenna Calibration" adlı ortak çalışmasında antenlerin düşük belirsizliklerle kalibrasyonu üzerinde tartışılmıştır [24].

L. Sevgi, S. Çakır ve G. Çakır'ın "Antenna Calibration for EMC Tests and Measurements" adlı çalışmasında da normalize edilmiş saha zayıflamalarının teorik hesapları ve pratik ölçümleri sunulup, anten faktörü ve mutlak-kazanç ölçüm metotları gözden geçirildikten sonra, alternatif bir kalibrasyon yaklaşımı ortaya konmuştur [25].

M. Doğan, E. Baran, F. Üstüner ortak çalışması olan "ANSI C63.5 Standardına Göre Anten Kalibrasyon ve Otomasyonu" makalesinde TÜBİTAK-BİLGEM EMI/EMC bölümünde gerçekleştirilen anten kalibrasyon ve otomasyon faaliyetleri hakkında bilgiler verilmiştir. Anten kalibrasyonunun gelişim sürecinin yanında, anten kalibrasyonu için farklı metotlardan ve TÜBİTAK BİLGEM altyapısı ile hangi tip antenlerin kalibrasyonlarının yapılabilidiğinden bahsedilmiştir [26].

B.Türetken ve E.Baran'ın "A New Implementation of ANSI C63.5 for 1 Meter Antenna Calibration" adlı çalışmasında 1 m'de anten faktörü ölçümleri için ANSI C63.5 standardının yeni bir uygulaması sunulmuş, farklı metot ve antenlerle TUBİTAK-UEKAE ve NPL ölçümleri karşılaştırılmıştır [27].

K. Fujii, M. Alexander ve A. Sugiura'nın "Uncertainty Analysis for Three Antenna Method and Standard Antenna Method" [28] adlı makalesinde üç anten ve standart anten metotlarının belirsizlikleri üzerinde, T. Morioka ve K. Komiyama'nın

“Uncertainty Analysis of Dipole Antenna Calibration Above a Ground Plane” [29] adlı makalesinde ise dipol anten kalibrasyonu belirsizliği üzerinde çalışılmıştır.

E. R. Heise ve R. E. W. Heise'nin “A Method to Compute Open Area Test Site Uncertainty Using ANSI C63.4 Normalized Site Attenuation Measurement Data” adlı çalışmasında normalize edilmiş saha zayıflaması ölçüm seti kullanılarak yapılan saha doğrulamasının ölçüm belirsizliği tartışılmıştır. Çalışma 3 m ve 10 m uzaklık için gerçekleştirilmiştir [30].

European Commission Measurement and Testing Programme-Intercomparison of EMC Antenna Factors 30 MHz to 1 GHz-Report EUR 16708 EN (M. J. Alexander) adlı karşılaştırma raporu ile bildirilen uluslararası anten kalibrasyon karşılaştırmasına Avrupa'da yer alan 10 ülkeden pilot laboratuvar da dahil 16 laboratuvar katılmıştır. Bu karşılaştırma anten faktörü ölçümleri, yansıma katsayısı ölçümleri ve ölçüm belirsizlikleri hesaplarını içerdiğinden bu konuda detaylı bir rapor oluşturmuştur. Avrupa'da farklı ülkelerdeki anten kalibrasyon alanlarında gerçekleştirilen kalibrasyonların doğruluğu ve tutarlılığı açısından, ± 1 dB bandında anten faktörü ölçümlerinin elde edilmesi ve Avrupa kapsamında anten kalibrasyon metrolojisinin düzeyinin artırılması ve geliştirilmesi hedeflenmiştir [31].

Antenlerin hava şartlarından etkilenebilirliği üzerinde bir çalışma Qingmin Li, Li Zhang; Wei Wang; J. D. Yan ve W. H. Siew tarafından yapılmıştır. “Impact of the Weather Factors on Frequency-domain Characteristics of the Antennas Used for EMC Measurement in Power Systems” adlı çalışmada EMC ölçümlerinde hava durumundan kaynaklanan etkiler tartışılmış; sıcaklık, nem ve basınç koşullarının anten ölçüm değerleri üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar, dijital işaret işleme, geliştirilmiş vektör fitting metotları ve yapay sinir ağları kullanılarak, hava şartlarının anten karakteristikleri üzerindeki etkilerinin ortaya çıkarılması için çalışılmıştır. Değişen hava koşullarında anten frekans cevapları elde edilerek, hava koşullarına bağlı anten frekans karakterizasyonları ortaya konmuştur [32].

1.4 Elektromanyetik Uyumluluk-EMU (Electromagnetic Compatibility-EMC)

Elektromanyetik ortam, belli bir alandaki tüm elektromanyetik olayların oluşturduğu ortamdır. Bu ortamlarda elektromanyetik girişimler oluşabilir. Elektromanyetik

girişim ise elektrik ve elektronik cihazlarda performans düşüşüne ve bozulmaya, istenmeyen tepkilerin oluşmasına veya yanlış çalışmaya sebebiyet verebilen, radyo frekanslarında, doğal veya insan kaynaklı olabilen bozucu sinyal ve emisyon gibi etkiler olarak adlandırılabilir. Kısaca EMI (Electromagnetic Interference) olarak gösterilir [33].

Elektromanyetik girişimler cihazların ve sistemlerin sağlıklı çalışmalarını engelleyebilir, fonksiyonlarını yerine getirememelerine yol açabilir. Polis telsizlerinin radyolara karışması, cep telefonları arama ve konuşmalarında bilgisayarlarda ve hoparlörlerde gördüğümüz etkiler, etrafındaki başka bir cihazın çalışmasından dolayı televizyon ekranlarında oluşan çizgilenmeler, yine cep telefonlarının uçaklarda uçuş kontrol sistemini, araçlarda ABS sistemini etkilemesi, baskı devrelerde oluşan sızıntılar günlük hayatta karşılaştığımız birçok elektromanyetik girişim örneğinden sadece birkaçıdır. Elektromanyetik girişimi oluşturan başlıca sebepler arasında kalitesiz kablolar, baskı devre elemanları, bağlantı noktalarındaki sızıntılar, dirençler, kondansatörler, indüktörler, kullanılan elemanların kararlılık durumu, elektromekanik cihazlar, sayısal devre elemanları, mekanik anahtarlar ve solenoidler sayılabilir [34,35].

Elektromanyetik uyumluluk (EMU) ise (Electromagnetic Compatibility-EMC) 24/10/2007 tarih ve 26680 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren “Elektromanyetik Uyumluluk Yönetmeliği (2004/108/AT)” içeriğinde “Donanımın kendi elektromanyetik ortamında, aynı ortamda bulunan donanımlarda tolere edilemeyen elektromanyetik bozulmaya yol açmaksızın tatminkar bir şekilde çalışabilme yeteneği” olarak tanımlanmıştır. Yine söz konusu yönetmelikte elektromanyetik bozulma “Donanımın performansını düşürebilen elektromanyetik gürültü, istenmeyen bir sinyal veya yayılma ortamının kendisindeki bir değişiklik olarak ifade edilmiştir [36].

Bir başka tanımla elektromanyetik uyumluluk elektriksel, elektronik ve elektromekanik cihazların veya sistemlerin bulundukları elektromanyetik ortamda çevresiyle uyumlu çalışabilme yeteneğidir. Üretimi yapılan her elektrik, elektronik veya elektromekanik cihazın, kullanıma sunulmadan önce elektromanyetik uyumluluğunun test edilmesi gerekir. EMC deneyleri olarak adlandırılan bu testlerde ilgili cihazların çevresine, bağlandıkları elektrik güç hatlarına veya veri iletim hatlarına istenmeyen girişim sinyalleri (EMI) yayıp yaymadığı, yayıyorsa derecesi;

bunun yanında çevresinden, bağlandıkları elektrik güç hatları ve veri iletim hatlarından etkilenip etkilenmediği, etkileniyorsa derecesi belirlenir [37].

Bağışıklık ise yine “Elektromanyetik Uyumluluk Yönetmeliği (2004/108/AT)” içeriğinde “Donanımın elektromanyetik bir bozulma bulunduğu sırada performans kaybı olmaksızın tasarlandığı şekilde çalışabilmesi” olarak tanımlanmıştır [36].

Bir cihazın kendi içinde girişime sebebiyet vermemesi öz uyumluluk (self compatibility) olarak adlandırılır. Herhangi bir cihaz öz uyumlu olup, diğer cihazlara girişimde bulunmamakta ve diğer cihazlardan kaynaklı girişimlere de bağışık durumdaysa, bu cihazın elektromanyetik uyumluluğa sahip olduğu söylenebilir [33].

Fırçalı tip DC Motorun yakında bulunan AM radyoyu etkilemesi, DC motordan yayılan emisyonların, radyonun bağışıklığı ile uyumlu olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda DC motordan yayılan emisyonların azaltılması veya radyonun bağışıklığının artırılması gerekmektedir [38].

Kısaca EMC tarihçesine bakıldığında, ilk olarak 1800’lerin sonlarında Marconi gerçekleştirdiği deneyler ile elektromanyetik girişim ve uyumluluk kavramlarının temelini oluşturmuş, sonrasında kablo yardımı ile Atlantik ötesi iletişim teknolojisinin önünü açmıştır. 1900’lerin başında, radyo alıcı/vericisi sayısının az olması EMI problemlerinin çözümünü de kolaylaştırmaktaydı. 1920’lerde ilk teknik makaleler yayınlanmış, 1930’lu yıllarda ise gelişen teknoloji ile beraber, birçok sistem ve cihazda, elektromanyetik girişimler önemli sorunlar oluşturmaya başlamıştır. Artan EMI sorunlarına çözüm bulmak amacıyla International Electrotechnical Commission (IEC) tarafından 1933’te Paris’te gerçekleştirilen toplantıda, International Spectral Committee on Radio Interference (CISPR)’ın bu problemler üzerinde çalışması konusunda tavsiye kararı alınmıştır. II. Dünya Savaşı sırasında, EMI en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Savaşın ardından 1946’da CISPR yeniden yapılandırılmış, 1950-1970 yılları arasında transistörün, entegre devrelerin ve mikroişlemcilerin bulunuşu ve sonrasında bu teknolojilerin hızla gelişmesi EMI/EMC sorununun daha da belirginleşmesine sebebiyet vermiştir. Sayısal işaret işleme uygulamalarındaki artış ve entegre devre teknolojileri EMI problemlerinin çoğalmasına neden olmuştur. Frekans spektrumu da kalabalıklaşmış ve bunun sonucunda bir frekans planlaması yapılması gerekliliği oluşmuştur. 1979’da ABD’de Federal Communication Commission (FCC) elektronik cihazlardan yayılım

limitleriyle ilgili dökümanlar yayınlamıştır. Devam eden süreçte EMI-EMC testleri konusunda birçok kaynak döküman oluşturulmuştur. Oluşan standartlarla birlikte elektronik ürünlerin pazarlanabilmesi, başka ülkelere girebilmesi ve kullanılabilmesi açısından elektromanyetik uyumluluk çok önemli bir kritere dönüşmüştür [35,39].

Elektromanyetik enerji ışınım ve iletim yoluyla taşınır. Elektromanyetik uyumluluk elektromanyetik enerjinin üretimi, iletimi ve alımı ile ilgili bir kavramdır. EMC olayı, yayılım (emisyon) üreten bir kaynağın (emitter), bir transfer ya da kuplaj yolu ile bu emisyon enerjisini, enerjinin istenen veya istenmeyen bir şekilde işlendiği alıcıya transfer etmesi şeklinde gerçekleşir. Alınan enerji alıcıda istenmeyen bir davranışa yol açıyorsa girişim gerçekleşmiştir. Bu noktada alıcı tarafından alınan enerjinin nasıl işlendiği önem arz etmektedir [39].

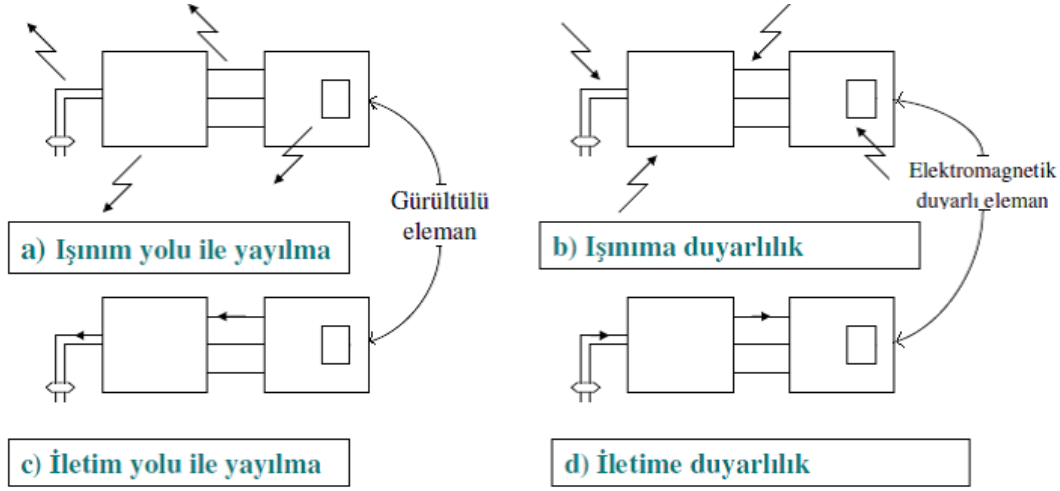
Bir EMC probleminde üç temel öge EMI kaynağı, girişimden etkilenen kurban ve kaynak ile kurban arasındaki girişimin sağlandığı girişim yoludur. Girişimin engellenmesi için 3 yol bulunmaktadır :

1. Girişimin kaynağında bastırılması,
2. Kuplaj yolunun etkisiz hale getirilmesi,
3. Alıcının emisyonu olan hassasiyetinin (alınanlığının) azaltılması [39,40].

EMI özelinde düşünüldüğünde elektromanyetik enerji transferini 4 alt grupta incelemek mümkündür [35,39]:

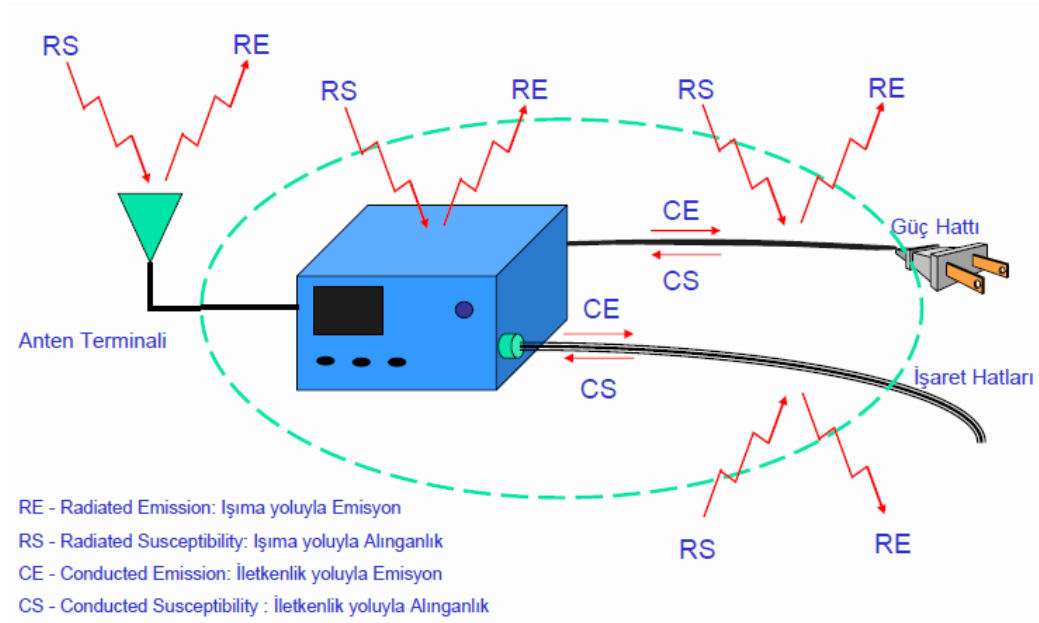
1. Işınım yoluyla yayılma (radiated emissions),
2. Işıma duyarlılık/alınanlık (radiated susceptibility),
3. İletim yoluyla yayılma (conducted emissions),
4. İletim duyarlılık/alınanlık (conducted susceptibility).

Şekil 1.1’de bu 4 alt grup gösterilmiştir. Sonuç olarak bu 4 alt grup EMC kavramının da 4 temel konusunu oluşturmaktadır [35].



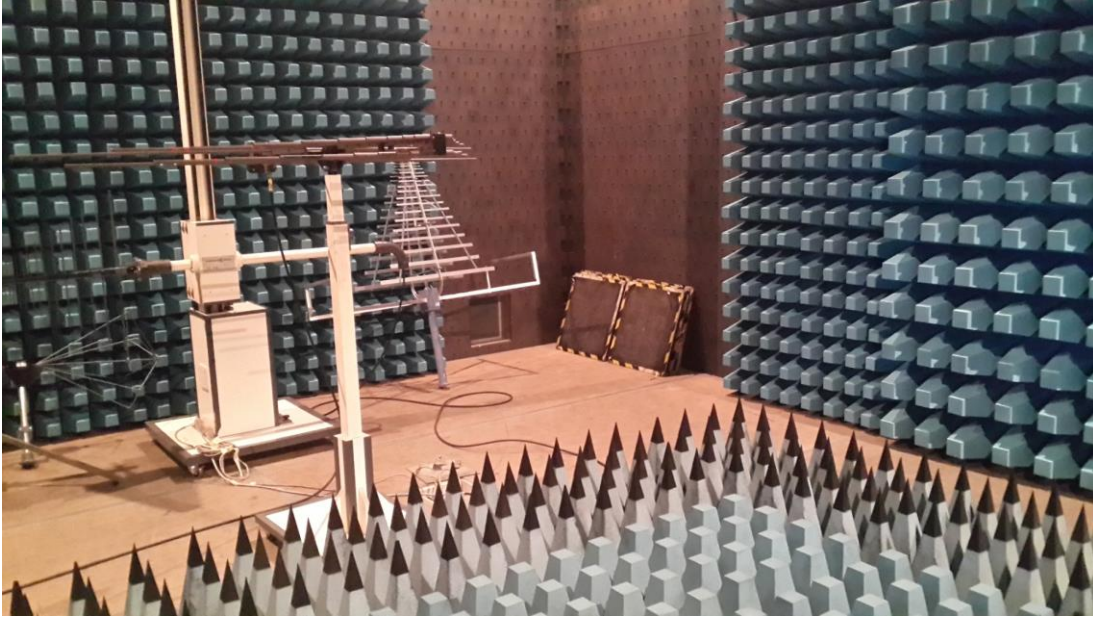
Şekil 1.1 : Elektromanyetik enerji transferinin 4 alt grubu.

Şekil 1.2’de ise bir cihazın elektromanyetik girişim yolları görülmektedir [33].



Şekil 1.2 : Bir cihazda elektromanyetik girişim yolları.

EMC, kuplaj mekanizmalarına göre ışıma yolu, iletim yolu ve bu iki mekanizmanın kombinasyonu olmak üzere 3 kısma ayrılabilir. Elektrostatik boşalma (Electrostatic Discharge) üçüncü bölüm altında incelenebilir. Işıma ve iletim yolu da daha önce de belirtildiği gibi kendi içinde ek olarak yayılım ve bağışıklık olmak üzere iki alt disipline daha ayrılmaktadır. Işıma ile yayılım ve bağışıklık ölçümlerinde birim olarak, birim uzaklıktaki gerilim (mikrovolt/metre ya da volt/metre) veya bunların desibel (dB) olarak eşdeğeri kullanılır [38].



Şekil 1.4 : TSE Gebze Elektroteknik Müdürlüğü'ne ait Yarı-Yansısız Oda.

1.5 Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) Antenleri

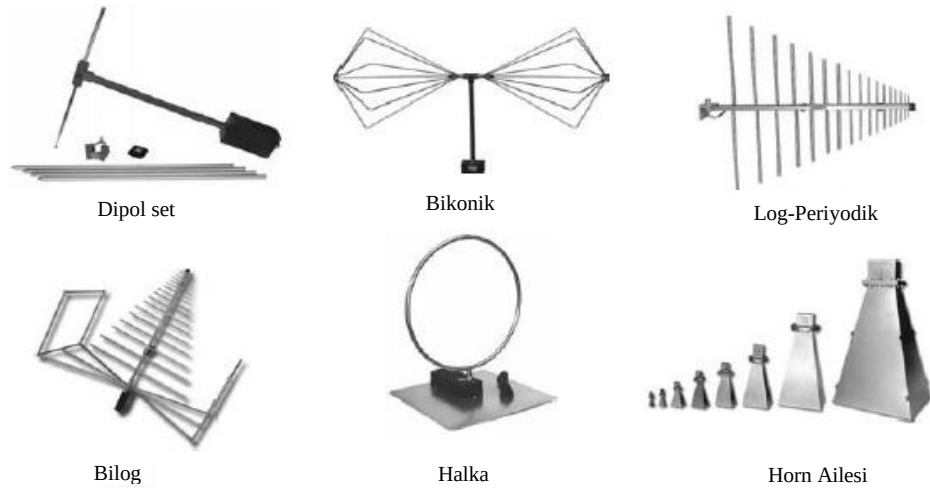
Anten, besleme noktalarına uygulanan gerilimi elektrik alana dönüştüren ya da elektrik alanı gerilime dönüştüren bir dönüştürücü olarak tanımlanabilir. Gerilimi elektrik alana çeviren anten verici anten, elektrik alanı gerilime çeviren anten ise alıcı antendir. Antenler iki yönlü yani resiprok elemanlar olup, verici anten aynı zamanda alıcı anten, alıcı anten ise verici anten olarak kullanılabilir. Örneğin bir alıcı anten bulunduğu belli bir ortamdaki elektromanyetik dalgalardan kaptığı elektrik alan etkisini kendi terminallerindeki gerilim farkına dönüştürür [40].

EMC anteni olarak adlandırılan antenler ise EMC uygulamalarında başta yayılan elektromanyetik emisyonların ölçümlerinde, yayılım bağışıklığı testlerinde, test alanının uygunluğunu tespit etme testlerinde olmak üzere birçok alanda kullanılan antenlerdir [43].

EMC Testlerinde sıkça kullanılan antenler ve özellikleri hakkında kısaca bilgi vermek gerekirse:

- 1- Ayarlanabilir dipol anten (Tunable dipole antenna): Ayarlanabilir dipol antenler genelde 25 MHz-1000 MHz frekans aralığında çalışabilen antenler olup, resonant dipol ve yarım-dalga dipol olmak üzere 2 tipi bulunmaktadır [44].

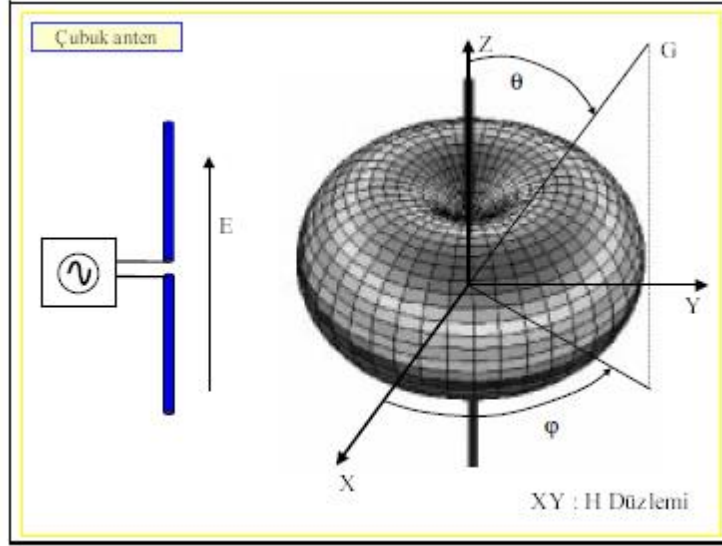
- 2- **Bikonik Anten:** Bikonik antenler aynı eksen ve köşeyi paylaşan iki konik iletkenlerden yani adından da anlaşılacağı üzere iki simetrik konik elemandan oluşan genişbant dipol antenler olup, genellikle 30 MHz – 1000 MHz frekans aralığında çalışırlar [44].
- 3- **Log-Periyodik Antenler:** Log-periyodik antenler bikonik antenlere göre yüksek frekanslarda çalışan ve karakteristikleri frekansın logaritması şeklinde periyodik olarak tekrarlanan bir geometri yapısına sahip antenlerdir. Bu antenlerin çalışma frekans aralığı genelde 200 MHz–1000 MHz’dir [44].
- 4- **Bilog/Bikonilog/Hibrit Antenler :** Bu antenler bikonik ve log-periyodik gibi farklı özellikteki antenlerin özelliklerini tek bir yapıda taşıyan karma özellikteki antenlerdir [44].
- 5- **Halka Antenler :** Bu antenler manyetik alanlara karşı hassas, elektrik alanlara karşı korumalı, frekans aralığı genellikle 20 Hz - 30 MHz olan halka şeklinde antenlerdir [44].
- 6- **Horn Antenler :** Genellikle 1 GHz üstü frekanslarda çalışan, yüksek yönelticiliği ve dar ışın demeti genişliği olan antenlerdir. Şekil 1.5’te EMC testlerinde sıkça kullanılan antenler görülmektedir [44].



Şekil 1.5 : EMC testlerinde sıkça kullanılan antenler [44].

En basit anten olan tipik bir çubuk antenle anten prensiplerini incelemek amacıyla bir çubuk anten ve etrafında oluşturduğu elektrik alan dağılımı Şekil 1.6’da verilmiştir. l uzunluğu olan bir iletken çubuk veya tel ortasından beslendiğinde anten gibi çalışır. Bilindiği üzere hareketli ve değişken yükler, hem elektrik hem de manyetik alan

oluştururlar. Şekil 1.6'daki çubuk antende oluşan elektromanyetik dalgaların çubuk eksenine paralel bir elektrik alan bileşeni bulunmaktadır. Elektrik alanın yoğun olduğu yerler, şekilde sağ kısımda üç boyutlu değişim ile gösterilmektedir. Alan şiddetinin, anten merkezinden uzaklaştıkça bazı noktalarda yüksek, belli yerlerde ise sıfır olduğu görülmektedir. Antenin uzunluğu ve frekans değeri yaydığı gücü etkilemektedir. İşaret dalga boyu antenin boyundan çok büyük ise antenin ışıma direnci çok küçük olacağından yayılan güç de çok küçük olmaktadır. Anten boyu ile yarım dalga boyu birbirine yakın değerlerde ise yayılan güç en fazla olmaktadır. Bu tip antenler rezonanslı (rezonant) antenler olarak adlandırılmaktadır. Şekilde standart anten yerleşimi ile birlikte, θ düşey ile yapılan açı, ϕ ise yatayda x eksenine ile yapılan açı olmak üzere yatay ve düşey düzlemlerle ilgili açılar gösterilmiştir. Yatay ve düşey düzlemler sırasıyla H-düzlemi ve E-düzlemi olarak ta adlandırılabilir [40].



Şekil 1.6 : Çubuk anten ve ışıma diyagramı.

L. Sevgi'ye göre (2000), “Bir anten için önemli parametreler;

- Giriş empedansı, ışıma direnci, girişindeki duran dalga oranı (DDO)
- Giriş gücü, ışıma gücü, verim
- Yatay ya da düşey ışıma diyagramları, polarizasyon
- Etkin yüzey, yönelticilik ve kazanç
- Demet genişliği, yakın alan – uzak alan
- Anten faktörü, anten kalibrasyonu olarak sıralanabilir” ([40], s. 72).

Giriş Empedansı : Antenin besleme terminallerinde yani gerilim kaynağının bağlanacağı uçlar arasında bir empedans değeri bulunmaktadır. Bu değer giriş empedansı olarak adlandırılır [40].

Duran Dalga Oranı (DDO/SWR)–Yansıma Katsayısı–Dönüş Kaybı : Anten giriş empedansı ile kaynağın uçlarındaki empedansın farklı olması, kaynak ile anten girişi arasında bir empedans uyumsuzluğu meydana getirir. Bu empedans farkına bağlı olarak giriş kısmında geri yansıyan bir güç oluşur. Duran dalga oranı ise anten girişinde geri yansıyan gücü ifade eden bir parametre olup, anten girişinde yansıyan ve giden gerilim dalgalarından oluşan maksimum gerilimin minimum gerilime oranı olarak tanımlanabilir. Empedans uyumlaştırıcı devreler bu geri yansımaları azaltmak için anten girişinde, kaynak ile anten arasında kullanılan devrelerdir. Tek frekans noktasında empedans uyumunun sağlanması, antenlerin genelde oldukça geniş bir frekans bandında kullanılması sebebiyle yeterli değildir. Empedans frekansla değişeceğinden, empedans uyumlaştırıcının da bu değişime uygunluk sağlaması gerekmektedir. Bu uygunluk belirli sınırlarda sağlanabilir. Duran dalga oranı değeri, pratikte belli bir frekans bandının ortasında ve kenarında verilirken, orta noktadaki değer en iyi değer, kenar değeri ise en kötü değer olarak nitelendirilebilir. Parametrelerin optimizasyonunda bandın ortası baz alındığından en kötü performans band kenarında beklenir. Daha sonra belirsizlik kısmında inceleneceği üzere, duran dalga oranı kaynaklı belirsizliklerde olasılık dağılımı olarak U dağılımının kullanılmasının sebebi de budur [40].

Aslında hem duran dalga oranı, hem yansıma katsayısı, hem de dönüş kaybı uyumsuzluk faktörüyle ilgilidir. Uyumsuzluğun meydana gelmesi ve iletim hattında durgun bir dalga oluşması sonucunda, maksimum ve minimum gerilimlerin oranı gerilim duran dalga oranını (VSWR) verir. Burada her üç kısaltma da (DDO, SWR, WSWR) duran dalga oranını ifade etmektedir. VSWR 1'e yaklaşıyorsa, empedans uyumsuzluğu azalmış ve daha iyi bir eşleşme sağlanmış demektir. Yansıyan gerilimin, ilerleyen gerilime oranı ise yansıma katsayısı olarak adlandırılır. Yansıma katsayısı gerçek bir sayı olabileceği gibi kompleks bir sayı da olabilir. Yansıma katsayısı küçülüyorsa, daha iyi bir eşleşme sağlanıyor demektir. Dönüş kaybı (return loss - RL) ise, yansıma katsayısının logaritmik formunun büyüklüğü olarak tanımlanabilir [43].

Bu 3 terimi aşağıdaki denklemlerle formülize edebiliriz [43]:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1.1)$$

$$|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (1.2)$$

$$RL = -20 \cdot \log|\Gamma| \quad (1.3)$$

Burada $|\Gamma|$ yansıma katsayısının büyüklüğü, RL ise dönüş kaybının dB cinsinden büyüklüğüdür. Güç açısından bakıldığında şu denklem kullanılabilir [43]:

$$P_{net} = (1 - |\Gamma|^2) \cdot P_{fwd} \quad (1.4)$$

Burada P_{net} net güç, P_{fwd} ise ilerleyen güçtür. Örneğin bir antenin duran dalga oranı $VSWR=2:1$ olsun. Bu durumda yukarıdaki formüller yardımıyla yansıma katsayısı $1/3$, dönüş kaybı 9,5 dB olarak hesaplanır. Gücün %11'i yansır, diğer bir deyişle antene iletilen net güç, toplam gücün %89'udur [43].

Anten Verimi : Kaynaktan çekilen gücün bir bölümü antende ısı kayıp olarak harcanır. Kaynaktan çekilen güç, ışıma gücü ve ısı kayıpların toplamına eşittir. Işıma gücünün kaynaktan çekilen güce oranı antenin verimidir. Yüksek verim için ısı kayıpların az olması gerekir [40].

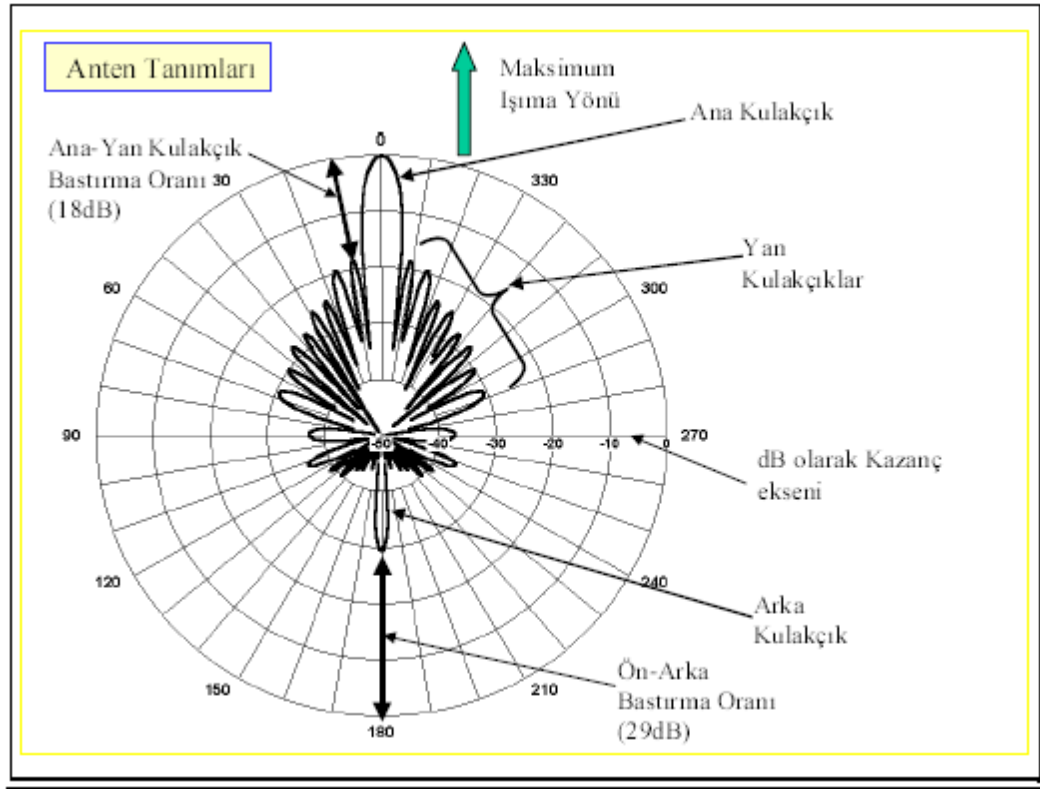
Yakın Alan-Uzak Alan : Yakın alan, antenin ya da ışıma elemanının yakınında yer alan, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin düzlem dalga karakteri göstermediği, her iki bileşenin de karmaşık karakter göstermesinden dolayı ölçülmesinin çok zor olduğu bölgedir. Bu karmaşık karakterden dolayı daha çok reaktif enerji birikimi oluşmaktadır. Düzlem dalga yaklaşımı yapılabildiği bölge ise uzak alandır [40].

Faz Merkezi : Işıma yapan bir dalga cephesi yakın alandayken kavislidir. Uzak alanda bu kavis çok geniş olduğundan dalga cephesi neredeyse düzlem dalga halini alır. Faz merkezi kavisin görünür merkezi olarak tanımlanabilir. Faz merkezi dipol ve bikonik anten gibi çoğu EMC anteninde oldukça net olmakla beraber, log-periyodik antenlerde frekans yükseldikçe arka taraftan ön tarafa doğru kayan bir faz merkezi bulunmaktadır [43].

Işıma Diyagramları ve Polarizasyon : Işıma diyagramları, antenlerin yaydığı gücün yönünü ve şiddetini gösteren şekillerdir. Herhangi bir düzlem için ışıma diyagramı oluşturulabileceği gibi, genelde yatay vey düşey düzlemdeki diyagramlarla ilgilenilir.

Balanis'e göre (2005) belli bir doğrultuda bir antenin polarizasyonu "antenden gönderilen (ışayan) dalganın polarizasyonu" ([45], s. 70) olarak tanımlanmaktadır. Polarizasyon elektrik alanın zamanla çizdiği şekil ilgili olup, antenden yayılan elektromanyetik dalgalarda elektrik alan iletim boyunca zemine dik ise düşey, paralel ise yatay polarizasyon söz konusudur. En genel polarizasyon elips biçiminde olmakla beraber, dairesel polarizasyon elips polarizasyonun özel bir halidir. Yatay ve düşey polarizasyon ise dairesel polarizasyonun iki bileşenidir [40,45].

Anten Işıma Diyagramı Parametreleri : Tek veya dizi şeklindeki antenlerin ışıma performanslarıyla ilgili olarak birçok anten parametresi bulunmaktadır. Şekil 1.7'de tipik bir anten ya da anten dizisi için bu parametrelerin de gösterildiği bir ışıma diyagramı bulunmaktadır.



Şekil 1.7 : Tipik bir anten için ışıma diyagramı.

Şekil 1.7'de de görülmekte olan, genel olarak güç yoğunluğu belli bir yönde olan antenlerdeki parametreler kısaca şu şekildedir:

- Ana ışıma kulakçığı : En fazla ışıma yapılan yöndeki demet,
- Yan kulakçıklar: Ana kulakçık çevresindeki kulakçıklar,
- Arka kulakçık: Antenin gerisinde, ana kulakçığa zıt yönde oluşan kulakçık,

- Ön - arka bastırma oranı: Ana kulakçık ile arka kulakçık arasındaki güç oranı,
- Ön - yan bastırma oranı: Ana kulakçık ile yan kulakçık arasındaki güç oranı,
- Işıma demeti: Ana kulakçık gücünün 3 dB zayıfladığı, başka bir ifade ile yarıya düştüğü 2 nokta arasındaki açı [40].

Işıma Gücü ve Direnci : Antenden uzaya elektromanyetik dalga olarak yayılan güc antenin ışıma gücü (P) olarak adlandırılır. Işıma direnci ise anten üzerinden akan akım ile ışıma gücü ile arasında Ohm yasasına göre bulunan sanal bir direnç olup, (R_r) sembolü ile gösterilir. R_r ışıma direnci, P ışıma gücü, I akım olmak üzere ışıma direnci ile ışıma gücü arasındaki ilişki (1.5) denklemi ifade edilebilir [40].

$$R_r = \frac{P}{I^2} \quad (1.5)$$

Anten Yöneltiliği, Kazancı, Etkin Yüzey ve Demet Genişliği : Yöneltilik bir antenin ışıma yoğunluğunu belirli bir doğrultuda toplayabilmesi ya da bu doğrultudaki bir sinyali alabilmesidir. Balanis'e göre (2005) belli bir doğrultuda bir antenin kazancı ise "belli bir doğrultudaki ışıma yoğunluğunun, anten tarafından çekilen gücün izotropik olarak ışıma yapması durumundaki elde edilecek ışıma yoğunluğuna oranı" ([45], s. 66) olarak tanımlanmaktadır. Anten yöneltiliği (directivity) ve kazanç (gain) parametreleri belli bir referans antene göre belirlenir. Burada referans olarak, her yöne eşit ışıma yapan noktasal bir kaynak şeklinde tanımlanan izotropik kaynak kullanılır. Bir antenin yöneltiliği, izotropik kaynak tarafından her yöne yayılan eşit gücü belli bir doğrultuya yayabilme özelliğidir. Kazanç ise, anten yöneltiliğinin ölçüsü olup, kayıpsız antenlerde yöneltilik ile kazanç aynı değerdir. Kayıplı antenlerdeki kazanç ise yöneltilik değeri ile kayıp oranının yani verimin çarpılmasıyla bulunur. Çoğu EMC anteni alüminyum ya da diğer yüksek iletkenliğe sahip metallere üretilmekte olup, bu antenlerde omik kayıplar ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu durum kazanç ile yöneltiliğin eşdeğer olmasını sağlamaktadır. Antenin yöneltiliği analitik olarak hesaplanabilir. Bunun yanında, antenin kazancı referans antene göre belirlenir [40,43,45].

Kazanç ve yöneltilik bir antenin gönderdiği sinyali istenen şekilde gönderebilme ya da aynı doğrultudaki sinyali istenen şekilde alabilme yeteneğini ifade eder. Bu noktada aslında izotropik anten ile karşılaştırma işlemi söz konusudur. İzotropik anten ise pratikte oluşturulması mümkün olmayan teorik bir modeldir. Teorik bir izotropik

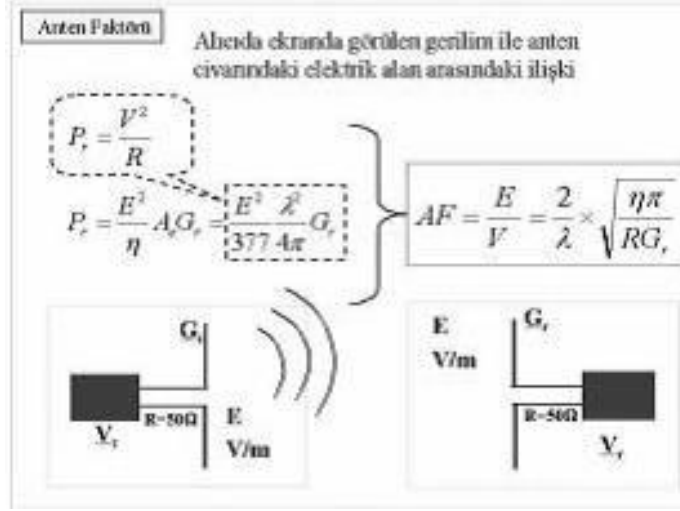
antenin yönelticiliği 0 dBi olup, burada “dBi” izotropik kaynağa göre desibel (dB) cinsinden farkı gösteren bir birim olarak nitelendirilir. Örneğin bir yarım dalga dipolün yönelticiliğinin 2,14 dBi olması, bu yarım dalga dipolün maksimum ışıma yaptığı yönde, izotropik kaynakla karşılaştırıldığında 2,14 dB daha fazla enerji oluşturabildiğini ifade etmektedir [43].

EMC uygulamalarında kazanç için omik kayıpların dışında genelde ek olarak bir uyumsuzluk faktörü daha bulunmaktadır. Uygulamada, anten ile kaynak arasındaki uyuşma hiçbir zaman ideal ve mükemmel bir şekilde sağlanamaz. Çünkü, anten portunda enerji yansımaları meydana gelmektedir. Burada, dB cinsinden ilerleyen güç ile ters gücün (yansıyan gücün) farkı net güce eşittir [43].

Etkin yüzey ve demet genişliği ise anten kazancı ile ilgili diğer parametrelerdendir. L. Sevgi'ye göre (2000), “Anten etkin yüzeyi, uzaydaki elektrik alanlardan, anten uçlarına güç aktarabilme yeteneği olarak tanımlanır. Demet genişliği, yönelticiliği olan antenlerde yönelticiliğin bir ölçüsüdür. Maksimum ışıma doğrultusundaki gücün yarıya (3 dB) düştüğü (yatayda ya da düşeyde) açısız genişlik anten ışıma demeti olarak tanımlanır” ([40], s. 75).

Anten Faktörü : Anten faktörü EMC konusunda önemli bir kavramdır. Bu çalışmada kullanılan temel parametre olması sebebiyle de önemlidir. EMC anteni kalibrasyonlarında anten faktörü ölçümleri kalibrasyonların temelini oluşturmaktadır. Anten faktörünün tanımı, antenin tanımı ile doğrudan ilişkilidir. Anten daha önce de tanımlandığı gibi elektrik alanı gerilime, gerilimi elektrik alana dönüştürebilen çift yönlü bir dönüştürücüdür. Bu dönüştürmenin ölçüsü ise anten faktörüdür. Başka bir tanımla anten faktörü, antenin polarizasyon doğrultusundaki elektrik alanının anten yükü üzerinde oluşturduğu gerilime oranı, ya da verici antenler için antene verilen gerilim ile oluşan elektrik alanının, verilen gerilime oranıdır. Bu oran desibel formunda verilir. Şekil 1.8’de anten faktörü ile ilgili bilgiler yer almaktadır. $AF=E/V$ şeklinde formülize edilebilen anten faktörünün teorik değerinden ziyade pratik değeri önemlidir. Burada E elektrik alanı, V ise gerilimi sembolize etmektedir. Ortamdaki elektrik alan, bir elektrik alan ölçüm cihazı ve bu cihaza bağlı bir alıcı anten ile ölçülmektedir. Örneğin bir çubuk anten düşünüldüğünde, bu çubuk antenin uçlarına konnektör yardımıyla bağlı koaksiyel kablodan ve bu kablonun bir diğer konnektör yardımıyla ölçüm cihazına veya kaynak cihaza bağlanmasından kaynaklı tüm etkiler anten faktörünü oluşturur. Başka bir ifade ile, antenin dışında kalan yardımcı elemanların durumu,

kullanılan kablolardaki üretim hataları, ezilme ve bükülmeler anten faktörü üzerinde etkilidir. Anten faktörü ölçümlerinde konnektör ve kablo kayıpları, empedans uyumsuzlukları gibi etkiler ölçüm doğruluğu açısından göz önüne alınmalıdır [2,40].



Şekil 1.8 : Anten faktörü.

Şekil 1.8’da anten faktörü teorik olarak incelenmiştir. Giriş uçlarındaki gerilim ve giriş empedansı alıcı girişindeki gücü (V^2/R) şeklinde etkilemektedir. Elektrik alan E ile gösterilmekte olup, düzlem dalga olarak güç yoğunluğu $E^2/377$ ’dir. G_r anten kazancını ve $A_e (= \lambda^2/4\pi)$ etkin yüzeyi göstermektedir. Bu parametrelerle alıcı gücü $(E^2 A_e G_r)/377$ olmaktadır. Bu denklemlerdeki güçlerin eşitliğinden faydalanılarak $AF=E/V$ Şekil 1.8 üzerinde de gösterildiği gibi bulunmaktadır [40].

Anten faktörünün yukarıda bulunan değeri teorik değer olup, konnektör ve kablo kayıpları bu değer içerisinde yer almamaktadır. Anten faktörü kavramında, antenin ölçüm cihazına ya da kaynağa bağlanması için kullanılan kablonun uzunluğu gibi diğer faktörler de önemlidir. Bu durumda anten faktörü tüm ölçüm sistemi için ölçümlerle bulunabilir veya antenin dışındaki yardımcı ekipmanların, ölçüm sisteminin ve diğer dış faktörlerin etkisi ölçümlerden düşülerek yalnızca antenin kendisine ait anten faktörü hesaplanabilir. Diğer bir alternatif ise, set halinde satın alınan ölçüm cihazları ve aksesuarların, üreticinin sağladığı anten faktörü değerleriyle beraber kullanılmasıdır. Üretici tarafından sağlanan değerler genelde belli bir frekans bandında ortalama değer şeklinde tek değer veya anten faktörünün frekansa göre değişen değerlerini içeren grafik ve tablolar halinde verilir [40].

Ancak anten faktörü değerleri üretici değerlerinden alınarak kullanıldığında, antenin üretimden sonraki olası anten faktörü değişimleri göz ardı edilmiş olacaktır. Bu durum

da EMC uygulamalarında hatalı ölçümlere sebebiyet verecektir. Hatalı ölçümler hatalı analiz ve beklenmeyen sonuçlara yol açabileceğinden, EMC antenlerinin periyodik olarak kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir.

Anten faktörünün birimi 1/m (1/metre), ya da logaritmik olarak ifade edildiğinde dB/m'dir. Uygulamada daha çok dB/m (desibel/metre) birimi kullanılmaktadır.

Alıcı antenler düşünüldüğünde anten faktörü küçük olan antenlerin, gelen elektromanyetik alana daha duyarlı olduğu söylenebilir. Genel olarak anten faktörleri frekans yükseldikçe artar. Yüksek frekanslarda, ölçüm için kullanılan alıcı cihazın hassaslığı önemlidir. Emisyon ölçümlerinin doğruluğu anten faktörü değerlerinin doğruluğuna bağlı olduğundan, EMC anteni kalibrasyonu önemli bir konudur. Ayrıca, anten faktörü ölçümü yapılırken ölçüm belirsizliklerinin minimum düzeyde tutulması ölçüm kalitesini artıracığından, ölçüm belirsizliği değerleri de büyük önem arz etmektedir [43].

1.6 Metroloji, Kalibrasyon ve Ölçüm Belirsizliği

1.6.1 Metroloji ve metroloji ile ilgili organizasyonlar

Metroloji, kısaca ölçüm, ölçme bilimi ve bunun uygulamasıdır. Ölçüm ile ilgili teorik ve pratik tüm unsurlar metrolojinin konusu kapsamındadır [46,47].

Metroloji temel olarak 3 farklı kategoriye ayrılabilir :

- 1- Bilimsel Metroloji : Temel ve türetilmiş büyüklüklerin birim standartlarının tanımlanması, bu birim standartların oluşturulması, koruma ve saklama koşullarının belirlenmesi ve geliştirilmesi bilimsel metrolojinin çalışma alanına girmektedir. Bilimsel metroloji kapsamında, temel birimler olan metre, kilogram, amper, saniye, kandela, mol, kelvin ve bunlardan türetilmiş birim standartlarının bilimsel olarak tanımlanması ve birincil düzeyde oluşturulması ve geliştirilmesi, ülkeler arasındaki ölçüm birliğinin sağlanması için çalışmalar yapılmaktadır. Birincil (primer) standartlar ile laboratuvar ve ölçümlerde uluslararası SI sistemine izlenebilirlik sağlanmaktadır. Ülkelerin ulusal standartlarının oluşturulması ile ülke çapındaki ölçümlere referans oluşturulmaktadır. Bilimsel metroloji çalışmaları, ülke düzeyinde ulusal metroloji enstitüleri tarafından yapılmaktadır. Uluslararası düzeyde ise Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM) tarafından koordine edilir.

Bölgesel Metroloji Organizasyonları da bu amaçla oluşturulmuş olup, Avrupa Bölgesel Metroloji Kuruluşu EURAMET'tir. Ulusal ölçüm standartlarının oluşturulup, geliştirilmesi ve korunması ulusal metroloji enstitülerinin görevidir. Bu görev ulusal karar ile bu enstitülere verilmiş olup, söz konusu ulusal karar ülkelere göre kanun veya yönetmeliklerde belirtilmiş olabilir. Ulusal metroloji enstitülerinin bir diğer görevi ülkelerini uluslararası alanda temsil etmek, metroloji konusunda diğer ülke ve uluslararası organizasyon ve kuruluşlarla iletişim ve işbirliği sağlamaktır. Uluslararası metroloji organizasyonunun en önemli unsuru ulusal metroloji enstitüleridir. Ülkemizde bu konuda görevli kuruluş ise TÜBİTAK UME'dir [46].

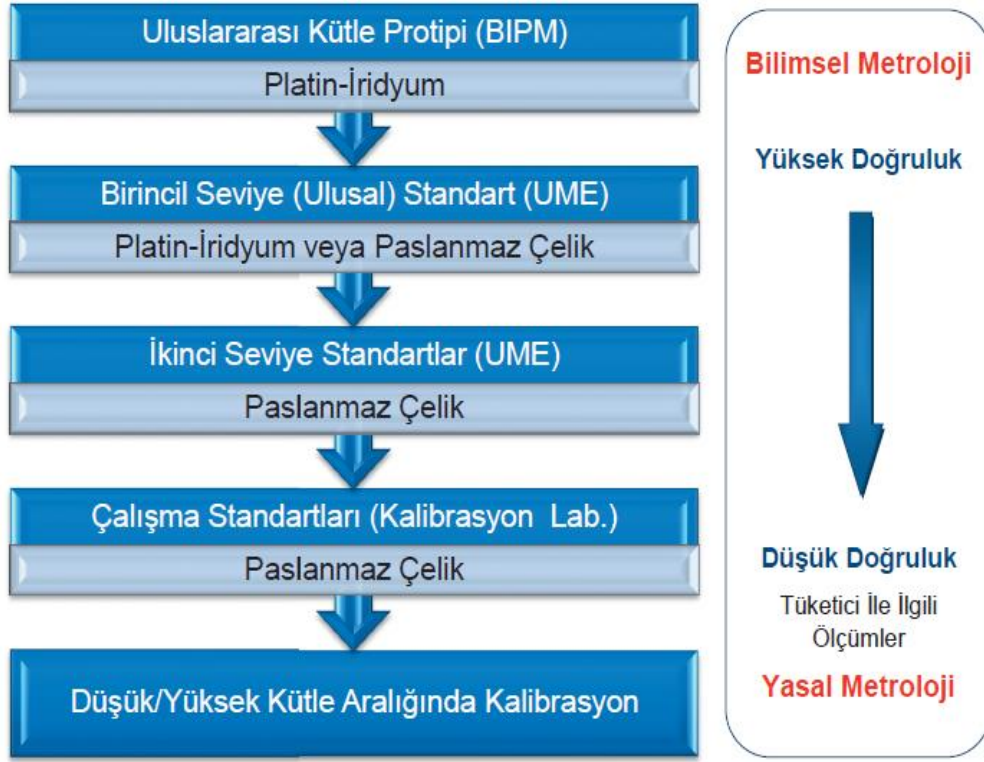
- 2- Endüstriyel Metroloji : Endüstride, üretimde, laboratuvarlarda ve testlerde kullanılan ölçüm cihazlarının uygun çalışmasını ve ölçüm doğruluğunu güvence altına almak amaçlı metrolojik çalışmalar, üretim kalitesini ve sonuçta yaşam kalitesini artırmakta olup, aynı zamanda akademik araştırmalara da konu olmaktadır. Bu amaçla yapılan metrolojik çalışmalar endüstriyel metrolojinin konusudur. Üretim hattında, üretim esnasında ve testlerde kullanılan tüm ölçüm cihazları endüstriyel metrolojinin çalışma alanındadır. Temel ve türetilmiş birimler bilimsel metroloji ile elde edilir, bu birimlerin izlenebilirliği endüstriyel üreticilere ve akademik dünyaya endüstriyel metroloji aracılığıyla iletilir. Böylece, endüstriyel metroloji endüstri ve bilimsel metroloji arasında bir nevi köprü görevi görmektedir. Endüstriyel metroloji zorunluluk arz etmez, gönüllülük esasıyla üretim kalitesi ve doğruluğunu sağlamayı amaçlar, kullanıcılara izlenebilirliği sağlar [46].

TÜBİTAK UME'nin "Metroloji" kitabına göre (2013) "Akreditasyon, başta laboratuvarlar olmak üzere uygunluk değerlendirme kuruluşlarının ulusal ve uluslararası kabul görmüş teknik kriterlere göre değerlendirilmesi, yeterliliğinin onaylanmasıdır" ([46], s. 28). Akreditasyon bir güven unsurudur. Test veya kalibrasyon laboratuvarlarının yeterliliği ve kalitesi, ulusal ve uluslararası alanda akreditasyon ile teyit edilmektedir. Akreditasyon gönüllülüğe bağlı bir durum olmakla birlikte, özel laboratuvarlar veya kamu laboratuvarları akredite olabilmektedir. Bazı ülkelerde, bazı sektörlerde (gıda sektörü laboratuvarları, perakende satış mağazalarındaki terazilerin kalibre edildiği laboratuvarlar) akreditasyon gereklilik halini alabilir. İlgili

laboratuvarın yeterliliğinin değerlendirilmesi, eksikliklerinin giderilmesi, periyodik gözetim denetimleri ve ara kontroller sonucunda ulusal ve uluslararası standartlara, laboratuvar teknik şartnamelerine ve talimatlara göre akreditasyon verilir veya devam ettirilir. Ulusal akreditasyon kuruluşları ülkelerin akreditasyon sisteminden sorumlu organizasyonlardır. Uluslararası Laboratuvarlar Akreditasyon Birliği (ILAC), akreditasyon konusunda uluslararası alanda önde gelen birlik olup, dünya çapında çalışmalar yürütmektedir. Ülkelerdeki ulusal akreditasyon organizasyonları, Avrupa’da yer alan ulusal akreditasyon kurumlarının oluşturduğu Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) gibi bölgesel akreditasyon organizasyonları ile ILAC’a bağlantı sağlar. Ülkemizde akreditasyon sisteminden sorumlu ulusal akreditasyon kuruluşu TÜRKAK olup, ilgili alanda çalışmalarını yürütmektedir [46].

- 3- Yasal Metroloji : TÜBİTAK UME’nin “Metroloji” kitabında (2013) OIML’nin “Elements for a Law on Metrology” dökümanını kaynak göstererek yaptığı tanım şu şekildedir: “Yasal metroloji, yasal gereklerden kaynaklanan ölçümleri, ölçüm birimlerini, ölçü aletlerini, ölçüm yöntemlerini kapsayan ve yetkili kuruluşlar tarafından yürütülen faaliyetlerle ilgilenen metroloji alanıdır” ([46], s. 31) [46,48].

İzlenebilirlik sürecini incelemek bilimsel metroloji ile yasal metroloji arasındaki farkı görmek açısından yeterlidir. Yasal metroloji, endüstriyel metrolojide olduğu gibi gönüllük esasına göre değil, zorunluluk içeren çalışmaları kapsar. Bu zorunluluk, kanun veya yönetmeliklerde belirtilerek ticari ve organize edilmesi gereken alanlarda ölçüm güvenilirliğini, doğruluğunu ve kalitesini temin eder. Yasal metrolojide birçok durum için kanun ve yönetmeliklerle hem cihazın uygunluğu, hem de doğruluğu denetlenir. Yasal metrolojide izlenebilirlik kadar, ölçüm cihazlarının hatalı kullanımının etkileri ve bundan dolayı oluşabilecek riskler de önemlidir. Şekil 1.9’da kütle için metrolojide ölçüm standartları hiyerarşisi ve bilimsel metrolojiden yasal metrolojiye geçiş görülmektedir [46].



Şekil 1.9 : Kütle için metrolojide ölçüm standartları hiyerarşisi.

Yasal metrolojinin genel kapsam alanları olarak ticaret, çevre, sağlık ve güvenlik sayılabilir. Yasal metrolojinin sağlık ve asayiş gibi bazı alanlardaki ölçümlerle birey ve toplumu koruma ve piyasada organizasyonu yetersiz alanlarda düzenleyici olma gibi misyonları da bulunmaktadır. Ölçüm güvenilirliğinin temini ile tüketicinin korunmasına katkı sağlamaktadır. Yasal metroloji, ölçümle ilgili hususlarda yasal hükümleri kapsamaktadır. Bu yasal hükümler de yasal zorunlulukları oluşturur. Bu zorunlulukların tetkiki için devlet tarafından veya devlet adına yasal kontroller yapılmaktadır. Yasal metroloji kapsamındaki ölçüm cihazlarının kalibrasyonu zorunludur. Ölçüm cihazlarının ve paketlenme öncesi ürünlerin ölçüm ve testleri ile ilgili hususlar, yasal metroloji kapsamında, ilgili ulusal veya bölgesel mevzuatlarda belirlenir [46].

Yasal Metroloji konusunda uluslararası alanda çalışmalar yürüten organizasyon Uluslararası Yasal Metroloji Organizasyonu (OIML)'dir. 2005 yılında ülkemiz OIML asil üyeliğine kabul edilmiştir. Ülkemizde T.C Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın Metroloji ve Standardizasyon Genel Müdürlüğü yasal metroloji alanında görevlendirilmiştir. Şekil 1.10'da

ülkelerin kalite altyapıları için önemli unsurlar ve Şekil 1.11’de metroloji ile ilgili organizasyonlar görülmektedir [46].



Şekil 1.10 : Ülkelerin kalite altyapıları için önemli unsurlar.

	Bilimsel Metroloji	Yasal Metroloji	Akreditasyon	Standardizasyon
Türkiye	TÜBİTAK UME	MSGM	TÜRKAK	TSE
Bölge (Avrupa)	EURAMET	WELMEC	EA	CEN/CENELEC
Uluslararası	CGPM- BIPM	OIML	ILAC	ISO/IEC

Şekil 1.11 : Metroloji ile ilgili organizasyonlar.

1.6.2 Ölçüm ve kalibrasyon

Bu bölümde “Uluslararası metroloji sözlüğü - Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)” ve TÜBİTAK UME’nin “Metroloji” kitabı ekseninde ölçüm ve kalibrasyonla ilgili tanım ve bilgiler verilmektedir. Ölçüm, JCGM 200:2008 “Uluslararası metroloji sözlüğü - Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)” (2008) dökümanında “bir büyüklüğe atanabilecek bir veya daha fazla büyüklük değerinin deneysel olarak elde edilmesi süreci” ([47], s. 16) olarak tanımlanmaktadır. Ölçüm birimi ise aynı cins iki büyüklüğün karşılaştırılmasını sayısal ifadelerle mümkün kılan, tanımı genel kabul ile yapılmış gerçek ve skaler büyüklüktür. Temel ve türetilmiş ölçüm birimlerinin dışında, bir boyutlu büyüklüklerin ölçüm birimleri sayı olup, bu büyüklüklerde herhangi bir

özel sembol ve isme sahip bir birim bulunmayabilir. Bu türdeki ölçüm birimleri için bazı durumlarda özel adlar ve katsayılar kullanılmaktadır. Örneğin radyan ve desibel gibi özel adlar ile volt başına mikrovolt durumunu ifade etmek için 10^{-9} gibi katsayılar kullanılabilir. Bu çalışmada da desibel (dB), desibel mikrovolt (dBµV) gibi birimler sıkça kullanılmıştır [46,47].

Ölçüm prosedürü bir ölçüm modeli temelindeki ve tüm hesaplamalarıyla birlikte ölçümün, ilgili ölçüm prensip ve metotlarına göre ayrıntılı tarifi ve açıklamasıdır. Bir ölçüm prosedürü, kullanıcının ölçümü prosedürü inceleyerek gerçekleştirebileceği kadar açık, net ve ayrıntılı bir doküman halinde olmalıdır. Bu ayrıntılı doküman, ölçümün gerçekleştirildiği ilgili laboratuvar veya mekanlarda, kullanıcının ulaşabileceği şekilde bulunmalıdır [46,47].

Ölçme işleminde aşağıdaki aşamalar dikkate alınır:

- Ölçülecek nesnenin, numunenin veya cihazın belirlenmesi,
- Ölçülecek büyüklüğün belirlenmesi,
- Ölçüm metodunun belirlenmesi,
- Ölçümde kullanılacak cihazların seçilmesi ve ölçüm düzeneğinin kurulması,
- Ölçme işleminin uygun prosedür ve metot ile gerçekleştirilmesi,
- Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi ve kontrolü [46].

Ölçüm sonucu elde edilen bilgiler ışığında, ölçülene yüklenen büyüklük değerleri kümesidir. Bu büyüklük değerleri kümesi ile ilgili bilgiler ölçüm sonucunda bulunmakta olup, ölçüm sonuçlarının dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) kavramını ön plana çıkarır. Ölçüm sonucu, ölçüm belirsizliğinin ihmal edildiği bazı durumlar dışında ölçülen büyüklük değerinin yanında ölçüm belirsizliği ile verilir [46,47].

Gösterge değeri, ölçüm sistemi ya da ölçüm cihazı kullanılarak ölçüm işlemi sonucunda elde edilen büyüklük değeridir. Ölçümlere etki eden tahmini sistematik hataların ortadan kaldırılması için ölçüm sonucuna düzeltme işlemi uygulanır. Ölçümlerdeki sistematik hataların düzeltilmediği, yalın olarak elde edilen ölçüm sonucu düzeltilmemiş sonuç, sistematik hataların düzeltilmesi sonucu elde edilen ölçüm sonucu ise düzeltilmiş sonuç olarak adlandırılır. Düzeltme işlemi düzeltilmemiş

sonuç ile çarpılan bir katsayı ile olabileceği gibi (düzeltme faktörü), mutlak ilave veya eksiltme şeklinde de olabilir. Ölçüm sonucunun niteliği ne ise (gösterge değeri, düzeltilmemiş sonuç veya düzeltilmiş sonuç) açıkça belirtilmelidir [46,47].

Ölçüm hatası veya hata ölçülen büyüklük değerinin referans büyüklük değerinden sapmasıdır. Tek referans büyüklük değeri ve ihmal edilebilir veya kabul edilebilir bir ölçüm belirsizliği ile ölçüm hatası bilinmektedir. Eğer ölçülen, tek bir gerçek büyüklük değeri veya büyüklük kümesi ile ifade ediliyorsa, karşılaştırma yapılacak bir referans büyüklük değeri bulunmuyorsa ölçüm hatası bilinemez. Ölçüm hatası, ölçülenin gerçek değere olan yakınlığını saptamada kullanılan bir kavramdır. Bu noktada JCGM 200:2008 “Uluslararası metroloji sözlüğü - Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)” (2008) dökümanına göre ölçüm doğruluğu “ölçülen büyüklük değeri ile ölçülenin gerçek büyüklük değeri arasındaki uyuşmanın yakınlığı” olup, “ölçüm doğruluğu kavramı bir büyüklük değildir ve bir sayısal büyüklük değeri ile gösterilmez. Ölçüm hatası küçüldükçe, ölçümün daha doğru olduğu söylenilir” ([47], s. 21). Yine aynı dökümana göre ölçüm kesinliği “belirli koşullar altında aynı veya benzer nesneler üzerinde tekrarlanan ölçümler ile elde edilen göstergeler veya ölçülen büyüklük değerleri arasındaki uyuşmanın yakınlığı” ([47], s. 22)’dir. Ölçüm doğruluğu ve ölçüm kesinliği kavramları birbirine karıştırılmamalıdır [46,47].

Ölçüm hataları temelde sistematik ve rastgele ölçüm hataları olmak üzere 2 tiptir. Tekrarlı ölçümlerde değişmeyen veya değişimi tahmin edilebilir şekilde olan hatalar sistematik ölçüm hataları, değişimi tahmin edilemeyen ölçüm hataları ise rastgele ölçüm hatalarıdır. Ölçüm hatasından sistematik ölçüm hatasının çıkarılmasıyla rastgele ölçüm hatası bulunmakta olup, bu tür hatalarda aynı ölçülenden alınan sonsuz sayıdaki tekrarlı ölçümlerin ortalaması referans büyüklük değerini verir. JCGM 200:2008 “Uluslararası metroloji sözlüğü - Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)” (2008) dökümanında ölçüm tekrarlanabilirliği koşulu için “aynı ölçüm prosedürü, aynı operatör ve aynı ölçüm sistemi ile, aynı uygulama koşulları altında, aynı yerde, ölçümlerin aynı veya benzer nesneler üzerinde kısa bir zaman aralığında tekrarlanarak gerçekleştirilmesini içeren ölçüm koşullarından her biri” ([47], s. 23) ve ölçüm tekrarlanabilirliği için “ölçümün tekrarlanabilirliği koşulları altında ölçüm kesinliği” ([47], s. 24) tanımları yapılmaktadır [46,47].

Deneyisel standart sapma $s(x_i)$, ölçüm sonuçlarının dağılımını karakterize eden bir parametre olup, aynı ölçülen büyüklüğün n sayıda ölçümü için aşağıdaki şekilde ifade edilir [46]:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.6)$$

x_i : i numaralı ölçüm sonucu.

$\bar{x}$: n adet ölçümün aritmetik ortalaması.

$s(x_i)$: Deneyisel standart sapma.

Kalibrasyon JCGM 200:2008 “Uluslararası metroloji sözlüğü - Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)” (2008) tanımına göre “belirli koşullarda, ilk aşamada ölçüm standartları tarafından sağlanan büyüklük değerleri ve ölçüm belirsizlikleri ile bunlara karşılık gelen gösterge değerleri ve ilgili ölçüm belirsizlikleri arasında bir ilişkinin oluşturulduğu, ikinci aşamada ise bu bilginin ölçüm sonucunun göstergeden elde edilmesinde kullanıldığı işlemler dizisi” ([47], s. 28)’dir. Kalibrasyon temelde bir karşılaştırma işlemi olup, ayar ve doğrulama işlemleri ile karıştırılmamalıdır [46,47].

Daha kısa bir tanımla kalibrasyon ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği sağlanmış, doğruluğu bilinen referans ile doğruluğu bilinmeyen bir ölçüm cihazını ya da malzemeyi karşılaştırma ve bunun sonucu ölçüm belirsizliği bilgisini de içeren ölçüm sonuçlarının raporlanması sürecidir [1].

1.6.3 Ölçüm belirsizliği

Ölçüm belirsizliği ölçülen değerlerin dağılımını ifade eden, yapılan ölçme işleminin bilinmeyen hatalarını modelleyen, istatistiksel yöntemlerle elde edilen bir tahmindir. Rastgele ve sistematik etkilerden kaynaklı bileşenleri bulunmaktadır. Ölçümlerde bazen tahmin edilen sistematik etkiler düzeltilmez, bunun yerine bu etkiler ölçüm belirsizliğine dahil edilir. Örneğin bir referans cihaza göre ölçüm yapılıyorsa, referans cihazın kendi hatasından kaynaklı etki ölçüm sonucunda düzeltilir veya düzeltme yapılmıyorsa bu etki ölçüm belirsizliğine dahil edilebilir. Bu durumda doğal olarak ölçüm belirsizliği artmakta ve ölçüm sonucu düzeltilmediğinden dolayı doğruluğu daha az olmaktadır. Ölçüm belirsizliğinde birçok bileşen bulunmaktadır. Tekrarlanan

ölçümlerle elde edilen ölçüm sonuçlarının istatistiksel dağılımı ile ifade edilen ve standart sapma ile karakterize edilen bileşenler A tipi ölçüm belirsizliği bileşenleri; tecrübe, kullanım kılavuzu ve kataloglardan elde edilen bilgiler gibi istatistiksel olmayan ve olasılık yoğunluk fonksiyonları ile kullanılan bileşenler B tipi ölçüm belirsizliği bileşenleridir. A tipi bileşenler A tipi ölçüm belirsizliği hesabı yöntemiyle, B tipi bileşenler de B tipi ölçüm belirsizliği hesabı yöntemiyle belirlenir. Ölçüm belirsizliği, ölçülene yüklenen büyüklük değeri ile ilişkili olduğundan bu büyüklük değerindeki değişiklikler, ölçüm belirsizliği değerini de değiştirir [46,47].

Ölçüm belirsizliği ölçümün kalitesini ve ölçüm sonuçlarının güvenilirlik derecesini gösterir. Ölçüm sonuçlarının güvenilirliğinin değerlendirilebilmesi için ölçüm sonuçlarını kullanacak olan kişilerin nicel göstergelere ihtiyacı vardır. Bu göstergeler aynı zamanda ölçümün kalitesini de göstermekte olup, ölçümlerin kendi aralarında veya referans değerlerle karşılaştırılabilmesine olanak sunmaktadır. İşte bu göstergeler ölçüm belirsizliği değerleridir. Ölçüm belirsizliği belirli toleransı olan durumlarda tolerans bandını daralttığı için değeri önem taşımaktadır [46,49].

Elde bulunan bilgilere dayanarak, beyan edilen olasılık dahilindeki gerçek büyüklük değerlerinin oluşturduğu kümeyi içeren aralık kapsam aralığı, bu değerlerin belirli bir kapsam aralığında bulunma olasılığı ise kapsam olasılığı olarak adlandırılır. Güvenilirlik aralığı ile kapsam aralığı birbirine karıştırılmamalıdır. Kapsam faktörü ise bileşik standart ölçüm belirsizliği ile çarpılarak genişletilmiş ölçüm belirsizliğinin elde edilmesini sağlayan, güvenilirlik düzeyini de belirleyen ve genellikle k sembolü ile gösterilen ‘bir’den büyük bir sayıdır [46,47].

Bir ölçümde yer alan tüm büyüklükler arasındaki matematiksel ilişki ölçüm modeli olup, genel gösterimi $h(Y, X_1, \dots, X_n) = 0$ şeklindedir. JCGM 200:2008 “Uluslararası metroloji sözlüğü - Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)” (2008) dökümanına göre ölçüm modelinin girdi büyüklüğü “bir ölçülenin ölçülen büyüklük değerini hesaplamak için, ölçülmesi gereken veya değeri başka yollardan elde edilebilen büyüklük”, ölçüm modelinin çıktı büyüklüğü ise “bir ölçüm modelinin girdi büyüklüklerinin değerleri kullanılarak ölçülen değerinin hesaplandığı büyüklük” ([47], s. 33) olarak tanımlanmıştır. $h(Y, X_1, \dots, X_n) = 0$ ile gösterilen bir ölçüm modelinde Y çıktı büyüklüğünü, $X_1, \dots, X_n$ ise girdi büyüklüklerini ifade etmektedir. Çıktı büyüklüğü ölçülen olup, değeri $X_1, \dots, X_n$ girdi büyüklüklerinin kullanılmasıyla

elde edilir. Çıktı büyüklüğü sayısı birden fazla ise ölçüm modelinde birden fazla denklem bulunur [46,47].

Model fonksiyon ölçüm modelindeki girdi büyüklükleri ile çıktı büyüklüğü arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade eden, ölçüm işlemini ve ölçüm işlemlerini matematiksel olarak modelleyen fonksiyondur. $h(Y, X_1, \dots, X_n) = 0$ olarak ifade edilen ve çıktı büyüklüğü Y olan bir ölçüm modelini $Y = f(X_1, \dots, X_n)$ şeklinde ifade edebilen f fonksiyonu bir model fonksiyondur. f fonksiyonu, girdi büyüklük değerleri $x_1, \dots, x_n$ için, tek bir $y = f(x_1, \dots, x_n)$ çıktı büyüklük değerine ulaştıran bir fonksiyondur. Model fonksiyon, bu çalışmada da olduğu gibi ölçüm belirsizliği hesabında da kullanılır [46,47].

Ölçüm belirsizliğinin oluşmasında;

- Ölçüm ortamının olumsuz etkilerinden veya uygunluğunun tam olarak sağlanamamasından kaynaklı hatalar,
- Ölçüm metodundan kaynaklı hatalar,
- Ölçülen değerin tanımındaki eksikliklerden kaynaklı hatalar,
- Ölçülen değerin tanımının gerçekleşmesindeki eksikliklerden kaynaklı hatalar
- Ölçümün yapıldığı çevre koşullarındaki (örneğin ortamın sıcaklığı, nemi ve basıncındaki) değişimlerden kaynaklı hatalar,
- Analog cihazların okunmasında kişisel faktörlerden kaynaklı hatalar,
- Ölçüm cihazlarının sonlu çözünürlüğünden kaynaklı hata,
- Ölçüm standartları ve referans malzemelerden kaynaklı hatalar (referansların ölçüm belirsizliği),
- Dış kaynaklardan, kullanım kılavuzu ve kataloglardan elde edilen sabit parametrelerden kaynaklı hatalar,
- Ölçüm tekrarlanabilirliğinden ve histerezisden kaynaklı hatalar,
- Cihaz ve ölçüm yardımcı donanımlarından, beslemeden ve bağlantılardan kaynaklı hatalar,
- Ölçümde yapılan yaklaşım, yuvarlama veya ekstrapolasyonlardan kaynaklı hatalar etkilidir [46].

1.6.3.1 A tipi ölçüm belirsizliği hesabı

A tipi ölçüm belirsizliği hesabı ölçüm tekrarlanabilirliği koşulları altında alınan tekrarlı ölçümleri ve istatistiksel metotları kullanarak ölçüm belirsizliği bileşenlerinin hesaplanmasıdır [46,47].

Tekrar eden gözlem değerlerinden faydalanılarak istatistiksel standart sapmanın bulunmasıyla A tipi ölçüm belirsizliği bileşenleri denklem (1.7) kullanılarak hesaplanır [46].

$$u_A = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{n}} \quad (1.7)$$

u_a : A tipi ölçüm belirsizliği.

s_{x_i} : Deneysel standart sapma.

n : Toplam gözlem (ölçüm) sayısı.

A-tipi ölçüm belirsizliğinde sıkça kullanılan dağılımlar;

- Normal dağılım,
- Student dağılımı olup, izleyen kısımda bu dağılımlar incelenmiştir [46].

Normal dağılım (Gauss Dağılımı)

Normal dağılım (Gauss dağılımı), ölçme sonuçlarına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonu (1.8) eşitliği ile verilen bir dağılımdır [46].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1.8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - \mu)^2} \quad (1.9)$$

x : Ölçüm sonucu.

μ : Ölçülen büyüklüğün gerçek değeri.

σ : Standart sapma.

Student (t) Dağılımı

Student dağılım normal dağılımın benzeri bir dağılım olmakla beraber, ölçüm sayısının kısıtlı olması durumunda ($n < 10$) kullanılmaktadır. Student dağılımı ile normal dağılım arasındaki fark Çizelge 1.1'deki dengeleme faktörleri kullanılarak dengelenir. Aşağıda ölçüm sonuçlarının dağılımı ile ilgili denklemler verilmiştir [46].

$$s_{x_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (1.10)$$

$$u_{A_t} = t_{\gamma,p} \frac{s_{x_i}}{\sqrt{n}} \quad (1.11)$$

u_{A_t} : t dağılımı ile belirlenen standart sapma belirsizliği.

$t_{\gamma,p}$: t dağılımı ile normal dağılım arasındaki farkı dengeleme faktörü.

Çizelge 1.1 : Student dağılımı ile normal dağılımı dengeleme faktörleri.

Serbestlik derecesi ($\gamma = n-1$)	p (Güvenilirlik düzeyi)					
	% 68,27	% 90	% 95	% 95,45	% 99	% 99,73
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

1.6.3.2 B tipi ölçüm belirsizliği hesabı

B tipi ölçüm belirsizliği hesabı, A tipi ölçüm belirsizliği hesabından farklı ve istatistiksel olmayan yöntemler kullanılarak ölçüm belirsizliği bileşenlerinin hesaplanmasıdır [46,47].

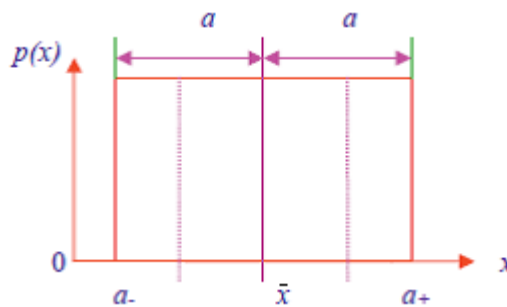
B tipi değerlendirme için aşağıdaki bilgiler dikkate alınır:

- Daha önceki ölçüm verileri,
- İlgili malzeme ve cihazlar hakkındaki bilgi ve deneyimler,
- Üreticinin bildirdiği özellikler,
- Kalibrasyon ve diğer sertifikalardan elde edilen veriler,
- Doğrulanmış cihazlarda doğruluk sınıfı bilgisi,
- Ölçüm cihazının çözünürlük değeri,
- Kullanım kılavuzu ve katalog gibi dokümanlardan elde edilen referans veriler [46,47].

İzleyen kısımda B-tipi belirsizlik hesaplama yöntemiyle yaygın kullanılan dağılımlar incelenmiştir.

Dikdörtgen dağılım

Dikdörtgen veya dikdörtgensel dağılım, bir büyüklükle ilgili, sadece değişim gösterebileceği aralığın bilindiği durumda kullanılmakta olup, Şekil 1.12’de grafiksel olarak görülmektedir [46].



Şekil 1.12 : Dikdörtgen Dağılım.

$$\text{Simetrik olmadığı durum : } u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{3}} \quad (1.12)$$

$$\text{Simetrik olduğu durum : } u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (1.13)$$

$p(x)$: x bileşeni değerleri için olasılık değerleri.

$u(x)$: x bileşeni için olasılık dağılım fonksiyonu ile elde edilen belirsizlik.

a : Değişim aralığı.

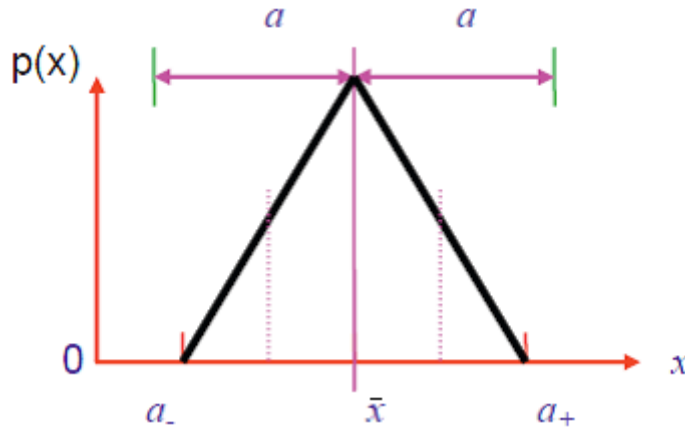
a_+ : Pozitif yöndeki değişim aralığı.

a_- : Negatif yöndeki değişim aralığı.

$\bar{x}$: Ölçüm sonuçlarının ortalaması.

Üçgen dağılım

Üçgen dağılım, bir büyüklükle ilgili, değişim gösterebileceği aralık ve eğilimin bilindiği durumda kullanılmakta olup, Şekil 1.13'te grafiksel olarak görülmektedir [46].



Şekil 1.13 : Üçgen Dağılım.

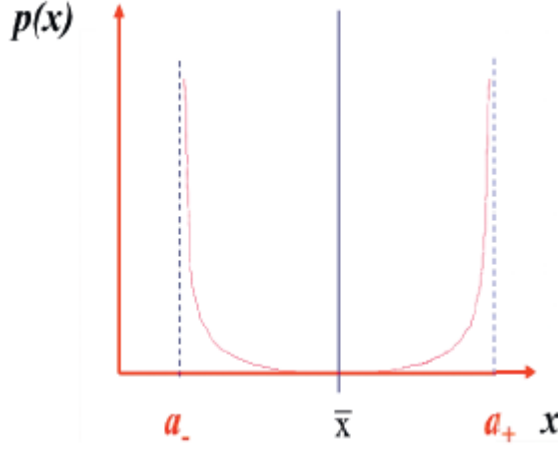
$$\text{Simetrik olmadığı durum : } u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{6}} \quad (1.14)$$

$$\text{Simetrik olduğu durum : } u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (1.15)$$

U tipi dağılım

U tipi dağılım, bir büyüklükle ilgili, değişim gösterebileceği aralık ve değerlerin aralık sınırlarına yakın bulunma olasılığının diğer olasılıklara göre daha yüksek olduğunun

bilindiği durumda kullanılır. Örneğin bu çalışmada da yer alan duran dalga oranından kaynaklı belirsizlik için U tipi dağılım kullanılmaktadır. Şekil 1.14'te U dağılım grafiksel olarak görülmektedir [46].



Şekil 1.14 : U Dağılımı.

$$\text{Simetrik olmadığı durum : } u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{2}} \quad (1.16)$$

$$\text{Simetrik olduğu durum : } u(x) = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (1.17)$$

Bileşik standart ölçüm belirsizliği bir ölçüm modelindeki girdi büyüklükleriyle ilgili A tipi ve B tipi değerlendirme sonucunda hesaplanan belirsizlik katkılarından elde edilen standart ölçüm belirsizliğidir. Bileşik standart ölçüm belirsizliği kapsam faktörü ile çarpılarak genişletilmiş ölçüm belirsizliği elde edilir. Ölçüm belirsizliği mutlak ve bağıl olarak verilebilir. Bağıl ölçüm belirsizliği ilgili ölçüm belirsizliği değerinin ölçülen değere bölünmesiyle elde edilir. Belirsizlik bütçesi ise JCGM 200:2008 “Uluslararası metroloji sözlüğü - Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)” (2008) dökümanına göre “ölçüm belirsizliğini, bileşenlerini, bunların hesaplanmasını ve kombinasyonlarını içeren beyan” olup, “bir belirsizlik bütçesi, ölçüm modelini, bu modeldeki büyüklükler ile ilgili ölçüm belirsizliklerini ve tahmini değerlerini, kovaryansları, uygulanan olasılık yoğunluk fonksiyonlarının tipini, serbestlik derecelerini, ölçüm belirsizliği hesabının tipini ve kapsam faktörlerini içermelidir” ([47], s. 27). Ölçüm belirsizlikleri tablo halinde verilir [46,47].

Ölçüm belirsizliği temel dökümanı olarak kullanılan GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) dökümanında bileşik standart ölçüm belirsizliğinin

belirsizlik bileşenlerinden elde edilen bileşik varyansın pozitif kareköküne eşit olduğundan bahsedilmektedir. Korelasyonsuz giriş büyüklükleri için bileşik standart ölçüm belirsizliği **(1.18)** denklemi ile ifade edilmektedir [49].

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (1.18)$$

Burada $u_c^2(y)$ bileşik varyansı, $u_c(y)$ bileşik ölçüm belirsizliğini, $u^2(x_i)$ x_i bileşenine ait varyansı, $u(x_i)$ x_i bileşenine ait belirsizliği belirtmektedir. $\partial f / \partial x_i$ model fonksiyonun x_i bileşenine göre kısmi türevi olup, duyarlılık (hassasiyet) katsayısını (c_i) ifade etmektedir [49].

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (1.19)$$

Yine ölçüm belirsizliği temel dökümanı olarak kullanılan GUM dökümanına göre giriş büyüklükleri arasında korelasyon bulunmaktaysa, birleştirilmiş belirsizlik için aşağıdaki formül geçerlidir [49].

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \\ &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (1.20)$$

Burada x_i ve x_j , X_i ve X_j büyüklüklerinin tahminleri; $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$, x_i ve x_j ile ilişkili tahmin edilen kovaryanstır [49].

Genişletilmiş ölçüm belirsizliği GUM'a göre Denklem **(1.21)**'deki gibi olmaktadır [49].

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (1.21)$$

U : Genişletilmiş ölçüm belirsizliği.

k : Kapsam faktörü.

Çizelge 1.2’de kapsam faktörlerine göre güvenilirlik düzeyleri yer almaktadır. Metrolojik uygulamalarda kapsam faktörü olarak genelde $k=2,0$ kullanılır. Bu değer %95,45 güvenilirlik sağlamaktadır [46].

Çizelge 1.2 : Kapsam faktörleri ve güvenilirlik düzeyleri.

Güvenilirlik Düzeyi-p (%)	Kapsam Faktörü- k_p
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

Bu noktaya kadar ölçüm belirsizliği ile ilgili verilen bilgiler ışığında özetlemek gerekirse, ölçüm belirsizliği hesaplarında izlenecek adımlar şu şekildedir:

- Girdi ve çıktı büyüklükleri arasındaki matematiksel ilişki belirlenir, bir başka ifadeyle model fonksiyon oluşturulur.
- İlgili ölçüm şartlarında ölçüm sonucuna etkisi bulunan tüm etkenler belirlenir.
- Tekrarlı ölçümler sonucu ortaya çıkan değerlere ait belirsizlik deneysel standart sapma ve ortalamanın sapması hesaplanarak bulunur.
- Düzeltmeler ve düzeltilmemiş sistematik hatalardan kaynaklı belirsizlik bileşenleri liste halinde belirlenir.
- Belirsizliğe ait tüm bileşenlerle birlikte, bileşenler arasında varsa korelasyonlar, olasılık fonksiyonları ve bileşenlere ait düzeltme katsayıları belirlenir.
- Belirlenen her bir bileşen için standart belirsizlik hesaplanır.
- Bileşik belirsizlik hesaplanır.
- Son olarak genişletilmiş ölçüm belirsizliği Denklem **(1.21)** kullanılarak hesaplanır [46].

1.7 EMC Antenlerinin Kalibrasyonunun Önemi ve Birimler

EMC Antenlerinin Kalibrasyonu EMC Testlerinin doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Çoğu zaman anten üreticisinin verdiği değerler antenin o anki değerlerinden farklıdır. Üretim ile kullanım arasında geçen zamanda antenin özellikleri değişebileceğinden anten faktörleri de değişebilir. EMC testlerinde doğruluğu yüksek, güvenilir sonuçlar elde etmek için antenlerin periyodik kalibrasyonlarının yaptırılması önemli bir husustur.

Anten kalibrasyonlarının bir diğer önemli yanı da, periyodik kalibrasyonlarla antenin künyesinin ve geçmişten bu yana davranışının ortaya konmasıdır. Antende oluşan beklenmeyen durumların ortaya konması da kalibrasyon ile sağlanmaktadır. Böylece, EMC testlerinin kalitesindeki şüpheler de ortadan kalkmaktadır.

Anten kalibrasyonunda kullanılan birimler logaritmik ve 1 boyutlu birimlerdir, birimden daha çok oranı ifade ederler. Bu birimler desibel (dB), desibel mikrovolt (dBμV) ve desibel miliwatt (dBm) gibi birimlerdir. EMC alanında birimlerin geniş aralıkta yer alması, EMC birimlerinin desibel (dB) cinsinden açıklanması sonucunu doğurmuştur. Örneğin güç kazancı dB olarak Denklem (1.22)'teki gibi ifade edilmektedir [39].

$$P_{gain}[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (1.22)$$

$P_{gain}[dB]$: dB olarak güç kazancı.

P_{out} : Çıkış gücü.

P_{in} : Giriş gücü.

Benzer şekilde gerilim kazancı dB olarak Denklem (1.23)'teki gibi ifade edilmektedir [39].

$$V_{gain}[dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (1.23)$$

$V_{gain}[dB]$: dB olarak gerilim kazancı.

V_{out} : Çıkış gerilimi.

V_{in} : Giriş gerilimi.

Güç ve gerilim kazançlarında katsayıların farklı (10 ve 20) olmasının sebebi gerilim ve güç arasındaki karesel ilişkidir. dB birimi iki büyüklüğün oranını ifade eder, eğer referans bir büyüklüğe göre ifade edilirse dBμV, dbm, dBμW gibi birimler ortaya çıkar. Bu çalışmada gerilimi ifade etmek için kullanılan dBμV birimi V_{ref} referans gerilim değeri (1 μV) olmak üzere denklem (1.24)'teki gibi açıklanabilir [39] .

$$V[dB\mu V] = 20 \log_{10} \left(\frac{V(V)}{V_{ref}(1 \mu V)} \right) \quad (1.24)$$

Bu çalışmada kullanılan diğer birimler anten faktörü için dB/m, elektrik alan için dBμV/m ve frekans için MHz'dir. Çalışmanın temel ölçüm büyüklüğü olan anten faktörü ANSI C63.5-2006'da "antenin polarizasyon doğrultusundaki elektrik alanının antene bağlı yükün üzerinde indüklenen gerilime oranının dB cinsinden ifadesi" ([2], s. 2) olarak tanımlanmıştır.

Denklem (1.25)'de anten faktörünün matematiksel olarak ifade edilişi görülmektedir [2].

$$AF = 20 \log_{10} \left(\frac{E}{V_0} \right) \quad (1.25)$$

E : Anten polarizasyon doğrultusundaki elektrik alan.

V_0 : Anten yükü üzerindeki gerilim.

AF : Anten Faktörü.

Ölçüm cihazındaki gerilim değeri ve elektrik alan değeri ile bağlantılı olarak anten faktörü Denklem (1.26) gibi de açıklanabilir. Denklemde parantez içerisinde verilenler ilgili bileşenin birimidir.

$$AF[dB/m] = E[dB\mu V/m] - V[dB\mu V] \quad (1.26)$$

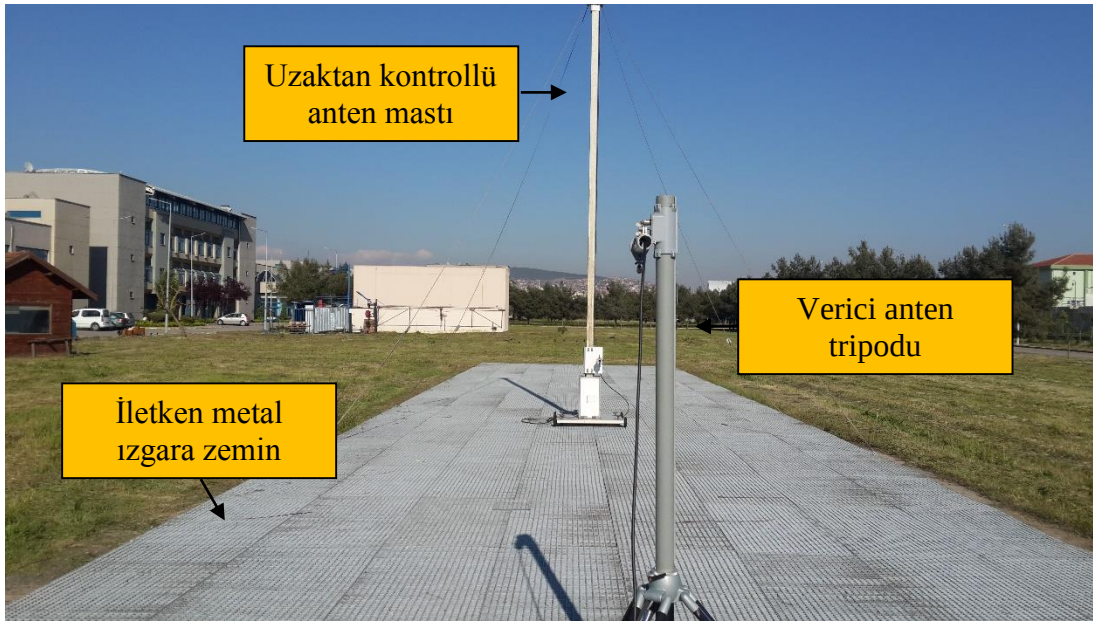
2. ÖLÇÜM SAHASI, EKİPMANLARI VE YÖNTEMLERİ

2.1 TSE Açık Saha Test Alanı (ASTA)

Türk Standardları Enstitüsü Deney ve Kalibrasyon Merkezi Başkanlığı Gebze Kalite Kampüsü'nde yer alan ve bu tez çalışması kapsamında anten kalibrasyon alanı olarak kullanılan saha elektromanyetik ölçüm standartlarına göre oluşturulmuş, metal ızgara şeklinde yaklaşık 35 m x 7,5 m boyutlarında bir elektromanyetik ölçüm sahasıdır. Sahanın yakın bölgesinde elektromanyetik sinyalleri zayıflatacak herhangi bir engel bulunmamaktadır. Sahada 3 m, 10 m ve 30 m anten kuyuları ve yaklaşık 1,5 m yarıçapında bulunan döner masa (turntable) düzeneği bulunmaktadır. Ayrıca alıcı antenin uzaktan kontrolü ve montajı için uzaktan kontrollü anten direği (mast) sahanın ortasında bulunmaktadır. Sahanın yaklaşık 20 m uzağında ise bir kontrol odası bulunmaktadır. Bu kontrol odasında alıcı anten direği kontrolü, sinyal gönderimi, sinyal alımı ve döner masa kontrolü sağlanmaktadır. Sinyali gönderen ve alan iletim hatları kontrol odası ve sahadaki kuyular arasında yer altından sinyal çevrimini sağlamaktadır. İletim hatları ve hat uçlarındaki N-tipi konnektörler elektromanyetik olarak uygundur. Saha ve tüm ölçüm sisteminde elektromanyetik kayıp ve yansımaları en aza indirecek malzemeler kullanılmıştır. Bu sahanın EMC anten kalibrasyonları için uygunluğu ANSI C63.4-2014 standardının önerdiği doğrulama yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Detaylı bilgi saha doğrulaması kısmında bulunmaktadır. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de ASTA'dan, Şekil 2.3'te kontrol odasından görüntüler yer almaktadır.



Şekil 2.1 : TSE Açık Saha Test Alanı (ASTA).

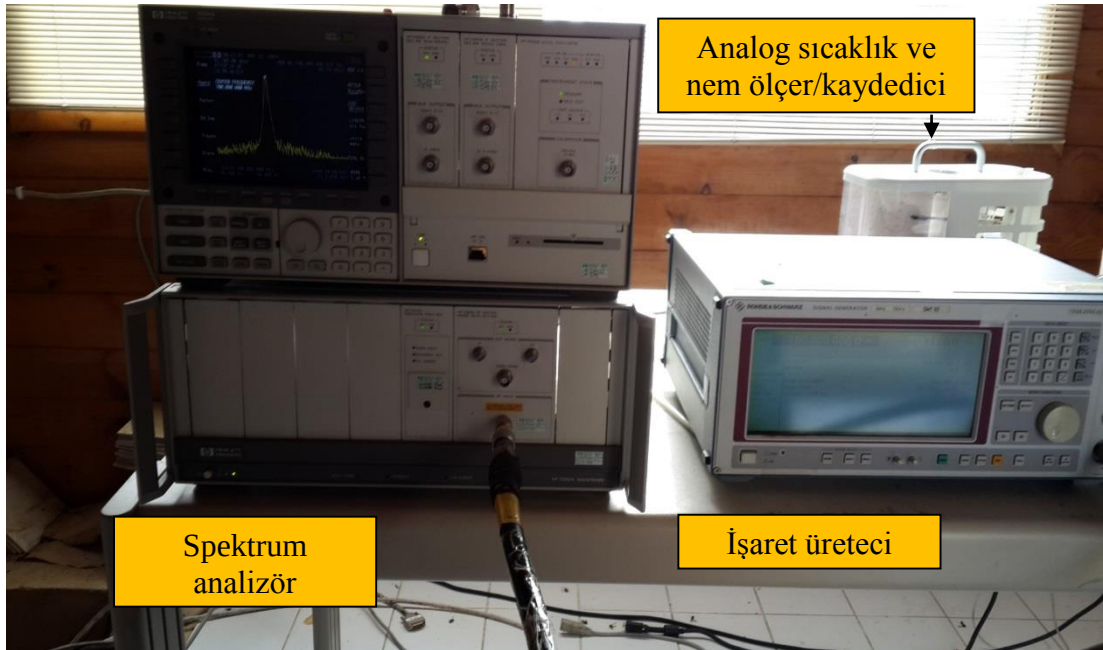


Şekil 2.2 : Açık Saha Test Alanı.

2.2 Ölçümlerde Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar, Ölçüm Koşulları

EMC Anten Kalibrasyonlarında kullanılacak cihazlar temel olarak bir işaret üretici, ölçüm alıcısı olarak spektrum analizör, zayıflatıcılar, konnektörler, kayıt yapabilen sıcaklık ve nem ölçerler, hava basıncı ölçer, rüzgar hızı ölçer, lazer mesafe ölçer, dijital hassas açı ölçer, otomatik kontrollü anten mastı, verici anten tripodu ve doğal olarak ölçüm antenleri olmak üzere sıralanabilir. İşaret üretici kaynak cihaz olmakla beraber, sinyali oluşturup verici antene göndermekte kullanılacaktır. Ölçüm alıcısı ise alıcı

antenden gelen sinyali ölçmek için kullanılacak olup, bu çalışmada kullanılan alıcı cihaz spektrum analizördür. Temel cihazlarla ilgili bilgiler Çizelge 2.1’de, yardımcı cihazlarla ilgili bilgiler ise Çizelge 2.2’de listelenmiştir. Kullanılan antenler ilerleyen bölümlerdeki çizelgelerde verildiğinden burada yer almamıştır. I konnektörler, marka ve modeli bulunamadığından çizelgede yer almamıştır. Çalışmada zayıflatıcılar sistem non-lineeritesini, gürültü ve yansımaları azaltmak amaçlı kullanılmıştır. Bu çalışmada biri verici anten girişinde, diğeri ise spektrum analizör girişinde olmak üzere 2 adet 10 dB zayıflatıcı kullanılmıştır. Kullanılan zayıflatıcılar aynı modeldir. Konnektörler ise iletim kabloları çıkış konnektörleri, antenler, zayıflatıcılar ve cihazlar arasında gerekli yerlerde bağlantı sağlama amaçlı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında herhangi bir harici amplifier veya pre-amplifier kullanılmamıştır. Kullanılan ölçüm cihazları kalibrasyonları periyodik olarak takip edilen cihazlar olup, EK-B’de bazı cihazların kalibrasyon sertifikaları yer almaktadır. Şekil 2.4’te kullanılan zayıflatıcılardan biri, Şekil 2.5’te ise saha sıcaklık ve nem ölçüm ve kaydında kullanılan sayısal sıcaklık ve nem ölçer/kaydedici görülmektedir.



Şekil 2.3 : Kontrol odasından bir görünüş.

Çizelge 2.1 : Ölçümlerde kullanılan temel cihazlar.

Cihaz Adı	Marka	Model
Modüler Spektrum Analizör	Hewlett Packard (HP)	70004A Display
		70310A Precision Frequency Reference
		70909A RF Section
		70902A IF Section
		70903A IF Section
		70900B Local Oscillator
İşaret Üretici	Rohde & Schwarz	SMT 02
Anten Mast Kontrolörü	HD 100 Controller	
10 dB Zayıflatıcı (2 adet)	Hewlett Packard (HP)	8491B
I konnektörler (2 adet)		N tipi



Şekil 2.4 : Ölçüm ekipmanlarından 10 dB zayıflatıcı.

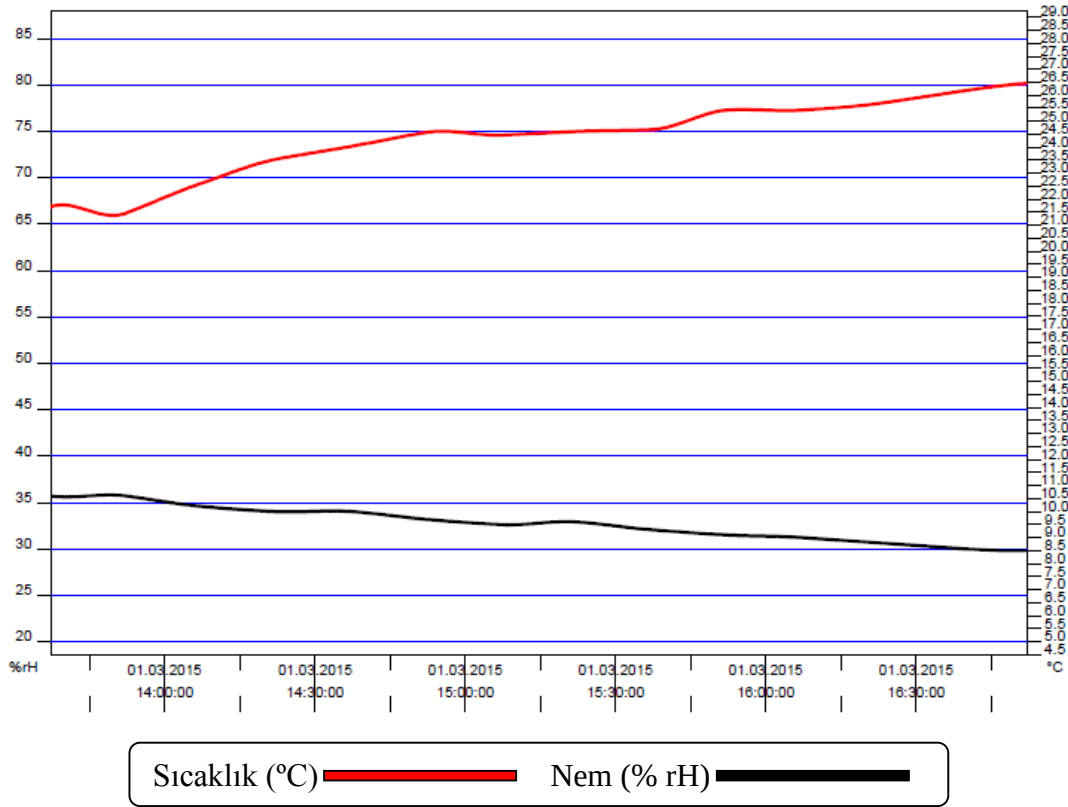
Çizelge 2.2 : Ölçümlerde kullanılan yardımcı cihazlar.

Cihaz Adı	Marka	Model
Sayısal Sıcaklık ve Nem Ölçer/Kaydedici	TESTO	177-H1 Logger
Analog Sıcaklık ve Nem Ölçer/Kaydedici	THIES CLIMA	Hygro-Thermograph
Basınç Ölçer	TFA	35.1083
Rüzgar Hızı Ölçer	PROVA	AVM-07
Lazer Mesafe Ölçer ve tripodu	BOSCH	GLM 250 VF Professional
		BS 150 Professional (Tripod)
Dijital Açı Ölçer	MITUTOYO	Digital Protractor Pro 360
Şerit Metre	FISCO	Uni-Matic UM3M



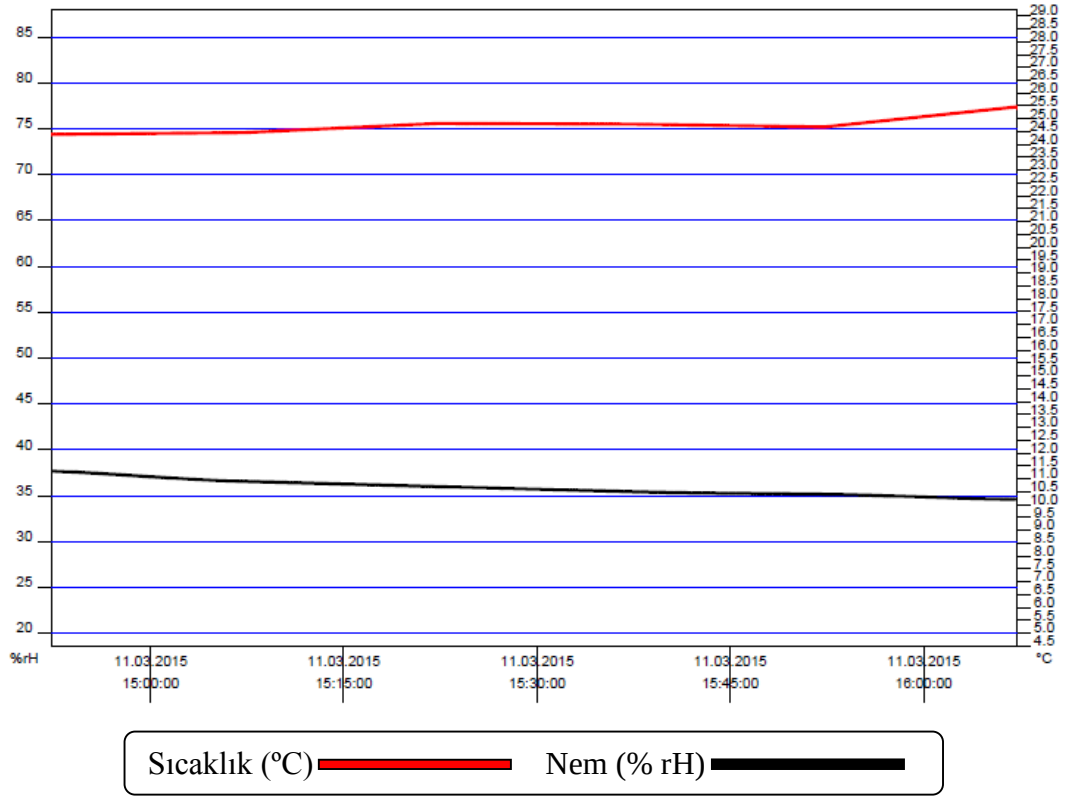
Şekil 2.5 : Sayısal sıcaklık ve nem ölçer/kaydedici.

Ölçümler açık sahada, dış etkenlere açık olarak yapıldığından ölçüm esnasında özellikle sıcaklık ve nem değerlerinin sürekli ölçülmesi ve kaydedilmesi gereklidir. Kontrol odasının da sıcaklık ve nem kontrolü bulunmadığından aynı şekilde bu değerlerin ölçülmesi ve kaydedilmesi önemlidir. Bu amaçla açık sahada ölçümler sırasında kayıt yapma özelliği bulunan (datalogger özellikli) sayısal sıcaklık ve nem ölçer ve aynı esnada kontrol odasında analog sıcaklık ve nem ölçer ile meteorolojik değerler kaydedilmiştir. Tüm ölçümler sırasında alınan kayıtlara göre, kalibrasyon sonucu oluşturulan ve EK-A'da da yer alan sertifikalardan da görüleceği üzere, sıcaklığın kontrol odasında (20 ± 7) °C, ASTA'da (15 ± 8) °C; bağıl nemin ise kontrol odasında % (45 ± 15), ASTA'da % (55 ± 30) bandlarında değiştiği tespit edilmiştir. Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de ölçümler sırasında açık sahada ve kontrol odasında alınan sıcaklık ve bağıl nem ölçümlerine ait kayıtlardan örnekler görülmektedir.

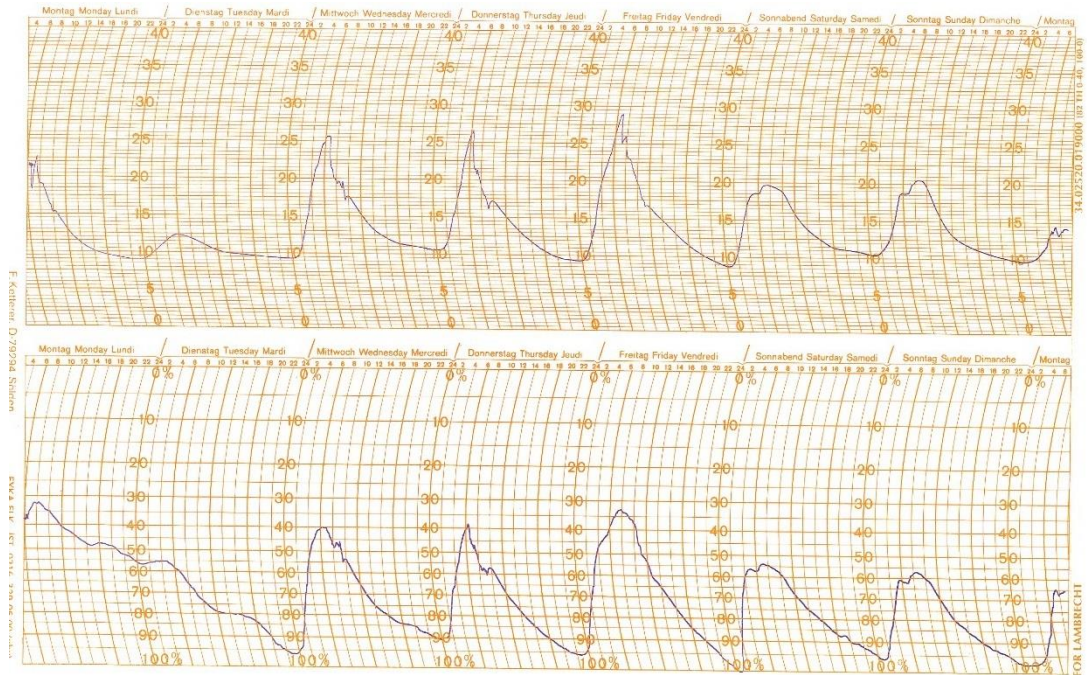


Şekil 2.6 : 01/03/2015 tarihinde bikonik anten kalibrasyonu için saha zayıflaması ölçümü sırasında ASTA'da çevre şartları (R&S HK 116 (verici), R&S HK 116³ (alıcı) kombinasyonda).

³ Kalibre edilen anten.



Şekil 2.7 : 11/03/2015 tarihinde log-periyodik anten kalibrasyonu için saha zayıflaması ölçümü sırasında ASTA'da çevre şartları (R&S HL 223 (verici), R&S HL 562E (alıcı) kombinasyonda).



Şekil 2.8 : Kontrol odasında örnek sıcaklık ve nem kaydı.

Bunların dışında basınç ölçer ve rüzgar hızı ölçerlerle ölçüm günlerindeki basınç ve rüzgar değerleri de not edilmiştir.

Sayısal sıcaklık ve nem ölçerde veri alma ve kayıt periyodu ayarlanabilmektedir. Şekil 2.5'ten de görüleceği üzere sayısal sıcaklık ve nem ölçerin sıcaklık çözünürlüğü 0,1 °C, bağıl nem çözünürlüğü ise % 0,1'dir. Analog sıcaklık ve nem ölçerde veriler sıcaklık ve bağıl nem ölçüm sayfasına çizdirilmektedir. Açık sahada sıcaklık ve nem ölçümleri alınırken, sayısal sıcaklık ve nem ölçerin doğrudan güneş ışığına maruz kalmasından dolayı oluşabilecek ölçüm hatalarını engellemek için gerekli önlemler alınmıştır.

Antenlerin ve anten direğinin konumlandırılmasında ± 1 mm hassasiyetli lazer mesafe ölçer ve $\pm 0,1^\circ$ hassasiyetli dijital hassas açı ölçer kullanılmıştır. Kullanılan lazer mesafe ölçer Şekil 2.10'da, dijital hassas açı ölçer ise Şekil 2.9'da görülmektedir. Antenlerin montajının ve konumlandırılmasının yapıldığı anten direklerinden (anten mastları) biri daha önce de bahsedildiği gibi anten sahasının ortasında sabit ve anten yüksekliği uzaktan (kontrol odasından) kontrol edilebilir şekilde bulunmakta olup, alıcı antenin konumlandırılması bu mast üzerinde yapılmıştır. Verici anten ise taşınabilir anten tripodu üzerinde konumlandırılmıştır.



Şekil 2.9 : Dijital hassas açı ölçer.



Şekil 2.10 : Lazer mesafe ölçer.

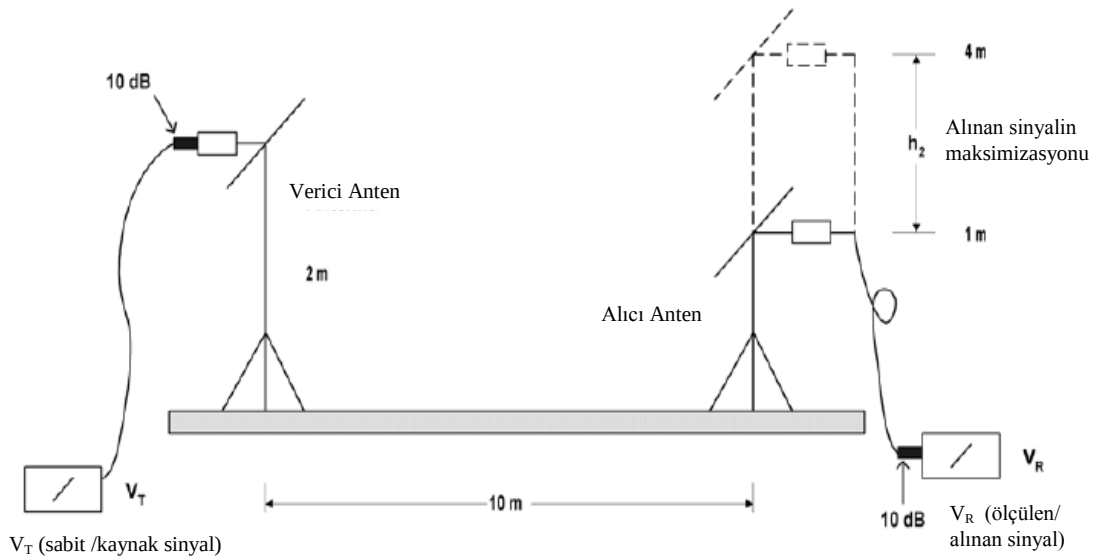
2.1 Kalibrasyon Metodu ve Ölçümlerin Alınışı

Kalibrasyon metodu olarak ANSI C63.5-2006 standardında bulunan Standart Saha Metodu (Standart Site Method) kullanılmıştır. Standart Saha Metodu aslında Albert A. Smith, Jr. [13] tarafından oluşturulan çalışmaların temelinde ortaya konmuş bir metottur. Standart Saha Metodunda bikonik dipol, ayarlanabilir dipol, log-periyodik dipol dizisi, geniş bant hibrit ve horn antenler kalibre edilebilir. Bikonik dipol antenler için Annex G düzeltmeleri yapılarak serbest uzay anten faktörleri elde edilebilir; standart saha metodu ve Annex G kullanılarak daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Bu çalışmada da bikonik anten kalibrasyonunda Annex G düzeltmeleri göz önüne alınmıştır. Geniş bant antenlerde ise standart saha metodu ile yakın serbest uzay (near free space) anten faktörleri elde edilmektedir. Burada Annex G düzeltmeleri geometri kaynaklı düzeltme faktörlerini (GSCF), serbest uzay anten faktörleri etrafındaki

nesnelerden hiç etkilenme olmaksızın anten faktörü ölçümünü, yakın serbest uzay anten faktörü ise test çevresinden minimum şekilde etkilenen anten faktörü ölçümünü ifade etmektedir [2].

Bu metotta antenler yatay polarizasyonda kalibre edilmektedir. Standart Saha Metoduna göre verici anten yüksekliği sabit 2 m, alıcı anten yüksekliği ise 1-4 m arasında değişken ve yükseklik taraması yapılabilecek şekilde olmalıdır. Alıcı ve verici antenler karşılıklı ve aralarındaki yatay mesafe 10 m olacak şekilde konumlandırılır. Bu mesafe alıcı-verici antenler aynı yükseklikte iken aralarındaki yatay mesafedir. Dipol ve bikonik dipol antenlerde bu yatay mesafe antenlerin dipol elemanlarının orta noktasından, log-periyodik dizi antenlerde boylamsal eksenindeki elemanların orta noktasından, horn antenlerde ise antenlerin ön yüzünden ölçülmelidir [2].

Standart Saha Metodu saha zayıflaması ölçümlerine dayanan bir metottur. ANSI C63.5-2006'da saha zayıflaması "test sahasındaki iki polarizasyon eşleşmeli anten arasında antenlerden biri belli bir yükseklik aralığı boyunca dikey hareket ettirilirken ölçülen minimum bağıl araya girme kaybı" ([2], s. 3) olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında saha zayıflaması zaman zaman SA kısaltmasıyla kullanılacaktır. Şekil 2.11'de antenlerin sahada konumlandırılması (ölçüm geometrisi) ve saha zayıflaması ölçümünün alınışı görülmektedir [2].



Şekil 2.11 : Saha zayıflaması ölçümlerinin alınışı [2].

Bu çalışma kapsamında bu bölümden itibaren bikonik dipol antenler “bikonik anten”, ayarlanabilir dipol antenler “dipol anten”, log-periyodik dizi antenler ise “log-periyodik anten” olarak adlandırılacaktır.

10 m yatay mesafe kullanıldığından antenlerin karşılıklı kuplaj değerleri; verici anten için 2 m ve alıcı anten için 1 m–4 m yükseklikleri kullanıldığından ve anten-zemin arası karşılıklı empedans değerleri ihmal edilebilir düzeyde olduğundan bu etkiler ihmal edilmektedir [2].

Standartta ayrıca işaret üreticinin alıcı cihazda gürültüden en az 16 dB fazla sinyal oluşturabilecek güçte olması istenmektedir. Bu çalışmada kullanılan cihazlar ile sinyal ile gürültü arasında çok daha fazla fark sağlanmış olup, gürültü kaynaklı etki ölçüm sonuçlarından çıkarılmamış, ölçüm belirsizliğine eklenmiştir. Ölçüm belirsizliği bölümünde de görüleceği üzere bu etki, diğer belirsizlik etkilerinin yanında ihmal edilebilecek düzeyde kalmıştır [2].

Antenlerin yatay polarizasyonda kalibre edilmesinin sebepleri ANSI C63.5-2006’da şu şekilde verilmiştir:

1. Anten ve ortogonal kablo arasında oluşabilecek karşılıklı kuplaj değerleri ihmal edilebilir düzeydedir.
2. Kablodan oluşabilecek yansımalar ihmal edilebilir düzeydedir.
3. Zemin düzleminin iletkenliğinin ve geçirgenliğinin değişimlerinden dolayı oluşabilecek zemin yansımalarına karşı yatay polarizasyon dikey polarizasyondan daha az hassastır.
4. Yatay polarizasyonda zemin kenarından oluşabilecek yansımalar daha az etkilidir.
5. Saha kaynaklı etkiler bakımından yatay polarizasyondaki ölçümler göreceli olarak daha az hassastır [2].

Kalibrasyonlara başlanmadan önce standardın önerdiği şekilde anten simetrileri kontrol edilmiştir. Benzer antenler alıcı-verici olarak dikey polarizasyonda anten merkezi zemin düzleminden 1 m yükseklikte konumlandırılmış, alıcı anten 180° derece döndürüldüğünde alınan sinyal ile orijinal pozisyonda alınan sinyal arasındaki farklar her zaman 1.0 dB’in altında kalmıştır. Bu durum anten simetrilerinin uygun olduğunu göstermiştir.

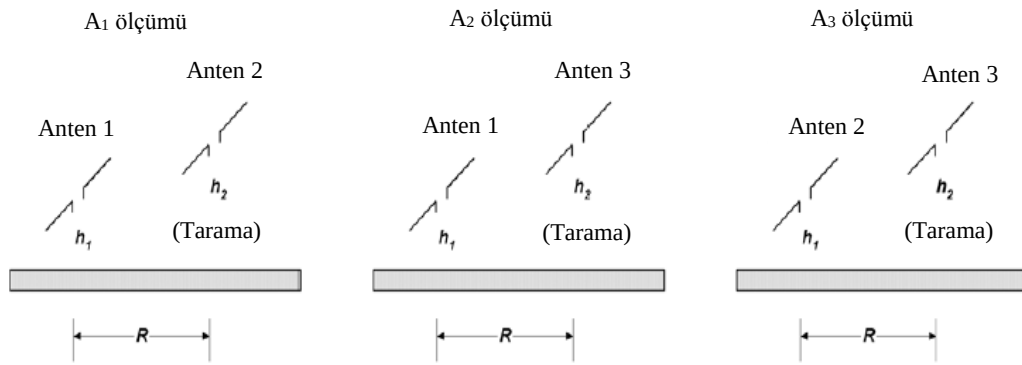
Üç Anten ile Standart Saha Metodu temel olarak 3 farklı antenin aynı ölçüm geometrilerinde (antenler arası mesafe ve anten yükseklikleri) ikişerli gruplar halinde toplamda 3 adet saha zayıflaması ölçümü ve bu ölçümler sonucu aşağıda görülen 3 adet denklemin çözümü ile her bir antenin anten faktörünün bulunmasından oluşur.

$$AF_1 + AF_2 = A_1 + 20 \log f_M - 48,92 + E_D^{max} \quad (2.1)$$

$$AF_1 + AF_3 = A_2 + 20 \log f_M - 48,92 + E_D^{max} \quad (2.2)$$

$$AF_2 + AF_3 = A_3 + 20 \log f_M - 48,92 + E_D^{max} \quad (2.3)$$

Denklemlerdeki tüm ifadeler dB cinsindendir. E_D^{max} verici antenden R mesafedeki maksimum alan değeri olup, birimi $\text{dB}(\mu\text{V/m})$ 'dir. E_D^{max} değerleri Albert A. Smith, Jr. [13] tarafından yapılan çalışmalardan elde edilmiş ve standartta da çizelge halinde verilmiştir. Standarttan alınarak Çizelge 2.3'te sunulan ilgili değerler mükemmel iletken metal zemin düzlemi için hesaplanmış değerlerdir. Bu çalışma kapsamında da bu değerler kullanılmış olup, çalışmada kullanılan metal zemin düzleminin mükemmel iletken kabulünden kaynaklanabilecek hatalar ihmal edilmiştir. AF_1 , AF_2 , AF_3 sırasıyla 1, 2 ve 3 numaralı antenlerin anten faktörleri olup, birimleri $\text{dB}(1/\text{m})$ 'dir. Saha zayıflaması bu çalışmada A ile sembolize edilmiştir. A_1 , A_2 , A_3 Şekil 2.12'de görülmekte olan ölçüm düzenlerindeki dB cinsinden saha zayıflamalarıdır. Son olarak f_M ise MHz olarak frekans değeridir [2].



Şekil 2.12 : 3 farklı anten çiftini kullanarak 3 saha zayıflaması ölçümü [2].

Çizelge 2.3 : Frekansa göre E_D^{max} değerleri.

f_M (MHz)	E_D^{max} (dB(μ V/m))	f_M (MHz)	E_D^{max} (dB(μ V/m))	f_M (MHz)	E_D^{max} (dB(μ V/m))
30	-4,76	90	2,05	300	2,71
35	-3,56	100	2,21	400	2,71
40	-2,55	120	2,39	500	2,57
45	-1,69	140	2,49	600	2,63
50	-0,95	160	2,56	700	2,67
60	0,24	180	2,60	800	2,69
70	1,09	200	2,63	900	2,71
80	1,69	250	2,68	1000	2,72

Yukarıdaki denklemler anten faktörlerini verecek şekilde düzenlendiğinde aşağıdaki ifadeler elde edilmektedir [2]:

$$AF_1 = 10 \log f_M - 24,46 + \frac{1}{2} (E_D^{max} + A_1 + A_2 - A_3) \quad (2.4)$$

$$AF_2 = 10 \log f_M - 24,46 + \frac{1}{2} (E_D^{max} + A_1 + A_3 - A_2) \quad (2.5)$$

$$AF_3 = 10 \log f_M - 24,46 + \frac{1}{2} (E_D^{max} + A_2 + A_3 - A_1) \quad (2.6)$$

Eğer eşdeğer 2 anten kalibre ediliyorsa, iki antenin her birinin anten faktörü aşağıdaki formülden hesaplanabilir [2]:

$$AF = 10 \log f_M - 24,46 + \frac{1}{2} (E_D^{max} + A) \quad (2.7)$$

İki antenin pratikte hiçbir zaman tamamen aynı, eşdeğer olması mümkün değildir. Yukarıdaki denklemle ifade edilen anten faktörü her iki antenin anten faktörlerinin geometrik ortalamasıdır. Bu çalışmada kullanılan dipol setlerindeki antenler gibi üretici tarafından birbirine çok yakın şekilde üretilen antenlerin anten faktörleri ölçüm belirsizliğine göre çok az değişim gösterir [2].

Eğer 2 anten bulunuyor ve birinin anten faktörü biliniyorsa, bilinen anten faktörü AF_2 olmak üzere şu denklem kullanılabilir [2]:

$$AF_1 = A_1 + 20 \log f_M - 48,92 + E_D^{max} - AF_2 \quad (2.8)$$

A_1 , A_2 , A_3 saha zayıflamalarının (site attenuation) ölçümünde standarda göre ayırık frekans metodu (discrete frequency method) ve süpürülmüş frekans metodu (swept frequency method) olmak üzere 2 metot kullanılabilir. Bu çalışmada ayırık frekans metodu kullanılmıştır. Bu yöntemde, “belirli frekans noktalarında” verici antenden gönderilen sinyal, alıcı antende maksimum sinyali elde edebilmek amacıyla yükseklik taramasına tabi tutulur [2].

Ayrık frekans metodunda saha zayıflatması ölçülürken standartta belirtilen prosedür göz önüne alınarak aşağıdaki adımlar izlenmiştir (3 anten kullanılarak):

1. Öncelikle kullanılan tüm cihazlar gerekli ısınma süreleri kadar çalıştırılarak, kararlı ve yüksek doğruluğa sahip olacakları düzeye gelmeleri sağlanmıştır.
2. Şekil 2.12'ye göre 1 ve 2 numaralı antenlerin yukarıda belirtilen ölçüm geometrisinde ($d=10$ m, $h_1=2$ m, $h_2=1$ m-4 m) sahada konumlandırılması sağlanmıştır. İşaret üreticiden gelen sinyal kablusunun ulaştığı verici anten kuyusu ile verici anten arasında kablo bağlantısı verici anten girişinde 10 dB değerinde bir zayıflatıcı olmak üzere oluşturulmuştur. Kabloların olabildiğince kuplaj oluşturmayacak şekilde uzanımı dikkate alınmıştır. Spektrum analizör girişine 10 dB değerinde diğer bir zayıflatıcı eklenmiştir. Alıcı anten ile alıcı anten kuyusu arasında kablo bağlantısı yine olabildiğince kuplaj etkisi oluşmayacak şekilde oluşturulmuştur.
3. İlgili frekans için işaret üretici ve spektrum analizör hazırlanmış, işaret üreticiden sinyal gönderilerek verici antende oluşturulan elektromanyetik enerjinin alıcı anten tarafından alınması ve spektrum analizörde ölçülmesi sağlanmıştır. Aynı esnada anten mast kontrolörü ile 1 m-4 m yükseklik aralığında alıcı antenin yüksekliği değiştirilmiş ve spektrum analizörden okunan maksimum sinyal kaydedilmiştir. Ölçümler sırasında işaret üretici çıkış sinyali tüm ölçümlerde 120 db μ V olarak sabit tutulmuş, spektrum analizör ise maksimum sinyali okuyacak şekilde ayarlanmıştır. Bu çalışmada standardın bahsettiği ölçüm cihazında referans gösterge değerini sağlayabilmek amacıyla yerine koyma zayıflatıcısı (substitution attenuator) kullanılmamış, ölçümler cihazdan doğrudan okunmuş ve kaydedilmiştir. Bu ölçüm saha ölçümü olarak

adlandırılmakta olup, bu çalışmada standartta olduğu gibi V_{site} olarak sembolize edilecektir.

4. Ölçüm alındıktan sonra tüm kablo ve zayıflatıcılar antenlerden ayrılmış, kablo ve zayıflatıcılar bir I konnektör ile birbirlerine doğrudan bağlanmıştır. Aynı frekansta aynı sinyal gönderilerek spektrum analizörden ölçüm alınmış ve bu ölçüm doğrudan ölçüm olarak kaydedilmiştir. Doğrudan ölçüm bu çalışmada standartta olduğu gibi V_{direct} olarak sembolize edilecektir.
5. V_{direct} ile V_{site} arasındaki fark hesaplanarak ilgili frekans noktasındaki saha zayıflaması dB olarak bulunmuştur [2].

$$A = V_{direct} - V_{site} \quad (2.9)$$

A : Saha Zayıflaması

6. Çizelge 2.3'te verilen frekans noktalarında (antenlerin çalışma frekans aralığına dikkat edilerek) saha zayıflamaları 3-4-5 maddeleri uygulanarak bulunmuştur.
7. Böylece Şekil 2.12'ye göre A1 saha zayıflaması ölçümleri elde edilmiştir. Yine Şekil 2.12'ye göre 3 antenin farklı kombinasyonlarının alıcı-verici şekilde konumlandırılmasıyla oluşan saha zayıflamalarından A_2 ve A_3 3-4-5-6 maddeleri uygulanarak elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında yukarıdaki adımların çok uzun süreler almasından dolayı standarttan farklı olarak A_1 , A_2 ve A_3 saha zayıflama ölçümleri farklı zamanlarda ancak benzer iklim koşullarında 5 kez tekrarlanmış, saha zayıflaması değeri olarak ortalama değer alınmıştır.

1, 2 ve 3 nolu antenlerin sırasıyla AF_1 , AF_2 , AF_3 anten faktörlerinin elde edilmesi için Denklem (2.4), (2.5) ve (2.6) kullanılmıştır. E_D^{max} değerleri için Çizelge 2.3'teki değerler seçilmiştir.

Önceki kısımlarda da belirtildiği gibi eğer anten faktörleri bilinen bir anten mevcut ve bu anten faktörleri kullanılarak diğer anten kalibre edilmek isteniyorsa ve (2.8)'deki denklem kullanılarak bilinmeyen antenin anten faktörleri bulunabilmektedir. Bu noktada iki anten ile tek saha zayıflaması ölçümü yeterli olacaktır. Bu çalışmada anten faktörleri mevcut bulunan (kalibrasyon sertifikası olan) antenler kullanılarak bu metot

uygulanmış olup, ilerleyen kısımlarda anlatılmıştır. Burada yukarıda maddeler halinde verilen saha zayıflaması işlem adımlarından 7. madde dışındakiler aynı şekilde uygulanmıştır.

Ayrıca, yine önceki kısımlarda belirtildiği gibi eğer 2 özdeş anten bulunuyorsa, (2.7)'deki denklem kullanılarak bu özdeş antenlerin anten faktörleri hesaplanabilmektedir. Bu metotta da tek bir saha zayıflaması ölçümü yeterli olup, yukarıda maddeler halinde verilen saha zayıflaması işlem adımlarından 7. Madde dışındakilerin aynı şekilde uygulanması gerekmektedir. Bu alt metodun bir uygulaması da ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

Bu çalışmada Standart Saha Metodu yukarıdaki farklı durumlara göre incelenmiştir. Bu durumlar çalışmaya özel olarak 3 Anten ile Standart Saha Metodu, Bilinen Anten ile Standart Saha Metodu ve Özdeş Antenler ile Standart Saha Metodu olarak adlandırılacaktır.

3. AÇIK SAHA TEST ALANININ (ASTA) KALİBRASYON YETERLİLİĞİ İÇİN DOĞRULANMASI (SAHA VALİDASYONU)

Kalibrasyonların yapılacağı açık saha test alanının kalibrasyonlara başlamadan önce kalibrasyonlar için yeterliliği test edilmelidir. Çünkü, kalibrasyon işlemine uygun olmayan bir sahada kalibrasyon yapmak güvenilir sonuçlar vermeyecektir. ANSI C63.4-2014 standardı Annex D kısmı test sahalarının doğrulanması ile ilgili prosedürleri içermektedir. ANSI C63.5-2006 standardı bu konuda ANSI C63.4-2014⁴ standardına atıf yaparak bu standarttaki alternatif test sahaları için normalize edilmiş saha zayıflaması testinin sahanın farklı konumlarını içeren bir hacim oluşturacak şekilde, kalibrasyonların yapılacağı ölçüm geometrisinde (10 m yatay mesafe, verici anten yüksekliği 2 m, alıcı anten yüksekliği 1 m-4 m) gerçekleştirilmesini istemektedir [2, 3].

Normalize edilmiş saha zayıflaması, saha zayıflamasından saha zayıflamasının elde edildiği antenlerin anten faktörlerinin çıkarılmasıyla elde edilmektedir. Normalize edilmiş saha zayıflaması için bundan sonraki kısımlarda NSA kısaltması kullanılacaktır. Denklem (3.1)'de anten tiplerine göre normalize edilmiş saha zayıflamasının elde edilişi görülmektedir (A_N : Normalize edilmiş saha zayıflaması, GSCF: Geometri kaynaklı düzeltme faktörü, AF_T : Verici anten anten faktörü, AF_R : Alıcı anten anten faktörü, ΔAF_{TOT} : Karşılıklı empedans düzeltme faktörü) [3].

$$A_N = \begin{cases} V_{direct} - V_{site} - AF_T - AF_R - \Delta AF_{TOT}, & \text{ayarlı dipol anten} \\ V_{direct} - V_{site} - AF_T - AF_R - GSCF, & \text{bikonik anten} \\ V_{direct} - V_{site} - AF_T - AF_R, & \text{diğer antenler} \end{cases} \quad (3.1)$$

Doğrulama için ayarlı dipol anten kullanılmadığından, NSA için denklemlerin 2. ve 3. sırasındaki bikonik ve diğer antenler için olan kısımları kullanılmıştır. Anten geometri kaynaklı düzeltme faktörleri değerleri için ANSI C63.5-2006 standardından yararlanılmıştır. Bu doğrulama yönteminde aynı sahada kalibre edilmiş antenlerin bu

⁴ Aslında ANSI C63.5-2006 doğal olarak tarih itibarıyla ANSI C63.4-2003 standardına [50] atıf yapmaktadır. Ancak, bu çalışmada dönem itibarıyla bu standardın güncel versiyonu olan ANSI C63.4-2014 kullanılmıştır.

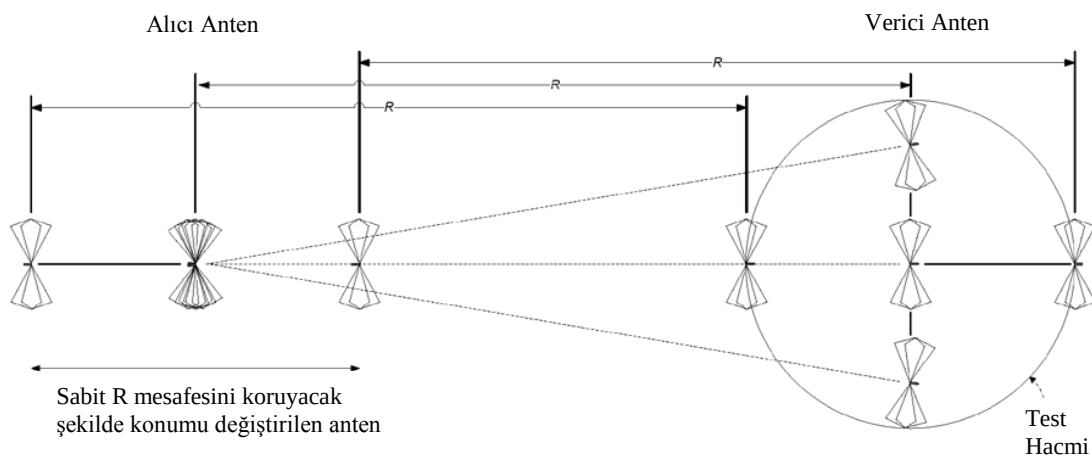
sahadaki ölçümlerle elde edilmiş anten faktörlerinin kullanılması, kendi içinde bir döngüye sebebiyet vererek gerçek anlamda sahanın doğrulanmasını engelleyecektir. Bu çalışmada sahanın doğrulandığı antenler daha sonra kalibrasyon aşamalarında da kullanılmıştır. Ancak, bu antenlerin başka laboratuvarlardan kalibrasyon sertifikası olması ve NSA hesabında sertifikadaki anten faktörlerinin kullanılması söz konusu döngüye girilmesini engellemektedir. Ayrıca, doğrulama işleminin yapıldığı tarihlerde doğrulamada kullanılan antenlerin kalibrasyon periyotlarının aşılmamış ve son kalibrasyonlarından uzun bir süre geçmemiş olması, yapılan işlemin doğruluğunun azalmasına engel olmuştur. Son kalibrasyon zamanından saha doğrulaması zamanına kadar olabilecek anten faktörü değişimlerinden kaynaklı hata ise ihmal edilmiştir. Çizelge 3.1’de saha doğrulaması için kullanılan antenler yer almaktadır.

Çizelge 3.1 : Saha doğrulaması için kullanılan antenler.

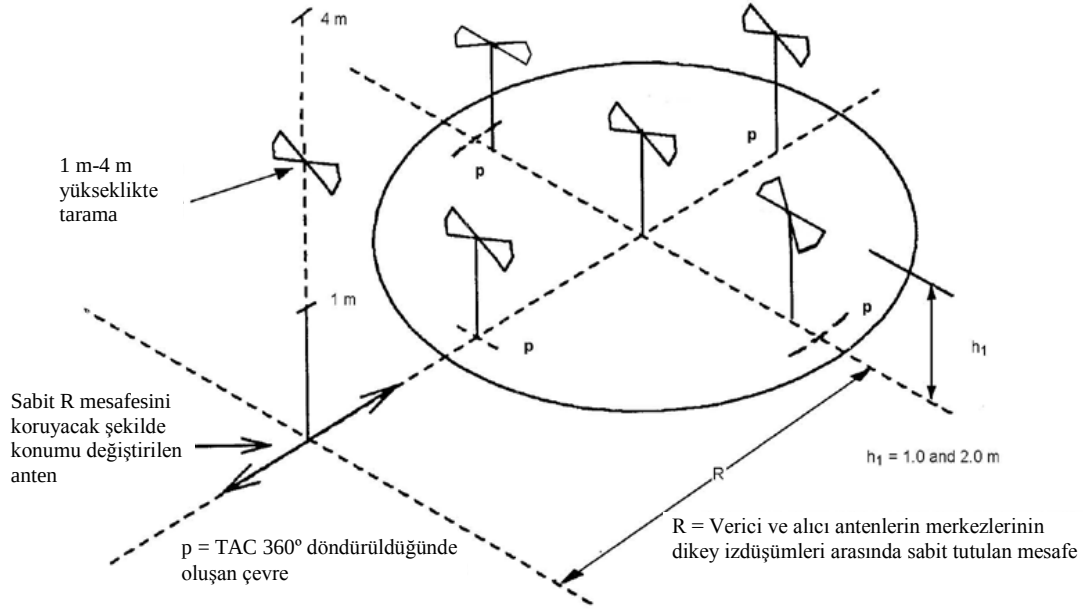
No	Marka	Model	Özellikler	Not
1	R&S	HK116	Bikonik Anten Çalışma Aralığı: 20 MHz - 300 MHz Empedans : 50 Ω	TUBİTAK UME’den kalibrasyon sertifikası bulunmaktadır.
2	R&S	HL223	Log-Periyodik Anten Çalışma Aralığı: 200 MHz – 1,3 GHz, Empedans : 50 Ω	TUBİTAK UME’den kalibrasyon sertifikası bulunmaktadır.
3	R&S	HL562 E	Ultralog ultra geniş bandlı anten (bikonilog hibrit özellikte) Çalışma Aralığı: 30 MHz - 6 GHz Empedans : 50 Ω	DKD’den kalibrasyon sertifikası bulunmaktadır.

Saha zayıflaması ölçümü bir önceki bölümde belirtilen ölçüm prosedürü ile aynıdır. Normalize edilmiş saha zayıflamaları ise saha zayıflaması ölçümleri, Denklem (3.1) ve ilgili anten sertifikalarında yer alan anten faktörleri kullanılarak hesaplanmıştır.

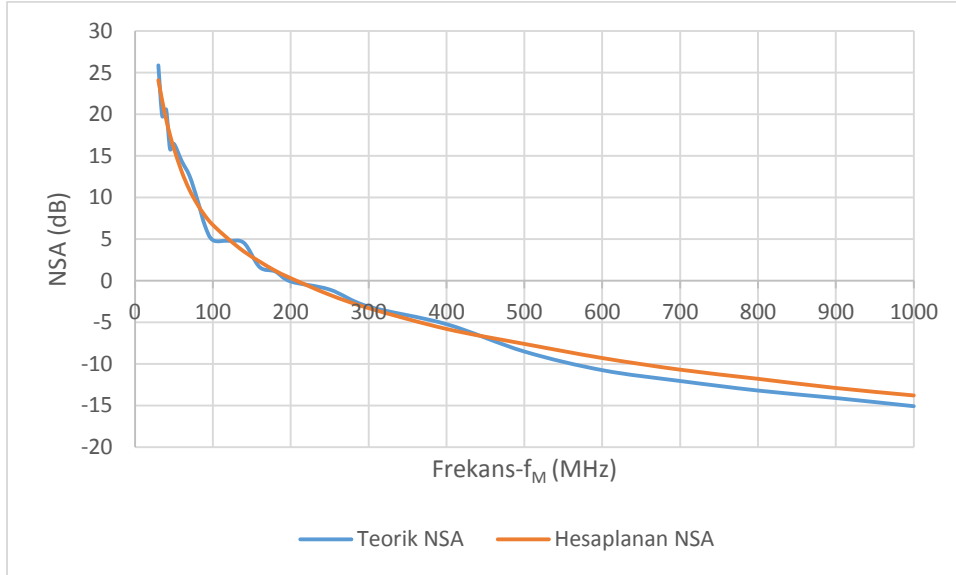
NSA ölçümleri kalibrasyon yapılacak geometride ASTA'da bulunan döner masa (turntable) çevresinde 0°, 90°, 180°, 270°, 360° yarıçap noktalarında, yani Şekil 3.1 ve 3.2'teki gibi sahanın 5 ayrı konumunu (merkez, sol, sağ, ön ve arka) içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Uzaktan kontrollü anten mastının tekerlekli bir kaideye sahip olması ilgili konumların sağlanmasını kolaylaştırmıştır. Test yukarıdaki çizelgede verilen antenler ile 30 MHz-1 GHz frekans bandında yapılmış, tüm konumlandırma ve frekanslarda hesaplanan NSA ile teorik NSA arasındaki fark ± 2 dB bandı içerisinde kaldığından sahanın antenin kalibrasyonu için uygun olduğu görülmüştür. Çizelge 3.2, 3.3 ve 3.4'te kalibrasyonların yapılacağı merkez konumda NSA test sonuçları yer almaktadır. Diğer 4 konum için oluşan standart sapma, ölçüm belirsizliği bölümünde grafik ile verilmiştir. Şekil 3.3'te ise teorik NSA ile ölçümlerle hesaplanan NSA arasındaki farklar grafiksel olarak görülmektedir.



Şekil 3.1 : NSA ölçümleri için 5 konum (üstten görünüş) [3].



Şekil 3.2 : NSA ölçümleri için 5 konum [3].



Şekil 3.3 : Teorik NSA - Ölçümlerle Hesaplanan NSA.

Çizelge 3.2 : Saha doğrulaması ölçüm sonuçları (30 MHz-100 MHz).

Frekans (f_M -MHz)	Hesaplanan NSA (dB)	Teorik NSA (dB)	Sapma (Hes. NSA- Teo. NSA) (dB)	Tolerans (dB)
30	25,88	24,1	1,78	± 2
35	19,79	21,6	-1,81	± 2
40	20,56	19,4	1,16	± 2
45	15,82	17,5	-1,68	± 2
50	16,44	15,9	0,54	± 2
60	14,37	13,1	1,27	± 2
70	12,60	10,9	1,70	± 2
80	9,76	9,2	0,56	± 2
90	6,57	7,8	-1,23	± 2
100	4,87	6,7	-1,83	± 2

Çizelge 3.3 : Saha doğrulaması ölçüm sonuçları (120 MHz-300 MHz).

Frekans (f _M -MHz)	Hesaplanan NSA (dB)	Teorik NSA (dB)	Sapma (Hes. NSA- Teo. NSA) (dB)	Tolerans (dB)
120	4,79	5,0	-0,21	± 2
140	4,53	3,5	1,16	± 2
160	1,64	2,3	-0,66	± 2
180	1,11	1,2	-0,09	± 2
200	-0,10	0,3	-0,40	± 2
250	-1,07	-1,7	0,63	± 2
300	-3,12	-3,3	0,18	± 2

Çizelge 3.4 : Saha doğrulaması ölçüm sonuçları (400 MHz-1000 MHz).

Frekans (f_M -MHz)	Hesaplanan NSA (dB)	Teorik NSA (dB)	Sapma (Hes. NSA- Teo. NSA) (dB)	Tolerans (dB)
400	-5,23	-5,8	0,57	± 2
500	-8,52	-7,6	-0,92	± 2
600	-10,76	-9,3	-1,46	± 2
700	-12,06	-10,7	-1,36	± 2
800	-13,21	-11,8	-1,41	± 2
900	-14,11	-12,9	-1,21	± 2
1000	-15,09	-13,8	-1,29	± 2

4. EMC ANTENİ KALİBRASYONLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Önceki kısımlarda anlatılan prosedürlere göre EMC anteni kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. 3 Anten ile Standart Saha Metodu ve Bilinen Anten ile Standart Saha Metodu bikonik ve log-periyodik antenler; Özdeş Antenler ile Standart Saha Metodu ise mevcut bulunan yarım-dalga dipol setler için gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları ile kullanılan ve kalibre edilen antenler ilerleyen kısımlarda verilmiştir.

Ölçümler alınırken alıcı anten yükseklik taraması sırasında spektrum analizör tarama süresi ayarları yüksekliğin etkin bir şekilde taranmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Ölçümler sırasında deneysel olarak özellikle bikonik anten kalibrasyonu saha ölçümlerinde 30 MHz-100 MHz bandında 1 m-4 m alıcı anten maksimum sinyalinin yüksekliğe bağımlılığının fazla olduğu, bu bandda maksimum sinyalin alıcı anten tarafından genellikle maksimum yükseklikte (4 m) algılandığı görülmüştür. 100 MHz üzeri frekanslarda ise maksimum sinyalin yüksekliğe bağımlılığının ortadan kalktığı tespit edilmiştir.

4.1 3 Anten ile Standart Saha Metodu

3 Anten ile Standart Saha Metodu yukarıda da belirtildiği üzere bikonik ve log-periyodik antenler için uygulanmıştır.

4.1.1 Bikonik anten kalibrasyonu

Bu çalışmada 3 Anten ile Standart Saha Metodu kullanılarak mevcut bulunan Rohde&Schwarz HK 116 model bikonik antenin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için kullanılan antenler Çizelge 4.1’de listelenmiştir.

Çizelge 4.1 : Bikonik anten kalibrasyonu için kullanılan antenler (3 Anten ile SSM).

No	Marka	Model	Özellikler	Not
1	HP	11966A K38	Bikonik Anten Çalışma Aralığı: 30 MHz - 300 MHz Empedans : 50 Ω	
2	R&S	HK116	Bikonik Anten Çalışma Aralığı: 20 MHz - 300 MHz Empedans : 50 Ω	TUBİTAK UME'den kalibrasyon sertifikası bulunmaktadır.
3	R&S	HK116	Bikonik Anten Çalışma Aralığı: 20 MHz - 300 MHz Empedans : 50 Ω	Kalibrasyonu yapılan anten

3 Anten alıcı-verici şeklinde ikişerli gruplandırılarak alınan 3 saha zayıflaması ölçümü 1 çevrim oluşturmaktadır. Bu çalışmada bikonik antenin kalibrasyonu için 5 çevrim ölçüm alınmıştır. Çalışmalar sırasında alınan bir çevrimin sonuçları örnek olarak Çizelge 4.2 ve 4.3'te verilmiştir. Çizelgede parantez içerisindeki (1), (2) ve (3) rakamları, Şekil 2.12'de verilen sırasıyla A_1 , A_2 , A_3 ölçümlerini belirtmektedir. AF_1 , AF_2 , AF_3 sırasıyla 1, 2, 3 no'lu antenlerin anten faktörlerini simgelemektedir. Şekil 4.1 ve 4.2'de ölçümlerden görüntüler yer almaktadır.



Şekil 4.1 : Bikonik anten kalibrasyonu saha ölçümlerinden bir görünüş.



Şekil 4.2 : Bikonik anten kalibrasyonundan bir kesit.

Çizelge 4.2 : Bikonik anten kalibrasyonu için alınan 1 çevrim ölçüm sonuçları-3 Anten ile SSM (30 MHz-100 MHz).

f_M (MHz)	$V_{\text{direct}}^{(1)}$ (dB μ V)	$V_{\text{site}}^{(1)}$ (dB μ V)	A (1) (dB)	$V_{\text{direct}}^{(2)}$ (dB)	$V_{\text{site}}^{(2)}$ (dB μ V)	A (2) (dB)	$V_{\text{direct}}^{(3)}$ (dB μ V)	$V_{\text{site}}^{(3)}$ (dB μ V)	A (3) (dB)	$E_{D\text{max}}$ dB(μ V/m)	AF ₁ (dB/m)	AF ₂ (dB/m)	AF ₃ (dB/m)
30	96,92	46,08	50,84	97,05	45,68	51,37	95,91	45,70	50,21	-4,76	13,80	12,64	13,17
35	96,89	50,78	46,11	96,94	50,52	46,42	95,97	50,74	45,23	-3,56	12,76	11,57	11,88
40	96,91	57,17	39,74	96,85	56,39	40,46	95,87	56,67	39,20	-2,55	10,73	9,47	10,19
45	96,64	59,71	36,93	96,48	59,04	37,44	95,68	59,96	35,72	-1,69	10,53	8,81	9,32
50	96,27	64,60	31,67	96,38	64,64	31,74	95,46	64,36	31,10	-0,95	8,18	7,54	7,61
60	94,25	66,53	27,72	94,35	66,71	27,64	93,34	66,42	26,92	0,24	7,29	6,57	6,49
70	91,43	65,23	26,20	91,71	65,61	26,10	90,72	65,44	25,28	1,09	7,80	6,98	6,88
80	88,95	64,02	24,93	88,96	63,15	25,81	87,63	63,43	24,20	1,69	9,14	7,53	8,41
90	86,42	60,23	26,19	86,60	60,25	26,35	86,46	61,09	25,37	2,05	10,03	9,05	9,21
100	84,90	57,54	27,36	85,18	57,53	27,65	85,14	58,36	26,78	2,21	10,82	9,95	10,24

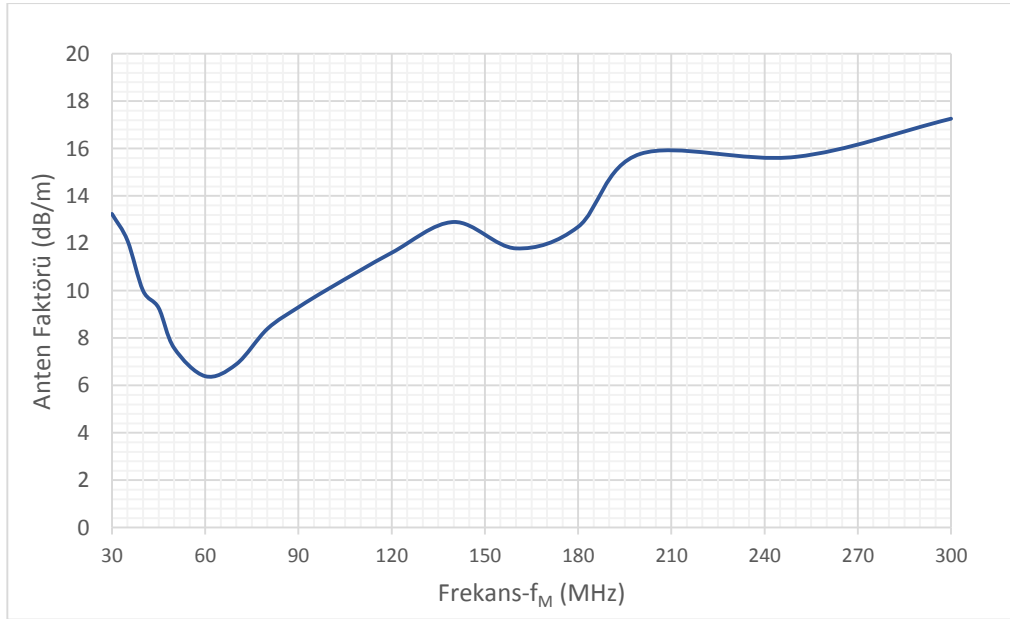
Çizelge 4.3 : Bikonik anten kalibrasyonu için alınan 1 çevrim ölçüm sonuçları-3 Anten ile SSM (120 MHz-300 MHz).

f_M (MHz)	V_{direct} (1) (dB μ V)	V_{site} (1) (dB μ V)	A (1) (dB)	V_{direct} (2) (dB)	V_{site} (2) (dB μ V)	A (2) (dB)	V_{direct} (3) (dB μ V)	V_{site} (3) (dB μ V)	A (3) (dB)	E_{Dmax} dB(μ V/m)	AF ₁ (dB/m)	AF ₂ (dB/m)	AF ₃ (dB/m)
120	84,25	54,41	29,84	84,74	55,03	29,71	85,09	56,34	28,75	2,39	12,73	11,77	11,64
140	86,16	57,17	28,99	87,89	58,28	29,61	89,05	60,79	28,26	2,49	13,43	12,08	12,70
160	93,01	66,83	26,18	93,38	66,92	26,46	90,41	65,13	25,28	2,56	12,66	11,48	11,76
180	86,09	59,16	26,93	83,88	56,32	27,56	82,36	55,91	26,45	2,60	13,36	12,25	12,88
200	79,98	51,30	26,68	79,80	48,60	31,20	78,59	49,12	29,47	2,63	14,92	13,19	15,71
250	84,57	58,14	26,43	84,06	55,11	28,95	85,17	58,16	27,01	2,68	15,04	13,10	15,62
300	86,73	45,82	40,91	82,25	45,38	36,87	79,03	43,82	35,21	2,71	22,95	21,29	17,25

5 çevrim ölçüm alındıktan sonra kalibrasyonu hedeflenen R&S bikonik antenin anten faktörü ölçüm sonuçları çizelge 4.4'te ve şekil 4.3'te görülmektedir.

Çizelge 4.4 : Bikonik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM).

f_M (MHz)	AF (dB/m)	f_M (MHz)	AF (dB/m)
30	13,24	100	10,11
35	12,11	120	11,60
40	10,00	140	12,90
45	9,28	160	11,79
50	7,58	180	12,70
60	6,39	200	15,78
70	6,90	250	15,65
80	8,39	300	17,26
90	9,30		

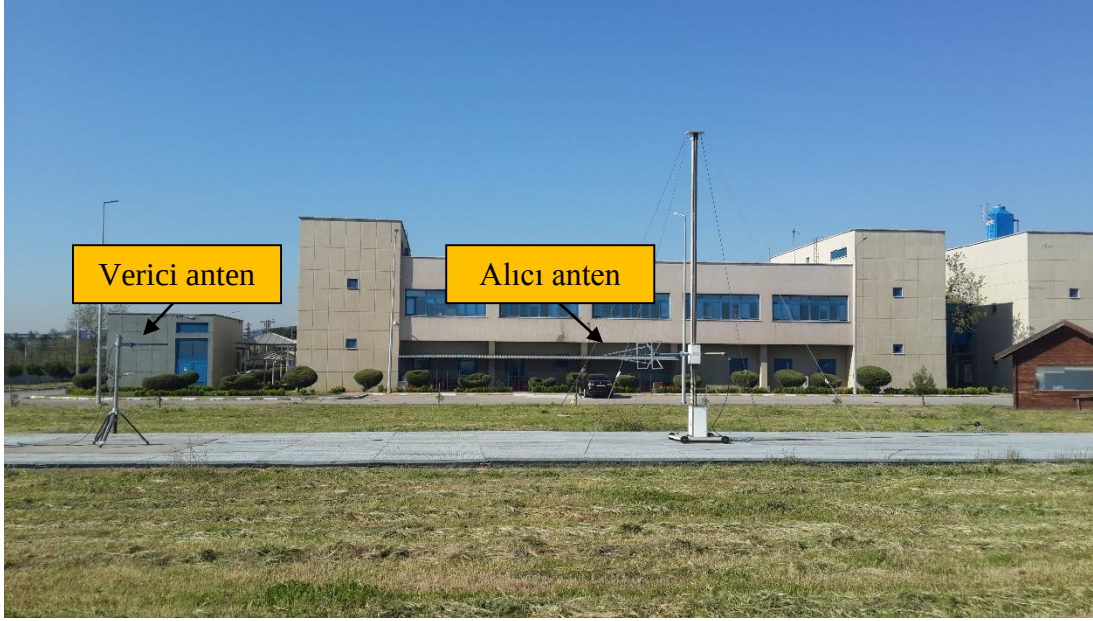


Şekil 4.3 : Bikonik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM).

4.1.2 Log-Periyodik anten kalibrasyonu

Bu çalışmada 3 Anten ile Standart Saha Metodu kullanılarak mevcut bulunan Rohde&Schwarz HL223 model log-periyodik antenin kalibrasyonu

gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için kullanılan antenler Çizelge 4.5'te bulunmaktadır. Şekil 4.4 ve 4.5'te saha ölçümlerinden görüntüler yer almaktadır.



Şekil 4.4 : Log-periyodik anten saha ölçümlerinin alınışı.



Şekil 4.5 : Log-periyodik anten kalibrasyonundan bir görünüş.

Çizelge 4.5 : Log-periyodik anten kalibrasyonu için kullanılan antenler.

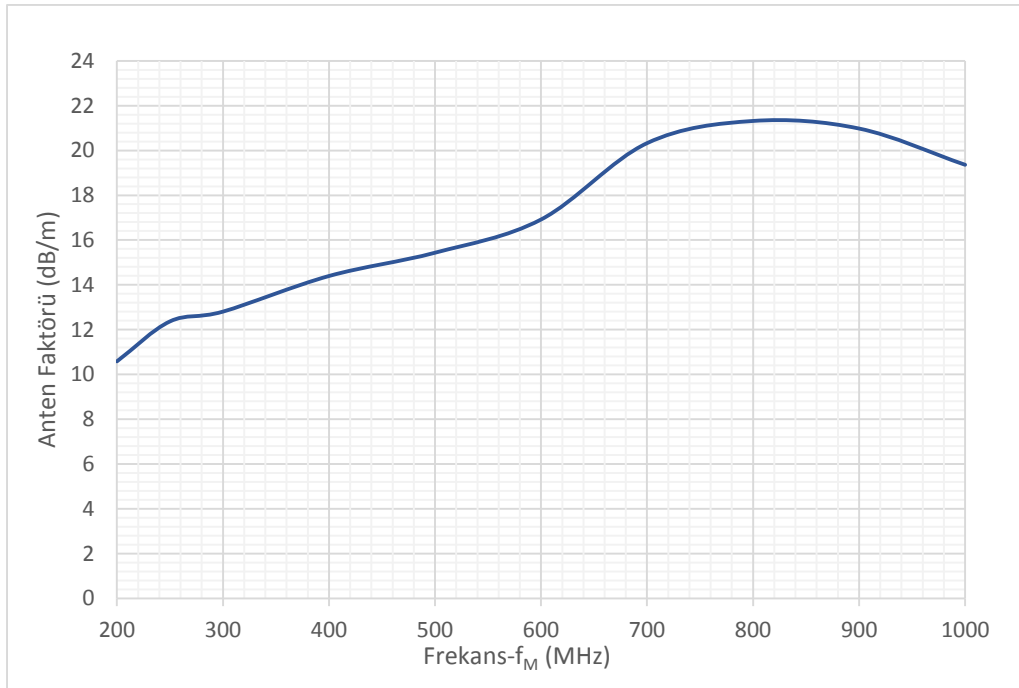
No	Marka	Model	Özellikler	Not
1	R&S	HL223	Log-Periyodik Anten Çalışma Aralığı: 200 MHz – 1,3 GHz, Empedans : 50 Ω	Kalibrasyonu yapılacak anten
2	R&S	HL223	Log-Periyodik Anten Çalışma Aralığı: 200 MHz – 1,3 GHz, Empedans : 50 Ω	TUBİTAK UME'den kalibrasyon sertifikası bulunmaktadır.
3	R&S	HL562 E	Ultralog ultra geniş bandlı anten (bikonilog hibrit özellikte) Çalışma Aralığı: 30 MHz - 6 GHz, Empedans : 50 Ω	DKD'den kalibrasyon sertifikası bulunmaktadır.

3 Anten alıcı-verici şekilde ikişerli gruplandırılarak alınan 3 saha zayıflaması ölçümü 1 çevrim oluşturmaktadır. Bu çalışmada log-periyodik antenin kalibrasyonu için 5 çevrim ölçüm alınmıştır. Çalışmalar sırasında alınan bir çevrimin sonuçları örnek olarak Çizelge 4.7'de verilmiştir. Burada parantez içerisindeki (1), (2) ve (3) rakamları, Şekil 2.12'de verilen sırasıyla A1, A2, A3 ölçümlerini belirtmektedir. AF1, AF2, AF3 sırasıyla 1, 2, 3 no'lu antenlerin anten faktörlerini simgelemektedir.

5 çevrim ölçüm alındıktan sonra kalibrasyonu hedeflenen R&S log-periyodik antenin anten faktörü ölçüm sonuçları Çizelge 4.6'da ve Şekil 4.6'da görülmektedir. Şekil 4.6'daki grafik incelendiğinde, log-periyodik antenin anten faktörlerinin genel olarak frekans arttıkça arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.6 : Log-periyodik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM).

f_M (MHz)	AF (dB/m)	f_M (MHz)	AF (dB/m)
200	10,59	600	16,92
250	12,37	700	20,33
300	12,81	800	21,32
400	14,40	900	20,98
500	15,43	1000	19,36



Şekil 4.6 : Log-periyodik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM).

Çizelge 4.7 : Log-periyodik anten kalibrasyonu için alınan 1 çevrim ölçüm sonuçları (3 Anten ile SSM).

f_M (MHz)	$V_{\text{direct}}^{(1)}$ (dB μ V)	$V_{\text{site}}^{(1)}$ (dB μ V)	A (1) (dB)	$V_{\text{direct}}^{(2)}$ (dB)	$V_{\text{site}}^{(2)}$ (dB μ V)	A (2) (dB)	$V_{\text{direct}}^{(3)}$ (dB μ V)	$V_{\text{site}}^{(3)}$ (dB μ V)	A (3) (dB)	$E_{D\text{max}}$ dB(μ V/m)	AF ₁ (dB/m)	AF ₂ (dB/m)	AF ₃ (dB/m)
200	79,38	57,73	21,65	79,42	60,39	19,03	79,45	60,54	18,91	2,63	10,62	10,50	7,88
250	85,24	62,61	22,63	85,01	64,40	20,61	83,37	63,43	19,94	2,68	12,42	11,75	9,73
300	81,59	59,14	22,45	81,63	60,79	20,84	81,43	60,54	20,89	2,71	12,81	12,86	11,25
400	82,52	58,85	23,67	82,37	58,15	24,22	82,41	57,58	24,83	2,71	14,43	15,04	15,59
500	73,76	49,43	24,33	73,71	50,16	23,55	74,58	49,99	24,59	2,57	15,43	16,47	15,69
600	72,64	48,09	24,55	72,48	49,04	23,44	71,80	49,13	22,67	2,63	16,93	16,16	15,05
700	78,95	50,74	28,21	78,77	51,28	27,49	76,21	50,89	25,32	2,67	20,27	18,10	17,38
800	83,05	54,25	28,80	82,84	54,81	28,03	81,53	54,65	26,88	2,69	21,34	20,19	19,42
900	78,51	50,60	27,91	78,36	51,34	27,02	77,79	51,22	26,57	2,71	20,96	20,51	19,62
1000	72,64	47,66	24,98	76,59	49,59	27,00	76,43	49,28	27,15	2,72	19,38	19,53	21,55

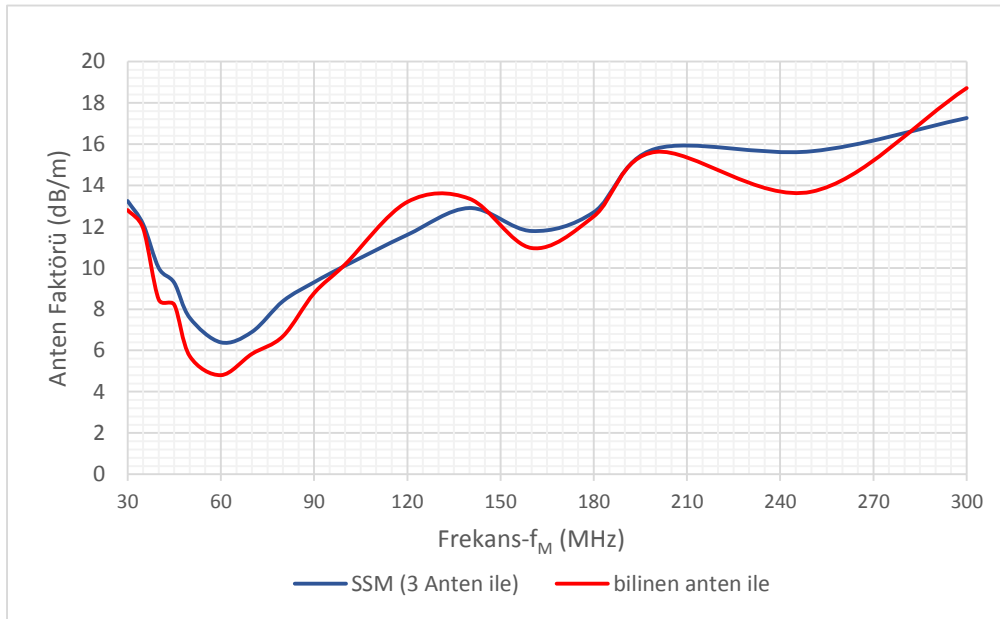
4.2 Bilinen Anten ile Standart Saha Metodu

4.2.1 Bikonik anten kalibrasyonu

Standartta yer alan (2.8) denklemini kullanarak, anten faktörü bilinen anten ile gerçekleştirdiğimiz ölçümlerin sonuçları Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7’de yer almaktadır. Burada anten faktörü bilinen anten Çizelge 4.1’deki 2 numaralı TUBİTAK UME tarafından kalibrasyon sertifikası bulunan Rohde & Schwarz HK116 bikonik antenidir.

Çizelge 4.8 : Bikonik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (Bilinen Anten ile SSM).

f_M (MHz)	AF (dB/m)	f_M (MHz)	AF (dB/m)
30	12,80	100	10,17
35	11,91	120	13,19
40	8,47	140	13,35
45	8,21	160	10,96
50	5,72	180	12,50
60	4,80	200	15,62
70	5,83	250	13,69
80	6,69	300	18,71
90	8,77		



Şekil 4.7 : SSM (3 Anten) - SSM (Bilinen Anten) – R&S HK116 Bikonik Anten Kalibrasyonu.

Şekil 4.7’deki grafiğe göre bikonik anten için standart saha metodunda bilinen anten ile yapılan kalibrasyonlar, 3 anten ile yapılan kalibrasyonlardan sonuçlar açısından farklılıklar göstermektedir. Bu durumun bilinen anten olarak kullanılan antenin son sertifikasından bu yana anten faktörlerindeki değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, bilinen anten ile yapılan SSM anten kalibrasyonu bikonik anten için yüksek doğrulukta sonuçlar vermemiştir.

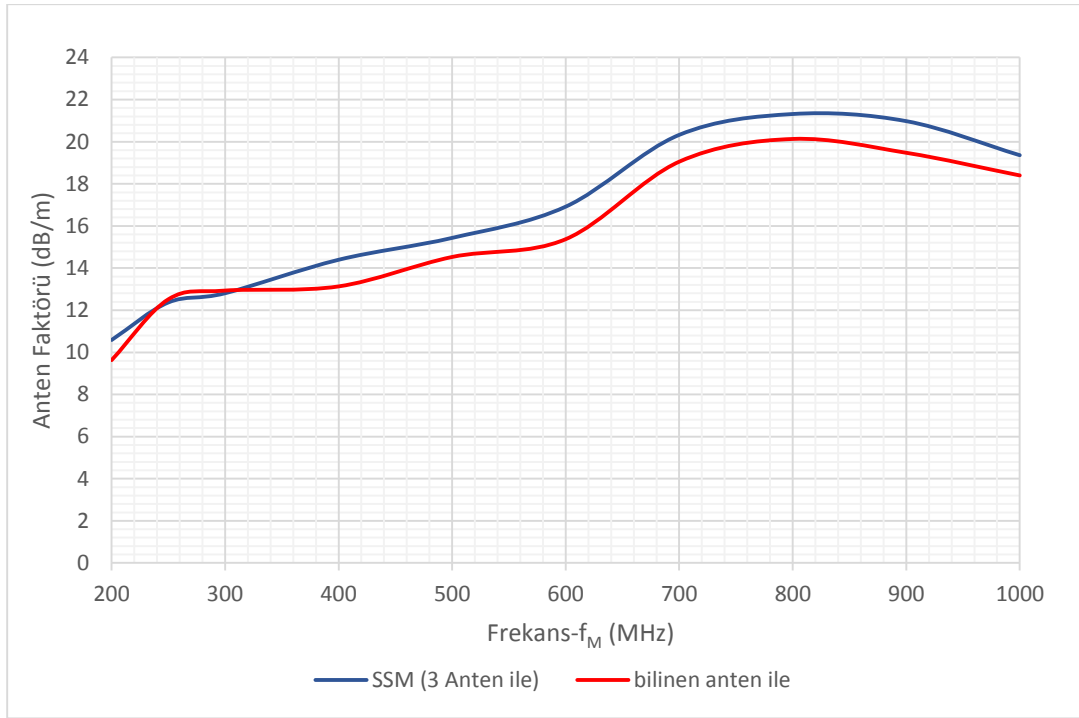
4.2.2 Log-periyodik anten kalibrasyonu

Log-periyodik anten kalibrasyonunu standartta yer alan **(2.8)** denklemini kullanarak, anten faktörü bilinen anten ile gerçekleştirdiğimizde elde edilen anten faktörlerine ilişkin sonuçlar Çizelge 4.9 ve Şekil 4.10’da sunulmuştur. Burada anten faktörü bilinen anten Çizelge 4.5’teki 2 numaralı TUBİTAK UME tarafından kalibrasyon sertifikası bulunan Rohde & Schwarz HL223 log-periyodik antenidir.

Çizelge 4.9 : Log-periyodik anten kalibrasyonu ölçüm sonuçları (Bilinen Anten ile SSM).

f_M (MHz)	AF (dB/m)	f_M (MHz)	AF (dB/m)
200	9,63	600	15,37
250	12,52	700	19,05
300	12,93	800	20,13
400	13,13	900	19,47
500	14,53	1000	18,40

Şekil 4.8’deki grafiğe göre log-periyodik anten için standart saha metodunda bilinen anten ile yapılan kalibrasyonlar, 3 anten ile yapılan kalibrasyonlara paralel bir eğilim göstermesine rağmen sonuçlar açısından farklılıklar meydana gelmiştir. Bu durumun bilinen anten olarak kullanılan antenin son sertifikasından bu yana anten faktörlerindeki değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, log-periyodik anten için bilinen anten ile yapılan SSM anten kalibrasyonu, 3 anten ile yapılan SSM anten kalibrasyonundan bir miktar ötelenmiş sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.8 : SSM (3 Anten) - SSM (Bilinen Anten) – R&S HL223 Log-Periyodik Anten Kalibrasyonu.

4.3 Özdeş Antenler ile Standart Saha Metodu

ANSI C63.5-2006 Standardı Standart Saha Metodu özdeş antenlerde tek bir saha zayıflaması ölçümü ile bu antenlerin anten faktörlerinin bulunabileceğini belirtmektedir. Bunun için denklem (2.7) kullanılmaktadır. Bu çalışmada özdeş olarak kabul edilebilecek R&S precision half wave dipol setlerin anten faktörleri bu metotla elde edilmiştir. Çizelge 4.10’da bu antenlerin marka, model ve özellikleri, Şekil 4.9’da bir setin görüntüsü bulunmaktadır [2].

Çizelge 4.10 : Özdeş Antenler ile SSM anten kalibrasyonu için kullanılan antenler.

No	Marka	Model	Özellikler	Not
1	R&S	HZ-12	Yarım Dalga Dipol Set Çalışma Aralığı: 30 MHz – 300 MHz Empedans : 50 Ω	Yüksek Kesinlik (Precision) Özellikte
2	R&S	HZ-13	Yarım Dalga Dipol Set Çalışma Aralığı: 300 MHz – 1000 MHz Empedans : 50 Ω	Yüksek Kesinlik (Precision) Özellikte



Şekil 4.9 : Rohde&Schwarz HZ-13 Dipol Anten Seti.

Diğer ölçümlerden farklı olarak tez çalışmasının ilk dönemlerinde yapılan bu ölçümlerde, kontrollü anten direğinin anten yüksekliğini 4 m'ye ayarlamasında yaşanan sorunlar sebebiyle anten yükseklik taraması 1 m-3,5 m arasında yapılabilmektedir. Daha sonraki süreçte sorun çözülmüş ve diğer metotlarda alıcı anten yükseklik taraması 1 m–4 m arasında sorunsuz şekilde yapılmıştır. Elde edilen anten faktörleri ve cihaz üreticisinin kılavuzunda belirttiği değerler⁵ çizelge 4.11'de görülmektedir. Çizelgedeki üretici değerleri, maksimum sinyalin alındığı yükseklik için üretici kılavuzundaki düzeltme değerlerinin nominal anten faktörü değerlerine eklenmesiyle elde edilen değerlerdir. Kılavuzda bildirilen yükseklik değerleri 0,2 m aralık ile verilmiş olup, maksimum sinyalin alındığı yükseklik değerleri ile bu değerler yakınsanmıştır. Bu sebeple oluşabilecek hatalar ihmal edilmiştir. İlgili antenlerin üretiminden uzun yıllar geçmesine rağmen, bu metotla elde edilen değerlerin üretici değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum aynı zamanda anten faktörü ölçmek için uygulanan bu metodun doğruluğuna da işaret etmektedir.

⁵ Üretici değerleri cihazların [59], [60]'daki kullanım kılavuzlarından alınmıştır.

Çizelge 4.11 : Özdeş Antenler ile SSM anten kalibrasyonu sonuçları ve üretici değerleri.

f_M (MHz)	Ölçülen AF (dB/m)	Nominal AF (dB/m)	Fark (dB)
30	8,75	8,62	0,13
35	10,64	9,28	1,36
40	11,77	9,75	2,02
45	12,20	10,39	1,81
50	12,92	11,01	1,91
60	14,16	13,62	0,54
70	15,51	15,46	0,05
80	16,38	16,14	0,24
90	16,64	16,57	0,07
100	17,45	17,88	-0,43
120	19,83	19,78	0,05
140	21,80	20,73	1,07
160	23,15	22,30	0,85
180	23,17	22,95	0,22
200	24,37	24,28	0,09
250	26,37	26,06	0,31
300	27,27	27,35	-0,08
400	30,03	29,95	0,08
500	32,51	31,94	0,57
600	34,24	33,72	0,52
700	36,37	35,01	1,36
800	36,71	36,12	0,59
900	38,07	37,15	0,92
1000	39,19	38,06	1,13

5. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

Bu bölümde gerçekleştirmiş olduğumuz EMC anteni kalibrasyonlarından 3 antenin kullanıldığı ANSI C63.5-2006 Standart Site Method (3 Anten ile Standart Saha Metodu) için ölçüm belirsizliği hesabı ve belirsizlik bütçesinin oluşturulması ele alınmıştır. Ölçüm belirsizliği temel ölçüm belirsizliği dökümanları olan GUM [49] ve EA 4-02 [51] dökümanlarına uygun olarak hesaplanmıştır. Belirsizlik bileşenleri ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Belirsizlik bileşenlerinin belirlenmesinde, sistemin kendine özgü durumları göz önüne alınmış, olası tüm etkiler incelendikten sonra bazıları ihmal edilmiş, bunların dışındakiler hesaplamaya dahil edilmiştir. Ayrıca, ANSI C63.5-2006 Annex I kısmındaki tavsiye ve örneklerden faydalanılmıştır.

Bu çalışma açık sahada yapıldığından birçok belirsizlik faktörü ortaya çıkmaktadır. Ölçüm sistemi çevre şartları açısından 2 kontrolsüz ortam içermektedir. Spektrum analizör ve işaret üreticinin bulunduğu kontrol odası klima veya iklimlendirici bulundurmadiğinden şartlandırılmış bir ortam değildir. ASTA ise tamamen dış çevre şartlarında yer almaktadır. Ölçüm boyunca sıcaklık ve nem şartları izlenmiş, kontrol odasında analog sıcaklık ve nem ölçer; ASTA’da ise dijital sıcaklık ve nem ölçer-kaydedici (datalogger) ile kayıtlar tutulmuştur. Kalibrasyon işleminin yapıldığı süreçlerde çevre şartlarının benzer olmasına dikkat edilmiş, farklı çevre şartlarından kaynaklanabilecek hatalar en aza indirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, antenlerin konumlandırılması (yükseklik-yatay mesafe) hassas lazer metre ile yapılmış, antenlerin açisal konumlandırılması hassas açı ölçer ile kontrol edilmiştir. Deneysel gözlemlerle konumlandırma hatalarından kaynaklı etkilerin hassas ölçüm cihazları ile konumlandırma sayesinde ihmal edilebileceği görülmüş olup, ek olarak 5.2.5 Sistem, Yerleşim Hataları ve Ölçüm Sahası Etkilerinden Kaynaklı Belirsizlik kısmında uygulanan yöntemle aynı zamanda konumlandırma hataları da değerlendirme kapsamında kaldığından ölçüm belirsizliği bütçesine ilaveten bir ölçüm belirsizliği bileşeni eklenmemiştir.

Kalibrasyonların standardın önerdiği ölçüm geometrisinde gerçekleştirilmesi ile antenden antene karşılıklı kuplaj etkileri ve anten-zemin arası kuplaj etkileri en aza indirgenmiş ve bu sebeple etkisi ihmal edilmiştir [2].

Nem değerlerinin ölçüm cihazlarına herhangi bir etkisi bildirilmediğinden etkisi ihmal edilmiştir. Kalibrasyon ölçümleri benzer iklim şartlarında alınmış, bu şartlar açık sahada % (55 ± 30) bağıl nem, (15 ± 8) °C sıcaklık şartlarında yapılmış; çok sıcak, çok soğuk, yüksek rüzgar hızı olan ve yağışlı hava şartları gibi uç nokta iklim şartlarından uzak durulmaya çalışılmıştır. Bağıl nem ve sıcaklık için verilen değer değişim aralıklarından kaynaklı belirsizlik ihmal edilmiştir.

5.1 Model Fonksiyonun Oluşturulması

“Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)” temel belirsizlik dökümanında birleştirilmiş belirsizlik birleştirilmiş varyansın pozitif karekökü olarak ifade edilmektedir (s. 19). Denklem (1.19) ve (1.20)’yi hatırlamak gerekirse [49]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (5.1)$$

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (5.2)$$

Burada $u_c^2(y)$ birleştirilmiş varyansı, $u_c(y)$ birleştirilmiş ölçüm belirsizliğini, $u^2(x_i)$ x_i bileşenine ait varyansı, $u(x_i)$ x_i bileşenine ait belirsizliği belirtmektedir. $\partial f / \partial x_i$ model fonksiyonun x_i bileşenine göre kısmi türevi olup, duyarlılık (hassasiyet) katsayısını ifade etmekte ve c_i ile gösterilmektedir [49].

Temel anten faktörü denklemindeki değişkenler ile model fonksiyon oluşturulabilir. Temel fonksiyon olarak AF_1 denklemi kullanılırsa [2]:

$$AF_1 = 10 * \log f_M - 24,46 + \frac{1}{2} [E_D^{max} + A_1 + A_2 - A_3] \quad (5.3)$$

Anten faktörü ölçümündeki hatayı ifade etmek için anten faktörü denklemindeki tüm değişkenler dikkate alındığında, [52]’deki çalışmaya benzer şekilde bu değişkenlerin kısmi türevleri alınarak aşağıdaki gibi bir yaklaşım ortaya konabilir:

$$\begin{aligned}\delta AF &= \sum_{i=1}^N \frac{\partial AF}{\partial x_i} \delta x_i \\ &= \frac{\partial AF}{\partial f_M} \delta f_M + \frac{\partial AF}{\partial E_{Dmax}} \delta E_{Dmax} + \frac{\partial AF}{\partial A_1} \delta A_1 + \frac{\partial AF}{\partial A_2} \delta A_2 + \frac{\partial AF}{\partial A_3} \delta A_3\end{aligned}\quad (5.4)$$

δ operatörü ilgili parametredeki hatayı temsil etmektedir (Örneğin; δAF_1 : Anten faktörü 1'in ölçümündeki hata).

Elde edilen kısmi türevler aynı zamanda temel fonksiyondaki parametrelerin duyarlılık katsayılarıdır. Sonuçta hata cinsinden bir yaklaşım ile AF_1 için temel hata fonksiyonu aşağıdaki gibi oluşturulabilir:

$$\begin{aligned}AF_1 + \delta AF_1 &= 10 * \log(f_M + \delta f_M) - 24,46 + \frac{1}{2} [(E_D^{max} + \delta E_D^{max}) + \\ &\quad (A_1 + \delta A_1) + (A_2 + \delta A_2) - (A_3 + \delta A_3)]\end{aligned}\quad (5.5)$$

Bu çalışmada E_{Dmax} için standarttaki değerler kullanılmış, sabit değer statüsünde olduğundan belirsizlik etkisi ihmal edilmiştir. E_{Dmax} ve sabit değer çıkarılarak temel model fonksiyon aşağıdaki gibi oluşturulabilir. Parametre hatalarının yönleri belli olmadığından olası maksimum hatanın hesaplanması için, parametre hatalarının katsayılarının mutlak değeri alınmalıdır.

$$\delta AF_1 = \left| \frac{\partial AF_1}{\partial f_M} \right| \log(\delta f_M) + \left| \frac{\partial AF_1}{\partial A_1} \right| \delta A_1 + \left| \frac{\partial AF_1}{\partial A_2} \right| \delta A_2 + \left| \frac{\partial AF_1}{\partial A_3} \right| \delta A_3 \quad (5.6)$$

Kısmi türevler alındığında model fonksiyon için hassasiyet katsayıları elde edilir.

$$\frac{\partial AF}{\partial f_M} = \frac{10}{f_M \cdot \ln 10} \quad (5.7)$$

$A_{1,2,3}$ için $AF_{1,2,3}$ denklemlerine göre hassasiyet katsayıları mutlak olarak eşittir.

$$\left| \frac{\partial AF}{\partial A_1} \right| = \left| \frac{\partial AF}{\partial A_2} \right| = \left| \frac{\partial AF}{\partial A_3} \right| = 0,5 \quad (5.8)$$

Sonuç olarak temel model fonksiyon aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\delta AF_1 = \frac{10}{f_M \cdot \ln 10} \log(\delta f_M) + 0,5 \cdot (\delta A_1 + \delta A_2 + \delta A_3) \quad (5.9)$$

Bu bilgilerin ışığında temel belirsizlik denklemi ise şu şekilde olmaktadır:

$$u(AF_1) = \sqrt{\left(\frac{10}{f_M \cdot \ln 10}\right)^2 \cdot u_{f_M}^2 + 0,5^2 \cdot u(A_1)^2 + 0,5^2 \cdot u(A_2)^2 + (0,5)^2 \cdot u(A_3)^2} \quad (5.10)$$

İlerleyen kısımlarda görüleceği üzere frekans kaynaklı belirsizlik saha zayıflamasından kaynaklı belirsizlik yanında ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Burada frekans kaynaklı belirsizlik AF hesabında kullanılan nominal frekansın gerçek değer ile farkından kaynaklanan belirsizliktir. Saha zayıflaması ölçümlerindeki belirsizlik bu belirsizlik çalışmasının temelini oluşturmaktadır.

Saha zayıflaması için temel denklem daha önce de belirtildiği gibi [2]:

$$A = V_{direct} - V_{site} \quad (5.11)$$

Bu denklem model fonksiyon için ölçümlerde olabilecek hatalar cinsinden ifade edilirse saha zayıflaması için temel hata fonksiyonu aşağıdaki gibi bulunur:

$$A + \delta A = (V_{direct} + \delta V_{direct}) - (V_{site} + \delta V_{site}) \quad (5.12)$$

Burada da δV_{direct} ve δV_{site} 'nin yönleri belli olmadığından δA 'nın olası en büyük değeri aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır:

$$\delta A = \delta V_{direct} + \delta V_{site} \quad (5.13)$$

Saha zayıflaması için model fonksiyon oluştururken ölçüme etki yapan parametrelere dayalı olarak hatalar cinsinden yukarıdaki fonksiyon genişletilirse (5.14)'deki fonksiyon elde edilmektedir. Bu denklem ve bu denklemi izleyen alt denklemlerdeki parametreler, ilgili denklemlerde etkileri dB cinsine dönüştürülmüş olarak yer almakta olduğundan hassasiyet katsayıları 1'dir. İlgili dönüştürme işlemleri belirsizlik bileşenlerinin incelenmesi kısmında yer almaktadır.

$$\delta A = \delta SP_A + \delta f_d + \delta SG_{r_A} + \delta V_{SWR1} + \delta V_{SWR2} + \delta_{site} + \delta_{att} + \delta_n + \delta_\sigma \quad (5.14)$$

δA : Saha zayıflaması ölçümündeki hata (dB).

δSP_A : Spektrum analizör genlik ölçümlerinden kaynaklı hata (dB).

δf_d : Ayırık frekans metodu doğruluğundan kaynaklı hata (dB).

δSG_{r_A} : İşaret üretici genlik kararlılığından (çözünürlüğünden) kaynaklı hata (dB).

δ_{VSWR1} : Zayıflatıcı 1 duran dalga oranı kaynaklı hata (dB).

δ_{VSWR2} : Zayıflatıcı 2 duran dalga oranı kaynaklı hata (dB).

δ_{site} : Saha ve ölçüm sistemi kaynaklı hata (dB).

δ_{att} : Zayıflatıcı kararlılıkları/hassasiyetleri kaynaklı hata (dB).

δ_n : Gürültü kaynaklı hata (dB).

δ_σ : Tekrarlanabilirlik–standart sapma kaynaklı hata (dB).

Yukarıdaki model fonksiyonda yer alan spektrum analizörün genlik ölçüm hatası alt model fonksiyon olarak şu şekilde incelenebilir:

$$\delta SP_A = \delta V_{direct(cal_A)} + \delta V_{site(cal_A)} + \delta_{cal\sigma_A} + \delta_{d_A} + \delta_{\Delta t_A} \quad (5.15)$$

$\delta V_{direct(cal_A)}$: Doğrudan ölçüm sertifika belirsizliğinden kaynaklı hata (dB).

$\delta V_{site(cal_A)}$: Saha ölçümü sertifika belirsizliğinden kaynaklı hata (dB).

$\delta_{cal\sigma_A}$: Sertifika sapmalarından kaynaklı hata (dB).

δ_{d_A} : Kayma (drift) (dB).

$\delta_{\Delta t_A}$: Sıcaklık değişiminden kaynaklı hata (dB).

Ayrık frekans metodunun frekans doğruluğundan kaynaklı hata da alt model fonksiyon olarak şu şekilde incelenebilir:

$$\delta f_d = \delta SP_{ag_f} + \delta SP_{cal_f} + \delta SP_{cal\sigma_f} + \delta SP_{\Delta t_f} + \delta SG_{ag_f} + \delta SG_{cal_f} + \delta SG_{cal\sigma_f} + \delta SG_{\Delta t_f} \quad (5.16)$$

δSP_{ag_f} : Spektrum analizör frekans-yaşlanma (aging) kaynaklı hata (dB).

δSP_{cal_f} : Spektrum analizör frekans-sertifika belirsizliğinden kaynaklı hata (dB).

$\delta SP_{cal\sigma_f}$: Spektrum analizör frekans-sertifika sapmalarından kaynaklı hata (dB).

$\delta SP_{\Delta t_f}$: Spektrum analizör frekans-sıcaklık değişiminden kaynaklı hata (dB).

δSG_{ag_f} : İşaret üretici frekans-yaşlanma (aging) kaynaklı hata (dB).

δSG_{cal_f} : İşaret üretici frekans-sertifika belirsizliğinden kaynaklı hata (dB).

$\delta SG_{cal\sigma_f}$: İşaret üretici frekans-sertifika sapmalarından kaynaklı hata (dB).

$\delta SG_{\Delta t_f}$: İşaret üretici frekans-sıcaklık değişiminden kaynaklı hata (dB).

Kullanılan zayıflatıcılardan kaynaklı hata ise şu şekilde modellenebilir:

$$\delta_{att} = \delta_{att1\Delta t} + \delta_{att2\Delta t} + \delta_{att2\Delta P} \quad (5.17)$$

$\delta_{att1\Delta t}$: Zayıflatıcı 1 sıcaklık kararlılığından kaynaklı hata (dB).

$\delta_{att2\Delta t}$: Zayıflatıcı 2 sıcaklık kararlılığından kaynaklı hata (dB).

$\delta_{att2\Delta P}$: Zayıflatıcı 2 güç hassasiyetinden kaynaklı hata (dB).

5.2 Belirsizlik Bileşenlerinin İncelenmesi

Temel model fonksiyon incelendiğinde ölçüm sonucunu etkileyen 2 parametre (AF hesabında kullanılan nominal frekansın gerçek değer ile farkından kaynaklanan belirsizlik ve saha zayıflaması) bulunmakta olup, izleyen kısımda öncelikle belirsizliğin temel unsuru olan saha zayıflaması ölçümlerine ait belirsizlik bileşenleri incelenecek ve son kısımda kalibrasyonları gerçekleştirilen antenlere ait toplam ölçüm belirsizliği hesabı yapılacaktır.

5.2.1 Spektrum analizörün genlik ölçüm hatasından kaynaklı belirsizlik (u_{SPA})

Ölçüm alıcısı olan spektrum analizörün genlik ölçümlerindeki hatalar belirsizlik oluşturmaktadır. Takip eden maddelerde bu belirsizliği oluşturan alt bileşenler incelenmiştir.

5.2.1.1 Kalibrasyon sertifikası genlik ölçüm belirsizliği (u_{cal_A})

Alıcı antenden gelen sinyalleri ölçmek için kullanılan cihaz olan HP 70004 Spektrum Analizör'ün sertifika genlik belirsizliği kalibrasyon sertifikasından elde edilmiştir. Bu değer $\pm 0,2$ dB düzeyindedir. Bu değer sertifika değeri olduğundan gauss dağılımına sahiptir. Ayrıca sertifika $k=2$ güvenilirlik seviyesinde (% 95) olduğundan dolayı 0,5 katsayısı ile çarpılarak belirsizliğe katkıda bulunacaktır. Cihazın kalibrasyon sertifikası incelendiğinde genlik açısından tüm noktalarda homojen bir belirsizlik verildiği görülmektedir. Spektrum analizör sertifika belirsizliği cihazın çözünürlüğünü, kararlılığını, doğrusallık hatasını içerdiği için bu bileşenler ilave olarak bütçeye eklenmemiştir. Bütçede 2 kez yer almasının sebebi ise doğrudan ölçüm ve saha ölçümleri (V_{direct} , V_{site}) olmak üzere 2 kez ölçüm alınmasıdır. 2 kez ölçüm

alınması alınan ölçümlerdeki belirsizliğin 2 kez etkin duruma geçmesine sebebiyet vermektedir. Cihaza ait kalibrasyon sertifikası EK-B’de yer almaktadır.

5.2.1.2 Kalibrasyon sertifikası sapmalarından kaynaklı belirsizlik ($u_{cal\sigma_A}$)

Spektrum analizörün ölçme hatalarını (sapmalarını) kalibrasyon sertifikasından elde ederek ölçümlerden düşmek gerçek ölçüm sonuçlarını elde etmek için gereklidir. Doğrusallığı iyi olan bir cihazda kablo ve saha ölçümlerinde 2 kez sinyal ölçüldüğü ve bu 2 ölçümün farkı önem arz ettiği için sapmaları her ölçümden düşmek gerekmeyebilir. Burada doğrusallıktan kasıt cihazın genlik ölçme aralığında her ölçümde aynı büyüklükte hata yapıp yapmadığıdır. Bu çalışmada sertifika sapmaları her ölçümden düşülmemiş, ancak fark ölçümlerinde etkisi olabilecek cihazın ölçüm aralığındaki hata değişimleri belirsizliğe eklenmiştir. Cihazın kalibrasyon sertifikası incelendiğinde gerçek değer ile cihazın değeri arasındaki sapmaların değişimi 30 MHz - 1 GHz frekans bandında en fazla 0,12 dB düzeyinde olmuştur. Bu maksimum değer alınarak, dikdörtgensel dağılım ile bütçeye eklenmiştir. Bundan dolayı dağılım fonksiyonundan gelen katsayı $1/\sqrt{3}$ olmaktadır.

5.2.1.3 Yıllık kayma (drift) değeri (u_{d_A})

Ölçüm cihazının son kalibrasyonundan itibaren meydana gelebilecek değişimler kayma (drift) olarak adlandırılır. Kayma değeri son kalibrasyondan itibaren sertifika değerinde oluşabilecek değişimleri tahmin ederek belirsizliğe katkıda bulunur. Böylece, daha güvenli bir belirsizlik sağlanmış olur. Kayma değeri cihaz spesifikasyonlarındaki accuracy (doğruluk) ve aging (yaşlanma) değerleri kullanılarak karakterize edilebileceği gibi, cihazın daha önceki ardışık kalibrasyon periyotlarındaki sertifikaları incelenerek ve bir önceki kalibrasyon değerinden değişimleri mutlak değer olarak alınarak ortalama yıllık değer olarak hesaplanabilir. Kullanılan spektrum analizörün yıllık kayma değeri tüm frekans ve genlik düzeylerinde maksimum 0,10 dB olarak hesaplanmıştır. Kayma değeri mutlak bir değer olup, dağılımı dikdörtgensel dağılımdır. Bundan dolayı dağılım fonksiyonundan gelen katsayı $1/\sqrt{3}$ olacaktır.

5.2.1.4 Sıcaklık değişiminden kaynaklı belirsizlik ($u_{\Delta t_A}$)

Sıcaklık değişiminin spektrum analizör genlik ölçümlerinde etkisi cihaz üreticisi tarafından 0,05 dB/°C olarak verilmektedir [52]. Kontrol odasındaki ölçümler esnasında sıcaklık maksimum ± 7 °C değişmiştir. Cihazın sertifikası incelendiğinde,

kalibrasyon belirsizliğinin ± 2 °C’de elde edildiği görülmektedir. Bu sebeple geriye kalan ± 5 °C’lik etki göz önüne alındığında sıcaklık değişim belirsizliği aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$u_{\Delta t_A} = a_t \cdot \Delta t = 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ dB} \quad (5.18)$$

$u_{\Delta t_A}$: Spektrum analizör sıcaklık değişiminden kaynaklı belirsizlik.

a_t : Birim sıcaklıktaki değişim (dB/°C).

Δt : Sıcaklık değişimi (°C).

Kontrol odası sıcaklık değişiminin 7 °C’den fazla olduğu durumlarda yukarıdaki değer ve belirsizlik bütçesi yeni duruma göre güncellenmelidir.

5.2.2 Ayırık Frekans Metodu frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik (u_{f_d})

Çalışmada kullanılan ayırık frekans metodunun doğruluğundan kaynaklı bir belirsizlik mevcuttur. Ölçüm sisteminde kaynak cihaz olan işaret üreticinin frekans doğruluğu, spektrum analizördeki ölçümlerde frekans olarak doğrudan etkili olmaktadır. Başka bir ifade ile işaret üreticinin frekansının doğruluğu ile spektrum analizörün frekansının doğruluğu arasında spektrum analizörden okunan frekansın doğruluğu açısından güçlü bir korelasyon bulunmaktadır.

Ölçüm belirsizliği temel dökümanı olarak kullanılan GUM dökümanına göre giriş büyüklükleri arasında korelasyon bulunmaktaysa birleştirilmiş belirsizlik için (1.21) denkleminde verilen formül geçerlidir [49].

x_i ile x_j belirsizlik bileşenleri, $u(x_i)$ ve $u(x_j)$ bu bileşenlere ait belirsizlikler olmak üzere bu bileşenler arasındaki korelasyonun derecesi korelasyon katsayısı ile ifade edilir [49]:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (5.19)$$

$r(x_i, x_j)$: Korelasyon katsayısı.

$u(x_i, x_j)$: x_i ve x_j bileşenlerine ait belirsizliğin kovaryansı.

Burada $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$ olup, korelasyon katsayısı $-1 \leq r(x_j, x_i) \leq +1$ şeklinde değer aralığına sahiptir. (1.21) denkleminde kovaryans terimli kısımlar korelasyon katsayısı

şeklinde ifade edilerek; c_i ve c_j , sırasıyla x_i ve x_j bileşenlerine ait duyarlılık katsayıları olmak üzere korelasyonlu birleşik ölçüm belirsizliği aşağıdaki gibi ifade edilir [49]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (5.20)$$

Özel durum olarak tüm giriş tahminleri $r(x_i, x_j) = +1$ ile korelasyonlu ise yukarıdaki denklem şu şekilde olmaktadır [49]:

$$u_c^2(y) = \left[\sum_{i=1}^N c_i u(x_i) \right]^2 = \left[\sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2 \quad (5.21)$$

Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmada kaynak cihaz olan işaret üreticinin frekans doğruluğundan kaynaklı hata doğrudan spektrum analizörden okunan frekansın doğruluğunu etkilediğinden, spektrum analizör frekans doğruluğu ile işaret üretici frekans doğruluğu arasında spektrum analizörden okunan frekansın doğruluğu açısından güçlü bir korelasyon bulunmaktadır. Bu durumdan dolayı yukarıdaki denklemlerden faydalanılarak ve korelasyon katsayısı +1 alınarak ayırık frekans metodu frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$(u_{f_d})^2 = (u_{acc_f}^{SP} + u_{acc_f}^{SG})^2 \quad (5.22)$$

$$u_{f_d} = u_{acc_f}^{SP} + u_{acc_f}^{SG} \quad (5.23)$$

$u_{acc_f}^{SP}$: Spektrum analizör frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik (dB).

$u_{acc_f}^{SG}$: İşaret üretici frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik (dB).

u_{f_d} : Ayırık frekans metodu doğruluğundan kaynaklı belirsizlik (dB).

5.2.2.1 Spektrum analizör frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik($u_{acc_f}^{SP}$)

Bu çalışma için spektrum analizör frekans doğruluğundan kasıt spektrum analizörün merkez frekansı doğruluğudur. Ölçüm alıcısı olarak kullanılan spektrum analizörün ilgili frekans noktaları için frekans doğruluğunun dB olarak belirsizlik katkısı cihaz spesifikasyonlarında verilen frekans doğruluğu ile ilgili frekans noktasında anten faktörü/frekans eğrisinin eğiminin çarpılması ile elde edilir. Bu belirsizlik

çalışmasında anten faktörü/frekans eğrisinin maksimum eğimi alınmıştır. Maksimum eğim bikonik anten için 30 MHz–60 MHz aralığında 0,228 dB/MHz; log-periyodik anten için 600-700 MHz aralığında 0,034 dB/MHz olarak hesaplanmıştır [2].

HP 70004 Spektrum Analizör frekans doğruluğu hakkında üretici kılavuzunda dahili frekans referansının hatasından bahsedilmektedir. Dahili frekans referansının hatası frekans referansı ayarlama hatası, yaşlanma ve sıcaklık değişimi kaynaklı etkinin toplamı şeklinde verilmektedir. Ayrıca yine üretici kılavuzunda yaşlanma (aging) maksimum 1.10^{-7} katsayısı ile, $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ çalışma aralığında sıcaklık değişimi kaynaklı etki maksimum 7.10^{-9} katsayıları ile verilmektedir [53].

$$e_f = e_{adj} + e_{aging} + e_{\Delta t} \quad (5.24)$$

e_f : Dahili frekans referansının hatası.

e_{adj} : Frekans referansı ayarlama hatası.

e_{aging} : Frekans referansı yaşlanma (aging) hatası.

$e_{\Delta t}$: Frekans referansının sıcaklık değişimi kaynaklı hatası.

Dahili frekans referansının ayarlama hatası spektrum analizörün sertifika sapmaları ve sertifika belirsizliğinden faydalanılarak hesaplanmıştır. Böylece ayarlanan merkez frekansın gerçek değerden farkından oluşan hatası da belirsizliğe katılmış olmaktadır.

$$e_{adj} = \sqrt{e_{cal}^2 + e_{cal\sigma}^2} \quad (5.25)$$

e_{cal} : Spektrum analizör frekans sertifika ölçüm belirsizliği.

$e_{cal\sigma}$: Spektrum analizör frekans sertifika sapmalarından kaynaklı belirsizlik.

Spektrum analizörün sertifikası incelendiğinde frekans belirsizliğinin bağıl olarak $k=2$ 'de 1.10^{-7} olduğu görülmektedir. Sertifika sapmaları incelendiğinde gerçek değerden sapmalar bağıl olarak en yüksek $3,33.10^{-7}$ (30 MHz'de) olarak hesaplanmıştır. Burada sertifika belirsizliği Gauss dağılıma, sertifika sapması ise dikdörtgensel dağılıma sahip olup, ölçüm belirsizliğinde gerekli katsayılar dikkate alınmıştır. Böylece sertifika değerlerinden elde edilen belirsizlik (5.25) denklemine göre bağıl olarak $1,99.10^{-7}$ olmaktadır. Dahili frekans referansının hatası ise (5.24) denklemine göre bağıl katsayı olarak $2,57.10^{-7}$ olmaktadır.

Cihazın üretici kılavuzunda verilen fonksiyona benzer şekilde dahili frekans referansının hatası merkez frekans ile çarpılarak, ölçüm frekans aralığı (span) değerinin %1'i ve 10 Hz toplanarak frekans doğruluğu elde edilmektedir. Üretici kılavuzundaki fonksiyonda merkez frekansının cihazdan okunan gerçek değeri kastedilmektedir. Ancak, merkez frekans değerleri için gerçek değerden olan sapmalar belirsizliğe eklenmiş olduğundan bu aşamada nominal değerler alınmıştır. Frekans doğruluğunun dB cinsinden etkisini elde etmek için bu frekans doğruluğu ile anten faktörü/frekans eğrisinin maksimum eğimi (dB/MHz) çarpılacaktır. Söz konusu durumun formülize edilmiş hali şu şekildedir [2,53]:

$$u_{acc_f}^{SP} = (f_c \cdot e_f + 0,01 \cdot f_s + 10) \cdot \left(\frac{dAF}{df_M} \right) \quad (5.26)$$

f_c : Merkez frekans (MHz).

f_s : Ölçüm frekans aralığı (span değeri) (MHz).

$\frac{dAF}{df_M}$: Anten faktörü / frekans eğrisi eğimi (maksimum).

Ölçümler 10 kHz frekans aralığında (span değeri) alındığından f_s değeri 0,01 MHz'dir. (5.26) denklemi ile ifade edilen fonksiyon her bir frekans noktasını kapsayacak şekilde belirsizlik bütçesine eklenmiştir. Sertifika belirsizliğinde sıcaklık değişimi etkisi ± 2 °C ile ifade edildiğinden, sıcaklık değişimi kaynaklı etki alınırken ± 7 °C olan sıcaklık değişimi ± 5 °C olarak alınmıştır.

5.2.2.2 İşaret üretici frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik ($u_{acc_f}^{SG}$)

İşaret üreticinin frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizliği 4 alt bileşende incelenmiştir. Bunlar ayarlanan frekans değerinin kalibrasyon sertifikasına göre gerçek değerden sapması, kalibrasyon sertifikasına göre frekans ölçüm belirsizliği, yıl içinde olabilecek değer kaymaları (drift) ve sıcaklık değişiminin işaret üretici frekans kararlılığına etkisidir.

Cihazın kalibrasyon sertifikası incelendiğinde, 30 MHz-1 GHz frekans bandında belirsizliklerinin bağıl olarak $2 \cdot 10^{-6}$ olduğu görülmektedir. Bu durumda işaret üretici frekans sertifika ölçüm belirsizliğinin dB cinsinden katkısı anten faktörü eğrisi eğimi ile bu bağıl katsayının çarpımı şeklinde hesaplanarak, aşağıdaki şekilde formülize edilmiştir [2]:

$$u_{cal_f}^{SG} = (2 \cdot 10^{-6}) \cdot f_M \cdot \left(\frac{dAF}{df_M}\right) \quad (5.27)$$

$u_{cal_f}^{SG}$: İşaret üretici frekans-sertifika ölçüm belirsizliğinden kaynaklı belirsizlik (dB).

Yine cihazın kalibrasyon sertifikası göz önüne alınarak, 30 MHz–1 GHz frekans bandında gerçek değerden sapmaların bağıl olarak maksimum $1,66 \cdot 10^{-6}$ olduğu görülmektedir. Bu durumda işaret üretici frekans sertifika sapmalarından kaynaklı belirsizliğinin dB cinsinden katkısı anten faktörü eğrisi eğimi ile bu bağıl katsayının çarpımı şeklinde hesaplanarak, aşağıdaki şekilde formülize edilmiştir [2]:

$$u_{cal\sigma_f}^{SG} = (1,66 \cdot 10^{-6}) \cdot f_M \cdot \left(\frac{dAF}{df_M}\right) \quad (5.28)$$

$u_{cal\sigma_f}^{SG}$: İşaret üretici frekans-sertifika sapmalarından kaynaklı belirsizlik (dB).

İşaret üreticinin frekans kararlılığı üretici firma spesifikasyonlarında yıllık olarak $1 \cdot 10^{-6}$ katsayısı ile yaşlanma (aging) şeklinde verilmiştir. Belirsizlik bütçesinde de bu değer kullanılmıştır. Bu durumda işaret üretici frekans yıllık dalgalanma kaynaklı belirsizliğinin dB cinsinden katkısı anten faktörü eğrisi eğimi ile bu bağıl katsayı ve ilgili frekans değerinin çarpımı şeklinde hesaplanarak, aşağıdaki şekilde formülize edilmiştir [2,54]:

$$u_{ag_f}^{SG} = (1 \cdot 10^{-6}) \cdot f_M \cdot \left(\frac{dAF}{df_M}\right) \quad (5.29)$$

$u_{ag_f}^{SG}$: İşaret üretici frekans-yıllık dalgalanma (aging) kaynaklı belirsizlik (dB).

Sıcaklık değişiminin işaret üretici frekans kararlılığına etkisi cihaz üreticisi spesifikasyon ve datalarında 0-55 °C çalışma sıcaklık aralığında $2 \cdot 10^{-6}$ katsayısı ile verilmektedir. Kontrol odasındaki ölçümler esnasında sıcaklığın maksimum ± 7 °C değiştiği ve işaret üretici sertifika belirsizliğinin ± 2 °C sıcaklık değişimini içerdiği göz önüne alınmıştır. Böylece geriye kalan ± 5 °C'lik sıcaklık değişiminin çalışma sıcaklığı aralığına oranı ve ilgili frekans değerinin çarpılması ile sıcaklık değişiminin işaret üretici frekans kararlılığına etkisi aşağıdaki gibi formülize edilebilir [2,54]:

$$u_{\Delta t_f}^{SG} = \left(\frac{5}{55}\right) \cdot (2 \cdot 10^{-6}) \cdot f_M \cdot \left(\frac{dAF}{df_M}\right) \quad (5.30)$$

$u_{\Delta t_f}^{SG}$: İşaret üretici frekans-sıcaklık değişimi kaynaklı belirsizlik (dB).

Kontrol odası sıcaklık değişiminin 7 °C'den fazla olduğu durumlarda yukarıdaki denklem ve belirsizlik bütçesi yeni duruma göre güncellenmelidir.

Sonuç olarak elde edilen 4 alt belirsizlik bileşeninin toplam etkisi işaret üretici frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizliği verecektir. **(5.31)** denkleminde işaret üretici frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizliğin hesaplanması görülmektedir.

$$u_{acc_f}^{SG} = \sqrt{\left(u_{ag_f}^{SG}\right)^2 + \left(u_{cal_f}^{SG}\right)^2 + \left(u_{cal_{\sigma_f}}^{SG}\right)^2 + \left(u_{\Delta t_f}^{SG}\right)^2} \quad (5.31)$$

Son olarak aralarında korelasyon bulunan spektrum analizör ve işaret üretici frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlikler **(5.23)** denklemine göre toplanarak ayırık frekans metodu frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik bulunmaktadır.

5.2.3 İşaret üretici genlik kararlılığı ($u_{SG_{r_A}}$)

İşaret üretici, kalibrasyon sürecinde doğrudan ölçümlerde (V_{direct}) ve saha ölçümlerinde (V_{site}) sabit genlikte bir gerilime (120 dB μ V) ayarlandığından, ölçüm belirsizliği açısından önemli olan yönü cihazın kararlılığıdır. Cihaz ekranında sabit bir gerilim değerinin belirsizlik oluşturan kısmı ekranda görünmeyen basamakların etkisidir. Burada çözünürlük işaret üreticinin genlik kararlılığının belirleyici faktörü olacaktır. Kullanılan işaret üretici Rohde & Schwarz SMT-02'nin dB μ V cinsinden çözünürlüğü 0,1 dB μ V'dur. Çözünürlük bileşeni dikdörtgensel dağılıma sahiptir. Bundan dolayı belirsizlik katsayısı $1/\sqrt{3}$ olacaktır.

5.2.4 Zayıflatıcıların duran dalga oranları kaynaklı belirsizlik (u_{VSWR})

Kalibrasyon süreci boyunca iki adet 10 dB zayıflatıcı (attenuator) kullanılmıştır. Daha önceki kısımlarda da belirtildiği gibi bu iki zayıflatıcının biri verici anten girişinde, diğeri ise alıcı ölçüm cihazı olan spektrum analizör girişinde kullanılmıştır. İki adet zayıflatıcı bu şekilde verici antene giden kablo ve alıcı cihaza giden kablonun sonunda konumlandırılmış olup, aslında sistemin duran dalga oranını (VSWR) da bu iki zayıflatıcı belirlemektedir. Her iki kablo ucundaki belirsizlik katkısı ANSI C63.5-2006 Annex I rehber alınarak aşağıdaki şekilde formülize edilebilir [2]:

$$u_{VSWR} = 20 \cdot \log_{10}(1 \pm |\Gamma_S| * |\Gamma_L|) \quad (5.32)$$

$$|\Gamma_S| = (VSWR_{kaynak} - 1)/(VSWR_{kaynak} + 1) \quad (5.33)$$

$$|\Gamma_L| = (VSWR_{yük} - 1)/(VSWR_{yük} + 1) \quad (5.34)$$

u_{VSWR} : Duran dalga oranı kaynaklı belirsizlik (dB).

$|\Gamma_S|$: Verici kısmın yansımaya katsayısı.

$|\Gamma_L|$: Alıcı kısmın yansımaya katsayısı.

$VSWR_{kaynak}$: Kaynak duran dalga oranı.

$VSWR_{yük}$: Yük duran dalga oranı.

Sonuç olarak alıcı ve verici bölümün belirsizlik katkıları aşağıdaki gibi olmaktadır [2]:

$$u_{VSWR}^A = 20 \cdot \log_{10}(1 \pm |\Gamma_{Alıcı anten ya da yol}| \cdot |\Gamma_{Alıcı cihaz ya da yol}|) \quad (5.35)$$

$$u_{VSWR}^V = 20 \cdot \log_{10}(1 \pm |\Gamma_{kaynak ya da yol}| \cdot |\Gamma_{verici anten ya da yol}|) \quad (5.36)$$

u_{VSWR}^A : Alıcı bölüm belirsizlik katkısı (dB).

u_{VSWR}^V : Verici bölüm belirsizlik katkısı (dB).

$|\Gamma_{Alıcı anten ya da yol}|$: Alıcı anten ya da yolun yansımaya katsayısı.

$|\Gamma_{Alıcı cihaz ya da yol}|$: Alıcı cihaz ya da yolun yansımaya katsayısı.

$|\Gamma_{kaynak ya da yol}|$: Kaynak ya da yolun yansımaya katsayısı.

$|\Gamma_{verici anten ya da yol}|$: Verici anten ya da yolun yansımaya katsayısı.

Alıcı ve verici kabloların sonunda yerleştirilmiş olan zayıflatıcılar aynı marka ve model (HP 8491B) olup, üretici nominal VSWR değerleri 1.2'dir. Bu değerlere göre her bir zayıflatıcı için yansımaya katsayıları hesaplanmıştır [2, 55]:

$$\Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} = \frac{1,2 - 1}{1,2 + 1} = 0,09090909 \quad (5.37)$$

Yansımaya katsayısı kullanılarak yukarıdaki formüllere göre alıcı ve verici bölümün belirsizlik katkısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$u_{VSWR}^A = u_{VSWR}^V = 20 \cdot \log_{10}(1 \pm 0,09090909 \cdot 0,09090909) = 0,071489207 \text{ dB} \quad (5.38)$$

Bu belirsizlik katkısı U dağılıma sahiptir. Yani elde edilen belirsizlik katkısının $\sqrt{2}$ 'ye bölünmesi gereklidir. Duran dalga oranı kaynaklı belirsizliğin U dağılıma sahip olmasının sebebi daha önceki kısımlarda da belirtildiği gibi belirsizlik bileşeni değerlerinin sınır değerlere yakın olma olasılığının yüksek olmasıdır.

5.2.5 Sistem, yerleşim hataları ve ölçüm sahası etkilerinden kaynaklı belirsizlik (U_{site})

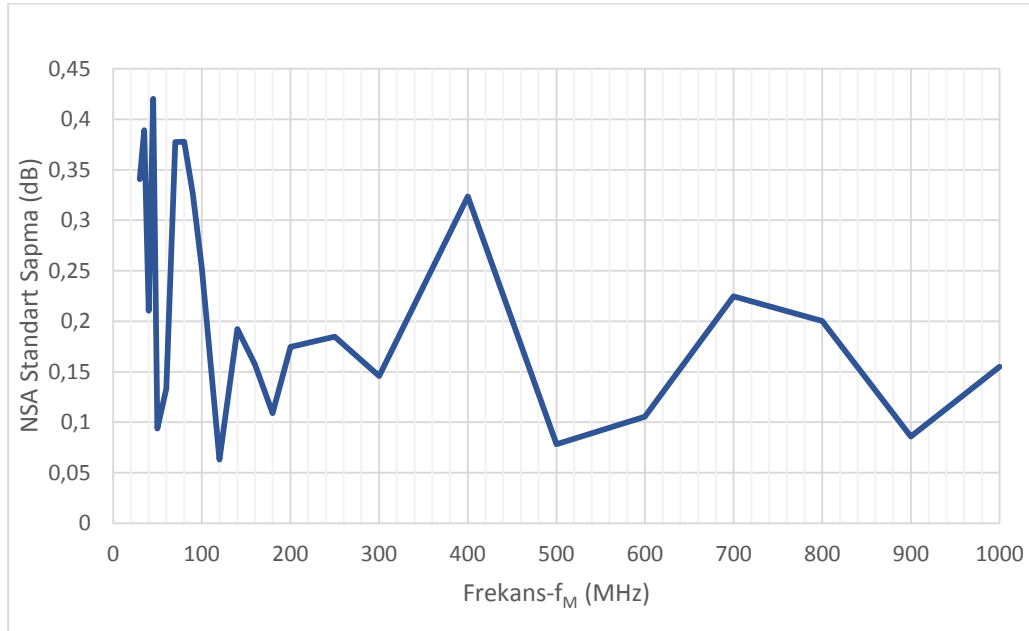
Bu çalışmada sistem, yerleşim hataları ve ölçüm sahası etkilerinden kaynaklı belirsizlik için ANSI C63.5-2006 Annex I'da belirtilen yol izlenmiş olup, A tipi belirsizlik hesabı ile yani ölçümlerle bir tespitte bulunulmaya çalışılmıştır. Bu hesabı yapmak için ANSI C63.4-2014'te hacimsel normalize edilmiş saha zayıflaması olarak belirtilen ölçümler yapılmış olmakla beraber, zira bu ölçümler saha doğrulaması bölümündeki ölçümlerdir. Ölçüm sahasının 5 farklı yerleşim düzeninde ve anten kalibrasyonu için kullanılan geometride ($d=10$ m, $h_1=2$ m, $h_2=1-4$ m) alınan 5 ölçümün standart sapması hesaplanmıştır. Her bir frekans için bu standart sapmanın maksimum olduğu değer bulunmuştur. Ölçüm sayısı 5 olduğu için ölçüm sonucu Student's t dağılıma sahiptir. Bu standart sapma değerlendirmesi saha kusurları, kablo uzanımları ve kabloların sahadaki yayılışlarından kaynaklı hatalardan; kalibrasyon sırasında mast, tripod gibi anten destek yapıları ile zemin düzlemi ve sahadan kaynaklı oluşabilecek yansıma etkilerinden; yatay mesafe, yükseklik ölçüm ve yükseklik start-stop hatalarından; anten hizalama doğruluğu ve yönelticilik hatalarından kaynaklı en kötü durum belirsizlik katkısını ortaya koymaktadır [2, 3].

Kalibrasyon ölçümleri esnasında, deneysel olarak, ölçüm sonuçlarına etkisi bakımından antenler arası mesafe hatalarının, rüzgar ve titreşimden olabilecek hataların, anten yükseklikleri ve açısal konumlandırma hatalarının etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Zira, bu kısımda uygulanan yöntemle bu hatalar da en kötü durum belirsizlik katkısına dahil olmaktadır. Ayrıca, konumlandırma işlemlerinde dijital hassas açı ölçer ve lazer mesafe ölçer kullanılması hata oranını düşürmektedir.

Saha doğrulaması kısmında verilen yerleşim şemasına uygun olarak antenler arası yatay mesafe anten merkezlerinden ölçülmek suretiyle 10 m, verici anten yüksekliği 2 m, alıcı anten yüksekliği 1 m-4 m ve yatay polarizasyonda NSA (Normalized Site Attenuation) ölçümleri Rohde Schwarz HL-562E bikonilog, Rohde&Schwarz HK116

Bikonik ve Rohde&Schwarz HL223 Log-Periyodik antenleri ve kalibrasyon sertifikalarındaki anten faktörü değerleri kullanılarak 5 farklı noktada alınmıştır. Bu 5 farklı noktada ölçüm düzeninin kurulması, kalibrasyonların yapıldığı merkez geometri dışında anten kalibrasyonu için kullanılan geometri değiştirilmeksizin ($d=10$ m, $h_1=2$ m, $h_2=1-4$ m), verici anten tripodunun döner masa çevresinde, Şekil 3.1 ve 3.2’teki gibi 4 ayrı noktada daha konumlandırılması ve alıcı anten mastının hareket edebilen tablasının yardımı ile sağlanmıştır.

Konumlar arası maksimum standart sapma tüm frekans bandında 0,42 dB olarak bulunmuş ve t dağılım ile bütçeye eklenmiştir. Şekil 5.1’deki grafikte tüm frekans aralığı (30 MHz-1 GHz) boyunca NSA standart sapmasının dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.1 : 5 konum için NSA standart sapması.

5.2.6 Gürültülü işaretin gürültüye oranı (Signal plus noise to noise ratio) kaynaklı hatalar (u_n)

Spektrum analizörde okunan sinyal değerinin içerisinde sinyal değerinin yanında ölçüm sisteminin gürültüsü vardır. ANSI C63.5-2006 Annex I kısmında da belirtildiği gibi bu durumdan kaynaklı hata oransal-logaritmik olarak dB cinsinden tanımlanırsa aşağıdaki gibi olmaktadır [2]:

$$E[dB] = \frac{S + N}{S} [dB] = SNR[dB] - 10 \cdot \log \left(10^{\frac{SNR[dB]}{10}} - 1 \right) \quad (5.39)$$

$$SNR[dB] = \frac{S + N}{N} [dB] \quad (5.40)$$

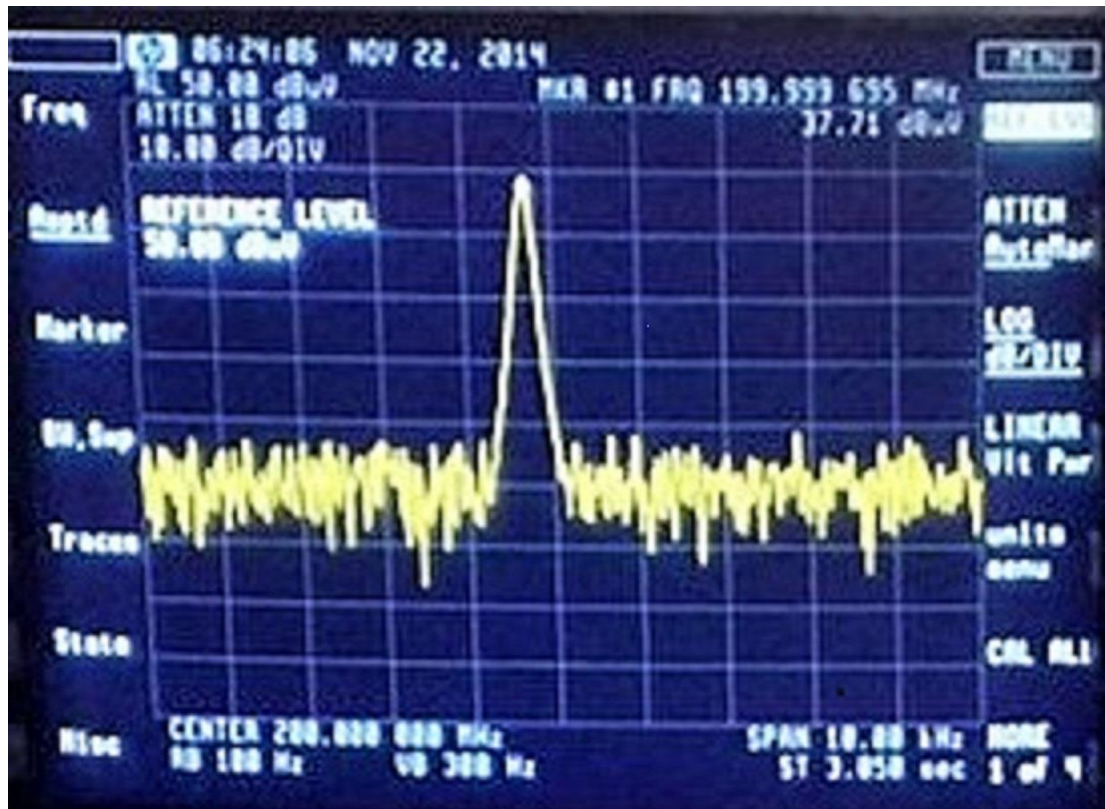
E : Hata (dB).

S : Sinyal seviyesi (dB).

N : Gürültü seviyesi (dB).

SNR : Signal-to-Noise-Ratio (dB).

Şekil 5.2’de spektrum analizörden bir ölçüm görüntüsü yer almaktadır. Bu örnek ölçümde tepe sinyal (peak search yapılarak) 37,71 dB μ V okunmuştur. Gürültü düzeyi görüntüden de anlaşılacağı üzere tepe değerin yaklaşık 40 dB altındadır. Yukarıdaki denklemler kullanılarak hata değeri hesaplandığında $4,343 \cdot 10^{-4}$ dB değerine ulaşılmaktadır. Bu değer diğer belirsizlik bileşenlerine göre son derece küçük bir değerdir. Kalibrasyon süresi boyunca alınan ölçümlerde tüm frekans aralığında tepe değeri ile gürültü değeri arasında 25 dB’den daha küçük bir fark oluşmamıştır. En kötü durum ekseninde düşünülerek yukarıdaki denklemlerde 25 dB SNR değeri kullanıldığında hata değeri 0,01376 dB olmaktadır. Oluşabilecek bu maksimum hata değeri dikedörtgensel dağılım ile hesaplanarak bütçeye dahil edilmiştir.



Şekil 5.2 : Spektrum analizörden bir ölçüm görüntüsü.

5.2.7 Zayıflatıcıların sıcaklık kararlılığı ve güç hassasiyetleri (u_{att})

Kalibrasyonda kullanılan zayıflatıcılar doğrudan ölçümlerde ve saha ölçümlerinde aynı şekilde kullanıldığından, doğruluk ve sertifika belirsizliklerinden ziyade, olası sıcaklık ve nem değişikliklerinden kaynaklı değer değişimleri ile doğrudan ölçüm ve saha ölçümleri arasındaki güç farkından kaynaklı etkiler ön plana çıkmaktadır. Bu noktada, zayıflatıcıların sıcaklık ve güç kararlılıkları (güç hassasiyetleri) önemlidir. Kullanılan zayıflatıcıların üretici spesifikasyonlarında sıcaklık kararlılıkları 0,0001 dB/dB/°C, güç hassasiyetleri 0,001 dB/dB/W olarak verilmiştir. Bu değerler dikdörtgensel dağılım ile her bir zayıflatıcı için belirsizlik bütçesine eklenerek zayıflatıcıların sıcaklık kararlılığı ve güç hassasiyetlerinden kaynaklı etkiler tahmin edilmeye çalışılmıştır [55].

Ölçümler süresince ASTA'da sıcaklık farkının maksimum olarak ± 8 °C, kontrol odasında ± 7 °C olması sebebiyle ve zayıflatıcı değerinin net 10 dB olduğu öngörüsüyle sıcaklık kararlılığı etkisi Denklem (5.41)'deki gibi hesaplanabilir.

$$u_{att_{\Delta t}} = \Delta t \cdot 0,0001 \cdot 10 \quad (5.41)$$

$u_{att_{\Delta t}}$: Zayıflatıcıların sıcaklık kararlılığından kaynaklanan belirsizlik.

Δt : Sıcaklık farkı.

Burada zayıflatıcıların referans düzeyde olmasından dolayı, nominal değerleri olan 10 dB değerinden sapmalarının denklem sonucunda meydana getirebileceği etki ihmal edilmiştir.

Zayıflatıcıların güç hassasiyetleri üretici tarafından [55] 0,001 dB/dB/W olarak verilmiş olup, doğrudan ölçümler ve saha ölçümleri arasında güç farkı olduğundan önem arz etmektedir. Verici anten girişinde bulunan zayıflatıcı doğrudan ölçümler ve saha ölçümleri arasında önemli bir güç değişikliğine maruz kalmayacaktır. Alıcı cihaz olan spektrum analizör girişinde bulunan zayıflatıcı ise ölçüm sonuçlarına göre tüm frekans aralığı değerlendirildiğinde, giriş gücü farkı olarak maksimum 30 MHz frekansta, bikonik anten ölçümlerinde güç farkına maruz kalmıştır. Giriş gücü, sinyal yolu düşünülerek hesaplandığında bu noktada doğrudan ölçümde yaklaşık 106,91 dB μ V (96,91 dB μ V+10 dB), saha ölçümünde yaklaşık 55,59 dB μ V (45,59 dB μ V+10 dB) olmuştur. Burada 10 dB değeri referans zayıflatıcı nominal değeri olup, referans nitelikte olmasından dolayı olabilecek değer sapmaları ihmal edilmiştir. 106,91 dB μ V,

982 μW 'a; 55,59 dB 0,00724 μV 'a tekabül etmektedir. Sonuç olarak direkt ve dolaylı ölçümler arasında zayıflatıcı girişinde güç değişimi $982 \mu\text{W} - 0,00724 \mu\text{W} = 981,99276 \mu\text{W}$ olacaktır. Bu durumda alıcı cihaz girişinde bulunan zayıflatıcının güç hassasiyetinden kaynaklı etki zayıflatıcının net değeri 10 dB olarak kabul edilerek maksimum olabilecek etki bazında ve yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$u_{\text{att}\Delta\text{P}} = 0,001 \cdot 10 \cdot 981,99276 \cdot 10^{-6} = 981,99726 \cdot 10^{-8} \text{ dB} \quad (5.42)$$

$u_{\text{att}\Delta\text{P}}$: Zayıflatıcının güç hassasiyetinden kaynaklanan belirsizlik.

Üretici spesifikasyon değerleri kullanılarak hesaplanan bu bileşenler dikdörtgensel dağılıma sahiptir.

5.2.8 Ölçümlerin tekrarlanabilirliği

30 MHz-1 GHz frekans aralığında bikonik ve log-periyodik anten kalibrasyonları için gereken her bir saha zayıflaması ölçümü 5 kez tekrarlanmış ve ortalama saha zayıflaması değerleri nihai saha zayıflaması değeri olarak alınmıştır. Bu 5 kez tekrarlama işleminde ortam şartlarının benzer olması dikkate alınmıştır. Bu değerlerin standart sapmasından kaynaklı belirsizlik de bütçeye Student (t) dağılımı ile eklenmiştir. 30 MHz için örnek bir tekrarlanabilirlik ölçümü Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Standart sapma kaynaklı belirsizlik için çizelgedeki standart sapma değeri ölçüm sayısının (n) kareköküne bölünerek elde edilmiştir. Burada ölçüm sayısı (n) sınırlı olduğundan ($n < 10$) tekrarlanabilirlik bileşeni Student (t) dağılıma sahiptir. Dolayısıyla olasılık dağılım fonksiyonundan gelen katsayı %68 güvenilirlik ve ($n-1=4$) serbestlik derecesi için Student tablosundan bakıldığında 1,14 olacaktır. Burada %68 güvenilirliğin seçilmesinin sebebi daha sonra standart belirsizliğin genişletilerek $k=2$ güvenilirlik katsayısı ile %95,45 güvenilirliğe ulaşacak olmasındandır.

Standart sapma hesabı için **(1.10)** ve **(1.11)** denklemleri kullanılmıştır. Student dağılımı ile normal dağılımı dengeleme faktörleri ise Çizelge 1.3'te yer almaktadır.

Çizelge 5.1 : 30 MHz için örnek tekrarlanabilirlik ölçümleri.

V_{direct} (dB μ V)	V_{site} (dB μ V)	A (dB)
95,94	45,72	50,22
95,95	45,74	50,21
95,81	45,71	50,10
95,62	45,58	50,04
95,79	45,67	50,12
Ortalama Saha Zayıflaması (dB)		50,14
Standart Sapma (dB)		0,076289
Standart Sapma Belirsizliği (dB)		0,0341174

5.2.9 Etkisi ihmal edilen diğer bileşenler

Bu noktaya kadar incelenen parametrelerin dışında etkisi ihmal edilen parametreler de bulunmaktadır. Bu parametrelerin belirsizliğe katkısı çok küçük derecelerde olduğundan ihmal edilmiştir. Aşağıda bu parametreler incelenmiştir:

1. Zayıflatıcıların sertifika belirsizliği ve sapma değerleri: Kullanılan zayıflatıcılar, hem doğrudan ölçümlerde (V_{direct}), hem de saha (V_{site}) ölçümlerinde ölçüm sisteminde aynı şekilde bulunduğundan sapma ve sertifika belirsizlikleri ihmal edilmiş, bunların yerine sıcaklık kararlılıkları ve güç hassasiyetleri incelenerek belirsizliğe dahil edilmiştir.
2. Kullanılan I konnektörden kaynaklı belirsizlik: Sistemde bağlantı ve geçişlerin sağlanması amacıyla 2 yerde I konnektör kullanılmıştır. Bunlardan biri alıcı anten kuyusunda N tipi konnektör dişi-erkek bağlantısı gerekliliğinden dolayı sürekli olarak sistemde bulunmuş olduğundan sistem tekrarlanabilirliği içerisinde değerlendirilmiştir. Diğeri ise doğrudan ölçümlerde (kablo sıfırlaması- V_{direct}) kablolar arasında bağlantıyı sağlamak amacıyla kullanılmış ve belirsizlik katkısı ihmal edilmiştir. Deneysel ölçümlerle bu I konnektörün frekans, genlik ve konnektör tekrarlanabilirliği açısından etkisinin çok düşük olduğu görülmüştür. Diğer tüm geçiş ve bağlantıların etkisinin ise gösterge ve sistem tekrarlanabilirliği içerisinde ve 5.2.5 başlığında değerlendirildiği

düşünülmekte olduğundan, ayrıca bir belirsizlik bileşeni olarak bütçeye eklenmesine lüzum görülmemiştir.

3. Anten spesifik özelliklerinden kaynaklı belirsizlik: Kullanılan antenlerin spesifik özelliklerinden kaynaklı bir belirsizlik oluşması mümkündür. Bunlar anten faz merkezindeki değişimden, anten yönelticiliğinden (directivity), patern değişiminden kaynaklı olabilir. Bu çalışmada kullanılan antenlerin katalog/kullanım kılavuzu [56,57,58,59,60] bilgilerinde bu gibi faktörler için önemli etkide bir değer bulunmadığından, bu etkilerden oluşabilecek belirsizlik ihmal edilmiştir.
4. Kablo kayıplarından kaynaklı belirsizlik : Kalibrasyon prosesinde ölçümleri alırken, ASTA'da alıcı-verici antenler arasındaki sinyal (V_{site}) ölçümü alındıktan sonra sahadaki alıcı-verici antenler ile kuyular arasındaki bağlantıyı sağlayan kablolar bir N-tipi I konnektör ile birbirine bağlanarak işaret üreticiden sinyal gönderildiğinde spektrum analizörde aynı frekansta okunan değer sistemin (yer altı-yer üstü kablolama, tüm bağlantı ve donanımın etkisi) tümünün durumunu gösterir (V_{direct}). Saha ölçümleri (V_{site}) ile kablo ve sistem ölçümleri (V_{direct}) arasındaki fark saha zayıflamasını (SA) vermektedir. Bu durum kablo ve sistem kaynaklı etkilerin ölçüm doğruluğunu etkilemesini zaten engellemektedir. Ancak, V_{site} ile V_{direct} ölçümleri arasında geçen sürede zeminin altından geçen kablo ve diğer kablo ile konnektörlerin toprak ve hava sıcaklığının değişiminden dolayı sinyal zayıflatma büyüklüklerinde değişim de olasıdır. Başka bir ifade ile, kablo kayıplarının değişmesi ile ilgili bir belirsizlik oluşmaktadır. Toprak zemininin ve hava şartlarının bu iki ölçüm arasında çok değişmediği durumlarda bu belirsizlik ihmal edilebilir düzeydedir. ANSI C63.5-2006 standardı Annex I kısmının önermiş olduğu belirsizlik hesabında belirtildiği üzere doğrudan ölçümler ve saha ölçümleri arasındaki sıcaklık değişiminden kaynaklı belirsizlikler, maksimum sıcaklık farkının açık sahada tüm ölçümler süresince $\pm 8^{\circ}\text{C}$ olması ve kablo üreticisinin sıcaklık kararlılığı verileri göz önüne alınarak hesaplanabilir [2].

Bu durum standardın da yer verdiği gibi aşağıdaki şekilde formülize edilebilir [2]:

$$u_{cable_{\Delta t}} = \beta \cdot \Delta t \quad (5.43)$$

β : Kablo zayıflatma değişimleri (dB / $^{\circ}\text{C}$).

Δt : Doğrudan ölçümler ve saha ölçümleri arasındaki toprak düzlemi sıcaklık değişimleri (°C).

Sistemde kullanılan yer altı ve yer üstü kablolar RFS Flexwell 3/8" Cu2Y 50 ohm kablolardır. Hali hazırda üretici firma bu kabloları HCA38A-50 ismiyle üretmektedir. Modelin datasheet verisi incelendiğinde çalışma sıcaklık aralığının -40 °C - +60 °C olduğu, karakteristik empedansının ise $50 \Omega \pm 1 \Omega$ şeklinde verildiği görülmektedir. Sonuç olarak diğer belirsizlik bileşenleri yanında etkisi ihmal edilebilir düzeydedir [61].

5.3 Birleştirilmiş Belirsizliğin Oluşturulması

Bu kısma kadar incelenen bileşenler sonucunda saha zayıflamaları için çizelge 5.2'deki ve daha sonrasında anten faktörü ölçümündeki nihai belirsizlik için çizelge 5.3'teki belirsizlik bütçesi oluşturulup, içerisinde birleştirilmiş ve genişletilmiş belirsizlik verilmiştir. İlgili belirsizlik bütçesi örnek olarak 30 MHz frekansta, 3 Anten ile SSM ile bikonik anten kalibrasyonu için düzenlenmiştir. Zira, diğer frekanslarda da ölçüm belirsizliği değeri neredeyse aynı değer olarak elde edilmektedir. Bütçe incelendiğinde, ölçüm belirsizliğinde en baskın etkenin saha ve sistem etkileri olduğu görülmektedir. Bu durum sahanın kalitesinin önemini göstermektedir. Spektrum analizörün genlik ölçümleriyle ilgili belirsizlikler diğer baskın olan etkenlerdir. Diğer belirsizlik parametreleri de değişen oranlarda belirsizliğe katkıda bulunmuştur.

Bir diğer ilgi çekici nokta ise frekans doğruluğu ile ilgili belirsizliğin etkisinin çok küçük hatta ihmal edilebilir düzeyde olduğudur. Kullanılan cihazların frekans doğruluğunun yüksek, belirsizliklerinin düşük olması frekans kaynaklı belirsizliğin çok düşük etkide olmasını sağlamıştır.

3 adet saha zayıflamasının ölçüm belirsizliklerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Temel model fonksiyon ve belirsizlik ifadeleri olan (5.9) ve (5.10)'da saha zayıflaması dışındaki diğer parametre olan frekans (AF hesabında kullanılan nominal frekansın gerçek değer ile farkından kaynaklanan) etkisinin de belirsizlik üzerinde çok düşük etkisinin olduğu ve ihmal edilebileceği belirsizlik bütçesinden anlaşılmaktadır. Bu nedenle anten faktörü ölçüm belirsizliği hesabı için saha zayıflaması belirsizliklerinin yeterli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Bütçelerde duyarlılık katsayılarının 1 ve -1 olması, önceki kısımlarda da incelendiği üzere belirsizlik bileşenlerinin etkilerinin dB cinsine çevrilmiş durumda bütçeye eklenmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Belirsizlik alışması sonucunda, log-periyodik ve bikonik antenler için tüm frekansları kapsayacak şekilde Microsoft Excel Belirsizlik Bütçesi oluşturulmuştur.

Çizelge 5.2 : Anten kalibrasyonu ölçüm belirsizliği bütçesi (SA).

Belirsizlik Bileşeni ve Tipi	Tahmini Belirsizlik Değeri (dB)	Düzeltilme Katsayısı	Dağılım Tipi	Dağılım Katsayısı	Hassasiyet (Duyarlılık) Katsayısı (c_i)	Belirsizlik Katkısı (dB)	Varyans (dB ²)
Doğrudan Ölçüm Spektrum Analizör Genlik-Sertifika Belirsizliği (V_a)-A	0,2	1/2	Gauss (Normal)	1	1	0,1	0,01
Saha Ölçümü Spektrum Analizör Genlik-Sertifika Belirsizliği (V_s)	0,2	1/2	Gauss (Normal)	1	1	0,1	0,01
Spektrum Analizör Genlik-Sertifika Sapmalarından Kaynaklı Belirsizlik	0,12	-	Dikdörtgensel	$1/\sqrt{3}$	1	0,069	0,0048
Spektrum Analizör Yıllık Kayma Değeri	0,10	-	Dikdörtgensel	$1/\sqrt{3}$	1	0,058	0,0033

Çizelge 5.2 (devam): Anten kalibrasyonu ölçüm belirsizliği bütçesi (SA).

Spektrum Analizör Genlik-Sıcaklık Değişimi Kaynaklı Belirsizlik	0,25	-	Dikdörtgensel	$1/\sqrt{3}$	1	0,144	0,0208
Spektrum Analizör Genlik Ölçümlerinden Kaynaklanan Belirsizlik	Spektrum analizör toplam genlik ölçüm belirsizliği yukarıdaki 5 alt bileşenin kareleri toplamının karekökü şeklinde hesaplanmıştır.					0,221	0,049
Spektrum Analizör Frekans Doğruluğundan Kaynaklı Belirsizlik	Alt bileşenler önceki bölümlerde incelenmiş olup, doğrudan spektrum analizör frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik yazılmıştır.					$2,684.10^{-5}$	
İşaret Üretici Frekans Doğruluğundan Kaynaklı Belirsizlik	Alt bileşenler önceki bölümlerde incelenmiş olup, doğrudan işaret üretici frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizlik yazılmıştır.					$1,029.10^{-5}$	
Ayrık Frekans Metodu Frekans Doğruluğundan Kaynaklı Belirsizlik	Korelasyondan dolayı spektrum analizör ve işaret üretici frekans doğruluğundan kaynaklı belirsizliklerin toplanması sonucu ortaya çıkmıştır.					$3,713.10^{-5}$	$1,378.10^{-9}$
İşaret Üretici Genlik Kararlılığı-Çözünürlük	0,1	1/2	Dikdörtgensel	$1/\sqrt{3}$	1	0,029	0,0008

Çizelge 5.2 (devam): Anten kalibrasyonu ölçüm belirsizliği bütçesi (SA).

Zayıflatıcı (1) Duran Dalga Oranı (VSWR) Kaynaklı Belirsizlik	0,0715	-	U dağılım	$1/\sqrt{2}$	1	0,05	0,0026
Zayıflatıcı (2) Duran Dalga Oranı (VSWR) Kaynaklı Belirsizlik	0,0715	-	U dağılım	$1/\sqrt{2}$	1	0,05	0,0026
Sistem ve Saha Etkilerinden Kaynaklı Belirsizlik	0,42	-	Student (t)	$2,87/2=1,435$	1	0,60	0,3632
Gürültü Kaynaklı Belirsizlik	0,01376	-	Dikdörtgensel	$1/\sqrt{3}$	1	0,0079	$6,3113 \cdot 10^{-5}$
Zayıflatıcı (1) Sıcaklık Kararlılığı Kaynaklı Belirsizlik	0,008	-	Dikdörtgensel	$1/\sqrt{3}$	1	0,0046	$2,1333 \cdot 10^{-5}$
Zayıflatıcı (2) Sıcaklık Kararlılığı Kaynaklı Belirsizlik	0,007	-	Dikdörtgensel	$1/\sqrt{3}$	1	0,0040	$1,6333 \cdot 10^{-5}$

Çizelge 5.2 (devam): Anten kalibrasyonu ölçüm belirsizliği bütçesi (SA).

Zayıflatıcı (2) Güç Hassasiyetinden Kaynaklı Belirsizlik	$9,82 \cdot 10^{-6}$	-	Dikdörtgensel	$1/\sqrt{3}$	1	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$3,2144 \cdot 10^{-11}$
Tekrarlanabilirlik-SA ₁	0,021	-	Student (t)	1,14	1	0,024	0,0006
Tekrarlanabilirlik-SA ₂	0,031	-	Student (t)	1,14	1	0,036	0,0013
Tekrarlanabilirlik-SA ₃	0,034	-	Student (t)	1,14	1	0,039	0,0015
Saha Zayıflaması 1 Belirsizliği (dB)	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$					0,6512	
Saha Zayıflaması 2 Belirsizliği (dB)	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$					0,6517	
Saha Zayıflaması 3 Belirsizliği (dB)	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$					0,6519	

Saha zayıflaması ile ilgili belirsizlikler bulunduktan sonra, temel model fonksiyon ve belirsizlik ifadeleri Denklem (5.9) ve (5.10)'a göre AF hesabında kullanılan nominal frekansın gerçek değer ile farkından kaynaklanan belirsizliği (bu belirsizlik kaynak cihaz olan işaret üreticinin frekans hatasından oluşabileceğinden, daha önce hesaplanan bu değerden yararlanılmıştır) de bütçeye eklenerek, birleştirilmiş ve genişletilmiş belirsizlik aşağıdaki gibi (1,13 dB) bulunmuştur. Gerçekleştirilen kalibrasyonlara ait EK-A'da da yer alan sertifikalarda ise bu belirsizlik değeri 1,20 dB'ye yuvarlanarak verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Anten kalibrasyonu ölçüm belirsizliği bütçesi.

Belirsizlik Bileşeni	Değeri (dB)	Hassasiyet Katsayısı	Belirsizlik Katkısı (dB)	Varyans (dB ²)
Saha Zayıflaması 1 Belirsizliği	0,6512	0,5	0,3256	0,1060
Saha Zayıflaması 2 Belirsizliği	0,6517	0,5	0,3259	0,1062
Saha Zayıflaması 3 Belirsizliği	0,6519	0,5	0,3259	0,1062
AF hesabında kullanılan nominal frekansın gerçek değer ile farkından kaynaklanan belirsizlik	$1,0289 \cdot 10^{-5}$	0,1448	$1,49 \cdot 10^{-6}$	$2,22 \cdot 10^{-12}$
Birleştirilmiş Belirsizlik (dB)	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}$		0,56	
Genişletilmiş Belirsizlik (dB)	(k=2, %95 güvenilirlik düzeyi)		1,13	

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada EMC testlerinin önemli ekipmanlarından EMC antenlerinin TSE Açık Saha Test Alanı'nda kalibrasyonları tartışılmış, sonuç olarak ASTA'da ANSI C63.5-2006 standardına göre kalibrasyonlar 30 MHz–1 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle ASTA'nın kalibrasyonlara uygunluğu değerlendirilmiş, bu amaçla ANSI C63.4-2014 standardının saha doğrulaması kısmından faydalanılmıştır. ANSI C63.5-2006 standardı kalibrasyon ortamının yeterliliği için ANSI C63.4-2014 standardındaki NSA testlerinin kalibrasyon geometrisini içeren bir hacim içerisinde gerçekleştirilmesini ve tüm ölçümler için hesaplanan NSA değerinin teorik NSA değerinin ± 2 dB toleransı içinde kalmasını istemektedir. 5 farklı konumda yapılan ölçümlerde bu kriter sağlanmış, ayrıca 5 konumdaki ölçümlerin standart sapması kullanılarak saha kaynaklı belirsizlik bileşeni hesaplanmıştır.

ASTA'nın yeterliliği onaylandıktan sonra, ANSI C63.5-2006 Standart Saha Metodu ile kalibrasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu metodun 3 alt metodu olarak görülebilecek ve bu çalışmaya özel olarak 3 Anten ile, Bilinen Anten ile ve Özdeş Antenler ile Standart Saha Metodu olarak adlandırılan yöntemlerle ve farklı tip antenlerle kalibrasyonlar gerçekleştirilmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bilinen Anten Metodu ve 3 Anten Metodu arasında ölçüm sonuçları açısından özellikle bikonik anten kalibrasyonunda düzensiz farklar oluşmuştur. Log-periyodik anten kalibrasyonunda ise iki metotta da aynı eğilimde grafikler elde edilmesine rağmen bir miktar öteleme-offset olduğu gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlara dayanarak, Standart Saha Metodu'nda 3 Anten ile kalibrasyonu gerçekleştirmenin daha doğru ve güvenilir olduğu düşünülmektedir. Bu duruma Bilinen Anten Metodu'nda, anten faktörü bilinen antenin son kalibrasyonundan ölçüm zamanına kadar geçen sürede anten faktörü değerinde olabilecek değişimlerinden kaynaklı hataların yol açtığı öngörülmektedir.

Özdeş Antenler ile Standart Saha Metodu'nda ise mevcut bulunan kesinlik özellikteki (precision) yarım dalga-dipol setler kalibre edilmiş olup, bu metotla elde edilen sonuçların üretici değerleri ile çok uyumlu olmasının kalibrasyon işleminin doğruluğunu gösterdiği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın önemli bir kısmını ise ölçüm belirsizliği analizi oluşturmaktadır. ASTA'da EMC anteni kalibrasyonu iki kontrolsüz ortam içermektedir. Birincisi açık saha koşullarına maruz kalan test alanıdır. Diğeri ise, iklimik olarak koşullandırması bulunmayan kontrol odasıdır. İki adet kontrolsüz ortamın neticesinde çok sayıda ölçüm belirsizliği bileşeni ölçümlerde etkili olmuştur. Bu bileşenler detaylı olarak incelenmiş, sonuçta genişletilmiş ölçüm belirsizliği 1,13 dB olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen kalibrasyonlara ait EK-A'da da yer alan sertifikalarda ise bu belirsizlik değeri 1,20 dB'ye yuvarlanarak verilmiştir.

Ölçüm belirsizliğinde en baskın etkenin saha ve sistem kaynaklı etkiler olduğu görülmüştür. Bu sebeple EMC anteni kalibrasyonlarında kalibrasyonun kalitesini belirleyen en önemli parametrenin sahanın durumu ve nitelikleri olduğu düşünülmektedir. Saha ve sistem etkilerinden sonra da baskın olarak ölçüm cihazı olan spektrum analizörün genlik ölçüm belirsizliği bileşenleri gelmektedir. Frekans ile ilgili belirsizliklerin ise son derece düşük olduğu, hatta ihmal edilebileceği ortaya çıkmıştır. Bu durumda, cihazların frekans belirsizliklerinin çok düşük olması da rol oynamıştır.

Sonuç olarak ASTA'da bu çalışma kapsamında hedeflenen kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilebilmiş, ölçüm belirsizliği detaylı analizlerle ortaya konarak bilimsel altyapısı hazırlanmıştır. İlerleyen zamanlarda ASTA'nın modernizasyon ve otomasyon seviyesi artırılarak gelişmesi sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<http://www.tse.org.tr>>, alındığı tarih 09.02.2015
- [2] **Standart**, “ANSI C63.5-2006-American National Standard for Electromagnetic Compatibility -Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) Control-Calibration of Antennas (9 kHz to 40 GHz)”, American National Standards Institute, 21 Nisan 2006
- [3] **Standart**, “ANSI C63.4-2014-American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz”, American National Standards Institute, 13 Haziran 2014
- [4] **Standart**, “ANSI C63.7-2015-American National Standard Guide for Construction of Test Sites for Performing Radiated Emission Measurements”, American National Standards Institute, 9 Mart 2015
- [5] **Standart**, “ANSI C63.6-1996-American National Standard Guide for the Computation of Errors in Open-Area Test Site Measurements”, American National Standards Institute, 27 Eylül 1996
- [6] **Standart**, “ANSI C63.2-2009-American National Standard for Electromagnetic Noise and Field Strength Instrumentation, 10 Hz to 40 GHz Specifications”, American National Standards Institute, 14 Aralık 2009
- [7] **Standart**, “SAE ARP 958D:2003-Electromagnetic Interference Measurement Antennas; Standard Calibration Method”, Society of Automotive Engineers, 12 Şubat 2003
- [8] **Standart**, “CISPR 16-1-5:2014-Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antenna calibration sites and reference test sites for 5 MHz to 18 GHz”, International Electrotechnical Commission, 17 Aralık 2014
- [9] **Standart**, “IEEE Std 291-1991-IEEE Standard Methods for Measuring Electromagnetic Field Strength of Sinusoidal Continuous Waves, 30 Hz to 30 GHz”, IEEE Antennas and Propagation Society, 1991
- [10] **Fitzgerrel, R. G.** “Linear gain standard antennas below 1000 MHz”, NBS Technical Note 1098, U.S. Department of Commerce
- [11] **Taggart, H. E. ve Workman, J. L.** , “Calibration principles and procedures for field strength meters (30 Hz to 1 GHz)”, NBS Technical Note 370, U.S. Department of Commerce
- [12] **Standart**, “ANSI/IEEE Std 149-1979- IEEE Standard Test Procedures for Antennas”, IEEE Antennas and Propagation Society, 1979

- [13] **Smith, A. A. , Jr.** (1982). “*Standart-Site Method for Determining Antenna Factors*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, EMC-24, pp. 316-322, no.3, Ağustos 1982
- [14] **Standart,** “ANSI C63.4-2009-American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz”, American National Standards Institute, 15 Eylül 2009
- [15] **Standart,** “ANSI C63.7-2015-American National Standard Guide for Construction of Open-Area Test Sites for Performing Radiated Emission Measurements”, American National Standards Institute, 7 Nisan 2006
- [16] **Smith, A. A. , Jr. , German, R. F. , Pate, J. B.** (1982). “*Calculation of Site Attenuation from Antenna Factors*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, EMC-24, pp. 301-316, no.3, Ağustos 1982
- [17] **Berry, J. B. , Pate J. B. , Knight, A.N.** (1990). “*Variations in mutual coupling correction factors for resonant dipoles used in site attenuation measurements*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Washington, DC, pp. 444-449, Ağustos 1990
- [18] **Heirman, D.N.** (1987). “*Definitive open-area test site qualifications*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Atlanta, GA, pp. 127-134, Ağustos 1987
- [19] **Heirman, D.N.** (1986). “*Vertical site attenuation-a necessity*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, San Diego, CA, pp. 342-346, Eylül 1986
- [20] **Pate, J.B.** (1984). “*Potential measurement errors due to mutual coupling between dipole antennas and radio frequency absorbing material in close proximity*”, IEEE National Symposium on Electromagnetic Compatibility, San Antonio, TX, pp. 13-19, Nisan 1984
- [21] **Salter, M. J. , Alexander M. J.** (1991). “*EMC Antenna calibration and the design of an open-field site*”, Measurement Science and Technology, Vol. 2, No. 6
- [22] **Sugiura, A. , Morikawa, T. , Koike, K. , Harima, K.** (1995). “*An improvement in the standart site method for accurate EMI antenna calibration*”, IEEE Transactions on Communications, Vol. E78-B, No. 8, pp. 1229-1237, 25/08/1995
- [23] **Bronaugh, E. L. , Osburn, J. D. M.** (1992). “*Measuring EMC Antenna Factors in the GHz Transverse Electromagnetic Cell*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Anaheim, CA, pp. 229-231, Ağustos 1992
- [24] **Alexander, M. J. , Salter, M. J. , Gentle, D. G. , Holland, K. P.** (1994). “*Advances in measurement methods and reduction of measurement uncertainties associated with antenna calibration*”, Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings, Vol. 141, Issue 4, pp. 283-286, Haziran 1994
- [25] **Sevgi, L. , Çakır, S. , Çakır, G.** (2008). “*Antenna Calibration for EMC Tests and Measurements*”, Antennas and Propagation Magazine, IEEE, Vol. 50, Issue 3, pp. 215-224

- [26] **Doğan, M. , Baran, E. , Üstüner, F.** (1994). “*ANSI C63.5 Standardına göre anten kalibrasyon ve otomasyonu*”, 1. Ulusal EMC Konferansı, 14-16 Eylül 2011
- [27] **Türetken, B. , Baran, E.** (2002). “*A new implementation of ANSI C63.5 for 1 meter antenna calibration*”, International Union of Radio Science (URSI), Maastricht 2002, 17-24 Ağustos 2002, Alındığı tarih: 20.11.2014, adres: <http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA02/papers/p0088.pdf>
- [28] **Fujii, K. , Alexander, M. , Sugiura, A.** (2012). “*Uncertainty analysis for three antenna method and standard antenna method*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 702-707
- [29] **Morioka, T. , Komiyama, K.** (2006). “*Uncertainty Analysis of Dipole Antenna Calibration Above a Ground Plane*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 48, Issue 4, pp. 781-791
- [30] **Heise, E. R. , Heise, R. E. W.** (1996). “*A Method to Compute Open Area Test Site Uncertainty Using ANSI C63.4 Normalized Site Attenuation Measurement Data*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Symposium Record, pp. 505-507
- [31] **Alexander, M. J.** (1996). “*Intercomparison of EMC Antenna Factors 30 MHz to 1 GHz*”, European Commission Measurement and Testing Programme Report
- [32] **Qingming Li, Li Zhang, Wei Wang, Yan, J. D. , Siew, W. H.** (2009). “*Impact of the weather factors on frequency-domain characteristics of the antennas used for EMC measurement in power systems*”, Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International, pp. 1-5
- [33] **Üstüner, F.** “*EMI/EMC (Elektromanyetik Girişim ve Uyumluluk)*”, TÜBİTAK UME Ulusal Metroloji Enstitüsü, Aralık 2011, Alındığı tarih : 29.10.2014, http://www.eee.metu.edu.tr/~design/lib/exe/fetch.php?media=lecture_notes:emi_emc_2011.pdf
- [34] **Url-2** < <http://www.elektrikport.com>>, alındığı tarih 29.10.2014
- [35] **Dural, G.** “*EMC/EMI*”, ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Ankara, 2008, Alındığı tarih: 17.11.2014 adres: http://www.emo.org.tr/ekler/fcd14fa8f9cf6f8_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=14
- [36] **Yönetmelik**, “*Elektromanyetik Uyumluluk Yönetmeliği*”, 24/10/2007 tarihli ve 26680 sayılı Resmi Gazete sayısı
- [37] **Url-1** < <http://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlarimiz/elektromanyetik-laboratuvarlari>>, alındığı tarih 29.10.2014
- [38] **Rybak T. , Steffka M.** “*Automotive Electromagnetic Compatibility (EMC)*”, Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2004
- [39] **Paul, R. C.** “*Introduction to Electromagnetic Compatibility*”, Wiley, 2006
- [40] **Sevgi, L.** “*Elektromanyetik Uyumluluk Elektromanyetik Kirlilik*”, TMMOB Elektrik Mühendisler Odası İstanbul Şubesi, 2000

- [41] **Yalçın, S.** (t.y) “*Elektromanyetik Uyumlulukta Işıma ve İletim İle Yapılan Yayınım ve Bağışıklık Testleri*”, alındığı tarih 28.10.2014, <http://gizemkahya.com>
- [42] **Williams, T.** “*EMC for Product Designers*”, Newley, Third Edition, 2001
- [43] **Chen, Z.** “*EMC Antenna Fundamentals*”, ETS-Lindgren, emc, Conformity 2004: The Annual Guide
- [44] **Montrose, M. I. , Nakauchi, E. M.** “*Testing for EMC Compliance :Approaches and Techniquesfor Product Designers*”, IEEE Electromagnetic Compatibility Society, IEEE Press, Wiley-Interscience, John Wiley&Sons, Inc., 2004
- [45] **Balanis, C. A.** “*Antenna Theory Analysis and Design*”, Third Edition, Wiley-Interscience, John Wiley&Sons, Inc., 2005
- [46] **TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü**, “*Metroloji*”, 2013
- [47] **JCGM 200:2008**, “*Uluslararası metroloji sözlüğü - Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)*”, TÜBİTAK UME © JCGM 2008
- [48] **OIML -International Organization of Legal Metrology**, “*Elements for a Law on Metrology*”, OIML D 1:2004 (E)
- [49] **JCGM 100:2008**, “*Evaluation of Measurement Data-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*”, First Edition, Eylül 2008
- [50] **Standart**, “*ANSI C63.4-2003-American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*”, American National Standards Institute, 11 Aralık 2003
- [51] **EA-4/02**, “*Expression of the Uncertainty Measurement in Calibration*”, Aralık 2009
- [52] **Türetken, B. , San, S. E. , Yazıcı, M., Araz, İ., Yürekli, A. İ. , Hekim, M.** (2002). “*Evaluation of Uncertainty Budget for Antenna Calibrations*”, 2002 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-02), Vol. 2, Kiev, Ukraine, 2002
- [53] **Hewlett Packard**, “*HP 70000 Series Modular Spectrum Analyzer System- HP 70900B Local Oscillator Source-Controlled Modules Installion and Verification Manual*”, Edition A.0.0, USA, Aralık 1996
- [54] **Rohde&Schwarz Test and Measurement Division**, “*Signal Generator SMT 1039.2000.02/03/06 Operating Manual*”, Federal Republic of Germany
- [55] **Agilent Technologies**, “*Agilent (HP) 8491 A/B, 8493A/B/C, 11581A, 11582A, 11583C Coaxial Attenuators DC to 26,5 GHz Product Overview*”, Alındığı Tarih 22.10.2014, adres: <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/Agilent-8491B-Datasheet.pdf>
- [56] **Rohde&Schwarz**, “*HF-VHF/UHF-SHF Antennas/Catalog 2014/2015-VHF/UHF Antennas-R&S HK116 Biconical Antenna*”, Alındığı Tarih 22.10.2014, adres: http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HK116_cat_2015_74-75.pdf

- [57] **Rohde&Schwarz**, “*HF-VHF/UHF-SHF Antennas/Catalog 2014/2015-VHF/UHF Antennas-R&S HL223 Log-Periodic Antenna*”, Alındığı Tarih 22.10.2014, adres: http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HL223_cat_2015_86-87.pdf
- [58] **Rohde&Schwarz**, “*HF-VHF/UHF-SHF Antennas/Catalog 2014/2015-VHF/UHF Antennas-R&S HL562E ULTRALOG*”, Alındığı Tarih 22.10.2014, adres: http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HL562E_cat_2015_88-89.pdf
- [59] **Rohde&Schwarz Test and Measurement Division**, “*Precision Halfwave Dipoleset HZ-12 0816.2870.02 Operating Manual*”, Federal Republic of Germany
- [60] **Rohde&Schwarz Test and Measurement Division**, “*Precision Halfwave Dipoleset HZ-13 0816.2940.02 Operating Manual*”, Federal Republic of Germany
- [61] **Radio Frequency Systems (RFS)**, “*Product Data Sheet-HCA38-50J 3/8” HELIFLEX Air-Dielectric Coaxial Cable*”, Rev.C1/14 Ağustos 2009, Alındığı Tarih: 17.03.2015, adres: http://www.ficael.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=56:especificacoes-completas-hca-38-50-j&id=1:coaxial

EKLER

EK A: Gerçekleştirilen Kalibrasyonlara Ait Kalibrasyon Sertifikaları

EK B: Kalibrasyon İçin Kullanılan Bazı Cihazlara Ait Kalibrasyon Sertifikaları

 TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI Kalibrasyon Sertifikası <i>Calibration Certificate</i>		<table border="1"> <tr><td>TSE</td></tr> <tr><td>15E00586</td></tr> <tr><td>03.15</td></tr> </table>	TSE	15E00586	03.15
TSE					
15E00586					
03.15					
Cihazın Sahibi/Adresi <i>Customer/Address</i>	TSE DKMB Gebze Kal. Müdürlüğü (Elektriksel.Kal.Lab.) Çayırova Tren İstasyonu Yanı Gebze/KOCAELİ				
İstek Numarası <i>Order No.</i>	916/1				
Makine/Cihaz <i>Instrument/Device</i>	Bikonik Anten				
İmalatçı <i>Manufacturer</i>	Rohde & Schwarz				
Tip <i>Type</i>	HK116				
Seri Numarası <i>Serial Number</i>	846653/009				
Kalibrasyon Tarihi <i>Date of Calibration</i>	16.03.2015				
Sertifikanın Sayfa Sayısı <i>Number of pages of the Certificate</i>	4				
Bu Kalibrasyon Sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler. <i>This calibration certificate documents the traceability to national standards which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).</i> TSE, bu hizmeti 132 sayılı kanunda verilen görevler çerçevesinde ve EA kuralları içerisinde yapmaktadır. <i>TSE is responsible for this calibration in accordance with Turkish Law Nr: 132 and EA-regulations.</i> Bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları takip eden sayfalarda verilmiştir. <i>Measurement results, expanded measurement uncertainties and calibration methods which are the complementary parts of this certificate, are given in the following pages.</i>					
Mühür <i>Seal</i>  20.03.2015	Tarih <i>Date</i> 20.03.2015	Kalibrasyonu Yapan <i>Calibrated by</i>  İlkan COŞKUN			
		Laboratuvar Müdürü <i>Head of the Calibration Laboratory</i>  Ali Can KUYRUKLUYILDIZ			

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen veya tamamen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced partially or fully without the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
 Necatibey Cad. No: 112 Bakanlıklar - ANKARA
 Tel: 0 312 416 65 08 - Faks: 0 312 416 64 18

BURSA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
 Organize Sanayi Bölgesi Kırmızı Cd. No: 6 Nilüfer-BURSA
 Tel: 0 224 243 80 00 - Faks: 0 224 243 83 21

GEBZE KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
 Çayırova Tren İstasyonu Yanı Çayırova Gebze - KOCAELİ
 Tel: 0 262 723 15 56 - Faks: 0 262 723 16 08



DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

TSE
15E00586
03.15

Sayfa 2 / 4

Kalibrasyonu Yapılan Makine/Cihaz/Teknizat *(The machine/device/equipment which calibrated)*

Cihazın Türü <i>(Device Type)</i> :	BİKONİK ANTEN / BICONICAL ANTENNA
Üretici/Marka <i>(Manufacturer/Trademark)</i> :	ROHDE & SCHWARZ
Model <i>(Model)</i> :	HK116
Seri No <i>(Serial No)</i> :	846653/009
Çalışma Aralığı <i>(Working Range)</i> :	20 MHz - 300 MHz

Bulunduğu Yer *(Place)* : Kalibrasyon işlemi, TSE Gebze Kalibrasyon Müdürlüğü tarafından TSE Gebze Kalite Kampüsü'nde bulunan Açık Saha Test Alanı'nda gerçekleştirilmiştir. *The calibration process was performed in the Open Area Test Site located in TSE Gebze Quality Campus by TSE Gebze Calibration Directorate.*

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi *(Received Date to Lab.)* : 12.01.2015

Prosedür *(Procedures)* : Kalibrasyon, doğrulaması yapılmış Açık Saha Test Alanı'nda (ASTA), ANSI C63.5-2006 standardı Standart Site Method kullanılarak, 10 m mesafede ve yatay polarizasyonda gerçekleştirilmiştir. 50 Ω'luk bir ölçüm alıcısı kullanılmıştır. *The calibration was performed in the Open Area Test Site (OATS), which has been verified, at a distance of 10 m and on horizontal polarization according to ANSI C63.5-2006 Standard Site Method. A 50 Ω-receiving device was used.*

Ölçüm Şartları *(Measurement Conditions)* : Kalibrasyon işlemleri kalibre edilecek cihazın ortam şartlarına uyumu ve tüm cihazlar için yeterli ısınma süreleri sağlandıktan sonra başlamıştır. *The calibration process started after the adaption to environmental conditions of the device which would be calibrated and enough warm-up time for whole devices.*

Cevre Şartları *(Environmental Conditions)* :

	Kontrol Odası (Control Room)	ASTA (OATS)
Ortam Sıcaklığı / Ambient temperature	(20 ± 7) °C	(15 ± 8) °C
Bağıl Nem / Relative humidity	(45 ± 15) % Rh	(55 ± 30) %Rh

Kalibrasyonda Kullanılan Teknizat *(Calibration Equipment)*

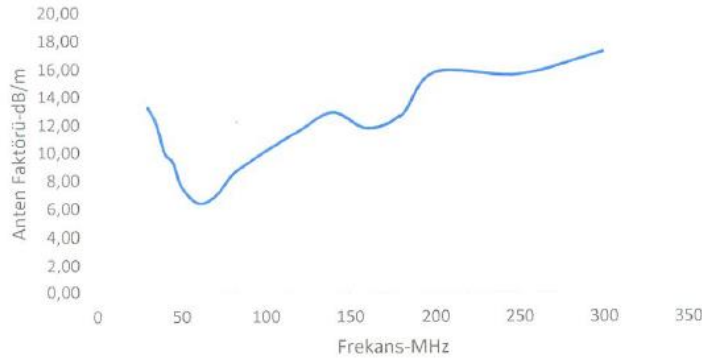
- 1-) HP Marka 70004A Model 3709A05086 Seri Nolu Spektrum Analizör Seti. / HP 70004A Spectrum Analyzer Set S/N: 3709A05086 - İzlenebilirlik *(Traceability)*: TSE, 14E2104, 23.10.2014
- 2-) ROHDE&SCHWARZ Marka SMT 02 Model 1039.2000.02 (828141/007) Seri No'lu İşaret Üretici / Rohde&Schwarz SMT 02 Signal Generator S/N: 1039.2000.02 (828141/007) - İzlenebilirlik *(Traceability)*: TSE, 14E2105, 13.10.2014
- 3-) TSE Açık Saha Test Alanı (ASTA) / TSE Open Area Test Site (OATS) - İzlenebilirlik *(Traceability)*: TSE, 14E2408, 27.06.2014

34.01.R.001/12.04.2007-00



Ölçüm Sonuçları / Measurement Results

FREKANS- f_M FREQUENCY- f_M	ANTEN FAKTÖRÜ-AF ANTENNA FACTOR-AF	BELİRSİZLİK (UNCERTAINTY)
30 MHz	13,24 dB/m	$\pm 1,20$ dB
35 MHz	12,11 dB/m	$\pm 1,20$ dB
40 MHz	10,00 dB/m	$\pm 1,20$ dB
45 MHz	9,28 dB/m	$\pm 1,20$ dB
50 MHz	7,58 dB/m	$\pm 1,20$ dB
60 MHz	6,39 dB/m	$\pm 1,20$ dB
70 MHz	6,90 dB/m	$\pm 1,20$ dB
80 MHz	8,39 dB/m	$\pm 1,20$ dB
90 MHz	9,30 dB/m	$\pm 1,20$ dB
100 MHz	10,11 dB/m	$\pm 1,20$ dB
120 MHz	11,60 dB/m	$\pm 1,20$ dB
140 MHz	12,90 dB/m	$\pm 1,20$ dB
160 MHz	11,79 dB/m	$\pm 1,20$ dB
180 MHz	12,70 dB/m	$\pm 1,20$ dB
200 MHz	15,78 dB/m	$\pm 1,20$ dB
250 MHz	15,65 dB/m	$\pm 1,20$ dB
300 MHz	17,26 dB/m	$\pm 1,20$ dB





DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

TSE
15E00586
03.15

Sayfa 4 / 4

Ölçüm Belirsizliği (Measurement Uncertainty)

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart belirsizliğin, $k=2$ olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucu bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır. Ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k=2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The measurement uncertainty was calculated in accordance with GUM and EA-4/02 documents.

Açıklama ve Yorumlar (Remarks)

Kalibrasyon sonuçları sadece kalibrasyonu yapılan antene aittir. Cihazın performansı açısından uygun çevre şartlarında kullanımından ve uygun kalibrasyon periyotlarında kalibre edilmesinden kullanıcı sorumludur. / *The calibration results belong only to the antenna which calibrated. The user is responsible for the instrument to be calibrated at appropriate calibration periods and using the device in appropriate environmental conditions.*

34.01.R.001/12.04.2007-00



TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ

DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

Kalibrasyon Sertifikası Calibration Certificate

TSE
15E00587
03.15

Cihazın Sahibi/Adresi
Customer/Address

TSE DKMB Gebze Kal. Müdürlüğü (Elektriksel.Kal.Lab.)
Çayırova Tren İstasyonu Yanı
Gebze/KOCAELİ

İstek Numarası
Order No.

916/2

Makine/Cihaz
Instrument/Device

Log-Periyodik Anten

İmalatçı
Manufacturer

Rohde & Schwarz

Tip
Type

HL223

Seri Numarası
Serial Number

846731/006

Kalibrasyon Tarihi
Date of Calibration

23.03.2015

Sertifikanın Sayfa Sayısı
Number of pages of the Certificate

4

Bu Kalibrasyon Sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

TSE, bu hizmeti 132 sayılı kanunda verilen görevler çerçevesinde ve EA kuralları içerisinde yapmaktadır.
TSE is responsible for this calibration in accordance with Turkish Law Nr: 132 and EA-regulations.

Bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları takip eden sayfalarda verilmiştir.
Measurement results, expanded measurement uncertainties and calibration methods which are the complementary parts of this certificate, are given in the following pages.

Mühür
Seal



Kalibrasyonu Yapan
Calibrated by

İlkcan COŞKUN

Laboratuvar Müdürü
Head of the Calibration Laboratory

Ali Can KUYRUKLUYILDIZ

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen veya tamamen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced partially or fully without the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Necatibey Cad. No: 112 Bakanlıklar - ANKARA
Tel: 0 312 416 65 08 - Faks: 0 312 416 64 18

BURSA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Organize Sanayi Bölgesi Kırmızı Cd. No: 6 Nilüfer-BURSA
Tel: 0 224 243 80 00 - Faks: 0 224 243 83 21

GEBZE KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Çayırova Tren İstasyonu Yanı Çayırova Gebze - KOCAELİ
Tel: 0 262 723 15 56 - Faks: 0 262 723 16 08

www.tse.org.tr



DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

TSE
15E00587
03.15

Sayfa 2 / 4

Kalibrasyonu Yapılan Makine/Cihaz/Techizat (The machine/device/equipment which calibrated)

Cihazın Türü (Device Type) :	LOG-PERİYODİK ANTEN / LOG-PERIODIC ANTENNA
Üretici/Marka (Manufacturer/Trademark) :	ROHDE & SCHWARZ
Model (Model) :	HL223
Seri No (Serial No) :	846731/006
Çalışma Aralığı (Working Range)	200 MHz - 1.3 GHz

Bulunduğu Yer (Place) : Kalibrasyon işlemi, TSE Gebze Kalibrasyon Müdürlüğü tarafından TSE Gebze Kalite Kampüsü'nde bulunan Açık Saha Test Alanı'nda gerçekleştirilmiştir. *The calibration process was performed in the Open Area Test Site located in TSE Gebze Quality Campus by TSE Gebze Calibration Directorate.*

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi (Received Date to Lab.) : 19.01.2015

Prosedür (Procedures) : Kalibrasyon, doğrulaması yapılmış Açık Saha Test Alanı'nda (ASTA), ANSI C63.5-2006 standardı Standart Site Method kullanılarak, 10 m mesafede ve yatay polarizasyonda gerçekleştirilmiştir. 50 Ω'luk bir ölçüm alıcısı kullanılmıştır. *The calibration was performed in the Open Area Test Site (OATS), which has been verified, at a distance of 10 m and on horizontal polarization according to ANSI C63.5-2006 Standard Site Method. A 50 Ω-receiving device was used.*

Ölçüm Şartları (Measurement Conditions) : Kalibrasyon işlemleri kalibre edilecek cihazın ortam şartlarına uyumu ve tüm cihazlar için yeterli ısınma süreleri sağlandıktan sonra başlamıştır. *The calibration process started after the adaption to environmental conditions of the device which would be calibrated and enough warm-up time for whole devices.*

Çevre Şartları (Environmental Conditions) :

Ortam Sıcaklığı / Ambient temperature
Bağıl Nem / Relative humidity

Kontrol Odası (Control Room)	ASTA (OATS)
(20 ± 7) °C	(15 ± 8) °C
(45 ± 15) % Rh	(55 ± 30) %Rh

Kalibrasyonda Kullanılan Techizat (Calibration Equipment)

- 1-) HP Marka 70004A Model 3709A05086 Seri Nolu Spektrum Analizör Seti. / HP 70004A Spectrum Analyzer Set
S/N:3709A05086 - İzlenebilirlik (Traceability): TSE, 14E2104, 23.10.2014
- 2-) ROHDE&SCHWARZ Marka SMT 02 Model 1039.2000.02 (828141/007) Seri No'lu İşaret Üretici /
Rohde&Schwarz SMT 02 Signal Generator S/N:1039.2000.02 (828141/007) - İzlenebilirlik (Traceability): TSE, 14E2105, 13.10.2014
- 3-) TSE Açık Saha Test Alanı (ASTA) / TSE Open Area Test Site (OATS) - İzlenebilirlik (Traceability): TSE, 14E2408, 27.06.2014

34.01.R.001/12.04.2007-00



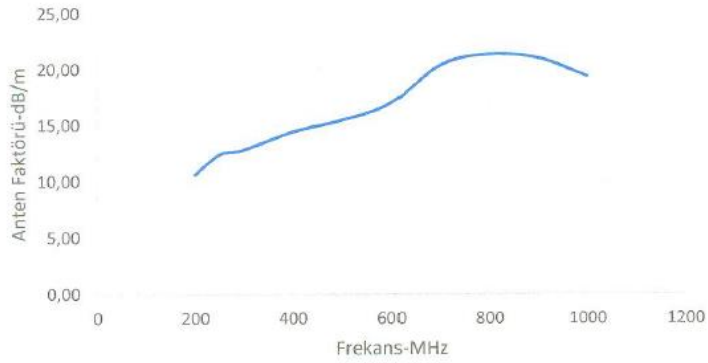
DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

TSE
15E00587
03.15

Sayfa 3 / 4

Ölçüm Sonuçları / Measurement Results

FREKANS- f_M FREQUENCY- f_M	ANTEN FAKTÖRÜ-AF ANTENNA FACTOR-AF	BELİRSİZLİK (UNCERTAINTY)
200 MHz	10,59 dB/m	$\pm 1,20$ dB
250 MHz	12,37 dB/m	$\pm 1,20$ dB
300 MHz	12,81 dB/m	$\pm 1,20$ dB
400 MHz	14,40 dB/m	$\pm 1,20$ dB
500 MHz	15,43 dB/m	$\pm 1,20$ dB
600 MHz	16,92 dB/m	$\pm 1,20$ dB
700 MHz	20,33 dB/m	$\pm 1,20$ dB
800 MHz	21,32 dB/m	$\pm 1,20$ dB
900 MHz	20,98 dB/m	$\pm 1,20$ dB
1000 MHz	19,36 dB/m	$\pm 1,20$ dB



34.01.R.001/12.04.2007-00



DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

TSE
15E00587
03.15

Sayfa 4 / 4

Ölçüm Belirsizliği (Measurement Uncertainty)

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart belirsizliğin, $k=2$ olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucu bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır. Ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k=2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The measurement uncertainty was calculated in accordance with GUM and EA-4/02 documents.

Açıklama ve Yorumlar (Remarks)

Kalibrasyon sonuçları sadece kalibrasyonu yapılan antene aittir. Cihazın performansı açısından uygun çevre şartlarında kullanımından ve uygun kalibrasyon periyotlarında kalibre edilmesinden kullanıcı sorumludur. / *The calibration results belong only to the antenna which calibrated. The user is responsible for the instrument to be calibrated at appropriate calibration periods and using the device in appropriate environmental conditions.*

34.01.R.001/12.04.2007-00

EK B



TÜBİTAK ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ

Kalibrasyon Sertifikası Calibration Certificate

TÜBİTAK
UME
G1ER-0130
11-13

Cihazın Sahibi / Adresi : TSE DENEY LABORATUVARLARI MERKEZİ BAŞKANLIĞI
Customer / Address ELEKTROTEKNİK LAB. MÜDÜRLÜĞÜ
Çayırova Tren İstasyonu Yanı Çayırova 41410 Gebze - KOCAELİ

İstek Numarası : 2013.01976
Order No.

Makine / Cihaz : Bikonik Anten
Instrument / Device Biconical Antenna

İmalatçı : Rohde & Schwarz
Manufacturer

Tip : HK116
Type

Seri Numarası : 846653/008
Serial Number

Kalibrasyon Tarihi : 13.11.2013 - 14.11.2013
Date of Calibration

Sertifikanın Sayfa Sayısı : 4
Total Number of Pages

Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri gerçekleştiren ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler. UME, BIPM nezdinde Karşılıklı Tanınma Anlaşmasına (MRA) taraf bir kuruluştur.
This calibration certificate documents traceability to national standards, which realize units of measurement according to the International System of Units (SI). UME is a signatory of the BIPM Mutual Recognition Arrangement (MRA).

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir.
Measurement results, expanded uncertainties and calibration methods are given on the following pages, which are part of this certificate.

18.11.2013

Tarih
Date



F. Üstüner

Dr. Fatih ÜSTÜNER

Enstitü Müdür Vekili
Acting Director

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi PK 54 41470 Gebze-Kocaeli / TÜRKİYE T +90 262 679 50 00 F +90 262 679 50 01 www.ume.tubitak.gov.tr

FRM-05-U-10-01/Rev.B/09.04.2009

Sayfa 2 / 4 Page	TÜBİTAK ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ NATIONAL METROLOGY INSTITUTE	TÜBİTAK UME G1ER-0130 11-13
---------------------	---	--------------------------------------

Makine / Cihaz

Instrument / Device

Sıra No.	Cihaz Adı	Üretici Firma	Model	Seri No.	Çalışma Aralığı
1	Bikonik Anten	R&S	HK116	846653 / 008	20 MHz – 300 MHz

Kalibrasyonun Yapıldığı Yer

Location

TÜBİTAK UME

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi

Date of Receipt of the Device

13.11.2013

Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihaz(lar)

Reference(s) Used in Calibration

Sıra No	Cihaz Adı	Üretici Firma	Tip / Model	Seri No	İzlenebilirlik
1	Açık Saha Deney Alanı	Siepel		-	UME, G1ER-0045, 18.03.2011
2	EMI Alıcı	Rohde & Schwarz	ESIB40	100150/040	UME, G1ZF-0030, 18.05.2012
3	İşaret Üretici	IFR Inc.	2023A	202304/703	UME, G1ZF-0079, 24.09.2012

Kalibrasyon Yöntemi ve Prosedürü

Calibration Method and Procedure

Kalibrasyon işlemi, "TLM-05-G1ER-04-38 Yönlü Anten Kalibrasyon Talimatı" ve ANSI C63.5 standardı uyarınca 10 m mesafede CISPR NSA ölçümleri ile uyumlu açık saha deney alanında 50 Ω'luk bir ölçüm alıcısı ile gerçekleştirilmiştir

Çevre Şartları

Environmental Conditions

Kontrol Odası

Ortam Sıcaklığı : (23 ± 5) °C

Bağıl Nem Değeri : % (45 ± 15)

ASDA

Ortam Sıcaklığı : (40 ± 15) °C

Bağıl Nem Değeri : % (60 ± 20)

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.

This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi PK 54 41470 Kocaeli / TÜRKİYE T +90 262 679 50 00 F +90 262 679 50 01 www.ume.tubitak.gov.tr

FRM-05-UJ-10-01/Rev.3/09.04.2009

Kalibrasyon Sonuçları

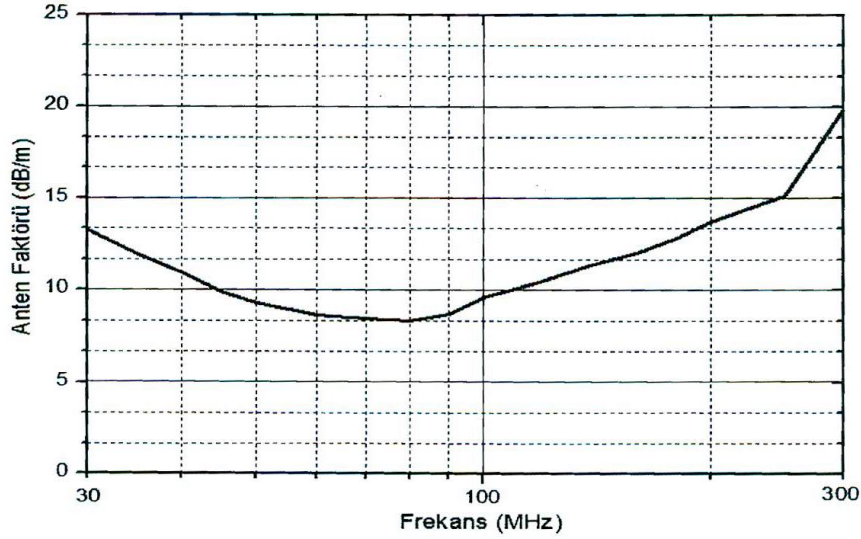
Calibration Results

Tablo 1. 846653 / 008 seri numaralı bikonik anten kalibrasyon sonuçları
(50 Ω' luk bir ölçüm alıcısı için)

Frekans (MHz)	Anten Faktörü (dB/m)	Frekans (MHz)	Anten Faktörü (dB/m)
30	13,2	100	9,6
35	11,9	120	10,5
40	10,9	140	11,4
45	9,9	160	12,0
50	9,3	180	12,8
60	8,6	200	13,7
70	8,4	250	15,1
80	8,3	300	19,9
90	8,7		

$$E [dB\mu V/m] = V [dB\mu V] + AF [dB/m]$$

(V= Ölçüm cihazında okunan değer, E=Elektrik alan değeri, AF=Anten Faktörü)



Şekil 1. Anten faktörünün grafiksel gösterimi

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Sayfa 4 / 4 Page	TÜBİTAK ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ NATIONAL METROLOGY INSTITUTE	TÜBİTAK UME G1ER-0130 11-13
---------------------	---	--------------------------------------

Ölçüm Belirsizliği

Measurement Uncertainty

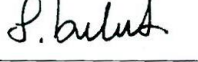
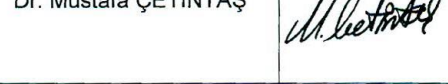
Ölçüm Belirsizliği 1,5 dB' dir

Beyan edilen genişletilmiş belirsizlik değeri, standart belirsizliğin normal dağılım için yaklaşık % 95 güvenilirlik seviyesini sağlayan k=2 kapsam faktörü ile çarpımının sonucudur. Standart ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02 dokümanlarına uygun olarak belirlenmiştir.

Görüşler, Açıklamalar ve Uygunluk Beyanı

Comments, Remarks and Statement of Compliance

Kalibrasyon sonuçları sadece kalibrasyonu yapılan Bikonik Anten cihazına aittir. Cihazın performansı için gerekli çevre şartlarında kullanımından ve uygun aralıklarla kalibre edilmesinin sağlanmasından kullanıcı sorumludur.

Kalibrasyonu Yapan(lar)		Laboratuvar Sorumlusu	
İsim	İmza	İsim	İmza
Fatih BULUT		Dr. Mustafa ÇETİNTAŞ	
Mesut ÖZTÜRK			

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi PK 54 41470 Kocaeli / TÜRKİYE T +90 262 679 50 00 F +90 262 679 50 01 www.ume.tubitak.gov.tr

FRM-05-U-10-01/Rev.5/09.04.2009



TÜBİTAK ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ

Kalibrasyon Sertifikası Calibration Certificate

TÜBİTAK
UME G1ER-0129
11-13

Cihazın Sahibi / Adresi : TSE DENEY LABORATUVARLARI MERKEZİ BAŞKANLIĞI
Customer / Address : ELEKTROTEKNİK LAB. MÜDÜRLÜĞÜ
Çayırova Tren İstasyonu Yanı Çayırova 41410 Gebze - KOCAELİ

İstek Numarası : 2013.01976
Order No.

Makine / Cihaz : Log Periyodik Anten
Instrument / Device : Log Periodic Antenna

İmalatçı : Rohde & Schwarz
Manufacturer

Tip : HL223
Type

Seri Numarası : 846731/005
Serial Number

Kalibrasyon Tarihi : 11.11.2013 - 12.11.2013
Date of Calibration

Sertifikanın Sayfa Sayısı : 4
Total Number of Pages

Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri gerçekleştiren ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler. UME, BIPM nezdinde Karşılıklı Tanınma Anlaşmasına (MRA) taraf bir kuruluştur.
This calibration certificate documents traceability to national standards, which realize units of measurement according to the International System of Units (SI). UME is a signatory of the BIPM Mutual Recognition Arrangement (MRA).

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir.
Measurement results, expanded uncertainties and calibration methods are given on the following pages, which are part of this certificate.

18.11.2013

Tarih
Date



F. Üstüner

Dr. Fatih ÜSTÜNER

Enstitü Müdür Vekili
Acting Director

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi PK 54 41470 Gebze-Kocaeli / TÜRKİYE T +90 262 679 50 00 F +90 262 679 50 01 www.ume.tubitak.gov.tr

FRN-05-UL-10-01/Rev.2/09.04.2009

Sayfa 2 / 4 Page	TÜBİTAK ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ NATIONAL METROLOGY INSTITUTE	TÜBİTAK UME G1ER-0129 11-13
---------------------	---	--------------------------------------

Makine / Cihaz

Instrument / Device

Sıra No.	Cihaz Adı	Üretici Firma	Model	Seri No.	Çalışma Aralığı
1	Log Periyodik Anten	R&S	HL223	846731/005	200 MHz – 1.3 GHz

Kalibrasyonun Yapıldığı Yer

Location

TÜBİTAK UME

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi

Date of Receipt of the Device

11.11.2013

Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihaz(lar)

Reference(s) Used in Calibration

Sıra No	Cihaz Adı	Üretici Firma	Tip / Model	Seri No	İzlenebilirlik
1	Açık Saha Deney Alanı	Siepel		-	UME, G1ER-0045, 18.03.2011
2	EMI Alıcı	Rohde & Schwarz	ESIB40	100150/040	UME, G1ZF-0030, 18.05.2012
3	İşaret Üretici	IFR Inc.	2023A	202304/703	UME, G1ZF-0079, 24.09.2012

Kalibrasyon Yöntemi ve Prosedürü

Calibration Method and Procedure

Kalibrasyon işlemi, "TLM-05-G1ER-04-38 Yönlü Anten Kalibrasyon Talimatı" ve ANSI C63.5 standardı uyarınca 10 m mesafede CISPR NSA ölçümleri ile uyumlu açık saha deney alanında 50 Ω'lık bir ölçüm alıcısı ile gerçekleştirilmiştir.

Çevre Şartları

Environmental Conditions

Kontrol Odası

Ortam Sıcaklığı : (23 ± 5) °C

Bağıl Nem Değeri : % (45 ± 15)

ASDA

Ortam Sıcaklığı : (40 ± 15) °C

Bağıl Nem Değeri : % (60 ± 20)

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi PK 54 41470 Kocaeli / TÜRKİYE T +90 262 679 50 00 F +90 262 679 50 01 www.ume.tubitak.gov.tr

FRM-05-U-10-01/Rev.B:09.04.2009

Sayfa 3 / 4 Page	TÜBİTAK ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ NATIONAL METROLOGY INSTITUTE	TÜBİTAK UME G1ER-0129 11-13
---------------------	---	--------------------------------------

Kalibrasyon Sonuçları

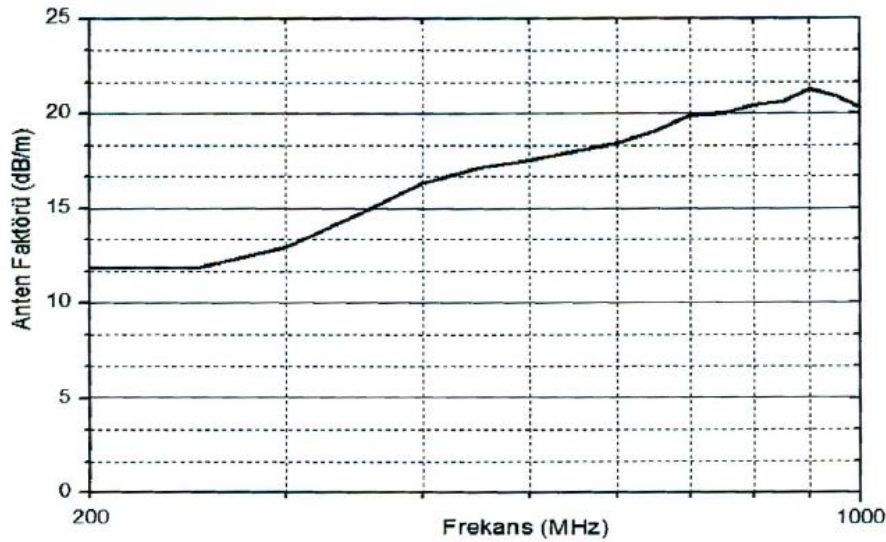
Calibration Results

Tablo 1. 846731/005 seri numaralı log periyodik anten kalibrasyon sonuçları
(50 Ω' luk bir ölçüm alıcısı için)

Frekans (MHz)	Anten Faktörü (dB/m)	Frekans (MHz)	Anten Faktörü (dB/m)
200	11,8	650	19,1
250	11,8	700	19,9
300	12,9	750	20,0
350	14,7	800	20,4
400	16,3	850	20,6
450	17,1	900	21,3
500	17,5	950	20,9
550	18,0	1000	20,3
600	18,4		

$$E [dB\mu V/m] = V [dB\mu V] + AF [dB/m]$$

(V= Ölçüm cihazında okunan değer, E=Elektrik alan değeri, AF=Anten Faktörü)



Şekil 1. Anten faktörünün grafiksel gösterimi

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi PK 54 41470 Kocaeli / TÜRKİYE T +90 262 679 50 00 F +90 262 679 50 01 www.ume.tubitak.gov.tr

FRM-05-U-10-01/Rev.5/03.04.2009

Sayfa 4 / 4 Page	TÜBİTAK ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ NATIONAL METROLOGY INSTITUTE	TÜBİTAK UME G1ER-0129 11-13
---------------------	---	--------------------------------------

Ölçüm Belirsizliği

Measurement Uncertainty

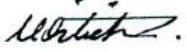
Ölçüm Belirsizliği 1,5 dB' dir

Beyan edilen genişletilmiş belirsizlik değeri, standart belirsizliğin normal dağılım için yaklaşık % 95 güvenilirlik seviyesini sağlayan k=2 kapsam faktörü ile çarpımının sonucudur. Standart ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02 dokümanlarına uygun olarak belirlenmiştir.

Görüşler, Açıklamalar ve Uygunluk Beyanı

Comments, Remarks and Statement of Compliance

Kalibrasyonu sonuçları sadece kalibrasyonu yapılan Log Periyodik Anten cihazına aittir. Cihazın performansı için gerekli çevre şartlarında kullanımından ve uygun aralıklarla kalibre edilmesinin sağlanmasından kullanıcı sorumludur.

Kalibrasyonu Yapan(lar) <i>Performed By</i>		Laboratuvar Sorumlusu <i>Head of the Laboratory</i>	
İsim	İmza	İsim	İmza
Fatih BULUT		Dr. Mustafa ÇETİNTAŞ	
Mesut ÖZTÜRK			

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi PK 54 41470 Kocaeli / TÜRKİYE T +90 262 679 50 00 F +90 262 679 50 01 www.ume.tubitak.gov.tr

FRN-05-U-10-01/Rev.8/09.04.2009



TÜRKAK
TÜRK AKREDİTASYON KURUMU
TURKISH ACCREDITATION AGENCY
tarafından akredite edilmiş
TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ

DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI



AB-0002-K

14E2104

10.14

Kalibrasyon Sertifikası
Calibration Certificate

Cihazın Sahibi/Adresi <i>Customer/Address</i>	TSE DKMB Gebze Kal. Müdürlüğü (Elektriksel.Kal.Lab.) Çayırova Tren İstasyonu Yanı Gebze/KOCAELİ
İstek Numarası <i>Order No.</i>	2771/1
Makine/Cihaz <i>Instrument/Device</i>	SPEKTRUM ANALİZÖRÜ
İmalatçı <i>Manufacturer</i>	HEWLETT PACKARD
Tip <i>Type</i>	70004A
Seri Numarası <i>Serial Number</i>	3709A05086
Kalibrasyon Tarihi <i>Date of Calibration</i>	23.10.2014
Sertifikanın Sayfa Sayısı <i>Number of pages of the Certificate</i>	5

Bu Kalibrasyon Sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

Kalibrasyon sertifikalarının tanınması konusunda Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) ile Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) arasında karşılıklı tanıma antlaşması imzalanmıştır.
Turkish Accreditation Agency (TÜRKAK) is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for the Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation (ILAC) for the Mutual recognition of calibration certificates.

Bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları takip eden sayfalarda verilmiştir.
Measurement results, expanded measurement uncertainties and calibration methods which are the complementary parts of this certificate, are given in the following pages.

Mühür
Seal



27.11.2014

Tarih
Date

Kalibrasyonu Yapan
Calibrated by

Emin Cevat YUCALAR

Laboratuvar Müdürü
Head of the Calibration Laboratory

Ali Can KUYRUKLUYILDIZ

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen veya tamamen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced partially or fully without the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Necatibey Cad. No: 112 Bakanlıklar - ANKARA
Tel: 0 312 416 65 08 - Faks: 0 312 416 64 18

BURSA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Organize Sanayi Bölgesi Kırmızı Cd. No: 6 Nilüfer-BURSA
Tel: 0 224 243 80 00 - Faks: 0 224 243 83 21

GEBZE KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Çayırova Tren İstasyonu Yanı Çayırova Gebze - KOCAELİ
Tel: 0 262 723 15 56 - Faks: 0 262 723 16 08

www.tse.org.tr



Makine/Cihaz (Object)

Kalibrasyonu yapılan cihaz **HEWLETT PACKARD** marka, **70004A** model, **3709A05086** seri numaralı, **MODULAR SPECTRUM ANALYZER SYSTEM** 'dir.

Bulunduğu Yer (Place)

Kalibrasyon TSE Gebze Kalibrasyon Müdürlüğü Elektriksel Kalibrasyon Laboratuvar'ında yapılmıştır.

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi (Date of Receipt of Device)

23.10.2014

Prosedür (Procedures)

UME tarafından realize edilen elektriksel birimlere göre kalibrasyonu yapılmış referans cihazdan elde edilen değerler, cihazın giriş terminallerine uygulanarak referans cihaz değeri ile cihazın gösterge değerleri karşılaştırılmıştır. Referans Cihaz değerleri raporda "GERÇEK DEĞER" olarak yer almıştır.

Ölçüm Şartları (Measurement Conditions)

Ölçümlere, cihaz ortam şartlarına uyum sağladıktan sonra başlanmıştır.

Çevre Şartları (Environmental Conditions)

Ortam Sıcaklığı / Ambient temperature (23 ± 2) °C
Bağıl Nem / Relative humidity (50 ± 20) % Rh

Ölçüm Sonuçları (Measurement Results)

Arka sayfalarda verilmiştir. / Given in next pages.

Ölçüm Belirsizliği (Measurement Uncertainty)

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart belirsizliğin, k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucu bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

Kalibrasyonda Kullanılan Techizat (Calibration Equipment)

HP Marka 83732B Model US37100697 Seri Numaralı Sinyal Generatörü. (İzlenebilirlik TSE GEBZE)
IFR Marka 2030 Model 203001/180 Seri Numaralı Sinyal Generatörü. (İzlenebilirlik TSE GEBZE)
HP Marka 5351B Model 3049A01685 Seri Numaralı Frekans Sayıcı. (İzlenebilirlik TÜBİTAK UME)
HP Marka 438A Model 3513U06037 Seri Numaralı Güç Metre. (İzlenebilirlik TÜBİTAK UME)
HP Marka 8482A Model 3318A29815 Seri Numaralı Güç Sensörü. (İzlenebilirlik TÜBİTAK UME)
HP Marka 8481A Model 3318A99614 Seri Numaralı Güç Sensörü. (İzlenebilirlik TÜBİTAK UME)
HP Marka 11667B Model 09975 Seri Numaralı Power Splitter. (İzlenebilirlik TSE GEBZE)

Gerektiğinde Yorum (Remarks)



Ölçüm Sonuçları

ÖLÇÜM BÜYÜKLÜĞÜ	:RF GENLİK, FREKANS (CAL OUT)		
BÖLGE	GÖSTERGE DEĞERİ	GERÇEK DEĞER	BELİRSİZLİK
	300 MHz	300,000 012 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	-10 dBm *	-10,03 dBm	$\pm 0,2\text{dB}$

ÖLÇÜM BÜYÜKLÜĞÜ	:FREKANS (INPUT 50 Ω , RF LEVEL=0 dBm)		
BÖLGE	GERÇEK DEĞER	GÖSTERGE DEĞERİ	BELİRSİZLİK
SPAN 100 Hz	10 kHz	10,000 kHz	$1 \cdot 10^{-4}$
	50 kHz	50,000 kHz	$2 \cdot 10^{-5}$
	100 kHz	100,000 kHz	$1 \cdot 10^{-5}$
	500 kHz	500,000 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	1 MHz	1,000 001 MHz	$1 \cdot 10^{-6}$
	3 MHz	3,000 001 MHz	$5 \cdot 10^{-7}$
	5 MHz	5,000 001 MHz	$2 \cdot 10^{-7}$
	7 MHz	7,000 001 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	10 MHz	10,000 001 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	30 MHz	30,000 001 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	50 MHz	50,000 001 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	70 MHz	70,000 000 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	100 MHz	99,999 999 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	300 MHz	299,999 994 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	500 MHz	499,999 985 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	700 MHz	699,999 984 MHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	1 GHz	0,999 999 967 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
SPAN 1 kHz	2 GHz	1,999 999 949 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	3 GHz	2,999 999 923 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	5 GHz	4,999 999 871 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	7 GHz	6,999 999 818 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	9 GHz	8,999 999 765 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	10 GHz	9,999 999 737 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	13 GHz	12,999 999 660 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
SPAN 2 kHz	16 GHz	15,999 999 580 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	18 GHz	17,999 999 529 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$
	20 GHz	19,999 999 476 GHz	$1 \cdot 10^{-7}$



DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

AB-0002-K

14E2104

10.14

Sayfa (Page) 4 / 5

ÖLÇÜM BÜYÜKLÜĞÜ		:RF GENLİK * (INPUT 50 Ω)	
BÖLGE	GERÇEK DEĞER	GÖSTERGE DEĞERİ	BELİRSİZLİK
100 kHz	-15,03 dBm	-13,80 dBm	± 0,2 dB
	-0,04 dBm	1,19 dBm	± 0,2 dB
	12,05 dBm	13,29 dBm	± 0,2 dB
1 MHz	-15,03 dBm	-14,27 dBm	± 0,2 dB
	-0,04 dBm	0,72 dBm	± 0,2 dB
	12,04 dBm	12,82 dBm	± 0,2 dB
10 MHz	-35,00 dBm	-34,28 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-14,35 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	0,60 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	15,60 dBm	± 0,2 dB
30 MHz	-35,00 dBm	-34,32 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-14,41 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	0,58 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	15,60 dBm	± 0,2 dB
100 MHz	-35,01 dBm	-34,38 dBm	± 0,2 dB
	-15,01 dBm	-14,46 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	0,51 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	15,51 dBm	± 0,2 dB
300 MHz	-35,00 dBm	-34,68 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-14,71 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	0,24 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	15,27 dBm	± 0,2 dB
500 MHz	-35,01 dBm	-35,02 dBm	± 0,2 dB
	-15,01 dBm	-15,00 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	-0,01 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	15,01 dBm	± 0,2 dB
1 GHz	-35,03 dBm	-35,16 dBm	± 0,2 dB
	-15,03 dBm	-15,09 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	-0,10 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	14,86 dBm	± 0,2 dB

*TÜRKAK Akreditasyon kapsamı dışındadır.

34.01.R.001/12.04.2007-00



DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

AB-0002-K

14E2104

10.14

Sayfa (Page) 5 / 5

ÖLÇÜM BÜYÜKLÜĞÜ		:RF GENLİK * (INPUT 50 Ω)	
BÖLGE	GERÇEK DEĞER	GÖSTERGE DEĞERİ	BELİRSİZLİK
2 GHz	-35,03 dBm	-35,21 dBm	± 0,2 dB
	-15,03 dBm	-15,11 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	0,10 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	14,93 dBm	± 0,2 dB
3 GHz	-35,00 dBm	-35,80 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-15,67 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	-0,71 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	14,32 dBm	± 0,2 dB
5 GHz	-35,00 dBm	-36,02 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-15,76 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	-0,65 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	14,25 dBm	± 0,2 dB
7 GHz	-35,00 dBm	-35,88 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-15,74 dBm	± 0,2 dB
	-0,01 dBm	-0,61 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	14,58 dBm	± 0,2 dB
10 GHz	-35,00 dBm	-37,17 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-16,87 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	-1,91 dBm	± 0,2 dB
	15,00 dBm	13,05 dBm	± 0,2 dB
13 GHz	-32,01 dBm	-32,35 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-12,03 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	-0,01 dBm	± 0,2 dB
	14,00 dBm	14,23 dBm	± 0,2 dB
16 GHz	-35,00 dBm	-34,37 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-14,47 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	-0,10 dBm	± 0,2 dB
	14,00 dBm	14,50 dBm	± 0,2 dB
18 GHz	-35,00 dBm	-34,16 dBm	± 0,2 dB
	-15,00 dBm	-14,45 dBm	± 0,2 dB
	0,00 dBm	0,44 dBm	± 0,2 dB
	14,00 dBm	14,46 dBm	± 0,2 dB

*TÜRKAK Akreditasyon kapsamı dışındadır.

34.01.R.001/12.04.2007-00



TÜRKAK
TÜRK AKREDİTASYON KURUMU
TURKISH ACCREDITATION AGENCY

tarafından akredite edilmiş
TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ

DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI



Kalibrasyon
TS EN ISO/IEC 17025
AB-0002-K

AB-0002-K

14E2105

10.14

Kalibrasyon Sertifikası
Calibration Certificate

Cihazın Sahibi/Adresi Customer/Address	TSE DKMB Gebze Elektroteknik Lab. Müd. Çayırova Tren İstasyonu Yanı Gebze/KOCAELİ
İstek Numarası Order No.	2772/1
Makine/Cihaz Instrument/Device	İŞARET ÜRETECİ
İmalatçı Manufacturer	R&S
Tip Type	SMT 02
Seri Numarası Serial Number	828141 / 007
Kalibrasyon Tarihi Date of Calibration	13.10.2014
Sertifikanın Sayfa Sayısı Number of pages of the Certificate	4

Bu Kalibrasyon Sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

Kalibrasyon sertifikalarının tanınması konusunda Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) ile Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) arasında karşılıklı tanıma anlaşması imzalanmıştır.
Turkish Accreditation Agency (TURKAK) is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for the Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation (ILAC) for the Mutual recognition of calibration certificates.

Bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları takip eden sayfalarda verilmiştir.
Measurement results, expanded measurement uncertainties and calibration methods which are the complementary parts of this certificate, are given in the following pages.

Mühür
Seal



27.11.2014

Kalibrasyonu Yapan
Calibrated by

Emin Cevat YUCALAR

Laboratuvar Müdürü
Head of the Calibration Laboratory

Ali Can KUYRUKLUYILDIZ

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen veya tamamen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced partially or fully without the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

ANKARA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Necatibey Cad. No: 112 Bakanlıklar - ANKARA
Tel: 0 312 416 65 08 - Faks: 0 312 416 64 18

BURSA KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Organize Sanayi Bölgesi Kırmızı Cd. No: 6 Nilüfer-BURSA
Tel: 0 224 243 80 00 - Faks: 0 224 243 83 21

GEBZE KALİBRASYON MÜDÜRLÜĞÜ
Çayırova Tren İstasyonu Yanı Çayırova Gebze - KOCAELİ
Tel: 0 262 723 15 56 - Faks: 0 262 723 16 08

www.tse.org.tr



DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

AB-0002-K

14E2105

10.14

Sayfa (Page) 2 / 4

Makine/Cihaz (Object)

Kalibrasyonu yapılan cihaz R&S marka, SMT 02 model, 828141 / 007 seri numaralı, Sinyal Generatörü'dür.

Bulunduğu Yer (Place)

Kalibrasyon TSE Gebze Kalibrasyon Müdürlüğü Elektriksel Kalibrasyon Laboratuvar'ında yapılmıştır.

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi (Date of Receipt of Device)

13.10.2014

Prosedür (Procedures)

UME tarafından realize edilen elektriksel birimlere göre kalibrasyonu yapılmış referans cihazdan elde edilen değerler, cihazın giriş terminallerine uygulanarak referans cihaz değeri ile cihazın gösterge değerleri karşılaştırılmıştır. Referans Cihaz değerleri raporda "GERÇEK DEĞER" olarak yer almıştır.

Ölçüm Şartları (Measurement Conditions)

Ölçümler, cihaz ortam şartlarına uyum sağladıktan ve bir saat ısınma süresinden sonra kalibrasyon işlemleri başlanmıştır.

Cevre Şartları (Environmental Conditions)

Sıcaklık : (23 ± 2) °C Nem : (50 ± 20) %

Ölçüm Sonuçları (Measurement Results)

Arka sayfalarda verilmiştir. / Given in the next pages.

Ölçüm Belirsizliği (Measurement Uncertainty)

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart belirsizliğin, k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucu bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

Kalibrasyonda Kullanılan Techizat (Calibration Equipment)

HP Marka 5351B Model 3049A01685 Seri Numaralı Frekans Sayıcı. (İzlenebilirlik – UME)
HP Marka 438A Model 3513U6037 Seri Numaralı Güç Metre. (İzlenebilirlik – UME)
HP Marka 8901B Model 3704A05713 Seri Numaralı Modülasyon Analizörü. (İzlenebilirlik – UME)
HP Marka 8482A Model 3318A29815 Seri Numaralı Güç Sensörü. (İzlenebilirlik – UME)
HP Marka 8481A Model 3318A99614 Seri Numaralı Güç Sensörü. (İzlenebilirlik – UME)

Gerektiğinde Yorum (Remarks)

34.01.R.001/12.04.2007-00



Ölçüm Sonuçları

ÖLÇÜM BÜYÜKLÜĞÜ : ÖLÇÜM BÜYÜKLÜĞÜ: FREKANS (LEVEL = -10 dBm)			
BÖLGE	GÖSTERGE DEĞERİ	GERÇEK DEĞER	BELİRSİZLİK
	5,000 0 kHz	4,999 992 kHz	$4 \cdot 10^{-6}$
	10,000 0 kHz	9,999 984 kHz	$4 \cdot 10^{-6}$
	30,000 0 kHz	29,999 950 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	50,000 0 kHz	49,999 916 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	100,000 0 kHz	99,999 834 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	500,000 0 kHz	499,999 17 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	1,000 000 0 MHz	999,998 34 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	5,000 000 0 MHz	4,999 991 7 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	10,000 000 0 MHz	9,999 983 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	50,000 000 0 MHz	49,999 917 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	100,000 000 0 MHz	99,999 834 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	300,000 000 0 MHz	299,999 502 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	500,000 000 0 MHz	499,999 171 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	700,000 000 0 MHz	699,998 840 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	900,000 000 0 MHz	899,998 508 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	1,000 000 000 0 GHz	999,998 343 kHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	1,300 000 000 0 GHz	1299,997 845 MHz	$2 \cdot 10^{-6}$
	1,500 000 000 0 GHz	1499,997 514 MHz	$2 \cdot 10^{-6}$

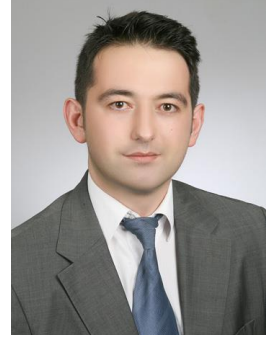


ÖLÇÜM BÜYÜKLÜĞÜ	: GENLİK *		
BÖLGE	GÖSTERGE DEĞERİ	GERÇEK DEĞER	BELİRSİZLİK
	-20 dBm ; 100 MHz	-20,04 dBm	± 0,1 dB
	-20 dBm ; 300 MHz	-19,97 dBm	± 0,1 dB
	-20 dBm ; 1000 MHz	-20,00 dBm	± 0,1 dB
	-20 dBm ; 1500 MHz	-19,96 dBm	± 0,1 dB
	-10 dBm ; 100 MHz	-9,97 dBm	± 0,1 dB
	-10 dBm ; 300 MHz	-9,96 dBm	± 0,1 dB
	-10 dBm ; 1000 MHz	-9,97 dBm	± 0,1 dB
	-10 dBm ; 1500 MHz	-9,92 dBm	± 0,1 dB
	0 dBm ; 100 MHz	0,03 dBm	± 0,1 dB
	0 dBm ; 300 MHz	0,03 dBm	± 0,1 dB
	0 dBm ; 1000 MHz	0,03 dBm	± 0,1 dB
	0 dBm ; 1500 MHz	0,04 dBm	± 0,1 dB
	10 dBm ; 100 MHz	10,02 dBm	± 0,1 dB
	10 dBm ; 300 MHz	10,03 dBm	± 0,1 dB
	10 dBm ; 1000 MHz	10,03 dBm	± 0,1 dB
	10 dBm ; 1500 MHz	10,06 dBm	± 0,1 dB

ÖLÇÜM BÜYÜKLÜĞÜ	:AM MODÜLASYON (AM SOURCE 1 kHz) * (FREKANS=100 MHz; RF LEVEL = 0 dBm)		
BÖLGE	GÖSTERGE DEĞERİ	GERÇEK DEĞER	BELİRSİZLİK
	%10	%10,45	% 0,5
	%30	%31,13	% 0,5
	%50	%51,8	% 0,5
	%70	%72,2	% 0,5
	%90	%91,9	% 0,5

(*) : TÜRKAK AKREDİTASYON KAPSAMI DIŞINDADIR

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : İlkan COŞKUN
Doğum Yeri ve Tarihi : Kocaeli, 05.03.1987
E-Posta : coskunilkcan@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
- **Lise** : 2005, Kocaeli Derince Merkez Bankası Anadolu Lisesi, Fen Bilimleri

MESLEKİ DENEYİMLER:

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı –Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Mühendis, 2011, ANKARA

Türk Standardları Enstitüsü, Gebze Kalibrasyon Müdürlüğü, Mühendis, İşe giriş: 2011, KOCAELİ

