DIŞ MEKAN ELEKTROMANYETİK MARUZİYET SEVİYESİNİN YAPAY SİNİR AĞI VE BULANIK MANTIK İLE TAHMİNİ

Bursa Uludağ Üniversitesi

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞ MEKAN ELEKTROMANYETİK MARUZİYET SEVİYESİNİN YAPAY SİNİR AĞI VE BULANIK MANTIK İLE TAHMİNİ

Muhammed Rafet BAKCAN
0000-0002-2291-2225

Dr. Öğr. Üyesi Esin KARPAT
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2022

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

DIŞ MEKAN ELEKTROMANYETİK MARUZİYET SEVİYESİNİN YAPAY SİNİR AĞI VE BULANIK MANTIK İLE TAHMİNİ

Muhammed Rafet BAKCAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi.Esin KARPAT

Elektromanyetik (EM) kaynakların insan hayatındaki önemi teknolojinin gelişmesiyle birlikte artmaktadır. Elektromanyetik radyasyon çevrede var olan elektronik cihazları ve daha da önemlisi insan sağlığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Günümüzde bahsedilen sorunları tetikleyebilen yapılardan biri olan baz istasyonu bir bölgedeki insan yoğunluğu ile orantılı olarak radyasyon yaymaktadır. Hastaneler, konser alanları, askeri kışlalar, okullar, alışveriş merkezleri gibi insanların yoğun olarak bulunduğu alanlarda elektromanyetik maruziyet diğer bölgelere göre daha fazladır. EM seviyelerini izin verilen sınırların altında tutmak için bu alanlardaki elektromanyetik radyasyon yoğunluğu hakkında sürekli endişe göstermek önemlidir. Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Yerleşkesi'nde 55000'den fazla öğrenci ve her gün binlerce kişinin ziyaret ettiği bir tıp fakültesi hastanesi bulunmaktadır. Bu nedenle EM düzeyini tespit etmek ve bu değeri ulusal standartların altında tutmak önem arz etmektedir. Bu çalışmada, kampüs genelinde EM seviyelerini incelemek için insan yoğunluğunun çok yüksek olduğu noktalarda elektrik alan şiddetleri statik olarak ölçülmüştür. Elde edilen ölçümler sonucunda yapay sinir ağı ve bulanık mantık yöntemleri ile elektromanyetik alan şiddeti tahmini için modeller geliştirilmiştir. Oluşturulan modeller kullanılarak ölçüm yapılmayan noktalarda elektromanyetik alan seviyesi tahmini yapılmış, ölçüm sonuçlarıyla doğrulanmış ve modellerin performansları karşılaştırılmıştır Ölçüm sonuçları ve tahmin sonuçları, ulusal (BTK) ve uluslararası (ICNIRP) standartların belirlediği sınırlar içinde değerlendirilmiştir. Son olarak, ölçüm tahmin sonuçları, ölçüm noktalarına ve ortalama elektrik alan şiddeti yoğunluğuna göre haritalandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapay sinir ağları, bulanık mantık, elektromanyetik radyasyon, elektromanyetik alan ölçümü, tahmin yöntemi.

2022, x +113 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

ESTIMATING OF ELECTROMAGNETIC EXPOSURE LEVEL IN OUTDOORS WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND FUZZY LOGIC

Muhammed Rafet BAKCAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronic Engineering

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi.Esin KARPAT

The importance of electromagnetic sources in human life is increasing with the development of technology. Electromagnetic radiation triggers some problems in our lives such as electromagnetic interference and human health problems. The electromagnetic radiation level emitted by the base station increases in proportion to the density of people in an area. Electromagnetic exposure is higher in areas where people are concentrated, such as hospitals, concert venues, military barracks, schools, shopping centers, compared to other regions. It is important to show constant concern about the intensity of electromagnetic radiation in these areas in order to keep EM levels below the permissible limits. Uludağ University Görükle Campus has a medical faculty hospital, which is visited by more than 55000 students and thousands of people every day. Therefore, it is important to determine the EM level and keep this value below the national standards. In this study, electric field values were measured statically at very high human density points to examine EM levels throughout the campus. As a result of the measurements obtained, models for electromagnetic field estimation were developed with artificial neural network and fuzzy logic methods and the electromagnetic field value was estimated by determining the best estimation model at the points where no measurement was made. In addition, measurement results and estimation results are evaluated within the limits set by national (BTK) and international (ICNIRP) standards. Finally, the measurement estimation results are mapped according to the measurement points and the average electric field intensity.

Key words: Artificial neural network, fuzzy logic, electromagnetic radiation, electromagnetic field measurement, prediction method.

2022, x +113 pages.

TEŞEKKÜR

Akademik çalışmam boyunca ilminden ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Güneş YILMAZ ve Dr. Öğr. Üyesi Esin KARPAT'a teşekkürlerimi borç bilirim. Bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan aileme ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed Rafet BAKCAN
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER VE KISALTMALAR vi
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ x
1.GİRİŞ 1
1.1.Tezin Amacı ve Kapsamı 1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
3.MATERYAL ve YÖNTEM 10
3.1.Materyal 10
3.1.1.Özgül Soğurulma Oranı 10
3.1.2.Radyo Dalgaları 11
3.1.3.Elektromanyetik Dalga Yayılımı 14
3.1.4.Vektör Potansiyeli 18
3.1.5.Homojen Olmayan Vektör Potansiyel Dalga Denklemleri 22
3.1.6.Işıma ve Saçılma Denklemleri 24
3.1.6.1.Yakın Alan 25
3.1.6.2.Uzak Alan 27
3.1.6.3.Bir Antenin Uzak Alan Işıması 30
3.1.7.Baz İstasyonu için Güç Yoğunluğu 31
3.1.8.Ulusal ve Uluslararası Standartlar 34
3.1.9.Yapay Sinir Ağları 37
3.1.9.1.Yapay Sinir Ağı Mimarisi 38
3.1.9.2.Algılayıcılar 39
3.1.9.3.Ortalama Karesel Hata 40
3.1.9.4.Doğrusal Filtreler 41
3.1.9.5.Ağ Eğitimi 41
3.1.9.6.Geri Yayılım 42
3.1.10.Bulanık Mantık 44
3.1.11.Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi (MLRA) 47
3.2.Yöntem 50
3.2.1. Ölçüm 51
3.2.2. Tahmin 58
3.2.2.1. Yapay Sinir Ağları ile Tahmin 59
3.2.2.2. Bulanık Mantık ile Tahmin 62
4. BULGULAR 64
4.1. Ölçüm Bulguları 64
4.2. Model – 1 Bulguları 66
4.3. Model – 2 Bulguları 69
4.4. Model – 3 Bulguları 72
4.5. Operatörlere Göre Sınıflandırma 76
4.6. Nihai Model Sonuçları 82
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 90

KAYNAKLAR 95
EKLER 99
Ek-1 100
Ek-2 106
Ek-3 110
ÖZGEÇMİŞ 112

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
λ	Dalga boyu (m)
$\vec{A}$	Manyetik vektör potansiyeli (Wb/m)
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti (V/m)
$\vec{F}$	Elektrik vektör potansiyeli (Q/m)
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti (A/m)
$\vec{J}$	Elektrik akım yoğunluğu A/m^2
$\vec{M}$	Manyetik akım yoğunluğu (V/m^2)
q_{ev}	Elektrik yük yoğunluğu (C/m^3)
q_{mv}	Manyetik yük yoğunluğu (F/m^3)
P	Güç yoğunluğu (W/m^2)
Z	Karakteristik empedans (Ω)
ε	Elektriksel geçirgenlik (F/m)
μ	Manyetik geçirgenlik (H/m)
σ	Elektriksel iletkenliktir (S/m)
σ:	Özgül iletkenlik (S/m)
η	Öz empedans (Ω)
G	Anten kazancı (dBi)
ρ	Kütle yoğunluğu(kg/m^3)

Kısaltmalar	Açıklama
ALS	Amyotrofik Lateral Skleroz
AM	Amplitude modulation(Genlik modülasyonu)
ANN	Artificial neural network (Yapay sinir ağları)
BTK	Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu
BM	Bulanık Mantık
EM	Elektromanyetik
FM	Frequency modulation (Frekans modülasyonu)
GSM	Global System for Mobiles (Mobil İletişim İçin Küresel Sistem)
ICNIRP	Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu
ITU	International Telecommunication Union (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği)
LMS	Least mean squares (En küçük kareler)
LOS	Line of sight (Görüş alanı)
LTE	Long Term Evolution (Uzun süreli gelişim)
MF	Membership function (Üyelik fonksiyonu)
MLRA	Multiple Linear Regression Analysis (Çoklu doğrusal regresyon analizi)
MSE	Mean squared error (Ortalama Hata Karesi)
RF	Radyo frekansı
SAR	Specific Absorption Rate (Özgül emilim oranı)

TV	Televizyon
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Karasal Radyo Erişim Ağı)
YSA	Yapay Sinir Ağı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1.	ICNIRP çalışanlar için limit SAR şiddetleri……..	10
Şekil 3.2.	Uniform düzlem dalga……..…….	14
Şekil 3.3.	Elektromanyetik dalgaların yayılım bölgeleri……	25
Şekil 3.4.	Işınım alanlarının hesaplanması için koordinat sistemleri…….	26
Şekil 3.5.	Anten analizi koordinat sistemi……..	28
Şekil 3.6.	Basit nöron mimarisi……..……	38
Şekil 3.7.	Log-Sigmoid transfer fonskiyonu……..	38
Şekil 3.8.	Vektör giriş ağ mimarisi…….	39
Şekil 3.9.	Temel sinir ağı mimarisi…….	43
Şekil 3.10.	Yapay Sinir Mimarisi…….	43
Şekil 3.11.	Bulanık mantık sistemi……...	45
Şekil 3.12.	Dağılım diyagram ilişkisi……...	48
Şekil 3.13.	Doğrusal Regresyon Yaklaşımı……..	48
Şekil 3.14.	Bir hesaplamanın doğrusal regresyon yaklaşımı……	49
Şekil 3.15.	Parçalı doğrusal ile karmaşık bir ilişkinin yaklaşıklığı……..	49
Şekil 3.16.	Regresyonda ekstrapolasyon tehlikesi……	50
Şekil 3.17.	Kampüs içerisi ölçüm konumları……	51
Şekil 3.18.	Ölçüm cihazın konumlanacağı nokta…….	53
Şekil 3.19.	SRM 3006 cihazı……..……..	53
Şekil 3.20.	2 Boyutlu olarak baz istasyonu ışıma örüntüsü……..	56
Şekil 3.21.	Dikey baz istasyonu ışınım yapısı……..	56
Şekil 3.22.	Önerilen Güvenlik Mesafesi Modeli……..	57
Şekil 3.23.	Tahmin modeli seçim blok diyagramı……	59
Şekil 3.24.	Yapay sinir ağı model-1…….	60
Şekil 3.25.	Yapay sinir ağı model-2…….	61
Şekil 3.26.	Yapay sinir ağı model-3……	61
Şekil 3.27.	Bulanık mantık model-1. ……...	62
Şekil 3.28.	Bulanık mantık model-2…….	63
Şekil 3.29.	Bulanık mantık model-3……	63
Şekil 4.1.	Günlük maksimum elektrik alan şiddetleri ölçüm sonuçları……..	64
Şekil 4.2.	Günlük ortalama elektrik alan şiddetleri ölçüm sonuçları…….	65
Şekil 4.3.	Yapay sinir ağı model-1 regresyon analizi…….	67
Şekil 4.4.	Bulanık mantık model-1 regresyon analizi…….	67
Şekil 4.5.a.	Model-1 test verileri ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması…..	68
Şekil 4.5.b.	Model-1 ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması……...	69
Şekil 4.6.	Yapay sinir ağı model-2 regresyon analizi…….	70
Şekil 4.7.	Bulanık mantık model-2 regresyon analizi…….	70
Şekil 4.8.a.	Model-2 test verileri ortalama elektrik alan kıyaslaması…..…….	71
Şekil 4.8.b.	Model-2 ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması……..	72
Şekil 4.9.	Yapay sinir ağı model-3 regresyon analizi…….	73

Şekil 4.10. Bulanık mantık model-3 regresyon analizi……. 73
Şekil 4.11.a. Model -3 test verileri ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması ….. 74
Şekil 4.11.b. Model -3 ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması…….. 75
Şekil 4.12. Operatör 1 için elde edilen tahmin sonuncunun ölçüm değerleri ile karşılaştırması…….. 77
Şekil 4.13. Operatör 2 için elde edilen tahmin sonuncunun ölçüm değerleri ile karşılaştırması…….. 78
Şekil 4.14. Operatör 3 için elde edilen tahmin sonuncunun ölçüm değerleri ile karşılaştırması……..……. 79
Şekil 4.15. Diğer frekans bileşenleri için elde edilen tahmin sonuncunun ölçüm değerleri ile karşılaştırması…… 80
Şekil 4.16. MLRA-ölçüm kıyaslaması…… 81
Şekil 4.17. MLRA-Ölçüm sonuçlarının kıyaslanması…… 82
Şekil 4.18. YSA nihai modeli……. 83
Şekil 4.19. 1 Frekans bileşenli model……. 84
Şekil 4.20. 2 Frekans bileşenli model……. 85
Şekil 4.21. 3 Frekans bileşenli model……. 86
Şekil 4.22. 4 Frekans bileşenli model……. 87
Şekil 4.23. Ölçüm-farklı ek frekans bileşenli model kıyaslaması…… 88
Şekil 4.24. YSA nihai model sonucu kampüs içi genel tahmin haritalandırması… 89

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1.	Vücudun kısımları için iletkenlik ve dielektrik sabitleri……	11
Çizelge 3.2.	Frekans bantları ve kullanım alanları……	12
Çizelge 3.2.	Frekans bantları ve kullanım alanları (devam) ……	13
Çizelge 3.3.	BTK elektrik ve manyetik alan sınır şiddetleri…….	35
Çizelge 3.4.	ICNIRP elektrik ve manyetik alan sınır şiddeti……	35
Çizelge 3.5.	Çalışma koşulları altındaki elektrik ve manyetik alan sınır şiddeti..	36
Çizelge 3.6.	10 GHz'e kadar basit kısıtlamalı tavsiye edilen SAR şiddeti……	36
Çizelge 3.6.	10 GHz'e kadar basit kısıtlamalı tavsiye edilen SAR şiddeti(devam)……	36
Çizelge 3.7.	Ölçüm servis tablosu…….	54
Çizelge 3.7.	Ölçüm servis tablosu (devam) ……	55
Çizelge 4.1.	Maksimum elektrik alan şiddetleri……	65
Çizelge 4.2.	Ortalama elektrik alan şiddetleri……	66
Çizelge 4.3.	YSA-BM-Ölçüm değerleri korelasyon oranları…….	75
Çizelge 4.4.	Ölçüm MLRA katsayıları……...	80

1.GİRİŞ

Ülkemizde artan nüfusun ihtiyaçları doğrultusunda iletişim altyapısına olan talep her geçen gün artmaktadır. TV, radyo vericileri, kablosuz internet sağlayıcı noktaları ve baz istasyonları çevremizde bulunan temel iletişim dağıtım noktalarıdır. Mobil haberleşmenin artmasıyla etrafımızda bulunan baz istasyonu sayıları ve çıkış güçleri artmaktadır. Bununla birlikte bu cihazların bulunduğu her nokta elektromanyetik maruziyet kaynağıdır. Bu da beraberinde mikrodalga frekans bandındaki dalgaların canlı sağlığı üzerinde etkisi olup olmadığı tartışmasını beraberinde getirmektedir.

1.1.Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle kampüsü içerisinde ve çevresinde baz istasyonu kaynaklı elektromanyetik maruziyet tahmini ve analizi yapılmıştır. Ölçümler, 27 MHz- 3 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Belirtilen frekans aralığı, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) tarafından tahsis edilen frekans bantlarına bölünerek mobil iletişim için küresel sistem (GSM), karasal radyo erişim ağı (UMTS), uzun süreli gelişim (LTE) ve bunların dışında kalan diğer frekanslar olarak sınıflandırılmıştır. Ölçüm noktaları insan yoğunluğun fazla olduğu hastane binasının dış çevresi, metro girişi, ana giriş kapıları gibi önemli noktalar seçilmiştir. Yapılan ölçümlerin yeri ve zamanı rastgele belirlenmiştir. En önemli seçim kriteri insan yoğunluğu olarak belirlenmiştir.

Tüm ölçümler dış ortamda yapılmıştır. Alınan ölçümlerde, konum ve saat bilgisi dikkate alınmıştır. Ölçüm alınan noktalar seçilirken insan yoğunluğunun yanı sıra baz istasyonu ile görüş alanı (LOS) içerisinde olan 15 nokta belirlenmiştir. Bu noktalarda hafta içi 5 gün sabah, öğlen ve akşam olmak üzere üçer kez ölçümler tekrarlanmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları sistematik olarak enlem, boylam, gün, saat kriterleri göz önüne alınarak 6 dakikalık ortalama elektrik alan şiddeti olarak sıralanmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemleriyle kampüs içerisinde elektromanyetik maruziyet tahminleri gerçekleştirilmiştir. İlk tahminler, daha önce ölçüm yapılmış olan noktalar için gerçekleştirilerek oluşturulan yapay sinir ağları

(YSA) ve bulanık mantık (BM) modellerinin doğruluğu gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan BM ve YSA yöntemleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak doğrusal olmayan elektromanyetik alan tahmininde hangi tahmin modeli ile daha yüksek doğruluk değeri ile sonuca ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu modeller ile belirli sınırları kapsayan baz istasyonları bölgesinde elektromanyetik (EM) alan tahminleri yapılarak nihai bir model tasarlanmıştır.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bir mobil iletişim sisteminde sinyallerin gönderilmesi ve alınması ile haberleşmenin sağlanması açısından baz istasyonunun anteni önemli bir elektromanyetik ışınım kaynağıdır. Bir antenin sahip olduğu iletim gücü, anten kazancı, yarı güç gibi belirli karakteristik parametreleri vardır. Bu karakteristik parametrelere göre antenin performansı değerlendirilebilir ve hesaplanabilir. Bir baz istasyonu antenine ait parametreler elektromanyetik radyasyon formüleri ile birleştirilir. Böylece baz istasyonundaki elektromanyetik ışınım için bir simülasyon modeli ortaya çıkar. Baz istasyonunun etrafındaki çok sayıda yansıtıcı nesne nedeniyle, inceleme noktalarının yakınında zeminden yansıyan dalganın etkisi, genel boş alan yayılma modeli, gerçek ölçümlerle bazı farklılıklara sahip olmasına neden olmaktadır. Ancak uzak alan durumunda ve çevrede belirgin bir yansıtıcı yoksa hesaplama için boş alan yayılma modeli kullanılabilmektedir (Yang vd., 2013).

Literatürde yapılan çalışmalarda, 100 kHz- 3 GHz frekans bandında EM kaynaklarının radyasyon düzeyini uzun vadede gözlemlemeyi amaçlamıştır. 100 kHz–3 GHz frekans bandında olan EM kaynaklar genel olarak radar, kablosuz internet, hücresel iletişim, TV yayıncılığı, seyrüsefer, FM yayıncılığı, polis telsizi, hava trafik kontrol, kısa dalga radyo, AM yayıncılığı ve deniz radyosudur. Yapılan çalışmadaki ölçüm ve gözlem süresi 4 sn. örnekleme periyodu ile altı dakikalık ölçüm periyodu ile 7 gün 24 saat olarak gerçekleşmiştir. Altı dakikalık ölçümler için örnekleme periyodu 60 s, 5 s ve 10 s olarak tercih edilmiştir. EM dalgalarının yansıması, soğurulması ve girişimi nedeniyle karmaşık bir ortamda EM kaynağının kesin ölçümleri kolay değildir (Miclaus & Bechet, 2007).

Ayrıca cep telefonu gibi elektromanyetik sinyal temelli çalışan hareketli saçıcılar bu ölçümlerde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle kesin ölçüm değerlerine ulaşmak için uzun zaman aralıklı ölçümler daha önemlidir. Ayrıca herhangi bir baz istasyonunun radyasyon seviyesi, aynı baz istasyonuna bağlı cep telefonu kullanıcısı sayısına göre enerji tasarrufu sağlamak amacıyla ayarlanmaktadır. Bir baz istasyonunun çıkış gücü kullanıcı sayısıyla orantılı olarak artar. Hücresel iletişimin bu özelliğinden dolayı ölçüm

süresi ve periyodu yüksek hassasiyette ölçümlere ulaşmak için çok önemlidir (Seyfi, 2013).

Başka bir çalışmada, Bursa ili Nilüfer ilçesinde 2014-2019 yılları arasında yapılan manyetik alan ölçümlerinin analizi ve ölçümü yapılmıştır. Geçmiş veriler kullanılarak, bu verilerin ölçülemeyeceği noktalarda ki ölçüm değerlerinin bulunması için sinir ağı yöntemi kullanılarak ağ eğitimleri gerçekleştirilmiştir. Eğitimin ardından form uygulaması üzerinde harita hazırlanmış ve istenen ölçüm konumuna göre eğitilmiş yapay sinir ağı sonucunda hesaplanan manyetik alan şiddeti verilmiştir. Hazırlanan bu platform sayesinde bu bölgede yaşayan veya oturmak isteyen kişilerin manyetik alan kirliliğinin miktarını öğrenilmesi ve buna göre önlem alması amaçlanmıştır (Sakacı & Cerezci, 2021).

Düzensiz kentleşme ve plansız yapılaşma sonucunda büyük şehirlerde yüksek gerilim enerji nakil hatları ve trafo merkezleri birbirine çok yakındır. Bu meskenlerde yaşayan insanlar elektromanyetik alanlara maruz kalmaktadır. Elektromanyetik kirliliğin biyolojik etkileri son otuz yılda çeşitli ülkelerdeki bilim adamları tarafından araştırılmış ve elektromanyetik kirliliğin özellikle kanser vakaları üzerindeki etkilerine dair bazı bulgular elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar kesin sonuçlar vermese dahi elde edilen bulgular ışığında gelişmiş ülkelerde elektromanyetik alanlar ile ilgili bazı standartlar oluşturulmuştur. Elektromanyetik alan, canlı organizmaları hem olumlu hem de olumsuz şekilde etkiler. Bu konudaki çalışmalar klinik ortamlarda hücre ve hayvan modelleri üzerinde yapılmaktadır.

İnsanın kendi manyetik alanı ile dünyanın manyetik alanı arasındaki uyumu çeşitli nedenlerle bozulabilir. Bu, konutların sahip olduğu manyetik alanın büyüklüğünden kaynaklanır. Tüm alanların üç değişkeni vardır; frekans, dönüş yönü ve dönüşün büyüklüğü veya gücü. Bu değişkenler insan vücuduna uyum sağladığında insan vücudu kendi enerjisini destekler. Bu manyetik etkileşim hücre zarlarında madde alışverişini sağlar.

Bilim adamlarına göre insan vücudundaki manyetik alan eksikliği yorgunluk ve baş ağrısı gibi rahatsızlıklara neden oluyor. Elektromanyetik dalgalar sayesinde vücudun dışına manyetik alanlar verilerek bu tür sağlık sorunları tedavi edilebilir. Buna magnetoterapi tedavisi denir. Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar tıpta kullanılmasının yanı sıra gıda, tekstil ve daha da önemlisi savunma sanayi gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Biomanyetik alanın dünya dışı faktörler ve yakın çevre üzerindeki etkilerini bilmek önlem ve tedavi almak için büyük önem taşımaktadır. Elektromanyetik alanların olumlu etkilerinin yanı sıra çok farklı frekans ve dalga boylarına sahip elektromanyetik alanlar canlılar üzerinde birçok olumsuz etkiye sahiptir.

Dünyadaki tüm biyolojik görünümler elektrikseldir. Bitkilerin, hayvanların ve insanların yaratılması ve korunması, atmosferdeki ve biyosferdeki radyasyon reaksiyonları tarafından sağlanır. Tüm canlı organizmalar yaratılış ve gelişim süreçleri boyunca elektrik, manyetik ve elektromanyetik alanlara uyum sağlamış ve bu alanlarla dengeli bir şekilde yaşamlarını sürdürmüşlerdir. Ancak diğer birçok alanda olduğu gibi bu alanların dengesi de bozulmuş ve bunun sonucunda elektromanyetik maruziyet özellikle büyük şehirleri ve dünyayı etkisi altına almaya başlamıştır. Elektromanyetik alanların etkilenen canlılar bu alanların enerjisini absorbe eder. Bazı organlar üzerindeki elektrik akımlarında değişiklikler olarak vücut üzerinde ısı artışına neden olur. Ayrıca elektromanyetik radyasyon histoblastların kimyasal yapısına zarar verir. Yapılan bilimsel çalışmalar elektromanyetik alanların bazı kanser türlerine, ALS, Alzheimer gibi nörolojik bozukluklara, baş dönmesi, baş ağrısı, uykusuzluk gibi hastalık benzeri semptomlara, depresyona, intihar girişimlerine, üreme sistemi sorunlarına ve düşüklere neden olduğunu göstermektedir.

Elektromanyetik kirliliğin etkileri çeşitli ülkelerdeki bilim adamları tarafından zaman zaman araştırılmıştır. Aynı mahallede yaşayan çocuklardan elektrik hatlarının yakınında yaşayanların kansere yakalanma olasılığının diğerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular sonucunda gelişmiş ülkelerde elektromanyetik alanlar ile ilgili bazı standartlar geliştirilmiştir. Bu standartlarda

konutların bulunduğu ortamlarda izin verilen elektromanyetik alan miktarı, mesleki olarak yüksek düzeyde elektromanyetik alanlara maruz kalma süresi ve enerji nakil hatlarındaki elektromanyetik alan miktarına dayalı faaliyetler sınırlandırılmıştır (Saim, Zerrin, & Selçuk, 2010).

Yüksek frekans elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerine etkisi hakkında literatürde çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar insanların yanı sıra bazı hayvanları, özellikle çiftlik hayvanlarını kapsayacak şekilde yapılmıştır. İnsanlar üzerinde yapılan araştırmalarda ise çocuk yetişkin ve yaşlıları kapsamaktadır. 10 yaşına kadar olan çocuklarda deri, beyin gibi dokular üzerine yüksek frekanslar uygulanarak bu etkinin değişimine olan etkileri ve yetişkinlere göre bu etkiler kıyaslanmıştır (M. Ibrani, Ahma, Hamiti, & Haxhibeqiri, 2011) .

Bunun yanı sıra yapılan bazı çalışmalarda da anne karnındaki çocuklarda baz istasyonu kaynaklı kanser riskinin olmadığı ifade edilmektedir. Kablosuz haberleşme cihazlarının bulunduğu ev ortamında bulunan 1-10 yaşlar arasındaki çocuklarla çalışma yapılmıştır. Farklı mesafelerde maruz kalınan elektromanyetik dalgalar ölçülerek vücudun doku bölgesine göre SAR şiddeti hesaplanarak uluslararası standartlar ile kıyaslanmıştır (Mimoza Ibrani, Ahma, & Hamiti, 2014).

İç mekanlarda bulunan farklı çıkış güçlerine sahip kablosuz bebek gözlem cihazı, telefon, kablosuz kulaklık gibi cihazlara yakın mesafede maruz kalınma durumunda oluşan SAR şiddeti hesaplanıp, maksimum ve ortalama maruziyet değerleri ölçümler elde edilerek incelenmiştir (Schmid, Lager, Preiner, Überbacher, & Cecil, 2007).

Mobil haberleşmenin artmasıyla etrafımızda bulunan baz istasyonu sayıları ve çıkış güçleri artmaktadır. Buda beraberinde mikrodalga frekansındaki bu dalgaların canlı sağlığı üzerinde etkisi olup olmadığı tartışmasını beraberinde getirmektedir. Ölçüm değerlerinin kullanıcı sayısı, anten yönelim açısı, tarih, saat ve konum gibi farklı parametrelere bağlı olarak istatistiksel çalışmalar epidemolojik çalışmalara katkı sağlamaktadır (Paniagua, Rufo, Jimenez, & Antolin, 2013).

Baz istasyonuna yakın yerlerde yaşayan insanlarda ters nörö davranış semptomlarının yaygınlığı, uyku düzensizliği, stres, hafızada oluşan problemler gözlenmektedir. Çocuklar, ergenler, yaşlılar ve hatta vahşi doğa üzerinde baz istasyonu tabanlı elektromanyetik kirliliğin etkileri gözlemlenmektedir (Balmori, 2015).

Çocuklar, özellikle fetüsler, diyabet, böbrek yetmezliği, kanser, bozulmuş bağışıklık ve iltihaplanmaya aşırı maruz kalma gibi birçok hastalığa sahip olabilen daha büyük oranda etkilenir. Bu radyasyonun hormonal ve sinir sistemi üzerinde de etkileri vardır, baş ağrısına, unutkanlığa, epilepsiye, konsantrasyon bozukluğuna, emilim ve uyku eksikliğine neden olur. Kısacası bu elektromanyetik radyasyonun tehlikeleri baş ağrısından kansere kadar değişebilecek şekilde çoktur (Cansız, Kurt, & Çelik, 2014).

Serçeler üzerinde yapılan çalışmada ise 900 MHz ve 1800 MHz frekansa maruz bırakılan bölgelerde erkek serçelerin daha az bulunduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu gözlem ile üreme döneminde doğa için olumsuz bir etki olacağı saptanmıştır (Everaert & Bauwens, 2007).

İnsan yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde yapılan elektromanyetik ölçüm çalışmalarında GSM bandı içerisindeki maruziyet tespit edilmiştir. Ölçüm alınan bölge içerisinde haritalama yapılarak uluslararası standartlara kıyaslanarak insan sağlığına olumsuz etki eden bölgelerin tespitleri literatürde mevcuttur.

Hücresel veri ağları için kurulan yerlerde bulunan elektromanyetik maruziyet bu ağların haberleşmesini etkileyebilir bunun için yeni metotlarla maruziyet tespiti ve azaltılması yapılmaktadır (García-Díaz, Salcedo-Sanz, Portilla-Figueras, & Jiménez-Fernández, 2013).

Elektromanyetik alanların tahmini ile ilgili literatürde yapılan çalışmalarda iç ortamda bulunan kablosuz kaynaklı elektromanyetik alan tespiti mahal içerisindeki pozisyona göre yapay sinir ağları ile tahmin edilmektedir. Cep telefonu haberleşme frekanslarına göre baz istasyonu ve cep telefonu arasında bulunan bitkisel yapıların oluşturduğu lineer

olmayan engellerin zayıflamaya etkisi de yapay sinir ağları ile tahmin edilmektedir (Gómez-Pérez, Crego-García, Cuiñas, & Caldeirinha, 2017).

Şehir içi karmaşık yerleşimin bulunduğu yerlerde binalar içerisindeki ev, okul gibi yerlerde yapı malzemeleri, cam boyutları, cam sayısı gibi parametrelerde ele alınarak yapay sinir ağları ile elektromanyetik maruziyet tespitinde kullanılmaktadır (Beekhuizen vd., 2014).

Baz istasyonu kaynaklı elektromanyetik kirliliği tespit etmek için literatürde çalışmalar mevcuttur. Yaşam alanında yapılan ölçümlerde rastgele seçilen bir evde 3 GHz'e kadar belirlenen frekanslar içerisinde bir hafta süreyle 24 saat boyunca statik olarak 4 saniye örnekleme ile ev ortamındaki elektromanyetik ki maruziyet oranı belirlenmiştir (Seyfi, 2013). Yine haftanın her gününü kapsayan ölçümlerde nüfusu az olan Besancon ve yüksek nüfusa sahip Lyon kentlerindeki maruziyet değerleri nüfusa göre incelenmiş ve elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti 0.2 V/m seviyesinde kalmaktadır (Viel, Tiv, Moissonnier, Cardis, & Hours, 2011).

Belçika'da yapılan çalışmada ise belirli günlerde şehir dışı, toplu taşıma araçları, havaalanı, alışveriş merkezi gibi yoğun popülasyonun bulunduğu noktalarda elektrik alan kirliliği ve değişimi gerçekleştirilmiştir (Urbinello, Joseph, Verloock, Martens, & Röösli, 2014).

AB ülkeleri içerisinde yapılan kısa ve uzun süreli ölçümlerde toplam elektrik alan şiddeti ortalaması 0.52 V/m olup ölçümler yerleşim yeri içi ve yerleşim yeri dışını kapsamaktadır (Gajšek vd., 2015).

Yerleşim yerleri içerisinde bulunan baz istasyonları genellikle çatı gibi yüksek yerlerde konumlandırılır. Yayılım yapan bu antenlerin yakın alan, uzak alan sınıflandırılması, yayılım deseni ve antene olan uzaklığa göre elektromanyetik alan ölçümleri mevcuttur (Baltrenas & Buckus, 2013).

Şehir içerisinde bulunan baz istasyonu kaynaklı GSM 900 MHz, GSM 1800 MHz, UMTS, LTE, TV vericisi, FM verici, WIFI noktaları gibi bölgelerde elektromanyetik kirliliğin tespiti gereklidir. Bu sayede uluslararası standartlar ile kıyaslama yapılarak güvenli bölge tespiti yapılmaktadır. Drive test metodu şehir içerisindeki kirliliğin tespiti için kullanılan yöntemlerden birisidir (Kurnaz, 2016).

Teorik tahmin ve matematiksel modellemede elektromanyetik maruziyet tespiti için bir diğer yöntemdir. Bu yöntemlerle hesaplamalar yapılırken farklı yüzeylerde olan yansımalar genellikle dikkate alınmamaktadır. Ayrıca matematiksel olarak yapılan hesaplamalarda anten yayılma deseni, çıkış gücü ve aynı ortan içerisinde bulunan birden fazla farklı çıkış gücüne sahip antenlerin elektromanyetik kirliliğe etkisi de incelenmektedir (Medjedovic & Suka, 2013).

Uludağ Üniversitesi tıp fakültesi hastanesi fiili 880 yatak kapasiteli bir araştırma hastanesi olup günde ortalama 3250 hastaya sağlık hizmeti vermektedir. İnsan nüfusunun bu kadar yoğun olduğu yerlerde elektromanyetik kirliliğin analizi önem kazanmaktadır. İletişim sistemleri bu yoğun talebe cevap verebilmek için bu bölge ve çevresine haberleşme sistemi altyapısını oluşturmaktadır. Tahmin edilebileceği üzere bu altyapı kablosuz ağ elemanlarıyla sağlanarak mobil iletişim gerçekleştirilmektedir. GSM şirketleri bu gibi yoğun bölgelerde kanal kapasitesini arttırmak için baz istasyon sayılarını arttırmaktadır (BUÜ, 2022).

3.MATERYAL ve YÖNTEM

3.1.Materyal

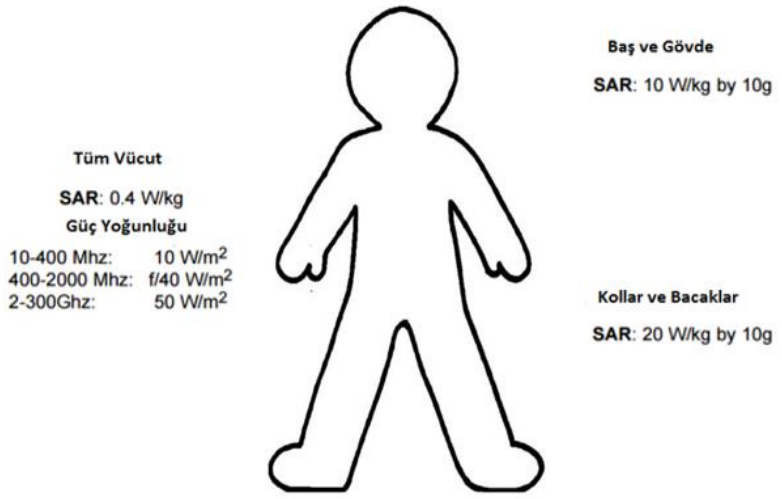
3.1.1.Özgül Soğurulma Oranı

Epidemiyolojik çalışmalar neticesinde elektromanyetik maruziyetin kanser ile ilişkisinden bahsedilmektedir (ICNIRP, 1998). Biyolojik dokular için iyonize olmayan elektromanyetik radyasyonun emiliminin bir ölçüsü olarak özgül soğurulma oranı (SAR) şiddeti kullanılmaktadır. Bu değer, birim kütlenin soğurduğu güç miktarı olarak da denklem 3.1'de ifade edilmektedir (Sühnel & Berg, 2003).

$$\text{SAR} = \frac{\sigma|E_{maks}|^2}{2\rho} \text{ W/kg} \qquad (3.1)$$

σ: Dokunun özgül iletkenliği (S/m), E_{maks}: Maksimum elektrik alan şiddeti (V/m), ρ: Dokunun kütle yoğunluğudur(kg/m^3).

30 dakika boyunca vücutta 1°C'lik sıcaklık artışına neden olan güç yoğunluğu 4 W/kg'dır. Bu değer temel sınır değer olarak belirlenmiştir. Güvenlik payı da göz önüne alındığında sınır değer temel değerin % 10'u olan 0.4 W/kg olarak alınmaktadır.



Şekil 3.1. ICNIRP çalışanlar için limit SAR şiddetleri (MMF & GSMA, 2008)

Çizelge 3.1.Vücudun kısımları için iletkenlik ve dielektrik sabitleri (Khalatbari, Sardari, Mirzaee, & Sadafi, 2006)

Vücudun Kısımları	900 MHz ε_r	900 MHz σ	1800 MHz ε_r	1800 MHz σ	Kütle Yoğunluğu (ρ: Kg /m^3)
Deri	39.5	0.7	38.2	0.9	1080
Kemik	12.5	0.17	12	0.29	1180
Beyin	56.8	1.1	51.8	1.5	1050

Ortamdaki tüm elektrik alan dikkate alındığında ve kötü şartlar düşünülerek 5.672 V/m maksimum değer alınmıştır. Çizelge 3.1'de belirtilen en hassas doku olan beyin için verilen değerler ile denklem 3.1'de hesaplandığında elde edilen maksimum SAR şiddeti 0.0168 W/kg'dır.

3.1.2.Radyo Dalgaları

Radyo dalgaları Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) Regülasyonlarında yapay kılavuz olmadan uzayda rasgele yayılan 3.000 GHz 'den daha düşük frekanslardaki elektromanyetik dalgalar olarak tanımlanır. Bu kızılötesi ve görünür ışık frekans aralığındaki daha yüksek frekansların da faydalı özelliklere sahip olabilmesine rağmen, troposferdeki yayılma özelliklerinin yararlı bir mesafeye iletişime izin verdiği frekans aralığını kapsar.

Radyo ve elektronik teknolojilerinin geliştirilmesi radyo dalgalarının modüle edilme ve dolayısıyla bilgi aktarma yeteneği ile birlikte elektromanyetik dalgaların uzun mesafelerde yayılmasının pratik kullanımı oluşmuştur. Bu da daha büyük iletişim bant genişlikleri ve daha yüksek hizmet kalitesi sağlamaya çalışarak, yayılma ortamı hakkındaki bilgileri genişletme ve radyo kanalının aktarım işlevini karakterize etme ihtiyacını doğurmuştur (Barclay, 2013).

Serbest uzayda veya kayıpsız homojen bir dielektrik ortamda dalga yayılımı basitçe tanımlanabilmektedir. Elektromanyetik alan mühendisini zorlayan nokta radyo sinyalinin

değişkenliğine ve bozulmasına yol açan dünyanın ve onu çevreleyen ortamın etkisidir. Radyo sistemlerinin tasarımında, planlanmasında ve işletilmesinde kullanılmak üzere sinyalin ayrıntılı bir tanımını ve bir tahmin yeteneği sağlamayı amaçlamaktadır (Barclay, 2013).

Telsiz iletişiminin çeşitli kullanımları ITU Telsiz Yönetmeliklerinde bir dizi telsiz hizmeti olarak tanımlanmıştır. Bunların her biri spektrum kullanımı ve parazite karşı bağışıklık için farklı gereksinimlere sahiptir. Her bir kullanım tipine göre yapılan frekans sınıflandırması çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Frekans bantları ve kullanım alanları

No	Sembol	Frekans Aralığı	Dalgaboyu	Kullanım Alanları
1	ELF	< 300 Hz	> 1000 km	Denizaltılarla iletişim
2	ULF	300 Hz-3 kHz	1000-100 km	Denizaltı iletişimi, madenlerde iletişim
3	VLF	3-30 kHz	100-10 km	Navigasyon, zaman sinyalleri, denizaltı iletişimi, kablosuz kalp atış hızı monitörleri, jeofizik
4	LF	30-300 kHz	10-1 km	Navigasyon, zaman sinyalleri, AM uzun dalga yayını (Avrupa ve Asya'nın bazı bölgeleri), RFID, amatör radyo
5	MF	300 kHz-3MHz	1 km-100 m	AM (orta dalga) yayınları, amatör radyo, çığ işaretleri
6	HF	3-30 MHz	100 - 10 m	Kısa dalga yayınları, vatandaşlar bant radyosu, amatör radyo ve ufuk üstü havacılık iletişimi, RFID, ufuk üstü radar, otomatik bağlantı kurma (ALE) / yakın dikey insidanslı skywave (NVIS) radyo iletişimi, deniz ve mobil radyo telefon

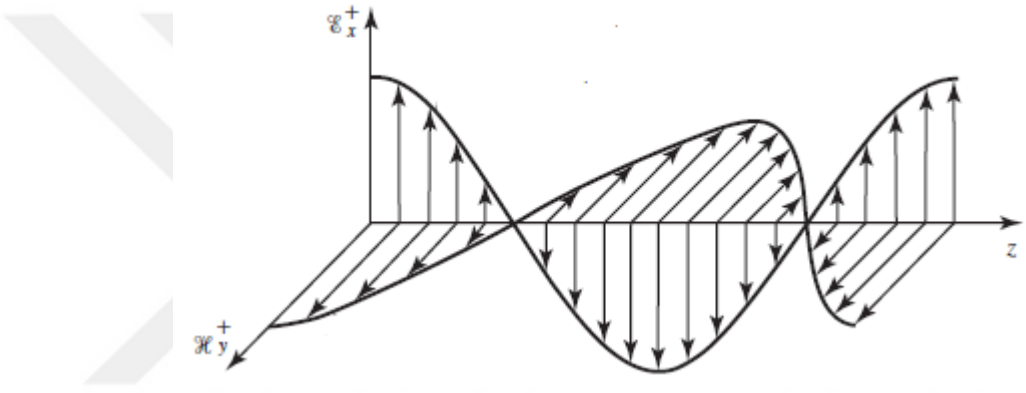
Çizelge 3.2. Frekans bantları ve kullanım alanları (devam)

No	Sembol	Frekans Aralığı	Dalgaboyu	Kullanım Alanları
7	VHF	30-300 MHz	10-1 m	FM, televizyon yayınları, görüş hattı yerden uçağa ve uçaktan uçağa iletişim, kara mobil ve deniz mobil iletişim, amatör radyo, hava durumu radyosu
8	UHF	300 MHz-3GHz	1 m-100 mm	Televizyon yayınları, mikrodalga fırın, mikrodalga cihazlar/haberleşme, radyo astronomi, cep telefonları, kablosuz LAN, Bluetooth, ZigBee, GPS ve kara mobil gibi iki yönlü telsizler, FRS ve GMRS telsizler, amatör telsiz, uydu telsiz, Uzaktan kumanda Sistemleri, ADSB.
9	SHF	3-30GHz	100-10 mm	Radyo astronomi, mikrodalga cihazlar /iletişim, kablosuz LAN, DSRC, en modern radarlar, iletişim uyduları, kablolu ve uydu televizyon yayıncılığı, DBS, amatör radyo, uydu radyosu.
10	EHF	30-300 GHz	10-1 mm	Radyo astronomi, yüksek frekanslı mikrodalga radyo rölesi, mikrodalga uzaktan algılama, yönlendirilmiş enerji silahı, milimetre dalga tarayıcı, Kablosuz Lan 802.11ad.
11	THF	300-3000 GHz	1-0.1 mm	X-ışınlarının yerini alacak deneysel tıbbi görüntüleme, ultra hızlı moleküler dinamikler, yoğun madde fiziği, terahertz zaman alanı spektroskopisi.

3.1.3.Elektromanyetik Dalga Yayılımı

Elektromanyetik dalgalar zamanla değişen elektrik ve manyetik alanların sonucu olan enerji veya bilgi aracıdır. Tipik elektromanyetik dalgalar, TV sinyalleri, radar ışınları ve radyo dalgalarıdır. Tüm elektromanyetik dalgaların kendine has özellikleri vardır bunlar kaynaktan yayılarak yüksek hızda hareket ederler.

Kaynaklardan yeterince uzak mesafelerdeki elektromanyetik dalgalar, düzgün düzlem dalgalar olarak tanımlanabilir. Bu dalgaların E ve H alan bileşenleri şekil 3.2'de gösterildiği gibi her yerde birbirine ve dalga yayılma yönüne diktir.



Şekil 3.2. Uniform düzlem dalga (Balanis 2012)

Elektromanyetik dalgalar serbest uzayda, kayıpsız dielektrik, kayıplı dielektrik ve iyi iletken olmak üzere dört farklı ortamda yayılım yapar. Kayıplı bir dielektrik ortamda ($\sigma \neq 0$) bir elektromanyetik dalga zayıf iletim nedeniyle yayılırken güç kaybederek ilerler. EM dalgaların yayılımı için Maxwell denklemleri kullanılmaktadır. Denklem 3.2 ve denklem 3.5 arasında temel Maxwell denklemlerini göstermektedir.

$$\nabla x\vec{E} = -\vec{M} - j\omega\mu\vec{H} \tag{3.2}$$

$$\nabla x\vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{E} \tag{3.3}$$

$$\nabla . \vec{E} = \frac{q_{ev}}{\varepsilon} \tag{3.4}$$

$$\nabla.\vec{H}=\frac{q_{mv}}{\mu} \tag{3.5}$$

Denklemlerde, $\vec{E}$ elektrik alan V/m, $\vec{H}$ manyetik alan A/m, μ manyetik geçirgenlik H/m, ε elektriksel geçirgenlik F/m, σ elektriksel iletkenliktir S/m, $\vec{M}$ manyetik akım yoğunluğu V/m^2 , $\vec{J}$ elektrik akım yoğunluğu A/m^2 μ manyetik geçirgenlik H/m, ε elektriksel geçirgenlik, q_{ev} elektrik yük yoğunluğu C/m^3 , q_{mv} manyetik yük yoğunluğu F/m^3'dur.

$\vec{E}$ ve $\vec{H}$ bulunduğu denklem 3.2'nin rotasyonu denklem 3.6 'da gibi alınır.

$$\nabla x\nabla x\vec{E} = -\mu\frac{\partial}{\partial t}(\nabla x\vec{H})=-\mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \tag{3.6}$$

Kaynakların bulunmadığı $(\vec{J}=\vec{M}=q_{ev}=q_{mv}=0)$ ortamda $\nabla.\vec{E}=0$ olacağından denklem 3.6'daki eşitliğin sol tarafı denklem 3.7 gibi yazılabilir.

$$\nabla x\nabla x\vec{E}=\nabla\left(\nabla.\vec{E}\right)-\nabla^2\vec{E}=-\nabla^2\vec{E} \tag{3.7}$$

Elde edilen eş yöresel vektör dalga denklemleri 3.8 ve 3.9 'da ifade edildiği gibi olmaktadır.

$$\nabla^2\vec{E}-\mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}=0 \tag{3.8}$$

$$\nabla^2\vec{H}-\mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2}=0 \tag{3.9}$$

Kaynaksız ve kayıpsız ortamda kartezyen koordinatlarda, elektik alanın fazörü için genel bir çözüm denklem 3.10'da ki gibi yazılabilir.

$$\nabla^2\vec{E}+\beta^2\vec{E}=\nabla^2\left(\hat{a}_xE_x+\hat{a}_yE_y+\hat{a}_zE_z\right)+\beta^2\left(\hat{a}_xE_x+\hat{a}_yE_y+\hat{a}_zE_z\right)=0 \tag{3.10}$$

Denklemde bulunan faz sabiti $\beta^2 = \omega^2 \mu\varepsilon$ (rad/m) olarak ifade edilir. Elektrik alanın yalnızca x bileşeninin olduğu kabul edilirse denklem 3.10 skaler formda daha açık bir şekilde denklem 3.11 de olduğu gibi yazılabilir.

$$\nabla^2 E_x + \beta^2 E_x = \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \beta^2 E_x = 0 \tag{3.11}$$

Dalga z yönünde hareket eden düzgün düzlem dalga olduğu için çözümü x ve y'nin bir fonksiyonu değildir. Bu nedenle elektrik alanın z'nin bir fonksiyonu olarak denklem 3.12 deki gibi tanımlanabilir.

$$E_x(z) = h(z) \tag{3.12}$$

Söz konusu dalga duran dalga yerine ilerleyen dalga olduğu için denklem 3.11 için en uygun çözüm denklem 3.13 ile verilen çözümdür. 3.13'deki ilk terim +z yönünde yayılan dalgayı ve ikinci terim −z yönünde yayılan dalgayı temsil eder. Bu nedenle 3.11'in 3.12 kullanılarak çözümü denklem 3.14'de olduğu gibi yazılabilir.

$$h(z) = Ae^{-j\beta_z z} + Be^{+j\beta_z z} \tag{3.13}$$

$$E_x(z) = E_0^+ e^{-j\beta z} + E_0^- e^{+j\beta z} = E_x^+ + E_x^- \tag{3.14}$$

Sonuç olarak kayıpsız ortamda düzlem dalganın zamana bağlı vektörel ifadesi denklem 3.15 'de verilmiştir.

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(\omega t - \beta z) a_x \tag{3.15}$$

Kayıplı ortamlarda eş yöresel Helmholtz denklemi denklem 3.16'da gösterilmektedir.

$$\nabla^2 \vec{E} + k_c \vec{E} = 0 \tag{3.16}$$

Denklemde $k_c$dalgasayısı olup $k_c = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ olarak ifade edilir. Yayılım sabiti γ karmaşık olması durumunda ise denklem 3.17 ‘de gösterilmektedir.

$$\gamma = a + j\beta = j\,\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\left(1 + \frac{\sigma}{j\,\omega\varepsilon}\right)^{1/2} \tag{3.17}$$

Denklemlerde gösterilen α sönüm sabiti olup, β ise faz sabitini ifade etmektedir. Denklem 3.17‘de ki ifade ile yola çıkarak kayıplı ortamda +z yönünde ilerleyen düzgün düzlem dalga denklemi genel ifadesi fazörler cinsinden denklem 3.18’de gösterilmektedir.

$$E_x = E_0 e^{-az} e^{-j\beta z} \tag{3.18}$$

Elektromanyetik dalgalar kendileriyle birlikte güç taşırlar. Elektromanyetik dalga tarafından taşınan zamanda-ortalama güç yoğunluğu denklem 3.19’da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\vec{P}_{ort}(z) = \frac{1}{T}\int_0^T \vec{P}(z,t)dt \qquad [\text{Watt/m}^2] \tag{3.19}$$

Denklem 3.20’de belirli bir zamanda birim alandan geçen anlık güç yoğunluğunu temsil eden Poynting vektörüdür.

$$\vec{P}(z,t) = \vec{E}x\vec{H} \tag{3.20}$$

Elektromanyetik dalga tarafından taşınan birim zamanda birim alana uygulanan ortalama güç yoğunluğu $\vec{P}_{ort}$ olarak denklem 3.21 ‘de hesaplanabilir.

$$\vec{P}_{ort} = \frac{1}{2}Re\{\vec{E}_s x \vec{H}_s^*\}\ [\text{Watt/m2}] \tag{3.21}$$

Burada $\vec{E}_s$ ve $\vec{H}_s^*$ sırasıyla elektrik alanının fazör biçimleri ve manyetik alanın eşleniğidir. Ortamın içsel empedansı denklem 3.22’de hesaplanır.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \tag{3.22}$$

Düzlem dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin genliklerinin arasındaki bağıntı denklem 3.23'de verilmektedir.

$$Z_0 = \frac{E_0}{H_0} \tag{3.23}$$

Elektromanyetik dalgaların ışınımsal alan olarak adlandırıldığı uzak alan bölgesinde, elektrik alan, manyetik alan ve güç yoğunluğu denklem 3.24 ile birleştirilir.

$$P = \frac{E_0^2}{Z_0} \text{ ya da } P = H_0^2 Z_0 \tag{3.24}$$

P; Güç yoğunluğu W/m^2, E_0 ; Elektrik alan yoğunluğu V/m, H_0 ; Manyetik Alan Yoğunluğu A/m ve Z_o; Boş uzayda ki karakteristik empedans yaklaşık 377 Ω.

Denklem 3.24'de uzak alanda elektrik alan veya manyetik alan ölçümünün ortamın elektromanyetik seviyesi hakkında bilgi verdiğini ve alan bileşenlerinden birinin değeri ölçüldüğünde diğerinin hesaplanabildiğini göstermektedir.

3.1.4.Vektör Potansiyeli

Vektör potansiyelinin kullanımı, elektromanyetik sınır değeri problemlerinde elektrik alan ve manyetik alan çözümleri için kullanılan yaygın bir metottur. Manyetik vektör potansiyeli olarak $\vec{A}$ Wb/m, elektrik vektör potansiyeli olarak $\vec{F}$ Q/m yaygın olarak kullanılan vektör potansiyelleridir. Vektör potansiyelleri ölçülebilir nicelikler olan elektrik ve manyetik alanın matematiksel ifade şeklidir.

Bir sınır değer probleminde elektrik ve manyetik alanın tespitinde iki yöntem kullanılır. İlki Maxwell ya da dalga denklemlerinin kullanılmasıdır. İkinci yöntem ise, vektör potansiyelleri $\vec{A}$ ve $\vec{F}$'nin bulunmasıdır. Vektör potansiyellerinin bulunması ile elektrik

ve manyetik alan değerleri hesaplanabilir. Elektrik ve manyetik alanlar ise vektör potansiyellerinin birer fonksiyonudur. Homojen bir ortamda elektrik ve manyetik alanlar için Maxwell denklemlerin çözümleri denklem 3.2 ve denklem 3.5 arasında gösterilmiştir.

Kaynakların bulunduğu bir ortam için vektör dalga denklemleri ise denklem 3.25 ve denklem 3.26 'de gösterilmiştir.

$$\nabla^2\vec{E} + \beta^2\vec{E} = \nabla x\vec{M} + \mathrm{j}\omega\mu\vec{J} + \frac{1}{\varepsilon}\nabla q_{ev} \tag{3.25}$$

$$\nabla^2\vec{H} + \beta^2\vec{H} = -\nabla x\vec{J} + \mathrm{j}\omega\varepsilon\vec{M} + \frac{1}{\mu}\nabla q_{mv} \tag{3.26}$$

Denklem 3.25 ve denklem 3.26'da kaynakların olmadığı bölgelerde $\vec{J} = \vec{M} = q_{ev} = q_{mv} = 0$ olmaktadır. Denklemlerde bulunan elektrik akım yoğunluğu eşdeğer kaynaklardan birisini temsil ederken, manyetik akım yoğunluğu manyetik kaynakların hepsini temsil etmektedir. Elektrik ve manyetik alanların tespiti için bu denklemler yeterli olmaktadır. Ancak vektör potansiyeli olarak da bu denklemler ifade edilmektedir.

Kaynaksız bölgede manyetik akı yoğunluğu selenoiddir. Dolayısıyla başka bir vektörün döneli biçiminde denklem 3.27'de ki gibi gösterilir.

$$\nabla.\left(\nabla x\vec{A}\right) = 0 \tag{3.27}$$

$\vec{A}$ rastgele bir vektör olduğunda manyetik alan denklem 3.28'de gibi elde edilir.

$$\vec{B}_A = \mu\vec{H}_A = \nabla x\vec{A} \tag{3.28}$$

$$\vec{H}_A = \frac{1}{\mu}\nabla x\vec{A} \tag{3.29}$$

Denklemde ifade edilen manyetik alanın A indeksi, $\vec{A}$ vektör potansiyelinin ifadesi olduğunu gösterir. Denklem 3.28 Maxwell denklemlerinde küresel koordinat biçiminde yazılırsa denklem 3.30 ifade edilir.

$$\nabla x\vec{E}_A = -\,\mathrm{j}\omega\mu\vec{H}_A = -\,\mathrm{j}\omega\nabla x\vec{A} \tag{3.30}$$

Denklem 3.30 denklem 3.31'e indirgenerek yazılabilir.

$$\nabla x\left[\vec{E}_A + \mathrm{j}\omega\vec{A}\right] = 0 \tag{3.31}$$

Denklem 3.31 ile vektör tanımlamasından denklem 3.32 elde edilir.

$$\nabla x(-\nabla\varphi_e) = 0 \tag{3.32}$$

$$\vec{E}_A = -\nabla\varphi_e - j\omega\vec{A} \tag{3.33}$$

φ_e, konumun bir fonksiyonu olan rastgele bir elektrik skaler potansiyelini temsil eder. Homojen ortamda Maxwell denklemleri uyguladığında ise manyetik alan ifadesi denklem 3.34'da gösterilmektedir.

$$\nabla x\vec{H}_A = \vec{J} + \mathrm{j}\omega\varepsilon\vec{E}_A \tag{3.34}$$

Sonuç olarak denklem 3.34 sadeleşecek olursa denklem 3.35 elde edilir.

$$\nabla^2\vec{A} + \beta^2\overrightarrow{A} = -\mu\vec{J} \tag{3.35}$$

$$\vec{E}_A = -\nabla\varphi_e - j\omega\vec{A} = -j\omega\vec{A} - j\frac{1}{\omega\varepsilon\mu}\nabla(\nabla.\vec{A}) \tag{3.36}$$

Manyetik akım yoğunluğu 0 alındığında $\vec{E}_A$, A vektör potansiyelinin ifadesi olarak Maxwell denklemleri aracılığıyla tüm koordinat sistemlerinde elde edilir.

Kaynaksız bölgede elektrik akı yoğunluğu selenoiddir. Dolayısıyla başka bir vektörün döneli biçiminde denklem 3.37'de ki gibi gösterilir.

$$\nabla.\left(-\nabla x\vec{F}\right) = 0 \tag{3.37}$$

$\vec{F}$ rastgele bir vektör olduğunda manyetik alan denklem 3.38 ve 3.39 elde edilir.

$$\vec{D}_F = -\nabla x\vec{F} \tag{3.38}$$

$$\vec{E}_F = -\frac{1}{\varepsilon}\nabla x\vec{F} \tag{3.39}$$

Denklemde ifade edilen manyetik alanın F indeksi, $\vec{F}$ vektör potansiyelinin ifadesi olduğunu gösterir. Denklem 3.39 Maxwell denklemlerinde küresel koordinat biçiminde yazılırsa denklem 3.40 olarak gösterilir.

$$\nabla x\vec{E}_F = -\vec{M} - \mathrm{j}\omega\mu\vec{H}_F \tag{3.40}$$

Denklem 3.40 ise 3.41 ve 3.42'i ortaya çıkarır.

$$\nabla^2\vec{F} + \beta^2\overrightarrow{F} = -\varepsilon\vec{M} + \nabla(\nabla.\overrightarrow{F} + \mathrm{j}\omega\mu\varepsilon\varphi_m) \tag{3.41}$$

$$\nabla x\vec{F} = -\mathrm{j}\omega\mu\varepsilon\varphi_m \tag{3.42}$$

φ_m, konumun bir fonksiyonu olan rastgele bir manyetik skaler potansiyelini temsil eder. Manyetik akım yoğunluğu 0 alındığında $\vec{H}_F$, F vektör potansiyelinin ifadesi olarak Maxwell denklemleri aracılığıyla tüm koordinat sistemlerinde elde edilir.

$$\nabla^2\vec{F} + \beta^2\overrightarrow{F} = -\varepsilon\vec{M} \tag{3.43}$$

$$\vec{H}_F = -j\omega\vec{F} - \frac{j}{\omega\varepsilon\mu}\nabla(\nabla.\vec{F}) \tag{3.44}$$

3.1.5.Homojen Olmayan Vektör Potansiyel Dalga Denklemleri

Homojen olmayan dalga denklemleri denklem 3.39 ve denklem 3.44 olarak elde edilmiştir. x,y,z koordinat sisteminin orijinine yerleştirilmiş ve limitte sonsuz küçüklükte olan akım kaynağı olarak $\vec{J}_z$, z doğrultusunda $\vec{A}_z$'nin bileşeni olarak denklem 3.45'de gösterilmektedir.

$$\nabla^2\vec{A}_z + \beta^2\vec{A}_z = -\mu\vec{J}_z \tag{3.45}$$

Kaynak ortadan kalktığında ise denklem 3.46 elde edilir.

$$\nabla^2\vec{A}_z + \beta^2\vec{A}_z = 0 \tag{3.46}$$

Limitte kaynak bir nokta olduğundan $\vec{A}_z$, θ ve ϕ yönünden bağımsız olarak küresel koordinatlarda r radyal mesafe olarak $A_z = A_z(r)$ olması durumunda denklem 3.46, denklem 3.47 ve 3.48'de gösterildiği gibi yazılır.

$$\nabla^2 A_z(r) + \beta^2 A_z(r) = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^2\frac{\partial A_z(r)}{\partial r}\right] + \beta^2 A_z(r) = 0 \tag{3.47}$$

$$\frac{d^2A_z(r)}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{dA_z(r)}{dr} + \beta^2 A_z(r) = 0 \tag{3.48}$$

A_z sadece radyal koordinatın bir fonksiyonu olduğundan kısmi türevler sıradan türev ile değiştirilmiştir.

Denklem 3.48'de ki diferansiyel denklemin çözümü denklem 3.49'da gösterilmiştir.

$$A_z = A_{z1} = A_{z2} = C\frac{e^{-j\beta r}}{r} \tag{3.49}$$

Elde edilen denklem β= 0 olduğu durumlarda geçerlidir. Kaynaktan uzaklaşılan noktalarda yapılan çözümlerde ise statik çözüm $e^{-j\beta r}$ ile çarpımla elde edilir.

Mevcut kaynağın olması durumunda (J_z= 0 ve β= 0) dalga denklemi denklem 3.50'deki gibi gösterilir.

$$\nabla^2 A_z = -\mu J_z \tag{3.50}$$

Denklem 3.50 çözümü geniş çapta Poisson denklemi olarak kabul edilir. Poisson formuyla en bilinen denklem, skaler elektrik potansiyeli φ ile elektrik yükü yoğunluğu q arasında ilişki kurularak denklem 3.51 'de gösterilmektedir.

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{q}{\varepsilon} \tag{3.51}$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \iiint_V \frac{q}{e} dv' \tag{3.52}$$

Denklemde bulunan r herhangi bir noktada yapılan gözlemde ki yük yoğunluğudur.

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{J_z}{r} dv' \tag{3.53}$$

Denklem 3.49'da β=0 olan statik durumları temsil etmektedir. Denklem 3.49'un z düzleminde zamana bağlı ifadesi ise denklem 3.54'de gösterilmiştir.

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V J_z \frac{e^{-j\beta r}}{r} dv' \tag{3.54}$$

Genel olarak vektör dalga denkleminin ifadesi ise denklem 3.55'de verilmiştir.

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \vec{J} \frac{e^{-j\beta r}}{r} dv' \tag{3.55}$$

Kaynak orijinden çıkarılır ve dikdörtgen koordinat sisteminde herhangi bir konuma yerleştirilirse denklem 3.55, denklem 3.56'da görüldüğü gibi yazılabilir.

$$\vec{A}(x,y,z) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \vec{J}(x',y',z') \frac{e^{-j\beta R}}{R} dv' \tag{3.56}$$

Denklemde R, kaynaktaki herhangi bir noktadan gözlem noktasına olan mesafeyi temsil eder. Benzer bir şekilde denklem 3.56'nin çözümünü denklem 3.57'de gösterilmektedir.

$$\vec{F}(x,y,z) = \frac{\varepsilon}{4\pi}\iiint_V \vec{M}(x',y',z')\frac{e^{-j\beta R}}{R}dv' \tag{3.57}$$

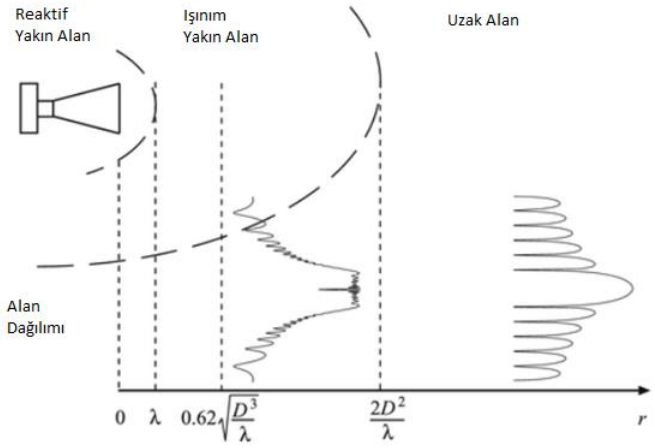
Elektrik ve manyetik akımlara göre denklemlerin integral formları ise denklem 3.58 ve 3.59 'da gösterilmiştir.

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi}\iiint_C \overrightarrow{I_e}(x',y',z')\frac{e^{-j\beta R}}{R}dl' \tag{3.58}$$

$$\vec{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi}\iiint_C \overrightarrow{I_m}(x',y',z')\frac{e^{-j\beta R}}{R}dl' \tag{3.59}$$

3.1.6.Işıma ve Saçılma Denklemleri

Dalga ışınımı yapan bir antenin elektromanyetik alan bölgesi, şekil 3.3'de gösterildiği gibi üç bölgeye ayrılabilir. λ'nin ötesindeki mesafe, λ ile $2D^2/\lambda$ arasındaki mesafenin yayılan yakın alan mesafesi olduğu reaktif yakın alan bölgesidir. Böylece, R $\geq 2D^2/\lambda$ uzak alan mesafesini belirtir. Yayılan yakın alan bölgesi, yakın alan ölçümü için uygundur. Çünkü ortalama enerji yoğunluğu antenden olan mesafeler boyunca yaklaşık olarak sabittir. Ölçülen yakın alan verileri, Fourier dönüşümü yöntemi kullanılarak uzak alan radyasyon modeline dönüştürülür (Phaebua, Lertwiriyaprapa, & Torrungrueng, 2021).



Şekil 3.3. Elektromanyetik dalgaların yayılım bölgeleri

Maxwell elektromanyetik alan teorisine göre halka açık faaliyet alanının uzak alan bölgesi olup olamayacağı denklem 3.60 ile hesaplanarak belirlenir:

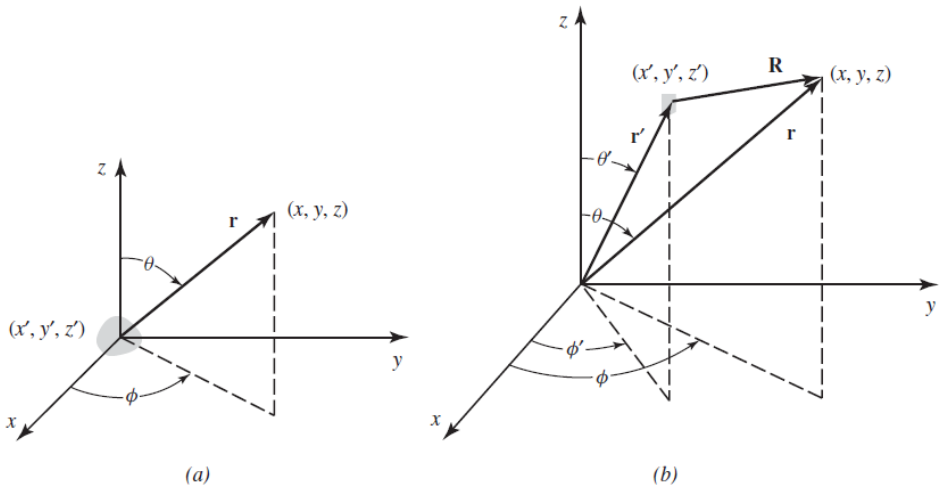
$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \tag{3.60}$$

Burada R bir elektromanyetik ışınım kaynağından halka açık faaliyet alanına m cinsinden mesafesi, D antenin m cinsinden maksimum uzunluğu, λ ise dalga boyudur. Örnek vermek gerekirse dijital iletişim ağının bir parçası olan GSM frekans aralığı için yer-uydu bağı frekans bandı 900 MHz, uydu-yer bağı frekansı ise 1800 MHz'dir. Bu nedenle emisyon dalga boyu yaklaşık 0.3 m, antenin maksimum uzunluğu 1.30 m olup uzak alan bölgesi antenden yaklaşık 10 m uzaklıkta olarak hesaplanmaktadır (Yang vd., 2013).

Antenlerde yapılan ışınım için yakın alan uzak alan dönüşümleri yapılmaktadır. Uzak alan yakın alan dönüşümü, uzak alan bölgesinde yapılacak gözlem için kullanılan formüllerin karmaşıklığının azaltılması için kullanılır.

3.1.6.1.Yakın Alan

Şekil 3.4'e göre akım yoğunluğundan kaynaklanan vektör potansiyeli, üslü koordinatların ışınım kaynağının üssüz koordinatların ise gözlem noktasını temsil ettiği şekilde denklem 3.61'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Işınım alanlarının hesaplanması için koordinat sistemleri

$$\vec{A}(x,y,z) = \frac{\mu}{4\pi}\iiint_V \vec{J}(x',y',z')\frac{e^{-j\beta R}}{R}dv' \tag{3.61}$$

Vektör potansiyelinden kaynaklı olarak $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ alanlarının dikdörtgen koordinat sistemi ile sınırlı olacak şekilde ifade edilir. Denklem 3.61'deki potansiyelden kaynaklanan manyetik alan denklem 3.62'de gösterilmektedir.

$$\vec{H}_A = \frac{1}{\mu}\nabla x\vec{A} = \frac{1}{4\pi}\nabla \mathrm{x}\iiint_V \vec{J}(x',y',z')\frac{e^{-j\beta R}}{R}dv' \tag{3.62}$$

Denklem 3.61, denklem 3.62 'de verilen vektör özdeşliğinde yerine yazılırsa denklem 3.63 elde edilir.

$$\nabla x\left(g\vec{F}\right) = (\nabla \mathrm{g})x\vec{F} + g(\nabla x\vec{F}) \tag{3.63}$$

$$\nabla x\left[\frac{e^{-j\beta R}}{R}\vec{J}(x',y',z')\right] = \nabla\left(\frac{e^{-j\beta R}}{R}\right)x\vec{J}(x',y',z') + \frac{e^{-j\beta R}}{R}\nabla \mathrm{x}\vec{J}(x',y',z') \tag{3.64}$$

Denklem 3.64'de $\vec{J}$ üslü koordinatların, ∇ ise üssüz koordinatların bir fonksiyonu olduğundan denklem 3.65'de ki gibi sadeleştirilerek yazılabilir.

$$\nabla \mathrm{x}\,\vec{J}(x',y',z') = 0 \tag{3.65}$$

Gözlem noktası ile bir kaynağın arasında çizilen bir vektörü $\vec{R}$'yi denklem 3.66'da ki gibi yazılabilir. Ayrıca denklem 3.65' de denklem 3.63 ve denklem 3.64 yerlerine konularak denklem 3.67 olarak yazılabilir.

$$\nabla\left(\frac{e^{-j\beta R}}{R}\right) = -\vec{R}\left(\frac{e^{-j\beta R}}{R^2}\right)e^{-j\beta R} \tag{3.66}$$

$$\vec{H}_A(x,y,z) = -\frac{1}{4\pi}\iiint_V (\vec{R}x\vec{J})\frac{1+j\beta R}{R^2}e^{-j\beta R}dx'dy'dz' \tag{3.67}$$

Maxwell denklemleri kullanılarak denklem 3.67 'de verilen ifadeden ilgili elektrik alan bileşeni denklem 3.68'de ki gibi çıkarılabilir.

$$\vec{E}_A = \vec{a}_x E_{Ax} + \vec{a}_y E_{Ay} + \vec{a}_z E_{Az} = -j\omega\vec{A} - j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\nabla(\nabla.\vec{A}) = \frac{1}{\omega\mu\varepsilon}x\vec{H}_A \tag{3.68}$$

3.1.6.2.Uzak Alan

$\beta r \gg 1$ olduğu durumda yani uzak alanda gözlem yapıldığında kaynak üzerinde ki herhangi bir noktadan gözlem noktasına olan uzaklık şekil 3.5'de gösterildiği gibi $\vec{R}$ 'dir. Gözlem noktası ile analizin yapılığı koordinat düzlemi orijin noktası arasında ki mesafeyi $\vec{r}$ olarak alındığı takdirde $\vec{R}$ ve $\vec{r}$ arasında ki ilişki denklem 3.69'da gösterilmektedir.

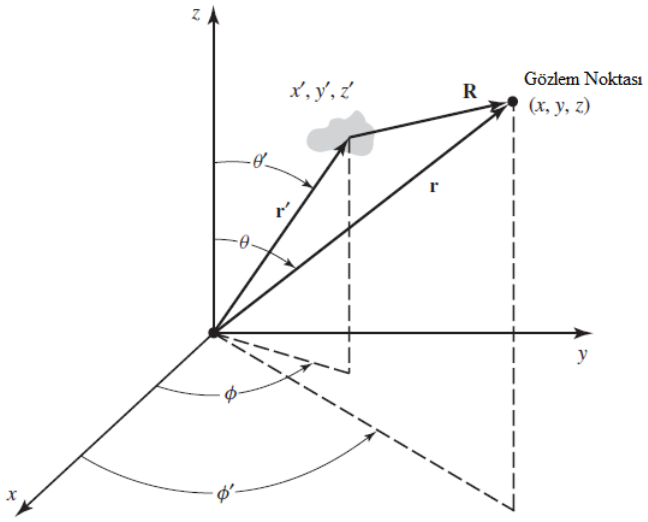
$$R = [r^2 + (r')^2 - 2rr'cos\varphi]^{1/2} \tag{3.69}$$

Şekil 3.5'e göre R'nin değişimleri ise denklem 3.70 ve 3.71'de ki sınır şartlarına göre değişir.

$$R = r - r'\,cos\varphi \qquad \text{faz değişimleri için} \tag{3.70}$$

$$R = r \qquad \text{genlik değişimleri için} \tag{3.71}$$

Denklemler de verilen φ, $\vec{R}$ ve $\vec{r}$ arasında bulunan açıyı gösterir.



Şekil 3.5. Anten analizi koordinat sistemi

Gözlem noktasına orijinden olan mesafe denklem 3.72'de gösterilmiştir.

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \tag{3.72}$$

D, yayıcının en büyük boyutudur. Denklem 3.72'de verilen mesafe uzak alan için minimum mesafeyi gösterir. Gözlem noktası için akım yoğunluklarının kaynağın üzerinde bulunması kabulü ile vektör potansiyelleri denklem 3.73 ve 3.74 ile hesaplanır.

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S \vec{J_s} \frac{e^{-j\beta R}}{R} ds' = \frac{\mu e^{-j\beta r}}{4\pi r} \vec{N} \tag{3.73}$$

$$\vec{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_S \vec{M_s} \frac{e^{-j\beta R}}{R} ds' = \frac{\varepsilon e^{-j\beta r}}{4\pi r} \vec{L} \tag{3.74}$$

Denklemler de bulunan $\vec{N}$ ve $\vec{L}$ ise denklem 3.75 ve 3.76' da gösterilmektedir.

$$\vec{N} = \iint_S \vec{J_s} e^{-j\beta r' \cos\psi} ds' \tag{3.75}$$

$$\vec{L} = \iint_S \vec{M_s} e^{j\beta r' \cos\psi} ds' \tag{3.76}$$

Vektör potansiyellerinin bir fonksiyonu olarak ise elektrik ve manyetik alan bileşenleri ise denklem 3.77 ve 3.78'de gösterilmektedir.

$$\vec{E}_A = -j\omega\left[\vec{A} + \frac{1}{\beta^2}\nabla(\nabla.\vec{A})\right] \tag{3.77}$$

$$\vec{H}_F = -j\omega\left[\vec{F} + \frac{1}{\beta^2}\nabla(\nabla.\vec{F})\right] \tag{3.78}$$

Denklemlerde gözlem mertebeleri $1/r^2$, $1/r^3$, $1/r^4$ gibi artan bir şekilde ilerleyen derecedendir. Uzak alan gözlemi için baskın değişim $1/r$ olandır. Bu şekilde radyal bileşenler çok küçük olduğu için ihmal edilerek sadece θ ve φ bileşenleri için denklem 3.79 ve 3.80 elde edilir.

$$\vec{E}_A = -j\omega\vec{A} \tag{3.79}$$

$$\vec{H}_F = -j\omega\vec{F} \tag{3.80}$$

Uzak alanda yapılan gözlemlerde elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirine ve radyal yöne diktir. Ayrıca ortamın öz empedansı olan η ohm ile ilişkilidir. $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ alan bileşenlerinin empedansla olan ilişkileri denklem 3.81 ve 3.84 arasında gösterildiği gibi yazılmaktadır.

$$(E_F)_\theta = +\eta(H_F)_\phi = -j\omega\eta F_\phi \tag{3.81}$$

$$(E_F)_\phi = -\eta(H_F)_\theta = -j\omega\eta F_\theta \tag{3.82}$$

$$(H_A)_\theta = -\frac{(E_A)_\phi}{\eta} = +j\omega\frac{A_\phi}{\eta} \tag{3.83}$$

$$(H_A)_\phi = +\frac{(E_A)_\theta}{\eta} = -j\omega\frac{A_\theta}{\eta} \tag{3.84}$$

Denklemlerde ki radyal bileşenleri ihmal edilerek nihai elektrik ve manyetik alan bileşenleri denklem 3.85 ile denklem 3.90 arasında gösterilmektedir.

$$E_r = 0 \tag{3.85}$$

$$E_\theta = -\frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(L_\phi + \eta N_\theta) \tag{3.86}$$

$$E_\phi = +\frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(L_\theta - \eta N_\phi) \tag{3.87}$$

$$H_r = 0 \tag{3.88}$$

$$H_\theta = +\frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(N_\phi - \frac{L_\theta}{\eta}) \tag{3.89}$$

$$H_\phi = -\frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r}(N_\theta + \frac{L_\phi}{\eta}) \tag{3.90}$$

3.1.6.3.Bir Antenin Uzak Alan Işıması

Sonlu boyuttaki antenlerin yapmış olduğu alan yayılımı küresel dalgalar şeklindedir. Bu dalgaların küresel koordinatlarda ki vektör dalga denklemi çözümü denklem 3.91'de gösterildiği gibidir.

$$\vec{A} = \overrightarrow{a_r}\, A_r(r,\theta,\varphi) + \overrightarrow{a_\theta}\, A_\theta(r,\theta,\varphi) + \overrightarrow{a_\varphi}\, A_\varphi(r,\theta,\varphi) \tag{3.91}$$

Denklem 3.91'de bulunan her bileşeninin r genlik değişimi $1/r^n$ olarak değişir. Genlik değişiminin yüksek mertebe terimleri $r\to\infty$ olacak şekilde ihmal edilerek denklem 3.92 elde edilir.

$$\vec{A} = \overrightarrow{a_r}\, A'_r(\theta,\varphi) + \overrightarrow{a_\theta}\, A'_\theta(\theta,\varphi) + \overrightarrow{a_\varphi}\, A'_\varphi(\theta,\varphi)\frac{e^{-j\beta r}}{r} \qquad (3.92)$$

Böylece r değişimleri φ ve θ 'den ayrılır. Denklem 3.92 vektör potansiyeli denklemi yerine konulduğunda ise denklem 3.93 elde edilir.

$$\vec{E} = \frac{1}{r}\left\{-j\omega e^{-j\beta r}\left[\overrightarrow{a_r}\,(0) + \overrightarrow{a_\theta}\, A'_\theta(\theta,\varphi) + \overrightarrow{a_\varphi}\, A'_\varphi(\theta,\varphi)\right]\right\} + \frac{1}{r^2}\{\ldots\} \qquad (3.93)$$

$1/r^n$'nin yüksek mertebe terimleri ihmal edilerek ışınım yapan E ve H alan bileşenleri sadece θ, φ olarak ifade edilebilir. $E_r = 0,\ E_\theta = -j\omega A_\theta,\ E_\varphi = -j\omega A_\varphi$ olacak şekilde daha basite indirgenmiş hali denklem 3.94'de verilmiştir.

$$\vec{E}_A = -j\omega\vec{A} \qquad (3.94)$$

Manyetik alan için ise $H_r = 0,\ H_\theta = -E_\varphi/\eta,\ H_\varphi = -E_\theta/\eta$ olacak şekilde denklem 3.95 elde edilir.

$$\vec{H}_A = \frac{\vec{a}_r}{\eta}\, x\, \vec{E}_A = -j\frac{\omega}{\eta}\vec{a}_r\, x\, \vec{A} \qquad (3.95)$$

3.1.7.Baz İstasyonu için Güç Yoğunluğu

Bir mobil iletişim sisteminde baz istasyonu anteni önemli bir elektromanyetik radyasyon kaynağıdır. Bu sayede elektromanyetik sinyal iletilir ve alınır. Herhangi bir antenin iletim gücü, anten kazancı, yarım güç açısı, elektronik eğim vb. gibi bazı belirli karakteristik parametreleri vardır. Bu karakteristik parametrelere rağmen antenin performansı değerlendirilebilir ve hesaplanabilir. Daha sonra anten mühendisliği teorisi ile birleştirilerek elektromanyetik radyasyon formülü bir baz istasyonu anteni modellenebilir. Böylece baz istasyonundaki elektromanyetik radyasyonun bir simülasyon modeli sunulmuştur.

Baz istasyonlarında kullanılan antenlerde temel dalga denklemleri ile yakın alan güç yoğunluğu tahmini yapılması literatürde mevcuttur. Eşdeğer düzlem dalganın güç yoğunluğu genellikle denklem 3.96'da ifade edilir:

$$S = \frac{1}{2} \text{Re}\,(\overline{E} x \overline{H}) = \frac{|E_{rms}|^2}{Z_0} = Z_0 \,.\, |H_{rms}|^2 \tag{3.96}$$

En basit durum bir insanın tek bir baz istasyonuna maruz kaldığı durumdur. Bu durumda, bulunduğu konumdaki güç yoğunluğu denklem 3.97 ile hesaplanabilir:

$$S = 0.08 \,.\, \frac{P}{R^2} \,.\, 10^{G/10} \left[W/m^2 \right] \tag{3.97}$$

Burada P anten tarafından yayılan Watt cinsinden güçtür ve G antenin yayılım yaptığı dBi cinsinden anten kazancıdır.

Aynı anda N adet antenin mevcut olduğu durumda toplam güç yoğunluğu incelenen noktada her bir antenden gelen bireysel S_i 'nin toplamı olarak elde edilir. Bu baz istasyonunun uzak alanındaki maruziyeti tahmin etmenin en basit yoludur. Ancak gerçekçi maruz kalma koşullarını ve çevre etkilerini hesaba katmadıkları için sonuçlar yalnızca fikir vericidir. Bir baz istasyonunun yakın alan ortalama güç yoğunluğunun veya tepe güç yoğunluğunun tahmini için tahmin formülleri belirlenmiştir. Eş doğrusal bir anten elemanı dizisi için ortalama güç yoğunluğunun, antenin yakın alanının (d>λ) ışıma bölgesinde silindirik bir bozulmaya ve uzak alanında küresel bir bozulmaya sahip olduğu gösterilmiştir. Analitik bir teknik baz istasyonunun yakın alanlarındaki periyodik ve periyodik olmayan lineer dizilerin uzaysal alan dağılımlarının ve radyasyon mekanizmalarının analizinin açıklanmasına izin verir. Denklem 3.94'de sunulan sonuçlar, özellikle yakın alan ışınlamasının kaçınılmaz olduğu mesleki maruziyet için RF güvenlik sınırlarına uygunluğu değerlendirirken son derece yararlı bilgiler sağlar. Bir sektörel antenden belirli bir mesafede küresel karaktere dönüşür ve buradaki yakın ışıma alanın silindirik karakteri denklem 3.98'de olduğu gibidir.

$$\rho_0 = \frac{\overline{\varphi_{3dB}}}{6} . D_A . \text{L} \tag{3.98}$$

Burada, φ_{3dB} yatay yarı güçlü veya -3dB ışın genişliğidir, D_A anten genişliği, L ise anten yüksekliğidir.

Baz istasyonlarının çoğu yakın silindirik alanda, anten merkezinden ρ yatay uzaklıkta ve azimutta φ ortalama sahip olduğu güç yoğunlukları denklem 3.99'da hesaplanır.

$$\overline{S_\rho}(\rho,\varphi) = \frac{W_{rad}.2^{-\left(\varphi/\bar{\varphi}_{3dB}\right)^2}}{2.\bar{\varphi}_{3dB}.\rho.L.\sqrt{1+\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^2}} \tag{3.99}$$

Burada W_{rad} net yayılan güçtür. $W_{rad} = e_A.W_{fwd}$ olarak ifade edilebilir, burada e_A anten verimliliği ve W_{fwd} anten konektöründen çıkan ileri güçtür.

Baz istasyonundan uyumluluk mesafesi denklem 3.100 ve denklem 3.101'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$q = \frac{3.W_{rad}.2^{-\left(\varphi/\bar{\varphi}_{3dB}\right)^2}}{\bar{\varphi}_{3dB}.L^2.D_A.\bar{S}} \tag{3.100}$$

$$\bar{\rho} = \rho(\bar{S})\ \rho_0.\frac{\rho}{\sqrt[4]{1+q^2}} \tag{3.101}$$

IEEE standardı tarafından şart koşulduğu üzere izin verilen maksimum maruz kalma seviyeleri mesleki koşullar için maruziyet seviyesini ve uyum mesafesi olan $\bar{\rho}$ hesaplamak için denklem 3.100 ve denklem 3.101 bir yol sunar.

Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) referans seviyelerine göre, tepe güç yoğunluğunun hesaplanması ve standartlaştırılmış değerle karşılaştırılması gerekir. Bu durumda baz istasyonunun yakın alan bölgesindeki tepe güç yoğunluğu denklem 3.102'de ifade edilir:

$$S_{\rho}^{tepe}(\rho,\varphi) = \frac{W_{rad}.2^{-(\varphi/\bar{\varphi}_{3dB})^2}}{\bar{\varphi}_{3dB}.\rho.L.\sqrt{1+\left(2.\frac{\rho}{\rho_0}\right)^2}} \quad (3.102)$$

ρ_0, silindirik koordinatlara dönüştürülmüş antene olan mesafe, $\bar{\varphi}_{3dB}$ dikey yarı güç, ρ anten merkezinden olan yatay mesafe, W_{rad} net ışınım gücü, L ise anten yüksekliğidir. Denklem 3.101'de verilen uyum mesafesi ise denklem 3.103'de hesaplanır.

$$\rho^{tepe} = \rho(S^{tepe}) \sim \rho_0 . \frac{2.\rho}{\sqrt[4]{1+(4q)^2}} \quad (3.103)$$

Burada ρ, S'nin S^{tepe} 'de yani maksimum güçte gözlem yapılan noktada ki ifade denklem 3.101'de ki denklem ile aynı ifadeye sahiptir (Miclaus & Bechet, 2007).

3.1.8.Ulusal ve Uluslararası Standartlar

Elektromanyetik alan kaynakları ulusal ve uluslararası düzenlemelerle belirli sınır değerlerin altında yayılım yapmak durumundadır. Ülkemizde BTK tarafından yayınlanan yönetmelik ile bu sınır değerleri çizelge 3.3'de, tek bir cihaz ve ortam limit değerleri frekans aralıklarına göre elektrik ve manyetik alan cinsinden belirlenmiştir. BTK tarafından yayınlanan bu yönetmelik, ICNIRP'nin 1998 yılında yayınladığı çizelge 3.4'de gösterilen standart referans alınarak düzenlenmiştir. ICNIRP'nin sınır değerleri BTK yönetmeliğinde daha da düşük tutulmuştur. Ayrıca ICNIRP standardı genel halk ve çalışma ortamı olmak üzere iki farklı şekilde düzenlenmiştir. Çizelge 3.5'de görüldüğü gibi çalışma alanındaki mevcut elektrik alan değerleri genel halk sağlığı için belirlenen değerlerden yüksektir.

Çizelge 3.3. BTK elektrik ve manyetik alan sınır şiddetleri (BTK, 2015)

Frekans Aralığı (MHz)	E-Alan Limit Şiddeti(V/m)		H-Alan Limit Şiddeti (A/m)	
	Tek cihaz için	Ortam için	Tek cihaz için	Ortam için
0.010-0.15	19.3	65.25	1.1	3.75
0.15-1	19.3	65.25	0.16/f	0.54/f
1-10	19.3 /$f^{1/2}$	65.25 /$f^{1/2}$	0.16/f	0.54/f
10-400	6.2	21	0.016	0.054
400-2 000	0.305$*f^{1/2}$	1.03$*f^{1/2}$	0.00082$*f^{1/2}$	0.0027$*f^{1/2}$
2 000-60 000	13.5	45.75	0.035	0.12

Çizelge 3.4. ICNIRP elektrik ve manyetik alan sınır şiddeti (ICNIRP, 1998)

Frekans Aralığı	E-Alan Şiddeti(V/m)	H-Alan Şiddeti (A/m)
<1 Hz	-	3.2*10^4
1-8 Hz	10 000	3.2*10^4/f^2
8-25 Hz	10 000	4000/f
0.025 – 0.8 kHz	250/f	4/f
0.8-3kHz	250/f	5
3-150 kHz	87	5
0.15-1 MHz	87	0.73/f
1-10 MHz	87/$f^{1/2}$	0.73/f
10-400 MHz	28	0.073
400-2 000 MHz	1.375*$f^{1/2}$	0.0037*$f^{1/2}$
2-300 GHz	61	0.16

Çizelge 3.5. Çalışma koşulları altındaki elektrik ve manyetik alan sınır şiddeti (ICNIRP, 1998)

Frekans Aralığı	E-Alan Şiddeti(V/m)	H-Alan Şiddeti (A/m)
<1 Hz	-	$1.63*10^5$
1-8 Hz	20 000	$1.63*10^5/f^2$
8-25 Hz	20 000	20000/f
0.025 – 0.82 kHz	500/f	20/f
0.82-65kHz	610	24.4
0.065-1 MHz	610	1.6/f
1-10 MHz	610/f	1.6/f
10-400 MHz	61	0.16
400-2000 MHz	$3*f^{1/2}$	$0.008* f^{1/2}$
2-300 GHz	137	0.36

Avrupa birliğindeki bazı ülkelerin standartları ele alındığında Belçika 6 V/m, İtalya 6V/m, Litvanya 6.1 V/m ve Polonya'da 7 V/m olarak maksimum ortalama elektrik alan şiddetleri belirlenmiştir (MMF & GSMA, 2008).

Sağlık açısından bakıldığında ise uluslararası kuruluşların yapmış olduğu çalışmalar neticesinde insan vücuduna etki edebilecek SAR şiddeti çizelge 3.6'da gösterildiği gibi tavsiye edilmiştir. Ancak bu değerler sınır veya maksimum değerleri temsil etmemektedir.

Çizelge 3.6. 10 GHz'e kadar basit kısıtlamalı tavsiye edilen SAR şiddeti (ICNIRP, 1998)

Maruziyet Karakteristiği	Frekans Aralığı	Tüm Vücut Ortalama SAR (W/kg)	Baş ve Gövde Bölgesi Ortalama SAR (W/kg)	Kol ve Bacaklar Bölgesi Ortalama SAR (W/kg)
Çalışma Koşulları Altındaki Maruziyet	<1 Hz	-	-	-
	1-4 Hz	-	-	-
	4 Hz- 1 kHz	-	-	-

Çizelge 3.6. 10 GHz'e kadar basit kısıtlamalı tavsiye edilen SAR şiddeti (ICNIRP, 1998)(devam)

Maruziyet Karakteristiği	Frekans Aralığı	Tüm Vücut Ortalama SAR (W/kg)	Baş ve Gövde Bölgesi Ortalama SAR (W/kg)	Kol ve Bacaklar Bölgesi Ortalama SAR (W/kg)
Çalışma Koşulları Altındaki Maruziyet	1-100 kHz	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	0.4	10	20
	10 MHz- 10 GHz	0.4	10	20
Genel Halk Maruziyeti	<1 Hz	-	-	-
	1-4 Hz	-	-	-
	4 Hz- 1 kHz	-	-	-
	1-100 kHz	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	0.08	2	4
	10 MHz- 10 GHz	0.08	2	4

3.1.9.Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağı öğrenme yeteneğine sahiptir ve biyolojik sinir ağı bilgi işleme sisteminin bir taklididir. Hesaplama modeline dayalı paralel merkezi olmayan işlemedir. Sinir ağı esas olarak, düğüm veya işlem birimi (PE) olarak da bilinen çok sayıda yapay nörondan oluşur ve aşağıdaki yeteneklere sahiptir:

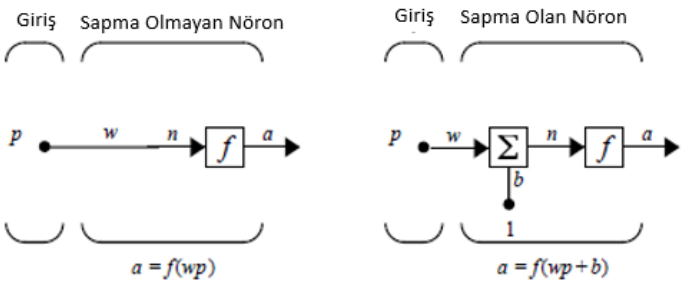
1. Öğrenme ve hafıza yeteneği: Ağın ağırlığını ayarlayarak öğrenmek ve hatırlamak için girdi ve çıktı arasındaki haritalama ilişkilerini dikkate alarak çıktı parametrelerinin gerçek çıktı değerine yakın üretmeyi amaçlar.

2. Paralel hesaplama yeteneği: Aynı anda birden fazla mesajı kabul edebilme ve paralel işleme prosedürlerine uygulanabilir. Her nöronun ayrı bir işleme yeteneği olmakla birlikte diğer nöronlardan etkilenmemektedir.

3. Hata toleransı: Bilgi depolama yöntemi için merkezi olmayan bellek kullanılmaktadır. Eksik bilgi veya gürültü girişinin küçük bir kısmı için de doğru düzeltme aksiyonu uygulayabilir.

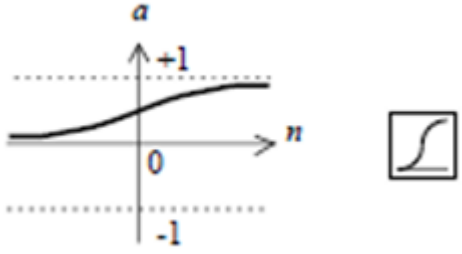
3.1.9.1.Yapay Sinir Ağı Mimarisi

Tek bir skaler girişi olan ve sapması olmayan bir nöron şekil 3.6'da solda gösterilmiştir.

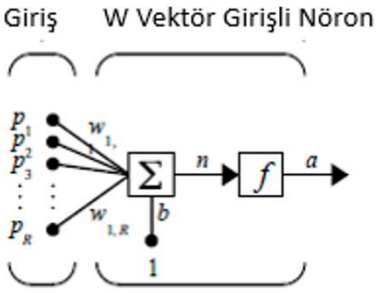


Şekil 3.6. Basit nöron mimarisi

Bir nöronun girdileri, onun sapması ve ağırlıklı girdilerinin toplamını içerir. Bir nöronun çıktısı, nöronun girdilerine ve transfer fonksiyonuna bağlıdır. Birçok kullanılabilir transfer fonksiyonu vardır. Tek bir nöron çok fazla işlevsel değildir. Dolayısıyla birkaç nöron, tek katman veya çoklu katmanlar halinde birleştirilebilir. Bir ağın mimarisi bir ağın kaç katmana sahip olduğunu her katmandaki nöronların sayısını her katmanın transfer fonksiyonunu ve katmanların birbirine nasıl bağlandığının bir açıklamasından oluşur.



Şekil 3.7. Log-Sigmoid transfer fonskiyonu



Şekil 3.8. Vektör giriş ağ mimarisi

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \ldots + w_{1,R}p_R + b \quad (3.104)$$

Kullanılacak en iyi mimari ağ tarafından temsil edilecek sorunun türüne bağlıdır. Bir ağ girdi değerlerini çıktı değerlerine eşleyerek bir hesaplamayı etkiler. Gerçekleştirilecek özel haritalama problemi ağ için çıktıların sayısı kadar girdi sayısını da sabitler. Bir ağın çıktı katmanındaki nöron sayısının yanı sıra her katmandaki nöron sayısı tasarımcıya bağlıdır. Lineer ağlar dışında gizli bir katmanda ne kadar çok nöron varsa ağ o kadar güçlü olur. Lineer bir haritalamanın temsil edilmesi gerekiyorsa lineer nöronlar kullanılmalıdır. Ancak lineer ağlar lineer olmayan herhangi bir hesaplama yapamaz. Lineer olmayan bir aktarım işlevinin kullanılması bir ağın girdi ve çıktı arasında doğrusal olmayan ilişkileri depolama becerisine sahip olmasını sağlar. Çok basit bir problem tek bir nöron katmanıyla temsil edilebilir. Ancak tek katmanlı ağlar belirli sorunları çözemez. Çoklu ileri beslemeli katmanlar bir ağa daha fazla çözüm yapabilme kapasitesi sağlar. Örneğin, herhangi lineer çıktı katmanını besleyen bir sigmoid katmanı olmak üzere iki katmanlı bir ağ ile temsil edilebilir. Sapmalı ağlar, girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkileri sapmasız ağlardan daha kolay temsil edebilir. Örneğin, sapmasız bir nöron tüm girdileri sıfır olduğunda transfer fonksiyonuna her zaman sıfır net girdiye sahip olacaktır. Bununla birlikte sapmalı bir nöron aynı koşullar altında herhangi bir net transfer fonksiyonu girdisine sahip olmayı öğrenebilir. İleri beslemeli ağlar zamansal hesaplama yapamaz. Geçici davranış için dahili geri bildirim yollarına sahip daha karmaşık ağlar gereklidir.

3.1.9.2.Algılayıcılar

Yapay sinir ağları içerisinde ki algılayıcılar sınıflandırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu sayede doğrusal olarak ayrılabilir girdi vektörleri sınıflandırabilirler. Algılayıcının sorunu

çözebilmesini sağlayan sonlu sayıda adımda yakınsama gerçekleştirilir. Bir algılayıcı ağının tasarımı tamamen çözülmesi gereken problemle sınırlıdır. Algılayıcılar tek bir katı sınır nöron katmanına sahiptir. Ağ girdilerinin sayısı ve katmandaki nöronların sayısı problemin gerektirdiği girdi ve çıktıların sayısı ile sınırlıdır.

Tek katmanlı algılayıcılar yalnızca veriler doğrusal olarak ayrılabilir olduğunda sorunları çözebilme kapasitesine sahiptir. Bunun yanı sıra ise birden çok katmanda birden çok algılayıcı kullanarak çözüm elde edilebilir. Alternatif olarak doğrusal olmayan şekilde ayrılabilen girdi vektörleri sınıflandırabilen doğrusal ağlar veya geri yayılım ağları gibi diğer ağ türleri kullanılmaktadır.

3.1.9.3.Ortalama Karesel Hata

Algılayıcı öğrenme kuralı gibi en küçük ortalama kare hatası (LMS) algoritması, öğrenme kuralına ait $\{p_1, t_1\}$, $\{p_2, t_2\}$,$\cdots$, $\{p_q, t_q\}$ olarak verilen bir dizi için istenen ağ davranışı örneğinin sağlandığı denetimli eğitimin bir örneğidir. p_q ağ için giriş, t_q ise ilgili hedef çıktıdır.

Ağa her bir girdiye karşılık hedef çıktı üretilmektedir. Ağa uygulanan her giriş hedef ile karşılaştırılır ve hedef çıktı ile ağ çıktısı arasındaki fark hata olarak hesaplanır. Bu hataların karelerinin toplamının ortalaması ortalama kare hatası olarak denklem 3.105'de gösterildiği gibi karşımıza çıkar ve bunun minimize edilmesi tahminin doğruluğunu arttırılması açısından önemlidir.

$$m_{se} = \frac{1}{Q}\sum_{k=1}^{Q} e(k)^2 = \frac{1}{Q}\sum_{k=1}^{Q}(t(k) - a(k))^2 \qquad (3.105)$$

Denklemde bulunan a(k) eğitimde kullanılan gerçek değer, e(k) ise ilgili eğitimin yapıldığı indeksteki hatadır.

3.1.9.4.Doğrusal Filtreler

Tek katmanlı lineer ağlar, minimum hata çözümü bulmak için doğrudan tasarlanabilir veya Widrow-Hoff kuralı ile eğitilebilir. Buna ilave olarak doğrusal ağlar, ağın çevresindeki değişiklikleri izlemesine izin verecek şekilde uyarlanabilir şekilde eğitilebilir.

Tek katmanlı lineer ağ tasarımı tamamen çözülecek problemle sınırlıdır. Ağ girişlerinin sayısı, katmandaki nöronların sayısı, problemin gerektirdiği giriş ve çıkışların sayısına göre belirlenir.

Doğrusal bir ağdaki çoklu katmanlar, daha güçlü bir ağ ile sonuçlanmaz bu nedenle tek katman bir sınırlama değildir. Ancak lineer ağlar sadece lineer problemleri çözebilir. Girdiler ve hedefler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler, doğrusal bir ağ ile tam olarak temsil edilemez. Bu bölümde tartışılan ağlar minimum toplam karesel hatayla doğrusal bir yaklaşım yapar.

Girdiler ve hedefler arasındaki ilişki doğrusal ise veya doğrusal bir yaklaşım isteniyorsa doğrusal ağların kullanılması daha uygundur. Aksi takdirde geri yayılım çözüm için iyi bir alternatif olmaktadır. (Howard & Mark, 2004)

3.1.9.5.Ağ Eğitimi

Yapay sinir ağlarında tahmin yapmak için gerekli koşullardan birisi ağın eğitilmesidir. Eğitim fonksiyonu bir dizi hesaplama döngüsü ile gerçekleşir. Her döngü geçişinde fonksiyon dizisi girdiler sunuldukça dizideki her girdi vektörü için çıktı, hata ve ağ ayarını hesaplayarak belirtilen girdi dizisi boyunca ilerler.

Eğitim fonksiyonu, ortaya çıkan ağın işini %100 doğruluk payı ile gerçekleştirmemektedir. Ağ yapısı içerisinde ki W ve b'nin yeni değerleri tüm hedeflere ulaşılıp ulaşılmadığını görmek için her giriş vektörü için ağ çıkışı hesaplanarak kontrol

edilmektedir. Bir ağ başarılı bir şekilde çalışmıyorsa daha fazla eğitim geçişi için yeni ağırlıklar ve sapmalarla eğitim fonksiyonu ile daha fazla eğitilebilir veya algılayıcı için uygun bir sorun olup olmadığını görmek için sorun analiz edilebilir. (Howard & Mark, 2004)

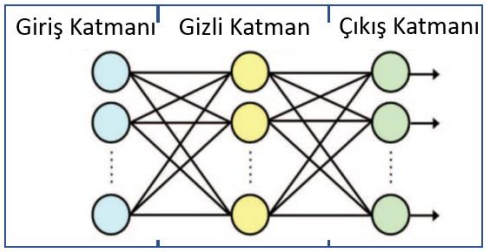
3.1.9.6.Geri Yayılım

Geri yayılım fonksiyon yaklaşımı, örüntü ilişkilendirmesi ve örüntü sınıflandırmasını gerçekleştirmek için türevlenebilir transfer fonksiyonlarına sahip çok katmanlı ileri beslemeli ağları eğitebilir. Buna ilave olarak en yaygın olarak çok katmanlı ağ kullanılmasına rağmen diğer ağ türleri de eğitilebilir.

Geri yayılım, ağ ağırlıkları ve sapmalara göre ağ hatasının türevlerinin hesaplanabileceği süreci ifade eder. Bu süreç bir dizi farklı optimizasyon stratejisiyle kullanılabilir. Çok katmanlı bir ağın mimarisi, çözülmesi gereken problemle tamamen sınırlı değildir. Ağdaki girdilerin sayısı problem tarafından kısıtlanır ve çıktı katmanındaki nöronların sayısı problemin gerektirdiği çıktıların sayısı ile sınırlandırılır. Ancak ağ girdileri ile çıktı katmanı arasındaki katman sayısı ve katmanların boyutları tasarımcıya bağlıdır.

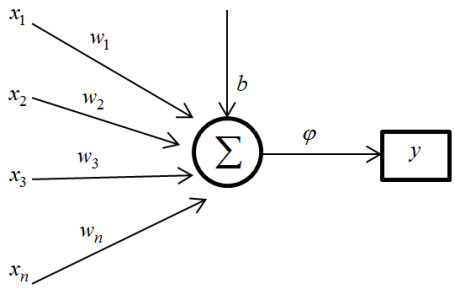
İki katmanlı sigmoid/doğrusal ağ, sigmoid katmanında yeterli nöron varsa, girdiler ve çıktılar arasındaki herhangi bir işlevsel ilişkiyi temsil edebilir. Birkaç farklı geri yayılım eğitim algoritması vardır. Çeşitli farklı hesaplama ve depolama gereksinimleri vardır ve hiçbir algoritma tüm konumlar için en uygun değildir (Howard & Mark, 2004).

Genel olarak bir sinir ağının mimarisi bir girdi katmanı, bir çıktı katmanı ve girdi katmanı ile çıktı katmanı arasında yer alan tek veya çok sayıda gizli katman içerir. Giriş katmanları ağ giriş değişkenlerini göstermek için kullanılır ve bilgi işlem yeteneği yoktur. Gizli katmanlar girdi işleme arasındaki etkileşimi temsil etmek için kullanılır. Çıkış katmanları ağ çıkış değişkenini görüntülemek için kullanılır. Nöronların sayısı aynı zamanda problemin karmaşıklığına göre değişkenlik göstermektedir (Chen, Huang, Lin, Tseng, & Wu, 2018).



Şekil 3.9. Temel sinir ağı mimarisi

Sinir ağının yapı taşı yapay bir nörondur. En basit sinir ağı şekil 3.10'da görüldüğü gibi sinaptik ağırlıkları w_1, w_2 ..., w_n ile bir sinüs ve bir aktivasyon fonksiyonu φ olan sinapslar yoluyla bir çıkış y'ye dönüştürülen girdi sinyalleri x_1, x_2 ..., x_n'ye sahiptir.



Şekil 3.10. Yapay Sinir Mimarisi (Pandey & Goyal, 2013)

İleri besleme sinir (feedforward) ağı mimarisinde üç katman bulunur. Bunlar giriş katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı. Giriş katmanı sistemin giriş değişkenlerini içerir. Gizli katmanın birden çok nöronları vardır. Çıktı katmanı ise ara gizli katmandan gelen veriyi verilen sinaptik ağırlıklarla birleştiriyor. Çok girişli ve tek çıkışlı bir ileri beslemeli sinir ağı mevcut olup denklem 3.106'da matematiksel olarak bu işlev gösterilmiştir.

$$y = \varphi\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b\right) \tag{3.106}$$

Sinir ağının öğrenilmesi sinaptik ağırlıkların güncellenmesi ve verilen ağ üzerinden iletilen verilen girdilerin istenen çıktıların yaklaşık değerlerine ulaşmasıdır. Öğrenme süreci denetlenebilir, denetlenemez veya takviye öğrenimi yapılabilir. Denetlenen öğrenme ağ için giriş-çıkış verisi sağlar ve ağ ağırlıklarını girdi-çıktı eşleştirmesinin gerçekleştirileceği şekilde uyarlamaktadır. Denetlenmeyen bir öğrenmede ağ için girdi-çıktı verileri sağlanmaz ve ağ ağırlıklarını veri kümeleşmesi gerçekleşecek şekilde adapte

eder. Takviye öğrenme sinaptik ağırlıkları en kötü çıktıyı üreten nöronların cezalandırılacağı şekilde günceller.

Bir gizli katmana sahip olan ileri beslemeli bir sinir ağı denklem 3.107'de ki gibi düşünülmektedir.

$$y = \sum_{i=1}^{n} w_i \varphi\,(x - x_i) \tag{3.107}$$

Bir dizi eğitim girişi x_i, i = 1, ..., k ve ilgili eğitim (tipik) çıktılar y_i, i = 1, ..., k olarak kabul edilir. Gerçek çıktı denklem 3.108'de gösterilmektedir.

$$o_i = \sum_{j=1}^{n} w_i \varphi\left(x_i - x_j\right) \tag{3.108}$$

Sistemin hata fonksiyonu ise denklem 3.109'da gösterilmektedir.

$$E = \sum_{i=1}^{k} (o_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^{k} \left(\sum_{j=1}^{n} w_j \varphi\left(x_i - x_j\right) - y_i\right)^2 \tag{3.109}$$

Öğrenme işlemi rastgele sinaptik ağırlıklar w_j, j=1,..,k olacak şekilde üretilir. Gerçek çıktı değeri o_i hesaplanır. Son olarak denklem 3.109'daki hata hesaplanır ve maksimum iterasyona ulaşılmamışsa minimum hata elde etmek için sinaptik ağırlıklar güncellenerek işlem tekrar edilir (Bede, 2006).

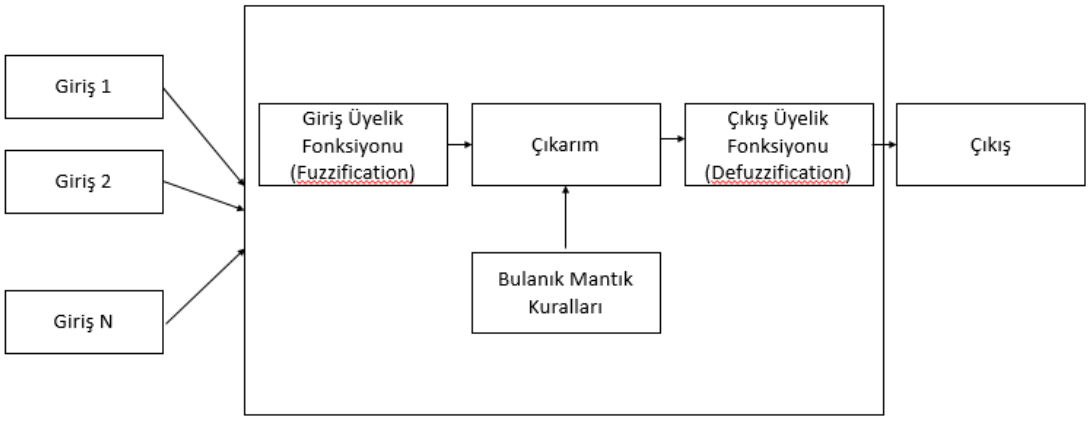
3.1.10.Bulanık Mantık

Bulanık mantık 1965 yılında matematiksel temellerini ilk forma sokan L. Zadeh tarafından dile getirilmiştir. Bulanık mantık, çok karmaşık bir sistemin küresel bilgisi ve bir kelime sistemindeki sistem davranışının ifadeleri nedeniyle safsızlıkların resmileştirilmesine izin verir. Bir sistem tanımının standartlaştırılmasına ve sayısal verilerin dilsel verilerde ifade edilmiş gibi işlenmesine izin verir.

Bulanık mantık, akıl yürütmenin temelini oluşturan mantıktır ve bu yöntem ile elde edilen sonuçlar kesin olmaya çok yakındır. Bulanık mantığın önemi, insan akıl yürütme

biçimlerinin çoğunun ve özellikle sağduyu akıl yürütmenin doğada yaklaşık olduğu gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bulanık mantık çıkarım sistemleri, yazılım geliştirmenin erken aşamalarında yazılım metrikleri açısından öznel bilgileri yakalama ve işleme konusunda faydalı bulmaktadır. Yazılım ölçütlerinin ilk aşamalarının çoğu çok net değildir ve aralarında yüksek ve karmaşık bir bağımlılık içerir. Bu nedenle bulanık mantık bu durumlarda uygun bir araç olarak düşünülür.

Şekil 3.11'de hata öngörüsü için bulanık mantık sistemine genel bir bakış sunmaktadır. Bir bulanık mantık sisteminin dört temel bileşeni vardır. Bunlar bulanıklaştırma işlemi (giriş), bulanık kural tabanı, bulanık çıkarım süreci ve bulanıklaştırma (çıktı). Bulanıklaştırma, berrak bir miktarı bulanık hale dönüştürme işlemidir. Diğer bir deyişle, bulanıklaştırma, net değerden bulanık değere bir eşleme sağlar. Elde edilen verilere ve ilişkili belirsizliğe bağlı olarak giriş ve çıkış parametreleri düşük, orta ve yüksek gibi dilsel değişkenler açısından sınıflandırılır. Herhangi bulanık sistemin temel birimi bulanık kural tabanıdır. Bulanık mantık sisteminin diğer tüm bileşenleri bu kuralları makul ve verimli bir şekilde uygulamak için kullanılır. Bulanık çıkarım işlemi bulanık kural tabanındaki kuralları birleştirir ve bulanık girdiden bulanık çıktıya bir eşleme sağlar. Bulanık bir işlemin çıktısının bulanık kümeye göre tek bir nicelik olması gerektiği durumlar olabilir. Bulanık çıktıdan net bir değer elde etmek için bulanık çıktılar bulanıklaştırılmalıdır.



Şekil 3.11. Bulanık mantık sistemi

Bulanık bir sistemin özelliği, sayısal verileri ve sözcük bilgisini aynı anda kontrol edebilmesidir. Bulanık bir sistemde girdi veri akışı üzerinde bir çıktıyla sonuçlanan

doğrusal olmayan bir dönüşüm yürütür. Bulanık sistemler gelişmiş sistemlerin özel bir durumu olarak kabul edilir. Bulanık küme veya belirsiz küme hakkında pek fazla kesin bilgiye sahip olmayan bir kümedir. Bir Bulanık Küme tamamen X değerlerinin evreni ve üyelik fonksiyonu (MF) tarafından tanımlanır.

X, x olarak belirtilen öğelerle birlikte söylemin evreni olsun. X söyleminin evreninin bir bulanık A kümesi ve A kümesindeki her x elemanına bir üyelik derecesi μ_A(x) ile ilişkilendirilen bir üyelik fonksiyonu A(x) denklem 3.110 ile karakterize edilir.

$$\mu_A \text{ (x): X} \rightarrow [0,1] \tag{3.110}$$

Bir bulanık kümeyi temsil etmek için ilk önce üyelik fonksiyonunu tanımlamalıdır. Bu durumda bir bulanık A kümesi tamamen çok sayıda ikili tarafından tanımlanır.

$$\text{A} = \{[\text{x}, \mu_A \text{ (x)}] \mid \text{x A}\} \tag{3.111}$$

Üyelik fonksiyonu μ_A böylece her bir elemanı x üyelik derecesini bulanık küme A ile ilişkilendirir ve üyelik derecesi μ bir elemanın bir bulanık kümeye ne ölçüde ait olduğunu ifade eder. Birkaç tür üyelik fonksiyonu veya bulanık sayı vardır. Bunlar temel olarak tekil, üçgen, gama, S, π, yamuk, Gauss 'dur.

Bulanık çıkarım sistemlerinin tipik yapısı belirli bir benzerliği gerçekleştiren kalıptır. Bu yapı içerisindeki parametreler; kesin giriş değeri, girişin üyelik fonksiyonları, çıkarım kuralları, çıktı özellikleri, çıkışın üye fonksiyonları, kesin çıkış değeridir. X_i, girdi boyutları ve Y_i, çıktı boyutlarıdır. Her blok ve bağlantının belirli işlevleri vardır.

Yukarıda anlatılan sistemin birçok noktada uygulama alanları mevcuttur. Örnek vermek gerekirse, bir tür üzerine maruz bırakılan ışınım parametreleri ve sağlık hasarı seviyesi arasında korelasyonları incelemek için farklı girdi boyutları oluşturulabilir. Elektromanyetik alan frekansı, manyetik indüksiyon ve alan gücü, kaynağa olan mesafe, maruz kalma süresi, türün yaşı, türün cinsiyeti girdiler olarak seçilebilir. Bulanık mantığın uygulanması, tek başına veya genetik algoritmalar ile ikili mantık veya sinir ağları ile kombinasyon halinde diğer elektromanyetik alan konularında yapılabilir. Bir diğer örnek

olarak ise, elektromanyetik parametrelerinin modifiye edilmesiyle bir elektrikli arabanın hızını kontrol etmektir. Bir elektrikli cihazın çalışma sırasında oluşan elektriksel ve manyetik gerilimlere göre elektromanyetik uyumluluğunun evrimi, endüstriyel güç şebekelerinin elektrik devrelerindeki kısa devrelerin tespiti, reaktif güç reaktif güç kontrolü ve güç faktörü artışı vb. verilebilir (Gao, Chen, Liu, Liu, & Hu, 2021).

3.1.11.Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi (MLRA)

Regresyon analizi, değişkenler arasındaki ilişkiyi araştırmak ve modellemek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. Regresyon uygulamaları mühendislik, fizik, kimya gibi temel bilimler, ekonomi, yönetim, yaşam- biyolojik bilimler ve sosyal bilimler dahil olmak üzere hemen hemen her alanda ortaya çıkmaktadır. Regresyon analizi en yaygın kullanılan istatistiksel teknik olarak karşımıza çıkmaktadır.

Temel olarak lineer regresyon modeli olarak adlandırılmaktadır. Geleneksel olarak denklem 3.108'de bağımsız değişken, y'ye de bağımlı değişken denir. Bununla birlikte bu genellikle istatistiksel bağımsızlık kavramıyla karışıklığa neden olur. Bu nedenle x'i tahmin edici veya regresyon değişkeni ve y yanıt değişkeni olarak adlandırılmaktadır. Çünkü denklem 3.112 sadece bir regresör değişkeni içerir ve buna basit lineer regresyon modeli denir.

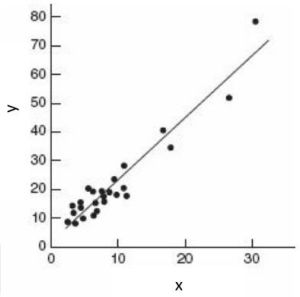
$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \tag{3.112}$$

Doğrusal regresyon modeline ilişkin bazı ek bilgiler elde etmek için x regresör değişkeninin değerini sabitleyebileceğimizi ve karşılık gelen y yanıtı değerini gözlemleyebileceğimizi varsayalım. Eğer x sabitse denklemin sağ tarafındaki ε rastgele bileşeni y'nin özelliklerini belirler. ε'nin ortalamasının ve varyansının sırasıyla 0 ve σ^2 olduğunu varsayalım. Ardından regresör değişkeninin herhangi bir değerindeki ortalama yanıtı denklem 3.113'de ki olmaktadır.

$$E(y \mid x) = \mu_{y \mid x} = E(\beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon) \tag{3.113}$$

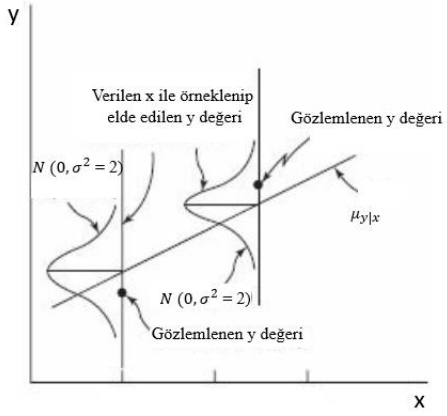
Denklem 3.113'de verilen dağılım diyagramı Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Herhangi bir x değeri verilen y'nin varyansı ise denklem 3.114'de gösterilmiştir.

$$\text{Var}(y \mid x) = \sigma^2_{y \mid x} = \text{Var}\,(\beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon) = \sigma^2 \qquad (3.114)$$



Şekil 3.12. Dağılım diyagram ilişkisi

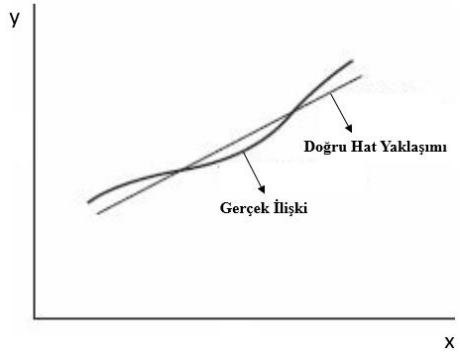
Böylece gerçek regresyon modeli $\mu_{yIx} = \beta_0 + \beta_{1x}$ bir ortalama değerler çizgisidir. Yani herhangi bir x değerindeki regresyon çizgisinin yüksekliği her x için y'nin yalnızca beklenen değeridir. Eğim (β_1), x' deki bir birim değişiklik için y'nin ortalamasındaki değişiklik olarak yorumlanmaktadır. Ayrıca y'nin belirli bir x değerindeki değişkenliği modelin hata bileşeni olan σ^{2}'nin varyansı tarafından belirlenir. Bu her x'te y değerlerinin bir dağılımı olduğu ve bu dağılımın varyansının her x'te aynı olduğu anlamına gelir.



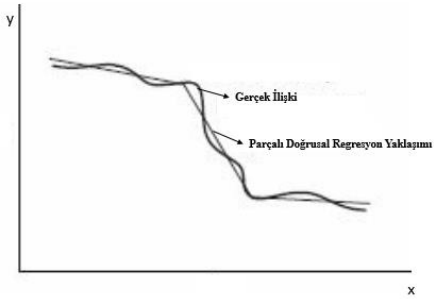
Şekil 3.13. Doğrusal regresyon yaklaşımı

Hemen hemen tüm regresyon uygulamalarında regresyon denklemi ilgilenilen değişkenler arasındaki gerçek fonksiyonel ilişkiye yalnızca bir yaklaşımı göstermektedir.

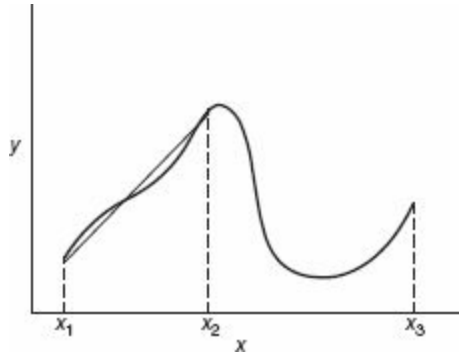
Bu işlevsel ilişkiler genellikle fiziksel, kimyasal, diğer mühendislik veya bilimsel teorilere, yani temel mekanizmanın bilgisine dayanır. Sonuç olarak bu tür modellere genellikle mekanik modeller denir. Regresyon modelleri ise ampirik modeller olarak düşünülür. Şekil 3.14'de, y ve x arasındaki gerçek ilişkinin nispeten karmaşık olduğu bir durumu göstermektedir. Ancak buna bir lineer regresyon denklemi olarak yaklaşılabilir. Bazen altta yatan mekanizma daha karmaşık olmakla birlikte y ve x arasındaki gerçek ilişkiyi yaklaşık olarak tahmin etmek için "parçalı doğrusal" bir regresyon fonksiyonunun kullanıldığı Şekil 3.15'de ki gibi daha karmaşık bir yaklaşıklık fonksiyonuna ihtiyaç duyulmasına neden olur.



Şekil 3.14. Bir hesaplamanın doğrusal regresyon yaklaşımı



Şekil 3.15. Parçalı doğrusal ile karmaşık bir ilişkinin yaklaşıklığı



Şekil 3. 16. Regresyonda ekstrapolasyon tehlikesi

Genel olarak, yanıt değişkeni y, k regresör, x_1, x_2,…, x_k ile ilişkili denklem 3.115'de ki gibi olabilir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3.115)$$

Denklem 3.115'de birden fazla regresör dahil olduğu için çoklu doğrusal regresyon modeli olarak adlandırılır. Y, x'lerin lineer bir fonksiyonu olmadığı için, β_0, β_1,…, β_k parametrelerinde modelin lineer olduğunu belirtmek için kullanılır. Daha sonra, y'nin x'lerle doğrusal olmayan bir şekilde ilişkili olduğu birçok modelin, denklem β'lar da doğrusal olduğu sürece hala doğrusal regresyon modelleri olarak ele alınabileceğini anlaşılmaktadır.

Regresyon analizinin önemli bir amacı, regresyon modelindeki bilinmeyen parametreleri tahmin etmektir. Bu işleme modelin verilere uydurulması da denir. Regresyon modelleri, veri açıklaması, parametre tahmini, kestirim ve tahmin, kontrol dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılır. Mühendisler ve bilim adamları bir dizi veriyi özetlemek veya tanımlamak için sıklıkla denklemleri kullanır. Regresyon analizi bu tür denklemlerin geliştirilmesinde yardımcı olur. Elektromanyetik alan şiddetinin tahmini de bu yöntemle belirlenebilmektedir (Montgomery, Peck, & Vining, 2012).

3.2.Yöntem

Bu bölümde materyal başlığında bahsedilen tahmin modelleri olan yapay sinir ağları ve bulanık mantık ile fiziksel olarak gerçekleştirilen elektrik alan şiddeti ölçümlerinin tezin amacına uygun olarak gerçekleştirilme yöntemleri açıklanmıştır.

3.2.1. Ölçüm

Bu çalışmada Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü içerisinde bulunan Tıp Fakültesi bölgesinde elektrik alan şiddeti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Uludağ Üniversitesi Görükle Yerleşkesinin Tıp Fakültesi bölgesi civarında 15 farklı konumda hafta içi 5 gün farklı saatlerde sistematik olarak seçilerek belirlenerek şekil 3.17'de gösterilmiştir. Ölçüm noktalarının belirlenmesinde bölgedeki yoğun insan popülasyonunun olması ve Tıp fakültesi hastanesi civarında bulunan 2 adet baz istasyonu noktalarının bulunması önemli rol oynamıştır. Ölçümler 15 farklı konumda, 5 gün ve her gün 08:00-10:00, 12:00-14:00 ve 17:00-19:00 olmak üzere 3 farklı saat diliminde toplam 225 adet olarak gerçekleştirilmiştir. Alınan 225 ölçüm değerleri ise bulgular kısmında ölçüm indeksi olarak nitelendirilmiştir (Karpat vd., 2019).



Şekil 3.17. Kampüs içerisi ölçüm konumları

Şekil 3.17'de referans 1, referans 2, referans 3 ve referans 4 konumları mevcuttur. Bu konumlar tahmin metodu neticesinde tüm kampüsün haritalandırılması için belirlenmiş sınır noktalarıdır.

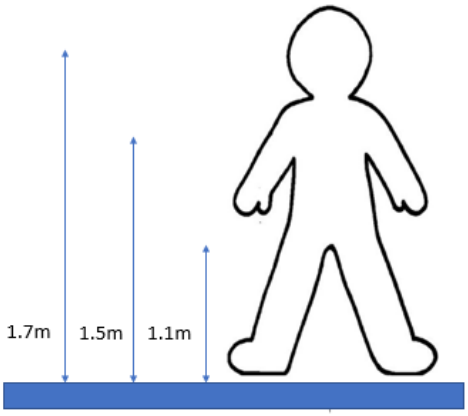
Ölçümler ulusal standartlar gereği altı dakikalık periyotlar halinde sabit olarak şekil 3.17'de gösterilen konumlarda BTK tarafından belirlenen standartlara uygun olarak alınmıştır (BTK, 2015). Cihaz parametreleri referans alınan standartlarda ölçüm alabilmek için konfigüre edilmiştir. Her ölçüm periyodu için çizelge 3.7'de belirtilen frekans tablosunda gösterilen frekans değerinde 224 örnek alınmış ve bu değerlerin ortalaması, maksimum ve minimum şiddetleri raporlanmıştır. Ölçümlerdeki örnekleme periyodu 1.6 s olarak gerçekleştirilmiştir. Rapor içerisinde göre üç farklı birimde (V/m, A/m ve W/ m^2) alan şiddetleri denklem 3.116'da ki gibi hesaplanarak raporlanmaktadır. Servis tablosunda belirtilen her bir frekans bileşeni için ayrı ayrı 224 örnek alınarak o frekans değeri için ortalama elektrik alan şiddeti elde edilir.

$$|E_i| = \frac{\sum_{n=1}^{224} \sqrt{|E_r|^2 + |E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}}{224} \tag{3.116}$$

Denklem 3.116'da elde edilen değerler, çizelge 3.7'deki servis tablosunda frekans bileşenleri denklem 3.117'de gösterildiği gibi toplam ortalama elektrik alan şiddeti hesaplanır.

$$|E_{ort}| = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} {E_i}^2} \tag{3.117}$$

Elektromanyetik maruziyetin tespiti için ölçülecek nokta ve ölçüm süresi elde edilecek verilerin doğruluğu açısından büyük önem arz etmektedir. Bu maruziyetin en çok etkilediği varlık olan insan düşünüldüğünde ortalama bir insan vücudu göz önüne alınarak bu noktalar belirlenmelidir. Ölçüm noktaları, BTK'nın belirttiği ölçüm standardında belirtildiği gibi insanların en yüksek maruz kalma düzeyini temsil edecek şekilde, şekil 3.18'de gösterildiği gibi ortalama bir insan boyu referans alınarak belirlenmiştir (BTK, 2015).



Şekil 3.18. Ölçüm cihazın konumlanacağı nokta (ECC 2003)

Ölçümlerde kullanılan cihaz şekil 3.19'da gösterilen SRM-3006 selektif (27 MHz- 6 GHz) radyasyon metredir. Kullanılan anten ise 27 MHz-3 GHz üç yönlü X, Y ve Z düzlemlerini kapsayan izotropik antendir. Cihaz içerisindeki dahili GPS modülü sayesinde ölçüm değerleri konum ve zaman verileriyle eş zamanlı olarak raporlanabilmektedir.



Şekil 3.19. SRM 3006 cihazı

Ölçümler sırasında kullanılan servis tablosu oluşturulurken Türkiye'de kullanılan frekans bandları dikkate alınmıştır. 27 MHz-3GHz aralığında 50 adet frekans bandından oluşmaktadır (Çizelge 3.7). Bu sayede her bir frekans bandından gelen etkiyi ayrı ayrı gözlemlemek mümkündür.

Çizelge 3.7. Ölçüm servis tablosu (BTK, 2015)

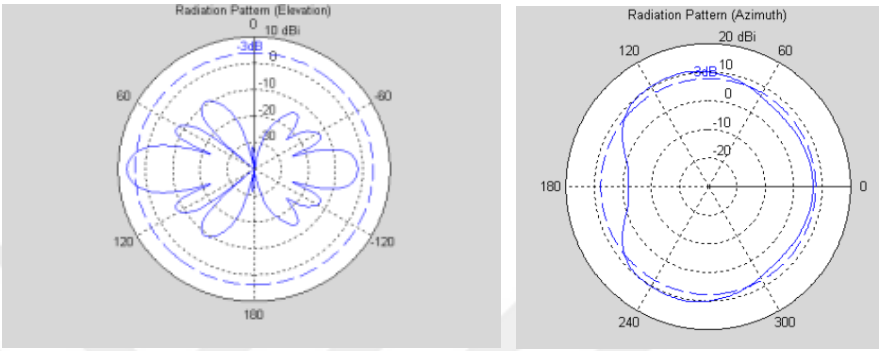
Frekans İndeksi	**Servis Adı**	F_{min}**(MHz)**	F_{maks}**(MHz)**
1	Band I	47	68
2	FM Radyo	87	108
3	VHF Telsiz	140	170
4	VHF TV	170	300
5	UHF Telsiz	400	470
6	UHF TV	470	790
7	Operatör1_800	791	801
8	Operatör2_811	801	811
9	Operatör3_811	811	821
10	Operatör1_840	832	842
11	Operatör2_852	842	852
12	Operatör3_862	852	862
13	Operatör1_887	880	888
14	Operatör1_890.1	887.7	890
15	Operatör3_901	890.1	901
16	Operatör3_902	901.1	903
17	Operatör2_913	902.5	914
18	Operatör2_914	913.5	915
19	Operatör1_932	925.1	933
20	Operatör1_935	932.7	935
21	Operatör3_946	935.1	946
22	Operatör3_947	946.1	948
23	Operatör2_958	947.5	959
24	Operatör2_959	958.5	960
25	Operatör1_1725	1710.1	1730
26	Operatör1_1745	1725.1	1750

Çizelge 3.7. Ölçüm servis tablosu (BTK, 2015) (devam)

Frekans İndeksi	**Servis Adı**	F_{min}**(Hz)**	F_{maks}**((Hz)**
27	Operatör1_1820	1805.1	1820
28	Operatör1_1840	1820.1	1840
29	Operatör3_1869	1840.1	1870
30	Operatör2_1879	1869.9	1880
31	Operatör3_1940	1920	1940
32	Operatör2_1955	1940	1960
33	Operatör1_1970	1955	1970
34	Operatör3_1980	1970	1980
35	Operatör2_2015	2010	2020
36	Operatör3_2025	2015	2030
37	Turkcell_2130	2110	2130
38	Operatör2_2145	2130	2150
39	Operatör1_2160	2145	2160
40	Operatör3_2170	2160	2170
41	WLAN	2400	2500
42	Operatör3_2525	2500	2530
43	Operatör2_2540	2525	2540
44	Operatör1_2550	2540	2550
45	Operatör1_2585	2570	2590
46	Operatör2_2595	2585	2600
47	Operatör3_2605	2595	2610
48	Operatör3_2645	2620	2650
49	Operatör2_2660	2645	2660
50	Operatör1_2670	2660	2670

Dünya üzerindeki mobil telekomünikasyon ağının sağlanması için baz istasyonları belirli teknik özelliklere sahip olmalıdır. Bu teknik özelliklerin içerisinde yer alan antenlerin

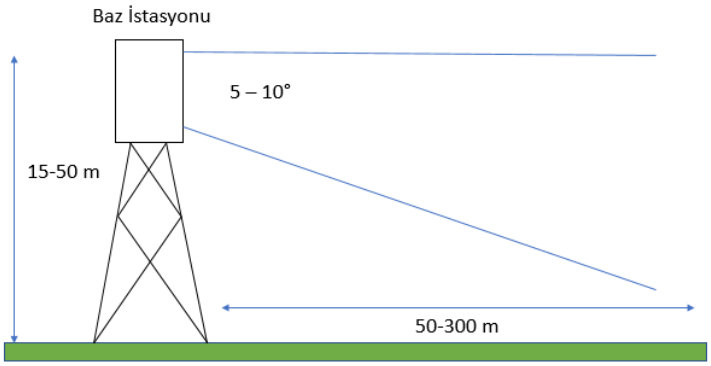
ışıma örüntüsü elektrik alan şiddeti ölçüm noktasının belirlenmesinde önemli bir parametredir. Ölçüm yapılan noktaların belirlenmesinde kullanılan bir diğer ölçüt ise şekil 3.20'de verilen ışıma örüntüsü bilgisidir. Bu parametre referans alınarak yerleşke içerisinde dış ortamda bulunan iki adet baz istasyonundan etkilenen yerler etrafındaki ölçüm noktaları belirlenmiştir.



Şekil 3.20. 2 Boyutlu olarak baz istasyonu ışıma örüntüsü (Acar 2010)

Ölçüm noktalarının tespitindeki bir diğer parametre ise denklem 3.118'de verilen baz istasyonuna olan izdüşümü mesafenin tespitidir. İncelenen modelde ölçüm alınacak baz istasyonu anteni 50 m yüksekliğinde (R_y) yerleştirildiğinde şekil 3.20'de ki anten ışıma örüntüsü incelendiğinde elevation açısı 6.2° olan ve şekil 3.21'da görülen R'nin yataydaki bileşenin optimum ölçüm alınacak nokta olan R_x mesafesi denklem 3.118'de hesaplanır.

$$\frac{R_y}{R_x} = \tan 6.2° \rightarrow R_x = 70.54 \text{ m} \qquad (3.118)$$



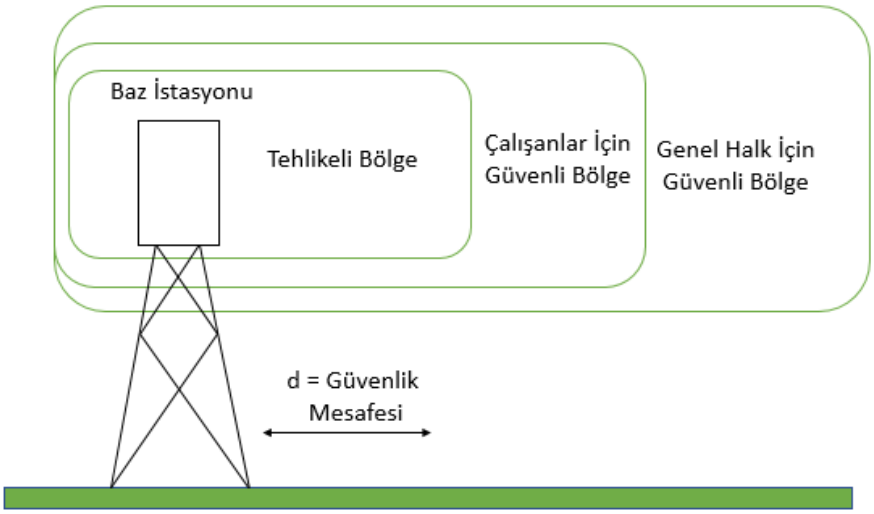
Şekil 3.21. Dikey baz istasyonu ışınım yapısı

Hesaplanan R_x mesafesinde antenden yayılan elektromanyetik dalganın toprak düzlemi ile temas ettiği ilk noktadır. Bu noktadaki elektromanyetik ışınım, anten çıkış noktasının yaklaşık %5'ine denk gelmektedir (Cerezci ve ark.,2010).

Baz istasyonları anten çıkış noktasındaki elektrik alan şiddeti oranı çok yüksek olduğundan şekil 3.22'de görülen güvenlik mesafesi modeli uygulanmalıdır. Bu model üç noktaya ayrılmaktadır. Bu noktalar tehlike bölgesi, çalışanlar için maruziyet bölgesi ve genel halk maruziyet bölgesidir. ICNIRP standardına göre çalışanlar için maruziyet limit değerleri genel halk maruziyeti limit değerlerinden yüksektir. Ülkemizdeki yasal standartlara göre tehlikeli bölge yalnızca emniyet mesafesi olarak belirlenmiştir, diğer iki bölge bu hesaplamaların dışında tutulmuştur. Denklem 3.119'da şekil 3.22'de gösterilen güvenlik mesafesi hesaplanmaktadır.

$$d = \frac{\sqrt{30 * P * 10^{G/10}}}{E} \tag{3.119}$$

Denklemde P çıkış gücü W, G anten kazancı dBi, E ise elektrik alanı V/m temsil etmekte olup örnek bir baz istasyonu modeli için anten çıkış gücü 40 W, anten kazancı 16.1 dBi, BTK standartlarına göre elektrik alan sınır şiddeti olan 13.5 V/m alınırsa emniyet mesafesi 16.37 m olarak hesaplanmaktadır.



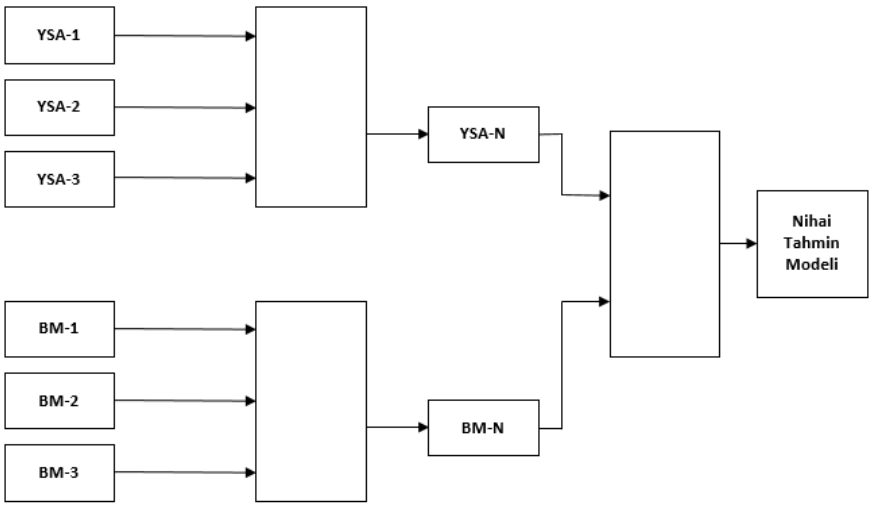
Şekil 3.22. Önerilen Güvenlik Mesafesi Modeli

3.2.2. Tahmin

Ölçüm verilerine dayanan, yapay sinir ağları ve bulanık mantık modelleri ile elektrik alan şiddeti tahmini yapılmıştır. Tahmin modelleri geliştirilirken ölçüm verileri MATLAB ortamına aktarılarak bulanık mantık için Fuzzy Logic Designer ve yapay sinir ağları için ise Neural Network/Data Manager Toolboxları kullanılmıştır. Bunun neticesinde de giriş değerlerine göre çıkış olarak elektrik alan şiddeti tahmin edilmiştir. Tahmin işlemleri için kullanılan bilgisayarın sahip olduğu özellikler ise şu şekildedir; Intel®Core(TM) i7-5500 CPU @ 2.40 GHz 8.00 GB RAM 64 Bit işletim sistemi x64 tabanlı işlemci.

Modelin eğitilmesi için iki farklı grup olarak giriş verileri belirlenmiştir. Buradaki amaç tahmin esnasında elde edilen toplam ortalama karesel hata (MSE) değerini düşük tutarak doğruluğunu arttırmaktır.

Tahminlerin yapılması ile en düşük hata dolayısıyla en yüksek doğruluğa sahip yöntemin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple hem yapay sinir ağı hem de bulanık mantık yöntemlerinin kullanılacağı 3'er adet model tasarlanmıştır. Bu modellerin tasarımında en karmaşık modele göre giriş ve gizli katmanların özellikleri belirlenmiştir. Şekil 3.23'de gösterilen blok diyagramda tasarlanan her bir model sonucunda yapılan karşılaştırmalar neticesinde nihai tahmin modelinin seçimi gösterilmektedir. Elde edilen nihai model belirlenmesinde giriş parametreleri, bu parametreler neticesinde elde edilen çıkış değerlerinin doğruluğunun yüksekliği, ağın karmaşıklığı, tahmin süresi, kullanılan çözüm ortamı ile uyumu göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Karpat & Bakcan, 2022).



Şekil 3.23. Tahmin modeli seçim blok diyagramı

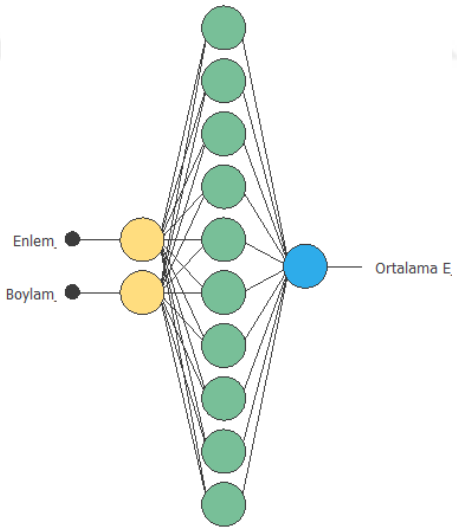
Sonraki bölümlerde bahsedilecek olan girdi parametreleri şu şekilde temsil edilmektedir. Enlem, ölçüm alınan noktanın WGS84 formatında ki enlem değeri (xx.xxxx); boylam, ölçüm alınan noktanın WGS84 formatında ki boylam değeri (yy.yyyy); mesafe-1, ölçüm alınan nokta ile ölçüm bölgesinde bulunan 1 numaralı baz istasyonu arasında ki iz düşümü mesafesi (m), mesafe-2, ölçüm alınan nokta ile ölçüm bölgesinde bulunan 2 numaralı baz istasyonu arasında ki iz düşümü mesafesi (m); gün, ölçüm alınan günler pazartesiden cumaya 1'den 5'e kadar sınıflandırılmıştır; saat, ölçüm alınan saat 00:00-23:59 arası olmak üzere dakika cinsine çevrilerek 0-1439 aralığında sınıflandırılmıştır.

3.2.2.1. Yapay Sinir Ağları ile Tahmin

Yapay sinir ağı ile tahmin yapılması için bulanık mantık yönteminde olduğu gibi MATLAB Neural Network Toolbox içerisinde üç adet model tasarlanmıştır. Giriş değişkenleri ölçüm alınan noktalarda ki parametreler olup 225 x 6'lik bir boyuta sahiptir. Giriş verilerinin %90'ı ağ eğitimi için, %10'u doğrulama ve test için kullanılmıştır. Eğitim verileri eğitim sırasında ağa sunulur ve ağ hatasına göre ayarlanır. Doğrulama verileri, ağ genelleştirmesini ölçmek ve genellemenin gelişmesi durduğunda eğitimi durdurmak için kullanılır. Son olarak test verileri ise eğitim üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Bu nedenle eğitim sırasında ve sonrasında ağ performansının bağımsız bir şekilde ölçülmesi amacıyla kullanılmaktadır. Gizli katmanda bulunan nöron sayısını tespit etmek amacıyla 2 ile 50 nöron sayısı arasında ızgara tarama metoduyla hata oranı incelenmiştir.

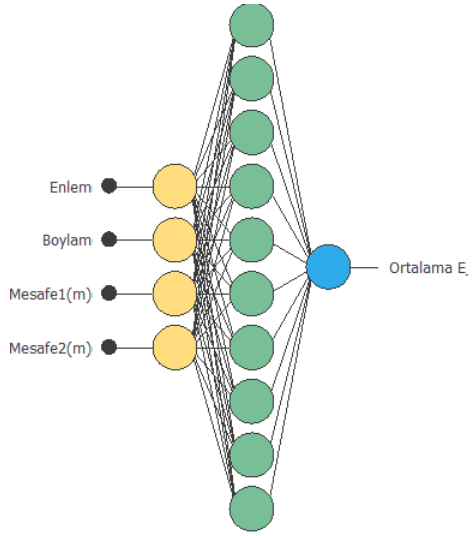
Gizli katman nöron sayısı bu tarama ile 10 olarak belirlenmiştir. Bu sayıdan daha fazla nöron kullanılmasında ağ eğitim hata oranında % 0.016 oranında azalma olmakla birlikte ağın eğitimi ve tahmin süresinde % 135 ‘lik artış söz konusudur. Dolayısıyla 10 adet nöron sistemin optimum çalışması için ideal olarak kabul edilmiştir. Bu katmanda ki nöron sayısı çıkışta elde edilen hata payının düşük olması amacı ön planda tutularak belirlenmiştir. Ağın eğitilmesi amacıyla Bayesian düzenleştirme algoritması, kullanılmıştır. Bu algoritmanın seçilmesinde daha az bellek gereksinimi kullanması ön plandadır. Bunun yanı sıra doğrulama örneklerinin ortalama kare hatasındaki bir artışla gösterildiği gibi, genellemenin gelişmesi durduğunda eğitim otomatik olarak minimum hatayı verecek şekilde durur. Giriş ve çıkış parametrelerinin dışındaki tüm değişkenler tahmin için geliştirilen modellerinde hepsinde aynı olarak uygulanmıştır. Burada ki amaç ise giriş parametrelerine bağlı olarak sistemin doğruluk değerinin tespit edilmesidir.

İlk modelde şekil 3.17’de verilen ölçüm konumlarının enlem, boylam değerleri iki adet giriş değişkeni olarak alınarak, ortalama elektrik alan şiddeti 1 adet çıkış değeri olarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu model şekil 3.24’de verilmektedir.



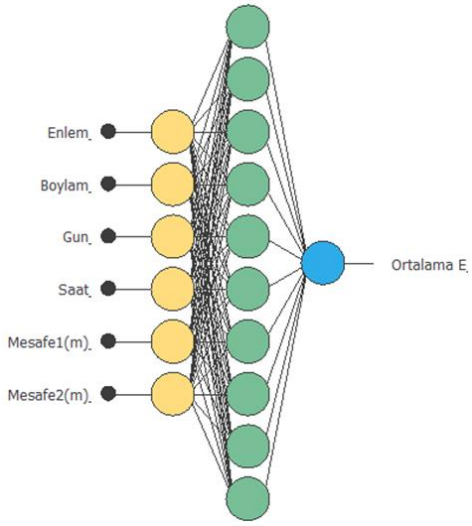
Şekil 3.24. Yapay sinir ağı model-1

İkinci modelde şekil 3.25’de gösterildiği gibi dört adet giriş değişkeni belirlenmiştir. Bu giriş verileri için 225x4 ‘lük bir dizi ile ölçüm yapılan konumun enlem, boylam değerleri, bölgede bulunan birinci baz istasyonuna olan mesafe ve bölgede bulunan ikinci baz istasyonuna olan mesafe verilmiştir.



Şekil 3.25. Yapay sinir ağı model-2

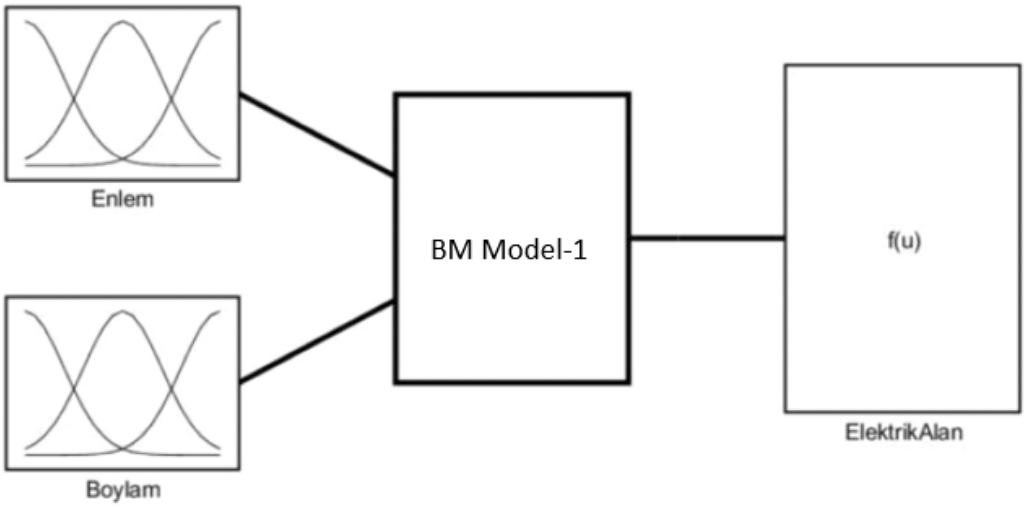
Üçüncü modelde şekil 3.26'da gösterildiği gibi altı adet giriş değişkeni belirlenmiştir. Bu giriş verileri için 225x6 'lık bir dizi ile ölçüm yapılan konumun enlem, boylam değerleri, bölgede bulunan birinci baz istasyonuna olan mesafe ve bölgede bulunan ikinci baz istasyonuna olan mesafe, ölçüm yapılan gün ve saattir. Coğrafi konumlara ilave olarak ölçüm gün ve saatinin eklenmesi dolaylı olarak ölçüm alınan noktalardaki insan yoğunluğunu modele entegre edilmesini sağlamıştır.



Şekil 3.26. Yapay sinir ağı model-3

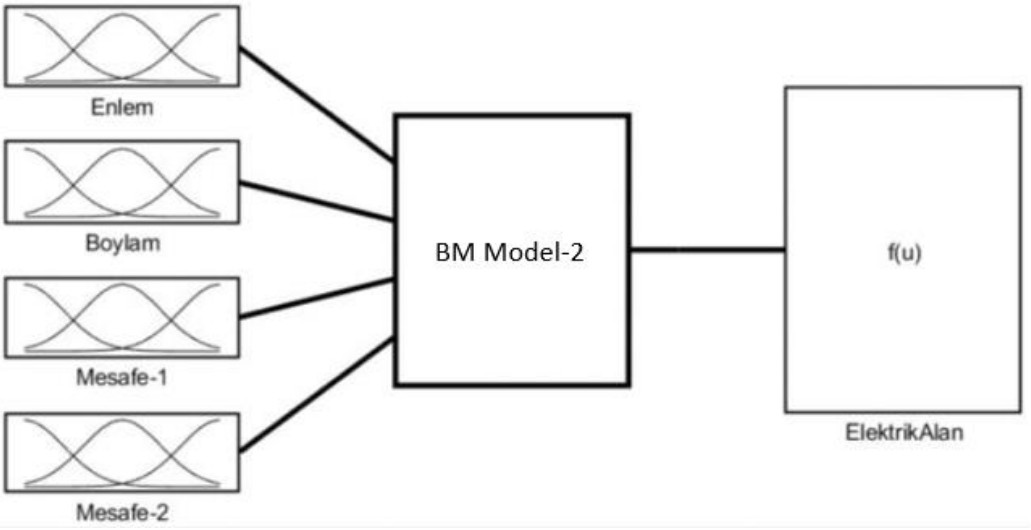
3.2.2.2. Bulanık Mantık ile Tahmin

Şekil 3.23'de verilen blok diyagramında BM olarak gösterilen bloklar bulanık mantık ile olan tahmin modelini temsil etmektedir. Kullanılan modellerde ki sınıflandırmada BM-1 modeli en basit model olmakla birlikte BM-3 en fazla girişe parametresine sahip model olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.27'de BM-1 modeli gösterilmektedir. Bu modelde 2 adet giriş, 1 adet çıkış bulunmaktadır. Çıkış olarak ölçüm yapılan tüm frekansların ortalama elektrik alan şiddetleri tahmin edilmiştir. BM-1 bloğu altında bulunan üyelik fonksiyonu katmanında, enlem ve boylam için 8'er adet üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Üyelik fonksiyonlarının çarpımı ile toplam kural sayısı elde edilmektedir. Model-3'de minimum 64 adet kural oluşturulabildiği için tüm modellerde eşit sayıda kural oluşturularak tahminler neticesinde oluşacak hataların gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Toplamda tahmin modeli için lineer olarak 64 kural oluşturulmuştur. Diğer bulanık mantık modellerinde de maksimum 64 kural olacak şekilde bir kural dizisi oluşturulmuştur.



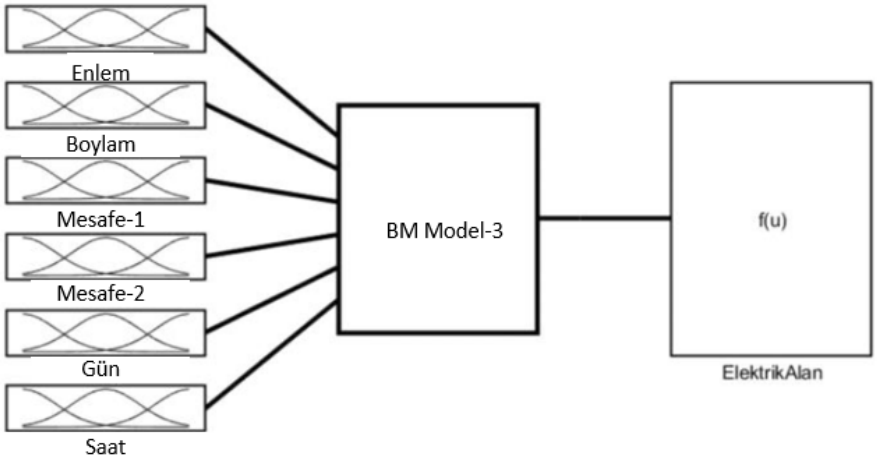
Şekil 3.27. Bulanık mantık model-1

Şekil 3.28 'de gösterilen ikinci modelde ilk modele göre daha karmaşık bir modeldir. Bu modelde giriş değerleri arasına mesafe-1 ve mesafe-2 parametreleri eklenmiştir. Üyelik fonksiyonu katmanı içerisinde ise; enlem için 4, boylam için 4, mesafe-1 için 2, mesafe- 2 için 2'şer adet üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Toplamda tahmin modeli için lineer olarak 64 kural oluşturulmuştur.



Şekil 3.28. Bulanık mantık model-2

Şekil 3.29'da gösterilen üçüncü modelde ise ilk iki modele göre daha karmaşık bir model amaçlanmıştır. Bu modelde giriş değerleri arasına gün ve saat parametreleri de eklenmiştir. Üyelik fonksiyonu katmanı içerisinde ise; enlem için 2, boylam için 2, mesafe-1 için 2, mesafe-2 için 2, gün için 2 ve saat için ise 2'şer adet üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Toplamda tahmin modeli için lineer olarak 64 kural oluşturulmuştur.

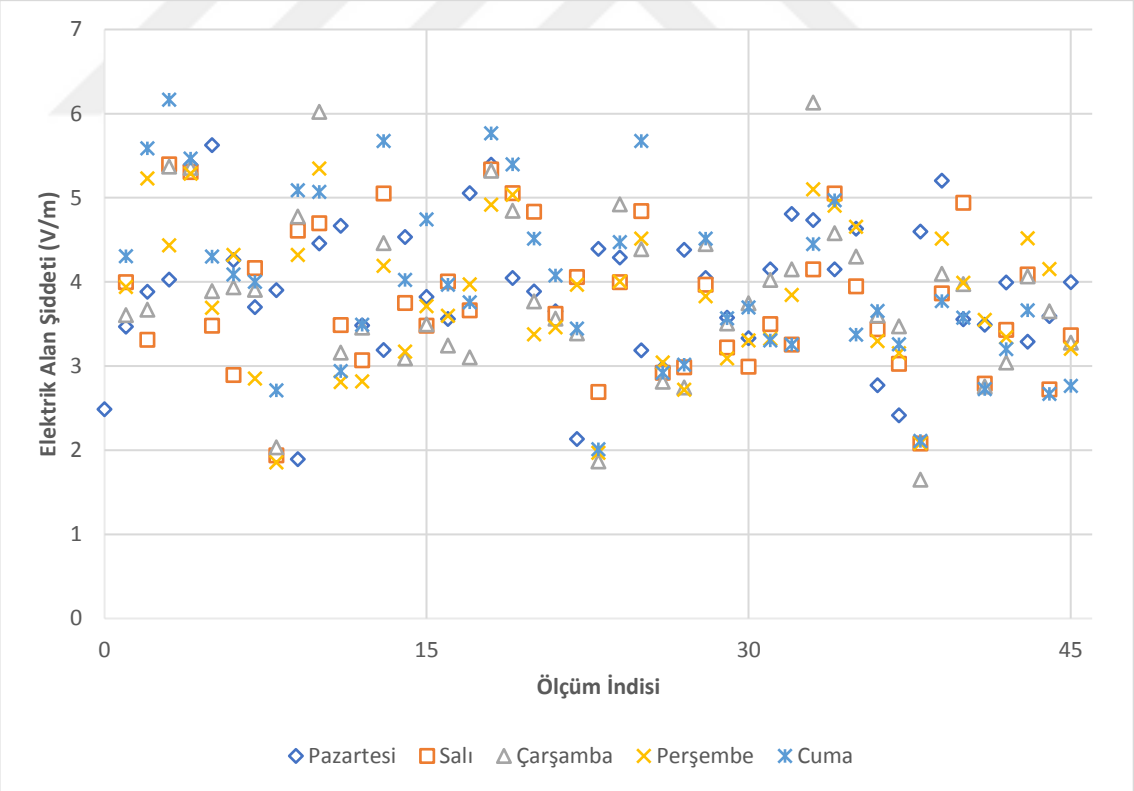


Şekil 3.29. Bulanık mantık model-3

4. BULGULAR

4.1. Ölçüm Bulguları

Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen sonuçlar ölçüm konumuna ve gününe (pazartesi-cuma) göre şekil 4.1 ‘de verilmiştir. Burada ölçüm noktası olarak verilen x, y koordinatlarında toplamda 225 ölçüm gösterilmiştir. 15 ölçüm noktasında 5 farklı günde, sabah, öğle ve akşam olmak üzere günün 3 farklı saatinde ölçüm yapıldığı ifade edilmiş ve ölçüm değerleri aşağıda gösterildiği gün-saat-konum bilgilerine göre sistematik olarak sıralanmıştır. Ölçüm indisleri 1-15 aralığı 09:00-11:00, 16-30 aralığı 12:00-14:00, 31-45 aralığı ise 17:00-19:00 saatleri arasında alınmıştır. Örneğin, şekil 4.1’de gösterilen yatay eksen olan “ölçüm indisi” ekseninde ki pazartesi günü için 17. ölçüm indisi pazartesi günü öğlen saatinde 2. ölçüm noktasında yapılan ölçümü göstermektedir. Bir başka örnek vermek gerekirse, yatay eksende bulunan 37. ölçüm indisi ilgili ölçüm yapılan günün akşam saatinde 7. ölçüm noktasında ki değeri ifade etmektedir.



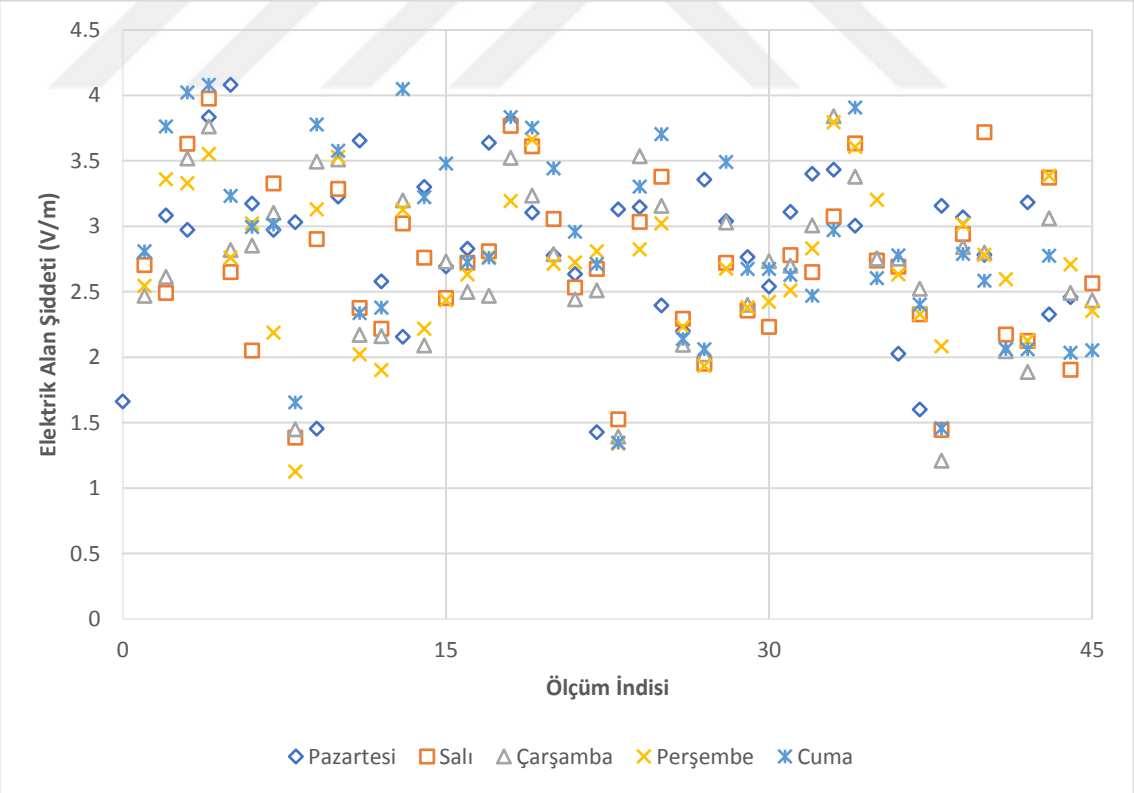
Şekil 4.1. Günlük maksimum elektrik alan şiddetleri ölçüm sonuçları

Ölçüm sonuçları incelendiğinde, ölçüm esnasında elde edilen maksimum ve ortalama elektrik alan şiddetleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1'de gösterilen maksimum elektrik alan şiddetleri günlere göre çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Elde edilen maksimum elektrik alan şiddeti ölçüm yapılan süre içerisinde elde edilen en yüksek anlık şiddeti ifade etmektedir.

Çizelge 4.1. Maksimum elektrik alan şiddetleri

	Sabah	**Öğlen**	**Akşam**
Pazartesi	5.627	5.395	5.202
Salı	5.397	5.338	5.051
Çarşamba	6.02	5.321	6.131
Perşembe	5.349	5.035	5.101
Cuma	6.165	5.768	4.971

Günlük ortalama elektrik alan şiddeti sabah öğle ve akşam için şekil 4.2 de gösterilmiş ve çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Günlük ortalama elektrik alan şiddetleri ölçüm sonuçları

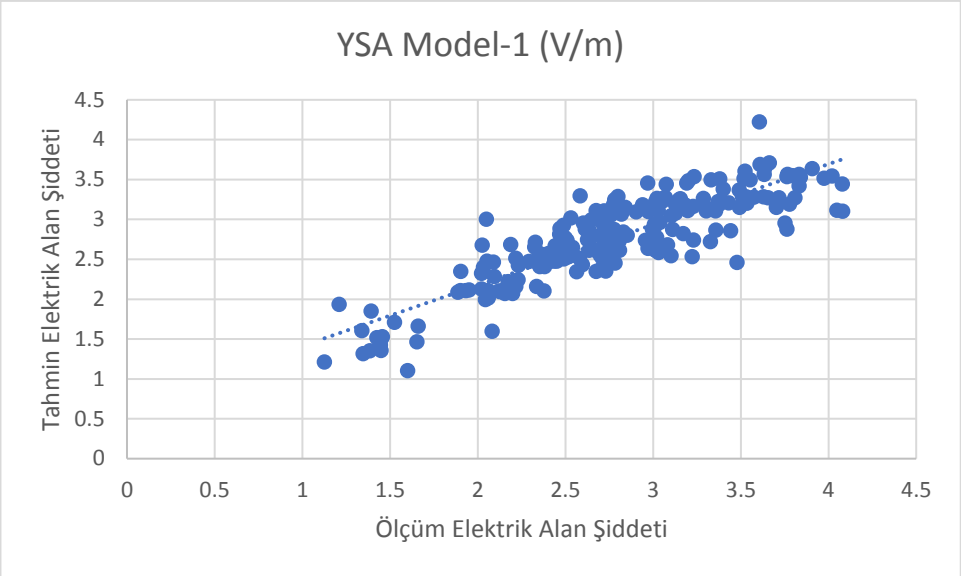
Çizelge 4.2. Ortalama elektrik alan şiddetleri

	Sabah	**Öğlen**	**Akşam**
Pazartesi	4.08	3.81	3.432
Salı	3.976	3.768	3.718
Çarşamba	3.764	3.535	3.84
Perşembe	3.553	3.663	3.795
Cuma	4.091	4.833	3.907

Aşağıda bulunan model bulgularında ki grafiklerde ölçüm ve bilgisayar öğrenmesine dayalı modeller incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.1 ve şekil 4.2'de gösterildiği gibi gün gün sınıflandırılmak yerine yapay sinir ağı tahmin sonucu, bulanık mantık tahmin sonucu ve ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Örneğin, grafiklerin yatay ekseninde 1. ölçüm indisinde bulunan veri değeri pazartesi günü, sabah, 1 numaralı ölçüm noktası iken 153. Ölçüm indisi değeri perşembe günü, sabah, 3 numaralı ölçüm noktasındaki değeri ifade etmektedir.

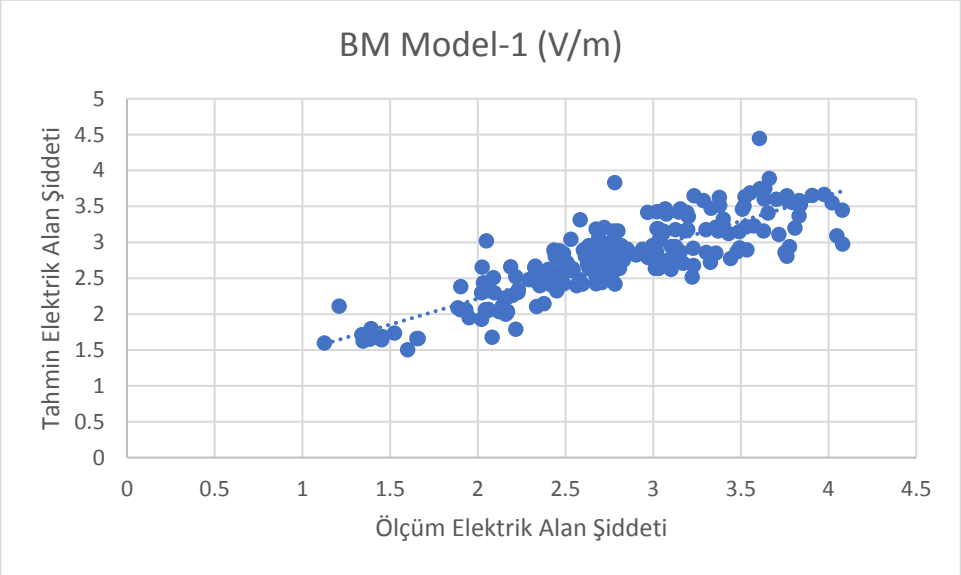
4.2. Model – 1 Bulguları

Yapay sinir ağları ile elde edilen sonuçların regresyon analizinde model-1 802 iterasyon ile 00:11 dakikada, R^2 değeri 0.758 ve MSE değeri 0.0042 olarak şekil 4.3'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Yatay eksende ölçüm sonucunca elde edilen tüm noktalardaki elektrik alan şiddeti V/m olarak ifade edilirken, dikey eksende tahmin sonucu elde edilen elektrik alan şiddeti değerleri V/m olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 4.3. Yapay sinir ağı model-1 regresyon analizi

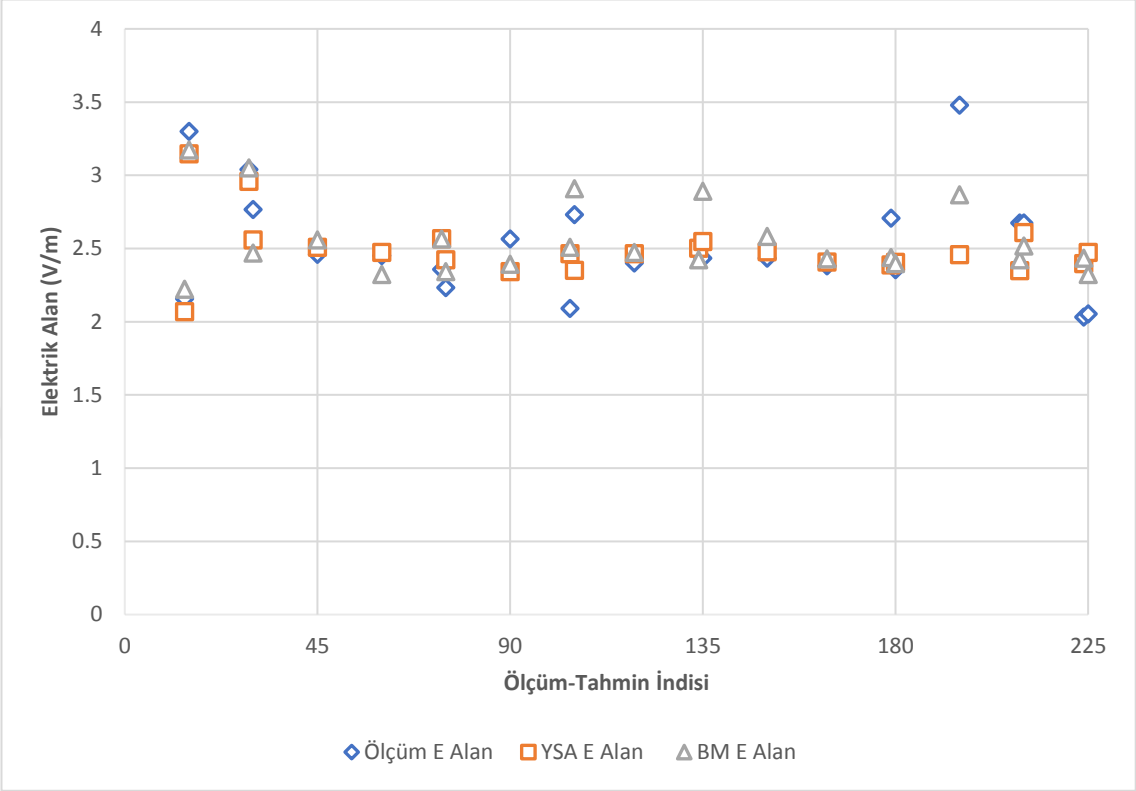
Bulanık mantık ile elde edilen tahmin neticesinde model- 1 için 220 iterasyon ile 01:11 dakikada, R^2 değeri 0.7211 ve MSE değeri 0.0437 şekil 4.4'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.4.30 Bulanık mantık model-1 regresyon analizi

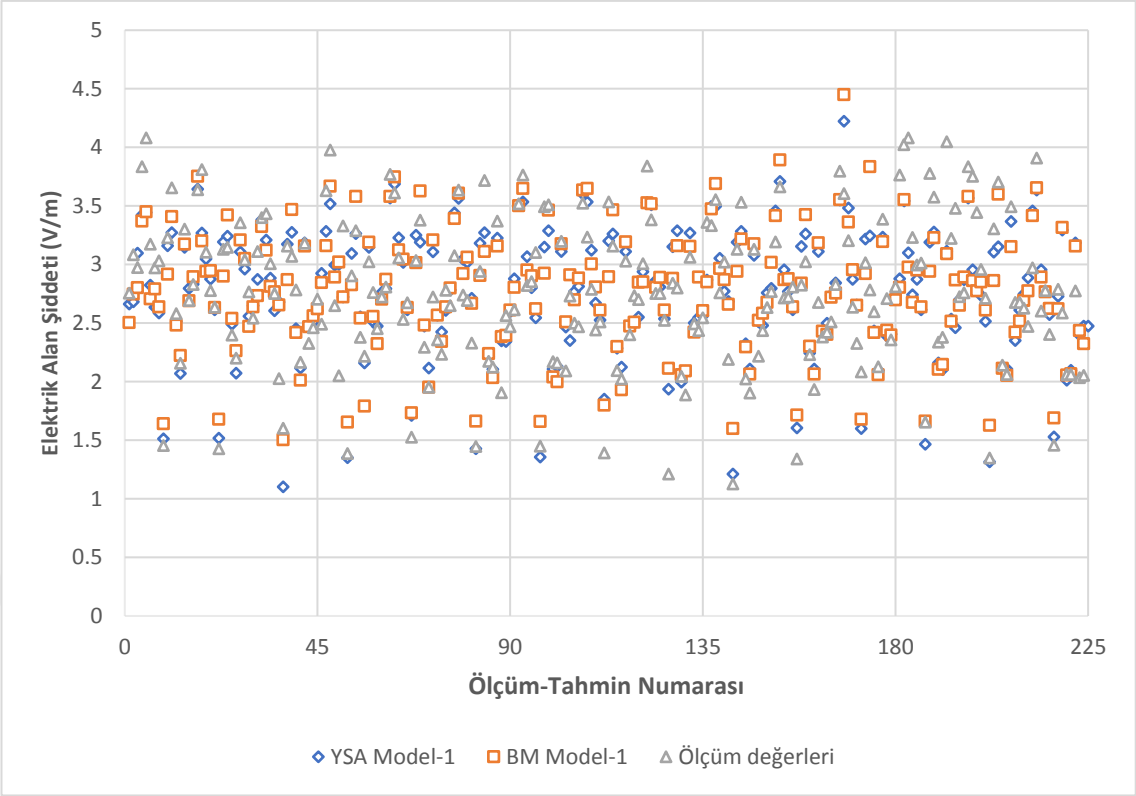
Gerçekleştirilen 225 ölçüm, yapay sinir ağı ve bulanık mantıkta kullanılan 1 no'lu model neticesinde elde edilen test verilerinin ortalama elektrik alan şiddeti kıyaslaması şekil 4.5.a'da gösterilmiştir. Test verileri ağın eğitimi için kullanılan verilerin %10'unu

oluşturmaktadır ve belirli periyotlarda seçilerek uygulanmıştır. Yatay eksende kaç numaralı ölçüm verisinin test için kullanıldığı gösterilmektedir.



Şekil 4.5.a. Model-1 test verileri ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması

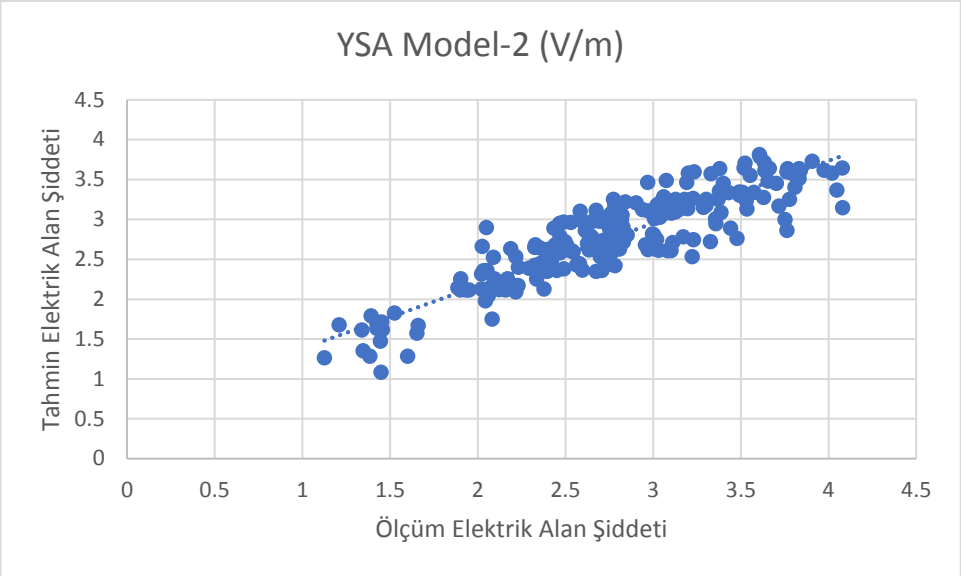
Eğitim ve test için kullanılan tüm ölçüm noktalarını kapsayan genel ölçüm-tahmin metodu kıyaslaması ise şekil 4.5.b'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5.b. Model-1 ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması

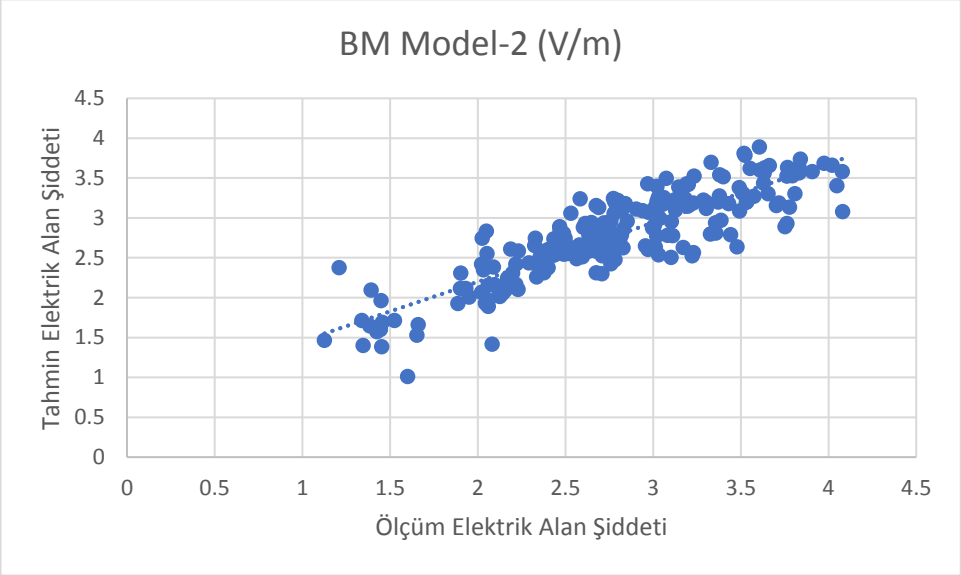
4.3. Model – 2 Bulguları

Yapay sinir ağları ile elde edilen sonuçlar neticesinde yapılan regresyon analizinde model-2 854 iterasyon ile 00:09 dakikada, R^2 değeri 0.7951 ve MSE değeri 0.033 olarak şekil 4.6'da gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Yapay sinir ağı model-2 regresyon analizi

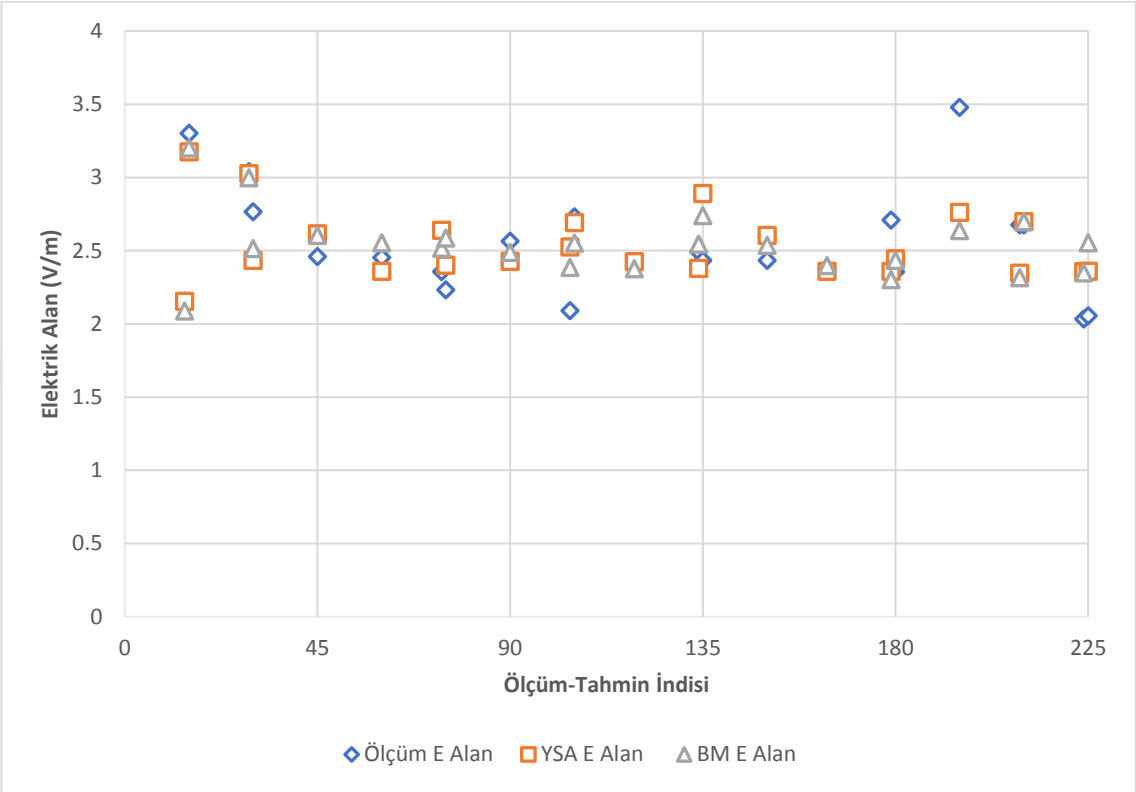
Bulanık mantık ile yapılan tahmin neticesinde model- 2 için 245 iterasyon ile 01:15 dakikada, R^2 değeri 0.7429 ve MSE değeri 0.037 şekil 4.7'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Bulanık mantık model-2 regresyon analizi

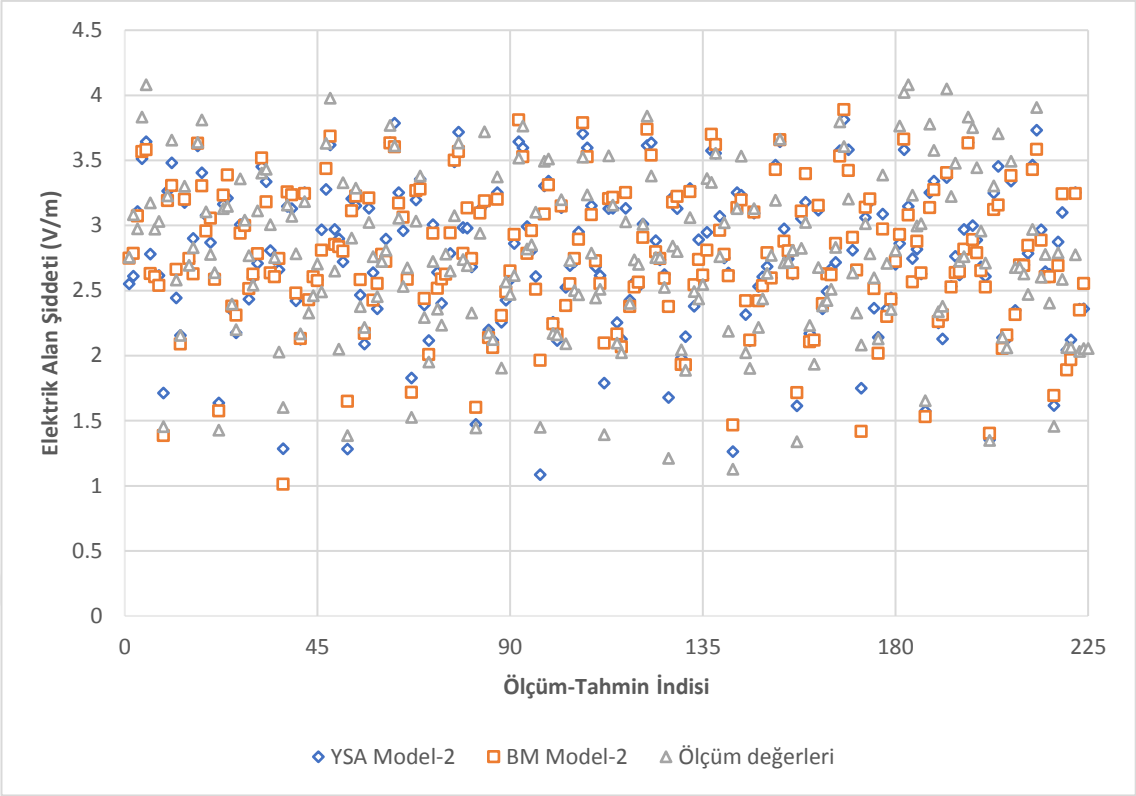
Gerçekleştirilen 225 ölçüm, yapay sinir ağı ve bulanık mantıkta kullanılan 2 no'lu model neticesinde elde edilen test verilerinin ortalama elektrik alan şiddeti kıyaslaması şekil

4.8.a'da gösterilmiştir. Test verileri ağın eğitimi için kullanılan verilerin %10'unu oluşturmaktadır ve belirli periyotlarda seçilerek uygulanmıştır. Yatay eksende kaç numaralı ölçüm verisinin test için kullanıldığı gösterilmektedir.



Şekil 4.8.a. Model-2 test verileri ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması

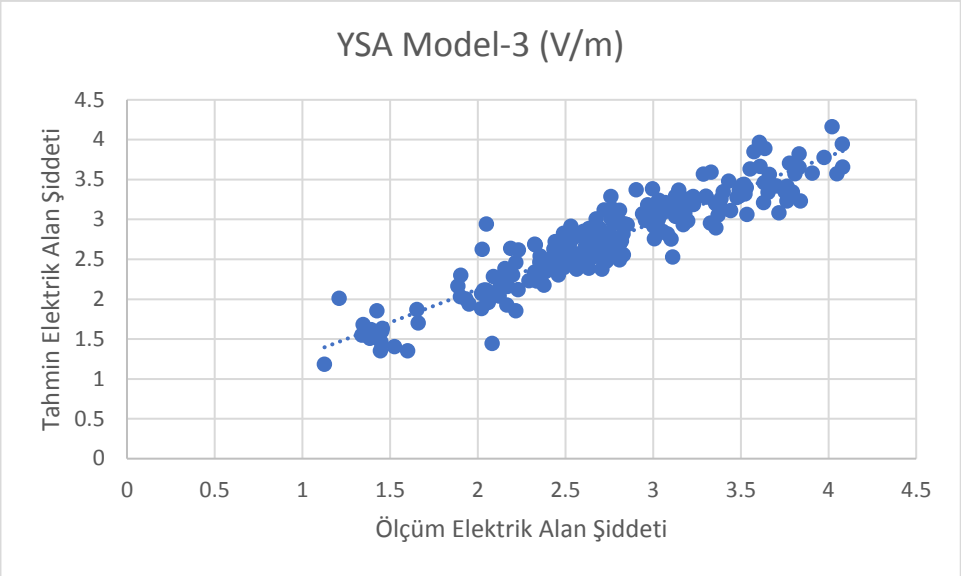
Eğitim ve test için kullanılan tüm ölçüm noktalarını kapsayan genel ölçüm-tahmin metodu kıyaslaması ise şekil 4.8.b'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8.b. Model-2 ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması

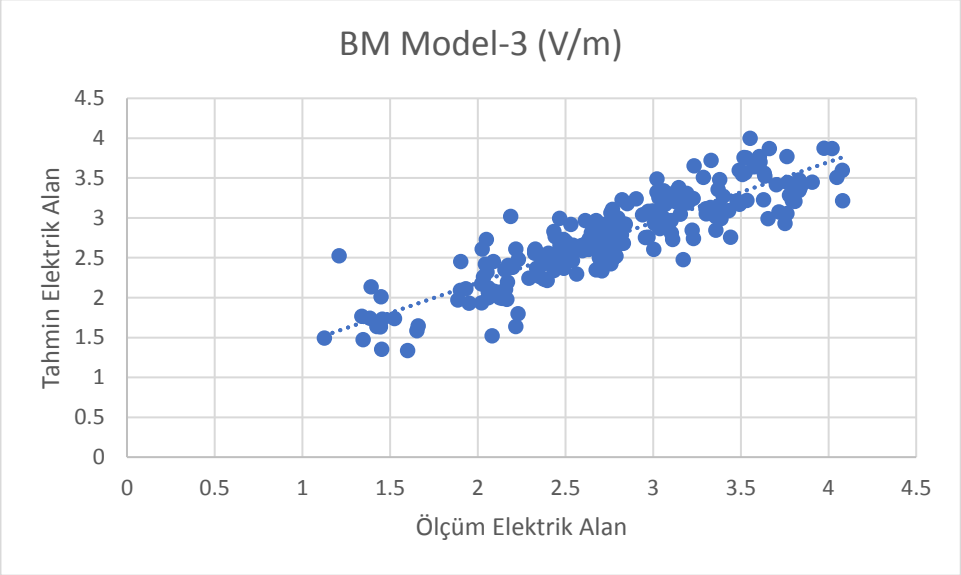
4.4. Model – 3 Bulguları

Yapay sinir ağları ile elde edilen sonuçların regresyon analizinde model-3 255 iterasyon ile 00:03 dakikada, R^2 değeri 0.8553 ve MSE değeri 0.024 olarak şekil 4.9'da gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Yapay sinir ağı model-3 regresyon analizi

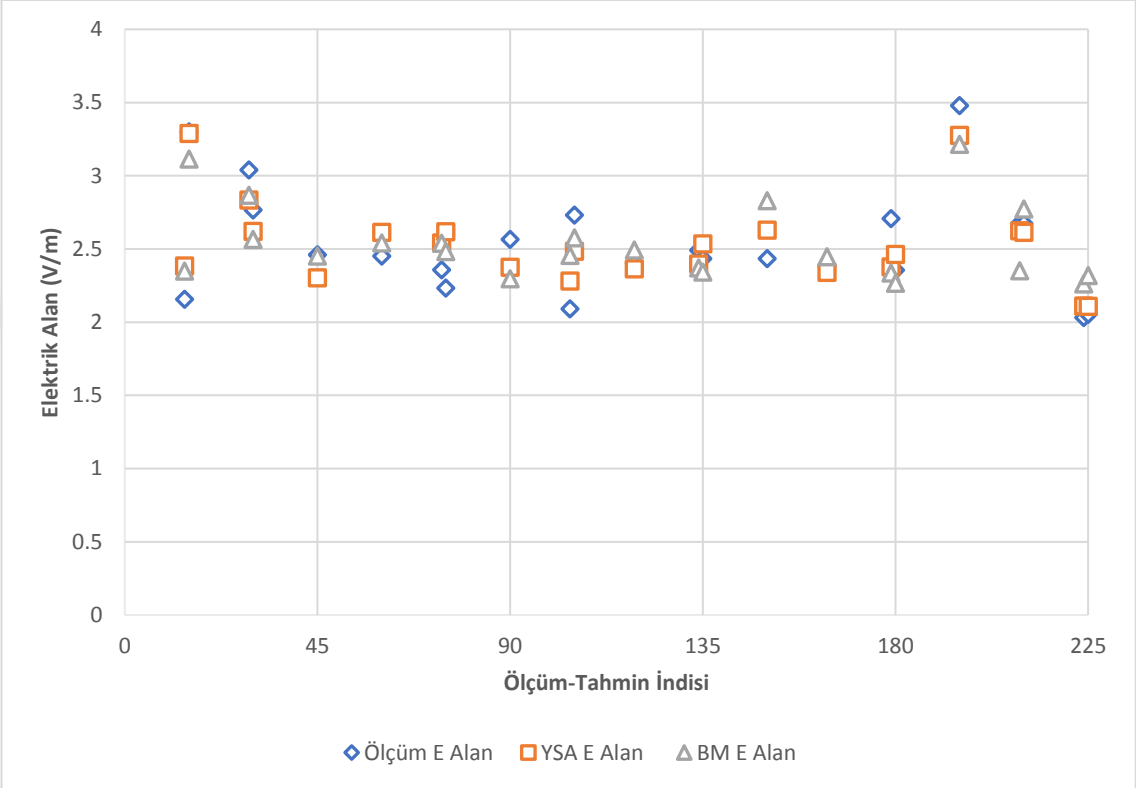
Bulanık mantık ile yapılan tahmin neticesinde model- 3 için 129 iterasyon ile 01:32 dakikada, R^2 değeri 0.7699 ve MSE değeri 0.0567 şekil 4.10'da gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Bulanık mantık model-3 regresyon analizi

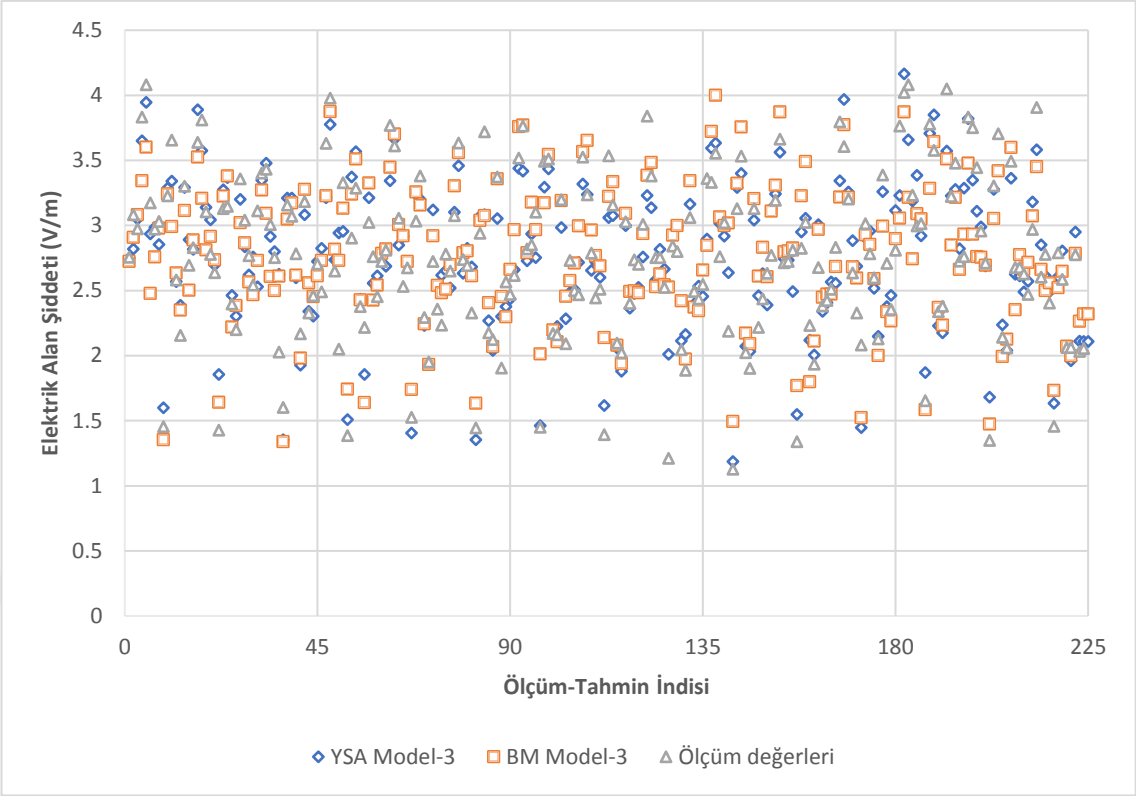
Gerçekleştirilen 225 ölçüm, yapay sinir ağı ve bulanık mantıkta kullanılan 2 no'lu model neticesinde elde edilen test verilerinin ortalama elektrik alan şiddeti kıyaslaması şekil

4.11.a'da gösterilmiştir. Test verileri ağın eğitimi için kullanılan verilerin %10'unu oluşturmaktadır ve belirli periyotlarda seçilerek uygulanmıştır. Yatay eksende kaç numaralı ölçüm verisinin test için kullanıldığı gösterilmektedir.



Şekil 4.11.a. Model -3 test verileri ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması

Eğitim ve test için kullanılan tüm ölçüm noktalarını kapsayan genel ölçüm-tahmin metodu kıyaslaması ise şekil 4.11.b'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11.b. Model -3 ortalama elektrik alan şiddetleri kıyaslaması

Yapılan ölçümlerdeki tahminlerde günlük olarak alınan ölçümlerin yapay sinir ağları model-3 ile tahmini yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre MSE değerleri pazartesi için 0.358, salı için 0.382, çarşamba için 0.346, perşembe için 0.335 ve cuma için 0.402 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte elde edilen R^2 değerleri ise pazartesiden cumaya sırayla 0.150, 0.307, 0.271, 0.3215 ve 0.154 olarak hesaplanmıştır.

Ölçüm değerleri ile tahmin değerleri arasında ki ilişkinin yönünü ve gücünü incelemek amacıyla yapılan korelasyon analizinde ise elde edilen sonuçlar çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

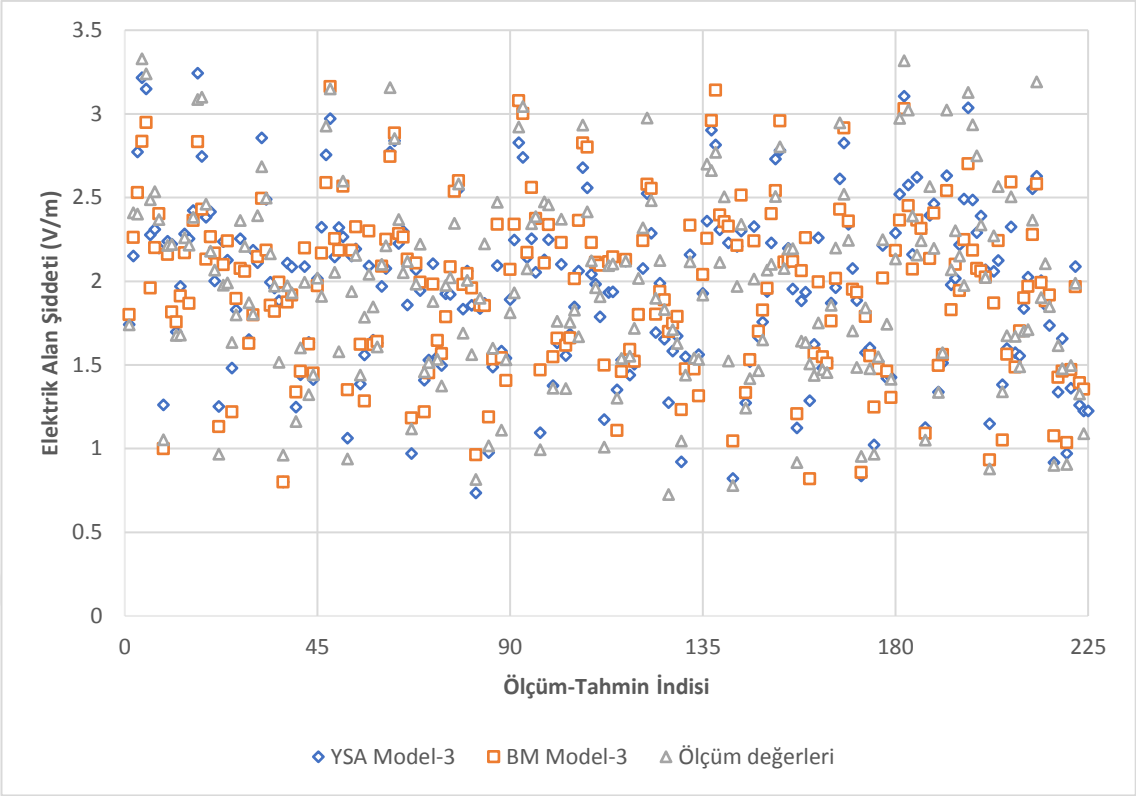
Çizelge 4.3. YSA-BM-Ölçüm değerleri korelasyon oranları

Ölçüm/Tahmin	YSA	BM
Model 1	0.87063	0.84914
Model 2	0.89168	0.86192
Model 3	0.92480	0.87741

4.5. Operatörlere Göre Sınıflandırma

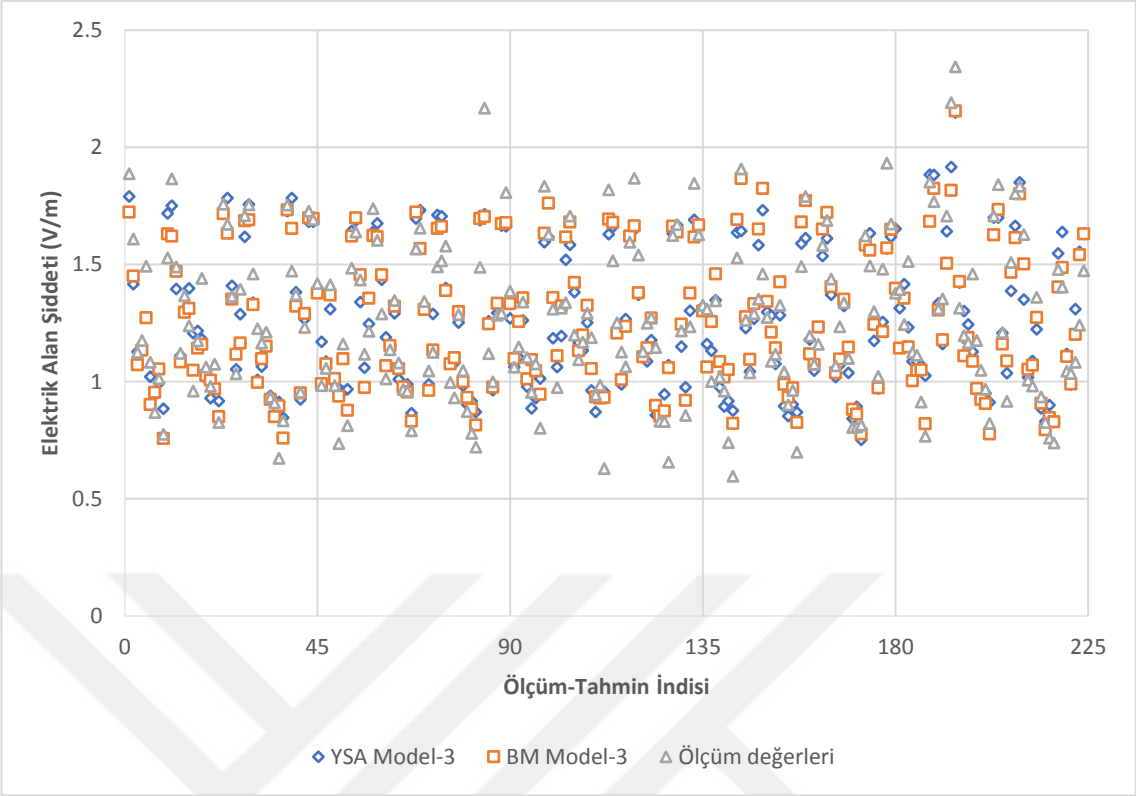
Ölçülen elektrik alan şiddetleri mobil iletişim hizmeti veren operatörlere göre de incelenmiştir. Türkiye'de hizmet veren 3 operatör mevcut olup bunun dışında TV, FM, WIFI gibi frekanslardaki elektrik alan şiddetleri de "diğer" olarak sınıflandırılmıştır. Yapay sinir ağları ve bulanık mantık ile ölçüm sonuçları kıyaslandığında her iki tahmin yöntemi için de model-3'ün yüksek doğruluk değeri içerdiği görülmektedir. Dolayısıyla operatörlerin elektrik alan şiddeti tahmin etmek amacıyla hem yapay sinir ağlarının hem de bulanık mantık metodunun 3 numaralı modelleri ile operatör-1, operatör-2, operatör-3 ve diğer olmak üzere 4 farklı frekans bileşenleri için ortalama elektrik alan şiddeti hesaplanmıştır. Hem yapay sinir ağı hem bulanık mantık için operatörlerin elektrik alan tahmini için model-3'de bulunan 6 adet parametre giriş olarak kullanılmıştır. Çıkış olarak ise her bir operatörün GSM, UMTS ve LTE frekans bandlarında ki toplam ortalama elektrik alan şiddetleri V/m olarak şekil 4.12'de gösterilmiştir.

1 numaralı operatör için model-3 kullanılarak yapılan yapay sinir ağı tahmininde servis tablosunda gösterilen GSM, UMTS ve LTE frekanslarında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti tahmininde MSE değeri 0.0221 olup R^2 değeri 0.923 olarak hesaplanmıştır. Sonuca ulaşmak için 246 iterasyon yapılmış olup geçen toplam süre 00:04 olarak hesaplanmıştır. Bulanık mantık ile yapılan tahminde de model-3 kullanılmıştır. Bu model neticesinde 1 numaralı operatör için elde edilen MSE değeri 0.0271 olup R^2 değeri 0.8783 olarak hesaplanmıştır. Sonuca ulaşmak için 158 iterasyon yapılmış olup geçen toplam süre 08:16 olarak hesaplanmıştır. Her iki tahmin yöntemi ile elde edilen sonuçlarının ve ölçüm değerlerinin karşılaştırması şekil 4.12'de verilmiştir.



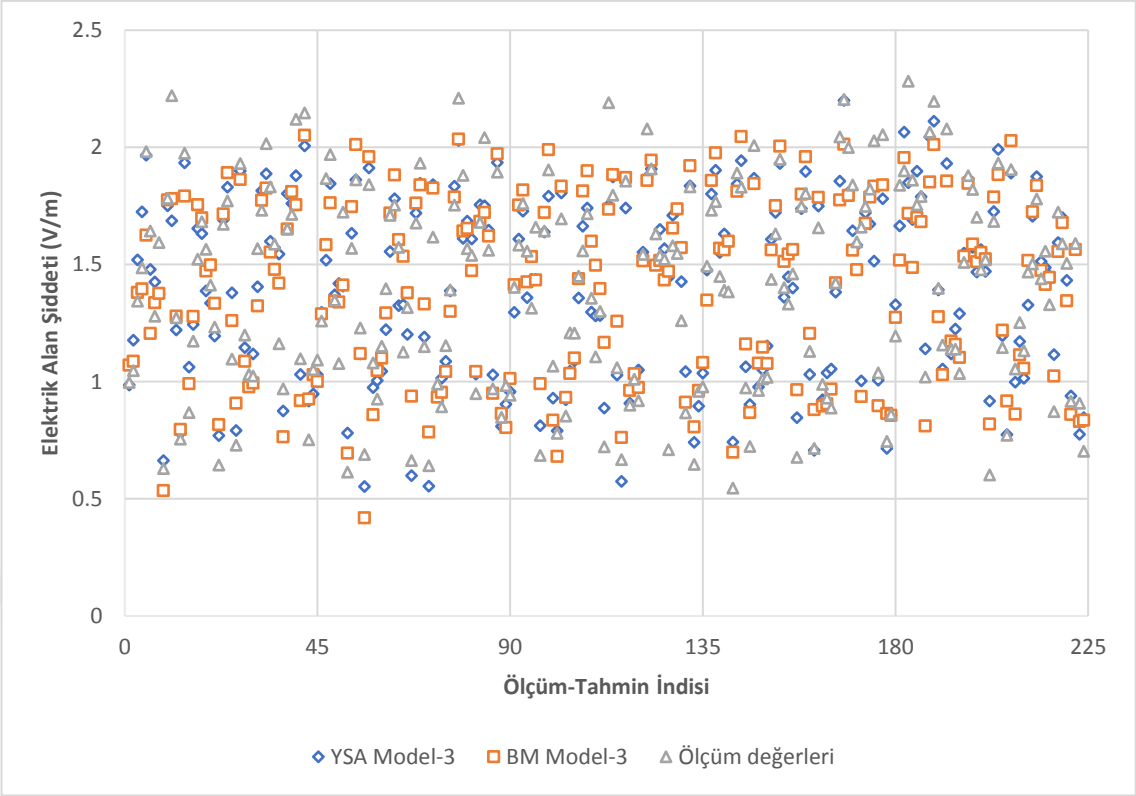
Şekil 4.12. Operatör 1 için elde edilen tahmin sonuncunun ölçüm değerleri ile karşılaştırması

2 numaralı operatör için model-3 kullanılarak yapılan yapay sinir ağı tahmininde servis tablosunda gösterilen GSM, UMTS ve LTE frekanslarında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti tahmininde MSE değeri 0.0142 olup R^2 değeri 0.904 olarak hesaplanmıştır. Sonuca ulaşmak için 255 iterasyon yapılmış olup geçen toplam süre 00:04 olarak hesaplanmıştır. Bulanık mantık ile yapılan tahminde de model-3 kullanılmıştır. Bu model neticesinde 2 numaralı operatör için elde edilen MSE değeri 0.0136 olup R^2 değeri 0.911 olarak hesaplanmıştır. Sonuca ulaşmak için 155 iterasyon yapılmış olup geçen toplam süre 08:48 olarak hesaplanmıştır. Her iki tahmin yöntemi ve ölçümler ile elde sonuçlar şekil 4.13'de gösterilmiştir ve karşılaştırılmıştır.



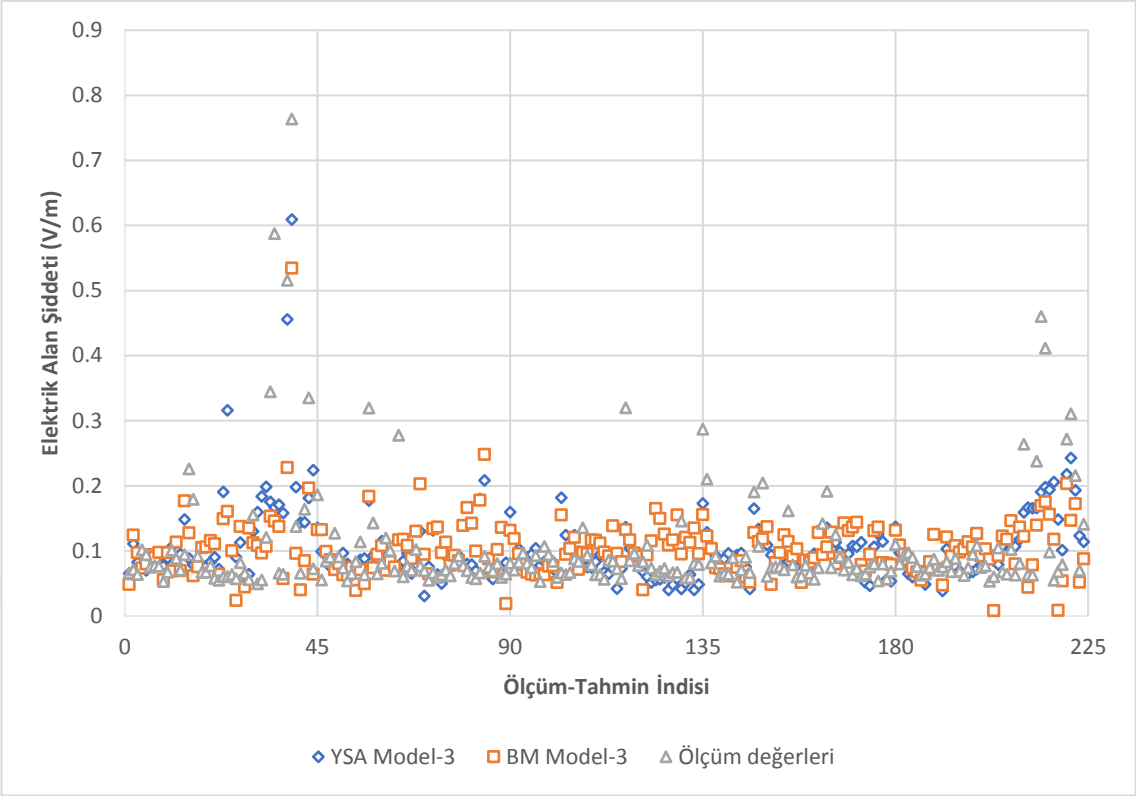
Şekil 4.13. Operatör 2 için elde edilen tahmin sonuncunun ölçüm değerleri ile karşılaştırması

3 numaralı operatör için model-3 kullanılarak yapılan yapay sinir ağı tahmininde servis tablosunda gösterilen GSM, UMTS ve LTE frekanslarında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti tahmininde MSE değeri 0.0219 olup R^2 değeri 0.929 olarak hesaplanmıştır. Sonuca ulaşmak için 217 iterasyon yapılmış olup geçen toplam süre 00:03 olarak hesaplanmıştır. Bulanık mantık ile yapılan tahminde de model-3 kullanılmıştır. Bu model neticesinde 3 numaralı operatör için elde edilen MSE değeri 0.0235 olup R^2 değeri 0.906 olarak hesaplanmıştır. Sonuca ulaşmak için 162 iterasyon yapılmış olup geçen toplam süre 08:55 olarak hesaplanmıştır. Her iki tahmin yöntemi ve ölçümler ile elde sonuçlar şekil 4.14'de gösterilmiştir ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.14. Operatör 3 için elde edilen tahmin sonuncunun ölçüm değerleri ile karşılaştırması

Diğer frekans bileşenleri olarak adlandırılan çizelge-7 servis tablosunda belirtilen Band I FM Radyo, VHF Telsiz, VHF TV, UHF Telsiz, UHF TV frekans değerlerini kapsamaktadır. Diğer frekans bileşenleri için ortalama elektrik alan şiddeti tahmininde Türkiye'de hizmet veren üç operatörde olduğu gibi yapay sinir ağları ve bulanık mantık kullanılmıştır. Yapılan tahminler neticesinde elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti için MSE değeri 0.0655 olup R^2 değeri 0.667 olarak hesaplanmıştır. Sonuca ulaşmak için 623 iterasyon yapılmış olup geçen toplam süre 00:06 olarak hesaplanmıştır. Bulanık mantık ile yapılan tahminde de model-3 kullanılmıştır. Bu model neticesinde elde edilen MSE değeri 0.0707 olup R^2 değeri 0.599 olarak hesaplanmıştır. Sonuca ulaşmak için 8 iterasyon yapılmış olup geçen toplam süre 08:10 olarak hesaplanmıştır. Her iki tahmin yöntemi ve ölçümler ile elde sonuçlar şekil 4.15'de gösterilmiştir ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.15. Diğer frekans bileşenleri için elde edilen tahmin sonuncunun ölçüm değerleri ile karşılaştırması

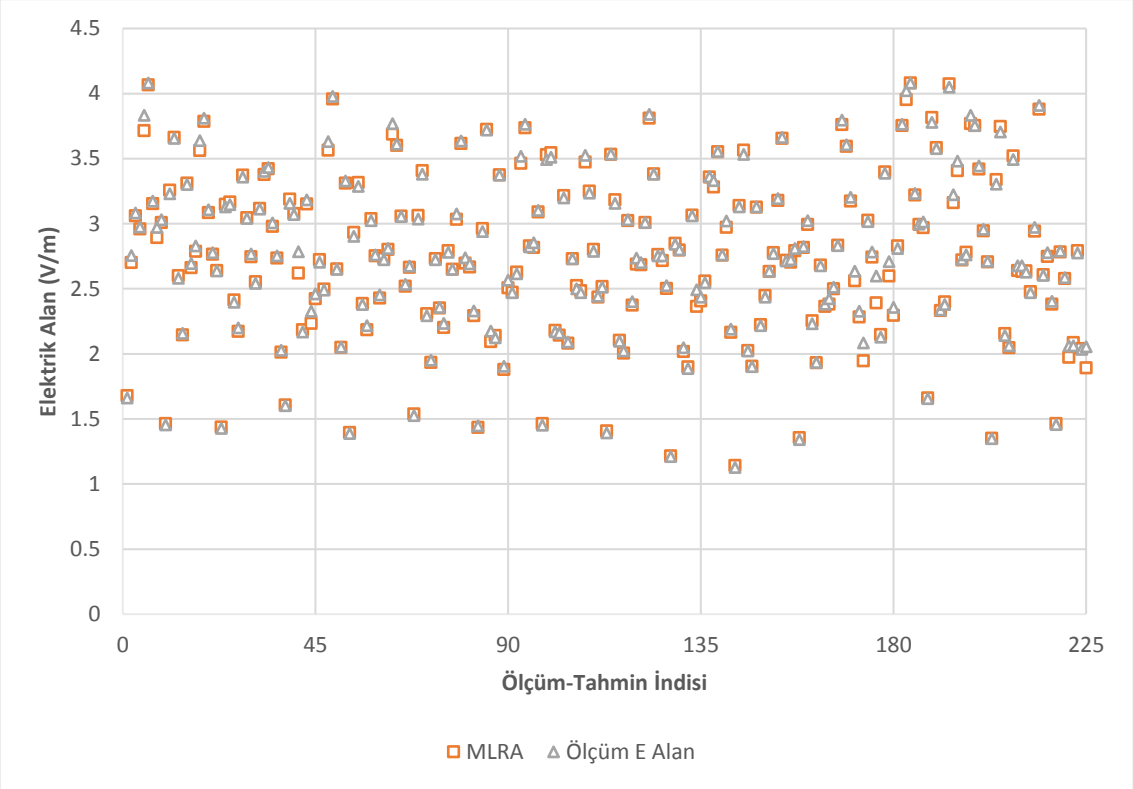
Diğer elektromanyetik maruziyet kaynağı olan frekansların toplam ortalama elektrik alan şiddetine olan paylarını hesaplanması amacıyla MLRA yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile bahsedilen operatörlerin toplam elektrik alan maruziyetindeki payı hesaplanmıştır. Çizelge 4.4'de her bir operatör için MLRA yöntemi ile elde edilen katsayılar gösterilmiştir. Denklem 4.1'de ise bu katsayılar neticesinde toplam elektrik alan şiddetinin tespitini sağlayan formül MATLAB aracılığıyla oluşturulmuştur. Denklemin oluşturulmasında ki amaç ise Türkiye'de bulunan operatörlerin elektromanyetik maruziyete olan etkilerinin yüzdelik dağılımı teorik olarak hesaplamaktır.

Çizelge 4.4. Ölçüm MLRA katsayıları

	Katsayı	**Elektrik Alan Şiddeti**
Operator 1 (ρ)	0.704	x
Operator 2 (φ)	0.508	y
Operator 3 (ε)	0.514	z
Diğer (β)	0.119	t

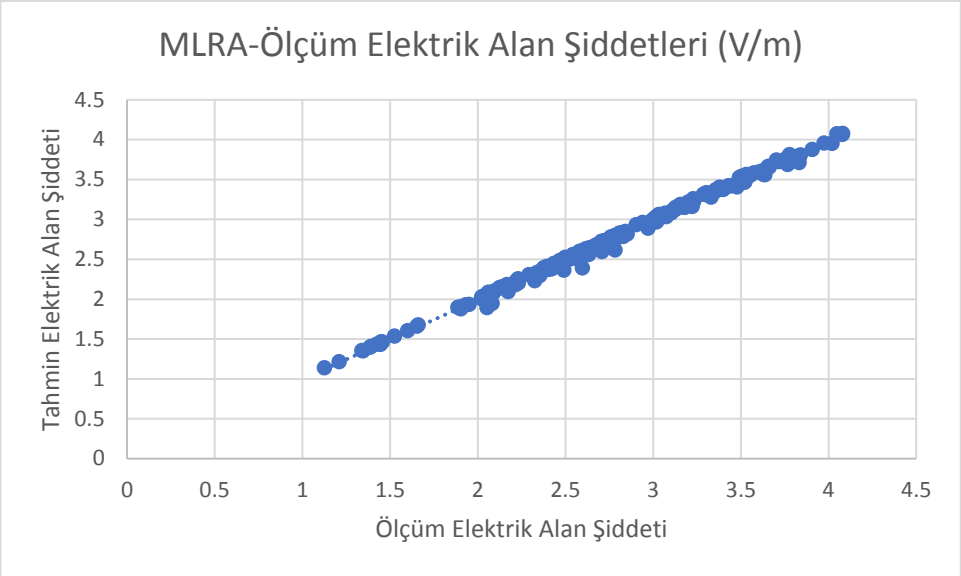
$$\sum_{n=0}^{N} E_{ortalama} = \rho*x+ \varphi *y+ \varepsilon *z+ \beta *t \quad (4.1)$$

Şekil 4.16'da ise denklem 4.1'de katsayılar ile ölçüm sonucu elde edilen frekans bileşenlerinin oluşturduğu elektromanyetik maruziyet değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.16. MLRA-ölçüm kıyaslaması

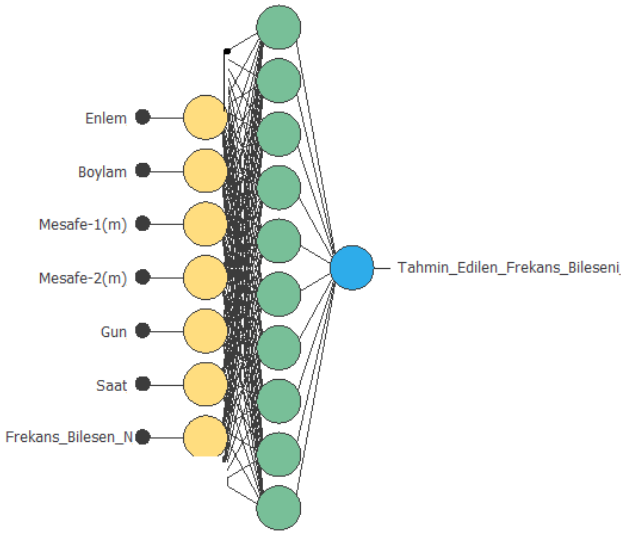
Ölçüm ve MLRA yöntemiyle elde edilen sonuçlar Şekil 4.17'de verilmiştir. Değerler arasındaki benzerlik oranı korelasyon ile incelenmiş ve R^2 değeri 0.9967 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç değerler arasında büyük oranda benzerlik olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.17. MLRA-Ölçüm sonuçlarının kıyaslanması

4.6. Nihai Model Sonuçları

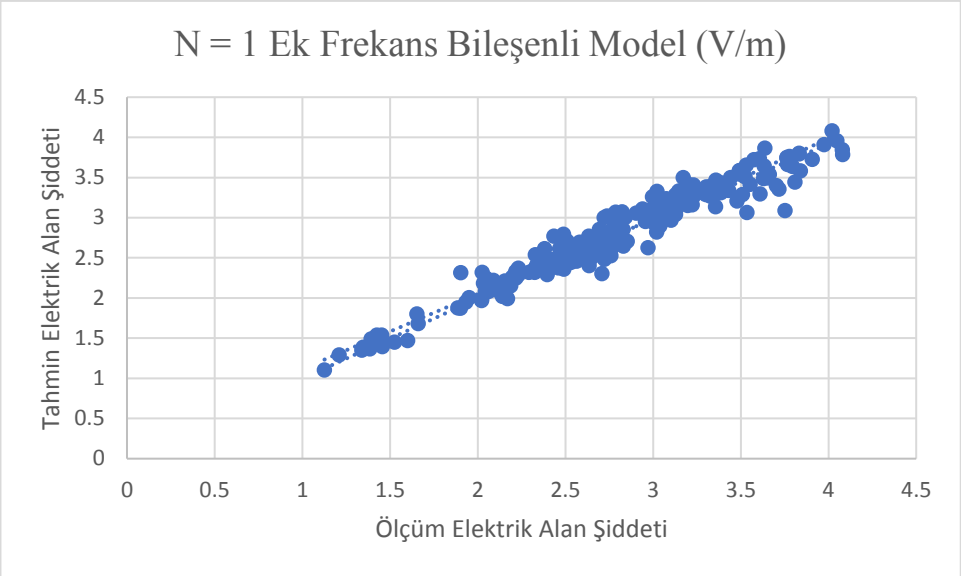
Yapılan tez çalışmasının amacında belirtildiği gibi elektromanyetik alan maruziyet seviyesinin tahmininde belirlenecek yöntem ve bu yöntemde tasarlanan modeller arasında en yüksek doğruluğa sahip model elde edilen sonuçlar kullanılarak model-3 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.18'de yapay sinir ağı modeli gösterilmiştir. Belirlenen nihai modelde de giriş değişken sayısı ve tipleri aynı olmaktadır. Giriş değişkeni olarak, enlem, boylam, ilk baz istasyonuna olan mesafe, ikinci baz istasyonuna olan mesafe, ölçüm yapılan gün, saat ve buna ilave olarak ölçüm yapılan frekans bandları içerisinde uygun olan N adet frekans bileşeni kullanılmıştır. Çıkış olarak ise ortalama elektrik alan şiddeti tahmini yapılmıştır. Örnek vermek gerekirse tahmin edilmek istenen frekans Türkiye'de hizmet veren 2 numaralı operatörün LTE frekans bandında ortalama elektrik alan şiddeti tahmin yapılmak isteniyor. Tahmin için ağı eğitmek üzere model-3'de bulunan giriş parametrelerine ek olarak o operatörün GSM, UMTS frekanslarının ortalama elektrik alan şiddeti veya diğer operatör/operatörlerin GSM, UMTS, LTE frekanslarının ortalama elektrik alan şiddetlerinden herhangi N tanesi "Frekans_bileşeni_N" parametresi olarak kullanılabilir. Buradaki amaç nihai olarak belirlenen tahmin modelinin doğruluk değerinin arttırılmasına yönelik optimizasyonun sağlanmasıdır.



Şekil 4.18. YSA nihai modeli

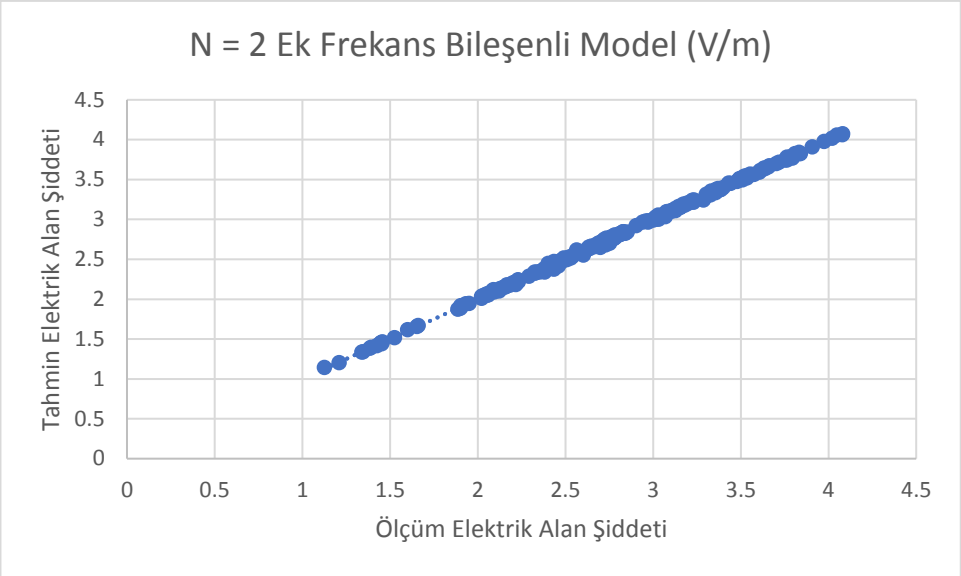
Tahmin edilecek frekans bileşeni için Frekans_Bileşen_N adlı giriş için yapay sinir ağı modeli ile tahminler gerçekleştirilmiştir. Bu tahminlerde N olarak 1, 2, 3 ve 4 adet farklı frekans bileşeni ile giriş oluşturularak yapay sinir ağı yönteminde kullanılmış ve toplam ortalama elektrik alan şiddeti tahmini yapılmıştır.

İlk olarak toplam ortalama elektrik alan tahmini için N, 1 olarak belirlenmiştir. Bunun için şekil 4.18'de verilen modeldeki gibi ilk 6 parametre ilgili ölçüm noktalarının parametreleri olmakla birlikte, Frekans_Bileşen_N girişine 1 adet ölçüm yapılan noktadaki toplam ortalama GSM frekans bandındaki elektrik alan şiddeti giriş parametresi olarak eklenmiştir. Bu neticede modeldeki ortalama elektrik alan şiddeti giriş ve çıkış dizi boyutları sırasıyla 225 x 7 ve 225 x 1 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.19 da gösterilmiş ve 853 iterasyon ile toplam 00:08 dakikada elde edilen MSE ve R^2 değeri sırasıyla 0.001715 ve 0.929358 olarak hesaplanmıştır.



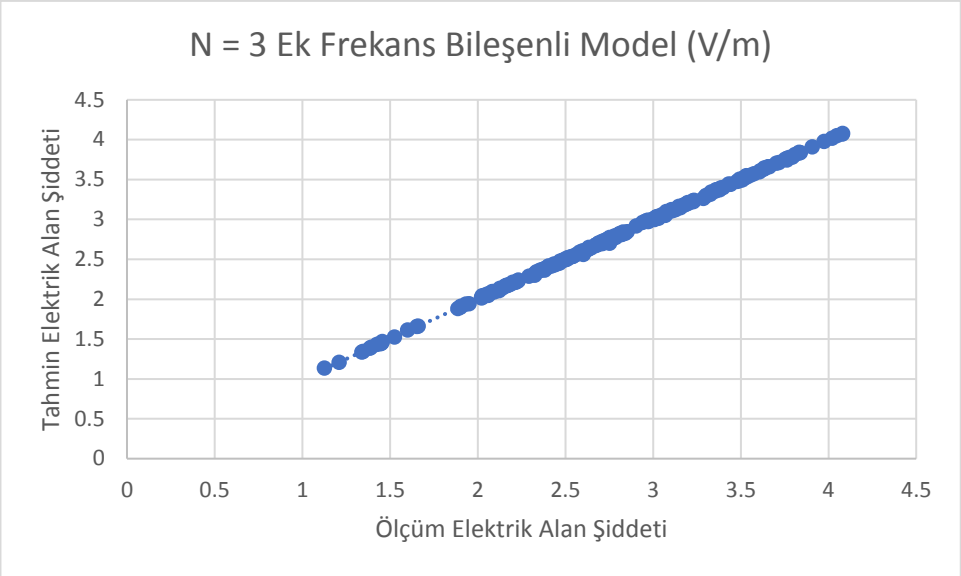
Şekil 4.19. 1 Frekans bileşenli model

Toplam ortalama elektrik alan tahmini için N, 2 olarak belirlenerek bir tahmin daha yapılmıştır. Bunun için şekil 4.18'de verilen modeldeki gibi ilk 6 parametre ilgili ölçüm noktalarının parametreleri olmak ile birlikte, Frekans_Bileşen_N girişine 2 adet ölçüm yapılan noktadaki toplam ortalama GSM ve UMTS frekans bandında ki elektrik alan şiddeti giriş parametresi olarak eklenmiştir. Bu neticede modeldeki ortalama elektrik alan şiddeti giriş ve çıkış dizi boyutları sırasıyla 225 x 8 ve 225 x 1 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.20'de gösterilmiştir ve 152 iterasyon ile toplam 00:02 dakikada elde edilen MSE ve R^2 değeri sırasıyla $1.395x10^{-5}$ ve 0.99857 olarak hesaplanmıştır.



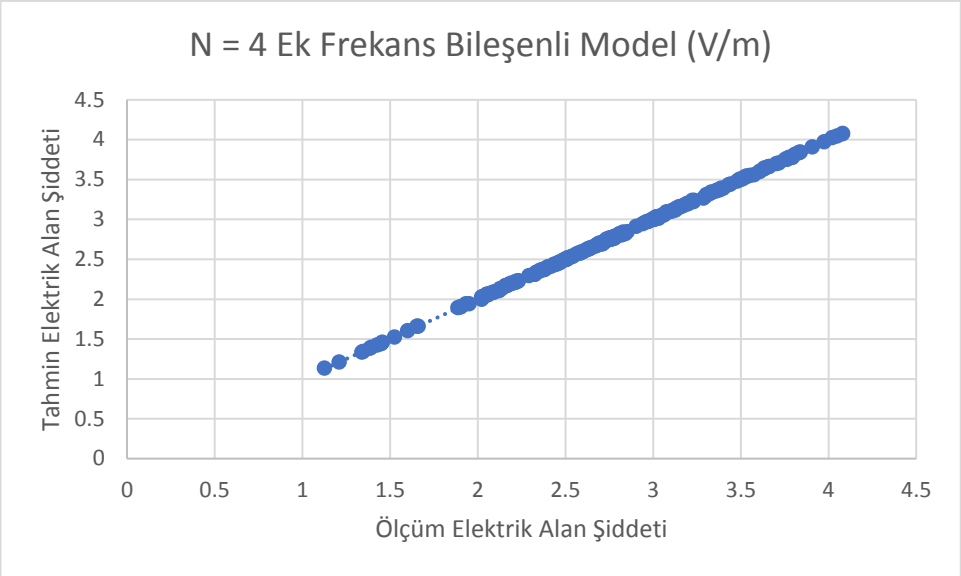
Şekil 4.20. 2 Frekans bileşenli model

İlk iki tahmine ilave olarak N, 3 olarak belirlenerek bir tahmin daha yapılmıştır. Bunun için şekil 4.18'de verilen modeldeki gibi ilk 6 parametre ilgili ölçüm noktalarının parametreleri olmak ile birlikte, Frekans_Bileşen_N girişine 3 adet ölçüm yapılan noktadaki toplam ortalama GSM, UMTS ve LTE frekans bandında ki elektrik alan şiddeti giriş parametresi olarak eklenmiştir. Bu neticede modeldeki ortalama elektrik alan şiddeti giriş ve çıkış dizi boyutları sırasıyla 225 x 9 ve 225 x 1 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.21'de gösterilmiştir ve 362 iterasyon ile toplam 00:05 dakikada elde edilen MSE ve R^2 değeri değerleri sırasıyla 1.102x 10^{-5} ve 0.99973 olarak hesaplanmıştır.



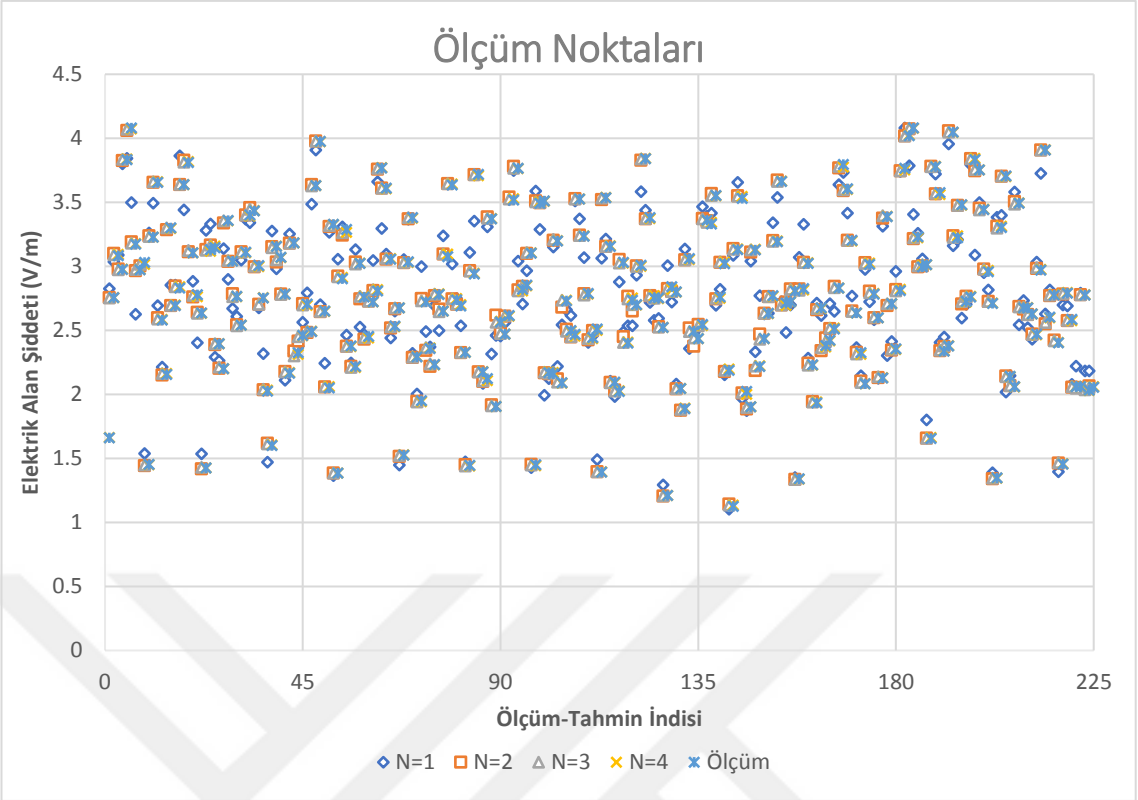
Şekil 4.21. 3 Frekans bileşenli model

Son olarak yapılan tahmin ile N, 4 olarak belirlenerek bir tahmin daha yapılmıştır. Bunun için şekil 4.18'de verilen modeldeki gibi ilk 8 parametre ilgili ölçüm noktalarının parametreleri olmak ile birlikte, Frekans_Bileşen_N girişine 4 adet ölçüm yapılan noktadaki toplam ortalama GSM, UMTS, LTE bu frekansların dışında kalan "diğer" frekans bandında ki elektrik alan şiddeti giriş parametresi olarak eklenmiştir. Bu neticede modeldeki ortalama elektrik alan şiddeti giriş ve çıkış dizi boyutları sırasıyla 225 x 10 ve 225 x 1 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.22'de gösterilmiştir ve 216 iterasyon ile toplam 00:04 dakikada elde edilen MSE ve R^2 değeri sırasıyla 8.766x10^{-6} ve 0.99983 olarak hesaplanmıştır.



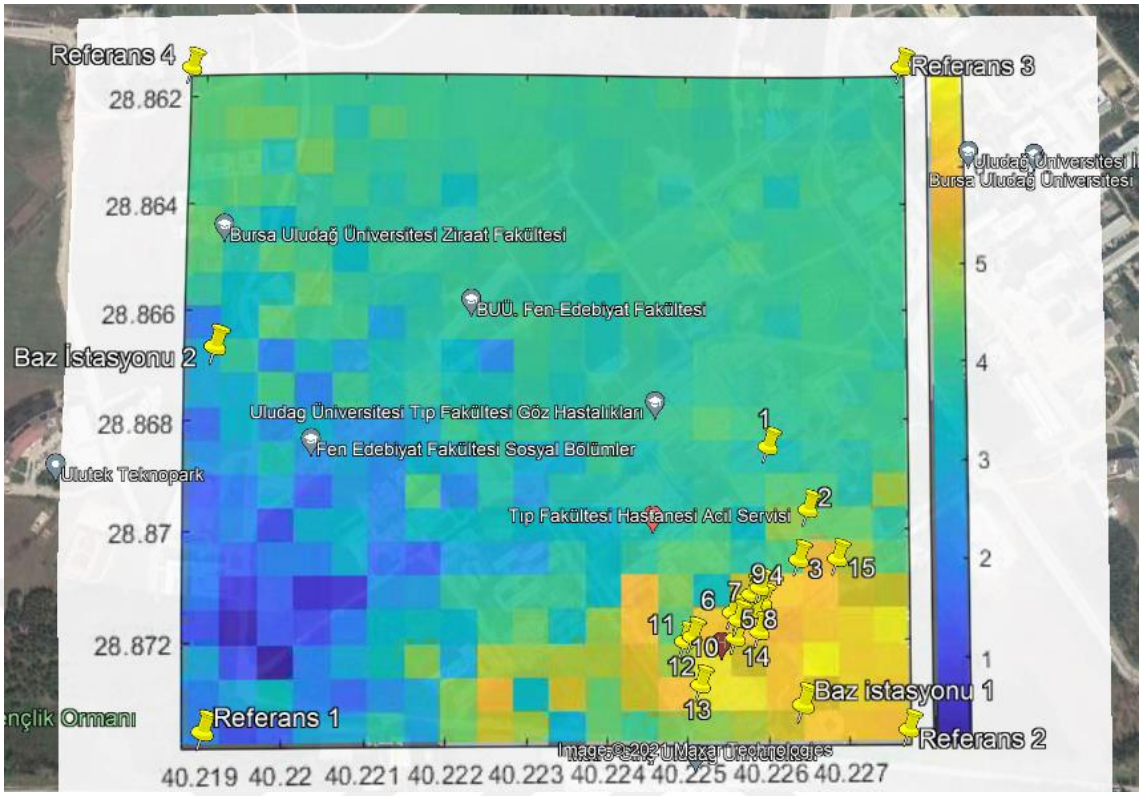
Şekil 4.22. 4 Frekans bileşenli model

Yapılan tüm tahminler neticesinde en uygun model olan yapay sinir ağı model-3'ün doğruluk değerinin artırılması amacıyla optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan optimizasyon ile giriş parametrelerinin, çıkış parametreleri ile bağlantılı olacak şekilde arttırılması durumunda modelin ürettiği tahminlerle ölçüm arasındaki korelasyon incelenmiştir ve şekil 4.23'de belirtilen Frekans1, N=1 adet frekans, Frekans2, N=2 adet frekans, N=3, Frekans3, Frekans4, N=4 adet frekans ve ölçüm ise fiziksel olarak yapılan ölçüm değerlerini temsil etmektedir. Diğer ölçümlerde olduğu gibi ölçüm noktaları ölçüm indeksi olarak adlandırılırken [225x(6+N)]'lik giriş dizisine karşılık [225x1]'lik çıkış dizisi kıyaslanmıştır.



Şekil 4.23. Ölçüm-farklı ek frekans bileşenli model kıyaslaması

Nihai olarak elde edilen model neticesinde yapay sinir ağları ile tüm kampüs içerisinde ortalama elektrik alan şiddeti tahmini yapılmıştır. Bu tahmin yapılırken kampüs şekil 4.24'de görüldüğü gibi 4 adet referans noktaları baz alınarak kare şeklinde modellenmiştir. Bu noktalar 4 km^2'lik alanı kapsamakla birlikte alanın eni ve boyu 100 m aralıklı 20x20 ve toplam 400 adet nokta olacak şekilde bölünmüştür. Yapay sinir ağlarında tasarlanan model-3 ile tahmin yapılmıştır. Giriş parametreleri, tahmin yapılacak noktanın enlem değeri, boylam değeri, ölçüm yapılacak noktanın baz istasyonu-1'e olan izdüşümü uzaklığı, ölçüm yapılacak noktanın baz istasyonu-2'ye olan izdüşümü uzaklığı, ölçüm yapılacak gün (pazartesiden cumaya 1-5 arasında rastgele olarak), ölçüm yapılan saat (00:00-23:59 arası dakika şekline çevrilerek 0-1439 aralığında rastgele olarak) olarak belirlenmiş ve giriş dizisi [400x6] olarak ayarlanmıştır. Çıkış olarak ise belirlenen noktalarda ortalama elektrik alan şiddeti [400x1] şeklinde bir dizi ile tahmin edilmiş ve şekil 4.24'de gösterildiği gibi haritalandırma yapılmıştır.



Şekil 4.24. YSA nihai model sonucu kampüs içi genel tahmin haritalandırması

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yapılan tez çalışmasında BUÜ Görükle yerleşkesinde üç farklı yöntem ile elektromanyetik maruziyet seviyesi belirlenmiştir. İlk yöntem, ölçüm yöntemidir. Belirlenen noktalarda belirli frekans aralığında ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak elektrik alan şiddeti ölçümü yapılmıştır. Yapılan 225 ölçüm neticesinde en yüksek ortalama elektrik alan şiddeti 4.081 V/m iken en düşük ortalama elektrik alan şiddeti ise 1.126 V/m'dir. Elde edilen ölçüm sonuçları ulusal standartlar ile kıyaslandığında ortamda elde edilen en yüksek ortalama elektrik alan şiddeti sınır elektrik alan şiddetinin %30.2'sine denk gelmektedir. Uluslararası standartlar ile kıyaslandığında ise %6.7'sine denk gelmektedir. Ölçümlerde dikkat edilen bir diğer husus ise ölçüm alınan noktadaki maksimum elektrik alan şiddetidir. Bu değer anlık olarak elde edilen en yüksek elektrik alan şiddeti olarak kaydedilmiştir. Bu doğrultuda bakıldığında ise en yüksek elektrik alan şiddeti tüm ölçümler boyunca 6.165 V/m olarak elde edilmiştir. Ulusal standartlar ile kıyaslandığında bu değer limit elektrik alan şiddetinin %45.6, uluslararası standartlar ile kıyaslandığında ise %10.1'idir.

Günler bazında ortalama elektrik alan şiddeti pazartesi sabah 4.08 V/m, öğlen 3.81 V/m, akşam 3.432 V/m, salı sabah 3.976 V/m, öğlen 3.768 V/m, akşam 3.718 V/m, çarşamba sabah 3.764 V/m, öğlen 3.535 V/m, akşam 3.84 V/m, perşembe sabah 3.553 V/m, öğlen 3.663 V/m, akşam 3.795 V/m, cuma sabah 4.081 V/m, öğlen 3.833 V/m ve akşam ise 3.807 V/m olarak elde edilmiştir. Bu veriler incelendiğinde elektrik alan şiddeti seviyesinin gün ve ölçüm yapılan saat bazında farklılık gösterdiği görülmektedir. En yüksek elektrik alan şiddetinin pazartesi ve cuma günü sabah olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise ölçüm yapılan saatler içerisinde hastane bölgesinde olan insan yoğunluğundaki artışın elektrik alan şiddetinin artışı ile paralellik göstermesidir. Gün içerisinde kampüs ve hastane bölgesindeki kullanıcı sayısı değişikliği ortamdaki elektrik alan şiddetini de etkilemektedir. Özellikle saat 17:00'den sonra alınan ölçümlerde hastane bölgesindeki kullanıcı sayısının azalmasıyla ölçülen elektrik alan şiddeti de bu saatlerde minimum değeri göstermektedir.

Operatörler bazında ölçüm sonuçları ele alındığında ise operatör 1 için ölçülen maksimum ortalama elektrik alan şiddeti 3.329 V/m, operatör 2 için 2.343 V/m, operatör 3 için 2.282 V/m ve diğer frekans bileşenleri için ise 0.763 V/m'dir. Ulusal standartlara göre ele alındığında ise ölçüm sonuçlarının limit elektrik alan şiddetine oranı operatör-1 %24.6, operatör-2 %17.3, operatör-3 %16.9 ve diğer bileşenler ise %5.65 olarak hesaplanmıştır. Türkiye'deki operatörlerin değerlendirilebilmesi amacıyla ölçüm sonuçları kullanılarak MLRA analizi yapılmıştır. Bu analizin amacı, her bir operatörün elektromanyetik maruziyet seviyesindeki payını tespit etmektir. Bu amaçla sonuçlar ele alındığında operatörlerin ortalama elektrik alan şiddetindeki payları operatör-1 için %37.9, operatör-2 için %27.7, operatör-3 için %27.9 ve diğer frekans bileşenleri ise %6.5'dir.

İkinci yöntem, yapay sinir ağları ile elektrik alan şiddeti tahminidir. Tahmin yöntemleri ele alındığında yapay sinir ağları için 3 model tasarlanmıştır. Yapay sinir ağları içerisindeki modellerin tahmin sonuçlarına bakıldığında model-1'den model-3'e kadar doğruluk değeri artmıştır. Model 2 model 1'e göre %4.89 daha yüksek doğruluk değeri ile tahmin yapabilirken model 3 de model 2 ye göre %7.57 daha yüksek doğruluk değeri ile tahmin yapabilmektedir. Üç model kıyaslandığında ise model 3 model 1'e göre %12.83 daha yüksek doğruluk değeri ile tahmin yapabilmektedir.

Üçüncü yöntem, bulanık mantık ile elektrik alan şiddeti tahminidir. Bulanık mantık için 3 model tasarlanmıştır. Modellerin doğruluk değerleri incelendiğinde model 1'den model 2 ye geçildiğinde %3.02'lik artış, model2'den model 3'e geçildiğinde ise %3.63'lük bir artış tespit edilmiştir. Üç model de incelendiğinde ise en iyi model olan 3 ile en kötü model 1 kıyaslandığında ise aralarında %6.76'lık bir fark olduğu tespit edilmiştir.

Her iki tahmin metodu karşılaştırıldığında yapay sinir ağlarının bulanık mantığa göre %11.09 daha iyi olduğu görülmektedir. Ancak bulanık mantık ile tahmin yapıldığında verilen giriş parametreleri, ağın eğitiminde kullanılan değerlerin dışına çıktığı takdirde sistemin doğruluk değeri yüzdesi düşmekte ve hata payı artmaktadır. Ortaya çıkan değerlerde gerçek dışı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu da sistemin en büyük dezavantajı olarak belirlenmiştir. Daha açık ifade etmek gerekirse örneğin, ağın eğitimi

için alınan ölçümlerin koordinatları bir kare olacak şeklinde alınmış olsun. Eğitim sonucunda ağın bu kare alanın dışında bir noktada ki elektrik alan şiddeti tahmini yapmamız istenirse bu noktada tahmin yapamayacaktır. Bu noktada yapay sinir ağının tahmin performansı ağın eğitildiği bölge dışında ki noktalarda da tahmin yapabilecek şekilde yüksektir. Bunun yanı sıra bulanık mantığın bir diğer dezavantajı ise tahmin süresidir. Bulanık mantık ile yapılan tahminde giriş parametreleri arttıkça sistemin karmaşıklığı eksponansiyel olarak artmaktadır. Bu da çözüm süresini yapay sinir ağlarına göre yaklaşık 32 kat arttırmaktadır. Tez çalışmasının amaçlarından biri de ölçüm alanlarının dışındaki konumlarda dahi tahmin yapmaktır. Bundan dolayı yapay sinir ağları ile tasarlanan model nihai tahmin modeli olarak seçilmiştir.

Belirlenen nihai yapay sinir ağı tahmin modeline ilave olarak sistemin daha yüksek doğruluk değeri ile tahmininin sağlanması için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. YSA model-3 giriş parametrelerine ek olarak frekans tablosunda verilen diğer frekans değerlerinden N adet giriş yapılarak çıkış elektrik alan şiddeti tahmin doğruluk değeri arttırılmıştır. 1 adet frekans bileşeninin (N=1) ek olarak giriş yapıldığı modelde yapılan ortalama elektrik alan tahmini 2 adet frekanslı bileşene göre %7.55 daha düşük doğruluğa sahiptir. 2 adet frekanslı giriş ise 3 adet frekanslı girişe göre %0.017 daha düşük doğruluk değerine sahiptir. Son olarak 3 adet frekanslı giriş ise 4 adet frekanslı girişe göre %0.010 daha düşük doğruluk değeri içerir. Çıkan sonuçlar incelendiğinde 2 adet frekans bileşenli girişin optimum olduğu tespit edilmiştir. Giriş sayısının artmasıyla sistem daha karmaşıklaşmakla birlikte artışın tahmin doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirmediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yapay sinir ağları model-3'de giriş parametrelerine ek olarak ölçüm yapılan herhangi iki frekans bileşeni sisteme girdi olarak tanımlanır. Toplamda 8 adet giriş parametresi ile, 1 adet elektrik alan şiddeti çıktı olarak kullanıldığında tahminin R^2 değeri 0.99984 olduğu tespit edilmiştir.

Yapay sinir ağları model-3 ile eğitilen ağ neticesinde kampüs şekil 4.28'de gösterildiği gibi eşit parçalara ayrılarak toplam ortalama elektrik alan şiddeti tahmini yapılmıştır. Bu tahminler neticesinde kampüs üzerinde ortalama elektrik alan şiddeti renkli harita metoduyla gösterilmiştir. Yapay sinir ağları içerisinde ağın eğitimi dışında ağın doğruluğunu test etmek amacıyla ölçüm verilerinin %10'u kullanılmıştır. Sistemin

doğruluğu R^2 değeri 0.934 olarak hesaplanmıştır. Eşit aralıklı 400 noktaya bölünen harita üzerinde tekrar ölçüm yapılarak doğrulama yapmaya gerek duyulmamaktadır. Yapılan haritalandırma kampüs içerisinde ki binaların konumları, yüzey üzerinde ki düzensizlikler, insan yoğunluğunun bölgelere göre değişimi, bitki örtüsü, havanın dielektrik katsayısının değişimi gibi çevresel faktörler göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Bu gibi çevresel faktörler yapay sinir ağlarındaki giriş parametreleri ile ağa bozucu giriş olarak dolaylı şekilde entegre edilerek tahmin gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin bilime katkısı, çevresel parametrelere bağlı olan elektromanyetik alan şiddetinin makine öğrenmesi tabanlı yapay sinir ağları ve kural tabanlı bulanık mantık metotları kullanılarak tahmin edilebilirliğinin literatüre kazandırılmasıdır. Kullanım amacına göre seçilecek tahmin metodunun da farklılıklar göstereceği tespit edilmiştir. Belirli bir alan içerisinde sınırları belli şekilde ölçüm yapılarak tahmini istenen bir bölge için bulanık mantık metodu ile yalnızca koordinat bilgileri gibi doğrusal veriler girilerek yüksek doğruluk değeri ile elektromanyetik alan şiddeti tespitinin yapılabileceği gözlemlenmiştir. Sınırları daha esnek olan doğrusal olmayan girdilere sahip bir alanda yapılacak tahminlerde ise yapay sinir ağı ile önerilen metotlar kullanılarak tahmin yapılabileceği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra benzer giriş parametrelerine sahip alanlar için yapılacak elektromanyetik alan şiddeti tahmini için doğruluk değeri harcanan süreye kıyasla öncelikli ise yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak yapılacak tahmin daha uygun olacaktır.

Bu tez çalışması gelecekte yapılabilecek iki adet çalışmaya temel oluşturabilir.

İlk çalışma baz istasyonu konumu tahmini yapmaktır. Bir bölge üzerine baz istasyonu kurulmak istendiğinde o bölge üzerinde olması istenen elektrik alan şiddetine göre baz istasyonunun hangi noktaya konumlanmasının tahmini yapılabilir. Bu sayede istenen elektrik alan şiddetine göre kaç adet baz istasyonu ve bu baz istasyonlarının hangi noktaya konumlanması gerektiği tahmini yapılabilir.

İkinci çalışma, tüm önerilen metotlar ile tek bir bilgisayar öğrenme modülünün tasarlanmasıdır. Bu modül ile doğruluk değeri, zaman, ölçüm konumu ile tahmin

konumları arasındaki ilişki hesaba katılarak optimum tahmin modelinin belirlenmesi ve bu model neticesinde istenen elektrik alan şiddetinin tespit edilmesidir.

KAYNAKLAR

Balmori, A. (2015). Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation. *Science of the Total Environment*, *518–519*, 58–60. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.077

Baltrenas, P., & Buckus, R. (2013). Measurements and analysis of the electromagnetic fields of mobile communication antennas. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *46*(10), 3942–3949. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.008

Barclay, L. (2013). *Propagation of Radiowaves Edited by* (The Instit). London.

Bede, B. (2006). Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Içinde *Feature extraction, foundations and applications*. Redmond, WA: Springer.

Beekhuizen, J., Vermeulen, R., van Eijsden, M., van Strien, R., Bürgi, A., Loomans, E., Huss, A. (2014). Modelling indoor electromagnetic fields (EMF) from mobile phone base stations for epidemiological studies. *Environment International*, *67*, 22–26. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.02.008

BTK. (2015). *Elektronik Haberleşme Cihazlarından Kaynaklanan Elektromanyetik Alan Şiddetinin Uluslararası Standartlara Göre Maruziyet Limit Değerlerinin Belirlenmesi, Kontrolü Ve Denetimi Hakkında Yönetmelik.* Ankara. Tarihinde adresinden erişildi https://www.mevzuat.gov.tr/anasayfa/MevzuatFihristDetayIframe?MevzuatTur=7&MevzuatNo=34522&MevzuatTertip=5

BUÜ. (2022). Tarihçe Tanıtım Kurumsal. Tarihinde adresinden erişildi https://suam.uludag.edu.tr/tarihce-tanitim.htm website: https://suam.uludag.edu.tr/tarihce-tanitim.htm

Cansız, M., Kurt, M. B., & Çelik, A. R. (2014). Measurements of Electric and Magnetic Field Intensities at 50 Hz Mains Frequency and Comparison of Measurement Results to ICNIRP's Reference Levels for General Public Exposure. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *20*(8), 294–299. https://doi.org/10.5505/pajes.2014.47550

Cerezci, F., Kazan, S., & Cerezci, O. (2015). Analyzing of Electromagnetic Exposure from GSM Antennas Using Data Mining Techniques. *ISITES*, 525–531. Valencia.

Chen, C. S., Huang, J. F., Lin, S. C., Tseng, C. C., & Wu, C. M. (2018). Applying Geometric Dilution of Precision Approximation to Adaptive Neural Network Learning for Precise Mobile Station Positioning. *Proceedings - International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, *2*, 474–479. https://doi.org/10.1109/ICMLC.2018.8526984

Everaert, J., & Bauwens, D. (2007). A possible effect of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on the number of breeding House Sparrows (Passer

domesticus). *Electromagnetic Biology and Medicine*, *26*(1), 63–72. https://doi.org/10.1080/15368370701205693

Gajšek, P., Ravazzani, P., Wiart, J., Grellier, J., Samaras, T., & Thuróczy, G. (2015). Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz-6 GHz). *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, *25*(1), 37–44. https://doi.org/10.1038/jes.2013.40

Gao, Y., Chen, J., Liu, Z., Liu, L., & Hu, N. (2021). *Deep Learning based Location Prediction with Multiple Features in Communication Network*. 1–5. https://doi.org/10.1109/wcnc49053.2021.9417278

García-Díaz, P., Salcedo-Sanz, S., Portilla-Figueras, J. A., & Jiménez-Fernández, S. (2013). Mobile network deployment under electromagnetic pollution control criterion: An evolutionary algorithm approach. *Expert Systems with Applications*, *40*(1), 365–376. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.07.050

Gómez-Pérez, P., Crego-García, M., Cuiñas, I., & Caldeirinha, R. F. S. (2017). Modeling and inferring the attenuation induced by vegetation barriers at 2G/3G/4G cellular bands using Artificial Neural Networks. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *98*, 262–275. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.014

Howard, D., & Mark, B. (2004). Neural Network Toolbox Documentation. Içinde *The Mathworks*.

Ibrani, M., Ahma, L., Hamiti, E., & Haxhibeqiri, J. (2011). Derivation of electromagnetic properties of child biological tissues at radio fre-quencies. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, *25*(April 2016), 87–100. https://doi.org/10.2528/PIERL11052002

Ibrani, Mimoza, Ahma, L., & Hamiti, E. (2014). Assessment of the exposure of children to electromagnetic fields from wireless communication devices in home environments. *IET Communications*, *8*(12), 2222–2228. https://doi.org/10.1049/iet-com.2013.0818

ICNIRP, (1998). ICNIRP Guıdelınes For Lımıtıng Exposure To Tıme ‐ Varyıng Electrıc, Magnetıc And Electromagnetıc Fıelds (Up To 300 Ghz) Publıshed IN: 74 (4):494-522; 1998 Note: Içinde *Health Physıcs*.

Karpat, E., & Bakcan, M. R. (2022). Measurement and Prediction of Electromagnetic Radiation Exposure Level in a University Campus. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, *29*(2), 449–455. https://doi.org/10.17559/tv-20200418183308

Karpat, E., Bakcan, M. R., Chabbar, A. T., İbrahim, M. M. A., Çelik, B., & Doğan, O. (2019). Estımatıng Base Statıon-Based Indoor And Outdoor Electrıc Fıeld Levels By Artıfıcıal Neural Networks. *European Journal of Technic*, *9*(1), 1–12. https://doi.org/10.36222/ejt.500040

Khalatbari, S., Sardari, D., Mirzaee, A. A., & Sadafi, H. A. (2006). Calculating SAR in

two models of the human head exposed to mobile phones radiations at 900 and 1800 MHz. *PIERS 2006 Cambridge - Progress in Electromagnetics Research Symposium, Proceedings*, 104–109. https://doi.org/10.2529/piers050905190653

Kurnaz, Ç. (2016). Measurement and Evaluation of Electric Field Strength in Samsun City Center. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*, *4*, 24–29.

Medjedovic, P. S., & Suka, D. S. (2013). Prediction and measurement of electromagnetic radiation at Krajina square in the city of Banja Luka. *2013 11th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, TELSIKS 2013*, *2*, 534–537. https://doi.org/10.1109/TELSKS.2013.6704435

Miclaus, S., & Bechet, P. (2007). Estimated and measured values of the radiofrequency radiation power density around cellular base stations. *Romanian Journal of Physics*, *52*(July 2006), 429–440. Tarihinde adresinden erişildi http://www.nipne.ro/rjp/2007_52_3-4/0429_0441.pdf

MMF & GSMA. (2008). *RF safety at base station sites*. 1–11. Tarihinde adresinden erişildi http://www.mmfai.org/Public/docs/eng/080729_RF_safety_base2NL_final.pdf
Montgomery, D., Peck, E., & Vining, G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis*. New York: Wiley.

Pandey, A. K., & Goyal, N. K. (2013). Early Software Reliability Prediction A Fuzzy Logic Approach. Içinde *Early Software Reliability Prediction*. New Delhi: Springer India. Tarihinde adresinden erişildi http://link.springer.com/10.1007/978-81-322-1176-1

Paniagua, J. M., Rufo, M., Jimenez, A., & Antolin, A. (2013). The spatial statistics formalism applied to mapping electromagnetic radiation in urban areas. *Environmental Monitoring and Assessment*, *185*(1), 311–322. https://doi.org/10.1007/s10661-012-2555-7

Phaebua, K., Lertwiriyaprapa, T., & Torrungrueng, D. (2021). Cylindrical Near-field to Far-field Radiation Pattern Measurement System for a Large Mobile Phone Base Station Antenna. *Proceeding of the 2021 9th International Electrical Engineering Congress, iEECON 2021*, 535–538. https://doi.org/10.1109/iEECON51072.2021.9440275

Saim, K., Zerrin, K., & Selçuk, S. (2010). Electromagnetic Pollution in Buildings and Its Effects on Human Health. *The International Conference on Electrical Engineering*, *7*(7), 1–9. https://doi.org/10.21608/iceeng.2010.33047

Sakacı, F. H., & Cerezci, O. (2021). Prediction of Magnetic Pollution with Artificial Neural Network in Living Areas. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, *16*(5), 2701–2708. https://doi.org/10.1007/s42835-021-00772-y

Schmid, G., Lager, D., Preiner, P., Überbacher, R., & Cecil, S. (2007). Exposure caused by wireless technologies used for short-range indoor communication in homes and offices. *Radiation Protection Dosimetry*, *124*(1), 58–62.

https://doi.org/10.1093/rpd/ncm245

Seyfi, L. (2013). Measurement of electromagnetic radiation with respect to the hours and days of a week at 100kHz-3GHz frequency band in a turkish dwelling. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *46*(9), 3002–3009. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.02

Sühnel, J., & Berg, H. (2003). Biological Effects of Electromagnetic Fields (Mechanisms, Modeling, Biological Effects, Therapeutic Effects, International Standards, Exposure Criteria). Içinde *Bioelectrochemistry* (C. 61). https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2003.09.002

Urbinello, D., Joseph, W., Verloock, L., Martens, L., & Röösli, M. (2014). Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in everyday environments across European cities. *Environmental Research*, *134*, 134–142. https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.07.003

Viel, J. F., Tiv, M., Moissonnier, M., Cardis, E., & Hours, M. (2011). Variability of radiofrequency exposure across days of the week: A population-based study. *Environmental Research*, *111*(4), 510–513. https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.02.015

Yang, J., Wang, L., Li, X., Wu, J., Chao, Y., & Pan, C. (2013). *A Prediction Model for Electromagnetic Radiation of Multi- system Base Station*. (Iccsee), 3012–3015. https://doi.org/10.2991/iccsee.2013.752

EKLER

Ek 1 Ölçüm noktalarına göre giriş-çıkış parametreleri

Ek 2 Yapay sinir ağları ile kampüs içi haritalandırma elektrik alan değerleri

Ek 3 SRM 3006 Datasheet

Ek-1

	Enlem	Boylam	Mesafe-1(m)	Mesafe-2(m)	Gün	Saat	Ortalama E
1	40.2224	28.8712	390	836	1	10:45:39	1.661
2	40.2215	28.8719	292	915	1	10:53:09	2.754
3	40.2208	28.8717	217	924	1	11:00:01	3.082
4	40.2205	28.871	187	885	1	11:12:55	2.974
5	40.2204	28.8709	183	877	1	11:22:28	3.833
6	40.2201	28.8705	174	863	1	11:32:16	4.08
7	40.22	28.8706	160	877	1	11:40:07	3.173
8	40.2202	28.8709	160	891	1	11:50:13	2.972
9	40.2203	28.871	166	897	1	11:59:16	3.031
10	40.2198	28.8706	142	886	1	12:07:08	1.453
11	40.2198	28.8698	194	829	1	12:14:18	3.228
12	40.2198	28.8697	201	822	1	12:21:11	3.655
13	40.2192	28.87	156	878	1	12:27:56	2.58
14	40.2199	28.871	128	913	1	12:35:44	2.156
15	40.2209	28.8724	225	978	1	12:43:21	3.301
16	40.2209	28.8718	219	931	1	14:19:35	2.693
17	40.2206	28.8711	203	882	1	14:27:59	2.829
18	40.2204	28.8708	190	872	1	14:34:30	3.638
19	40.2201	28.8705	170	867	1	14:41:00	3.81
20	40.2201	28.8707	163	876	1	14:47:22	3.105
21	40.2202	28.8709	165	886	1	14:54:05	2.777
22	40.2203	28.8711	170	899	1	15:00:36	2.636
23	40.2198	28.8705	148	880	1	15:08:00	1.426
24	40.2199	28.8698	196	827	1	15:14:48	3.129
25	40.2199	28.8696	214	809	1	15:21:58	3.146
26	40.2192	28.8699	158	874	1	15:30:04	2.396
27	40.2199	28.871	127	914	1	15:38:20	2.199
28	40.2209	28.8724	227	980	1	15:47:54	3.357
29	40.2213	28.8721	270	941	1	15:55:54	3.039
30	40.2215	28.8718	288	914	1	16:03:04	2.766
31	40.2209	28.8718	223	927	1	16:55:49	2.541
32	40.2205	28.8711	186	895	1	17:03:19	3.111
33	40.2204	28.8709	181	878	1	17:10:17	3.401
34	40.2201	28.8706	169	868	1	17:17:27	3.432
35	40.2201	28.8707	160	880	1	17:24:09	3.005
36	40.2202	28.8709	160	891	1	17:31:05	2.753
37	40.2203	28.8711	171	897	1	17:37:48	2.026
38	40.2197	28.8705	140	887	1	17:45:06	1.601

	Enlem	Boylam	Mesafe-1(m)	Mesafe-2(m)	Gün	Saat	Ortalama E
39	40.2199	28.8698	195	828	1	17:52:27	3.156
40	40.2199	28.8696	211	813	1	17:59:17	3.069
41	40.2192	28.87	155	878	1	18:06:40	2.783
42	40.2198	28.8709	126	910	1	18:14:35	2.166
43	40.2208	28.8724	224	977	1	18:23:12	3.182
44	40.2214	28.8718	282	915	1	18:31:16	2.326
45	40.2216	28.8718	301	905	1	18:38:03	2.46
46	40.2209	28.8717	224	926	2	10:28:32	2.704
47	40.2206	28.8711	197	886	2	10:35:52	2.49
48	40.2204	28.8709	181	881	2	10:42:30	3.63
49	40.2202	28.8705	178	859	2	10:49:12	3.976
50	40.2201	28.8707	162	877	2	10:56:06	2.649
51	40.2202	28.8708	164	882	2	11:02:29	2.05
52	40.2203	28.871	166	891	2	11:08:59	3.328
53	40.2199	28.8705	152	876	2	11:17:13	1.386
54	40.2198	28.8698	192	831	2	11:24:07	2.903
55	40.2198	28.8696	212	812	2	11:31:11	3.287
56	40.2192	28.8699	157	876	2	11:38:56	2.377
57	40.2198	28.8709	123	909	2	11:46:55	2.217
58	40.2209	28.8724	225	980	2	11:55:34	3.023
59	40.2214	28.8719	277	919	2	12:02:17	2.76
60	40.2215	28.8718	293	909	2	12:08:45	2.452
61	40.2209	28.8718	223	932	2	14:18:49	2.722
62	40.2206	28.8711	202	885	2	14:26:25	2.808
63	40.2204	28.8708	186	874	2	14:33:17	3.768
64	40.2202	28.8705	179	860	2	14:39:49	3.61
65	40.2201	28.8707	166	875	2	14:46:20	3.055
66	40.2202	28.8709	169	884	2	14:53:01	2.532
67	40.2203	28.8711	170	899	2	14:59:50	2.674
68	40.2199	28.8706	148	881	2	15:07:06	1.525
69	40.2199	28.8698	199	824	2	15:14:11	3.034
70	40.2199	28.8695	218	805	2	15:20:51	3.379
71	40.2192	28.87	156	876	2	15:28:31	2.293
72	40.2198	28.8709	127	908	2	15:36:41	1.951
73	40.2209	28.8724	227	980	2	15:46:00	2.722
74	40.2214	28.8719	280	919	2	15:53:36	2.357
75	40.2216	28.8718	296	906	2	16:00:36	2.233
76	40.2209	28.8718	226	927	2	17:23:04	2.78
77	40.2206	28.8712	197	894	2	17:30:23	2.649

	Enlem	Boylam	Mesafe-1(m)	Mesafe-2(m)	Gün	Saat	Ortalama E
78	40.2204	28.8709	184	877	2	17:37:13	3.075
79	40.2202	28.8705	177	861	2	17:44:10	3.634
80	40.2201	28.8706	164	875	2	17:50:51	2.738
81	40.2202	28.8708	166	883	2	17:57:30	2.691
82	40.2203	28.8711	171	895	2	18:04:15	2.328
83	40.2198	28.8705	149	879	2	18:12:00	1.445
84	40.2198	28.8698	196	828	2	18:19:14	2.94
85	40.2198	28.8697	201	823	2	18:26:00	3.718
86	40.2192	28.87	153	879	2	18:33:40	2.174
87	40.2198	28.8709	127	910	2	18:41:48	2.123
88	40.2208	28.8724	223	979	2	18:50:15	3.371
89	40.2214	28.8718	281	912	2	18:57:37	1.904
90	40.2216	28.8717	298	903	2	19:04:13	2.565
91	40.2209	28.8717	223	924	3	10:28:37	2.469
92	40.2206	28.8711	194	891	3	10:35:58	2.614
93	40.2204	28.8708	184	875	3	10:42:35	3.518
94	40.2202	28.8705	178	860	3	10:49:37	3.764
95	40.2201	28.8706	164	876	3	10:56:03	2.82
96	40.2202	28.8709	163	887	3	11:02:57	2.852
97	40.2203	28.8711	166	898	3	11:09:57	3.102
98	40.2199	28.8704	157	871	3	11:17:28	1.45
99	40.2198	28.8698	194	829	3	11:24:41	3.493
100	40.2198	28.8696	205	818	3	11:31:22	3.51
101	40.2192	28.87	149	884	3	11:38:57	2.17
102	40.2198	28.8709	125	911	3	11:46:18	2.16
103	40.2209	28.8724	226	977	3	11:57:37	3.198
104	40.2214	28.8718	278	917	3	12:04:31	2.09
105	40.2216	28.8717	303	900	3	12:11:01	2.731
106	40.2209	28.8718	222	932	3	14:17:36	2.498
107	40.2206	28.8711	202	883	3	14:25:34	2.468
108	40.2204	28.8708	186	873	3	14:32:54	3.524
109	40.2202	28.8705	178	860	3	14:39:51	3.234
110	40.2201	28.8706	164	875	3	14:46:32	2.787
111	40.2202	28.8709	161	890	3	14:53:22	2.442
112	40.2203	28.8711	167	900	3	15:00:12	2.51
113	40.2199	28.8705	157	873	3	15:07:56	1.392
114	40.2199	28.8698	197	826	3	15:15:19	3.535
115	40.2199	28.8696	213	811	3	15:22:13	3.156
116	40.2192	28.87	154	878	3	15:30:03	2.095

	Enlem	Boylam	Mesafe-1(m)	Mesafe-2(m)	Gün	Saat	Ortalama E
117	40.2198	28.8709	126	908	3	15:38:47	2.022
118	40.2209	28.8724	226	978	3	15:47:48	3.029
119	40.2214	28.8718	281	915	3	15:55:17	2.401
120	40.2216	28.8718	300	905	3	16:02:21	2.734
121	40.2209	28.8717	222	922	3	17:18:34	2.7
122	40.2206	28.8711	197	885	3	17:25:57	3.007
123	40.2204	28.8708	185	875	3	17:32:45	3.84
124	40.2202	28.8705	175	863	3	17:39:30	3.38
125	40.2201	28.8707	159	880	3	17:46:01	2.753
126	40.2202	28.8709	165	888	3	17:52:41	2.753
127	40.2203	28.8711	167	901	3	17:59:08	2.523
128	40.22	28.8704	164	867	3	18:06:34	1.21
129	40.2198	28.8698	194	829	3	18:13:35	2.841
130	40.2199	28.8697	203	821	3	18:20:16	2.8
131	40.2192	28.87	151	881	3	18:27:39	2.045
132	40.2199	28.8709	129	909	3	18:35:13	1.887
133	40.2208	28.8724	222	980	3	18:43:30	3.06
134	40.2215	28.8718	288	913	3	18:51:07	2.492
135	40.2216	28.8718	306	903	3	18:57:34	2.434
136	40.2209	28.8717	225	924	4	10:42:41	2.545
137	40.2206	28.8711	199	886	4	10:50:23	3.359
138	40.2204	28.8708	183	876	4	10:57:16	3.331
139	40.2202	28.8705	179	858	4	11:04:20	3.553
140	40.2201	28.8707	163	877	4	11:10:56	2.759
141	40.2202	28.8709	164	888	4	11:17:34	3.021
142	40.2203	28.8711	170	896	4	11:24:09	2.188
143	40.2198	28.8705	147	880	4	11:31:52	1.126
144	40.2198	28.8698	196	827	4	11:39:38	3.129
145	40.2198	28.8697	202	822	4	11:47:00	3.531
146	40.2192	28.87	153	880	4	11:54:30	2.022
147	40.2198	28.871	126	912	4	12:02:31	1.902
148	40.2209	28.8724	227	976	4	12:11:07	3.128
149	40.2214	28.8719	280	917	4	12:18:33	2.217
150	40.2216	28.8718	301	904	4	12:25:16	2.434
151	40.2209	28.8718	220	929	4	14:15:09	2.633
152	40.2207	28.871	209	873	4	14:22:39	2.769
153	40.2204	28.8709	185	877	4	14:29:18	3.193
154	40.2202	28.8705	181	858	4	14:36:19	3.663
155	40.2201	28.8707	161	878	4	14:43:04	2.713

	Enlem	Boylam	Mesafe-1(m)	Mesafe-2(m)	Gün	Saat	Ortalama E
156	40.2202	28.8709	163	888	4	14:50:06	2.723
157	40.2203	28.8711	168	898	4	14:57:10	2.808
158	40.2199	28.8705	152	877	4	15:04:48	1.339
159	40.2199	28.8698	195	829	4	15:12:05	2.824
160	40.2199	28.8696	212	811	4	15:19:02	3.022
161	40.2192	28.87	154	877	4	15:26:54	2.231
162	40.2198	28.871	126	912	4	15:35:00	1.933
163	40.2209	28.8724	226	978	4	15:44:44	2.676
164	40.2214	28.8718	281	914	4	15:52:15	2.381
165	40.2216	28.8718	298	907	4	15:59:04	2.422
166	40.2209	28.8719	227	934	4	17:16:42	2.51
167	40.2206	28.8712	191	896	4	17:23:50	2.83
168	40.2204	28.8708	185	875	4	17:30:24	3.795
169	40.2203	28.8705	188	855	4	17:37:04	3.606
170	40.2202	28.8706	171	869	4	17:43:35	3.202
171	40.2202	28.8708	164	886	4	17:49:59	2.634
172	40.2203	28.8711	169	896	4	17:57:03	2.326
173	40.2198	28.8706	144	885	4	18:04:29	2.082
174	40.2199	28.8698	198	826	4	18:11:16	3.014
175	40.2198	28.8695	212	812	4	18:18:09	2.782
176	40.2192	28.87	155	878	4	18:25:46	2.597
177	40.2199	28.8709	128	909	4	18:33:51	2.127
178	40.2208	28.8724	224	983	4	18:45:40	3.387
179	40.2214	28.8718	279	914	4	18:52:46	2.708
180	40.2216	28.8718	298	904	4	18:59:39	2.355
181	40.2209	28.8718	224	932	5	11:07:03	2.809
182	40.2206	28.8711	194	891	5	11:14:44	3.764
183	40.2204	28.8708	186	875	5	11:21:15	4.021
184	40.2201	28.8706	164	874	5	11:28:28	4.081
185	40.22	28.8707	157	881	5	11:34:59	3.231
186	40.2202	28.8709	165	886	5	11:41:34	2.996
187	40.2203	28.8711	168	898	5	11:48:20	3.013
188	40.2198	28.8705	147	881	5	11:55:43	1.654
189	40.2198	28.8698	196	827	5	12:02:58	3.778
190	40.2198	28.8697	201	822	5	12:09:39	3.576
191	40.2192	28.87	151	883	5	12:17:21	2.337
192	40.2199	28.871	125	914	5	12:24:52	2.378
193	40.2209	28.8723	224	969	5	12:33:36	4.048
194	40.2214	28.8719	282	917	5	12:40:49	3.223

	Enlem	Boylam	Mesafe-1(m)	Mesafe-2(m)	Gün	Saat	Ortalama E
195	40.2216	28.8717	304	902	5	12:47:20	3.479
196	40.2209	28.8718	221	928	5	13:53:19	2.726
197	40.2206	28.871	202	881	5	14:00:55	2.759
198	40.2204	28.8708	186	874	5	14:07:31	3.833
199	40.2201	28.8706	165	871	5	14:14:32	3.752
200	40.2201	28.8707	159	879	5	14:21:36	3.443
201	40.2202	28.8709	163	889	5	14:28:58	2.957
202	40.2203	28.8711	166	900	5	14:38:04	2.711
203	40.2198	28.8705	148	880	5	14:46:33	1.347
204	40.2198	28.8698	192	831	5	14:53:46	3.303
205	40.2199	28.8695	221	803	5	15:01:03	3.704
206	40.2192	28.87	151	881	5	15:08:22	2.14
207	40.2198	28.8709	126	911	5	15:16:14	2.06
208	40.2208	28.8724	220	982	5	15:24:46	3.492
209	40.2214	28.8718	278	914	5	15:32:19	2.675
210	40.2216	28.8718	302	907	5	15:38:56	2.675
211	40.2209	28.8718	223	932	5	16:55:49	2.627
212	40.2205	28.8711	191	893	5	17:03:19	2.47
213	40.2204	28.8709	185	877	5	17:10:17	2.97
214	40.2202	28.8705	177	862	5	17:17:27	3.907
215	40.2201	28.8707	161	879	5	17:24:09	2.603
216	40.2202	28.8709	160	891	5	17:31:05	2.776
217	40.2203	28.8711	168	899	5	17:37:48	2.403
218	40.2199	28.8705	149	879	5	17:45:06	1.456
219	40.2198	28.8699	183	840	5	17:52:27	2.789
220	40.2199	28.8697	208	816	5	17:59:17	2.585
221	40.2192	28.87	151	881	5	18:06:40	2.061
222	40.2199	28.8709	128	910	5	18:14:35	2.061
223	40.2208	28.8724	224	977	5	18:23:12	2.774
224	40.2214	28.8718	280	914	5	18:31:16	2.033
225	40.2215	28.8718	293	909	5	18:38:03	2.054

Ek-2

Enlem / Boylam	**28.8619**	**28.86252**	**28.86313**	**28.86375**	**28.86436**
40.21903	3.273992	2.814507	3.520934	1.897974	2.138928
40.21948	3.370707	3.416467	3.576022	1.430026	2.502721
40.21858	3.148967	2.318839	3.700231	1.533055	1.527301
40.22037	3.323662	3.116297	3.348737	2.113157	1.468647
40.22082	3.106068	3.080213	3.530039	1.334962	1.94121
40.22127	3.196432	3.389565	3.646699	2.580754	1.740365
40.22172	3.238169	3.36876	3.795161	2.037505	1.433965
40.22216	3.583597	2.825656	4.001273	1.966911	1.442699
40.22261	3.742411	2.097809	4.02986	1.839269	1.532946
40.22306	2.629631	3.393969	3.804528	2.737545	1.965256
40.22351	3.663154	2.3045	3.670129	2.359853	1.684308
40.22396	3.878023	3.783706	3.833722	2.427271	2.015131
40.2244	3.376688	3.680365	1.847019	2.165574	2.942725
40.22485	2.363635	3.535731	3.165032	1.639746	3.572762
40.2253	3.400065	2.881142	2.085016	1.452299	2.44919
40.22575	1.870005	1.807018	1.609174	2.075657	3.003347
40.22619	1.587735	1.693025	1.679054	2.340775	3.602503
40.22664	3.477903	1.426565	2.091196	3.746952	2.674368
40.22709	3.582818	3.410582	2.976732	4.015897	3.446854
40.22754	3.631129	3.663949	2.914851	3.998682	3.945224

Enlem / Boylam	**28.86498**	**28.8656**	**28.86621**	**28.86683**	**28.86744**
40.21903	1.279307	1.270178	1.152229	1.157624	1.187224
40.21948	1.212405	1.252801	1.299946	1.159017	1.14398
40.21858	1.282452	1.18163	1.404144	1.266239	1.145514
40.22037	1.422177	1.280422	1.236585	1.367587	1.144139
40.22082	1.501142	1.345563	1.185634	1.379704	1.156567
40.22127	1.465391	1.401766	1.346191	1.31524	1.1885
40.22172	1.48347	1.398676	1.223484	1.251586	1.229952
40.22216	1.20495	1.4104	1.376691	1.159667	1.259439
40.22261	1.22922	1.47033	1.416833	1.39718	1.248701
40.22306	1.763307	1.495771	1.445569	1.215497	1.94992
40.22351	2.135064	2.131433	1.454792	1.552385	1.423911
40.22396	2.027529	1.649485	1.512746	1.579875	1.274106
40.2244	1.633459	1.869488	1.399368	1.643151	1.504301
40.22485	1.891998	1.614468	1.662637	2.098331	1.53808
40.2253	2.341213	1.985279	2.20567	2.058724	2.113019
40.22575	2.728836	2.415011	2.396565	3.444954	2.378332
40.22619	2.809941	3.09823	2.85995	3.347193	3.180289
40.22664	3.013385	3.365685	3.268204	3.531146	2.492054
40.22709	3.516227	3.039563	3.733168	3.90276	1.97317
40.22754	3.727285	3.793015	3.732236	3.919175	2.0448

Enlem / Boylam	**28.86806**	**28.86867**	**28.86929**	**28.8699**	**28.87052**
40.21903	1.141223	1.219084	1.398203	1.398121	1.398064
40.21948	1.142245	1.147332	1.398805	1.398666	1.398574
40.21858	1.200632	1.191568	1.399426	1.399259	1.399173
40.22037	1.147541	1.305593	1.40005	1.399925	1.399842
40.22082	1.14687	1.356787	1.400817	1.400725	1.40071
40.22127	1.240833	1.402303	1.401974	1.401867	1.401912
40.22172	1.161854	1.404625	1.40398	1.40374	1.40381
40.22216	1.153148	1.409174	1.407721	1.407218	1.407198
40.22261	1.362171	1.417851	1.415058	1.413741	1.41375
40.22306	1.400096	1.434558	1.428811	1.426306	1.426511
40.22351	1.3996	1.466006	1.455897	1.451633	1.452815
40.22396	1.380711	1.524504	1.509615	1.505226	1.512798
40.2244	1.314658	1.634281	1.619501	1.626964	1.657467
40.22485	1.30172	1.852463	1.864772	1.90846	1.990232
40.2253	1.722071	2.274997	2.330497	2.408328	2.492671
40.22575	1.899356	2.80026	2.844259	2.874925	2.900997
40.22619	3.194204	3.149218	3.154637	3.150065	3.141194
40.22664	3.681097	3.321042	3.317266	3.310299	3.302642
40.22709	3.917311	3.43944	3.442831	3.450016	3.457861
40.22754	3.749991	3.573905	3.589882	3.610236	3.635889

Enlem / Boylam	**28.87113**	**28.87175**	**28.87236**	**28.87298**	**28.87359**
40.21903	1.398063	1.39808	1.398264	1.39861	1.399326
40.21948	1.398551	1.398558	1.398738	1.399147	1.399778
40.21858	1.399143	1.399213	1.399408	1.399886	1.400691
40.22037	1.399897	1.400021	1.400329	1.400939	1.401962
40.22082	1.400829	1.401072	1.401575	1.402413	1.403769
40.22127	1.402146	1.402605	1.403373	1.404664	1.406751
40.22172	1.404216	1.404973	1.406347	1.408498	1.41214
40.22216	1.407904	1.409214	1.411644	1.415737	1.422519
40.22261	1.414843	1.417487	1.42249	1.430799	1.445401
40.22306	1.428948	1.43489	1.446278	1.465643	1.499447
40.22351	1.460065	1.475854	1.503226	1.551767	1.630603
40.22396	1.534994	1.57663	1.645595	1.753262	1.900409
40.2244	1.719607	1.816927	1.946648	2.108566	2.271964
40.22485	2.098292	2.231088	2.366053	2.483815	2.58019
40.2253	2.569236	2.643687	2.702356	2.754714	2.80069
40.22575	2.915585	2.924979	2.942248	2.959012	2.989939
40.22619	3.130236	3.126581	3.131221	3.15413	3.193549
40.22664	3.301189	3.307792	3.32683	3.365411	3.421803
40.22709	3.47435	3.503242	3.542748	3.592675	3.650812
40.22754	3.664009	3.698907	3.737043	3.776596	3.81742

Specifications – Basic Unit SRM-3006

RF Data [a]			
Frequency	Frequency range	9 kHz to 6 GHz	
	Resolution bandwidth (RBW)	See specifications for each mode	
	Phase noise (SSB)	< -100 dBc/Hz (@ 300 kHz carrier offset)	verified at (57.5 / 2140.5 / 4500.5) MHz
	Reference frequency	Initial deviation Aging Thermal drift	< 1 ppm < 1 ppm/year, < 5 ppm over 15 years < 1.5 ppm (-10 °C to +50 °C)
Amplitude	Display range	From Displayed Average Noise Level (DANL) to +20 dBm	
	Measurement range (MR)	-30 dBm to +20 dBm in steps of 1 dB	
	RF Input attenuation	0 to 50 dB in steps of 1 dB (coupled with measurement range MR)	
	Measurement range setting	Set individually from a list or using the "MR Search" function for determining the optimum measurement range at a given time	
	Level uncertainty	≤ 1.2 dB (15 °C to 30 °C)	
	Displayed Average Noise Level (DANL)	f ≤ 30 MHz: < -160 dBm/Hz (noise figure < 14 dB) f ≤ 2 GHz: < -156 dBm/Hz (noise figure < 18 dB) f ≤ 4 GHz: < -155 dBm/Hz (noise figure < 19 dB) f ≤ 6 GHz: < -150 dBm/Hz (noise figure < 24 dB)	MR = -30 dBm (RF input attenuation = 0 dB)
	3rd order intermodulation	< -60 dBc for two single tones with a level of 6 dB below MR, spaced by 1 MHz or more	
	Spurious responses (input related)	< -60 dBc or MR-60 dB (whichever is worse) and a carrier offset of 1 MHz or more	
	Spurious responses (residual)	< -90 dBm (MR = -30 dBm, RF input attenuation = 0 dB) For (294 to 306) MHz and (4534 to 4586) MHz limited to < -85 dBm	
RF input	Type	N-Connector, 50 Ω, female	
	Maximum RF power level	+27 dBm (destruction limit)	
	Maximum DC voltage	±50 V	
	Return loss	f ≤ 4.5 GHz > 12 dB (typ.) f > 4.5 GHz > 10 dB (typ.)	MR ≥ -28 dBm (RF input attenuation ≥ 2 dB)

Three-axis antenna (E-field) 3502/01

RF Data					
Frequency range			420 MHz to 6 GHz The correction factors determined individually during calibration are stored in an EEPROM and are applied automatically when used in conjunction with the SRM basic unit.		
Antenna type			E-field		
Sensor type			Three-axis design with scanned axes		
Dynamic range [4]			0.14 mV/m to 160 V/m (typ.)		
Maximum field strength (destruction limit)			435 V/m or 50 mW/cm² (nom.)		
Displayed Average Noise Level (DANL) in conjunction with the SRM basic unit			Frequency range	Single-axis measurement with isotropic antenna	Isotropic measurement
			900 MHz (RBW = 1 kHz)	33 µV/m (typ.)	60 µV/m (typ.)
			2.1 GHz (RBW = 1 kHz)	25 µV/m (typ.)	43 µV/m (typ.)
Measurement range limit (for single CW signal)			200 V/m (typ.)		
RF connector			N-Connector, 50 Ω, male		

General specification				
Operating temperature range			-10 °C to +50 °C (same as SRM basic unit)	
Compliance	Climatic		Storage	1K3 (IEC 60721-3) extended to -10 °C to +50 °C
			Transport	2K4 (IEC 60721-3) -40 °C to +70 °C
			Operating	7K2 (IEC 60721-3) extended to -10 °C to +50 °C
	Mechanical		Storage	1M3 (IEC 60721-3)
			Transport	2M3 (IEC 60721-3)
			Operating	7M3 (IEC 60721-3)
	Ingress protection		IP 52 (antenna connected)	
	EMC	EU	Complies with EMC Directive 2014/30/EU and IEC/EN 61326 -1: 2013	
		Immunity	IEC/EN: 61000-4-2, 61000-4-3, 61000-4-4, 61000-4-5, 61000-4-6, 61000-4-8, 61000-4-11	
		Emission	IEC/EN: 61000-3-2, 61000-3-3, IEC/EN 55011 (CISPR 11) Class B	
	Safety		Complies with European Low Voltage Directive 2014/35/EU and IEC/EN 61010-1: 2010	
	Material		Complies with European RoHS Directive 2011/65/EU	
Air humidity (operating range)			< 29 g/m³ (< 93 % RH at +30 °C), non-condensing	
Weight			400 g	
Dimensions			450 mm length; 120 mm antenna head diameter	
Calibration			21 reference points: 420 MHz, 600 MHz, 750 MHz; 900 MHz (1; 1.2; 1.4; 1.6; 1.8; 2; 2.2; 2.45; 2.7; 3; 3.5; 4; 4.5; 5; 5.5; 5.8; 6) GHz The SRM basic unit applies linear interpolation between reference points	
Recommended calibration interval			24 months	
Country of origin			Germany	