150202



T.C

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROMANYETİK RADYASYONUN ÇEVRE ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

150202

Güray YÜKSEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Prof.Dr. Anatoly DIMOGLU

GEBZE

2004

Güray Yüksel .....'ın tez çalışması, GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..07.06./2004.. tarih ve 2004/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından .....Gemi.....Mühendisliği..... Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE :
(Tez Danışmanı) Prof. Dr. Anatoly Dimarogonas

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Bulat Rameev

ÜYE : Prof Dr. Mehmet Karpuzcu

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 06../07../2004 tarih ve 2004/ 23.... sayılı kararı.

Müdür

Yrd. Doç. Dr. Ahmet GAPOĞLU
GYTE Mühendislik ve Fen Bil.
Enstitüsü Müdür Yardımcısı

ÖZET

20. yüzyılda hızla gelişen teknolojiden haberleşme en büyük payı almış ve insanoğlunu yeni teknolojiler ile tanıştırmıştır. Kullanıcıya hareket özgürlüğü sağlayan GSM bu süreç içinde tasarlanmış, hayatımıza cep telefonunu sokarak ayrılmaz bir parçamız haline getirmiştir. GSM beklenenin aksine çok büyük gelişme göstererek en büyük pazarlardan biri konumuna gelmiştir. Üreticiler bu pazarı çok iyi değerlendirerek GSM' i sadece konuşma ile sınırlandırmayarak SMS, Data, MMS ve GPRS üzerine yeni sistemler ve bunları destekleyen telefonlar geliştirmişlerdir. Pek yakında EDGE ve UMTS gibi sistemleri de servise vererek sınırlarını daha da geliştireceklerdir.

Teknolojik gelişim, yenilik ve avantajlar ile birlikte günümüzde yaşanmakta olan kirlilik çeşitlerine ek olarak elektromanyetik kirliliği de beraberinde getirmiştir. Son yıllarda radyo kaynaklarının yoğun bir biçimde kullanılması ve özellikle cep telefonunun hayatımıza girmesi ile birlikte bu konuda gündemdeki yerini almış ve geniş tartışmaları başlatmıştır. Elektromanyetik (EM) enerjinin kullanımının yaygınlaşması ve EM alan üreten sistemlerin artması ile birlikte doğal çevre ve burada bulunan insan, hayvan ve bitkiler yoğun bir şekilde elektromanyetik dalgalara maruz kalmaktadırlar. EM enerjileri yaşam standartlarımızı yükseltmek için yoğun bir şekilde kullandığımız, hatta buna bağımlı duruma geldiğimiz ve kullanımının gelecekte daha da artış göstereceği göz önüne alındığında konunun önemi daha da artmaktadır.

Elektromanyetik alanların insan sağlığına etkileri konusunda birçok ülkede standart ve sınır değerler belirlenmiştir. Ülkemizde ilk olarak TSE, Nisan 1996'da bir standart yayımlanmıştır. Ülkemizde halen yürürlükte olan TK (Telekomünikasyon Kurumu) yönetmeliği ile sınır değerler belirlenmiş ve uygulamaya konulmuş olup takibi de aynı kurum tarafından yapılmaktadır. Fakat şu an gelinen durum itibari ile araştırmaların ve tartışmaların bir süre daha devam edeceği görülmektedir.

Tez kapsamında değişik karakteristikteki GSM ve TV istasyonlarından ölçümler alınmıştır. Teoride olması gereken değerler ile ölçülen değerler karşılaştırılarak değişkenler arasında ilişkiler kurulmuş ve istatistik programlar yardımı ile formülüze edilmiştir. Ayrıca mevcut konfigürasyonlar için güvenlik mesafeleri hesaplanmıştır.

SUMMARY

In the 20. century, communication is became important into the development of technology and start to teach the new technologies to the humanbeings. GSM, that ensures the freely movement to people, is designed in this period and the self-phone started to get into our lifes. GSM show unexpected growth and become one of the major markets. Manufacturers utilize this market and develop not only calls but also SMS, Data, MMS and new systems onto GPRS and cell-phones that support them. GSM will become wider by serving EDGE and UMTS systems soon.

Rather that the innovation and advantages, technological development bring the electromagnetic pollution to our lifes. After starting intensively usage of radio source and self-phones, this subject takes its major part into the discussions. Environment, people living in this environment, animals and plant are exposed to electromagnetic radiation due to the increase of usage of Electromagnetic (EM) energy and systems that create EM area. Humanbeings become dependant EM energy and usage of it will increase in the future. That becomes very important when intensive usage of EM energy to increase the life standart is considering.

In many countries, standarts and specifications are established for the effects of electromagnetic areas to human health. In our country, TSE has published these standarts in April 1996. With the telecommunication councils' regulation, which is still in force, limitations are established and followed by this council. It is seen that researches and discussions will continue for a while.

In the scope of this thesis, measurements were done from different GSM and TV stations. By comparing measured data and theoritical values, variables are related with other variables and formulized with the help of statistical program. Besides, security distances are calculated for existing configurations.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında ilgi ve desteğini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Anatoly DIMOGLU'na,

Çevre Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Mehmet KARPUZCU şahsında tüm hocalarım ve arkadaşlarıma,

Yüksek Lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca destekleyen sevgili eşime teşekkürlerimi sunuyorum.

Saygılarımla...

Güray YÜKSEL

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLOLAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. EM IŞIMA VE GSM SİSTEMİNİN ETKİLERİ	3
2.1 Elektromanyetik Alanlar	3
2.2 Elektromanyetik Kirlilik	7
3. GSM (GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATIONS)	12
3.1. GSM Sisteminin Gelişimi	12
3.2 GSM Sistem Modeli	13
3.2.1 Mobil İstasyon Terminali (MS-Mobile Satation)	15
3.2.2 Abone Kimlik Modülü (SIM-Subscriber Identity Module)	15
3.2.3 Baz Alıcı–Verici İstasyonu (BTS- Base Transceiver Station)	16
3.2.4 Baz İstasyon Denetleyicisi (BSC-Base Station Controller)	16
3.2.5 Mobil Servisler Anahtarlama Merkezi (MSC-Mobile Services Switching Center)	16
3.2.6 Geçit Mobil Servisler Anahtarlama Merkezi (GMSC-Gateway Mobile Services Switching Center)	17
3.2.7 Dahili Yer Kaydedici (HLR-Home Location Register)	17
3.2.8 Ziyaretçi Yer Kaydedicisi (VLR-Visitor Location Register)	17
3.2.9 Doğrulama Merkezi (AUC-Authentication Center)	18
3.3 GSM Sistem Yapısı	18
3.4 GSM' de Trafik Durumları	20
3.4.1 Mantıksal Kanallar	21
3.4.2 MS'den Aranma	22

3.4.3 MS' i Arama 23
3.5 Kısa Mesaj Servisi 24
3.6 Handover (Aktarma) 26
3.7 Kanal Kavramı 27
3.8 Radyo Şebeke Özellikleri 28
3.8.1 Dinamik MS&BTS Güç Kontrolü 28
3.8.2 DTX (Discontinuous Transmission - Sürekli olmayan iletim) 29
3.9 Sistem Dengesi 29
3.10 ERP (Effective Radiated Power) 33
3.11 GSM Baz İstasyonlarının Anten Tipleri 33
3.12 GSM'in Geleceği 35
4. ÖLÇÜM METOTLARI 37
4.1. Alan Şiddeti Ölçümleri 37
4.2. Geniş Bant Ölçümleri 38
4.3. Dar bant ölçümleri 38
4.4. Ölçüm cihazları 39
4.4.1. Ölçüm cihazlarının çeşitleri 39
4.4.2. Genel şartlar 41
4.4.3. Elektriksel çalışma karakteristikleri 42
4.4.4. Ölçüm cihazlarının seçimi 42
4.4.5. Yerinde yapılan ölçümler 43
4.5. Cep telefonu ölçümleri 43
4.6. SAR ve Dozimetre 45
4.7. Güvenlik Mesafesi Hesaplanması 47
4.7.1 Yer seviyesindeki maruziyet 50
4.7.2. Yakındaki bir binadan maruziyet 51
4.8. BTS ve Anten Tiplerine Göre Oluşturulabilecek Konfigürasyonlara Ait Güvenlik Mesafeleri 52
4.9. Standartlar ve Limitler 55
5. ELEKTROMANYETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ VE YORUMLAR 59
5.1. GSM İstasyonunun Kapsama Analizi 59
5.1.1. GSM Hücrelerinin Kapsama Analizi 60
5.1.2. GSM İstasyonunun DL ve UL Sinyal Seviyesi İncelemesi 61
5.2. GSM İstasyonunun Bina İçi ve Dışı Ölçüm Sonuçları 64

5.3. GSM Hücresi için Alınan 1 Günlük Ölçüm İncelemesi 66
5.4. TV İstasyonu Elektrik ve Manyetik Alan İncelemesi 67
5.5. GSM Ölçüm Sonuçlarının Analizi 69
5.5.1 Kazancı 5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 74
5.5.2 Kazancı 9 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 76
5.5.3 Kazancı 10 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 78
5.5.4 Kazancı 12,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 80
5.5.5 Kazancı 13 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 83
5.5.6 Kazancı 15,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 86
5.5.7 Kazancı 16 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 100
5.5.8 Kazancı 16,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 102
5.5.9 Kazancı 17,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 103
5.5.10 Kazancı 18,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi 104
6. SONUÇLAR 107
KAYNAKLAR 110
ÖZGEÇMİŞ 115

KISALTMALAR DİZİNİ

AGCH – Access Grant Channel – Erişim Verme Kanalı

ANSI – American National Standards Institute – Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü

AUC – Authentication Center – Doğrulama Merkezi

BCCH – Broadcast Control Channel – Yayın Kontrol Kanalı

BSC – Base Station Controler – Baz İstasyon Denetleyicisi

BSIC – Base Station Identity Code – Baz İstasyon Kimlik Kodu

BSS – Base Station System – Baz İstasyon Sistemi

BTS – Base Transceiver Station – Baz Alıcı/Verici İstasyonu

CE – Conformity Europa

CGI – Cell Global Identity – Hücre Küresel Kimliği

DTX – Discontinuous Transmission - Sürekli olmayan iletim

EC – European Council

EDGE – Enhanced Data GSM Environment

EIR – Equipment Identity Register – Cihaz Kimlik Kaydedicisi

EM – Elektromanyetik

ERP – Effective Radiated Power

ETSI – European Telecommunications Standart Institute – Avrupa Haberleşme Standardı Enstitüsü

FACCH – Fast Associated Control Channel – Hızlı Birleştirilmiş Kontrol Kanalı

FCC – Federal Communications Commission-Federal Haberleşme Komisyonu

FCCH – Frequency Correction Channel – Frekans Düzeltme Kanalı

GMSC – Gateway MSC – Geçit MSC

GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying – Gauss Minimum Kaydırmalı Anahtarlama

GPRS – General Packet Radio Service – Genel Amaçlı Radyo Paket Hizmeti

GSM – Global System for Mobile Communications – Küresel Mobil İletişim Sistemi

HLR – Home Location Register – Dahili Yer Kaydedicisi

HO – Handover – Aktarma

HSCSD – High Speed Circuit Switch Data

IMEI – International Mobile Equipment Identity – Uluslararası Mobil Cihaz Kimliği

IMSI – International Mobile Subscriber Identity – Uluslararası Mobil Abone Numarası

IRPA – The International Radiation Protection Association – Uluslararası Radyasyondan Korunma Derneği

ITU – Internatioal Telecommunications Union - Uluslararası Haberleşme Birliği

LA – Location Area – Yerleşim Bölgesi

LAI – Location Area Identity – Yerleşim Bölgesi Kimliği

MCC – Mobile Country Code – Mobil Ülke Kodu

MNC – Mobile Network Code – Mobil Şebeke Kodu

MOC – Mobile Originated Call – Mobil Çıkışlı Arama

MS – Mobile Station – Mobil İstasyon

MSC – Mobile Services Switching Center – Mobil Hizmetler Bağlaşma Merkezi

MSISDN – Mobile Station ISDN Number – Mobil İstasyon ISDN Numarası

MTC – Mobile Terminated Call – Mobil Sonlandırmalı Arama

Network – Akıllı Şebeke

NMT – Nordic Mobile Telephone

OMC – Operation and Maintenance Center – İşletme ve Bakım Merkezi

OSI – Open System Interconnect – Birbirine Bağlı Açık Sistem

PCH – Paging Channel – Çağırma Kanalı

PIN – Personal Identification Number – Kişisel Kimliklendirme Numarası

PLMN – Public Land Mobile Network – Yerel Alan Mobil Şebekesi

PSTN – Public Switch Telephone Network – Yerel Bağalşmalı Telefon Şebekesi

PUK – Personal Unblocking Key – Kişisel Blok Çözme Anahtarı

RACH – Random Access Channel – Rastgele Erişimli Kanal

RF – Radyo Frekans

SACCH – Slow Associated Control Channel – Yavaş Birleştirilmiş Kontrol Kanalı

SAR– Spesific Absorbtion Rate

SCH – Synchronisation Channel – Senkronizasyon Kanalı

SDCCH – Stand Alone Dedicated Control Channel – Tek Başına Tahsis Edilmiş Kontrol Kanalı

SIM – Subscriber Identity Module – Abone Kimlik Modülü

SMS – Short Message Service

SS – Switching System – Bağlaşma Sistemi

TCH – Traffic Channel – Trafik Kanalı

TDMA – Time Division Multiple Access – Zaman Bölmeli Çoklu Erişim

TMSI – Temporary Mobile Subscriber Identity – Geçici Mobil Abone Kimliği

TRX – Transceiver – Alıcı/Verici

TS – Time Slot – Zaman Dilimi

UMTS – Universal Mobile Telecommunication Service – Evrensel Mobil Haberleşme Hizmeti

VLR – Visitor Location Register – Ziyaretçi Yer Kaydedicisi

WAP – Wireless Access Protocol

WB-CDMA – Wideband CDMA – Geniş Bant CDMA

WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access

WHO – World Health Organization

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1 EM dalgasının yayılımı	5
2.2 EM Spektrum	7
3.1. GSM Sistem Modeli	14
3.2 Mobil Ünitelerin Sınıflarına göre Güç Çıkışları	15
3.3 Hücre yapısı	19
3.4 GSM sisteminde farklı hücre yapıları	19
3.5 MSC/VLR Servis Alanı	20
3.6 GSM' deki alanlar arası ilişki	20
3.7 GSM sistemlerinde arama ve aranma senaryosu	21
3.8 Mantıksal kanallar	22
3.9 MS' in PSTN' e arama kurulumu	22
3.10 PSTN' den MS' i arama	23
3.11 Mobil sonlandırmalı kısa mesaj	25
3.12 - Mobil çıkışlı kısa mesaj	25
3.13 BTS' ler arası aktarma	27
3.14 TDMA kanal kavramı	27
3.15 TS Kullanımı	28
3.16 Ssitem Dengesinin Şematik Gösterimi	31
3.17 Anten Özellikleri	34
3.18 Anten Resimleri	35
3.19 Mobil Multimedya Hizmetleri	35
3.20 GSM&GPRS ve UMTS geçiş şeması	36
4.1. Wandel-Goltermann EMR-300 elektromanyetik alan ölçüm cihazı	40
4.2. Ölçüm sonuçlarının ölçüm cihazından bilgisayara aktarılması	40
4.3 Belirli bir yükseklikteki antene yerdeki bir insanın maruziyeti	50
4.4 Yakın bir binadaki maruziyet	51
5.1. GSM istasyonunun kapsama haritası	59
5.2. GSM hücrelerinin ayrı ayrı kapsama haritası	60
5.3. GSM hücrelerinin ayrı ayrı görüş alanı	60
5.4. 1. Hücre DL Sinyal Seviyesi Dağılımı	61

5.5. 2. Hücre DL Sinyal Seviyesi Dağılımı 61
5.6. 3. Hücre DL Sinyal Seviyesi Dağılımı 62
5.7. 1. Hücre UL Sinyal Seviyesi Dağılımı 62
5.8. 2. Hücre UL Sinyal Seviyesi Dağılımı 62
5.9. 3. Hücre UL Sinyal Seviyesi Dağılımı 63
5.10. 1. Hücre için Sinyal Seviyesi'nin Uzaklığa göre Dağılımı 63
5.11. 2. Hücre için Sinyal Seviyesi'nin Uzaklığa göre Dağılımı 63
5.12. 3. Hücre için Sinyal Seviyesi'nin Uzaklığa göre Dağılımı 64
5.13. 1. Hücre için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 65
5.14. 2. Hücre için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 66
5.15. 3. Hücre için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 66
5.16. Saate göre Elektrik Alan Şiddeti Değeri Değişimi 67
5.17. TV istasyonları için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 68
5.18. 1. TV İstasyonu Uzaklığa göre Sektörel Elektrik Alan Şiddeti Dağılımı 69
5.19. 2. TV İstasyonu Uzaklığa göre Sektörel Elektrik Alan Şiddeti Dağılımı 69
5.20. Ölçülen ve Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti Değişimi 70
5.21. Ölçülen ve Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti Değişimi 70
5.22. Uzaklığa göre Elektrik Alan Şiddeti Değişimi 71
5.23. Uzaklığa göre Manyetik Alan Şiddeti Değişimi 71
5.24. Tüm verilerden elde edilen Elektrik Alan ve Uzaklık Analizi 71
5.25. Tüm verilerden elde edilen Manyetik Alan ve Uzaklık Analizi 72
5.26. Tüm Verilerden Elektrik alan Şiddetinin Değişkenlerinin Analizi 73
5.27. Tüm verilerden Manyetik Alan Şiddetinin Değişkenlerinin Analizi 74
5.28. 5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 75
5.29 5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 75
5.30. 9 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 77
5.31. 9 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 77
5.32. 9 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi 78
5.33. 10 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 79
5.34. 10 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 79
5.35. 12,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 81
5.36. 12,5 dBi için Uzaklık ve Güç Değişkenleri Bloğu 82
5.37. 12,5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 82
5.38. 12,5 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi 83

5.39. 13 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 84
5.40. 13 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 84
5.41. 13 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi 85
5.42. 15,5 dBi için Uzaklık ve Güç Değişkenleri Bloğu 94
5.43. 15,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 94
5.44. 15,5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 95
5.45. 15,5 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi 95
5.46. 15,5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 96
5.47. 15,5 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi 97
5.48. 15,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 97
5.49. Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 98
5.50. 15,5 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi 98
5.51. 15,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 99
5.52. 15,5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 99
5.53. 15,59 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi 100
5.54. 16 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 101
5.55. 16 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 101
5.56. 16,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 103
5.57 17,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 104
5.58. 18 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri 105
5.59. 18 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi 105
5.60. 18 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi 106

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
3.1 TURKCELL, TELSIM, ARIA ve AYCELL' in ağ adı, tipi ve kodu	12
3.2 GSM şebekeleri için sistem standartları	13
4.1 Değişik marka ve model cep telefonlarına ait E-alan ölçümleri	45
4.2. 10 GHz' e kadar değişik frekans aralıkları için genel ve mesleki maruziyet	47
4.3 Çıkış gücü düşürülme katsayısı	52
4.4 Besleme kablosu kaybı	52
4.5. BTS ve anten tiplerine göre güvenlik mesafesi hesaplanması	53
4.6. Kontrolsüz etkilenme için sınır değerler	56
4.6. IRPA tarafından belirlenen mesleki ve genel halk sağlığı etkilenme sınırları	56
4.7 Türkiye için belirlenen sınır değerler	57
4.8 Türkiye için belirlenen sınır değerler	57
4.9. Kontrollü etkilenme için sınır değerler	58
5.1. Bina dışı ölçüm sonuçları.	64
5.2. Bina içi ölçüm sonuçları.	65
5.3. TV istasyonları ölçüm sonuçları	68
5.5. 5 dBi Kazançlı Anten Verileri	75
5.6. 9 dBi Kazançlı Anten Verileri	76
5.7. 10 dBi Kazançlı Anten Verileri	78
5.8. 12,5 dBi Kazançlı Anten Verileri	80
5.9. 13 dBi Kazançlı Anten Verileri	83
5.10. 15,5 dBi Kazançlı Anten Verileri	86
5.11. 16 dBi Kazançlı Anten Verileri	100
5.12. 16,5 dBi Kazançlı Anten Verileri	102
5.13. 17,5 dBi Kazançlı Anten Verileri	103
5.14. 18 dBi Kazançlı Anten Verileri	104

1. GİRİŞ

İnsanoğlu haberleşmede çok hızlı bir yol almış, yüzyılın son çeyreğinde TV, radyo, internet ve GSM teknolojisi ile birlikte dünya üzerindeki sınırlar kalkmış ve iletişim sınır tanımaz bir boyuta ulaşmıştır. Özellikle GSM (Global System for mobile Communications) teknolojisi bu hizmetlerin mobil ve kesintisiz alınma isteği ile birlikte beklenenin aksine çok hızlı bir şekilde büyümüştür.

GSM sistemi konuşmanın dışında SMS (Short Message Service) ve data hizmetlerinin verilmesi ile birlikte GPRS ve MMS ile tanışmamızı da sağlamıştır. Böylece GSM servisinin bulunduğu her yerden GPRS üzerinden internete ulaşım sağlanmış ve data iletişimi de mobil ortama taşınmıştır. Günümüzde insanlar GSM kapsamasının bulunduğu her yerden konuşabilmekte, mesajlaşabilmekte, ve data iletimi sayesinde birbirlerine resimli mesajlar, müzik ve video görüntüleri gönderebilmekte ve bulundukları yerden şirket veya özel e-mail' lerini kontrol edebilmektedirler. Cep telefonu üreticilerinin yoğun çalışmaları ile birlikte cep telefonları artık bilgisayarlara rakipsiz olmadıklarını hissettirmektedirler.

GSM sistemi ile birlikte WAP (Wireless Access Protocol), HSCSD (High Speed Circuit Switch Data) ve GPRS (General Packet Radio Services) sistemleri ve servisleri geliştirilmektedir. Data iletiminde sınırların ve hızın arttırılma isteği insanları WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), EDGE (Enhanced Data GSM Environment) ve UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) gibi sistemlerin geliştirilmesine ve kullanımına yönlendirmiştir. Bu sitemler daha çok gelişmiş ülkelerde denemekle birlikte GSM sistemi tüm dünya üzerinde hızla yayılmaya devam etmektedir.

Fakat kullanılan ve geliştirilen tüm bu teknolojilerle birlikte insanoğlu bazı sorulara da cevap aramak durumunda kalmıştır. Endüstrileşme ve teknolojinin gelişimi ile birlikte elektromanyetik dalgalar, birçok doğal ve insan yapımı kaynaklar tarafından yayılmakta ve hayatımızda önemli bir rol oynamaktadır. Elektromanyetik (EM) enerjinin kullanımının yaygınlaşması ve EM alan üreten sistemlerin artması ile birlikte doğal çevre ve burada bulunan insan, hayvan ve bitkiler yoğun bir şekilde elektromanyetik dalgalara maruz kalmaktadırlar. EM enerjileri yaşam standartlarımızı yükseltmek için yoğun bir şekilde kullandığımız, hatta buna bağımlı duruma geldiğimiz ve kullanımının gelecekte daha da artış göstereceği göz önüne alındığında konunun önemi daha da artmaktadır.

İkinci bölümünde EM kirlilikten, yapılan araştırmalardan, konu ile ilgili tanımlardan bahsedilecektir. Üçüncü bölümde GSM sistemleri, çalışma prensipleri hakkında ayrıntılı bilgiler verilecektir. Dördüncü kısımda ölçüm ve hesaplama yöntemleri ile birlikte standart ve limit değerler verilecektir. Beşinci bölümde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler incelenecek çıkarım ve yorumlar yapılacaktır. Son bölümde ise çalışma kapsamında ele alınan konularla ilgili olarak genel değerlendirmeler yapılacaktır.

2. EM IŞIMA ve GSM SİSTEMİNİN ETKİLERİ

Teknolojik gelişim, yenilik ve avantajlar ile birlikte günümüzde yaşanmakta olan kirlilik çeşitlerine ek olarak elektromanyetik kirliliği de beraberinde getirmiştir. Son yıllarda radyo kaynaklarının yoğun bir biçimde kullanılması ve özellikle cep telefonunun hayatımıza girmesi ile birlikte bu konuda gündemdeki yerini almış ve geniş tartışmaları başlatmıştır. Cep telefonları ve baz istasyonlarının insan sağlığı üzerine etkileri hakkında yapılan araştırmalar özellikle son yıllarda yoğun bir şekilde devam etmektedir. Fakat şu an edinilen bilgiler itibari ile araştırmaların ve tartışmaların bir süre daha devam edeceği görülmektedir.

2.1 Elektromanyetik Alanlar

Elektromanyetik alanlar, bir fiziksel büyüklüğün zamana bağlı olarak uzaysal dağılımıdır. Alanlar, vektörel ve skaler olmak üzere ikiye ayrılır. Bir vektör alanının büyülük ve yönü uzay ve zaman bağlı olarak tanımlanır. Buna karşılık skaler alan, uzayın herhangi bir noktasında ve herhangi bir andaki büyüklüğü ile tanımlanabilir.

Fiziksel alanlar genellikle üç boyutlu alanlardır. Atmosferdeki basınç dağılımda olduğu gibi, üç uzay değişkenine bağlı olduğundan üç boyutlu alanlardır.

Elektrik yükü, uzunluk ve zaman gibi temel bir büyüklüktür. Yani diğer büyüklükler cinsinden tanımlanamaz. Yükler durağan veya hareketli olsun, diğer yükler üzerine kuvvet uygularlar. Bu kuvvetlerin oluşturduğu alanlara elektromanyetik alanlar denir.

Maddenin yapıtaşı olan atomlar, protonlar, nötronlar ve elektronlardan oluşur. Proton ve nötron, atomun çekirdeğini oluşturur ve nükleer olaylar dışında hareket etmezler. Proton ve nötronlardan farklı olarak elektronlar, birbirleriyle ve

çevreleriyle etkileşen parçacıklardır. Elektron, negatif yüklüdür. Pozitif yüklü protonla arasında bir çekim kuvveti bulunur. Zıt yükler birbirini çeker ve aynı cins yüklerse birbirlerini iterler. Hareketsiz bir elektron yalnızca elektrik alan oluşturur. Eğer elektron sabit hızla gidiyorsa, elektrik alanına ek olarak manyetik alanda oluşturur. Örnek olarak içinden sabit bir akım geçen tel manyetik alan oluşturur. Manyetik alan yükleri bir nokta çevresinde dönmeye zorlar. Elektron, sabit olmayan, hızlanıp yavaşlayan bir hareket yapıyorsa elektrik ve manyetik alana ek olarak, elektromanyetik dalga yaymaya başlar. Elektromanyetik dalga, elektrik ve manyetik alanın ilerleyen biçimidir. Işınım, enerjinin bir ortamda dalga veya tanecik halinde yayılması olarak tanımlanır. Elektromanyetik (EM) ışınım ise elektromanyetik dalganın herhangi bir ortamda yayılmasıdır. Haberleşmede, sınırsız bir ortamda kullanılan dalgalar genelde enine dalga şeklindedir. EM dalgasında E, H alan bileşenleri yayılma doğrultusunda dik bir düzlemde bulunurlar. Bu enine düzlemde E ve H bileşenleri birbirlerine dik olarak değişirler.

Bir alternatif işaretin birim zamanda tekrar sayısına o işaretin frekansı denir. Tekrarlanan işaretin bir tekrardaki süresine işaretin periyodu denir. Bir alternatif işaretin birim zamandaki tekrar sayısına o işaretin frekansı denir. Birimi Hz' dir. Hz' in bir milyon katı MHz, bir milyar katı da GHZ' dir. Bir işaretin frekansı ile periyodu ters orantılıdır.

$$f = 1 / T \quad [\text{Hz}] \tag{2.1}$$

Bir periyot boyunca EM dalganın almış olduğu yola o dalganın veya işaretin dalga boyu denir.

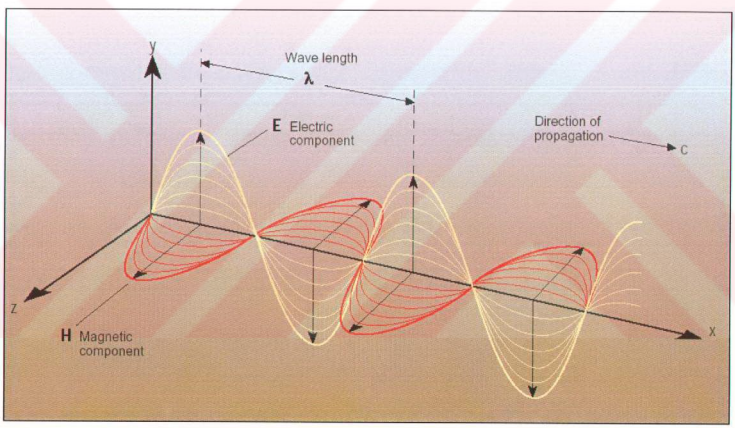
$$\lambda = c.T = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \tag{2.2}$$

TEM dalgasının yayılım hızı (enerji taşıma hızı) v ;

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (2.3)$$

şeklindedir. Burada ε_r ortamın di elektrik katsayısını c ise ışık hızını göstermektedir. Boşlukta ve havada $(\varepsilon_r \cong 1)$ $v \cong c = 3.10^8$ m/sn' dir.

EM dalganın yayılması Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1 EM dalgasının yayılımı

Enerji akışı, dalga yayılması veya parçacık akışı şeklinde karşımıza çıkar. Bu da elektromanyetik dalganın " dalga - parçacık " ikili davranışı olarak bilinir. Işınım enerjisini Joule cinsinden

$$W = h\,f \qquad (2.4)$$

bağıntısı ile verebiliriz. Burada h; planck sabitidir. ($h = 6{,}626.10^{-34}$ J.s) ve f hertz cinsinden frekanstır.

Elektron-Volt (eV) cinsinden ışınım enerjisi ise

$$W = 4{,}14125 .10^{-15} \; f \quad [\text{eV}] \qquad (2.5)$$

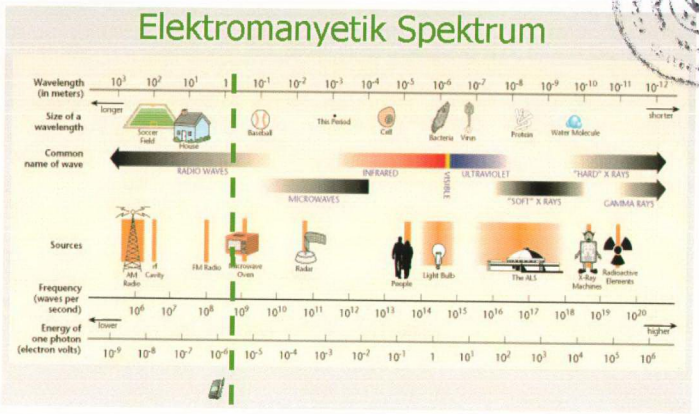
şeklinde verilebilir. ($1 \text{ eV} = 1{,}6 .10^{-19}$ J)

İyonlaşma, elektronun çekirdekten koparılarak serbest hale gelmesidir. En basit atom olan hidrojen atomunda iyonlaşma enerjisi 13,6 eV' dur. İyonlaştırma moleküler yapıda değişime neden olur. Bu değişme biyolojik dokuda, DNA' nın yapısında genetik yapıda bozulmalara neden olur. Yüksek enerjili parçacık biyolojik molekülü iyonlaştırıp biyolojik yapıya zarar verebilir. 10 eV' luk bir enerjiden daha büyük enerjiye sahip parçacık biyolojik molekülü iyonlaştırıp, biyolojik bozulmalara neden olabilir.

EM alan ışıması aynı zamanda "iyonize yapmayan" ışınıma olarak da bilinir. Çünkü EM dalga, maddeleri iyonize yapacak kadar enerjiye sahip değildir. Maddeleri iyonize edecek kadar enerjisi olmayan bütün elektromanyetik alan ve ışınıma iyonize yapmayan ışınım denir. İyonize yapmayan ışınımda (IRPA / ICNIRP' nın tanımında), her foton 12 eV 'dan daha az enerjiye, 100 nm' den daha uzun dalga boyuna ve frekansı 300 THz' den daha düşük frekansa sahiptir. Denklem 2.4' den iyonize yapmayan EM dalganın frekansı

$f \leq 2{,}8968.10^{15}$ Hz olarak elde edilir.

İyonize yapan ışınım frekansı ise $2{,}89.10^{15}$ Hz' den başlamaktadır. Bu da X ve Gama ışınları tayfını içermektedir. (Prof. Dr. Hasan Dinçer, Elektromanyetik Işınımların İnsan Sağlığına Etkisi)



Şekil 2.2 EM Spektrum

2.2 Elektromanyetik Kirlilik

EM kirlilik yaşadığımız alanlarda bulunan ve günlük hayatta kullandığımız birçok unsur tarafından oluşturulmaktadır. Güneş doğal bir EM kaynağı olmakla birlikte, elektrik akımı taşıyan yer altı ve yerüstü elektrik hatları, TV ve bilgisayarlar, elektrikli ev aletleri (saç kurutma makinası, elektrikli süpürge, çamaşır makinesi, mikrodalga fırın vb.), telsiz haberleşme sistemleri, radyo ve TV vericileri ve hücresel telefon sistemleri (GSM Baz istasyonları ve GSM telefon cihazları) başlıca EM kirlilik unsurlarıdır.

TV&FM yayıncılığında stüdyoda üretilen resim ve ses sinyallerinin televizyon alıcılarına ulaştırılması amacıyla çeşitli ortam ve sistemler kullanılmaktadır. Kullanılan ortam ve sistemlerden en yaygın olanı karasal televizyon yayıncılığıdır. Karasal yayıncılıkta yayın izleyicilere televizyon vericileri ve aktarıcıları üzerinden ulaştırılır. Bu sistemlerde mantık yayının uplinkten uyduya gönderilmesi, çeşitli yerlerde kurulu olan verici istasyonlarında çanak anten ve receiver yardımıyla

yayının tekrar alınarak vericide çeşitli kademelerde işlenmesi ve tekrar TV&FM anten sistemleri yardımıyla ilgili bölgeye yayınlanmasıdır. Bu sistemlerde verici güçleri 40 KW' lara kadar çıkabilmektedir.

Elektromanyetik enerjinin kullanımının yaygınlaşması ve EM alan üreten sistemlerin artması ile birlikte doğal çevre ve burada bulunan insan, hayvan ve bitkiler yoğun bir şekilde elektromanyetik dalgalara maruz kalmaktadırlar. EM enerjileri yaşam standartlarımızı yükseltmek için yoğun bir şekilde kullandığımız, hatta buna bağımlı duruma geldiğimiz ve kullanımının gelecekte daha da artış göstereceği göz önüne alındığında konunun önemi daha da artmaktadır.

Avrupa Birliği EMC çalışmalarını 1992 yılında başlatmış ve 4 yıllık geçiş sürecinden sonra zorunlu standart haline getirmiştir. Bu noktadan sonra AB pazarına girecek her şey CE (Conformity Europa) damgasını taşımak, taşırken de bu damganın zorunlu kıldığı bütün koşulları sağlamak zorundadır. Bu konuda ;

ANSI = Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
ICNIRP = Uluslararası İyonize Olmayan radyasyondan Korunma Komitesi
NCRP = Radyasyondan Korunma ve Ölçme Konseyi,

çalışmaları ile üretilen temel limitler kullanılmaktadır.

Bu çalışmalarda RF (Radyo Frekans) standartları düzlem dalga güç yoğunluğu cinsinden ifade edilir ve miliwatt/cm² (mW/cm²) ölçü birimi kullanılır.

RF elektromanyetik sinyallerinin canlı dokuda yaratacağı etkiler özel soğurulma oranı SAR (Spesific Absorbtion Rate), dokularda yutulan ve ısıya dönüşen güç değeri olarak tanımlanır. SAR ile ilgili temel limit değerler " İnsanda ortalama vücut sıcaklığını 1 C° arttıracak EM enerji soğurulmasının zararlı olduğu " varsayımı ile belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu ortalama kan dolaşımında 4

W/kg. değeri bulunmuştur. Yani kg. başına dokuların yutabileceği en yüksek EM güç 4 W' tır.

EM alanlarda çalışılan işyerleri için : 0,4 W / kg SAR.
Diğer yerler için : 0,08 W / kg SAR.

Ancak şu ana kadar canlı insan üzerinde SAR ölçümü gerçekleştirilememiştir. Zira canlı dokuda yutulan SAR değerinin, canlı doku içindeki elektrik alan şiddetinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu ölçüm, tıbbi insan dokusuna yakın özellikler taşıyan tuzlu su ve jellerden yapılmış üzerinde veya sayısal teknikler kullanılan bilgisayar simülasyonları ile yapılmaktadır. (EMO GSM Rapor)

Baz istasyonlarının sağlığa zararları konusunda başvurulabilecek en güvenilir kaynaklar, resmi araştırma kurumları tarafından yayınlanan ve yapılan araştırmaların sonuçlarını içeren raporlardır. Bu raporlardan bazılarına göz atacak olursak;

IEEE bünyesinde oluşturulan "IEEE-ABD İnsan ve Radyasyon Komitesi" tarafından hazırlanmıştır. Raporun ortaya koyduğu ana sonuç baz istasyonlarından yayılan RF dalgalarının yoğunluğunun çoğunlukla uluslararası standartların altında olduğu ve insan sağlığına herhangi bir belirgin etkisinin olmadığıdır. IEEE Komisyonu, bu raporun hazırlanmasının nedenini, son yıllarda cep telefonu sistemlerinin hızla yaygınlaşması ve baz istasyon antenlerinin halk sağlığına zararlı olduğu yönünde haklı bir endişenin ortaya çıkması olarak özetlemektedir.

Büyük şehirlerde, genel olarak yoğun televizyon ve radyo yayınlarından dolayı belirli bir miktar EM dalga art alanı bulunmaktadır. Cep telefonu antenlerinden yayılan RF dalgaların bu EM dalga ortamına yaptığı katkı çok büyük olmayıp, genellikle bu art alan değerinden altında kalmaktadır. Bu yüzden, tipik baz istasyon antenleri çevresinde yapılan ölçümler göstermiştir ki, halkın maruz kaldığı RF şiddeti standartlarca tavsiye edilen değerlerin çok altındadır. (IEEE US Activities Board. Human Exposure RF Emission from Cellular BTS Antennas)

IEEE ve ANSI' nin raporları diğer standart sistemlerinin de benzer değerlere sahip olduğunu, normal şartlar için maksimum DDG değerinin 0.41-0.45 (mW/cm2)

arasında, maksimum mesleki sınırın ise 2.75-2.97 (mW/cm2) arasında değiştiğini söylemektedir.

Bu konuda çalışan diğer bir kurum olan NRPB' de raporunda insanların baz istasyonu antenlerine karşı duyduğu hassasiyete değiniyor ve bu konu üzerinde daha çok araştırma yapılması gerektiğini vurguluyor. (NRPB. "Background Information on Mobile Phones")

EM dalgaların en önemli etkileri, daha önce de belirtildiği gibi, termal etkilerdir ve bu etkiler dokuların ısınmasıyla ortaya çıkar. NRPB bu ısınmanın sağlığa zarar vermemesi için belirli standartlar koymuştur. Öncelikle, cep telefonları konuşma esnasında baş tarafına yakın tutulduğu en çok bu bölge radyasyondan etkilenmektedir. Baş bölgesi için emilim limiti, 6 dakikalık bir periyot için 10 gram dokunun emdiği enerji miktarı 0.1 W' tır. Bu miktar, çok uzun süreli EM dalgalara maruz kalma sonucunda, dokularda 1 dereceden daha az bir sıcaklık artışına sebep olur. Baz istasyonu antenlerinden yayılan dalgaların vücuda etkisi daha homojendir, çünkü tüm vücut bu dalgalara maruz kalmaktadır. Tüm vücut için koyulan enerji emilim standardı, 15 dakikalık bir periyot için 1 kg doku başına 0.4 W'dır. (2) Kamunun maruz kaldığı baz istasyon kökenli radyasyon bu değerlerin çok altında bir emilime neden olur. Bu yüzden herhangi bir ısınma etkisi görülmez. NRPB, kendilerinin yaptığı araştırmalarda da bu durumu destekleyen sonuçlara vardıklarını söylemektedir (NRPB. "Background Information on Mobile Phones")

GSM ülkemizde 1994 yılında 2 adet 900 MHz operatörle hizmete başlamış ve günümüzde bunlara 2 adet 1800 MHz bandında hizmet veren operatörde katılmıştır.. bulunmaktadır. Fakat şu günlerde 2 GSM 1800 operatörü birleşerek tek bir operatör olarak servis vermek için entegrasyon çalışmalarına devam etmektedir. TK kurumu operatörlerin uyması gereken standart ve limit değerleri belirlemiş ve operatörlerden bunlara uymaları konusunda son derece titiz davranmalarını istemiştir. Ayrıca çoğu noktada referans olmaya çalışan ülkenin bilimsel araştırma kurumu TÜBİTAK'ta bu konuda açıklamalarda bulunmuştur. Kurum yayınladığı bir el kitapçığı ile kendilerine en çok yöneltilen soruları ve cevapları ve bu konuda bilinmesi gerekenleri yayınlamıştır. Halkımız en çok mobil iletişimin insan sağlığı özellikle kanser riski taşıyıp taşımadığı konularında bilgi sahibi olmayı istemekte ve merak

etmektedir. Kurum tarafından yapılan resmi açıklamada konunun tüm dünyada araştırılmakta olduğunu ve şu ana kadar GSM haberleşme sisteminin özellikle iki önemli parçası olan BTS (Base Transceiver Station – Baz istasyonu) ve MS(Mobile Station-cep telefonu)'in kanser yaptığına ilişkin herhangi bir kanıtın bulunamadığını ancak araştırmaların yoğun şekilde sürdüğünü yine de şu ana kadar elde edilen bazı kesin verilerde ise örneğin cep telefonu kullanımının beyin tümörü riskini arttırmadığının ABD ve Danimarka'da yapılan ayrıntılı çalışmalar ile açıkça ortaya koyduğunu belirtmiştir (Bilten, 2001). Üçüncü bölümde GSM sistemleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilecektir.

3. GSM (GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATIONS)

3.1. GSM Sisteminin Gelişimi

GSM sözcüğü, Türkçe anlamı "Küresel Mobil İletişim Sistemi" anlamına gelen GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATIONS tanımlamasının baş harflerinden oluşmuştur. Son yıllarda telekomünikasyon alanında yapılan yenilikler dünyada farklı standartlarda Mobil telefon sistemlerinin kurulmasına yol açmıştır. NMT (Nordic Mobile Telephone) sistemi bunların ilki olup TACS (Total Access Telephone System) ve AMPS (Advanced Mobile Phone Service) sistemleri de analog sistemlere örnek oluşturmaktadır. 80' li yılların sonlarına doğru sayısal telsiz teknolojisindeki gelişmelerin en ileri ürünü olarak GSM sistemi dizayn edilmiş ve aralarında Türkiye'nin de yer aldığı 18 Avrupa ülkesi 1989 yılında kabul ettikleri ortak anlaşma ile sistemi uygulamaya başlamışlardır. GSM sistemi ile birlikte çok daha iyi konuşma kalitesi (eşit veya mevcut olan analog hücresel teknolojiden daha iyi), düşük terminal, işletim ve hizmet ücretleri, yüksek seviyede güvenlik, uluslararası dolaşım (bir abone dizin numarası altında), düşük güçte çalışan portatif veya mobil terminal desteği ve yeni hizmetlere ve şebekelere uyumluluk özellikleri gelmiştir. Hücresel telekomünikasyon, telekomünikasyon uygulamalarının en hızlı gelişeni ve en çok talep göreni olarak, yeni teknolojilerinde sisteme entegrasyonu ile hızlı bir şekilde yoluna devam etmektedir.

GSM sisteminin Türkiye'deki gelişimine baktığımızda, 2004 yılı itibari ile ülkemizde 2 GSM 900 ve 2 GSM 1800 olmak üzere 4 operatör bulunmaktadır. Bunlar TURKCELL, TELSIM, ARIA ve AYCELL' dir. 2004 yılı başında ARIA ve AYCELL operatörleri birleşerek TT&TIM operatörünü kurmuşlardır. Halen her iki şebekenin entegrasyon çalışmaları devam etmektedir.

Tablo 3.1 – TURKCELL, TELSIM, ARIA ve AYCELL' in ağ adı, tipi ve kodu

Ağ Adı	TURKCELL	TELSIM	ARIA	AYCELL

Ağ Tipi	GSM 900	GSM 900	GSM 1800	GSM 1800
Ağ kodu	286-01	286-02	286-03	286-04

3.2 GSM Sistem Modeli

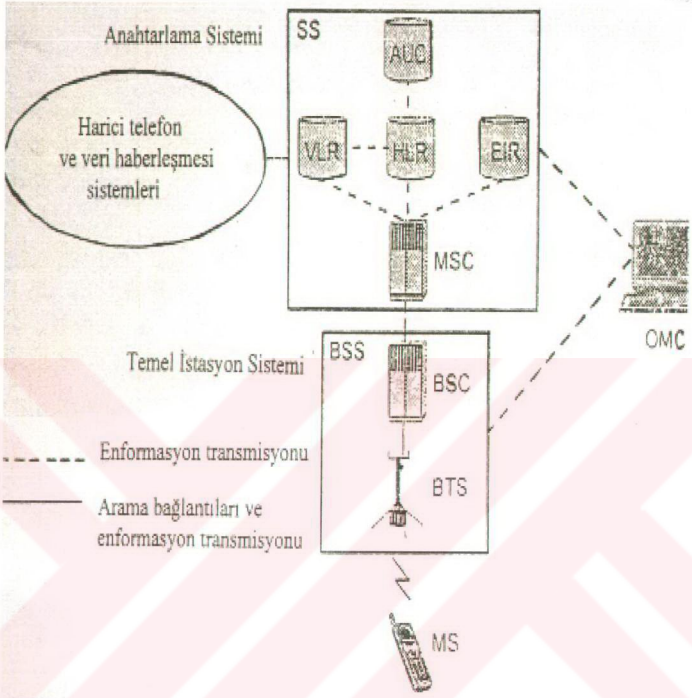
GSM şebekeleri için sistem standartları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 GSM şebekeleri için sistem standartları

Sistem	GSM 900	GSM 1800	GSM 1900
Frekanslar: • Uplink • Downlink	 890-915 MHz 935-960 MHz	 1710-1785 1805-1880	 1850-1910 1930-1990
Dalga boyu	≅ 33cm	≅ 17cm	≅ 16cm
Bant genişliği	25 MHz	75 MHz	60 MHz
Dupleks mesafe	45 MHz	95 MHz	80 MHz
Kanal aralığı	200 kHz	200 kHz	200 kHz
Radyo kanal sayısı	125	375	300
İletim oranı	270 kbit/s	270 kbit/s	270 kbit/s

GSM sistemi temel olarak, baz istasyonları, baz istasyonlarını kontrol eden santraller ile bu elemanları birbirine bağlayan transmisyon hatları ve cep telefonundan oluşmaktadır. Bu sistemlerin birleşmesiyle oluşan şebeke üzerinde, cep telefonlarının baz istasyonlarıyla haberleşmesi radyo (elektromanyetik) dalgaları, diğer birimlerin birbirleriyle iletişimi de Türk Telekom transmisyon hatları ya da Radyo linkler vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. GSM sistem temel olarak, SS – Switching System ve BSS - Base Station System olmak üzere iki bölüme ayrılır. Bunlardan her biri, bütün sistemin fonksiyonlarının gerçekleştirildiği bir takım

fonksiyonel üniteler içerir. Bu fonksiyonel üniteler, değişik donanım gereçleri ile gerçeklenirler.



Şekil 3.1 GSM Sistem Modeli

Anahtarlama Sistemi' nin (SS) içerdiği fonksiyonlar;

- MSC - Mobile Services Switching Center
- VLR - Visitor Location Register
- HLR - Home Location Register
- AUC - Authentication Center
- EIR - Equipment Identity Register

Baz İstasyon Sistemi'nin (BSS) içinde yer alan fonksiyonlar;

- BTS - Base Transceiver Station
- BSC - Base Station Controller

3.2.1 Mobil İstasyon Terminali (MS-Mobile Satation)

Hücresel şebekenin temel unsuru olan cep telefonlarının özellikleri açısından birçok çeşidi mevcuttur. SIM ve mobil cihaz birlikte mobil istasyonu oluştururlar. Yaygın kullanılan cep telefonları 2W'a kadar güç çıkarırlar. Şekil 3.2'de mobil ünitelerin sınıflarına göre güç çıkışları verilmiştir.

Sistem	MS güç sınıfı	Çıkış gücü
GSM 900	2	39dBm (8 W)
GSM 900	3	37 dBm (5 W)
GSM 900	4	33 dBm (2 W)
GSM 900	5	29 dBm (0.8 W)
GSM 1800/1900	1	30 dBm (1 W)
GSM 1800	2	24 dBm (0.25 W)

Şekil 3.2 Mobil Ünitelerin Sınıflarına göre Güç Çıkışları

3.2.2 Abone Kimlik Modülü (SIM-Subscriber Identity Module)

SIM, mobil aboneye bir kimlik tedarik eder. SIM olmadan, acil aramalar hariç, mobil işlevini göremez. SIM, kredi kartı büyüklüğünde, içinde kurulmuş çipi olan plastik bir karttır. 'Smart Card' olarak da adlandırılır. Belirli abone parametreleri SIM kartta yüklüdür. Bunlarla beraber abone tarafından kullanılan kişisel veriler de kişisel telefon numaraları gibi bu kart içindeki çipte mevcuttur. Kartın güvenliği için

şifre konulmuştur. Bu şifre PIN (Personal Identification Number) olarak adlandırılır. PIN kartta yüklüdür ve üç kere yanlış girilirse, kart kendini bloke eder. Bu durumda kart ancak sekiz basamaklı bir şifre ile çözülebilir. Buna da PUK (Personal Unblocking Key) denir ve PUK da kartta yüklüdür.

3.2.3 Baz Alıcı–Verici İstasyonu (BTS- Base Transceiver Station)

Her bir hücre bir grup radyo kanalını işleten Baz Alıcı - Verici istasyonuna (BTS) sahiptir. BTS, mobilin şebekeye arayüzüdür ve BTS' in gücü hücrenin boyutunu belirler.

3.2.4 Baz İstasyon Denetleyicisi (BSC-Base Station Controller)

Baz istasyon denetleyicisinin (BSC) en önemli görevleri arasında güç kontrolü, frekans idaresi ve BTS' lerin kontrolü sayılabilir. BSC donanımı, BTS gibi aynı bölgeye veya kendi başına bir bölgeye yerleştirilebileceği gibi Mobil Servisler Anahtarlama Merkezinin (MSC) bölgesine de yerleştirilebilir. BSC ve BTS, fonksiyonel olarak bir bütündür, buna da Baz İstasyon Sistemi veya Baz İstasyon Alt Sistemi (BSS - Base Station System) adı verilir.

3.2.5 Mobil Servisler Anahtarlama Merkezi (MSC-Mobile Services Switching Center)

Belirli bir sayıda baz istasyon denetleyicisine (BSC) bir Mobil Servisler Anahtarlama Merkezi (MSC) hizmet eder. MSC' ler PSTN, ISDN, PLMN ve birçok özel şebekelerle yapılan karşılıklı görüşmeleri kontrol ederler.

3.2.6 Geçit Mobil Servisler Anahtarlama Merkezi (GMSC-Gateway Mobile Services Switching Center)

GMSC, hücresel ağın PSTN' e arayüzüdür. Eğer sabit ağdaki bir abone herhangi bir GSM abonesini aramak isterse, PSTN aramayı 'gateway' diye adlandırılan giriş yerine bağlar. Gateway, genellikle bir MSC' de gerçeklenir ve bu MSC, GMSC - Gateway MSC olarak adlandırılır. GMSC, herhangi bir MSC olabilir. Şebekenin boyutuna bağlı olarak, bir operatör, sabit şebekeye bir arayüz kullanabilir. Bu da birkaç GMSC veya sadece bir GMSC kullanarak olur.

3.2.7 Dahili Yer Kaydedici (HLR-Home Location Register)

Mobil istasyonun izini takip etmek ve bir takım bilgileri tutmak için kullanılan veri tabanlarından en önemli olanı Dahili Yer Kaydedicisi'dir (HLR). Herhangi bir kişi bir GSM operatöründen abonelik aldığında o operatörün HLR' ında kaydedilir. HLR, ilgili MSC bölgesine ait bütün abonelerin kullanıcı veri ve kimlik bilgilerini saklar. Bunlar, bir kullanıcını Uluslararası Mobil Abone Numarası (IMSI – International Mobile Subscriber Number), doğrulama parametreleri ve abonenin kabul edilen bütünleyici servisleri gibi kalıcı veriler ve bazı geçici verilerdir. SIM' deki geçici veriler şunları içerirler;

- Abonenin o anda bulunduğu VLR
- Eğer abone yönlendirme seçerse gelen aramaların hangi numaraya aktarılacağı
- Güvenlik ve şifreleme için gerekli bazı parametreler

IMSI, SIM kartta kalıcıdır ve GSM sistemde aboneyi tanımlayan önemli enformasyonlardan biridir. IMSI' nin ilk üç basamağı Mobil Ülke Kodunu (MCC - Mobile Country Code), daha sonraki iki basamak Mobil Şebeke Kodunu (MNC - Mobile Network Code) tanımlar. On basamağa kadar olabilen Mobil Abone Kimlik Numarası (MSIC – Mobile Subscriber Identification Number), IMSI' yi tanımlar.

3.2.8 Ziyaretçi Yer Kaydedicisi (VLR-Visitor Location Register)

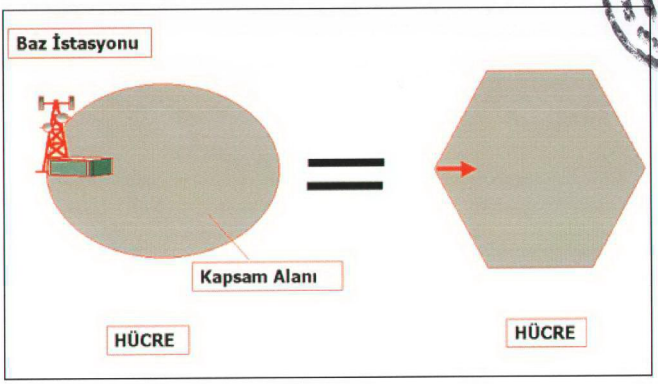
Ziyaretçi Yer Kaydedicisi (VLR), MSC bölgesinde yerleştirilen bütün mobil istasyonlar hakkında bilgi içeren bir veri tabanıdır. Mobil istasyon yeni bir MSC bölgeye girer girmez o MSC' ye bağlı olan VLR, HLR' dan mobil istasyon hakkında bilgi ister ve aldığı bilgileri geçici olarak saklar. Abone verilerini VLR' a (aynı zamanda HLR' a) yerleştirme HLR' daki veri trafiğini azaltır. Böylece her seferinde gerekli olduğunda bu verilerin tekrar istenmesine gerek yoktur. Aşağı yukarı birbirinin aynı olan bu verilerin hem HLR, hem de VLR' a yüklenmesinin diğer sebebi her birinin farklı amaçlara hizmet etmesidir. HLR, PSTN' den bir arama geliyor iken gerekli abone bilgilerini GMSC' ye tedarik etmelidir. VLR, tam zıt bir işlevi yerine getirir, yani bir mobil istasyondan arama geliyor iken gerekli abone bilgilerini ev sahibi GMSC' ye tedarik eder. Sonuçta hem HLR hem de VLR, GSM sisteminde ki haberleşme akışı açısından çok önemli yerlere sahiptirler.

3.2.9 Doğrulama Merkezi (AUC-Authentication Center)

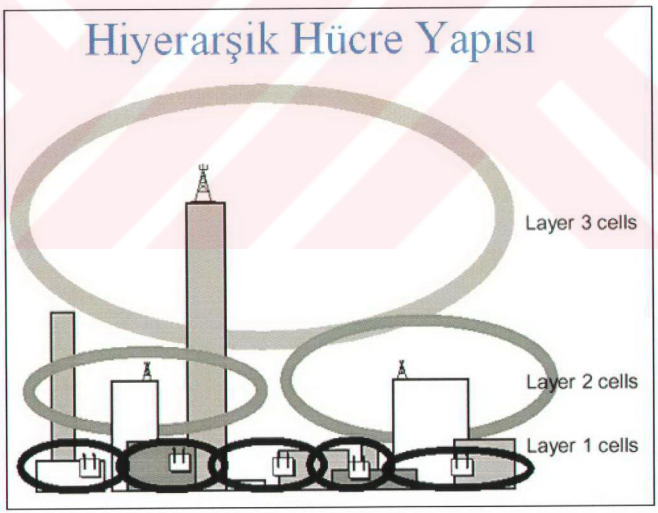
AUC, mobil istasyonun doğrulama prosedürü esnasında HLR 'a bazı parametreler tedarik eder. AUC, belirli bir abone ile ilgili giriş değerlerini hesaplamak ve istenilen sonuçları HLR 'a aktarmak için hangi algoritmayı kullanacağını önceden bilir. Doğrulama prosedürleri ile ilgili algoritmalar AUC 'de yüklüdür ve herhangi bir anda ki kötü kullanıma karşı korunurlar.

3.3 GSM Sistem Yapısı

Mobil telefon sistemleri için sınırlayıcı faktör kullanılacak olan radyo frekans aralığıdır ve mobil iletişim için oldukça dar bir bant tahsis edilmiştir. Şehirlerde aynı anda yapılan birçok görüşme için yeterli kapasiteyi sağlamanın tek yolu şebekenin bazı bölümlerinde aynı radyo frekanslarını tekrar tekrar kullanmaktır. Bu amaçla sistem, bal peteği gibi birbirine bitişik olarak çalışan hücrelerden oluşmakta ve her hücre düşük çıkış gücü ve kısa mesafeli radyo sinyalleri ile çalışan ana alıcı-verici istasyonu ile çalışmaktadır.

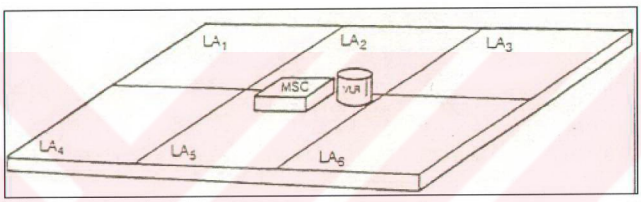


Şekil 3.3 Hücre yapısı

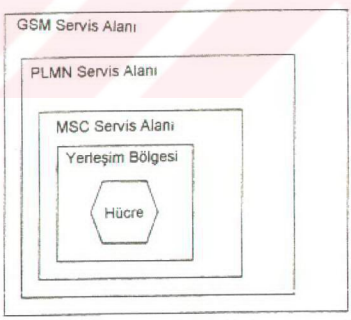


Şekil 3.4 GSM sisteminde farklı hücre yapıları

Hücreler için tanımlanmış alanlar vardır. Her MSC/VLR servis bölgesi birkaç yerleşim bölgesine ayrılmıştır. Yerleşim bölgesi (LA), MSC/VLR servis bölgesinin bir parçasıdır ve mobil istasyonun bu alanda serbestçe gezmesi yerleşim bölgesindeki MSC/VLR kontrolündeki yer bilgisini değiştirmez. Bir yerleşim bölgesi, abonenin bulunması için arama mesajının yayımlandığı bölgedir. Yerleşim bölgesi, birkaç hücreye sahip olabilir ve bir veya daha fazla BSC' ye bağlıdır. Fakat sadece bir MSC/VLR' a sahiptir. Yerleşim bölgesi, sistem tarafından Yerleşim Bölgesi Kimliği (LAI - Location Area Identity) kullanarak tanınır. Sistem aktif durumdaki aboneyi aramak için kullanır.



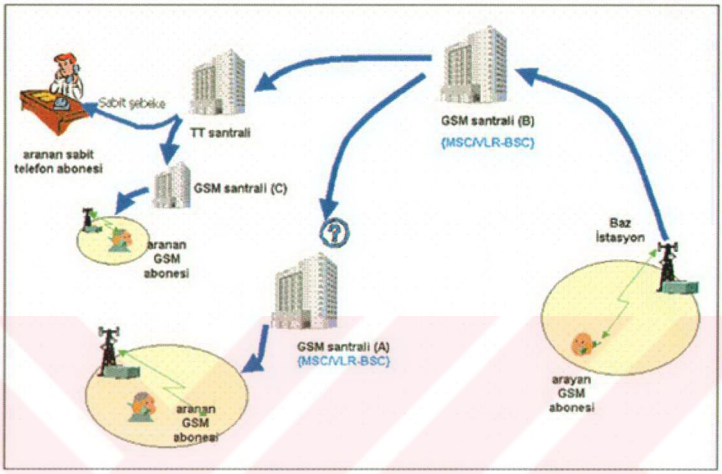
Şekil 3.5 MSC/VLR Servis Alanı



Şekil 3.6 GSM' deki alanlar arası ilişki

3.4 GSM' de Trafik Durumları

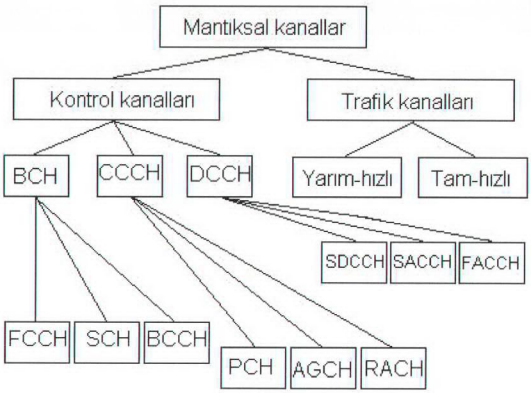
GSM sistemlerinde çeşitli trafik senaryoları kurulmaktadır. Aşağıda temel arama ve aranma senaryosu görülmektedir.



Şekil 3.7 GSM sistemlerinde arama ve aranma senaryosu

3.4.1 Mantıksal Kanallar

Birçok enformasyon türü (örneğin, kullanıcı veri ve kontrol işaretleri), BTS ve MS arasında gönderilir. Gönderilen enformasyonun türüne bağlı olarak, farklı mantıksal kanallardan bahsetmek mümkündür. Örneğin farklı enformasyon türleri, fiziksel kanallar üzerinde belirli bir düzen ve dizide gönderilirler. Bu mantıksal kanallar fiziksel kanallar üzerinde planlanır. Mesela; konuşma, "trafik kanalı" olarak adlandırılan (ve belirli belirsiz bir fiziksel kanal olan) mantıksal kanaldan gönderilir. Mantıksal kanallar "kontrol" ve "trafik" kanalları olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 3.8'de mantıksal kanalların alt bölümleri görülmektedir.

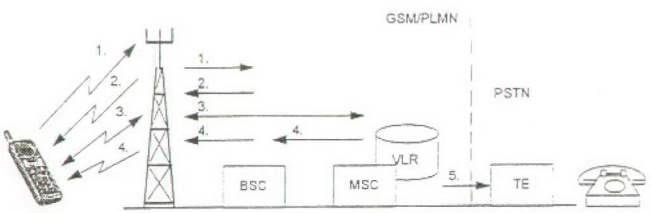


Şekil 3.8 Mantıksal kanallar

MS açıldığında şebeke girmesi Yayın Kontrol Kanalı (BCCH - Broadcast Control Channel) taşıyıcısını içeren bir prosedür kullanarak yapılır. Basit anlamda MS'leri şebekede tutan BCCH kanalları, konuşma için TCH kanalları ve sinyalleşme senaryoları içinde SDCCH kanalları kullanılır.

3.4.2 MS'den Aranma

GSM' de konuşma geleceği zaman yaşanan senaryo;



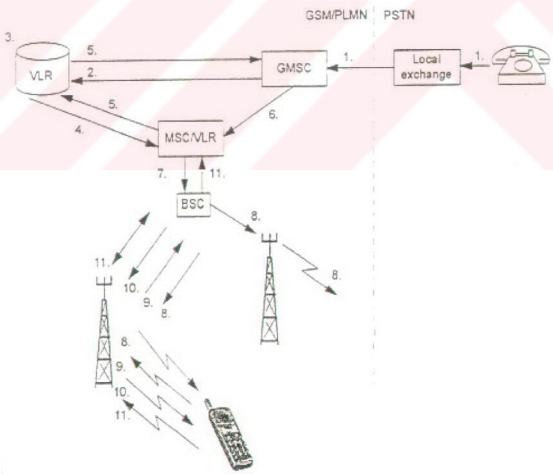
Şekil 3.9 MS' in PSTN' e arama kurulumu

1. MS bir işaretleşme kanalı sorar. Bu kanal SDCCH' dır ve bunu sorarken RACH' ı kullanır.

2. BSC, AGCH' ı kullanarak bir işaretleşme kanalı tahsis eder.
3. MS, MSC/VLR' a SDCCH yolu ile arama kurulumu isteğini gönderir. SDCCH üzerinde bazı işaretleşmeler olur, bu işaretleşmeler şöyledir; MS, MSC/VLR' da meşgul konumuna getirilir, doğrulama prosedürü gerçeklenir ve aranılan abonenin numarasını (bu durumda bir PSTN numarası) gönderir.
4. MSC/VLR, BSC' ye boş bir TCH tahsis edilmesi durumunu sorar. Sonra bu istek TCH'I aktif etmesi için BTS ve MS' e yönlendirilir.
5. MSC/VLR, aranılan abonenin numarasını PSTN' de aboneye bağlantı kurması için anahtarlama merkezine gönderir (exchange).

3.4.3 MS' i Arama

Bir mobil abone ile PSTN' deki abonenin aranması arasındaki en büyük fark mobil abone yerinin bilinmemesi, dolayısıyla ulaşılamamasıdır. Bu yüzden arama bağlantısının kurulması için önce MS tespit edilmelidir.



Şekil 10 - PSTN' den MS' i arama

1. PSTN abonesi MSISDN' i anahtarlar. MSISDN' in herhangi bir GSM şebekeye ait bir numara olup olmadığının anlaşılması için MSISDN, PSTN' de analiz edilir. GMSC ile bağlantı kurulur.

2. GMSC, MSISDN' i MS' in hangi HLR' da kayıtlı olduğunu anlamak için analiz eder. Yine GMSC, HLR' dan aramaya uygun MSC/VLR' a yönlendirmek için bilgi ister.

3. HLR, MSISDN' i IMSI' a dönüştürür ve böylelikle MS' in hangi MSC/VLR bölgesinde olduğunu tespit edebilir. HLR aynı zamanda abonenin aktif olduğu servisler hakkında bilgiye de sahiptir. (örneğin, herhangi bir numaraya yönlendirilmiş olma gibi)

4. HLR, MSC/VLR' dan, adresini içeren bir MSRN talep eder.

5. MSRN, MSC/VLR' dan HLR yoluyla GMSC' ye gider.

6. GMSC, aramayı direkt olarak veya PSTN yoluyla MSC/VLR' a gönderir.

7. MSC/VLR, MS' in hangi LA' da olduğunu bilir. LA' nın içindeki bütün BSC' lere çağrı mesajı gönderir.

8. BSC' ler çağrı mesajını istenilen LA' daki BTS' lere dağıtır. BTS' ler mesajı hava ara yüzünden PCH' ı kullanarak gönderirler. MS' i yakalamak için IMSI veya TMSI kullanılır.

9. MS çağrı mesajını algılayınca, SDCCH için talepte bulunur.

10. BSC, AGCH' ı kullanarak SDCCH tedarik eder.

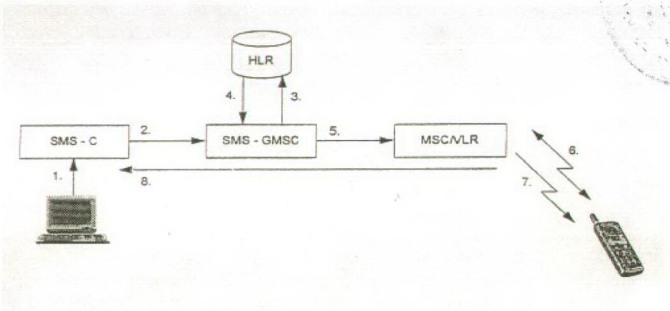
11. SDCCH, MS'den aramada olduğu gibi arama kurulumu prosedüründe kullanılır ve TCH tahsis edilir. SDCCH serbest bırakılır.

12. Mobil telefon çalar ve abone cevap verdiği zaman bağlantı tamamlanmış, arama yolu kurulmuş olur.

3.5 Kısa Mesaj Servisi

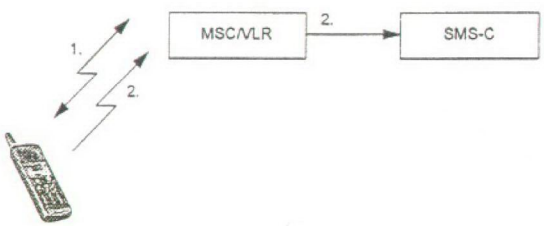
Kısa mesaj servisi, 160 alfanümerik karaktere kadar metin halinde mesaj gönderme hizmetidir. Kısa Mesa Service (SMS-Short Message Service) iki temel hizmeti ihtiva eder.

- Mobil sonlandırmalı SMS (bir SMS-C'den bir MS'e)
- Mobil çıkışlı SMS (bir MS'den bir SMS-C' ye)



Şekil 3.11 Mobil sonlandırmalı kısa mesaj

1. Bir kullanıcı bir SMS-C'ye mesaj gönderir.
2. SMS-C mesajı SMS-GMSC'ye gönderir.
3. SMS-GMSC enformasyonun ulaşması gereken MS'e yönlendirilmesi için HLR'ı sorgular.
4. HLR enformasyonun gideceği MSC/VLR'ın adresini verir.
5. SMS-GMSC mesajı MSC/VLR' a yollar.
6. MS' e çağrı yapılır, MS ile şebeke arasında bağlantı kurulur.
7. Eğer doğrulama prosedürü başarılı olursa MSC/VLR mesajı MS' e gönderir. Kısa mesajlar SDCCH' dan gönderilir.
8. Gönderme başarılı tamamlanırsa MSC/VLR' dan SMS-C' ye bir rapor gönderilir. Eğer gönderme başarı ile tamamlanamaz ise HLR, MSC/VLR tarafından haberdar edilir ve SMS-C' ye başarısızlık raporu gönderilir.



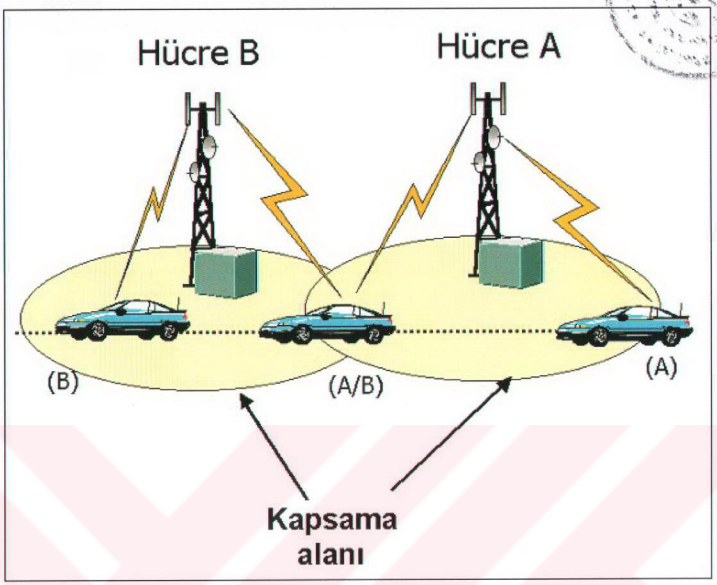
Şekil 3.12 - Mobil çıkışlı kısa mesaj

1. MS normal arama kurulumunda olduğu gibi şebeke ile bağlantı kurar.
2. Doğrulama prosedürü başarılı gerçekleşirse MS kısa mesajı MSC/VLR yoluyla SMS-C' ye gönderir. SMS-C mesajı gideceği yere yönlendirir.

3.6 Handover (Aktarma)

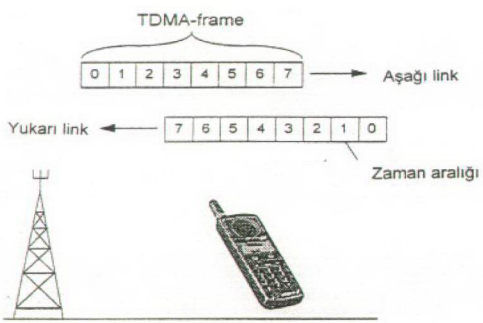
Handover , bir mobil istasyonun iki hücre arasında geçiş yaparken konuşmanın devamı için bir araçtır. Hücresel bir şebekede, bir hücrenin komşu hücreleri vardır. Böylelikle sistem, mobil istasyonun hangi hücreye geçebileceğini saptayabilmektedir. Bir sonraki hücreyi saptayabilme metodu analog ve sayısal sistemlerde farklılık gösterir. Bu farklılık 'Handoff' ve 'Handover' sözcüklerinden tespit edilebilir. 'Handoff' analog sistemlerde kullanılmakta iken, 'Handover' ise GSM sisteminden bahsedilirken kullanılır.

Mobil istasyon sürekli komşu hücrelerde algılanan güç seviyelerini göstermelidir. Bunu yapmak için, baz istasyon mobil istasyona güç ölçümlerini yapmak için baz istasyonların (kanalların) listesini verir. Bu liste temel kanalda gönderilir. Bu temel kanal, mobil açıldığında frekansın akordlandığı kanaldır ve birinci kanaldır. Mobil istasyon, kalite için, içinde bulunulan hücrenin güç seviyesi ölçümlerine devam eder. Ayrıca bu ölçümler komşu hücrelerin güç seviyeleri için de aynı şekilde icra edilir. Ölçüm sonuçları periyodik olarak 'ölçüm raporu' na yerleştirilerek baz istasyona geri gönderilir. Baz istasyon, mobil istasyona olan bağlantının gücü ve kalitesi üzerinde ölçüm yapıyor da olabilir. Eğer ölçümler, bir aktarma yapılması gerektiğini gösteriyorsa, aktarma için en uygun baz istasyonu daha önceden tespit edilmiş olduğundan hiç gecikme olmadan bu aktarma gerçekleştirilerek sorun çözülür.



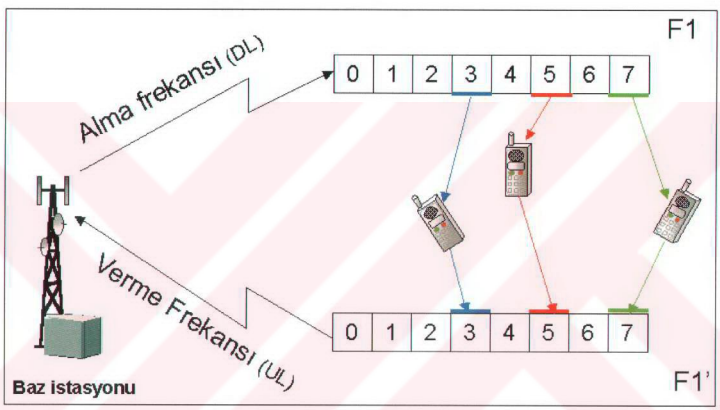
Şekil 3.13 BTS' ler arası aktarma

3.7 Kanal Kavramı



Şekil 3.14 TDMA kanal kavramı

Taşıyıcı üzerindeki TDMA çerçevedeki bir zaman aralığı, bir fiziksel kanalı ifade eder. Eğer, her kullanıcının belli sayıda frekanstan biri yoluyla bir sisteme bağlandığı FDMA sistemi ile karşılaştırma yaparsak, netice olarak görülür ki, GSM' de her taşıyıcı için sekiz fiziksel kanal mevcuttur (TS 0-7).



Şekil 3.15 TS Kullanımı

3.8 Radyo Şebeke Özellikleri

3.8.1 Dinamik MS&BTS Güç Kontrolü

Genel olarak bakıldığında dinamik güç kontrolü özelliği, cep telefonu (MS-Mobile Station) ve baz istasyonlarının (BTS-Base Transceiver Station) bataryalarının güç tüketimini azaltmakta yani cep telefonları içini daha uzun süre şarjlı durmalarını, baz istasyonları için ise bir enerji kesintisi durumunda akülerin daha uzun süreli

istasyonu çalıştırması anlamına gelmektedir. Ayrıca bir abone istasyona en yakın bulunduğu anda zaten o istasyonun sinyalini en güçlü şekilde almaktadır. MS ve BTS birbirlerine bu kadar yakınken birbirleriyle maksimum güçle haberleşmeleri her iki cihazında doyuma girmesine neden olabilir. Eğer MS ve BTS' lerin çıkış güçleri birbirleriyle olan mesafelerine göre ayarlanabilirse bu istenmeyen durumun önleneceği düşünülerek dinamik güç kontrolü özelliği geliştirilmiştir. Bu özelliğin tüm şebekeye uygulanmasıyla bir abone BTS' e ne kadar yakınsa hem MS hem de BTS birbiriyle minimum güçle haberleşecek, bu da tüm şebekenin güç tüketiminin düşürülmesi adına önemli bir iyileşme sağlayacaktır. Ayrıca bir BTS kendisine türlü mesafelerde bulunan tüm abonelere aynı güçte sinyalle ulaşmaya çalışırsa bu özellikle yoğun kentsel nüfusun ve baz istasyonu sayısının çok olduğu yerlerde enterferansa yol açacak sonuç olarak şebekenin kalitesi frekans yönünden de olumsuz etkilenmiş olacaktır (Özgüner,2002).

3.8.2 DTX (Discontinuous Transmission - Sürekli olmayan iletim)

DTX, konuşma olmadığı anlarda güç tüketimini minimuma indiren bir özelliktir. Normalde bir telefon konuşmasında zamanın yarısında konuşmanın bir tarafı diğer yarısında diğer abone konuşmaktadır. Yani 3 dakikalık bir konuşmada 1.5 dakika aktif olarak konuşulmakta ve 1.5 dakika ise karşı taraf dinlenmektedir. DTX özelliği, dinleme anlarında MS' in güç tüketimini minimuma indirerek uplink yönündeki enterferansı minimize ettiği gibi, batarya ömrünü de uzatmaktadır. Downlink yönünde de BTS' in güç tüketimini ve sistemin enterferans oranını düşürür.

3.9 Sistem Dengesi

GSM haberleşme sisteminde bir bölgenin kapsandığını söylemek için bölgenin %95'inde MS tarafından alınan sinyal seviyesinin –90dBm (1pW)'den iyi olması gerekir. İki yönlü radyo iletişim sistemlerinde kapsama, zayıf iletim yönü dikkate alınarak kararlaştırılır. Bu iki iletişim yönü gönderme ve alma olarak adlandırılır.

Gönderme: Mobil aboneden, baz istasyonu vasıtasıyla şebekeye ulaşım
Alma: Baz istasyonu vasıtasıyla şebekeden, mobil aboneye ulaşım

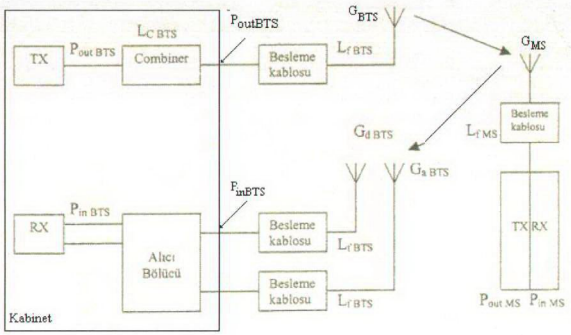
Her iki iletim yönü de, bir diğeriyle girişimden kaçınmak, sisteme erişebilirlik sağlamak veya ilave maliyetlere engel olmak amacıyla dengede olmalıdır. Bu sebeple öncelikle sistem dengesi hesapları başlamadan yapılmalıdır.

Denge hesaplarından önce bazı kabuller ve basitleştirmeler yapmaya gerek vardır. Bunlar;

- İnsandan oluşan gürültüyle, duyarlılığın azalmasının dengeye etkisi yoktur.
- Baz istasyonunda yöneltme kullanılmıştır.
- Baz istasyonunda RX ve TX (alıcı ve verici) antenler aynı kazanca sahiptir.

Çeşitleme, çok yollu radyo yayılımı sebebiyle oluşan hızlı sinyal seviyesi değişiklikleriyle mücadele için kullanılır. Çeşitleme iyileştirmesi, değişik radyo çevre şartları ile birlikte değişir. Düz ve açık arazide çeşitleme iyileştirmesi göreceli olarak daha düşüktür. Diğer taraftan yoğun şehir bölgelerinde, yüksek binaların doğrudan gelen işareti engellemesi ve birçok yansıyan dalga bileşeni üretmesi ile oluşan çevre şartlarında çeşitleme iyileştirmesi de yüksek olacaktır. Sonuç olarak aşağıdaki değerler çeşitleme kazancı olarak kullanılabilirler

- Analog sistem açık alan : 4 dB
- Analog sistem şehir bölgesi : 6 dB
- Sayısal sistem genel olarak : 4-6 dB



Şekil 3.16 Sistem dengesinin şematik gösterimi; G(Gain): Kazanç, L (Loss):Kayıp, a(antenna): Anten, f (feeder ve jumper): Besleme kabloları ve atlama kabloları, c (Combiner): Birleştirici, d (diversity): Çeşitleme

İki iletim yönü arasında, baz istasyonundan mobile ve tersi istikamette, dengeyi sağlamak amacıyla, bazı radyo parametrelerinin açıklığa kavuşturulması gerekmektedir.

Pin_{MS} = MS' in giriş gücü (dBm)
Pin_{BTS} = BTS' in giriş gücü (dBm)
$Pout_{MS}$ = MS' in çıkış gücü (dBm)
$Pout_{BTS}$ = BTS' in çıkış gücü (dBm)
Lf_{MS} = MS'de besleme kablosu kaybı (dB)
Lf_{BTS} = BTS' de besleme kablosu kaybı (dB)
Lc_{BTS} = BTS' de birleştirici kaybı (dB)
Lp = MS ile BTS arası yol kaybı (dB)
Ga_{MS} = MS' in anten kazancı (dBi)
Ga_{BTS}= BTS' in anten kazancı (dBi)
Gd_{BTS}= BTS' de çeşitleme (diversity) kazancı (dBi)

Bu açıklamalardan sonra mobildeki sinyal seviyesi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$Pin_{MS}=Pout_{BTS}–Lc_{BTS}- Lf_{BTS} + Ga_{BTS} – Lp + Ga_{MS} – Lf_{MS} \quad (3.1)$$

Benzer şekilde baz istasyonunda da;

$$Pin_{BTS} = Pout_{MS} – Lf_{MS}+ Ga_{MS} –Lp + Gd_{BTS} +Ga_{BTS} – Lf_{BTS} \quad (3.2)$$

Her iki denklemi çözerek yol kaybı Lp yi bulabiliriz.

$$Lp = Pout_{BTS} – Lc_{BTS} – Lf_{BTS} + Ga_{BTS} + Ga_{MS} – Lf_{MS} – Pin_{MS} \quad (3.3)$$

$$Lp = Pout_{MS} – Lf_{MS} + Ga_{MS} + Gd_{BTS} + Ga_{BTS} + Lf_{BTS} - Pin_{BTS} \quad (3.4)$$

Buradan,

$$Pout_{BTS} – Lc_{BTS} – Lf_{BTS} + Ga_{BTS} + Ga_{MS} – Lf_{MS} – Pin_{MS} = Pout_{MS} – Lf_{MS} +Ga_{MS} + Gd_{BTS} + Ga_{BTS} – Lf_{BTS} – Pin_{BTS} \quad (3.5)$$

$$Pout_{BTS} – Lc_{BTS} - Pin_{MS} = Pout_{MS} + Gd_{BTS} – Pin_{BTS} \quad (3.6)$$

Sonuçta sistem denge formülü şu şekilde bulunabilir;

$$Pout_{BTS} = Pout_{MS} + Gd_{BTS} + Lc_{BTS} + Pin_{MS} – Pin_{BTS} \quad (3.7)$$

Baz istasyonu çıkış gücü ($Pout_{BTS}$) mobil çıkış gücünden ($Pout_{MS}$) daha büyük olmalıdır. Çeşitleme kazancı (Gd_{BTS}), birleştirici kaybı (Lc_{BTS}) ve duyarlılık farkının (Pin_{MS} – Pin_{BTS}) toplamları dikkate alındığında bu sonuç, yukarıdaki formülde açıklandığı şekildedir.

Örneğin, Class4 bir MS için GSM900 bandında sistem dengesi;

$Pout_{MS}$ = 2W (33dBm), Gd_{BTS} = 3.5dB ve MS_{sens} = -104dBm (MS' in genel şebekede algılayabildiği en düşük sinyal seviyesi), BTS_{sens} = -110dBm alınırsa

$Pout_{BTS} = 33 + 3.5 + (-104 + 110) = 42.5dBm$

elde edilir. Bu da BTS' in en az 18W'lık bir çıkış gücüne ihtiyacı olduğu anlamına gelir. BTS' in çıkış gücü her zaman MS' in çıkış gücünden çok daha büyük olmalıdır. Çünkü, her zaman BTS' den yayılan sinyal birçok zayıflamaya maruzdur ve bu zayıflamalar sinyalinde zayıflamasına neden olmaktadır.

3.10 ERP (Effective Radiated Power)

Efektif yayınım gücü ERP antenden yapılan yayınımı tanımlamak için kullanılır. Bu yayınım normalde bir doğrultuya doğru konsantre edilmiştir. Sonuç olarak ERP verilen doğrultuda tüm kayıp faktörleri dikkate alınarak beklenen yayınım yani antenin gücü olarak görülebilir.

$$ERP = Pout_{BTS} - Lc_{BTS} - Lf_{BTS} + Ga_{BTS} \quad (3.8)$$

$Pout_{BTS}$: Baz istasyonu çıkış gücü.

Lc_{BTS} : Birleştirici (combiner) kaybı.

Lf_{BTS} : Besleme kablosu kaybı.

Ga_{BTS} : Anten kazancı.

Efektif yayınım gücü EIRP olarak da ifade edilebilir. Bunun anlamı anten kazancının izotropik antene göre verildiğidir. Dipol antene göre hesaplar yapıldığında bu ifade ERP olarak kullanılmaktadır.

ERP ve EİRP arasındaki ilişkide;

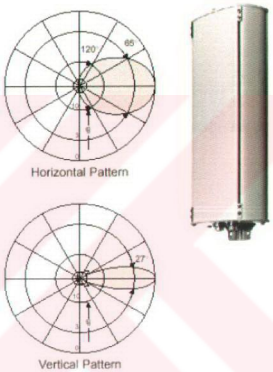
$EIRP = ERP + 2.15$

3.11 GSM Baz İstasyonlarının Anten Tipleri

Antenler yayın yapma karakteristiklerine göre, basit anlamda her yöne yayın yapan ve sektörel yayın yapan antenler olmak üzere iki gruba ayrılabilirler. Her yöne yayın yapan antenler daha çok yüksek güçle çalıştırıldığı için şehir dışlarında kırsal alanlarda kullanılırlar. Sektörel antenlerde kullanılacağı yerdeki özelliklere göre seçilirler. Anten seçiminde genelde büyüklüğü, kazancı, yatayda ve dikeyde yayın yaptığı açılar yani paterni önemli unsurlardır. Şekil 3.17'de katalogdan alınan 12,5 dBi kazanca sahip bir antenin özellikleri görülmektedir.

XPol A-Panel 800/900 65° 12.5dBi

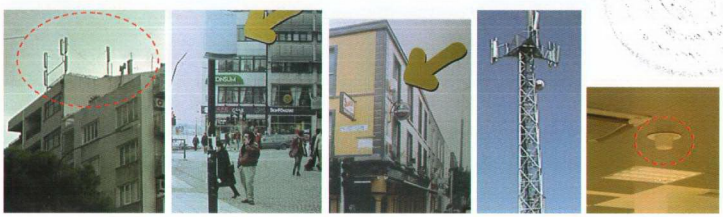
Type No.	739 620
Input	2 x 7-16 female
Connector position	Bottom or top
Frequency range	806 – 960 MHz
VSWR	< 1.5
Gain	2 x 12.5 dBi (870 – 960 MHz) 2 x 12 dBi (806 – 870 MHz)
Impedance	50 Ω
Polarization	+45°, –45°
Front-to-back ratio, copolar	> 30 dB
Half-power beam width	+45° polarization Horizontal: 65°, vertical: 27° –45° polarization Horizontal: 65°, vertical: 27°
Isolation	> 30 dB
Max. power per input	500 Watt (at 50 °C ambient temperature)
Weight	6 kg
Wind load	Frontal: 110 N (at 150 km/h) Lateral: 60 N (at 150 km/h) Rearside: 240 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	200 km/h
Packing size	782 x 287 x 165 mm
Height/width/depth	656 / 262 / 116 mm



Şekil 3.17 Anten Özellikleri

Anten kazancı beamwidth ile ilişkilidir. Açı büyüdükçe kazanç düşer. Kazanç ideal izotropik anten için dBi, dipol anten için dBd olarak ifade edilir. Beamwidth max. kazancın yarıya düştüğü yani 3dB azaldığı noktadaki açının iki katıdır. Örneğin standart sektör anteni için 2 x 32,5 = 65 derece.

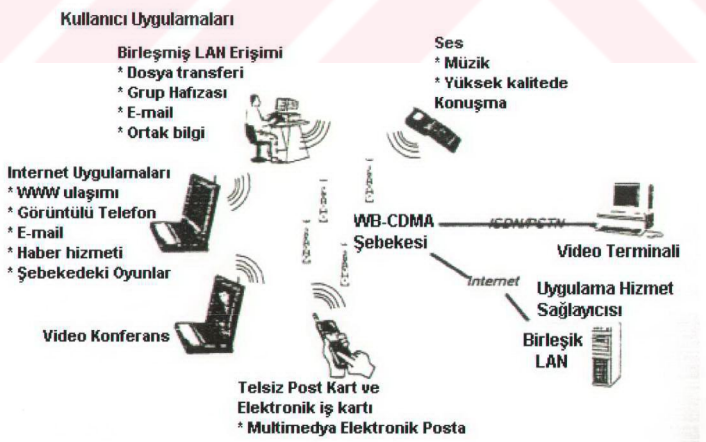
Şekil 3.18'de değişik anten kurulum ve tiplerine örnek resimler verilmiştir.



Şekil 3.18 Anten Resimleri

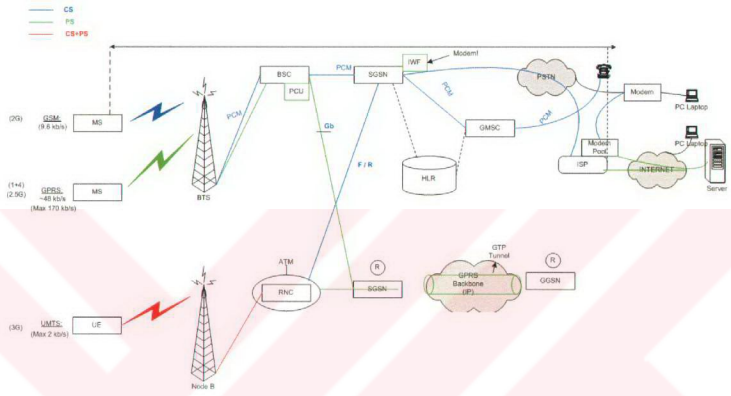
3.12 GSM' in Geleceği

GSM sistemine sonradan entegre edilen GPRS sistemlerinin de kullanıcılarının ihtiyaçlarına cevap vermekte zorlanması ve data iletiminde sınırların ve hızın arttırılma isteği insanları WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), EDGE (Enhanced Data GSM Environment) ve UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) gibi sistemlerin geliştirilmesine ve kullanımına yönlendirmiştir. Bu sistemler sayesinde multimedya hizmetlerinde daha iyi servisler verilebilecektir.



Şekil 3.19 Mobil Multimedya Hizmetleri

Şekil 3.19'da GSM' den GPRS' e ve sonrasında da UMTS' e geçiş aşamaları gösterilmektedir. Her sistem talepler dahilinde birbirine entegre edilerek geliştirilmektedir.



Şekil 3.20 GSM&GPRS ve UMTS geçiş şeması

Mobil iletişimin geleceği ile ilgili tahmin yapmak oldukça zor olmasına rağmen yapılan büyük yatırımlar tahminlerin olumlu yönde olduğunu göstermektedir. Ayrıca geçmişe dönük hızlı gelişim gelecekteki teknolojinin ve gelişmenin de çok hızlı olacağını göstermektedir.

4. ÖLÇÜM METOTLARI

Bu bölümde 10 kHz – 300 GHz frekans aralığındaki maruz kalma ölçümleri için gerekli olan ölçüm cihazlarından ve metotlardan bahsedilecektir. Metot ve aletlerin seçimi frekansa, alan özelliğine (yakın veya uzak alan), modülasyon tipine ve ışıma yapan kaynak sayısına bağlı olarak değişmektedir. Ölçüm standartları ile ilgili bilgiler TK' nın yönetmeliklerinde yer almaktadır.

4.1. Alan Şiddeti Ölçümleri

Alan şiddeti ölçümleri için;

a) Frekans, Üretilen güç ve alanlar, Modülasyon, Radyasyon karakteristikleri, İletken akım ve gerilimleri

b) Maruz kalma şartları (mesafe ölçme noktası, maruz kalma zamanı)

c) Ölçme metodu ve ilgili cihazların seçimi

d) Değişen çalışma parametreleri ile ışıma kaynağının çalışma durumunun tayini

e) Daha önce yapılmış ölçüm ve deneyleri göz önünde tutarak ölçüm yapan personel ve cihaz için muhtemel tehlikeyi dikkate almak. Gerektiğinde; güvenlik gözlükleri ve elbiseleri gibi koruyucu teçhizatı kullanmak, güç azaltmak, maruz kalma süresini sınırlamak gibi güvenlik arttırıcı tedbirlere başvurulmalıdır.

f) Ölçme, kayıt ve analiz; her ölçümden evvel ve sonra cihazın doğru ölçüm yapıp yapmadığı ikinci bir cihaz ile, hesaplanmış sonuçlarla veya önceden bilinen değerlerle kontrol edilmelidir.

Alan şiddetleri ölçme sistemi genellikle aşağıdaki bileşenlerden meydana gelir.

a) Ölçme sensörü: Ölçme sensörü belirli frekans kademeleri dışındaki frekanslara duyarlılık gösterir.

b) Detektör: Düşük seviyeli alan şiddetlerinde, diyot detektörler, alanın karesi ile orantılı seçilmiş bir sinyal oluşturur.Yüksek alan şiddeti için ölçme sinyali alanın

kendisi ile orantılıdır.Eğer farklı frekanslı birkaç alan aynı zamanda varsa veya alan darbeli ise ölçümler yanlış olur. Yarı iletkenler, ışığa, infrared radyasyona ve sıcaklık değişimlerine duyarlı olmaları sebebiyle hataya sebep olabilirler.

c) Ölçülen değerlerin iletimi: Koaksiyel kabloların ekranlama zayıflatmasının yeterli olması gerekir. Ölçülen işaretlerin iletiminde kullanılan metalik iletim hatları önemli ölçüde alan bozulmalarına yol açar. Yalıtılmış karbon fiber gibi kablolar, alanların bozulmalarını önlemede kullanılır.

d) Gösterge birimi: Elektromanyetik alan içinde yerleştirilen gösterge, ölçüm sınırları dışında olan frekans bileşenlerinden kaynaklanan parazite karşı yeterince toleranslı olmalıdır.

Yukarıda belirtilen öneriler ışığında hareket ederek ölçümler dar band (seçici olarak) veya geniş bandlı olarak tayin edilir.

4.2. Geniş Bant Ölçümleri

Işıyan kaynakların frekansları biliniyor ve referans seviyeleri, ölçüm yapılacak frekans aralığında eşit ise tepe/rms değerleri geniş bantlı ölçüm cihazları ile ölçülmelidir. Band genişliği ilgili bütün frekansları ölçebilecek kadar geniş olmalıdır ve ölçülen rms değerleri dalga şeklinden bağımsız olmalıdır. Ölçüm zamanı, ortaya çıkan en yüksek tepe değerini ölçebilecek kadar geniş seçilmelidir.

4.3. Dar bant ölçümleri

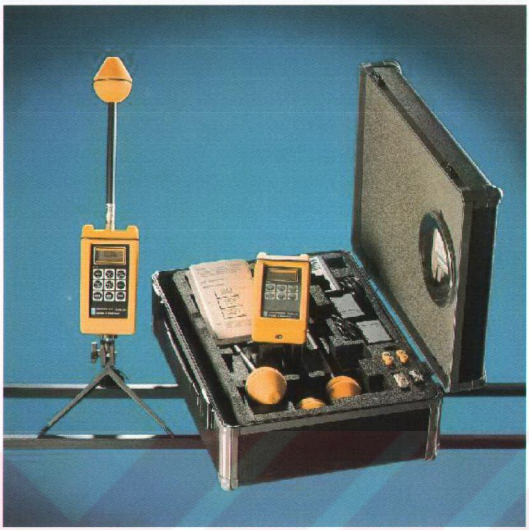
Şayet ışıyan kaynakların frekansları biliniyor ve referans seviyeleri. Gözlenen frekans aralığında farklı ise tepe/rms değerleri frekans seçici ölçüm cihazlarıyla ölçülmelidir. Band genişliği her frekans bileşenini yeterli doğrulukta ölçebilecek kadar dar seçilmelidir. Modüle edilmiş taşıyıcının ölçümü belli zaman aralığı için yapılmış (geçici kayıt edici) ve frekans spektrumu Fourier dönüşümü ile hesaplanmışsa, sonuçların doğru değerlendirilmesini temin için yeterli frekans ayrımı kullanılmalıdır.

4.4. Ölçüm cihazları

4.4.1. Ölçüm cihazlarının çeşitleri

Alan şiddeti veya güç yoğunluğunu ölçen aletler üç temel parçadan oluşur. Bunlar; prob, bağlantı kabloları ve cihazdır. Probda alana hassas elemanlar yerleştirilmiştir. Dipoller elektrik alan sensöründe, döngüler(loops) manyetik alan sensöründe kullanılır. RF geriliminin tespiti probta veya cihazda yapılır. Diyot veya termokupullar genellikle detektör olarak kullanılır. Probtaki sinyal kablolar aracılığı ile cihaza iletilir ve cihazda görüntü haline dönüştürülür. 1 MHz in altındaki aletler genel olarak elektrik alan şiddeti E' yi manyetik akı yoğunluğu veya akı değişimini ölçer. 1 MHz ile 300 MHz arasındaki frekanslardaki ölçülen tipik değerler ortalama alan şiddetinin karesi veya manyetik alan şiddetinin karesi veya eşdeğer düzlem dalga güç akı yoğunluğunun ortalamasıdır. 300 MHz nin üstünde güç akı yoğunluğu elektrik alan sensörleri ile ölçülür. İndüklenen vücut akımları, paralel tabaka elektrotları, elde tutulan temas ampermetreleri veya akım transformatörleri ile ölçülür. Tabaka elektrotları, akım transformatörleri ve temas ampermetreleri için istenilen frekans aralığı 10 KHz - 50 MHz arasındadır (Karabulut,2001).

Çalışma kapsamında yapılan tüm ölçümler Wandel-Goltermann' ın EMR-300 modelindeki ışıma metre (radyasyon metre) cihazıyla yapılmıştır. Şekil 4.1.' te bu cihazın görünümü bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Wandel-Goltermann EMR-300 elektromanyetik alan ölçüm cihazı



Şekil 4.2. Ölçüm sonuçlarının ölçüm cihazından bilgisayara aktarılması

Ölçüm cihazı ile E-alan, H-alan, güç yoğunluğu değerleri ölçülebilmekte ve yapılan ölçümlerin ortalama değerlerini gösterebildiği gibi ölçüm süresinin tepe değeri de ölçülebilmekte ve görüntülenebilmektedir (Wandel-Goltermann, 2001). Ölçüm cihazının ölçüm için frekans aralığı 3kHz – 60 GHz' dir. Sonuçta kullanılan frekanslar 900 MHz ve 1800 MHz olduğu için bu cihaz tercih edilmiştir. Genel olarak yurtiçi ve yurtdışında yapılan benzer ölçümlerde de sıklıkla bu cihazın kullanıldığı tespit edilmiştir. Ölçüm cihazının kalibrasyonu ülkemizde TÜBİTAK UME tarafından yapılmış olup, her 2 yılda bir bu kalibrasyon tekrarlanmaktadır.

Ölçüm yapılan yerlerin büyük bir çoğunluğunda sadece tek bir operatör bulunduğu için sadece ölçüm cihazı kullanılmıştır. Birden fazla elektromanyetik ışıma kaynağının bulunduğu ortamlarda spektrum analizör ile ölçüm yapmak daha doğru olacaktır. Ölçüm yapılırken, mevcut çalışan sistem dışında, ölçüm cihazını etkileyebilecek hiçbir elektronik cihaz üzerimizde bulunmamıştır. Bu konu da ölçüm sonuçlarının doğruluğu açısından son derece önemlidir. Ölçümler yapılırken ölçüm cihazının kayıt özelliği de kullanılarak yaklaşık 6 dakikalık ölçümler kaydedilmiş ve bunların ortalaması alınarak ölçüm sonucu olarak kaydedilmiştir

4.4.2. Genel şartlar

Ölçü aletleri bir standartta belirtilen referans seviyeleri ve temel sınırlamaları ile ilgili ölçülen değerleri kayıt edilebilme özelliklerine sahip olmalıdırlar. Ölçü aletleri belirli bir uygulama için gerekli yapı ve frekans sınırlarına sahip olmalıdır.

Ölçüm sonuçları aşağıdaki şartlardan önemli ölçüde etkilenmemelidir:

- Sıcaklık nem gibi çevre şartlarından
- Ölçüm düzeninden,
- Deneyi yapan kişinin alana yakınlığından dolayı alanla karşılıklı etkileşimden,
- Radyo parazitlerine karşı alınan tedbirlerin yetersizliğinden,

- Bağlantı kablolarının elektro manyetik alanlardan yetersiz korunmalarından.,

4.4.3. Elektriksel çalışma karakteristikleri

Frekans aralığı ve kullanılan ölçüm cihazlarına bağlı olarak aşağıdaki değerlerin ölçülmesi mümkündür.

- Elektrik alan şiddetinin rms ve tepe değerlerinin (V/m)
- Manyetik alan şiddetinin rms ve tepe değerlerini (A/m)
- Manyetik akı yoğunluğun rms ve tepe değerleri (T)
- Güç akı yoğunluğun ortalama ve tepe değerini (W/m^2)
- Elektrik alanın düzlem dalga eşdeğer Güç akı yoğunluğunu (W/m^2)
- Manyetik alanın düzlem dalga eşdeğer Güç akı yoğunluğunu Güç (W/m^2)
- Temas akımını rms ve tepe değerlerini (mA)
- Vücut akımını rms ve tepe değerlerini (mA)

4.4.4. Ölçüm cihazlarının seçimi

Ölçüm cihazlarının seçimi, frekansa, tepki zamanına, tepe değeri kısıtlaması ve alanın polarizasyonuna bağlıdır. Aletin çalışma sınırları, ışıma yapan kaynağın frekanslarını kapsamalıdır. Şayet alan pek çok frekanstan oluşmuş ise rms tepkili geniş bant probu kullanılmalıdır. Her bir bileşen ayrı ayrı frekans seçici özelliği olan alet ile ölçülmelidir. Bu durum bilhassa sınırlar, seviyeler frekansa bağımlı ise daha da önemlidir. Genellikle bu standarda göre, ortalama veya rms değeri cevap zamanı ile ölçülür. Şayet alan yavaş ve periyodik olarak değişiyorsa, uzun periyotlar süresince (saniyeler veya dakikalar) ortalama değer hesaplanabilir veya elektronik olarak tahmin edilebilir. Alanın çok çabuk değişmesi durumunda, örneğin tarayıcı radar anteninde olduğu gibi, detektörün tepki süresi tepe alan değerinin güvenilebilir ölçümü için 1 μs' den az olmalıdır. Tarayıcı radar anteni etrafında alanların ölçümü yapılırken probu düşük darbe oranlı alanlardan korumak için probun tepe değer

sınırları bilinmelidir. Kaynak ve antenin polarizasyonu tam olarak bilinmiyorsa izotropik probların kullanılması tavsiye edilir. Toprağa galvanik veya kapasitif temas veya metalik yapılar ile değme durumlarında temas ve indüklenen vücut akımları, akımın rms değerini gösteren aletler ile ölçülmelidir. 30 MHz' in altındaki frekanslarda temas akımlarının ölçümü, insan vücudunun eşdeğeri olan direnç(R)' nin kullanılması ile yapılır. $R = (-45\log_{10} f_{MHz} + 370\ \Omega)$ bu standartta verilen değerlere göre ölçülen akımın ortalaması alınmalıdır. (Özgüner, 2004)

4.4.5. Yerinde yapılan ölçümler

Her bir ölçümden önce ve sonra aletin fonksiyonları ikinci bir alet yardımıyla hesaplanan değerler veya bilinen diğer ölçümler ile kontrol edilmelidir. Alanlar ve akımlar gerçek maruz kalma şartlarında ölçülmelidir. Şayet pek çok durum var ise şartları en kötü olan seçilmelidir. Ölçme yapan personelin ölçü aletlerinin zarar görmemesi için ölçümlere kaynaktan emniyetli bir mesafeden başlanmalıdır. Bu mesafe, alan şiddetinin hesabı için yapılan ön çalışmadan çıkarılmalıdır. Işıma seviyesi, ölçmeler ile tespit edildikten sonra ölçümlere yavaş yavaş kaynağa doğru devam edilir. Güç akı yoğunluğu veya alan şiddetine maruz olan kişilerinin çalıştığı ve insanın kullanım hacminin değişik noktaları gibi, farklı yerlerde ölçülmelidir ki, alan dağılımı doğru olarak tanımlanabilsin. Şayet insan vücudunun tamamı alanlara maruz kalmış ise ölçüm sonuçlarının insan hacmine göre ortalaması alınmalıdır. Bu ölçüler frekansa bağlı olan ve değiştirilebilen prob kullanılarak elde edilebilir (Karabulut, 2001).

4.5. Cep telefonu ölçümleri

Cep telefonlarının 3 farklı çalışma modu bulunmaktadır. Bunlar; sessizlik modu (idle mode), çağrı kurulma modu (call setup) ve konuşma modu (active mode). Telefonlar ilk konuşma kurulma sırasında maksimum güç yayarlar. Bu sebeple cep telefonu kullanımlarında baz istasyonlarından ziyade ilk konuşma başlatma anlarına

daha çok dikkat etmek ve mümkün olduğunca kulaklık kullanmak yararlı olacaktır. Ekte konu ile ilgili yapılan örnek bir çalışmanın ölçüm sonuçları bulunmaktadır. Cep telefonlarına ait ölçümler yapılırken, CDU C+, K 739 622 X-pol antenden (anten kazancı 15.5 dBi, 65° yatay 14° düşey polarizasyona sahip anten) servis alan bir hücrede, antene 7m. mesafeden, ana ışıma alanı içinden ölçümler yapılmıştır. Ölçüm yapılan hücrede herhangi bir güç kısımı söz konusu olmadığı gibi maksimum güçle çalıştırılmıştır. Bu sınır güvenlik mesafesinin 1.5 m. fazlasıdır. Tüm telefonlar bayilerden yeni alınarak ölçüm yapılmıştır. Bunun sebebi de, telefon bataryalarının zaman içinde batarya ömürlerini doldurarak daha kısa sürede daha fazla güç harcamalarından kaynaklanabilecek ölçüm yanlışlığına düşmemektir. Yine ölçümler yapılırken aranan abone de benzer bir hücrede aynı mesafede durarak senkronizasyon sağlanmıştır.

Ölçümlerde, telefon isimleri hukuki durumlar gözönünde bulundurulduğu için verilmemiştir. Fakat bu telefon modelleri, ülkemizde şu anda abonelerin yoğun olarak kullandığı telefon modelleridir. (Özgüner, 2004)

	ELEKTRİK ALAN (V/m)		
TELEFON MODELI	IDLE	CALL SETUP	ACTIVE
1	0.1206	18.45	3.7082
2	0.1	9.8725	12.3602
3	0.377	74.3112	9.3126
4	0.14064	10.47	6.7905
5	0.4659	16.572	6.5902
6	0.2579	33.7514	14.2387
7	0.16	37.3	11.83
8	0.39	42.83	20.05
9	0.45	26.57	15.46
10	0.3	14.1	4.5
11	0.2	6.2	1.6
12	0.2	8.5	2.1
13	0.2	5.5	2.1

14	0.1	15.1	10.5
15	0.2	17.2	3.5
16	0.2	6.7	3.5
17	0.04	55.08	11.86
18	0.15	18.29	3.2
19	0.18	25.07	3.5
20	0.2	12.5	4.5

Tablo 4.1 Değişik marka ve model cep telefonlarına ait E-alan ölçümleri (Özgüner, 2004)

4.6. SAR ve Dozimetre

Organizmaların RF alanlarına maruz kalması vücudun içerisinde RF alanları ve akım indüklenmesine yol açar. Vücut içindeki alanlar, biyolojik sistemlerle olan etkilenmelerden sorumludur. Bu etkilenmeler ya termal ya da termal olmayan etkileşmelerde bulunur. RF alanlarının biyolojik sistemlerle etkileşmesinin ölçülmesinde yaygın olarak dozimetrik nicelik, vücut tarafından elektromanyetik ışımadan soğurulan enerjidir. Bu enerji SAR ile gösterilir. Yani, elektromanyetik ışıma (iyonlaştırmayan radyasyon) dokular üzerinde birim kütle tarafından soğurulan enerji miktarı (SA – Specific Absorption) kadar canlı vücudunda soğurulur ve oradan doku ısınması yoluyla hasar oluşmasına yol açar. Soğurulan enerji miktarının soğurulma hızı ise (SAR – Specific Absorption Rate) elektrikli ev aletleri ve elektronik cihazların yaydıkları EM alanlar için önemli bir parametredir.

$$\mathrm{SAR} = \frac{d(SA)}{dt} = \frac{d(\frac{dw}{\rho dV})}{dt} \quad \text{(W/kg)} \qquad (4.1)$$

Burada ρ, kg/m^3 cinsinden vücut yoğunluğunu göstermektedir. SAR değerini vücudun tümü tarafından emilen radyasyon miktarı olarak da düşünebiliriz.SAR'ın dokulardaki elektrik alan cinsinden tanımı ise,

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \tag{4.1}$$

olarak da gösterebiliriz. Burada σ, doku iletkenliğini (S/m), E ise vücutta dokuya ait elektrik alan şiddetini (V/m) göstermektedir. SAR değerini, kg başına Watt veya g başına mW olarak tanımlayabiliriz. EM alanın insan vücudundaki en önemli belirtisinin ısınma olduğundan hareket edecek olursak, bu ısınmaya yol açan SAR ile sıcaklığın doğru orantılı olduğu sonucuna kolayca varabiliriz. Bu da bizi ;

$$\frac{dT}{dt} = \frac{SAR}{c} \tag{4.2}$$

ifadesine götürür. Burada, T sıcaklığı, c ise öz ısıyı göstermektedir.

SAR hesaplamalarında kullanılan en önemli teknik FDTD (Finite Difference Time Domain) tekniğidir. Bu teknikte ala teorisinden yola çıkılarak Maxwell denklemlerindeki kısmi türev operatörlerinin merkezi farklara dayalı sonlu farklar karşılıkları ile değiştirilip doğrudan zaman ve konum domenlerinde sayısallaştırmasına dayanan bir yöntemdir. Ele alınan hesap uzayının dikdörtgen prizmalardan oluştuğu varsayılır (Matthes,1996, Akleman ve diğ.,1999). SAR değerinin doğrudan ölçülmesinin çok zor olmasından dolayı, sınır değerlerin belirlenmesinde kolay ölçülebilen ve/veya gözlemlenebilen parametreler kullanılmaktadır. Bunlar elektrik alan şiddeti, manyetik alan şiddeti ve güç yoğunluğudur.

Bugüne kadar yapılan araştırmalar insan vücudunun 1 derecelik sıcaklık artışını düzenleyemediğini ve sorunlar yarattığını göstermektedir. İnsan vücudunda 1 derecelik sıcaklık artışı için 1kg doku başına 4W'lık bir gücün soğurulması gerekir.

İnsanların genel yaşam yerlerinde bu değerin 1/50'si olan 0.08 W/kg SAR sınır değeri olarak kabul edilmiştir. Bu değerler WHO/ICNIRP' nin 1998 yılında yapıla bilimsel araştırmaların neticesinde vardıkları konsensüs üzerine yayınladıkları uluslararası tavsiye niteliğindeki yayınlarından sonra genel kabul görmüş ve 1999 yılında EC(European Council) tarafından da birçok ülkeye düzenlenerek kabul edilmiştir. ICNIRP ve CENELEC tarafından belirlenen standartlar ve limit değerler birbiriyle aynıdır (CENELEC,1998).

Tablo 4.2. 10 GHz' e kadar değişik frekans aralıkları için genel ve mesleki maruziyet SAR sınırları (ICNIRP,1998).

Sınırlar	Frekans Aralığı	Manyetik Akım yoğunluğu (baş ve gövde)	Tüm vücut için ortalama SAR (W/kg)	Baş ve gövde için SAR	Kol ve bacaklar için SAR
Mesleki Sınırlar	1Hz'e kadar	40			
	1-4 Hz	40/f			
	4Hz - 1kHz	10			
	1 - 100 kHz	f/100			
	100 kHz - 10 MHz	f/100	0.4	10	20
	10 Mhz - 10 GHz		0.4	10	20
Genel Halk sınırları	1Hz'e kadar	8			
	1-4 Hz	8/f			
	4Hz - 1kHz	2			
	1 - 100 kHz	f/500			
	100 kHz - 10 MHz	f/500	0.08	2	4
	10 Mhz - 10 GHz		0.08	2	4

4.7. Güvenlik Mesafesi Hesaplanması

Boş uzay formülünü kullanarak,

$$W=\frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \qquad (4.3)$$

Verici antenden belli bir uzaklıktaki elektrik alan şiddetini hesaplamak bazı durumlarda, güç yoğunluğunun belirtilmesinden daha uygundur. Bu durum, elektrik alan şiddeti (E) ile güç yoğunluğu (W) arasındaki bağıntı ile yapılabilir ;

$$S = \frac{E^2}{\eta} \qquad (4.4)$$

Burada η boşluğun karakteristik empedansıdır ve değeri 120π $(\approx 377\,\Omega)$'dur. Böylece;

$$S = \frac{E^2}{377} = H^2 \text{ x } 377 \qquad (4.5)$$

formülü ile ifade edilebilir. Bu formüller ölçüm yapılan ve standartlarda limit değerler olarak verilen elektrik alan (E), manyetik alan (H) ve güç yoğunluğunun (S) da birbirleriyle olan ilişkisini göstermektedir. Bu formül ayrıca;

$$\frac{E^2}{377} = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \qquad (4.6)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan da;

$$E = \frac{\sqrt{(30 P_T G_T)}}{d} \qquad (4.7)$$

ifadesini verir. Buradan d mesafesini yalnız bırakırsak;

$$d = \frac{\sqrt{(30 P_T G_T)}}{E} \qquad (4.8)$$

formülü elde edilir ki burada d GSM haberleşme sistemi için güvenlik mesafesini verir. Bu formül uzak alan hesaplamaları için geçerlidir.O halde birde yakın alan için hesaplamaları formülize etmek gerekir. Buna göre;

$$S = \frac{n.P.10^{(G-L)/10}}{4\pi r^2} \tag{4.9}$$

şeklinde bulunur. Burada S, güç yoğunluğu, n, TRX/U sayısı, P, combiner çıkışındaki güç, G, anten kazancı dBi, L, sistemdeki toplam kayıp (feeder, jumper vb.), r, güvenlik mesafesidir.

Buradan r, yalnız bırakılırsa yakın alan için güvenlik mesafesi;

$$r = \sqrt{\frac{n.P.10^{(G-L)/10}}{4\pi S}} \tag{4.10}$$

formülü elde edilir.Elektromanyetik problemlerde yakın alan-uzak alan tanımları anten boyutları ile de tanımlanır. Dalga boyu cinsinde olan uzaklık $\lambda/2\pi$'yi aştığında hem elektrik dipol hem de manyetik dipol için aynı dalga empedansına ulaşılmaktadır. Bu değer boşluktaki düzlem dalga empedansı olan 377 Ω'dur. Bu $\lambda/2\pi$ değeri yakın alan uzak alan sınırı olarak kabul edilir.

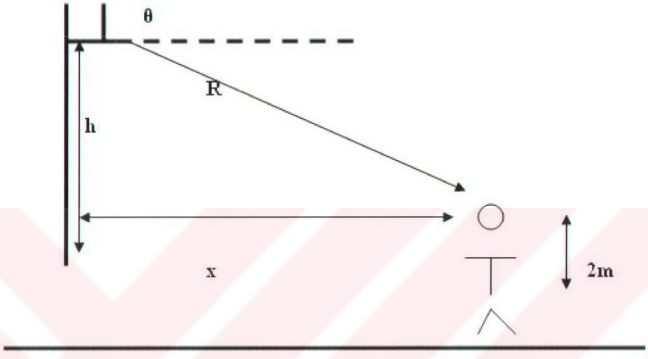
Elektromanyetik problemlerde yakın alan – uzak alan tanımları anten boyutları ile de tanımlanır. Parabolik yansıtıcı tipten antenlerde ve dizilerde kullanılan diğer tanım ise d uzaklık ve D antenin en büyük boyutu (eni, boyu vb) olmak üzere ;

$$d \geq \frac{2D^2}{\lambda} \tag{4.11}$$

şeklinde verilir. Bu tanım antenin yarattığı elektromanyetik dalgaların eş faz yüzeylerinin belli bir hata ile düzlem kabul edilebildiği uzaklık olarak verilir (Sevgi,?)

4.7.1 Yer seviyesindeki maruziyet

Belirli bir yükseklikteki antenden yerdeki bir insanın maruz kalacağı etki için aşağıdaki geometri kullanılabilir.



Şekil 4.3 Belirli bir yükseklikteki antene yerdeki bir insanın maruziyeti

Antenin yayınım merkezi yerden h yüksekliğindedir. Amaç kuleden x mesafedeki (örneğin 2 m) yükseklikteki güç yoğunluğunu hesaplamaktır. Ana ışının yere paralel gittiği ve antenin eksenel olarak simetrik olduğu varsayılmıştır.

$h' = h - 2$, $R^2 = h'^2 + x^2$, ve $\theta = \tan^{-1}(h' / x)$ (4.12)

yerden kaynaklanan yansımaları dikkate alarak, güç yoğunluğu,

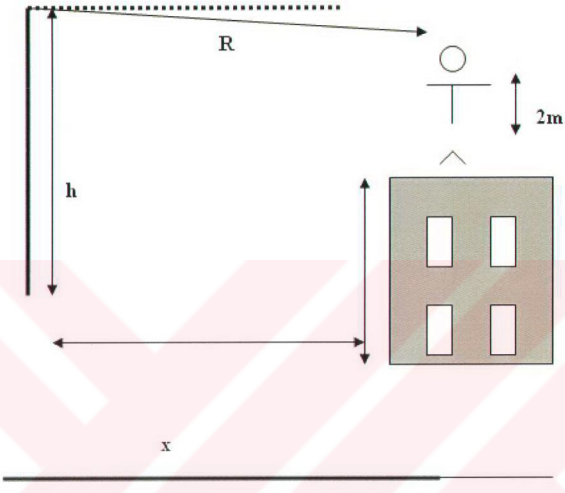
$S = 2.56 / 4\pi * F(\theta)\, EIRP / h'^2 + x^2$ (4.13)

örneğin anten yarı dalga boyunda dipol anten ise nümerik kazancı,

$F(\theta,\Phi) = \cos(\pi/2 \sin\theta) / \cos\theta$ (4.14)

4.7.2. Yakındaki bir binadan maruziyet

Anten kulesine yakın bir binada maruziyeti hesaplamak için;



Şekil 4.4 Yakın bir binadaki maruziyet

$h' = h - h_2 - 2$, $R^2 = h'^2 + x^2$, ve $\theta = \tan^{-1}(h' / x)$ (4.15)

yerden kaynaklanan yansımalar ihmal edilebilir çünkü dalga bina tarafından soğurulmaktadır.

$S = F(\theta)\, EIRP / 4\pi h'^2 + x^2$, (4.16)

Örneğin anten yarı dalga boyunda dipol anten ise, nümerik kazancı,

$F(\theta,\Phi) = \cos(\pi/2 \sin\theta) / \cos\theta$ (4.17)

(Karabulut,2001)

4.8. BTS ve Anten Tiplerine Göre Oluşturulabilecek Konfigürasyonlara Ait Güvenlik Mesafeleri

Telekomünikasyon Kurumu tarafından 12.07.2001 tarihinde yayımlanan, "10kHz-60GHz Frekans Bandında Çalışan Sabit Telekomünikasyon Cihazlarından Kaynaklanan Elektromanyetik Alan Şiddeti Limit Değerlerinin Belirlenmesi, Ölçüm Yöntemleri ve Denetlenmesi Hakkındaki Yönetmelik" in 6.maddesindeki formüle göre hesaplanmıştır.

Ks: Bölücü kayıp katsayısı (Splitter Loss Coefficient)

$K_{S=}$	0.71

Kpd: Çıkış gücü düşürülme katsayısı (Power Down Coefficient)

Tablo 4.3 Çıkış gücü düşürülme katsayısı

	Power Down in BSPWRB/BSPWRT (dB)									
$K_{pd=}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.89	0.79	0.71	0.63	0.56	0.50	0.45	0.40	0.35	0.32

Kf: Besleme kablosu kaybı katsayısı (Feeder Loss Coefficient)

Tablo 4.4 Besleme kablosu kaybı

$K_{f=}$	Kayıp(db/100m)	Besleme kablosu uzunluğu (metre)			
		25	*50*	*75*	*100*
LCF 1 / 2 "	**7.2**	**0.81**	**0.66**	**0.54**	**0.43**
LCF 7 / 8 "	**4**	**0.89**	**0.79**	**0.71**	**0.63**
LCF 1-1/4 "	**3**	**0.92**	**0.84**	**0.77**	**0.71**
LCF 1-5/8 "	**2.5**	**0.93**	**0.87**	**0.81**	**0.75**

Tablo 4.5. BTS ve anten tiplerine göre güvenlik mesafesi hesaplanması

ANTEN TİPLERİ	Anten Kazancı (dBi)	BTS TİPLERİ							
		RBS 2000-CDU A (dBm)	RBS 2000-CDU C+ (dBm)	RBS 2000-CDU D (dBm)	RBS 200-FILTER (1-8 TRX)	RBS 200-HYBRID (2 TRX)	RBS 200- 3 HYBRID (3-4 TRX)	2302	2401
		44.5	**41**	**42**	**42.5**	**41.5**	**38**	**33**	**19**
K 728 684	**17.5**	21.3	14.2	16.0	16.9	15.1	10.1	5.7	1.1
K 728 685	**14.5**	15.1	10.1	11.3	12.0	10.7	7.1	4.0	0.8
K 729 931	**5**	5.1	3.4	3.8	4.0	3.6	2.4	1.3	0.3
K 730 360	**12.5**	12.0	8.0	9.0	9.5	8.5	5.7	3.2	0.6
K 730 368	**15.5**	16.9	11.3	12.7	13.4	12.0	8.0	4.5	0.9
K 730 374	**13**	12.7	8.5	9.5	10.1	9.0	6.0	3.4	0.7
K 730 376	**18.5**	23.9	16.0	17.9	19.0	16.9	11.3	6.4	1.3
K 730 376	**18.5**	23.9	16.0	17.9	19.0	16.9	11.3	6.4	1.3
K 730 378	**17**	20.1	13.4	15.1	16.0	14.2	9.5	5.4	1.1
K 730 382	**16**	17.9	12.0	13.4	14.2	12.7	8.5	4.8	1.0
K 730 676	**9**	8.0	5.4	6.0	6.4	5.7	3.8	2.1	0.4
K 730 682	**6.5**	6.0	4.0	4.5	4.8	4.3	2.8	1.6	0.3
K 730 690	**11.5**	10.7	7.1	8.0	8.5	7.6	5.1	2.8	0.6
K 732 433	**18.5**	23.9	16.0	17.9	19.0	16.9	11.3	6.4	1.3
K 732 448	**15.5**	16.9	11.3	12.7	13.4	12.0	8.0	4.5	0.9
K 735 727	**16.5**	19.0	12.7	14.2	15.1	13.4	9.0	5.1	1.0
K 736 347	**11**	10.1	6.7	7.6	8.0	7.1	4.8	2.7	0.5
K 736 349	**10.5**	9.5	6.4	7.1	7.6	6.7	4.5	2.5	0.5
K 736 622	**7.5**	6.7	4.5	5.1	5.4	4.8	3.2	1.8	0.4
K 736 624	**7**	6.4	4.3	4.8	5.1	4.5	3.0	1.7	0.3
K 736 767	**14**	14.2	9.5	10.7	11.3	10.1	6.7	3.8	0.8
K 736 855	**10**	9.0	6.0	6.7	7.1	6.4	4.3	2.4	0.5
K 737 031	**2**	3.6	2.4	2.7	2.8	2.5	1.7	1.0	0.2
K 737 115	**9**	8.0	5.4	6.0	6.4	5.7	3.8	2.1	0.4
K 737 602	**2**	3.6	2.4	2.7	2.8	2.5	1.7	1.0	0.2
K 739 619	**9**	8.0	5.4	6.0	6.4	5.7	3.8	2.1	0.4
K 739 620	**12.5**	12.0	8.0	9.0	9.5	8.5	5.7	3.2	0.6
K 739 622	**15.5**	16.9	11.3	12.7	13.4	12.0	8.0	4.5	0.9
K 739 624	**18**	22.6	15.1	16.9	17.9	16.0	10.7	6.0	1.2
K 739 633	**15**	16.0	10.7	12.0	12.7	11.3	7.6	4.3	0.8

[D]-(m)

Güvenlik mesafesi = K . D (4.18)

Güvenlik mesafesinin değeri yukarıdaki formülden hesaplanabilir. Buradaki ;

D: Tablo 4.5'ten bulunacak olan RBS ve Anten tipine göre belirlenen uzaklık (m),
K: Ks, Kpd ve Kf' in çarpımıyla oluşan, sistemdeki (BTS kabinet ile anten arasındaki) tüm cihaz kayıplarına karşılık gelen katsayı.

Bu katsayı; BTS güç kısılması, feeder (besleyici), splitter(bölücü) vb kaynaklanan zayıflamalara karşılık gelen katsayısı değerlerinin çarpımına eşittir.

$K=K_{pd} * K_f * K_s$ (4.19)

Not: Kabinet çıkışı ile anten arasındaki kayıplar ve güç kısılması için hesaplanan (feeder loss+power splitter+power down), güvenlik mesafesi için gerekli katsayı aşağıdaki formülden de hesaplayabilir. Formül dB cinsinden kaybı, güvenlik mesafesi katsayısına (K) çevirecektir. Bu katsayı ile Tablo 4.5'teki "D" değerlerinin çarpılması yeterli olacaktır.

X_{dB}: dB cinsinden toplam kayıp (feeder kaybı+ power splitter kaybı+ güç kısılması +vb...)
K: Güvenlik mesafesi için katsayı

$$K = 1 / 10^{(X_{dB}/20)} \quad (4.20)$$

Hesaplanan K değeri Formül 6.14' de yerine konursa, güvenlik mesafesi bulunur.

Örnek Hesaplamalar:

1-) RBS 2000-CDU C+ ,K 739 619 konfigürasyonu kullanılan, gücü 4 dB kısık, 25 m. LCF 1/2" feeder kullanılmış bir hücredeki antene olan güvenlik mesafesi:

D= 5,4 m(bkz. Tablo 6.9). Ks=0(Power splitter yok), Kpd=0,63 , Kf=0,81

Güvenlik mesafesi=0,63*0,81*5,4=2,75m.

2-) RBS 2000-CDU C+, K 739 620 konfigürasyonu kullanılan max. güçte çalışan, 25 m. LCF 1-7/8" feeder kullanılmış bir hücredeki antene olan güvenlik mesafesi:
D= 8m. (bkz. Tablo 6.9), Ks=0 (Power splitter yok), Kpd= 1 (güç kısık değil), Kf= 0,89

Güvenlik mesafesi: 0,89*8= 7,1 m.

4.9. Standartlar ve Limitler

Elektromanyetik alanların insan sağlığına etkileri konusunda birçok ülkede oluşturulan standart ve sınır değerlerin yanı sıra uluslararası standartlar ve sınır değerler de vardır.Uluslararası alanda ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komitesi) tarafından belirlenen sınır değerler bir çok Avrupa ülkesinde ve dünyanın farklı ülkelerinde en yaygın kabul görenler arasındadır. ICNIRP, Dünya Sağlık Örgütü (WHO-World Health Organization) ve Dünya Çalışma Örgütü (ILO) tarafından resmen tanınan bağımsız bir araştırma kurumudur.

Amerika Birleşik Devletlerinde bu sınır değerler FCC (Federal Communications Commission-Federal Haberleşme Komisyonu) tarafından belirlenmekte (FCC,1999) ve bu sınır değerlerin belirlenmesinde IEEE ve ANSI (American National Standarts Institute–Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü) tarafından oluşturulan standart değerler temel olarak alınmaktadır. IEEE/ANSI standartları da sınır değerlerin belirlenmesinde yaygın olarak kabul gören ve temel alınan değerlerdir (IEEE,ANSI,1992).

Buna göre genel yaşam alanlarında GSM 900 / 1800 MHz sistemleri için kontrolsüz etkilenme için sınır değerler Tablo 6.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.6. Kontrolsüz etkilenme için sınır değerler

SINIR DEĞERLER	ICNIRP		IEEE / FCC	
	900 MHz	1800 MHz	900 MHz	1800 MHz
Elektrik alan şiddeti (V/m)	41.25	58.33		
Manyetik alan şiddeti (A/m)	0.111	0.157		
Güç yoğunluğu (W/m^2)	4.5	9	6	10

Bu konuda çalışan gruplardan biri de IRPA (The International Radiation Protection Association – Uluslararası Radyasyondan Korunma Derneği) isimli kuruluştur. Aşağıda IRPA tarafından belirlenen mesleki etkilenme sınırları ve genel halk sağlığı etkilenme sınırları tablolar halinde verilmiştir (IRPA/INIRC,1988).

Tablo 4.6. IRPA tarafından belirlenen mesleki ve genel halk sağlığı etkilenme sınırları

Mesleki Maruz Kalma				
İlgili Standart	Frekans aralığı	Elektrik Alan Şiddeti (Volt/metre)	Manyetik Alan Şiddeti (Amper/metre)	Eşdeğer düzlem dalga Güç Yoğunluğu Watt/m^2
ICNIRP	400-2000 MHZ (900 MHz için değerler)	$3f^{1/2}$ (90)	$0.008\ f^{1/2}$ (0.24)	f/40 (22.5)
CENELEC/TSE		$3.07f^{1/2}$ (92.1)	$0.008\ f^{1/2}$ (0.24)	f/40 (22.5)

Genel Halk Maruz Kalma				
İlgili Standart	Frekans aralığı	Elektrik Alan Şiddeti (Volt/metre)	Manyetik Alan Şiddeti (Amper/metre)	Eşdeğer düzlem dalga Güç Yoğunluğu Watt/m^2
ICNIRP	400-2000 MHZ (900 MHz için değerler)	$1.375f^{1/2}$ (41.25)	$0.0037\ f^{1/2}$ (0.11)	f/200 (4.5)
CENELEC/TSE		$1.37\ f^{1/2}$ (41.1)	$0.0036\ f^{1/2}$ (0.11)	f/200 (4.5)

Ülkemizde ilk olarak TSE, Nisan 1996'da TS ENV 50166-2 nolu sayı ve "İnsanların Elektromanyetik Alanlara Maruz Kalması – Yüksek Frekanslar (10kHz – 300 GHz" isimli bir standart yayımlanmıştır (T.S.E.,1996). Ülkemizde halen

yürürlükte olan TK (Telekomünikasyon Kurumu) yönetmeliği ile sınır değerler belirlenmiş ve uygulamaya konulmuştur. TK yönetmeliğinin tüm metni çalışma kapsamında son bölümde Eklerde verilecektir (T.K.,2001). TK yönetmeliğine göre ülkemizdeki sınır değerler;Türkiye için belirlenen sınır değerlerde Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.7 Türkiye için belirlenen sınır değerler

Frekans Aralığı (MHZ)	E-alan şiddeti (V/m)		H-alan şiddeti (A/m)		B-Manyetik akı yoğunluğu (uT)		Eşdeğer düzlem dalga güç yoğunluğu (W/m^2)	
	Tek bir cihaz için limit değer	Ortamın toplam limit değeri	Tek bir Cihaz için limit değer	Ortamın toplam limit değeri	Tek bir Cihaz için limit değer	Ortamın toplam limit değeri	Tek bir Cihaz için limit değer	Ortamın toplam limit değeri
400-2000 (900 MHz için değerler)	0.341 $f^{1/2}$ **(10.23)**	1.375 $f^{1/2}$ **(41.25)**	0.0009 $f^{1/2}$ **(0.0270)**	0.0037 $f^{1/2}$ **(0.111)**	0.001 $f^{1/2}$ **(0.03)**	0.0046 $f^{1/2}$ **(0.138)**	f/3200 **(0.281)**	f/200 **(4.5)**

Tablo 4.8 Türkiye için belirlenen sınır değerler

SINIR DEĞERLER	900 MHz		1800 MHz	
	Tek bir cihaz için sınır değer	Ortamın toplam sınır değeri	Tek bir cihaz için sınır değer	Ortamın toplam sınır değeri
Elektrik alan şiddeti (V/m)	10.23	41.25	14.47	58.34
Manyetik alan şiddeti (A/m)	0.027	0.111	0.038	0.157
Güç yoğunluğu (W/m^2)	0.28	4.5	0.56	9

Bilimsel çalışmalar sonucunda insan vücut sıcaklığını 1^oC arttırabilecek alt değerler belirlenmiş, mesleği gereği bu tür ışımaların etkisinde kalanlar için bu değerlerin güç yoğunluğu cinsinden 1/10'unun, genel insan yaşam alanları için ise 5

kat daha ek koruma faktörü eklenerek 1/50'sinin sınır değerler olarak alınması kabul edilmiştir. İnsanlar elektromanyetik alanların yarattığı ışımalara iki şekilde maruz kalmaktadır. Bunların ilki mesleği icabı ışımaya maruz kalmak, ikincisi ise farkında olmadan ışımaya maruz kalmak. Meslek icabı ışımaya maruz kalanlar için kontrollü etkilenme sınır değerleri belirlenmiştir. Buna göre;

Tablo 4.9. Kontrollü etkilenme için sınır değerler

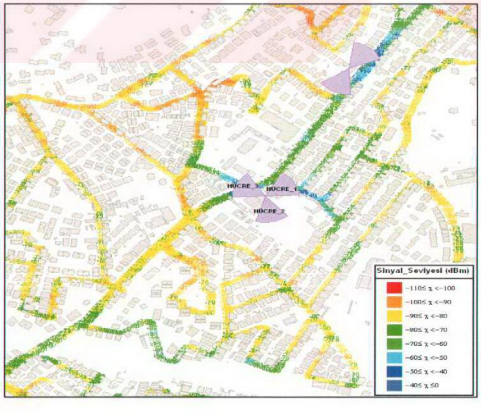
SINIR DEĞERLER	ICNIRP		IEEE / FCC	
	900 MHz	1800 MHz	900 MHz	1800 MHz
Elektrik alan şiddeti (V/m)	90	127.28		
Manyetik alan şiddeti (A/m)	0.24	0.34		
Güç yoğunluğu (W/m^2)	22.5	45	30	50

5. ELEKTROMANYETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ VE YORUMLAR

Bu bölümde, TV ve baz istasyonları için yapılan elektromanyetik alan ölçümlerinin sonuçlarının değerlendirilmesi yapılacaktır.

5.1. GSM İstasyonunun Kapsama Analizi

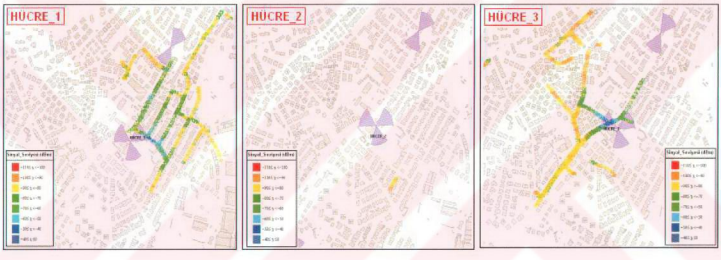
Şekil 5.1'de bir GSM istasyonunun sinyal seviyesi değerlerine göre kapsama haritası verilmiştir. Sinyal seviyesi ölçümleri için Ericsson' un bir ölçüm aracı olan TEMS Investigation kullanılmıştır. Sinyal seviyesi -40 dBm ile – 110 dBm arasında değişmektedir. Kapsama haritası 10'ar dBm' lik aralıklara bölünerek renklendirilmiş ve istasyonun kapsamasının hangi bölgelerde nasıl değişim gösterdiği verilmeye çalışılmıştır. Hücreler arasındaki frekanslarda girişim yaşanmadığı sürece operatörün parametre değerleri ile belirlediği sinyal seviyesi değerine kadar kaliteli konuşma yapılabilir. Genelde -80 dBm' e kadar sinyal seviyesi yeterli kabul edilir. Fakat -80 dBm' den sonra girişime bağlı olarak konuşma kalitesinde bozulmalar ve konuşma kesilmeleri yaşanabilir.



Şekil 5.1. GSM istasyonunun kapsama haritası

5.1.1. GSM Hücrelerinin Kapsama Analizi

Şekil 5.2'de GSM istasyonun 3 sektör olan hücrelerinin ayrı ayrı kapsama haritaları verilmiştir. Hücre bazında ayrım yapabilmek için her bir hücrenin tek olan hücre numarasına göre analiz yapılmıştır. Aşağıdaki hücre kapsama haritalarından da görüleceği üzere, 3. bölümde bahsedilen ve sinyal seviyesini etkileyen faktörler sebebi ile pratikte çok farklı sonuçlar çıkabilmektedir. 2. sektör için alınan ölçümlerde anten yeri ve arazi yapısı sebebi ile gezilen güzergahta az data bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 5.3'te her bir hücre için görüş alanları verilmiştir.



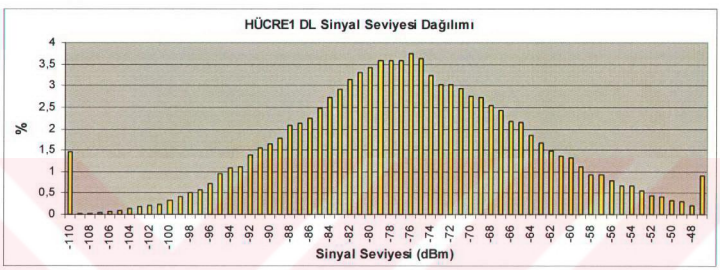
Şekil 5.2. GSM hücrelerinin ayrı ayrı kapsama haritası



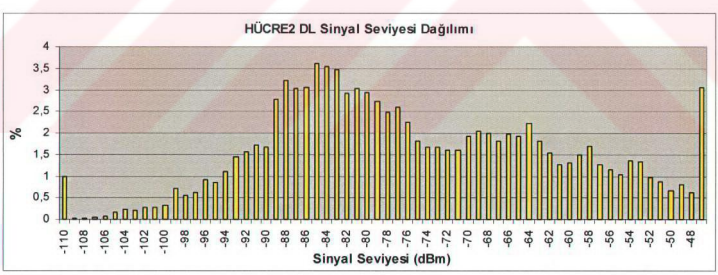
Şekil 5.3. GSM hücrelerinin ayrı ayrı görüş alanı

5.1.2. GSM İstasyonunun DL ve UL Sinyal Seviyesi İncelemesi

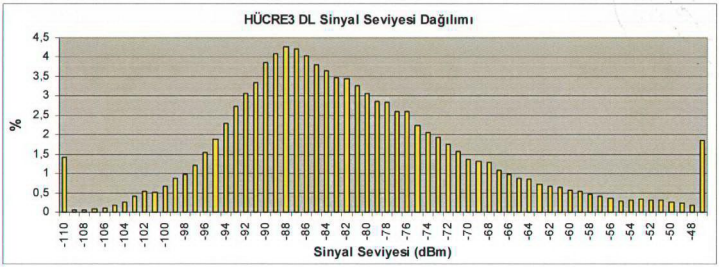
3. bölümde de açıklandığı üzere GSM DL ve UL olmak üzere iki frekans bandı kullanmaktadır. Her iki yönde de sinyal seviyesi farklı dağılımlar göstermektedir. Aşağıda her bir hücre için, DL ve UL olmak üzere sinyal seviyelerinin hangi aralıklarda dağıldığının verildiği grafikler yer almaktadır.



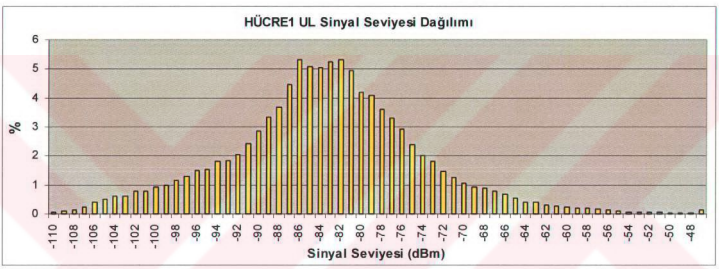
Şekil 5.4. 1. Hücre DL Sinyal Seviyesi Dağılımı



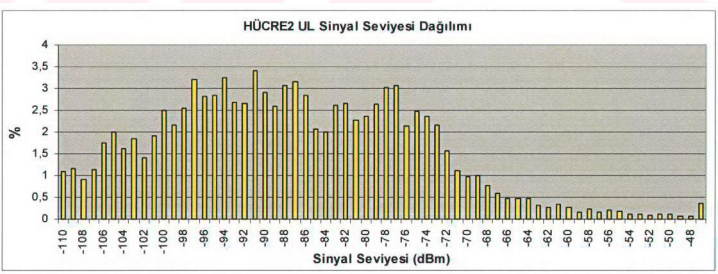
Şekil 5.5. 2. Hücre DL Sinyal Seviyesi Dağılımı



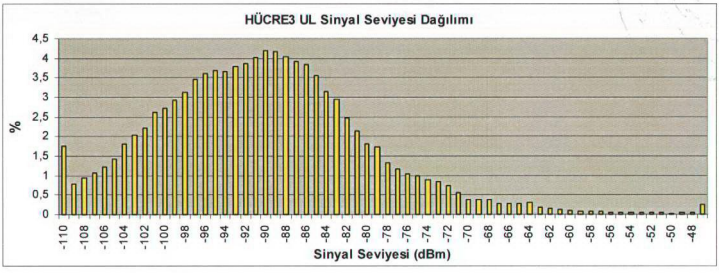
Şekil 5.6. 3. Hücre DL Sinyal Seviyesi Dağılımı



Şekil 5.7. 1. Hücre UL Sinyal Seviyesi Dağılımı

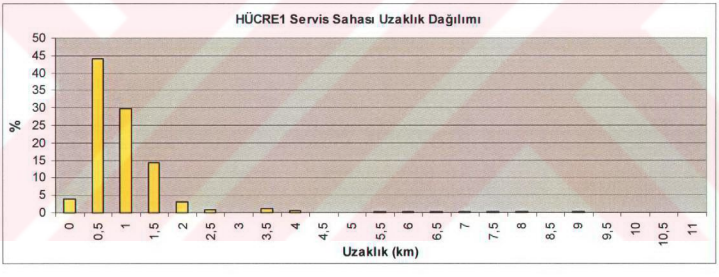


Şekil 5.8. 2. Hücre UL Sinyal Seviyesi Dağılımı

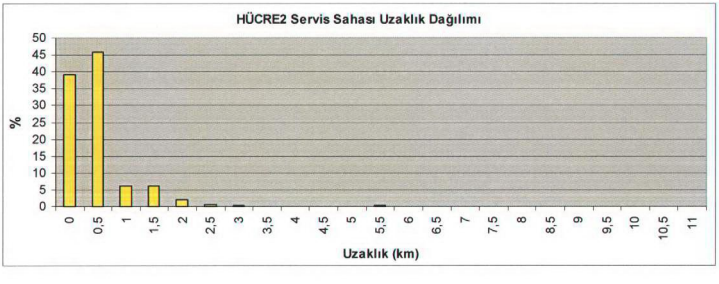


Şekil 5.9. 3. Hücre UL Sinyal Seviyesi Dağılımı

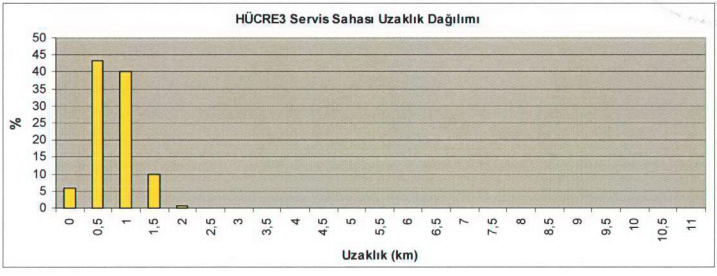
Her bir hücre için uzaklığa göre kapsama analizi yapılarak ekteki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.10. 1. Hücre için Sinyal Seviyesi'nin Uzaklığa göre Dağılımı



Şekil 5.11. 2. Hücre için Sinyal Seviyesi'nin Uzaklığa göre Dağılımı



Şekil 5.12. 3. Hücre için Sinyal Seviyesi'nin Uzaklığa göre Dağılımı

5.2. GSM İstasyonunun Bina İçi ve Dışı Ölçüm Sonuçları

Kapsama analizi yapılan istasyonun her hücresi için üç değişik uzaklıkta elektromanyetik alan şiddeti ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca binanın çeşitli yerlerinden alınan bina içi ölçümleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Bina dışında ölçülen ve hesaplanan elektrik ve manyetik alan şiddeti değerleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

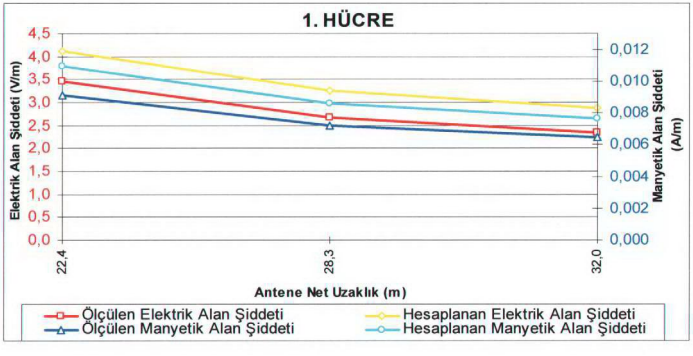
Tablo 5.1. Bina dışı ölçüm sonuçları.

Hücre İsmi	Çıkış Gücü (Watt)	Anten Kazancı (dBi)	Anten Yüksekliği (m)	Antene Uzaklık (m)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Güvenlik Mesafesi (m)
1	7,94	15,5	20	10	22,4	0,0091	3,460	4,11	0,0109	9,0
	7,94	15,5	20	20	28,3	0,0072	2,680	3,25	0,0086	9,0
	7,94	15,5	20	25	32,0	0,0065	2,340	2,87	0,0076	9,0
2	7,94	15,5	20	10	22,4	0,0064	2,450	4,11	0,0109	9,0
	7,94	15,5	20	20	28,3	0,0038	1,460	3,25	0,0086	9,0
	7,94	15,5	20	25	32,0	0,0033	1,280	2,87	0,0076	9,0
3	7,94	15,5	20	10	22,4	0,0040	1,510	4,11	0,0109	9,0
	7,94	15,5	20	20	28,3	0,0035	1,330	3,25	0,0086	9,0
	7,94	15,5	20	25	32,0	0,0024	0,890	2,87	0,0076	9,0

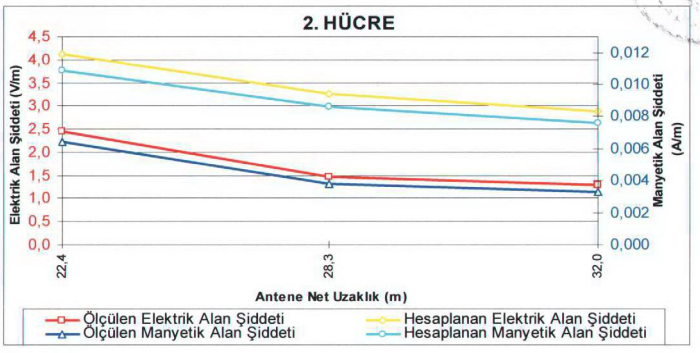
Tablo 5.2. Bina içi ölçüm sonuçları.

Ölçüm Yeri	Ölçüm No	Elektrik Alan (V/m)
1. Balkon	1	1,3
	2	1,54
	3	1,57
1. Oda İçi	4	1,35
	5	1,21
	6	1,17
2. Oda İçi	7	1,52
	8	1,84
	9	1,9
3. Oda İçi	10	0,75
	11	0,88
	12	0,88
2. Balkon	13	1,81
	14	1,47
	15	1,28
Bina İçi	16	0,21
	17	0,24
	18	0,23

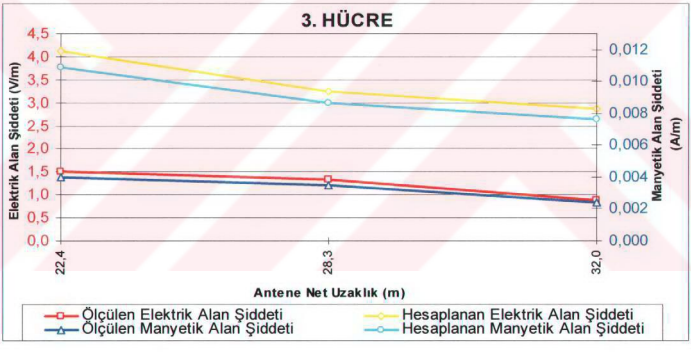
İstasyon için alınan elektrik ve manyetik alan ölçümlerinin teoride hesaplanan değerler ile karşılaştırıldığı grafikler ekte yer almaktadır. Üç hücrede de ölçülen değerler hesaplanan değerlerin altında çıkmıştır.



Şekil 5.13. 1. Hücre için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri



Şekil 5.14. 2. Hücre için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri

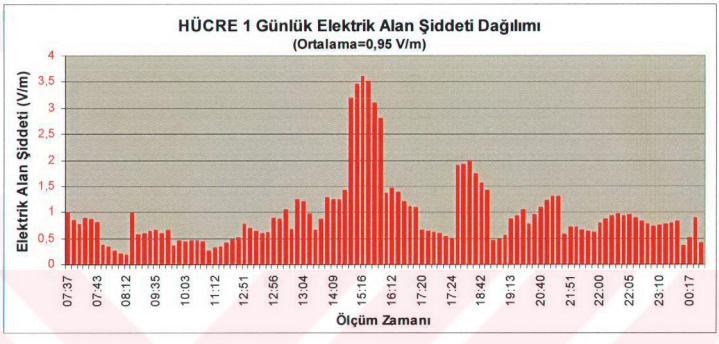


Şekil 5.15. 3. Hücre için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri

5.3. GSM Hücresi için Alınan 1 Günlük Ölçüm İncelemesi

Elektromanyetik alan şiddeti gün içinde hücrede yaşanan trafik yoğunluğa göre değişim gösterebilmektedir. Bu durumun analizinin yapılabilmesi için belirlenen bir hücreden sabah 07:30 ve gece 00:20 saatleri arasında sürekli olarak elektrik alan

şiddeti ölçümü alınmıştır. Beklendiği üzere günün belirli saatlerinde azalmalar ve artmalar görülmüştür. Şekil 5.16'da hücrenin saatlere göre elektrik alan şiddeti değişimi verilmiştir.



Şekil 5.16. Saate göre Elektrik Alan Şiddeti Değeri Değişimi

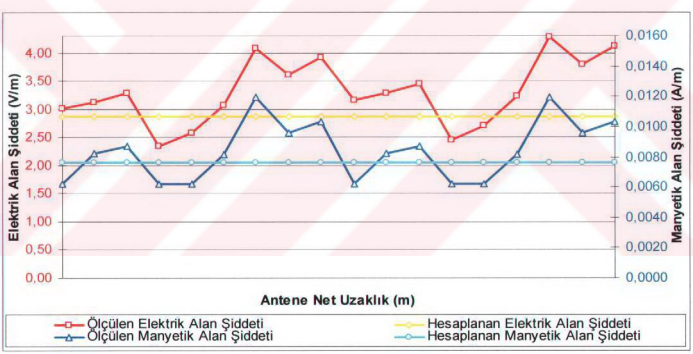
5.4. TV İstasyonu Elektrik ve Manyetik Alan İncelemesi

Örnek bir GSM istasyonunda yapılan incelemenin yanında, örnek iki TV istasyonu seçilerek ölçümler yapılmıştır. Burada alınan ölçümler istasyonun önünde ve ayrıca 20^{o} sağında ve solunda alınmıştır. TV sistemlerinde yapılan ölçümlerde sonuçlar arasında tutarlılık görülmekte olup teori ve pratikteki değerler birbirine daha yakın çıkmaktadır. Yapılan ölçümlerde elektrik alan şiddeti değerlerinin hesaplananın altında kalmasına rağmen manyetik alan şiddetinin bir miktar üzerinde yer aldığı görülmüştür. TV sistemlerinde, GSM' deki gibi güç ayarlama parametreleri kullanılmamakta ve sürekli bir yayın verilmektedir. Şekil 5.17'de yapılan ölçüm sonuçları ve hesaplanan değerler yer almaktadır.

Tablo 5.3. TV istasyonları ölçüm sonuçları

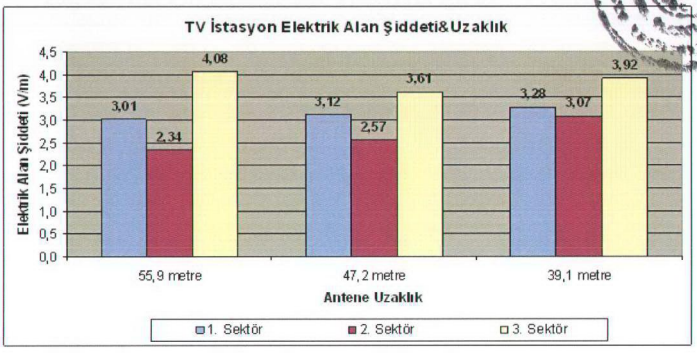
İstasyon İsmi	Sektor İsmi	Çıkış Gücü (W)	Kullanılan Frekans (MHz)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Güç Yoğunluğu (W/m2)	Anten Kazancı (dBi)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Güvenlik Mesafesi (m)
1	1. Sektör	33,3	815,25	39,1	0,0062	3,01	0,0187	11,00	0,0076	2,87	11,52
		33,3	815,25	39,1	0,0082	3,12	0,0257	11,00	0,0076	2,87	11,52
		33,3	815,25	39,1	0,0087	3,28	0,0286	11,00	0,0076	2,87	11,52
	2. Sektör	33,3	815,25	39,1	0,0062	2,34	0,0145	11,00	0,0076	2,87	11,52
		33,3	815,25	39,1	0,0062	2,57	0,0159	11,00	0,0076	2,87	11,52
		33,3	815,25	39,1	0,0082	3,07	0,0251	11,00	0,0076	2,87	11,52
	3. Sektör	33,3	815,25	39,1	0,0119	4,08	0,0487	11,00	0,0076	2,87	11,52
		33,3	815,25	39,1	0,0096	3,61	0,0346	11,00	0,0076	2,87	11,52
		33,3	815,25	39,1	0,0103	3,92	0,0404	11,00	0,0076	2,87	11,52
2	1. Sektör	33,3	767,25	39,1	0,0062	3,16	0,0196	11,00	0,0076	2,87	11,87
		33,3	767,25	39,1	0,0082	3,28	0,0270	11,00	0,0076	2,87	11,87
		33,3	767,25	39,1	0,0087	3,44	0,0300	11,00	0,0076	2,87	11,87
	2. Sektör	33,3	767,25	39,1	0,0062	2,46	0,0152	11,00	0,0076	2,87	11,87
		33,3	767,25	39,1	0,0062	2,70	0,0167	11,00	0,0076	2,87	11,87
		33,3	767,25	39,1	0,0082	3,22	0,0264	11,00	0,0076	2,87	11,87
	3. Sektör	33,3	767,25	39,1	0,0119	4,28	0,0511	11,00	0,0076	2,87	11,87
		33,3	767,25	39,1	0,0096	3,79	0,0363	11,00	0,0076	2,87	11,87
		33,3	767,25	39,1	0,0103	4,12	0,0424	11,00	0,0076	2,87	11,87

Şekil 5.18'de ölçülen elektrik ve manyetik alan ölçümlerinin teoride hesaplanan değerler ile karşılaştırıldığı grafik yer almaktadır.

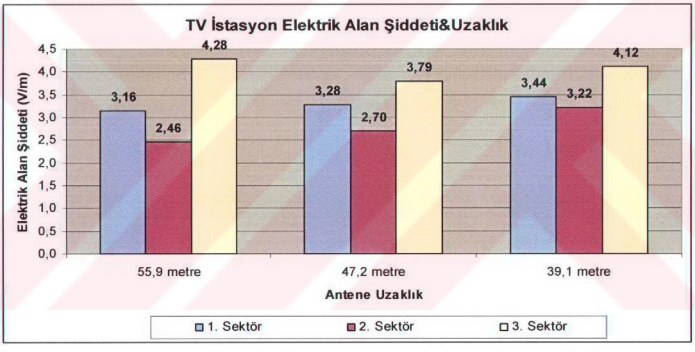


Şekil 5.17. TV istasyonları için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri

2 TV istasyonu için çıkış gücü, frekansı ve anten kazancı eşit olan her sektörün elektrik alan şiddeti değerlerini içeren grafik Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.18. 1. TV İstasyonu Uzaklığa göre Sektörel Elektrik Alan Şiddeti Dağılımı



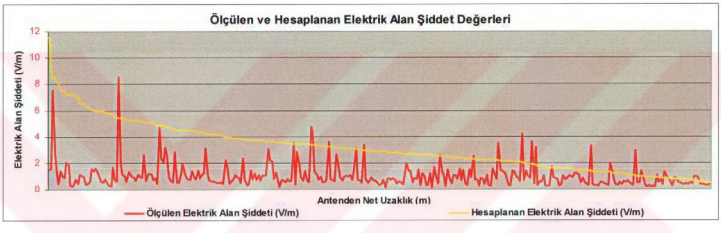
Şekil 5.19. 2. TV İstasyonu Uzaklığa göre Sektörel Elektrik Alan Şiddeti Dağılımı

5.5. GSM Ölçüm Sonuçlarının Analizi

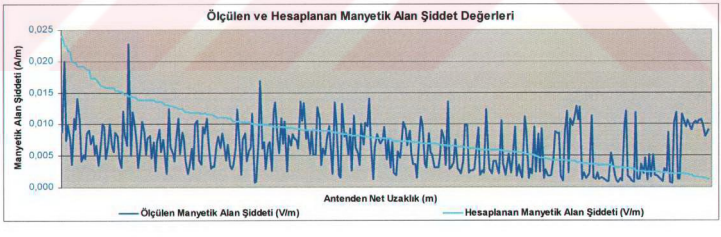
Bu bölümde 50 istasyondan alınan toplam 680 ölçüm sonuçları genel olarak analiz edilecek ve ölçülen değerler hesaplanan değerler ile karşılaştırılacaktır. Sonrasında veriler anten kazancına göre sınıflandırılacak, STATGRAPHICS programı yardımı ile Multiple Regression ve Polynomial Regression analizleri

yapılarak elektrik ve manyetik alan şiddeti ve değişkenlerinin birbirlerine etkileri formülüze edilecektir. Ayrıca verilen tüm tabloların içinde ölçüm sonuçlarının yanı sıra hesaplanan elektrik ve manyetik alan şiddetleri ve güvenlik mesafesi değerleri de yer alacaktır. Bu değerler tablolardaki değişkenlere göre formülüze edilip hesaplanmış olup ayrıca hesaplanmalarına yer verilmeyecektir.

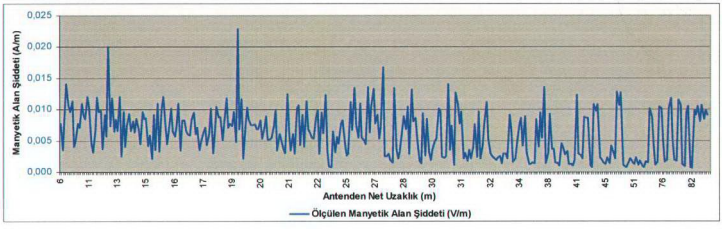
Teoride antenden uzaklaştıkça elektrik ve manyetik alan şiddeti değerlerinin orantılı bir şekilde azalmasını bekleriz. Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de tüm ölçüm ve hesaplanan alan şiddeti değerlerinin uzaklığa göre değişimi görülmektedir.



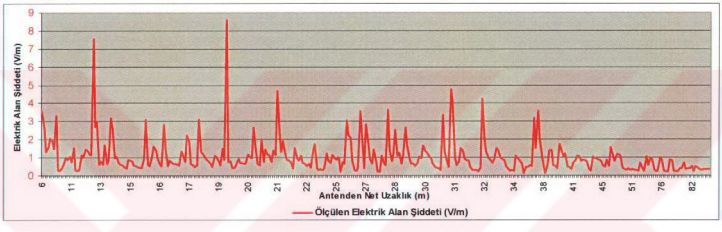
Şekil 5.20. Ölçülen ve Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti Değişimi



Şekil 5.21. Ölçülen ve Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti Değişimi

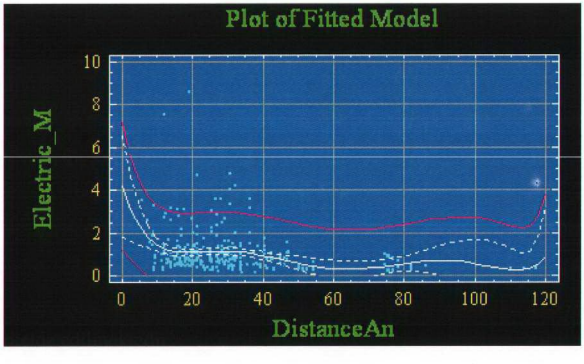


Şekil 5.22. Uzaklığa göre Elektrik Alan Şiddeti Değişimi



Şekil 5.23. Uzaklığa göre Manyetik Alan Şiddeti Değişimi

Tüm veriler için STATGRAPHICS programı yardımı ile Polynomial Regression yapacak olursak elektrik ve manyetik alan şiddeti değerleri için Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'teki gibi bir model oluşturulmaktadır. Ayrıca (5.1) ve (5.2) formülleri elde edilmektedir.



Şekil 5.24. Tüm verilerden elde edilen Elektrik Alan ve Uzaklık Analizi

% 95 güvenilirlik ve 0,923106 hata payı ile % 8,15 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 4{,}18382 - 0{,}511163 * d + 0{,}0317945 * d^2 - 0{,}000930456 * d^3 + 0{,}0000134459 * d^4 - 9{,}32489E\text{-}8 * d^5 + 2{,}47896E\text{-}10 * d^6 \quad (5.1)$$

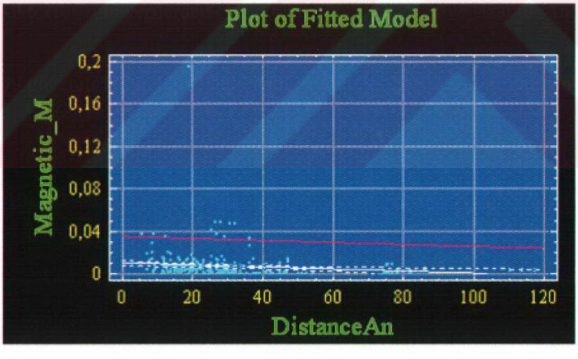
H_m = Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)

E_m = Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)

d = Antene Net Uzaklık (metre)

P = Çıkış Gücü (Watt)

G = Anten Kazancı (dBi)

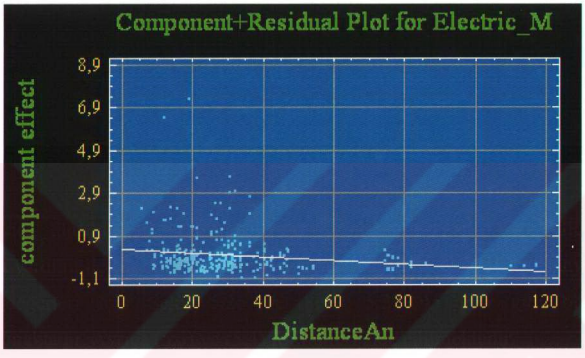


Şekil 5.25. Tüm verilerden elde edilen Manyetik Alan ve Uzaklık Analizi

% 99 güvenilirlik ve 0,0128006 hata payı ile % 2,45 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = 0{,}0101962 - 0{,}0000983349 * d \quad (5.2)$$

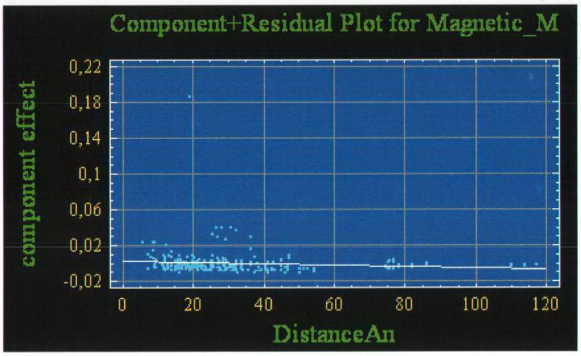
Ayrıca tüm değişkenlerin analizinin yapılabilmesi için STATGRAPHICS programı yardımı ile Multiple Regression yapacak olursak elektrik ve manyetik alan şiddeti değerleri için Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'teki gibi gibi bir model oluşturulmaktadır. Ayrıca (5.3) ve (5.4) formülleri elde edilmektedir.



Şekil 5.26. Tüm verilerden Elektrik Alan Şiddetinin Değişkenlerinin Analizi

% 95 güvenilirlik ve 0,909353 hata payı ile % 10,07 oranında datanın sağladığı formül;

$$\mathbf{E_m = 1{,}76042 - 0{,}009353^{*}\ d + 0{,}0672305^{*}\ P - 0{,}0546726\ G} \qquad \mathbf{(5.3)}$$



Şekil 5.27. Tüm verilerden Manyetik Alan Şiddetinin Değişkenlerinin Analizi

% 95 güvenilirlik ve 0,0126516 hata payı ile % 5,28 oranında datanın sağladığı formül;

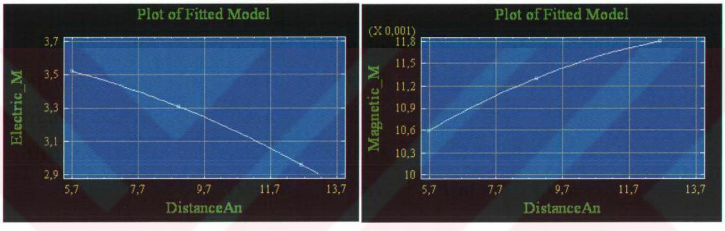
$$H_m = 0{,}0198768 - 0{,}0000693602*d + 0{,}00063343*P - 0{,}000954916\ G \qquad (5.4)$$

Yapılan analizlerde izlenen yol öncelikle elektrik ve manyetik alan şiddeti değerlerinin uzaklıkla ilişkisini kurmaya çalışmak ve sonrasında güç ve kazanç değişkenlerini de hesaba katarak daha genel bir formül çıkarmaktır. Analiz sırasında izlenen yol, en yüksek güvenilirlikte, en az hata payı ile maksimum verinin sağlayacağı bir formül elde etmektir. Verilerin çok fazla oluşu sebebi ile değişkenler arasında korelasyon kurmak güçleşmektedir. Bu sebeple elektrik ve manyetik alanı etkileyen değişkenlerden, anten kazancına göre bir gruplama yapılacak ve incelemeler güç ve uzaklık değişkenleri için yapılacaktır. Gücün sabit ve sadece uzaklığın değiştiği veriler için sadece Polynomial Regression yapılacaktır.

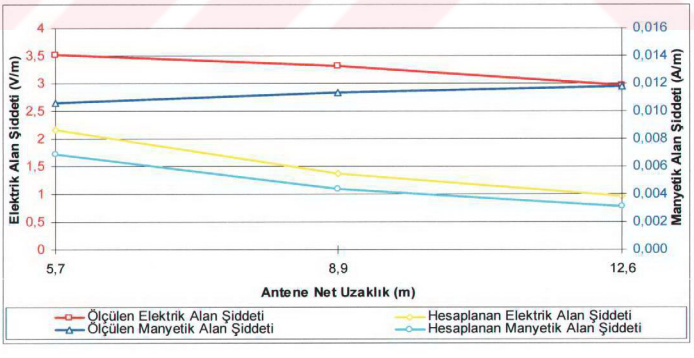
5.5.1 Kazancı 5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

Tablo 5.5. 5 dBi Kazançlı Anten Verileri

Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
5	1,58	5,7	3,52	2,17	0,0106	0,0069	1,2
5	1,58	8,9	3,31	1,37	0,0113	0,0044	1,2
5	1,58	12,6	2,96	0,97	0,0118	0,0031	1,2



Şekil 5.28. 5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi



Şekil 5.29 5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri

% 100 güvenilirlikle % 100 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 3{,}68107 - 0{,}00432702 * d + 0{,}00419849 * d^2 \quad (5.5)$$

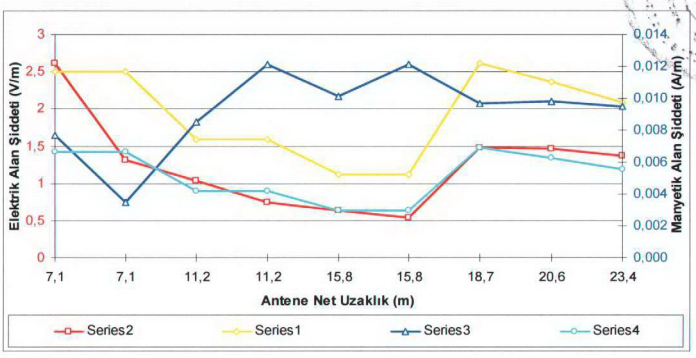
% 100 güvenilirlikle % 100 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = 0{,}00873837 + 0{,}000395674 * d - 0{,}0000121181 * d^2 \quad (5.6)$$

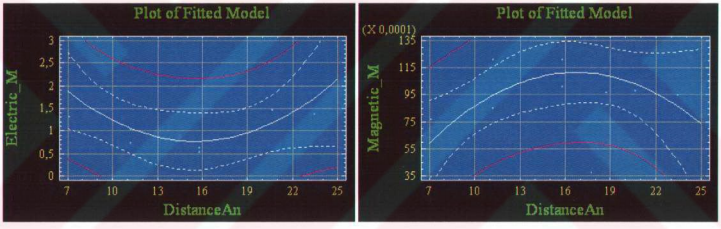
5.5.2 Kazancı 9 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

Tablo 5.6. 9 dBi Kazançlı Anten Verileri

Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
9	1,32	7,1	2,61	2,51	0,0077	0,0067	1,7
9	1,32	7,1	1,32	2,51	0,0035	0,0067	1,7
9	1,32	11,2	1,04	1,59	0,0085	0,0042	1,7
9	1,32	11,2	0,74	1,59	0,0121	0,0042	1,7
9	1,32	15,8	0,63	1,12	0,0101	0,0030	1,7
9	1,32	15,8	0,54	1,12	0,0121	0,0030	1,7
9	10,00	18,7	1,48	2,61	0,0097	0,0069	4,8
9	10,00	20,6	1,46	2,37	0,0098	0,0063	4,8
9	10,00	23,4	1,37	2,08	0,0095	0,0055	4,8



Şekil 5.30. 9 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri



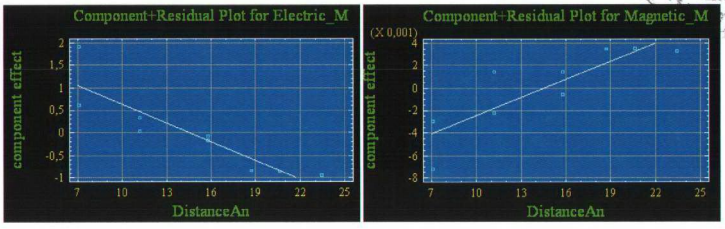
Şekil 5.31. 9 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi

%90 güvenilirlik ve 0,507855 hata payı ile %51,00 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 4{,}46908 - 0{,}47674 * d + 0{,}0153612 * d^2 \quad (5.7)$$

%90 güvenilirlik ve 0,00189398 hata payı ile %59,81 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = -0{,}0043557 + 0{,}001855 * d - 0{,}000055518 * d^2 \quad (5.8)$$



Şekil 5.32. 9 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi

% 90 güvenilirlik ve 0,620189 hata payı ile % 59,05 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 2{,}48787 - 0{,}139692 * d + 0{,}186835 * P \quad (5.9)$$

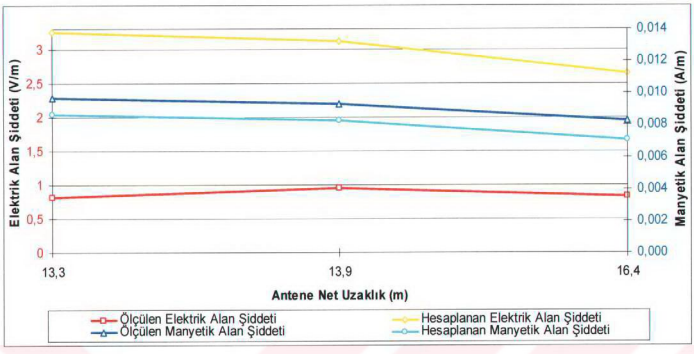
% 90 güvenilirlik ve 0,00214545 hata payı ile % 48,43 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = 0{,}00357597 + 0{,}000536725 * d - 0{,}000512685 * P \quad (5.10)$$

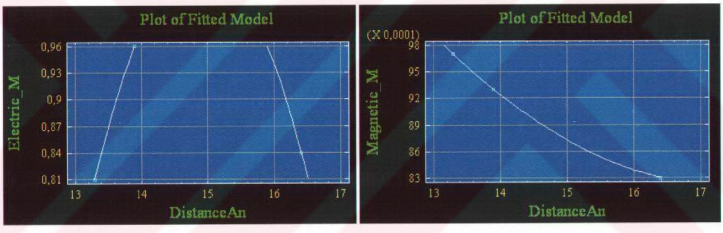
5.5.3 Kazancı 10 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

Tablo 5.7. 10 dBi Kazançlı Anten Verileri

Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
10	6,31	13,3	0,81	3,26	0,0097	0,0087	4,3
10	6,31	13,9	0,96	3,12	0,0093	0,0083	4,3
10	6,31	16,4	0,84	2,65	0,0083	0,0070	4,3



Şekil 5.33. 10 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri



Şekil 5.34. 10 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi

% 100 güvenilirlikle % 100 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = -20{,}2864 + 2{,}86471 * d - 0{,}096129 * d^2 \quad (5.11)$$

% 100 güvenilirlikle % 100 oranında datanın sağladığı formül;

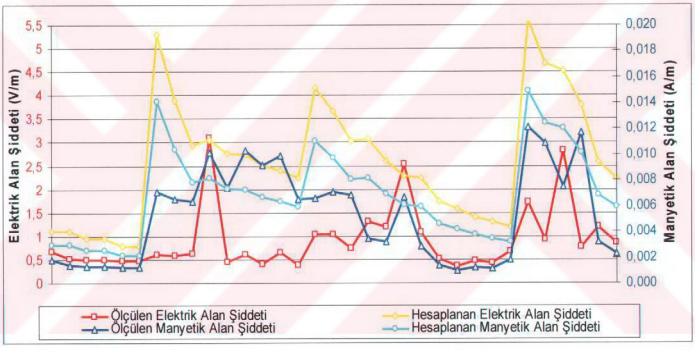
$$H_m = 0{,}0344695 - 0{,}00300645 * d + 0{,}0000860215 * d^2 \quad (5.12)$$

5.5.4 Kazancı 12,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

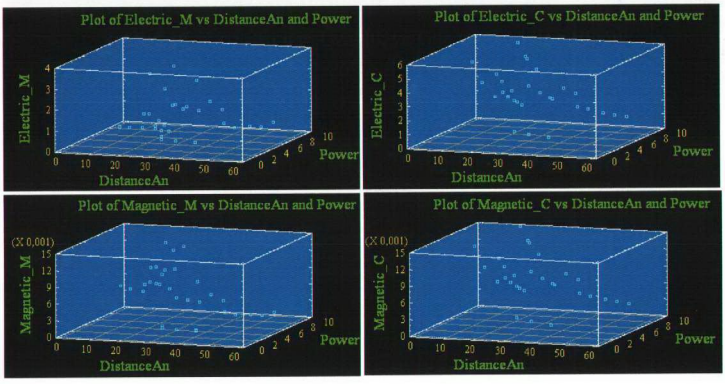
Tablo 5.8. 12,5 dBi Kazançlı Anten Verileri

Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
12,5	2,00	29,3	0,67	1,11	0,0018	0,0030	3,2
12,5	2,00	29,3	0,52	1,11	0,0014	0,0030	3,2
12,5	2,00	34,0	0,49	0,96	0,0013	0,0025	3,2
12,5	2,00	34,0	0,49	0,96	0,0013	0,0025	3,2
12,5	2,00	40,7	0,47	0,80	0,0012	0,0021	3,2
12,5	2,00	40,7	0,48	0,80	0,0013	0,0021	3,2
12,5	4,68	9,4	0,61	5,29	0,0071	0,0140	4,9
12,5	4,68	12,8	0,59	3,90	0,0065	0,0103	4,9
12,5	4,68	17,0	0,64	2,94	0,0063	0,0078	4,9
12,5	5,50	17,7	3,11	3,06	0,0101	0,0081	5,3
12,5	5,50	19,6	0,45	2,76	0,0074	0,0073	5,3
12,5	5,50	19,7	0,61	2,75	0,0103	0,0073	5,3
12,5	5,50	21,5	0,41	2,52	0,0091	0,0067	5,3
12,5	5,50	22,7	0,66	2,39	0,0099	0,0063	5,3
12,5	5,50	24,2	0,39	2,24	0,0065	0,0059	5,3
12,5	6,31	13,9	1,04	4,17	0,0066	0,0111	5,7
12,5	6,31	15,8	1,03	3,67	0,0071	0,0097	5,7
12,5	6,31	19,1	0,75	3,04	0,0068	0,0081	5,7
12,5	7,94	21,2	1,31	3,07	0,0035	0,0081	6,4
12,5	7,94	25,0	1,21	2,60	0,0032	0,0069	6,4
12,5	7,94	28,4	2,53	2,29	0,0067	0,0061	6,4
12,5	7,94	29,2	1,09	2,23	0,0029	0,0059	6,4
12,5	7,94	37,5	0,53	1,73	0,0014	0,0046	6,4

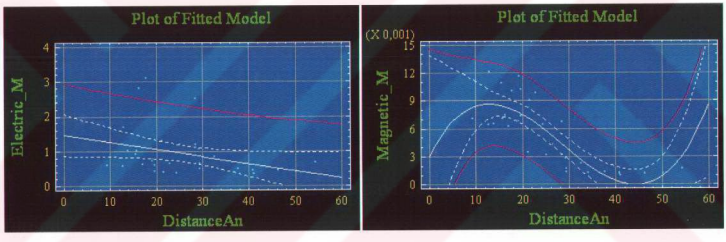
12,5	7,94	41,0	0,36	1,59	0,0010	0,0042	6,4
12,5	7,94	46,1	0,47	1,41	0,0012	0,0037	6,4
12,5	7,94	50,0	0,44	1,30	0,0012	0,0035	6,4
12,5	7,94	54,1	0,69	1,20	0,0018	0,0032	6,4
12,5	10,00	13,0	1,71	5,62	0,0121	0,0149	7,1
12,5	10,00	15,6	0,93	4,68	0,0109	0,0124	7,1
12,5	10,00	16,2	2,82	4,52	0,0075	0,0120	7,1
12,5	10,00	19,2	0,78	3,80	0,0117	0,0101	7,1
12,5	10,00	28,3	1,21	2,58	0,0032	0,0068	7,1
12,5	10,00	32,6	0,87	2,24	0,0023	0,0059	7,1



Şekil 5.35. 12,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri



Şekil 5.36. 12,5 dBi için Uzaklık ve Güç Değişkenleri Bloğu



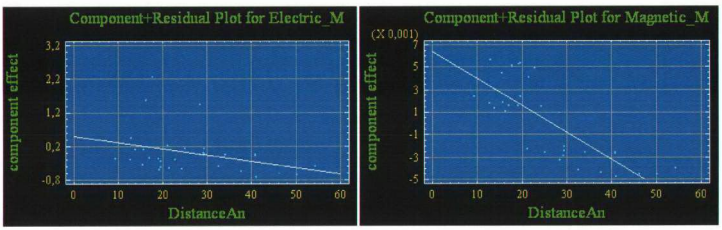
Şekil 5.37. 12,5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi

%90 güvenilirlik ve 0,658576 hata payı ile %11,53 oranında datanın sağladığı formül;

$$\mathbf{E_m = 1{,}46291 - 0{,}0203869 * d} \qquad \mathbf{(5.13)}$$

%95 güvenilirlik ve 0,0020702 hata payı ile %70,84 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = 0{,}00303606 + 0{,}000964976*d - 0{,}000048324*d^2 + 5{,}63425E^{-7}*d^3 \quad (5.14)$$



Şekil 5.38. 12,5 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi

% 90 güvenilirlik ve 0,620189 hata payı ile % 24,07 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 0{,}828577 - 0{,}018408* d + 0{,}0916483* P \quad (5.15)$$

% 90 güvenilirlik ve 0,00219633 hata payı ile % 66,04 oranında datanın sağladığı formül;

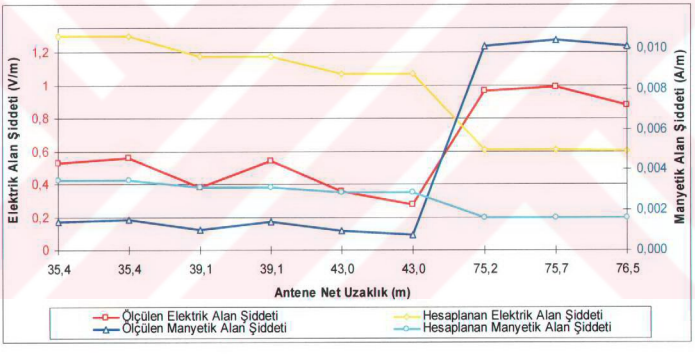
$$H_m = 0{,}00958507 - 0{,}000240349*d + 0{,}000322357*P \quad (5.16)$$

5.5.5 Kazancı 13 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

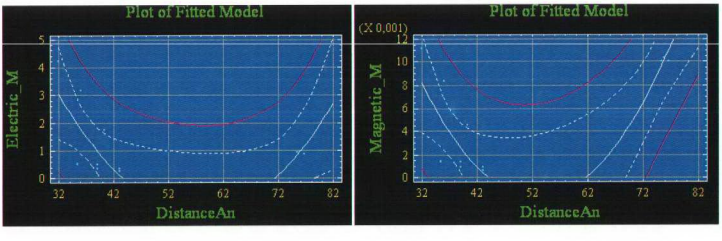
Tablo 5.9. 13 dBi Kazançlı Anten Verileri

Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
13	3,55	35,4	0,53	1,30	0,0014	0,0035	4,5

13	3,55	35,4	0,56	1,30	0,0015	0,0035	4,5
13	3,55	39,1	0,38	1,18	0,0010	0,0031	4,5
13	3,55	39,1	0,54	1,18	0,0014	0,0031	4,5
13	3,55	43,0	0,36	1,07	0,0010	0,0028	4,5
13	3,55	43,0	0,28	1,07	0,0007	0,0028	4,5
13	3,55	75,2	0,97	0,61	0,0101	0,0016	4,5
13	3,55	75,7	0,99	0,61	0,0104	0,0016	4,5
13	3,55	76,5	0,88	0,60	0,0101	0,0016	4,5
13	7,08	32,0	4,23	2,03	0,0112	0,0054	6,4
13	7,08	36,1	3,17	1,81	0,0084	0,0048	6,4
13	7,08	40,3	1,75	1,61	0,0046	0,0043	6,4



Şekil 5.39. 13 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri



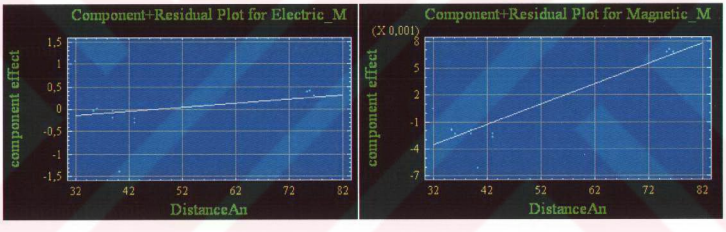
Şekil 5.40. 13 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi

%99 güvenilirlik ve 1,01464 hata payı ile %45,74 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 20{,}6276 - 0{,}760628 * d + 0{,}00660978 * d^2 \quad (5.17)$$

%95 güvenilirlik ve 0,00266984 hata payı ile %70,80 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = 0{,}0621735 - 0{,}00241811 * d + 0{,}0000228556 * d^2 \quad (5.18)$$



Şekil 5.41. 13 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi

% 90 güvenilirlik ve 0,619868 hata payı ile % 79,75 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = -2{,}4425 + 0{,}00897453 * d + 0{,}729975 * P \quad (5.19)$$

% 99 güvenilirlik ve 0,00218214 hata payı ile % 80,49 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = -0{,}0148626 + 0{,}000226799 * d + 0{,}00208111 * P \quad (5.20)$$

5.5.6 Kazancı 15,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

Tablo 5.10. 15,5 dBi Kazançlı Anten Verileri

Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
15,5	0,66	20,4	2,02	1,30	0,0054	0,0034	2,6
15,5	0,66	21,5	1,53	1,23	0,0041	0,0033	2,6
15,5	0,66	28,3	1,39	0,94	0,0037	0,0025	2,6
15,5	0,66	28,3	0,78	0,94	0,0021	0,0025	2,6
15,5	0,66	32,0	0,97	0,83	0,0026	0,0022	2,6
15,5	0,66	32,0	1,33	0,83	0,0029	0,0022	2,6
15,5	2,82	109,7	0,32	0,50	0,0081	0,0013	5,4
15,5	2,82	113,4	0,33	0,48	0,0085	0,0013	5,4
15,5	2,82	117,2	0,35	0,47	0,0091	0,0012	5,4
15,5	2,95	30,4	0,44	1,84	0,0024	0,0049	5,5
15,5	2,95	31,6	0,32	1,77	0,0024	0,0047	5,5
15,5	2,95	33,5	0,27	1,67	0,0017	0,0044	5,5
15,5	3,09	13,9	0,48	4,12	0,0068	0,0109	5,6
15,5	3,09	14,9	0,51	3,86	0,0058	0,0102	5,6
15,5	3,09	16,4	0,65	3,50	0,0061	0,0093	5,6
15,5	3,09	17,2	0,55	3,33	0,0061	0,0088	5,6
15,5	3,09	19,8	0,71	2,89	0,0075	0,0077	5,6
15,5	3,09	20,5	0,75	2,80	0,0073	0,0074	5,6
15,5	3,16	13,9	0,61	4,17	0,0063	0,0111	5,7
15,5	3,16	13,9	0,68	4,17	0,0081	0,0111	5,7
15,5	3,16	13,9	0,58	4,17	0,0085	0,0111	5,7

15,5	3,16	16,4	0,65	3,54	0,0066	0,0094	5,7
15,5	3,16	16,4	0,73	3,54	0,0082	0,0094	5,7
15,5	3,16	16,4	0,57	3,54	0,0084	0,0094	5,7
15,5	3,16	19,8	0,65	2,92	0,0069	0,0078	5,7
15,5	3,16	19,8	0,91	2,92	0,0084	0,0078	5,7
15,5	3,16	19,8	0,66	2,92	0,0076	0,0078	5,7
15,5	3,55	23,5	0,31	2,61	0,0036	0,0069	6,0
15,5	3,55	25,1	0,24	2,45	0,0029	0,0065	6,0
15,5	3,55	27,5	0,22	2,24	0,0026	0,0059	6,0
15,5	3,55	75,2	0,87	0,82	0,0087	0,0022	6,0
15,5	3,55	75,7	0,88	0,81	0,0102	0,0022	6,0
15,5	3,55	76,5	0,81	0,80	0,0118	0,0021	6,0
15,5	3,55	78,1	0,38	0,79	0,0116	0,0021	6,0
15,5	3,55	78,1	0,38	0,79	0,0107	0,0021	6,0
15,5	3,55	82,0	0,41	0,75	0,0095	0,0020	6,0
15,5	3,55	82,0	0,39	0,75	0,0105	0,0020	6,0
15,5	3,55	86,0	0,51	0,71	0,0099	0,0019	6,0
15,5	3,55	86,0	0,43	0,71	0,0091	0,0019	6,0
15,5	3,63	8,6	1,91	7,23	0,0107	0,0192	6,1
15,5	3,63	8,6	2,06	7,23	0,0141	0,0192	6,1
15,5	3,63	12,2	1,12	5,09	0,0057	0,0135	6,1
15,5	3,63	12,2	1,18	5,09	0,0092	0,0135	6,1
15,5	3,63	16,6	0,73	3,76	0,0071	0,0100	6,1
15,5	3,63	16,6	1,18	3,76	0,0061	0,0100	6,1
15,5	3,63	109,7	0,34	0,57	0,0105	0,0015	6,1
15,5	3,63	113,4	0,35	0,55	0,0107	0,0015	6,1
15,5	3,63	117,2	0,37	0,53	0,0099	0,0014	6,1
15,5	3,98	12,1	1,124	5,39	0,0119	0,0143	6,4
15,5	3,98	12,1	1,018	5,39	0,0097	0,0143	6,4
15,5	3,98	14,9	0,879	4,38	0,0096	0,0116	6,4
15,5	3,98	14,9	0,811	4,38	0,0085	0,0116	6,4
15,5	3,98	18,6	0,576	3,50	0,0074	0,0093	6,4

15,5	3,98	18,6	0,783	3,50	0,0078	0,0093	6,4
15,5	3,98	30,4	1,37	2,14	0,0019	0,0057	6,4
15,5	3,98	30,4	0,95	2,14	0,0053	0,0057	6,4
15,5	3,98	30,4	1,26	2,14	0,0035	0,0057	6,4
15,5	3,98	31,6	1,34	2,06	0,0018	0,0055	6,4
15,5	3,98	31,6	0,93	2,06	0,0035	0,0055	6,4
15,5	3,98	31,6	0,84	2,06	0,0021	0,0055	6,4
15,5	3,98	33,5	1,38	1,94	0,0014	0,0051	6,4
15,5	3,98	33,5	1,02	1,94	0,0029	0,0051	6,4
15,5	3,98	33,5	0,83	1,94	0,0021	0,0051	6,4
15,5	3,98	46,1	0,53	1,41	0,0014	0,0037	6,4
15,5	3,98	46,1	0,86	1,41	0,0023	0,0037	6,4
15,5	3,98	50,0	0,34	1,30	0,0009	0,0035	6,4
15,5	3,98	50,0	0,31	1,30	0,0008	0,0035	6,4
15,5	3,98	54,1	0,38	1,20	0,0010	0,0032	6,4
15,5	3,98	54,1	0,28	1,20	0,0007	0,0032	6,4
15,5	4,17	9,2	0,3	7,23	0,0041	0,0192	6,5
15,5	4,17	9,2	0,25	7,23	0,0051	0,0192	6,5
15,5	4,17	11,7	0,31	5,71	0,0046	0,0152	6,5
15,5	4,17	11,7	0,26	5,71	0,0032	0,0152	6,5
15,5	4,17	13,0	0,64	5,11	0,0026	0,0136	6,5
15,5	4,17	13,9	3,18	4,79	0,0041	0,0127	6,5
15,5	4,17	13,9	2,63	4,79	0,0075	0,0127	6,5
15,5	4,17	14,9	0,56	4,48	0,0042	0,0119	6,5
15,5	4,17	14,9	0,48	4,48	0,0021	0,0119	6,5
15,5	4,17	15,6	3,11	4,26	0,0033	0,0113	6,5
15,5	4,17	16,3	0,54	4,09	0,0034	0,0109	6,5
15,5	4,17	17,0	2,21	3,93	0,0035	0,0104	6,5
15,5	4,17	18,4	1,11	3,61	0,0118	0,0096	6,5
15,5	4,17	21,6	0,95	3,09	0,0113	0,0082	6,5
15,5	4,17	25,3	0,76	2,63	0,0112	0,0070	6,5
15,5	4,17	25,7	0,28	2,59	0,0051	0,0069	6,5
15,5	4,17	25,7	0,31	2,59	0,0055	0,0069	6,5

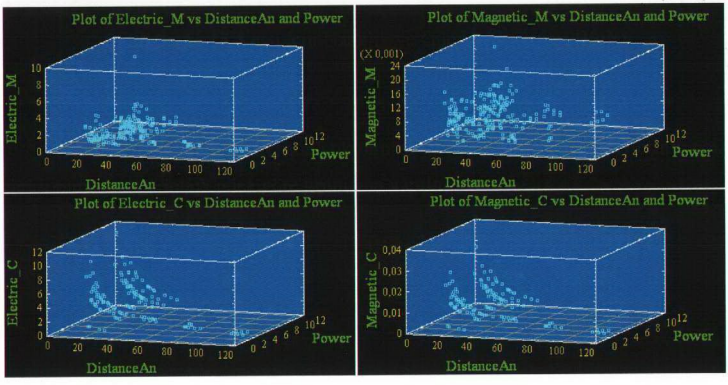
15,5	4,17	29,4	0,71	2,26	0,0094	0,0060	6,5
15,5	4,17	33,8	0,64	1,97	0,0089	0,0052	6,5
15,5	4,17	38,3	0,59	1,74	0,0093	0,0046	6,5
15,5	4,47	20,2	1,41	3,41	0,0089	0,0090	6,7
15,5	4,47	20,2	0,67	3,41	0,0052	0,0090	6,7
15,5	4,47	20,2	0,57	3,41	0,0052	0,0090	6,7
15,5	4,47	20,6	1,15	3,34	0,0061	0,0089	6,7
15,5	4,47	20,6	0,74	3,34	0,0052	0,0089	6,7
15,5	4,47	22,4	1,08	3,08	0,0063	0,0082	6,7
15,5	4,47	22,4	0,72	3,08	0,0054	0,0082	6,7
15,5	4,47	25,0	0,84	2,76	0,0056	0,0073	6,7
15,5	4,47	25,0	0,71	2,76	0,0046	0,0073	6,7
15,5	4,47	42,7	0,85	1,61	0,0086	0,0043	6,7
15,5	4,47	42,7	0,88	1,61	0,0088	0,0043	6,7
15,5	4,47	42,7	0,77	1,61	0,0086	0,0043	6,7
15,5	4,47	44,7	0,91	1,54	0,0108	0,0041	6,7
15,5	4,47	44,7	1,04	1,54	0,0108	0,0041	6,7
15,5	4,47	44,7	0,96	1,54	0,0098	0,0041	6,7
15,5	4,47	47,2	1,08	1,46	0,0127	0,0039	6,7
15,5	4,47	47,2	1,18	1,46	0,0128	0,0039	6,7
15,5	4,47	47,2	1,18	1,46	0,0107	0,0039	6,7
15,5	4,47	50,2	0,39	1,37	0,0017	0,0036	6,7
15,5	4,47	50,2	0,32	1,37	0,0021	0,0036	6,7
15,5	4,47	51,0	0,35	1,35	0,0015	0,0036	6,7
15,5	4,47	51,0	0,3	1,35	0,0013	0,0036	6,7
15,5	4,47	52,2	0,32	1,32	0,0023	0,0035	6,7
15,5	4,47	52,2	0,27	1,32	0,0012	0,0035	6,7
15,5	4,47	75,2	0,2	0,92	0,0011	0,0024	6,7
15,5	4,47	75,2	0,3	0,92	0,0046	0,0024	6,7
15,5	4,47	75,7	0,2	0,91	0,0016	0,0024	6,7
15,5	4,47	75,7	0,28	0,91	0,0052	0,0024	6,7
15,5	4,47	76,5	0,2	0,90	0,0019	0,0024	6,7
15,5	4,47	76,5	0,27	0,90	0,0051	0,0024	6,7

15,5	4,68	7,8	1,57	9,03	0,0088	0,0240	6,9
15,5	4,68	9,4	0,875	7,48	0,0092	0,0198	6,9
15,5	4,68	9,4	1,003	7,48	0,0109	0,0198	6,9
15,5	4,68	11,7	1,54	6,05	0,0101	0,0161	6,9
15,5	4,68	12,8	0,612	5,51	0,0066	0,0146	6,9
15,5	4,68	12,8	0,785	5,51	0,0084	0,0146	6,9
15,5	4,68	16,2	1,43	4,37	0,0109	0,0116	6,9
15,5	4,68	17,0	0,475	4,15	0,0043	0,0110	6,9
15,5	4,68	17,0	0,558	4,15	0,0071	0,0110	6,9
15,5	5,62	28,4	1,08	2,72	0,0089	0,0072	7,6
15,5	5,62	29,7	0,98	2,60	0,0085	0,0069	7,6
15,5	5,62	30,4	1,66	2,54	0,0032	0,0067	7,6
15,5	5,62	30,4	1,03	2,54	0,0049	0,0067	7,6
15,5	5,62	31,6	1,53	2,45	0,0031	0,0065	7,6
15,5	5,62	31,6	0,82	2,45	0,0039	0,0065	7,6
15,5	5,62	31,8	0,43	2,44	0,0076	0,0065	7,6
15,5	5,62	33,5	1,52	2,31	0,0026	0,0061	7,6
15,5	5,62	33,5	0,91	2,31	0,0029	0,0061	7,6
15,5	7,08	32,0	2,01	2,71	0,0053	0,0072	8,5
15,5	7,08	36,1	1,54	2,41	0,0041	0,0064	8,5
15,5	7,08	40,3	1,42	2,15	0,0038	0,0057	8,5
15,5	7,41	23,6	0,34	3,76	0,0009	0,0100	8,7
15,5	7,41	23,6	0,3	3,76	0,0008	0,0100	8,7
15,5	7,41	27,8	0,7	3,20	0,0019	0,0085	8,7
15,5	7,41	27,8	0,58	3,20	0,0015	0,0085	8,7
15,5	7,41	32,2	0,71	2,76	0,0019	0,0073	8,7
15,5	7,41	32,2	0,86	2,76	0,0023	0,0073	8,7
15,5	7,94	12,2	1,38	7,53	0,0037	0,0200	9,0
15,5	7,94	17,0	1,88	5,42	0,0050	0,0144	9,0
15,5	7,94	18,7	0,87	4,92	0,0048	0,0131	9,0
15,5	7,94	20,6	1,12	4,47	0,0034	0,0118	9,0
15,5	7,94	20,8	1,38	4,42	0,0037	0,0117	9,0

15,5	7,94	21,2	1,12	4,34	0,0030	0,0115	9,0
15,5	7,94	23,4	1,74	3,92	0,0062	0,0104	9,0
15,5	7,94	23,4	0,41	3,92	0,0123	0,0104	9,0
15,5	7,94	25,1	1,02	3,67	0,0027	0,0097	9,0
15,5	7,94	25,5	3,06	3,61	0,0134	0,0096	9,0
15,5	7,94	25,5	2,24	3,61	0,0075	0,0096	9,0
15,5	7,94	25,5	0,78	3,61	0,0109	0,0096	9,0
15,5	7,94	25,5	2,1	3,61	0,0054	0,0096	9,0
15,5	7,94	26,6	3,58	3,46	0,0136	0,0092	9,0
15,5	7,94	26,9	0,38	3,42	0,0105	0,0091	9,0
15,5	7,94	26,9	2,85	3,42	0,0133	0,0091	9,0
15,5	7,94	26,9	1,9	3,42	0,0077	0,0091	9,0
15,5	7,94	26,9	0,92	3,42	0,0091	0,0091	9,0
15,5	7,94	26,9	0,67	3,42	0,0053	0,0091	9,0
15,5	7,94	28,2	3,61	3,26	0,0134	0,0087	9,0
15,5	7,94	29,2	2,68	3,15	0,0132	0,0084	9,0
15,5	7,94	29,2	1,66	3,15	0,0081	0,0084	9,0
15,5	7,94	29,2	0,92	3,15	0,0086	0,0084	9,0
15,5	7,94	29,2	0,66	3,15	0,0052	0,0084	9,0
15,5	7,94	29,7	1,03	3,09	0,0027	0,0082	9,0
15,5	7,94	30,4	0,66	3,02	0,0102	0,0080	9,0
15,5	7,94	30,4	0,46	3,02	0,0097	0,0080	9,0
15,5	7,94	30,8	3,36	2,98	0,0141	0,0079	9,0
15,5	7,94	30,8	0,79	2,98	0,0074	0,0079	9,0
15,5	7,94	30,8	0,46	2,98	0,0012	0,0079	9,0
15,5	7,94	31,6	0,48	2,91	0,0076	0,0077	9,0
15,5	7,94	31,6	0,31	2,91	0,0096	0,0077	9,0
15,5	7,94	33,5	0,54	2,74	0,0092	0,0073	9,0
15,5	7,94	33,5	0,39	2,74	0,0066	0,0073	9,0
15,5	7,94	37,5	1,11	2,45	0,0136	0,0065	9,0
15,5	7,94	41,0	0,72	2,24	0,0019	0,0059	9,0
15,5	7,94	41,1	0,81	2,24	0,0123	0,0059	9,0
15,5	7,94	44,8	0,58	2,05	0,0015	0,0054	9,0

15,5	8,32	15,0	0,45	6,27	0,0035	0,0166	9,2
15,5	8,32	15,8	0,54	5,95	0,0057	0,0158	9,2
15,5	8,32	15,8	1,62	5,95	0,0045	0,0158	9,2
15,5	8,32	15,8	1,41	5,95	0,0066	0,0158	9,2
15,5	8,32	15,8	0,61	5,95	0,0065	0,0158	9,2
15,5	8,32	15,8	0,97	5,95	0,0101	0,0158	9,2
15,5	8,32	18,0	0,67	5,22	0,0051	0,0138	9,2
15,5	8,32	18,0	1,33	5,22	0,0031	0,0138	9,2
15,5	8,32	18,0	1,21	5,22	0,0063	0,0138	9,2
15,5	8,32	18,0	0,88	5,22	0,0088	0,0138	9,2
15,5	8,32	18,0	0,99	5,22	0,0104	0,0138	9,2
15,5	8,32	18,4	1,06	5,10	0,0071	0,0135	9,2
15,5	8,32	19,2	0,43	4,90	0,0021	0,0130	9,2
15,5	8,32	21,2	0,73	4,44	0,0043	0,0118	9,2
15,5	8,32	21,2	1,21	4,44	0,0029	0,0118	9,2
15,5	8,32	21,2	1,94	4,44	0,0061	0,0118	9,2
15,5	8,32	21,2	0,81	4,44	0,0106	0,0118	9,2
15,5	8,32	21,2	0,88	4,44	0,0101	0,0118	9,2
15,5	8,32	21,6	0,84	4,36	0,0068	0,0116	9,2
15,5	8,32	23,3	0,44	4,03	0,0029	0,0107	9,2
15,5	8,32	25,3	0,64	3,72	0,0067	0,0099	9,2
15,5	8,91	27,5	0,21	3,55	0,0025	0,0094	9,5
15,5	8,91	34,0	0,15	2,87	0,0032	0,0076	9,5
15,5	8,91	37,8	0,13	2,58	0,0031	0,0068	9,5
15,5	9,33	8,6	1,48	11,59	0,0097	0,0307	9,7
15,5	9,33	12,2	1,46	8,17	0,0098	0,0217	9,7
15,5	9,33	13,9	0,41	7,16	0,0045	0,0190	9,7
15,5	9,33	16,4	0,61	6,08	0,0058	0,0161	9,7
15,5	9,33	16,6	1,37	6,02	0,0095	0,0160	9,7
15,5	9,33	19,8	0,71	5,02	0,0075	0,0133	9,7
15,5	10,00	19,0	8,59	5,44	0,0228	0,0144	10,1
15,5	10,00	19,9	2,66	5,18	0,0071	0,0137	10,1

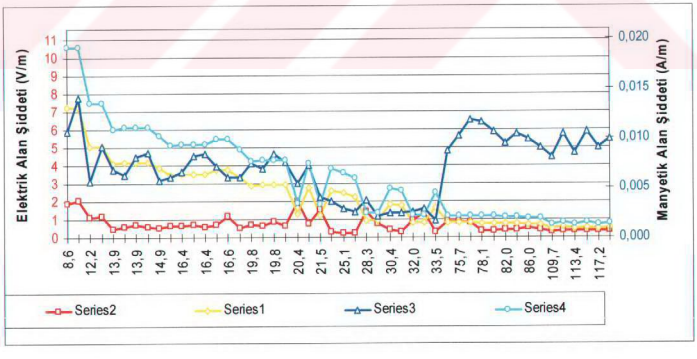
15,5	10,00	26,9	2,38	3,83	0,0063	0,0102	10,1
15,5	10,00	27,5	1,42	3,76	0,0071	0,0100	10,1
15,5	10,00	27,5	0,79	3,76	0,0168	0,0100	10,1
15,5	10,00	27,6	1,09	3,74	0,0029	0,0099	10,1
15,5	10,00	28,8	1,26	3,58	0,0069	0,0095	10,1
15,5	10,00	28,8	0,64	3,58	0,0104	0,0095	10,1
15,5	10,00	30,8	1,32	3,35	0,0035	0,0089	10,1
15,5	10,00	30,9	0,99	3,34	0,0077	0,0089	10,1
15,5	10,00	30,9	0,56	3,34	0,0097	0,0089	10,1
15,5	10,00	31,4	0,79	3,29	0,0021	0,0087	10,1
15,5	10,00	38,4	1,4	2,69	0,0037	0,0071	10,1
15,5	10,00	38,4	0,57	2,69	0,0015	0,0071	10,1
15,5	10,00	38,4	1,41	2,69	0,0037	0,0071	10,1
15,5	10,00	42,4	0,8	2,43	0,0021	0,0065	10,1
15,5	10,00	42,4	1,03	2,43	0,0027	0,0065	10,1
15,5	10,00	42,4	1,08	2,43	0,0029	0,0065	10,1
15,5	10,00	46,6	0,79	2,21	0,0021	0,0059	10,1
15,5	10,00	46,6	1,08	2,21	0,0029	0,0059	10,1
15,5	10,00	46,6	1,59	2,21	0,0042	0,0059	10,1
15,5	10,23	14,9	0,78	7,02	0,0086	0,0186	10,2
15,5	10,23	14,9	0,45	7,02	0,0091	0,0186	10,2
15,5	10,23	18,0	0,79	5,79	0,0087	0,0154	10,2
15,5	10,23	18,0	0,46	5,79	0,0081	0,0154	10,2
15,5	10,23	22,4	0,67	4,67	0,0053	0,0124	10,2
15,5	10,23	22,4	0,52	4,67	0,0087	0,0124	10,2



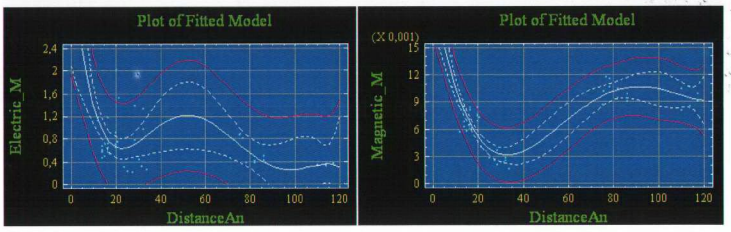
Şekil 5.42. 15,5 dBi için Uzaklık ve Güç Değişkenleri Bloğu

15,5 dBi için ölçüm verilerinin çok olması ve dolayısı ile güç değerlerinin çok farklı olmasından dolayı güce göre gruplama yapılmıştır.

0,66-2,82-2,95-3,09-3,16-3,55-3,63 watt için;



Şekil 5.43. 15,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri



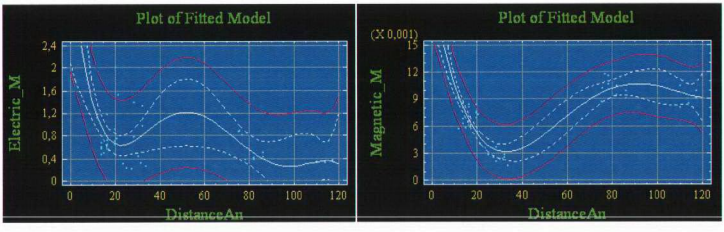
Şekil 5.44. 15,5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi

%90 güvenilirlik ve 0,383322 hata payı ile %37,23 oranında datanın sağladığı formül;

$$\mathbf{E_m = 4{,}06791 - 0{,}403634*d + 0{,}0165659*d^2 - 0{,}000286892*d^3 + 0{,}00000218877*d^4 - 6{,}10865E\text{-}9*d^5} \quad \mathbf{(5.21)}$$

%90 güvenilirlik ve 0,00140842 hata payı ile %80,02 oranında datanın sağladığı formül;

$$\mathbf{H_m = 0{,}0214425 - 0{,}00137448*d + 0{,}0000338845*d^2 - 3{,}04323E\text{-}7*d^3 + 9{,}18851E\text{-}10*d^4} \quad \mathbf{(5.22)}$$



Şekil 5.45. 15,5 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi

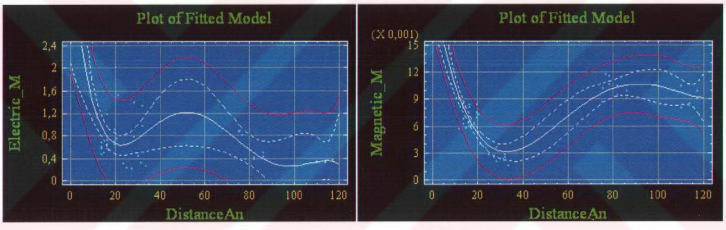
% 90 güvenilirlik ve 0,388871hata payı ile % 30,78 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 1{,}4367 - 0{,}00471959d^* - 0{,}170144^* P \quad (5.23)$$

% 99 güvenilirlik ve 0,0023214 hata payı ile % 43,21 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = 0{,}00121918 + 0{,}0000299698^*d + 0{,}00157733^*P \quad (5.24)$$

3,98-4,17-4,47 ve 4,68-5,62-7,08-7,41 watt için;



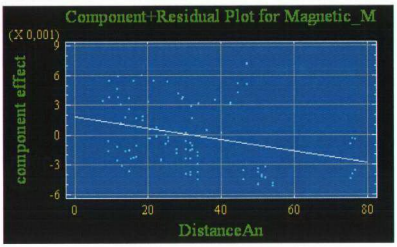
Şekil 5.46. 15,5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi

%99 güvenilirlik ve 0,53004 hata payı ile %37,23 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 1{,}25256 - 0{,}0123993^*d \quad (5.25)$$

%99 güvenilirlik ve 0,00317147 hata payı ile %19,84 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = -0{,}0082386 + 0{,}00365831^*d - 0{,}00029925^*d^2 + 0{,}0000104032^*d^3 - 1{,}59045E\text{-}7^*d^4 + 8{,}68372E\text{-}10\ d^5 \quad (5.26)$$



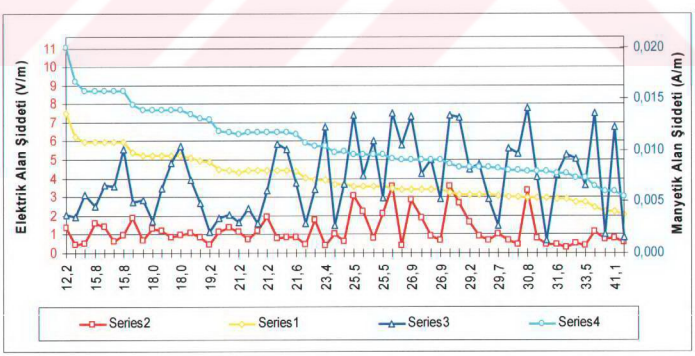
Şekil 5.47. 15,5 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi

% 90 güvenilirlik ile ilgili bir çıkarım yapılamamıştır.

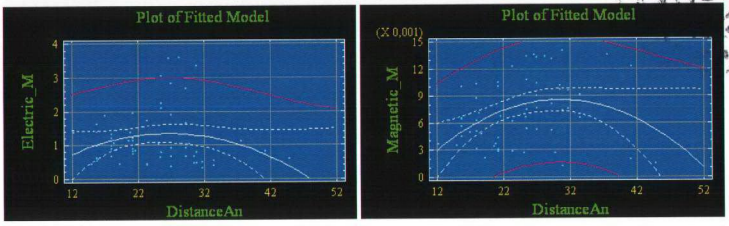
% 95 güvenilirlik ve 0,00324325 hata payı ile % 12,55 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = 0{,}0106442 - 0{,}000058539*d - 0{,}000730022*P \qquad (5.27)$$

7,94-8,32 watt için;



Şekil 5.48. 15,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri



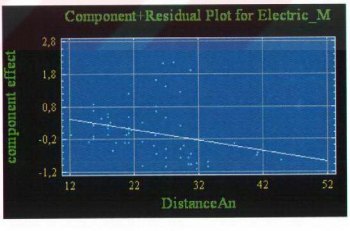
Şekil 5.49. Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi

%90 güvenilirlik ve 0,818992 hata payı ile %5,51 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = -0{,}741996 + 0{,}157158*d - 0{,}00296291*d^2 \quad (5.28)$$

%95 güvenilirlik ve 0,0034301 hata payı ile %13,84 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = -0{,}00676169 + 0{,}00100517*d - 0{,}0000164749*d^2 \quad (5.29)$$

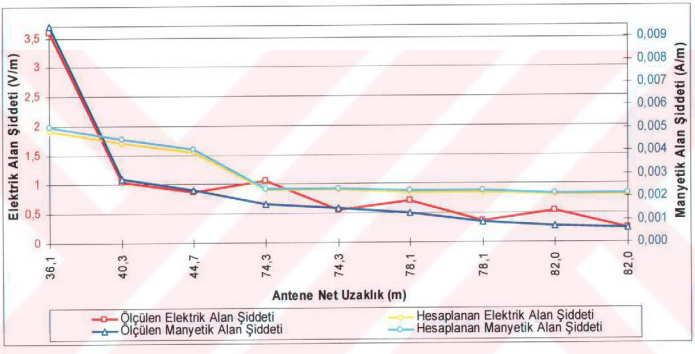


Şekil 5.50. 15,5 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi

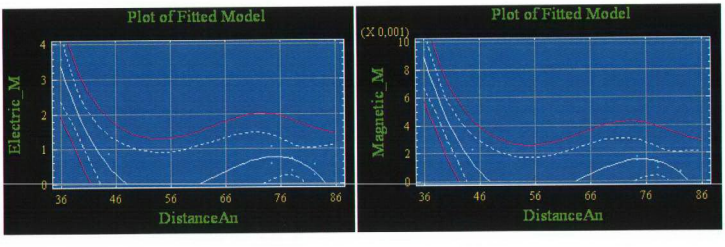
%90 güvenilirlik ve 0,799046 hata payı ile %10,06 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 16{,}9122 - 0{,}033258d^* - 1{,}84448^* P \quad (5.30)$$

16	3,72	78,1	0,71	0,85	0,0013	0,0023	6,5
16	3,72	78,1	0,37	0,85	0,0009	0,0023	6,5
16	3,72	82,0	0,53	0,81	0,0007	0,0022	6,5
16	3,72	82,0	0,24	0,81	0,0006	0,0022	6,5
16	3,98	36,1	3,59	1,91	0,0095	0,0051	6,7
16	3,98	40,3	1,04	1,71	0,0028	0,0045	6,7
16	3,98	44,7	0,87	1,54	0,0023	0,0041	6,7



Şekil 5.54. 16 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri



Şekil 5.55. 16 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi

%95 güvenilirlik ve 0,410515 hata payı ile %89,72 oranında datanın sağladığı formül;

$$E_m = 56{,}9312 - 2{,}78953*d + 0{,}0444356*d^2 - 0{,}000229717*d^3 \quad (5.33)$$

%99 güvenilirlik ve 0,000913489 hata payı ile %93,21 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = 0{,}146701 - 0{,}00713485*d + 0{,}000112749*d^2 - 5{,}79031E\text{-}7*d^3 \quad (5.34)$$

Multiple Regression için ;

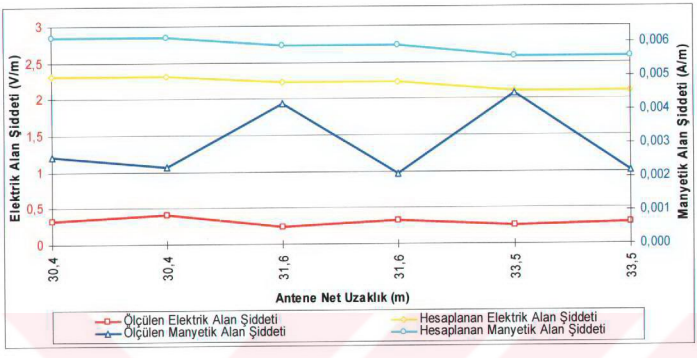
% 90 güvenilirlik ile ilgili bir çıkarım yapılamamıştır.

5.5.8 Kazancı 16,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

Tablo 5.12. 16,5 dBi Kazançlı Anten Verileri

Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
16,5	4,17	9,2	0,41	8,11	0,0077	0,0215	7,3
16,5	4,17	11,7	0,37	6,41	0,0067	0,0170	7,3
16,5	4,17	25,7	0,41	2,91	0,0044	0,0077	7,3
16,5	7,94	12,2	2,73	8,45	0,0074	0,0224	10,1
16,5	7,94	12,2	7,55	8,45	0,0200	0,0224	10,1
16,5	7,94	21,2	2,35	4,87	0,0064	0,0129	10,1
16,5	7,94	21,2	4,68	4,87	0,0124	0,0129	10,1
16,5	7,94	30,8	4,06	3,35	0,0108	0,0089	10,1
16,5	7,94	30,8	4,78	3,35	0,0127	0,0089	10,1

17,5	2,95	33,5	0,29	2,10	0,0022	0,0056	6,9



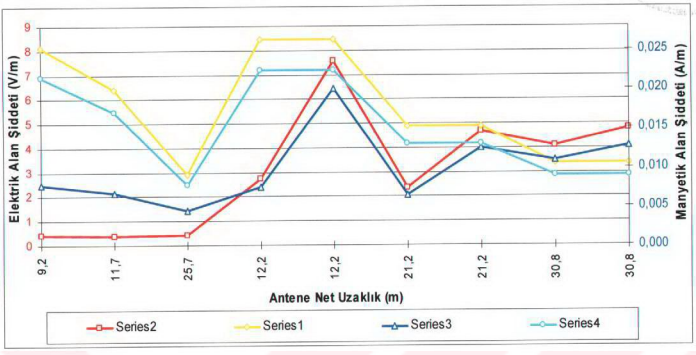
Şekil 5.57 17,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri

Her iki regression yöntemi ile de %90 güvenilirlikle bir çıkarım yapılamamıştır.

5.5.10 Kazancı 18,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

Tablo 5.14. 18,5 dBi Kazançlı Anten Verileri

Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
18,5	7,08	75,2	0,26	1,63	0,0017	0,0043	12,0
18,5	7,08	75,7	0,23	1,62	0,0019	0,0043	12,0
18,5	7,08	76,5	0,22	1,60	0,0018	0,0043	12,0
18,5	7,94	19,8	0,97	6,54	0,0053	0,0174	12,7



Şekil 5.56. 16,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri

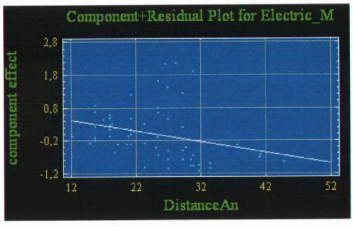
Her iki regression yöntemi ile de %90 güvenilirlikle bir çıkarım yapılamamıştır.

5.5.9 Kazancı 17,5 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

Tablo 5.13. 17,5 dBi Kazançlı Anten Verileri

Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
17,5	2,95	30,4	0,32	2,32	0,0026	0,0062	6,9
17,5	2,95	30,4	0,41	2,32	0,0023	0,0062	6,9
17,5	2,95	31,6	0,24	2,23	0,0042	0,0059	6,9
17,5	2,95	31,6	0,32	2,23	0,0021	0,0059	6,9
17,5	2,95	33,5	0,25	2,10	0,0045	0,0056	6,9

$$H_m = 0{,}0127612 - 0{,}000224052 * d \qquad (5.31)$$



Şekil 5.53. 15,59 dBi için Alan Şiddetleri Değişkenlerinin Analizi

% 90 güvenilirlik ile ilgili bir çıkarım yapılamamıştır.

%90 güvenilirlik ve 0,00358956 hata payı ile %36,04 oranında datanın sağladığı formül;

$$H_m = -0{,}011924 - 0{,}000239326d^* + 0{,}00255327^* P \qquad (5.32)$$

5.5.7 Kazancı 16 dBi olan Anten Ölçümleri İncelemesi

Tablo 5.11. 16 dBi Kazançlı Anten Verileri

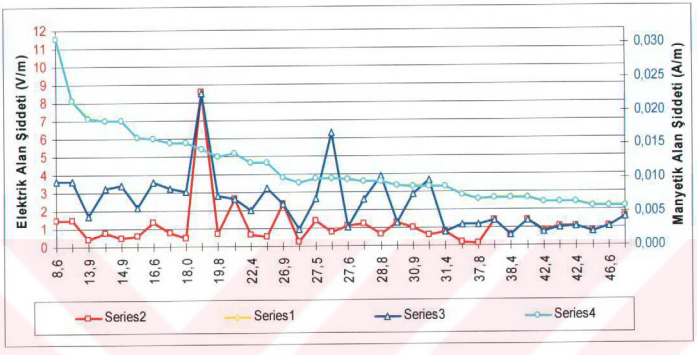
Anten Kazancı (dBi)	Çıkış Gücü (Watt)	Antene Net Uzaklık (m)	Ölçülen Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Ölçülen Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Hesaplanan Güvenlik Mesafesi (m)
16	3,72	74,3	1,06	0,90	0,0017	0,0024	6,5
16	3,72	74,3	0,56	0,90	0,0015	0,0024	6,5

ÖZGEÇMİŞ

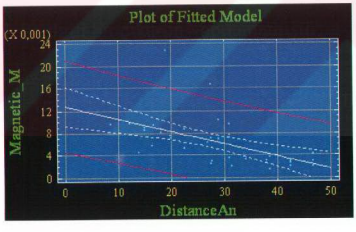
10 Şubat 1974 tarihinde Tekirdağ'da doğan Güray YÜKSEL, ilk öğrenimini Kırıkali köyünde, orta öğrenimini Malkara'da ve lise öğrenimini de Tekirdağ'da tamamlamıştır. 1998 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünü bitirmiştir. 1999 yılında askerliğini tamamladıktan sonra 1 yıl Rumeli Telekomünikasyon şirketinde çalışmıştır. 2000 senesinde Turkcell firmasında çalışmaya başlamış olup halen aynı şirkette çalışmaya devam etmektedir. 2002 yılında ise Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.

% 90 güvenilirlik ile ilgili bir çıkarım yapılamamıştır.

8,91-9,33-10-10,23 watt için;



Şekil 5.51. 15,5 dBi için Ölçülen ve Hesaplanan Alan Şiddet Değerleri



Şekil 5.52. 15,5 dBi için Elektrik ve Manyetik Alan Şiddeti'nin Uzaklık Modellemesi

% 90 güvenilirlik ile ilgili bir çıkarım yapılamamıştır.

%99 güvenilirlik ve 0,00368141 hata payı ile %30,69 oranında datanın sağladığı formül;