

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAPALI ORTAMLARDA ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIMININ 3 BOYUTLU
IŞIN İZLEME YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ İÇİN BİR SİMÜLATÖR TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Emrullah GÜNDÜZALP
(141129110)**

Anabilim Dalı: Bilgisayar Mühendisliği

Programı: Donanım

**Danışman: Prof. Dr. Yetkin TATAR
İkinci Danışman: Dr. Güngör YILDIRIM**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Haziran 2018

TEMMUZ-2018

ÖNSÖZ

Telsiz haberleşmenin her geçen gün yaygınlaşmasıyla beraber elektromanyetik dalgalar üzerindeki çalışmalar da hız kesmeden devam etmektedir. Elektromanyetik dalgalar üzerinde çalışılan konulardan biri de elektromanyetik dalgaların yayılımıdır. Kurulacak sistemin maliyeti ve doğruluğu açısından önem arz eden bu konu ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmış ve birçok model geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, deterministik bir yöntem olan 3 boyutlu ışın izleme tekniği ile elektromanyetik dalgaların yayılımı incelenmiş ve bu amaçla bir yazılım kütüphanesi oluşturulmuştur. Gerçek ortamda radyo sinyal gücü ölçümleri yapılmış ve yapılan bu ölçümler 3 boyutlu ışın izleme kütüphanesini kullanan ve tez kapsamında yazılan bir program ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın yapılmasında yaptıkları katkılardan dolayı değerli hocalarım sayın **Prof.Dr. Yetkin TATAR**'a, sayın **Dr. Güngör YILDIRIM**'a ve değerli eşim **Seda GÜNDÜZALP**'e teşekkürü bir borç bilirim.

Emrullah GÜNDÜZALP

ELAZIĞ – 2018

ÖZET

Elektromanyetik (EM) dalgaların yayılımı, üzerinde çokça araştırmanın yapıldığı bir konudur. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki açık görüşün olduğu ortamlarda daha basit hesaplamalar yapılarak gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilirken ortamın karmaşık hale gelmesiyle bu hesaplamalar da karmaşık hale gelebilmektedir. Literatürde elektromanyetik dalgaların yayılımını modelleyen pek çok yöntem mevcuttur. Bu modellerden biri olan deterministik yöntemler, ortamın geometrisini, dielektrik özelliklerini, ışının yansıma, kırılma ve kırınım gibi olaylarını dikkate almaktadır. Deterministik yöntemlerden bazıları bu etkileri Maxwell denklemleri ile çözerek başarılı sonuçlar üretebilmektedir. Bununla birlikte Maxwell denklemleri çözümlerinin getirdiği karmaşıklık ve işlem yükü beraberinde belirli dezavantajlar da getirmektedir. Bu zorlukların önüne geçmek amacıyla yaklaşımsal teknikleri kullanan bir diğer deterministik yöntem olan ışın izleme teknikleri kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kapalı ortamlarda elektromanyetik dalgaların yayılımını tahmin etmek amacıyla ışının temel olayları olan kırılma, yansıma ve kırınım etkilerini bilimsel metotlarla hesaba katan 3 boyutlu ışın izleme yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla istenilen ortamın 3 boyutlu modellenebileceği, alıcı ve verici kablosuz düğümleri istenilen parametrelerle konumlandırılabilmesi için 3 boyutlu ışın izleme yazılım aracı ve kütüphanesi geliştirilmiştir. Programın doğruluğunun test edilebilmesi için gerçek tünel ortamından sonuçlar alınmıştır. Ölçüm alınan tünel ortamı, geliştirilen program aracılığı ile 3 boyutlu olarak modellenip çeşitli senaryolar denenmiştir. Gerçekleştirilen senaryolarda yansıma ve kırınım olaylarının etkileri gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3 Boyutlu ışın izleme, elektromanyetik dalgaların yayılımı, radyo yayılımı

SUMMARY

A Simulator Design to Model Electromagnetic Wave Propagation by 3D Ray Tracing Method in Indoor Environments

Electromagnetic (EM) wave propagation is an important research area on which many studies have been done. The studies show that while realistic results can be achieved for simple environments with clear sight, the computations costs can be high for the complex environments. In literature, there are a lot of methods that model the propagation of EM wave. One of these methods is deterministic models. The deterministic models can take into accounts the geometry of the environment, reflection, refraction, diffraction effects. Some deterministic methods can produce successful results by solving Maxwell equations. However, the complexity due to the resolution of Maxwell equations is the disadvantages of these methods. To overcome these disadvantages, different approach methods such as ray tracing have been proposed.

In this thesis, in order to predict the EM wave propagation in closed environments, 3D Ray tracing method that takes into account the reflection, refraction and diffraction effects has been discussed and implemented. For this purpose, a 3D Ray Tracing software tool, which can model the environment of interest, and consider the transmitter and receiver parameters, has been developed. The measurements taken from a real tunnel environment have been used in order to test the accuracy of the program. The tunnel environment has been modeled in 3D by the developed program, and then different scenarios have been carried out in this model. In the scenarios, the effects of reflection and refraction have been observed.

Key Words: 3D ray tracing, electromagnetic wave propagation, RF propagation

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
ÖZET	II
SUMMARY	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
KISALTMALAR.....	VII
SEMBOLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XI
EKLER LİSTESİ.....	XVI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Çalışmaları.....	2
1.2. Tezin Amacı ve Yöntemler.....	4
2. ELEKTROMANYETİK (EM) DALGALAR.....	6
2.1. EM Dalgaların Genel Özellikleri.....	6
2.2. Elektrik Alan	8
2.3. Manyetik Alan	8
2.4. Düzlem EM Dalga	9
2.5. EM Dalgaların Taşıdığı Enerji	10
2.6. RF Dalganın Maruz Kaldığı Etkenler.....	11
2.7. Yayılım Boyunca RF Dalgalarda Sönümleme ve Bozulma	14
2.7.1. Yol Kayıpları	15
2.7.2. Ortamsal ve Özel Sönümler.....	15
2.7.2.1. Çok Yavaş (Very Slow) ve Yavaş (Slow) Sönümler.....	15
2.7.2.2. Hızlı (Fast) Sönümler	15
2.7.2.3. Özel Sönümler	16
3. KABLOSUZ KANAL MODELLERİ.....	18
3.1. Genel Yol Kayıp Modeli	18
3.2. Açık Alan (Free Space) Yayılım Modeli.....	18

3.3. Ampirik Modeller	19
3.3.1. Log Distance Free Space Model.....	19
3.3.2. One-Slope Model.....	19
3.3.3. Duvar ve Zemin Faktörü Modeli	20
3.3.4. COST231 Çoklu Duvar Modeli.....	20
3.3.5. Lineer Zayıflama Modeli.....	21
3.4. Olasılıksal (İstatistiksel) Modeller.....	21
3.4.1. Rayleigh Sönümleme Modeli	21
3.4.2. Rice Sönümleme Modeli	22
3.4.3. Nakagami-m Sönümleme Modeli.....	22
3.4.4. Log Normal Sönümleme Modeli	23
3.5. Deterministik Modeller.....	23
3.5.1. Işın Başlatma (Ray Launching) Modeli	24
3.5.2. Işın İzleme (Ray Tracing) Model	25
3.6. Yarı Deterministik Modeller	26
4. SİMÜLATÖRLER	27
5. TEZ KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALARDA KULLANILAN BİLİMSEL YÖNTEMLER VE TEKNİKLER	29
5.1. Işının Modellenmesi	29
5.2. Işının Yüzey ile Kesişimi	30
5.2.1. Işının Yansıması ve Kırılması	32
5.2.2. Yansıyan ve Kırılan Işınlara Zayıflaması ve EM Hesapları	34
5.3. Nesne Kenarlarının (Edge) ve Kırınımın Modellenmesi.....	40
5.3.1. Kırınım Türleri	41
5.3.2. Huygens Prensipleri.....	41
5.3.3. Kenar-Işın Kesişimi.....	43
5.3.4. Işın-Kenar Kesişimi Sonrası Kırınım Gerçekleşmesi ve Keller Konisi	46
5.3.5. Kırınım Işınlara Zayıflaması ve EM Hesapları	48
5.4. Kablosuz Düğümün Modellenmesi	56
5.4.1. Işın-düğüm Kesişimi	56

5.4.2. Düğümün Aldığı Toplam Gücün Hesaplanması	58
6. GELİŞTİRİLEN 3B IŞIN İZLEME (3Bİİ) PROGRAMI VE ARAYÜZÜ	61
6.1. Mod�l Yapısı	61
6.2. Akış Şeması ve UML Diyagramı	63
7. SENARYOLAR	68
7.1. Ortam Bilgileri ve �l��mler	68
7.2. Free Space Senaryolar	78
7.3. Free Space ve Yansıma Senaryoları	82
7.4. Free Space, Yansıma ve Kırınım Senaryoları	87
7.5. Senaryo Değerlendirmeleri	91
8. SONUÇLAR	95
KAYNAKLAR	97
EKLER	101
�ZGE�MİŐ	129

KISALTMALAR

RSS	: Received Signal Strength
WLAN	: Wireless Local Area Networks
SBR	: Shooting and Bouncing Ray
UTD	: Uniform Theory of Diffraction
LOS	: Line of Sight
NLOS	: Non Light of Sight
GO	: Geometrical Optics
GTD	: Geometrical Theory of Diffraction
EM	: Elektromanyetik
RF	: Radio Frequency
3B	: 3 Boyutlu
3Bİİ	: 3 Boyutlu Işın İzleme
UWB	: Ultra-Wide Band
ToA	: Time of Arrival
C-RAN	: Cloud Radio Access Network
LTE	: Long Term Evolution
FDTD	: Finite Difference Time Domain
VEP	: Vector Parabolic Equation
MoM	: Method of Moments
FEM	: The Finite Element Method
MAC	: Medium Access Control
PTD	: Physical Theory of Diffraction
ITD	: Incremental Theory of Diffraction
UML	: Unified Modeling Language
PEM	: Parabolic Equation Method
ELF	: Extremely Low Frequency
SLF	: Super Low Frequency
ULF	: Ultra Low Frequency
VLF	: Very Low Frequency
LF	: Low Frequency
MF	: High Frequency
HF	: High Frequency
VHF	: Very High Frequency
UHF	: Ultra High Frequency
SHF	: Super High Frequency
EHF	: Extremely High Frequency
YGB	: Yansıma Gölge Bölgesi
DGGB	: Direkt Gelen Gölge Bölgesi
RBW	: Resolution BandWidth
VBW	: Video BandWidth
RMSE	: Root Mean Square Error
BO	: Başarım Oranı

SEMBOLLER LİSTESİ

λ	: Dalga boyu
c	: Işık hızı
f	: Frekans
E	: Elektrik alan
D	: Elektrik akı yoğunluğu
H	: Manyetik alan
B	: Manyetik akı yoğunluğu
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ	: Dielektrik sabiti, yalıtkanlık sabiti
ϵ_r	: Malzemenin bağıl dielektrik sabiti
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_r	: Bağıl manyetik geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
E_0	: Elektrik alan genliği
H_0	: Manyetik alan genliği
ω	: Açısal frekans
k	: Açısal faz sabiti
a	: Kayıplı ortamın zayıflama sabiti
$\vec{S}$	: Poynting vektörü
Z_0	: Serbest uzay empedansı
P_r	: Alıcının aldığı sinyal gücü
P_t	: Vericinin sinyali transmisyon gücü
G_r	: Alıcının anten kazancı
G_t	: Vericinin anten kazancı
P_d	: Güç yoğunluğu
L_0	: Bir metre mesafedeki referans yol kaybı
L_1	: Verici ve alıcı arasındaki 1 metre mesafedeki yol kaybı
L_w, L_f	: Duvar ve zemin başına neden olan girişim kayıpları
n_w, n_f	: Duvar ve zemin sayıları
L_{FS}	: Alıcı ve verici arasındaki free space yol kaybı
Ω	: Sinyaldeki solmanın ortalama gücü
η	: Gauss fonksiyonun yol kaybı katsayısı
θ_i	: Işının yüzeye geliş açısı
θ_r	: Işının yüzeyden yansıma açısı
θ_t	: Işının ikinci yüzeye geçerken normal ile açısı
μ_1, μ_2	: Birinci ve ikinci ortamın manyetik geçirgenlikleri
ϵ_1, ϵ_2	: Birinci ve ikinci ortamın yalıtkanlık sabitleri
β^i	: Gelen ışının yön vektörünü içeren düzlemi
$R_{\parallel}$	: Fresnel paralel yansıma katsayısı
$R_{\perp}$	: Fresnel dik yansıma katsayısı
$R_{\parallel\perp}$	: Fresnel yansıma katsayısı
$E_{\parallel\perp}^i$	: Gelen ışının elektrik alanı
$E_{\parallel\perp}^r$	: Yansıyan ışının elektrik alanı
$T_{\parallel}$	: Fresnel paralel kırılma katsayısı
$T_{\perp}$	: Fresnel dik kırılma katsayısı

$T_{\parallel\perp}$	: Fresnel kırılma katsayısı
$E_{\parallel\perp}^t$	: Kırılan ışının elektrik alanı
$E_{\parallel\perp}^d$	: Kırınan ışının elektrik alanı
R_s	: Işının başlangıç noktası
R_d	: Işının doğrultusu
$R_s(x_s, y_s, z_s)$	: Işının başlangıç noktası
$\vec{R}_d(x_d, y_d, z_d)$	: Işının doğrultusu
$R_2(x, y, z)$	: Işının yüzey ile kesişim noktası
$N(n_x, n_y, n_z)$	: Üçgen yüzeyin normali
x_a, y_a, z_a	: Üçgen yüzey üzerindeki herhangi bir noktanın koordinatı
$\vec{E}_d(x_e, y_e, z_e)$	: Kenarın yön vektörü
$P_1(x_1, y_1, z_1)$	: Kenarın başlangıç noktası
$P_2(x_2, y_2, z_2)$	: Kenarın bitiş noktası
$C(x_c, y_c, z_c)$	: Kürenin merkez noktası
r	: Kürenin yarıçapı
Δ	: Diskriminant
$kök_{1,2}$	: İkinci derecen bir bilinmeyenli denklem kökleri
θ_c	: Kritik açı
θ_B	: Brewster açısı
γ_0	: Gelen ışının yön vektörü ile kenarın yön vektörü arasındaki açı
$D_{\parallel\perp}$	: UTD zayıflama katsayısı
$E_{ışın}$	: Düğümüne ulaşan tek bir ışının elektrik alanı
E_{toplam}	: Düğümüne ulaşan ışınların elektrik alan toplamı
P	: Düğüm için ilk transmision gücü
P_d	: Yüzeydeki güç yoğunluğu
$det(A)$	: Matrisin determinantı
t	: Adım sayısı
$\vec{d}$	: Gelen ışın
$\vec{r}$	: Yansıyan ışın
$\vec{k}$	: Kırılan ışın
$\vec{r}_d$	: Yansıyan ışının doğrultusu
$\vec{k}_d$	: Kırılan ışının doğrultusu
$A(s)_R$	: Yansıyan ışın için mesafeye bağlı yol kaybı
$A(s)_T$	: Kırılan ışın için mesafeye bağlı yol kaybı
$A(s', s)_D$	: Kırınan ışın için mesafeye bağlı yol kaybı
γ_0	: Keller konisi tepe açısı
$\vec{s}'$	: Kenara gelen ışın
$\vec{s}$	: Kenardan kırınan ışın
ϕ	: Kırınan ışının yakın yüzey ile yaptığı açı
ϕ'	: Kenara çarpan ışının yakın yüzey ile yaptığı açı

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. EM spektrum	6
Tablo 4.1. Simülatörler karşılaştırması.....	27
Tablo 5.1. Gönderilen tek ışın için oluşan yansıma ışınlarının hesaplanan değerleri	38
Tablo 5.2. Gönderilen tek ışın için oluşan kırılma ışınlarının hesaplanan değerleri	40
Tablo 5.3. Gönderilen tek ışın için oluşan kırınım ışınlarının hesaplanan değerleri	55
Tablo 7.1. 50 cm yükseklikteki düğümlerin koordinat değerleri	75
Tablo 7.2. 100 cm yükseklikteki düğümlerin koordinat değerleri	76
Tablo 7.3. 200 cm yükseklikteki düğümlerin koordinat değerleri	77
Tablo 7.4. Senaryolardaki sabit parametreler	77
Tablo 7.5. Senaryo 1' e ait genel sonuçlar	79
Tablo 7.6. Senaryo 2' ye ait genel sonuçlar	80
Tablo 7.7. Senaryo 3' e ait genel sonuçlar	81
Tablo 7.8. Senaryo 4' e ait genel sonuçlar	84
Tablo 7.9. Senaryo 5' e ait genel sonuçlar	85
Tablo 7.10. Senaryo 6' ya ait genel sonuçlar	86
Tablo 7.11. Senaryo 7' ye ait genel sonuçlar	88
Tablo 7.12. Senaryo 8' e ait genel sonuçlar	89
Tablo 7.13. Senaryo 9' a ait genel sonuçlar	90
Tablo 7.14. 50 cm senaryoları için ait genel değerlendirme tablosu.....	91
Tablo 7.15. 100 cm senaryoları için ait genel değerlendirme tablosu.....	92
Tablo 7.16. 200 cm senaryoları için ait genel değerlendirme tablosu.....	93

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. EM dalganın genel özellikleri	7
Şekil 2.2. EM düzlem dalga.....	9
Şekil 2.3. İletişim sistemi ve maruz kaldığı etkenler.....	12
Şekil 2.4. EM dalga yayılımındaki temel olaylar	14
Şekil 2.5. Çarpımsal etkenlere sebep olan olaylar	14
Şekil 2.6. RF sinyalinin sönümleme türlerine göre gücünün azalması	16
Şekil 2.7. Kablosuz kanalın maruz kaldığı sönümlemeler	17
Şekil 3.1. Işın başlatma modelinde ışının maruz kaldığı etkiler.....	25
Şekil 3.2. Işın izleme yöntemi	25
Şekil 4.1. Castalia simülatör modül yapısı	28
Şekil 5.1. Işının modellenmesi	29
Şekil 5.2. Işın yüzey kesişimi	30
Şekil 5.3. Heron formülüne göre üçgen alanını hesaplama	32
Şekil 5.4. Snell yasası	33
Şekil 5.5. Fresnel yasası	35
Şekil 5.6. Gönderilen bir ışının yansımaları.....	37
Şekil 5.7. Gönderilen bir ışın yansımalarının kuşbakışı görünümü	37
Şekil 5.8. Gönderilen bir ışın için programın çalıştırılması ve yansıma bilgilerinin yazdırılması	38
Şekil 5.9. Gönderilen bir ışının kırılması	39
Şekil 5.10 Gönderilen bir ışın için programın çalıştırılması ve kırılma bilgilerinin yazdırılması	39
Şekil 5.11. Huygens Prensibi.....	42
Şekil 5.12. Knife-Edge Kınırımı.....	42
Şekil 5.13. Işın-kenar kesişimi	44
Şekil 5.14. Işının kırınımı ve gölge alanlarının üstten görünüşü.....	46
Şekil 5.15. Işının Keller konisi şeklinde kırınımının yandan görünüşü	46
Şekil 5.16. Keller konisinin oluşumu	47
Şekil 5.17. Örnek kırınım 1	50

Şekil 5.18. Örnek kırınım 2	51
Şekil 5.19. Örnek kırınım 3	51
Şekil 5.20. Örnek kırınım 4	52
Şekil 5.21. Örnek kırınım 5	52
Şekil 5.22. Örnek kırınım 6	53
Şekil 5.23. Örnek kırınım 7	53
Şekil 5.24. Gönderilen bir ışın için kırınımın hesaplanması	54
Şekil 5.25. Gönderilen bir ışın sonucu oluşan kırınım ışınlarının kuşbakışı görünümü	54
Şekil 5.26. Gönderilen bir ışın sonucu oluşan kırınım ışınları hesaplarının yazdırılması	55
Şekil 5.27. Işın-düğüm kesişiminin hesaplanması	56
Şekil 5.28. Güç yoğunluğu ve elektrik alanın hesaplanması	59
Şekil 5.29. Düğümün aldığı ışınlar	60
Şekil 6.1. 3Bİİ programı modül yapısı	62
Şekil 6.2. Üçgen modülü	63
Şekil 6.3. 3Bİİ programının UML diyagramı.....	65
Şekil 6.4. 3Bİİ programı akış diyagramı	66
Şekil 6.5. 3Bİİ program genel arayüzü.....	67
Şekil 7.1. Galeri 1. fotoğraf.....	69
Şekil 7.2. Galeri 1. fotoğrafın 3B modeli	70
Şekil 7.3. Galeri 2. fotoğraf.....	70
Şekil 7.4. Galeri 2. fotoğrafın 3B modeli	71
Şekil 7.5. Galeri 3. fotoğraf.....	71
Şekil 7.6. Galeri 3. fotoğrafın 3B modeli	72
Şekil 7.7. Galeri 4. fotoğraf.....	72
Şekil 7.8. Galeri 4. fotoğrafın 3B modeli	73
Şekil 7.9. Galeri 5. fotoğraf.....	73
Şekil 7.10. Galeri 5. fotoğrafın 3B modeli	74
Şekil 7.11. RF üretici ve EagleShot program arayüzü	75
Şekil 7.12. Senaryo 1' in çalıştırılması.....	78

Şekil 7.13. Senaryo 1' e ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 7.14. Senaryo 2' ye ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 7.15. Senaryo3' e ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....	82
Şekil 7.16. Senaryo 4' ün çalıştırılması.....	83
Şekil 7.17. Senaryo 4' ün 2B haritası	83
Şekil 7.18. Senaryo 4 sonucu oluşan ışınların kuşbakışı görünümü	84
Şekil 7.19. Senaryo 4' e ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 7.20. Senaryo 5' e ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....	86
Şekil 7.21. Senaryo 6' ya ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....	87
Şekil 7.22. Senaryo 7' ye ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....	88
Şekil 7.23. Senaryo 8' ye ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....	89
Şekil 7.24. Senaryo 9' ye ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....	90
Şekil 7.25. 50 cm senaryoları için ait genel değerlendirme grafiği	91
Şekil 7.26. 100 cm senaryoları için ait genel değerlendirme grafiği	93
Şekil 7.27. 200 cm senaryoları için ait genel değerlendirme grafiği	94
Ek Şekil 1.1 Işın yüzey kesişimi.....	101
Ek Şekil 2.1 Işın kenar kesişimi	106
Ek Şekil 3.1. 3Bİİ program arayüzü	107
Ek Şekil 3.2. Ortam genel değişkenleri paneli	108
Ek Şekil 3.3a. Olaylar paneli	109
Ek Şekil 3.3b. Dalga türü paneli.....	109
Ek Şekil 3.4. Kırınım türü paneli.....	110
Ek Şekil 3.5. Düğümler paneli.....	110
Ek Şekil 3.6. Düğüm ekleme penceresi.....	111

Ek Şekil 3.7. Düğüm güncelleme penceresi	111
Ek Şekil 3.8. Alıcı düğümün aldığı ışınlar	112
Ek Şekil 3.9. Duvarlar/Nesneler paneli	112
Ek Şekil 3.10. Nesne/Duvar ekleme penceresi.....	113
Ek Şekil 3.11. Nesne/Duvar güncelleme penceresi.....	114
Ek Şekil 3.12. 3B ortam paneli.....	115
Ek Şekil 3.13. Bilgilendirme paneli	116
Ek Şekil 3.14. Çıktı paneli.....	116
Ek Şekil 3.15. Gezinti paneli	116
Ek Şekil 3.16. Dosya menüsü.....	117
Ek Şekil 3.17. 3Bİ programı üst çubuğu	117
Ek Şekil 3.18. Senaryo import penceresi.....	118
Ek Şekil 3.19. Raporla menüsü	118
Ek Şekil 3.20. Analiz dosyası seçme penceresi.....	119
Ek Şekil 3.21. Analiz kayıt penceresi.....	119
Ek Şekil 3.22. Analiz dosyasındaki gönderici düğüm bilgileri	120
Ek Şekil 3.23. Analiz dosyasındaki alıcı düğüm bilgileri	120
Ek Şekil 3.24. Analiz dosyasındaki simülasyon sonuç değerleri	120
Ek Şekil 3.25. Analiz dosyasındaki alıcı düğümlerin aldıkları güç grafiği.....	120
Ek Şekil 3.26. Görünüm menüsü.....	121
Ek Şekil 3.27. Işınları kuşbakışı görüntüleme	121
Ek Şekil 3.28. 3B ortam kamera ayarları penceresi	122
Ek Şekil 3.29. Düğümün aldığı ışınları gezme.....	122
Ek Şekil 3.30. 2D harita oluşturma sürecinde progress barın çalışması.....	123
Ek Şekil 3.31. Simülasyon ortamının 2D haritası	123
Ek Şekil 3.32. 2D harita ayarları	124
Ek Şekil 3.33. Nesne/düğüm ekleme menüsü	124
Ek Şekil 4.1. Omnet++ başlangıç konfigürasyon dosyasının (omnetpp100cm.ini) ekran görüntüsü	125
Ek Şekil 4.2. Konfigürasyon dosyasının parametreleri	126

Ek Şekil 4.3. SinyalGonder uygulamasının header (.h) dosyası	126
Ek Şekil 4.4. SinyalGonder uygulamasının kaynak (.cc) dosyası	127
Ek Şekil 4.5. Simülasyonun çalıştırılması	127
Ek Şekil 4.6. Simülasyon sonuçlarının yazdırılması	128



EKLER LİSTESİ

EK 1. Işın-Üçgen Kesişim Örneği.....	101
EK 2. Işın-Kenar Kesişim Örneği.....	106
EK 3. 3Bİİ Program Arayüzü	107
EK 3.1. Ortam Genel Değişkenleri Paneli.....	108
EK 3.2. Olaylar ve Dalga Türü.....	109
EK 3.3. Kırınım Türü Paneli	110
EK 3.4. Düğümler Paneli.....	110
EK 3.5. Duvarlar/Nesneler Paneli	112
EK 3.6. 3B Ortam Paneli	115
EK 3.7. Bilgilendirme Paneli.....	115
EK 3.8. Çıktı Paneli.....	116
EK 3.9. Gezinti Paneli	116
EK 3.10. Menüler	117
EK 4. OMNET++ Castalia Uygulaması.....	125

1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşme teknolojilerinin gün geçtikçe gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla beraber bu haberleşme teknolojilerini kullanan cihazların etkin ve verimli şekilde nasıl kullanılacağı daha önemli hale gelmiştir. Özellikle kablosuz sensör ağları gibi teknolojiler, tüneller ve yer altı galerileri gibi kapalı ortamlardaki kablosuz iletişimi kolaylaştırmakla birlikte yeni problemleri ortaya çıkarmıştır. Bu kablosuz haberleşme cihazlarının uygun şekilde konumlandırılması, sahip oldukları sınırlı güç kaynağı ve yüksek maliyeti sebebiyle rotalama v.b problemler üzerinde hassasiyetle durulan konular haline gelmiştir. Kablosuz iletişim ağlarının kurulumu öncesinde, doğru öngörülerde bulunabilmek için geliştirilen birçok simülasyon programı mevcuttur. Bu programların gerçeğe en yakın sonuçlar vermesi için, kullanılan modüllerin yetenekleri ve sağladığı protokol destekleri çok önemlidir. Bu modüllerin belki de en karmaşığı kablosuz kanal modülüdür. Kablosuz kanal modülünde, EM (Elektromanyetik) dalgaların bir çeşidi olan radyo dalgalarının (sinyallerinin) ortamdaki yayılımı modellendiğinden burada kullanılan yöntemin büyük önemi vardır. Alıcı tarafından alınan radyo dalgasının gücünü hesaplamak kapalı ve özellikle de karmaşık ortamlarda oldukça güçtür. Radyo dalgaları sadece mesafeye bağlı azalmakla kalmayıp soğurma, yansıma, kırılma, kırınım ve saçılma gibi etkilere de maruz kalmaktadır. Bu nedenle dalgaın ortamdaki yayılımında bu etkilerin hepsinin hesaba katılması gerekmektedir.

EM dalgaların yayılımını en başarılı şekilde açıklayan model deterministik bir model olan Maxwell denklemlerinin çözümüdür. Fakat Maxwell denklemlerinin karmaşıklığından ve hesaplama yükünden dolayı yaklaşık bir çözüm getiren ışın izleme teknikleri kullanılmaktadır. Işın izleme tekniğinde EM dalgalar ışın olarak modellenip ışının temel olayları olan yansıma, kırılma ve kırınım olayları hesaplanmaktadır. Maxwell denklemleri kadar olmasa da yine karmaşık ortamlar için hesaplama yükü gerektiren bir modeldir.

Günümüz bilgisayarlarının işlem güçlerinin artması ile birlikte, ışın izleme ve ışın başlatma tekniklerinin hesaplama yükünün meydana getirdiği problemler kısmen azalmış ve dolayısıyla karmaşık ortamların simülasyon süreleri de oldukça kısalmıştır. Işın izleme tekniklerindeki diğer önemli bir konu ise ortamın dielektrik ve geometrik açıdan başarılı bir şekilde modellenbilmesidir. Özellikle karmaşık ortam modellemelerinde bu sorun daha da önem kazanmakta ve ortamın gerek geometrik ve gerekse dielektrik olarak birebir modellenmesi oldukça güç ve hesap zamanı gerektirir bir hale dönüşmektedir.

Bu tez çalışmasında kapalı ortamlarda EM dalgaların yayılımının incelenmesi için, ışın izleme ve başlatma tekniklerine dayanan bir simülasyon yazılım aracı geliştirilmiştir. Tezin ilerleyen bölümlerinde ayrıntılı bir şekilde açıklanacak olan 3B Işın İzleme (3Bİİ) isimli bu yazılımda, gerek 3 boyutlu ortam modellemeleri gerekse EM dalgaların ışın olarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Işın olarak modellenen EM dalgaların ortamdaki yüzeyler ve kenarlar ile etkileşimlerini modelleyen algoritmalar için yazılım kütüphanesinde ayrı ayrı sınıflar oluşturulmuştur. Böylece EM dalgaların 3 boyutlu ortamda maruz kaldığı; yol kaybı ve çoklu yol etkileri başarılı bir şekilde modellenip simüle edilebilmektedir. Bunun için her bir ışının alıcı düğüme ulaşana kadar kat ettiği mesafeye bağlı olarak yol kaybı ve ortamdaki engellere bağlı olarak zayıflama miktarı hesaplanmaktadır. Yansıma, kırılma ve kırınım olayları sonucu alıcı düğümlere farklı zamanlarda ulaşan ışınların konuma bağlı anlık değerlerine göre etkileri hesaba katılmaktadır. Çoklu yol etkisi içerisinde yer alan saçılma olayı ise kullanılan EM dalga boyundan dolayı ihmal edilmiştir, bu durum daha sonraki bölümlerde açıklanacaktır.

Geliştirilen 3Bİİ simülasyon yazılımıyla kullanıcı 3 boyutlu modellenmiş ortamlar için kaynak çıkış gücü, çıkan ışın sayısı, maksimum yansıma, kırılma ve kırınım sayıları, düğüm kapsama yarıçapı, ortamın dielektrik özellikleri gibi parametreleri seçebilmekte ve böylece farklı senaryolar gerçekleştirebilmektedir.

Bu tez çalışmasının en orijinal kısmı, literatürde sıkça üzerinde çalışılan EM dalgaların kırınım olayının modellenmesi ve simülasyonu sürecidir. Kırınım olayı 3Bİİ kütüphanesinde UTD (Uniform Theory of Diffraction) model kullanılarak başarılı bir şekilde modellenmektedir. Kırınım olayı sonucu ışının optiksel davranışı Keller konisi modeli kullanılarak başarılı bir şekilde ortaya konulmaktadır.

1.1. Literatür Çalışmaları

Radyo sinyallerinin yayılımı ile ilgili pek çok yöntem mevcuttur. Bu tez çalışmasında bu yöntemlerden ışın izleme tekniği üzerinde durulmuştur. Literatürde ışın izleme yöntemi ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Örneğin [1]'de çok katlı binalarda ampirik modellerle ışın izleme tekniği karşılaştırılmış ve çeşitli parametrelerle belirlenen, daha fazla doğruluk oranına ve daha az hesaplama zamanına sahip olduğu iddia edilen Baskın Yol Modeli (Dominant Path Model) olarak adlandırılan yeni bir model tavsiye edilmiştir. [2]'de RSS (Received Signal Strength) tabanlı WLAN (Wireless Local Area Networks) lokalizasyonu için 3B (3 Boyutlu) ışın izleme tekniği ile radyo haritaları çıkarılmış ve diğer yayılım

yöntemlerine göre bu modelin daha doğru sonuçlar ürettiği, sistem tasarımında bu modelin daha uygun olduğu iddia edilmiştir. [3]'te ışın izleme tekniği NS-2 simülatorüne entegre edilmiş ve radyo yayılım modelinin ağ topolojisindeki önemine ve kullanılan modele göre sebep olduğu farklılıklara değinilmiştir. Image yöntemi ve SBR (Shooting and Bouncing Ray) sıkça literatürde karşımıza çıkan ışın izleme teknikleridir. [4]'te bu modellerde karşılaşılan hesaplama süresi, modellenen fiziksel ortamın sınırlı olması gibi problemlerden kaynaklı sorunların çözümü için yeni bir yöntem tavsiye edilmiştir. Geliştirilen matematiksel framework ile modifiye edilmiş Dalga Cephesi (Wavefront) yöntemi geliştirilmiş ve daha hızlı ve doğru sonuçlar elde edildiği iddia edilmiştir. [5]'te kapalı ve fiziksel olarak karmaşık ortamlardaki WLAN sistemler için EM dalgaların objelerle etkileşimini daha iyi modelleyen gelişmiş bir ışın izleme algoritması kullanılmıştır. UTD modelinin uygulandığı bu yöntemde yeni bir sezgisel kırınım katsayısı kullanılmıştır. Fiziksel olarak farklı karmaşıklıklara sahip ayrı ayrı ortamlarda test edilen bu model ile başarılı sonuçlar elde edildiği iddia edilmiştir. [6]'daki tez çalışmasında verici ve alıcı arasına çeşitli türlerdeki malzemeler farklı uzaklıklara yerleştirilmiş ve alınan sinyalin değişimi gözlemlenmiştir. MATLAB programında geliştirilen ışın izleme yöntemi ile bu senaryolar benzetilmiştir. Alınan sinyal gücüne göre vericinin konumu belirlemek yine radyo yayılımının alanına giren bir araştırma konusudur. [7]'deki tez çalışmasında verici ile alıcı arasında açık görüşün olduğu (LOS) ve açık görüşün olmadığı (NLOS) durumlarda alıcı ve verici arasındaki kablosuz kanal, ışın izleme tekniği ile modellenmiştir. Alıcılara gelen sinyallerin çokyolluluk karakteristikleri incelenerek NLOS/LOS sınıflandırılması yapılmaya çalışılmış ve genlik dağılım karakteristiğini kullanan NLOS/LOS sınıflandırma algoritmasının başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Işın izleme tekniği sadece kapalı ortamlarda kullanılan bir radyo yayılım tekniği değildir. Açık alanlarda da başarılı sonuçlar verir. [8]'deki tez çalışmasında engebeli arazilerde ışın izleme tekniği kullanılarak radyo yayılımı incelenmiştir. Işın izlemenin temeli olan GO (Geometrical Optics) modeli ile bu modelin uygulamada yetersiz kaldığı kırınımı açıklayan GTD (Geometrical Theory of Diffraction) modeli açıklanmıştır. GO' nun eksikliklerinden dolayı, GTD' nin kırınım mekanizmaları klasik GO teoremine eklenmiştir. Engebeli araziler için GTD modeli ile Longley-Rice yayılım modeli karşılaştırılmış ve GTD modelinin başarılı sonuçlar verdiği iddia edilmiştir. Tünellerde radyo yayılımı da üzerinde çokça araştırmaların olduğu bir konudur. [9]'daki tez çalışmasında EM dalgaların tünel ortamında yayılımı incelenmiş ve kırınım teorilerinden bahsedilmiştir. Geliştirilen yazılımla tünel ortamında GTD ve UTD

ışın izleme temelli yöntemler kullanılarak EM alan değişimi incelenmiştir. [10]' da yapılan doktora çalışmasında FDTD temelli teknik ile ışın izleme metodunun bir karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırmada, EM yayılımının ortamda bulunan saçıcı nesnelerin boyutlarına ve kullanılan dalga boyuna göre nasıl değişim gösterdiği irdelenmiştir. Ayrıca Lubber katsayılarının FDTD metodunda kullanılması durumunda elde edilen iyileştirmeler irdelenmiştir. [11]' de, FDTD, UTD, geometrik optik ve ToA (Time of Arrival) metotları yardımı ile UWB (Ultra-Wide Band) sinyallerin kullanıldığı kapalı ortamlarda lokalizasyon tahminleri yapılmıştır. Kapalı ortamlarda bulunan insan bedenlerinin farklı açısall hareketlerinin yayılım üzerine etkileri gözlemlenmiştir. Şehirsel ortamlarda radyo yayılımının ışın izleme algoritmaları ile hızlı bir şekilde yapılabilmesine yönelik iyileştirmeler [12]' de önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen tekniklerin sonuçları COST 231 ile elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Cloud Radio Access Network (C-RAN) mimaride ışın izleme yöntemleri kullanılarak tahmini bir kaynak paylaşımı metodolojisi [13]' te gerçekleştirilmiştir. LTE (Long Term Evolution) ağlar kapsamında bulunan birlikte bulunma (co-existing) kısıtları dikkate alınarak sezgisel iyileştirmeler bu çalışmada sunulmuştur. [14]' te endüstriyel ortamlarda kablosuz ağların tesis edilmesinde kullanılan algoritmalar ve metotlar detaylıca incelenmiştir. Farklı modellerin bir arada kullanıldığı bir simülasyon yazılımı da bu çalışma kapsamında geliştirilmiştir. Işın izleme temelli yeni bir deterministik RF yayılım tahmini yaklaşımı [15]' te sunulmuştur. Bu çalışmada temel amaçlardan biri de ışın izleme algoritmalarının hesapsal zaman bakımından daha hızlı çalışabilmesine yönelik iyileştirmeler yapabilmektir.

1.2. Tezin Amacı ve Yöntemler

Bu tez çalışmasında kapalı ortamlarda EM dalgaların yayılımının ışın izleme tekniği ile modellenmesi ve simülasyonu için kullanılabilen, 3Bİİ ismini verdiğimiz bir yazılım aracının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Özellikle tüneller ve yer altı galerileri gibi kablosuz haberleşmenin sorunlu olduğu ortamlarda kablosuz cihazların verimli bir şekilde iletişimini sağlamak, optimum konumlandırmayı gerçekleştirmek ve ortamdaki EM dalgalarının taşıdığı enerji seviyelerinden dolayı patlama veya yanmaya sebep olabilecek değerleri önceden hesaplamak son derece önemlidir. Geliştirilen 3Bİİ yazılım aracı bu gibi durumların önceden tespit edilmesine de yardımcı olacak şekilde yapılandırılmış ve yazılım kütüphanesi bu bağlamda geliştirilmiştir.

EM dalga yayılım analizlerinde Maxwell denklemleri temelli metotların hesap doğruluğunun getirdiği avantajlarının yanında, sahip olduğu uzun hesaplama süreleri ve karmaşıklıklarından dolayı bu çalışmada daha esnek bir yaklaşım modeli olan 3B Işın Başlatma tekniği kullanılmıştır. Yansıma ve kırılma gibi geometrik optik olayları Snell yasasına göre modellenirken kırınım sonrası EM dalganın nasıl kırınacağı Keller konisi modeli ile açıklanmıştır. Yansıma ve kırılma olayları sonucu EM dalgaların gücündeki değişim Fresnel yasasıyla açıklanmaktadır. Kırınım sonrası EM dalganın gücündeki azalma ise UTD model kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu yöntemlerin ayrıntıları tezin ilerleyen bölümlerinde detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

3Bİ yazılım aracında bütün hesaplamalar üç boyutlu (3B) olarak gerçekleştirilmektedir. 3B modelleme için cisimlerin yüzeyleri, üçgenlere bölünerek tanımlanmış ve 3B uzayda ışın-üçgen kesişimi, ışın-kenar kesişimi, ışın-düğüm kesişimi hesaplamaları da bu çalışma sürecinde kullanılmış olup tezin sonraki kısımlarında detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu yazılım aracı ile 3B ortamda kaynak düğümlerden yayılan EM dalgaların, yayılım sürecinde maruz kaldıkları yol kaybı, gölgeleme ve çok yolluluk etkilerinden kaynaklanan kayıp ve gecikmeler literatürde bulunan geometrik optik ve hesaplama yöntemlerine göre modellenerek alıcılarda elde edilebilecek güç seviyesi ve gecikme değerleri farklı senaryolar için tahmin edilmiştir.

3Bİ simülasyon yazılımı sonuçlarının doğruluğunu değerlendirmek için yaklaşık olarak 2x4x270 m boyutlarındaki bir galeri ortamı 3 boyutlu olarak modellenmiş ve değişik senaryolar için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Daha sonra aynı senaryolar için gerçek galeri ortamında deneyler yapılmıştır. Ayrıca literatürdeki bilinen bir simülasyon aracı olan OMNET++ tabanlı Castalia framework'unda, bahsedilen ortam modellenerek ilgili senaryolar için sonuçlar elde edilmiştir. Gerek 3Bİ gerekse gerçek ortam ve OMNET++ tabanlı simülasyonlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirmeler sunulmuştur.

2. ELEKTROMANYETİK (EM) DALGALAR

2.1. EM Dalgaların Genel Özellikleri

Yüklü bir parçacığın ivmeli hareketi sonucu oluşan ve boşlukta ışık hızı ile yayılan dalgalardır. EM dalgalar, birlikte sinüzoidal olarak değişen birbirine dik düzlemdeki elektrik alan ve manyetik alandan meydana gelir. Bir ortamdaki elektrik alanını değiştirmek için yüklü parçacıkları ivmeli olarak hareket ettirmek gerekir. Bu hareket sonucu değişen elektrik alan kendisine dik bir manyetik alan oluşturur. Bu iki bileşenin oluşturduğu EM dalganın, yönü bunlarla aynı yönde ve bunlara diktir [16].

EM dalgalar, dalga boylarına göre radyo dalgaları, mikrodalga, kızılötesi, görünür ışık, morötesi, X-ray ve Gama ışını olarak ayrılırlar. EM dalgaların frekans ve dalga boylarına göre ayrılması EM Spektrum olarak adlandırılır. Tablo 2.1. 'de EM spektrumu gösterilmektedir.

Tablo 2.1. EM spektrum [17]

Spektrum Adı	Frekans	Dalga Boyu	Açıklama
ELF	3 Hz – 30 Hz	100000 km - 10000 km	Aşırı alçak frekans
SLF	30 Hz – 300 Hz	10000 km - 1000 km	Süper alçak frekans
ULF	300 Hz – 3 KHz	1000 km - 100 km	Ses frekansı
VLF	3 KHz – 30 KHz	100 km - 10 km	Çok alçak frekans
LF	30 KHz – 300 KHz	10 km - 1 km	Alçak frekans
MF	300 KHz – 3 MHz	1 km - 100 m	Orta frekans
HF	3 MHz – 30 MHz	100 m - 10 m	Yüksek frekans
VHF	30 MHz – 300 MHz	10 m - 1 m	Çok yüksek frekans
UHF	300 MHz – 3 GHz	1 m - 10 cm	Ultra yüksek frekans
SHF	3 GHz – 30 GHz	10 cm - 1 cm	Süper yüksek frekans
EHF	30 GHz – 300 GHz	1 cm - 1 mm	Süper yüksek frekans

EM dalgaların başlıca özelliklerini şunlardır [18]:

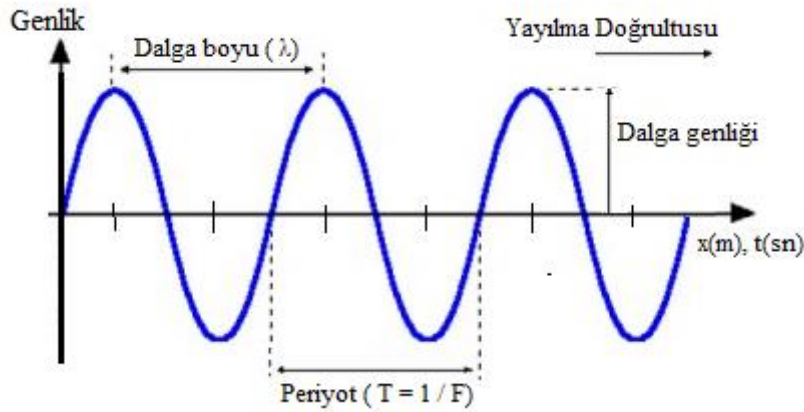
- Yüklü cisimlerin ivmeli hareketi sonucu oluşurlar.
- Kendini meydana getiren elektrik alan ve manyetik alan birbirine diktir ve aynı fazdadır.
- Işık hızı ile yayılırlar.
- Yüksüzdürler ve bu nedenle elektrik ve manyetik alanlardan etkilenmezler.
- Hızları ortam değiştirdiklerinde değişir.
- Soğurulabilirler, soğuran cisimler ısınır.
- Enine dalgalarlardır.
- Boşlukta yayılabilirler.
- Yansıma, kırılma, kırınım ve girişim yapabilirler.
- Polarize edilebilirler.

Bu özelliklere ek olarak EM dalgalara ait temel tanımlar şunlardır:

Frekans: EM dalganın saniyede yaptığı salınım sayısına denir. Birimi Hertz (Hz)'dir.

Dalga Boyu: EM dalgaların bir salınımda aldıkları yola dalga boyu denir. Birimi metre (m)'dir.

Şiddet: EM dalganın şiddeti, birim yüzeyden geçen ortalama güç olarak tanımlanır.



Şekil 2.1. EM dalganın genel özellikleri

Bütün EM dalgalar, boşlukta c ($3 \cdot 10^8$ m/s) hızı ile yayılırlar ve f frekansı ile λ dalga boyu arasında;

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

ilişkisi vardır. Boşlukta EM dalganın hızı, Eşitlik 2.2’ de belirtildiği gibi uzayın dielektrik sabiti (ϵ_0) ile manyetik geçirgenlik (μ_0) değerlerine bağlıdır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir [21].

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.2)$$

2.2. Elektrik Alan

Bir elektrik yükünün başka bir elektrik yükü üzerinde oluşturduğu çekme veya itme kuvveti etkisine elektrik alan denir. Vektörel bir büyüklüktür. Elektrik alan “E” ile gösterilir ve birimi Volt/metre (V/m)’ dir. Elektrik alan, akı yoğunluğuna (D) ve malzemenin yalıtkanlık sabitine (ϵ) bağlıdır. Elektrik akı yoğunluğu birimi Coulomb/metrekare (C/m²)’dir. [17,23-25]. Elektrik alan ile akı yoğunluğu arasındaki ilişki Eşitlik 2.3’ teki gibidir.

$$D = E \cdot \epsilon \quad (2.3)$$

Akı yoğunluğu vektörü, elektrik alan vektörü ile aynı yöne sahip ve şiddeti elektrik alanı oluşturan yük ile orantılıdır.

Dielektrik Sabiti (Permittivity)

Yalıtkanlık sabiti olarak da bilinir. Dielektrik sabiti, bir malzemenin üzerinde yük depolayabilme yeteneğini ölçmeye yarayan katsayıdır ve “ ϵ ” ile gösterilir. Birimi Farad/metre (F/m)’ dir. Dielektrik sabiti, serbest uzayın yalıtkanlık sabiti (ϵ_0) ile malzemenin bağlı dielektrik sabiti olarak ifade edilen (ϵ_r) nin çarpımına eşittir [17, 23-25].

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0, \quad \epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \cong 8.85419 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad (2.4)$$

2.3. Manyetik Alan

Manyetik alan, hareket eden elektrik yükleri tarafından zamanla değişen elektrik alanlardan veya temel parçacıklar tarafından üretilen vektörel bir büyüklüktür. Manyetik alan “H” ile gösterilir ve birimi Amper/metre (A/m)’ dir [17, 23-25].

$$B = \mu \cdot H \quad (2.5)$$

Manyetik akı yoğunluğu “B” ile gösterilir. Birimi Tesla (T) veya Weber/metrekare (Wb/m²) olarak ifade edilir. Eşitlik 2.5’ te görüldüğü üzere manyetik akı yoğunluğu, manyetik geçirgenlik (μ) ile manyetik alan şiddeti ile doğru orantılıdır.

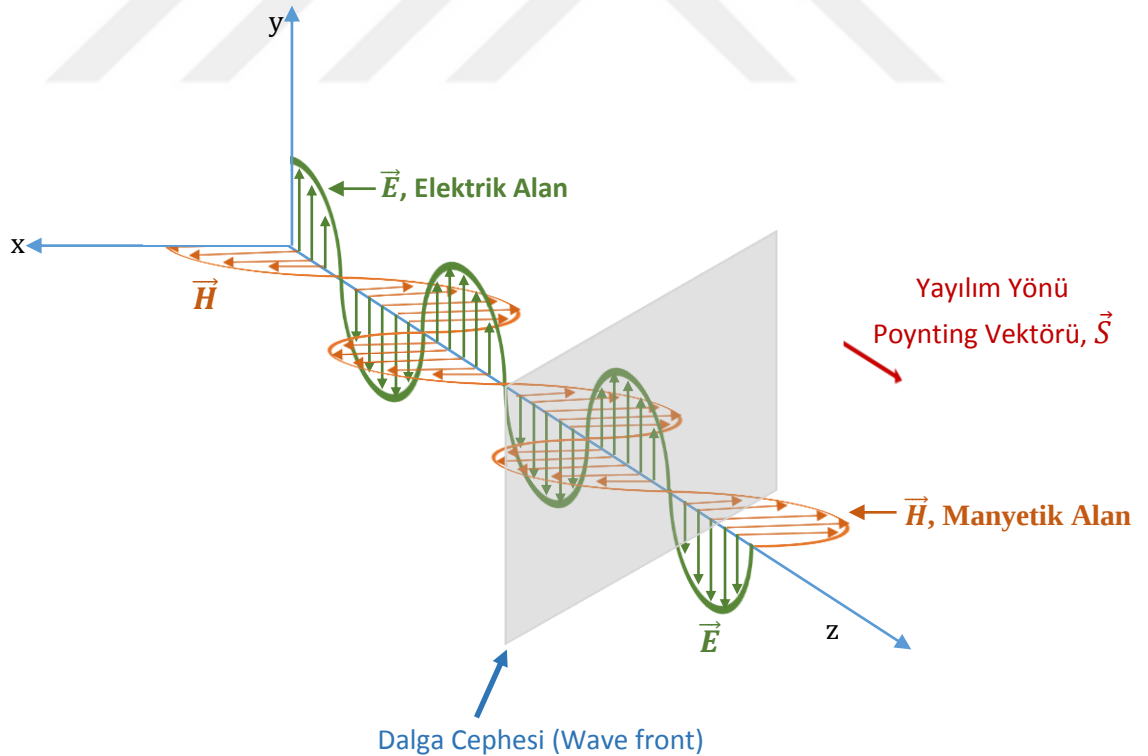
Manyetik Geçirgenlik

Manyetik geçirgenlik “ μ ” ile gösterilir. Malzemenin manyetik geçirgenliğinin birimi Henry/metre (H/m)’dir. Manyetik geçirgenlik, bağıl manyetik geçirgenlik (μ_r) ile serbest uzayın manyetik geçirgenliğine (μ_0) bağlıdır [17, 23-25].

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0, \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (2.6)$$

2.4. Düzlem EM Dalga

EM dalgayı oluşturan elektrik alan ve manyetik alan, içinde bulunduğu ortamda hem birbirlerine hem de yayılma doğrultusuna dik kalıyorsa bu EM dalgaya düzlem EM dalga denir [17, 22, 26].



Şekil 2.2. EM düzlem dalga

Zamanın herhangi bir anında elektrik alan (E) ve manyetik alan (H), kendi eksenlerinde bir vektörel gösterime sahiptirler. Bu gösterimin yapıldığı düzlem, dalga cephesi olarak adlandırılır. Şekil 2.2' de z eksenı yönünde yayılan bir düzlem dalga gösterilmektedir.

Düzlem dalğanın kayıpsız ortamlardaki elektrik ve manyetik alan bileşenleri Eşitlik 2.7a ve 2.7b' deki gibidir [52,54].

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kz) \hat{y} \quad (2.7a)$$

$$\vec{H} = H_0 \cos(\omega t - kz) \hat{x} \quad (2.7b)$$

Kayıplı ortamlar için karmaşık ifadeleri ise 2.8a ve 2.8b' deki gibidir.

$$\vec{E} = E_0 e^{[j(\omega t - kz) - az]} \hat{y} \quad (2.8a)$$

$$\vec{H} = H_0 e^{[j(\omega t - kz) - az]} \hat{x} \quad (2.8b)$$

Bu denklemlerde kullanılan semboller şu şekildedir;

E_0 : Elektrik alan genliği (V/m)

H_0 : Manyetik alan genliği (H/m)

$\omega = 2\pi f$ (Açısal frekans (Hz))

$k = 2\pi/\lambda$ (Açısal faz sabiti (rad/m))

t : zaman (sn)

z : mesafe (m)

Burada a kayıplı ortam zayıflama sabiti olup birimi desibel/metre (dB/m)' veya Neper/metre (Np/m)'dir. Bu kayıp genelde ısıya bağlı kayıpların dikkate alındığı ortamlarda hesaba katılır. [54].

2.5. EM Dalgaların Taşıdığı Enerji

EM dalgalar, elektrik ve manyetik alan bileşenleri sayesinde yayılım doğrultusu boyunca enerji taşırlar ve karşılaştıkları cisimlere enerji aktarabilirler. Bir EM dalğanın birim

zamanda birim alana aktardığı enerji Poynting vektörü ile tanımlanır ve birimi Watt/m²'dir. Şekil 2.2.'deki düzlem dalganın yayılım yönünü gösteren poynting vektörü görülmektedir. Poynting vektörü elektrik ve manyetik alan vektörlerine bağlı olarak Eşitlik 2.9'daki gibi ifade edilir [17, 22, 23, 25, 27].

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B}) = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.9)$$

Poynting vektörünün büyüklüğü, birim yüzey başına gücü ifade eder. Poynting vektörünün herhangi bir noktadaki yönü, o noktadaki enerji akısının yönünü verir. Poynting vektörünün skaler değeri Eşitlik 2.10'daki gibi ifade edilir.

$$S = \frac{E^2}{Z_0} \quad (2.10)$$

Z₀ değeri boş alan empedansı veya serbest uzay empedansı olarak adlandırılır. Bu değer EM dalganın yayılımı esnasında boşluğun gösterdiği dirençtir. Z₀ değeri, uzayın manyetik geçirgenlik değeri ile serbest uzayın dielektrik sabiti cinsinden Eşitlik 2.11'deki gibi ifade edilir [17].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \cong 377 \Omega \quad (2.11)$$

RF (Radio Frequency) sinyalleri EM dalga tabanlı sinyaller olduğu için tezin bundan sonraki bazı bölümlerinde EM dalga ifadesi yerine RF sinyalleri ifadesi de kullanılmaktadır.

2.6. RF Dalganın Maruz Kaldığı Etkenler

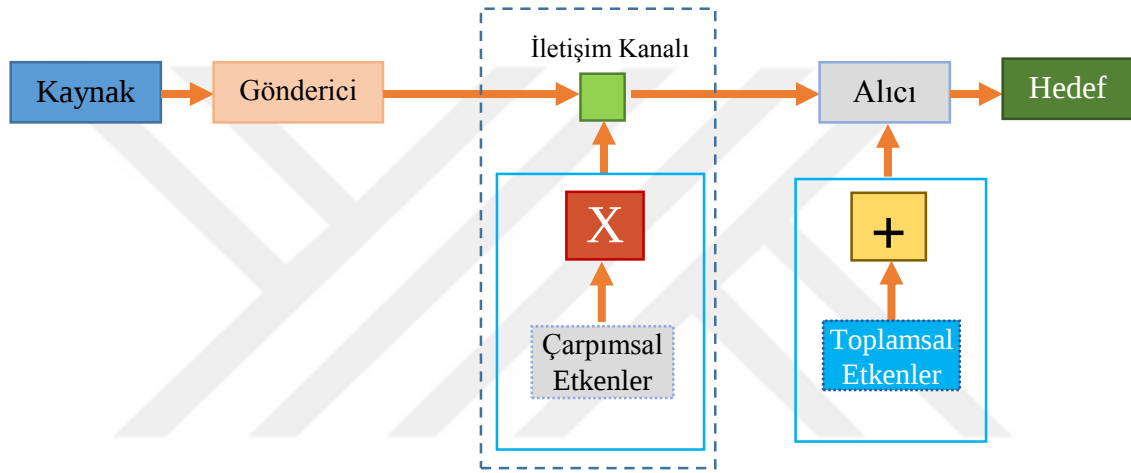
Bir iletişim sinyalinin alıcı ile verici arasında iletildiği, içerisinde farklı fiziksel etkileri barındıran medyaya iletişim kanalı denir. Bu medya kablo, hava gibi fiziksel ortamlar olabilir.

Medya ister kablolu olsun ister kablosuz olsun, ortamda her zaman gürültü, girişim ve bozulma (distorsiyon) gibi etkiler vardır. Medyanın hava olması durumunda iletişim modeli, kablosuz kanal modeli olarak tanımlanır. Kablosuz teknolojilerin modellenmesinde en

önemli ve en karmaşık modül kablosuz kanal modelidir [28, 29, 30, 31]. Kablosuz kanal modeli iki farklı etkene maruz kalır. Bunlar;

- Toplamsal etkenler
- Çarpımsal etkenler

diye ikiye ayrılır. Şekil 2.3.' te bir iletişim sisteminin genel yapısı ve maruz kaldığı etken türleri gösterilmektedir.



Şekil 2.3. İletişim sistemi ve maruz kaldığı etkenler

Toplamsal etkenler, bir alıcı devrenin ısınma, atmosferden alınan kozmik radyasyon veya etraftaki diğer verici devrelerden kaynaklanan gürültü ve girişim etkileridir. Bu etkenlerden bazıları kontrol edilebilirken bazıları sınırlı kontrol edilebilir, bazıları ise kontrol edilemezler.

Çarpımsal etkenler, alıcı verici arasında sinyalin karşılaştığı olaylardan dolayı oluşan bozulmalardır. Bu bozulmalara (distorsiyonlara) sebep olan faktörler; antenlerin yönsel karakteristikleri, yansıma, sönümlleme, saçılma, kırınım ve kırılma. Bu bozulma etkenleri aynı zamanda bu tez kapsamında da ayrıca irdelendiğinden bunlara kısaca değinmek uygun olacaktır.

- **Antenlerin Yönsel Karakteristikleri ve RF Dalgaların Polarizasyonu (Kutuplanma)**

RF sinyalleri enine dalgalar olduğundan polarize olabilirler. Ortamda yayılan RF dalganın elektrik alanının doğrultusunun yer düzlemine göre yönelimi dalganın polarizasyonu veya kutuplanması olarak tanımlanır. Başka bir ifadeyle elektrik alan bileşenin zamanla oluşturduğu şekle denilir. Eğer RF dalganın elektrik alan bileşeni yer düzlemine paralel ise yatay polarizasyonlu, dik konumda ise düşey polarizasyonlu olarak tanımlanır.

- **Yansıma (Reflection)**

RF sinyalleri, dalga boyundan daha büyük bir yüzeye çarpmasıyla yansıma olayı gerçekleşir. Yansıma yüzeyinin mükemmel bir yansıtıcı olması durumunda gelen dalga, enerjisinde bir kayıp olmadan yansır. Buna karşılık yansıma yüzeyinin yalıtkan olması durumunda gelen dalga enerjisinin bir kısmını kaybederek yansır.

- **Kırınım (Diffraction)**

RF sinyalleri, ortamda yayılırken keskin yüzeylere ve kenarlara çarpması sonucu doğrultusu değişmiş RF dalgaları yayarlar. Bu olaya kırınım denir. Kırınım sonucu RF dalgasının gücünün bir kısmı soğrulur.

- **Kırılma (Refraction)**

RF dalgalar fiziksel yoğunlukları farklı olan bir ortamdan diğerine geçerken, bu iki ortamdaki hız farkı nedeniyle yön değiştirir. RF dalganın bu şekilde yön değiştirmesine kırılma denir.

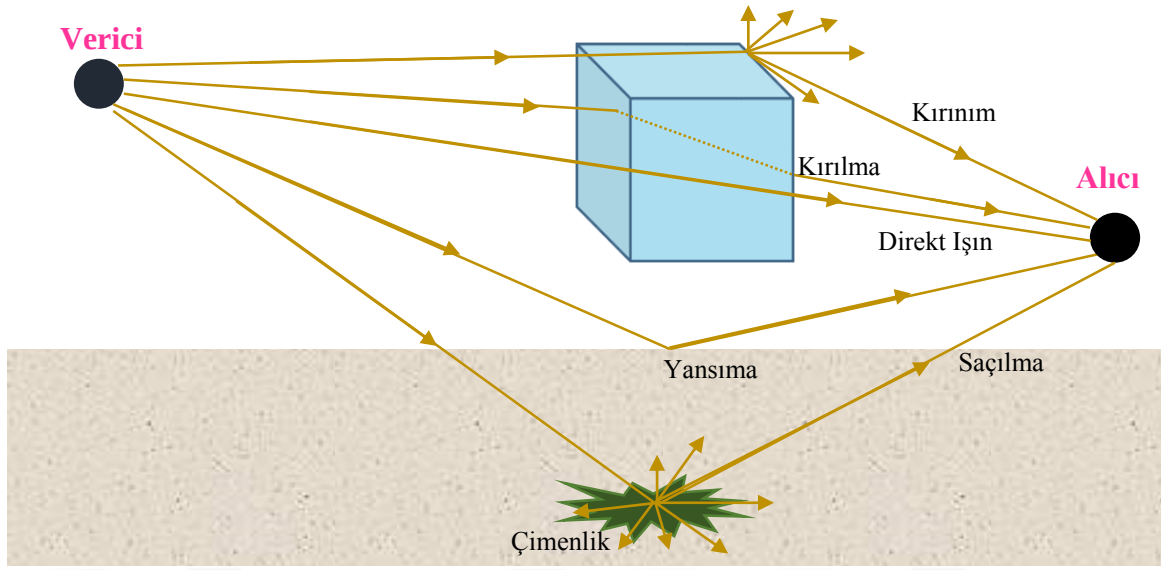
- **Saçılma (Scattering)**

Yayılan RF dalganın, dalga boyunun çarptığı yüzeye göre büyük olması ve bu yüzeydeki birim alana düşen engellerin çok olmasıyla oluşur. Bu yüzeylere çarpan RF dalga rastgele yüzeylere dağılır. Pürüzlü yüzeyler, küçük nesneler, çimenlikler, trafik işaretleri ve lamba direkleri saçılma kaynakları arasında gösterilebilir. Bu çalışmada kullanılan EM sinyalinin dalga boyu yaklaşık 12.5 cm (2.4 Ghz) ve çalışılan ortam nispeten daha az pürüzsüz olduğundan bu etki ihmal edilmiştir.

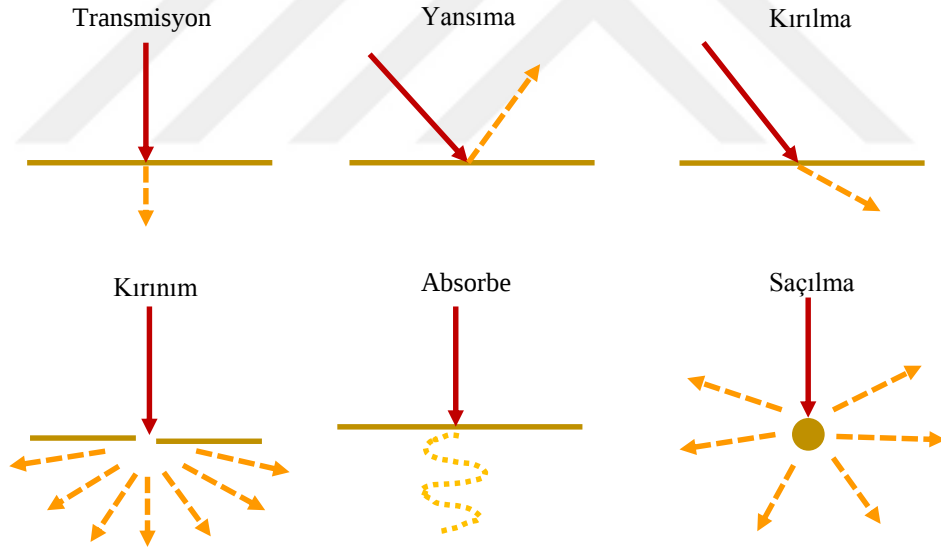
- **Sönümlleme (Absorption)**

RF dalgaların bir yüzeye çarpması sonucu gücünün bir kısmının çarptığı yüzey tarafından absorbe edilip gücünün azalmasıdır [32-36].

RF sinyallerde çarpımsal etkenlere sebep olan bu etkiler Şekil 2.4. ve 2.5.' te verilmiştir.



Şekil 2.4. EM dalga yayılımındaki temel olaylar



Şekil 2.5. Çarpımsal etkenlere sebep olan olaylar

2.7. Yayılım Boyunca RF Dalgalarda Sönümlenme ve Bozulma

RF dalgalar iletişim kanalı boyunca maruz kaldığı etkilerden dolayı sönümlenme ve bozulmaya (distorsiyon) maruz kalırlar. Bu sönümlenme ve bozulma iki başlık altında incelenir.

- Yol Kayıpları (Path Loss)
- Genel Sönümlemeler (Fading)

2.7.1. Yol Kayıpları

RF dalga gücünün mesafeye bağlı olarak zayıflamasıdır. İletişim kanalının modellenmesindeki en temel etkidir.

2.7.2. Ortamsal ve Özel Sönümlemeler

RF sinyallerinin yansıma, kırılma, kırınım gibi ışının temel olayları ve alıcıda farklı fazlardaki RF sinyallerinin birbirine etkileri sonucu gibi çeşitli nedenlerden gücünün azalması bu tür sönümlemelerdir [28-31]. Ortamsal ve özel sönümlemeler üçe ayrılır. Aşağıda bunlar açıklanmaktadır.

2.7.2.1. Çok Yavaş (Very Slow) ve Yavaş (Slow) Sönümlemeler

Yol kaybı (çok yavaş sönümleme) ve gölgelemeden (yavaş sönümleme) kaynaklanan sinyal zayıflamalarıdır. Bu tip yavaş sönümlemelere genel olarak büyük ölçekli sönümleme (large-scale fading) veya gölgeleme (shadowing) sönümleme de denilmektedir. Etrafımızdaki fiziksel varlıklar (binalar, ağaçlar vs.) kablosuz iletişim sinyallerinin sönümlemesinde ayrı bir rol oynarlar. Bu nedenle aynı frekans bandını kullanan bir kablosuz iletişim sistemindeki RF yayılımı, açık alanlarda farklı, şehirsal alanlarda farklı, ormanlık alanda farklı ve kapalı alanlarda farklı yayılım ve sönümleme gösterirler [28-31].

2.7.2.2. Hızlı (Fast) Sönümlemeler

Bu sönümleme türü küçük ölçekli sönümleme (small-scale fading) veya çoklu yol (multipath) sönümleme olarak da bilinir. Bir vericinin anteninden çıkan RF sinyalleri, fiziksel ortamda farklı nesnelerden yansıyarak, kırılarak, kırınıma uğrayarak veya saçılarak alıcı antene birden fazla yolla ulaşabilmektedir. Farklı yollardan farklı zamanlarda alıcıya ulaşan bu sinyaller arasında doğal olarak bir faz farkı meydana gelmektedir. Bu faz (sinyal formları arasındaki zaman farkı) farkından dolayı alıcı antendeki bu çoklu sinyaller, birbirini yok edici veya toplayıcı olabilirler. Bu da sinyal enerjisinde dalgalanmalara yol açmaktadır. Pratikte bu isimlendirmelerden en çok ‘multipath fading’ ifadesi tercih edilmektedir [28-31].

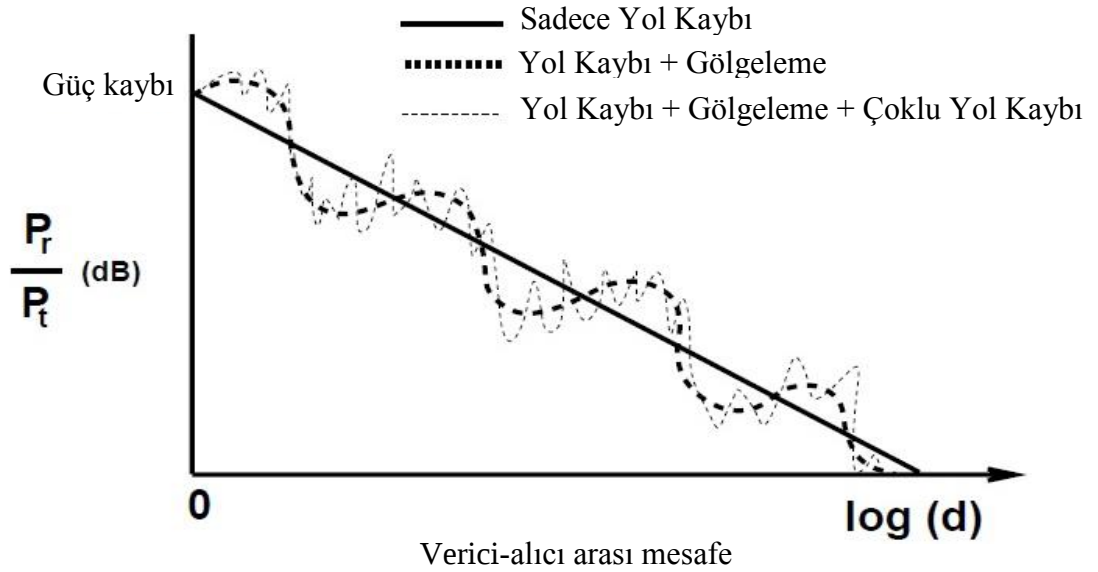
2.7.2.3. Özel Sönümler

Genellikle büyük bant genişliğine sahip kablosuz iletişimlerde görülen bir sönümleme türüdür. Bu tür sönümler de iki ayrılır;

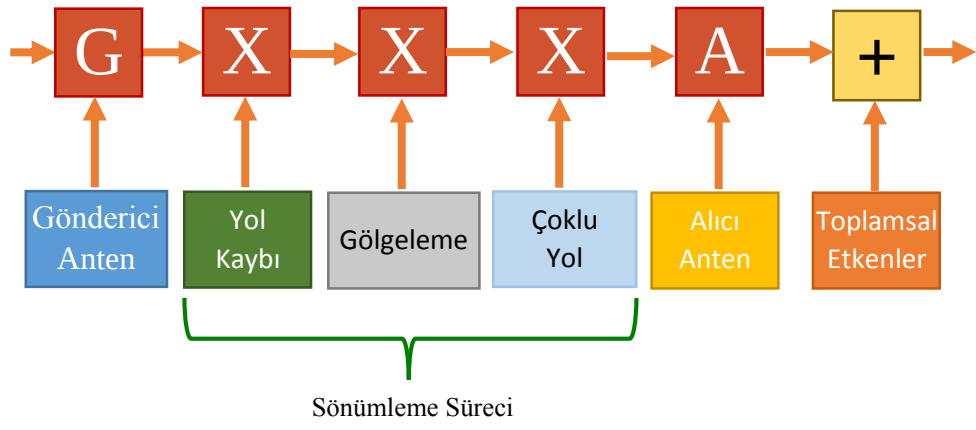
- Frequency Selective Fading
- Flat Fading

Ancak bu etkiler sadece çok yüksek bant genişliği kullanan spesifik sistemlerde ortaya çıktığından günlük hayatta kullanılan kablosuz iletişimlerde genellikle ihmal edilirler [28-31].

RF sinyalinin; çok yavaş sönümleme, yavaş sönümleme ve hızlı sönümler sonucu sinyal gücündeki değişimler Şekil 2.6 ve 2.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. RF sinyalinin sönümleme türlerine göre gücünün azalması



Şekil 2.7. Kablosuz kanalın maruz kaldığı sönümlmeler

3. KABLOSUZ KANAL MODELLERİ

Yayınlanan radyo sinyalindeki güç kayıplarının, gecikmelerin, çoklu yol etkilerinin alıcı tarafta doğurduğu sonuçları incelemek açısından kablosuz kanal modelleme hayati bir rol oynamaktadır. RF sinyallerinin yayılımı ile ilgili birçok model mevcuttur. Bu modeller kendi arasında radyo sinyalinin bant genişliği, modelleme yöntemi ve uygulama senaryosu gibi sınıflara ayrılır. Bant genişliği açısından bakıldığında; geniş bant ve dar bant modelleri olarak kategorilendirilebilir. Modelleme yöntemi açısından; ampirik modeller, olasılıksal modeller, deterministik modeller ve yarı deterministik modeller şeklinde kategorilendirilebilir. Yayılım modeline uygulama senaryosu açısından bakıldığında ise kapalı ortam yayılım modelleri ve açık ortam yayılım modelleri şeklinde incelenebilir. Bu tez çalışmasında bir deterministik yöntem olan ve kapalı ortamlardaki geniş bant sinyallerinin modellenmesinde başarılı sonuçlar veren 3Bİİ yöntemi kullanılmıştır [17, 32, 33, 35-38]. Aşağıda literatürde yer alan belli başlı radyo yayılım modelleri de kısaca açıklanmaktadır.

3.1. Genel Yol Kayıp Modeli

Kablosuz kanal modellemede en genel güç kayıp ifadesi alıcı gücünün (P_r) verici gücüne (P_t) oranıdır. Bu oran Eşitlik 3.1' deki gibidir.

$$PL(dB) = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (3.1)$$

3.2. Açık Alan (Free Space) Yayılım Modeli

Radyo yayılım modellerinin en basitidir. Bu modele göre verici ile alıcı arasında herhangi bir engel olmadığı varsayılır. Friis yasasına göre vericiden d mesafe uzaklıktaki alıcının aldığı sinyal gücü Eşitlik 3.2' deki gibi hesaplanır.

$$P_r(d) = P_t * G_t * G_r * \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.2)$$

P_r , alıcının aldığı sinyalin gücü, P_t vericinin transmisyon gücü, G_t ve G_r sırasıyla verici ve alıcı antenlerin kazançları, λ ise sinyalin dalga boyudur [17, 32, 33, 35-38].

3.3. Ampirik Modeller

Radyo yayılımının tahmini için pek çok model geliştirilmiş olsa da bazı durumlarda bu modeller yeterli kalmamaktadır. Böyle durumlarda önceki tecrübelerle dayanarak ve deneysel olarak ölçülmüş verilere göre geliştirilen ampirik modeller devreye girmektedir. Ampirik modeller, yayılım ortamının fiziksel geometrisini basitleştirecek varsayımlar yaparak veya ortamdaki ölçüm verilerine dayanarak oluşturulur. Ampirik modeller uzun işlem hesaplama süreleri gerektirmediğinden hızlı ve pratiktir fakat fiziksel ortam geometrisinin karmaşık olduğu ortamlarda gerçeğe yakın sonuçlar vermeyebilir. Ampirik model, düşük hesaplama süresi ve hesaplama yükü nedeniyle ağ tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kapalı ortamlarda kullanılan beş ampirik modele aşağıda değinilmiştir [17, 32, 33-38].

3.3.1. Log Distance Free Space Model

Sık kullanılan bir yayılım modelidir. Mesafeye bağlı yol kaybını hesaba katıp yavaş sönümlenme (slow fading) ve hızlı sönümlenmeyi (fast fading) hesaba katmaz. Bu model Eşitlik 3.3' teki gibi hesaplanır.

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10 * n * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.3)$$

Burada $PL(d_0)$, önceden belirlenmiş bir referans uzaklıkta (d_0) ölçülmüş güç değeri, d değeri ise alıcı ile verici arasındaki mesafedir. n değeri ise ortama bağlı katsayıdır ve genellikle 1-6.5 arasında bir değer seçilir.

3.3.2. One-Slope Model

Bu model alıcı ve verici arasındaki mesafeye bağlı yol kaybını free space modeldeki gibi logaritmik bir azalış olarak hesaplar. Uygulanması kolay bir modeldir fakat fiziksel açıdan karmaşık kapalı ortamlarda iyi sonuçlar vermeyebilir. Bu modelde d mesafe uzaklıktaki alınan sinyal gücü Eşitlik 3.4' teki gibi hesaplanır.

$$PL(d) = L_0 + 10 * n * \log(d) \quad (3.4)$$

Burada L_0 desibel cinsinden bir metre mesafedeki referans yol kaybı değeridir, n değeri ise deneysel olarak belirlenen mesafeye bağlı logaritmik azalış ifadesinin katsayısıdır [17, 32, 33, 35-38].

3.3.3. Duvar ve Zemin Faktörü Modeli

Bu model de one-slope modelde olduğu gibi free space yol kaybı temellidir. Bu model ayrıca verici ve alıcı arasında düz çizgi ile kesişen duvar ve zemin sayısını da hesaba katar. Bu modelde d mesafe uzaklıktaki alınan sinyal gücü Eşitlik 3.5' teki gibi hesaplanır.

$$PL(d) = L_1 + 20 * \log(d) + n_w L_w + n_f L_f \quad (3.5)$$

L_1 değeri verici ve alıcı arasındaki 1 metrelik mesafedeki yol kaybıdır, n_w ve n_f değerleri sırasıyla duvar ve zemin sayılarıdır, L_w ve L_f değerleri de sırasıyla duvar ve zeminden kaynaklı neden olan girişim kayıplarıdır [17, 32, 33, 35-38].

3.3.4. COST231 Çoklu Duvar Modeli

Bu model Duvar ve Zemin Faktörü modelinin geliştirilmiş halidir. Bu model de ayrıca farklı duvar ve zemin tipleri de hesaba katılır. Bu modelde alınan sinyal gücü Eşitlik 3.6' daki gibi hesaplanır.

$$PL(d) = L_{FS} + L_C + \sum_{i=0}^W L_{wi} n_{wi} + L_f n_f \left(\frac{n_f + 2}{n_w + 1} - b \right) \quad (3.6)$$

L_{FS} alıcı ve verici arasındaki free space yol kaybı, L_{wi} değeri i türündeki duvar için girişim kaybı, n_{wi} değeri i türündeki duvarların sayısı, L_f zemin başına girişim kaybı, n_f değeri zemin sayısı, b ve L_C değerleri ise deneysel olarak belirlenen katsayılarıdır [17, 32, 33, 35-38].

3.3.5. Lineer Zayıflama Modeli

Bu model verici ve alıcı arasındaki mesafeye bağılı olarak zayıflamayı lineer olarak azaldığını varsayar. Bu modelde d mesafe uzaklıktaki alınan sinyal gücü Eşitlik 3.7' deki gibi hesaplanır.

$$PL(d) = L_{FS} + a_n * d \quad (3.7)$$

Bu ifadedeki L_{FS} alıcı ve verici arasındaki free space yol kaybı, a_n değeri ise zayıflama katsayısıdır [17, 32, 33, 35-38].

3.4. Olasılıksal (İstatistiksel) Modeller

Olasılıksal modeller genellikle çok yollu sönümlemeleri yani küçük ölçekli sönümlemeleri modellemek için kullanılır. Bu modeller belirli bir yönteme göre rastgele olarak her defasında farklı sonuçlar üreten modellerdir. Olasılıksal modeller, radyo sinyalinin sönümlemesini rastgele bir durum olarak farz eder ve sönümleme türüne göre farklı olasılık metotları kullanır. Vericiden gönderilen sinyalin kırılma, yansıma, saçılma ve kırınım gibi olaylar sonucu alıcıya birden fazla yolla ulaşması, alıcıda aynı sinyalin farklı fazlarının ulaşmasına neden olur. Dolayısıyla sönümlenen bu sinyallerin genlikleri de farklı olmaktadır. Küçük ölçekli sönümleme (small scale fading) veya çokluyol sönümlemesi (multipath fading) olarak adlandırılan bu modellerin en bilinenleri; Rayleigh Fading modeli, Rice Fading modeli ve Nakagami-m Fading modelidir. Verici ve alıcı arasındaki engellerden kaynaklı sönümlemeler de farklı bir sönümleme sürecidir. Bu sönümlemelerden dolayı alıcıdaki küçük ölçekli sönümlemelerin ortalamasında değişiklikler meydana gelmektedir. Büyük ölçekli sönümleme modelleri arasında en bilinen yöntem ise Log-normal fading modelidir [17, 32, 33, 35-38].

3.4.1. Rayleigh Sönümleme Modeli

Bu model alıcı ve verici arasında açık görüşün olmadığı durumlarda çokluyol sönümlemesini modellemek için kullanılır. Rayleigh dağılımına göre alınan sinyalin dağılımı Eşitlik 3.8' deki gibidir.

$$P\alpha(\alpha) = \frac{2\alpha}{\Omega} * \exp\left(-\frac{\alpha^2}{\Omega}\right), \alpha \geq 0 \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.8’ deki α değeri sinyalin genliğidir, $\Omega = \overline{\alpha^2}$ değeri ise sönümlemenin ortalama gücüdür [17, 32, 33, 35-38].

3.4.2. Rice Sönümleme Modeli

Rice dağılımı Nakagami-n dağılımı olarak da bilinir. Rice sönümleme modeli açık görüşün olduğu (LOS) senaryolarda kullanılan bir çokluyol sönümleme (multipath fading) modelidir. Alınan sinyalin genliği Nakagami-n dağılımındaki n parametresine göre hesaplanır. n değeri 1 ile ∞ arasında değişen bir değerdir. Rice sönümleme dağılımı Eşitlik 3.9’ daki gibidir.

$$P\alpha(\alpha) = \frac{2(1+n^2)e^{-n^2}\alpha}{\Omega} * \exp\left(-\frac{(1+n^2)\alpha^2}{\Omega}\right) I_0\left(2 * n * \alpha \sqrt{\frac{1+n^2}{\Omega}}\right), \alpha \geq 0 \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9’ daki n değeri Rice K ($K = n^2$) faktörü ile ilgilidir. K değeri açık görüş (LOS) bileşeninin gücünün tüm açık olmayan görüş bileşenlerine (NLOS) oranı olarak tanımlanır. Bu değer 0’a yaklaştıkça Rice dağılımı Rayleigh dağılımına indirgenir, ∞ değerine yaklaştıkça ise Gaussian dağılımına yaklaşır [17, 32, 33, 35-38].

3.4.3. Nakagami-m Sönümleme Modeli

Nakagami-m sönümleme modeli kapalı mobil ortamlarda başarılı sonuçlar veren bir modeldir. Nakagami-m dağılımı Eşitlik 3.10’ daki gibidir.

$$P\alpha(\alpha) = \frac{2m^m \alpha^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\alpha^2}{\Omega}\right), \alpha \geq 0 \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10’ daki m değeri Nakagami-m sönümlemesinin m parametresi olarak adlandırılır, Γ değeri ise gama fonksiyonudur. m değerinin 0,5 ile ∞ arasında olması sönümlemenin şiddetli olduğunu gösterir. Bu değerden küçük değerlerde sönümlemenin şiddeti azdır [17, 32, 33, 35-38].

3.4.4. Log Normal Sönümlleme Modeli

Log-normal sönümlleme modeli hem kapalı ortamlarda hem de açık ortamlarda, yol kaybı ve gölgeleme kayıplarını hesaplamada kullanılan bir modeldir. Log-normal sönümlleme modeli Eşitlik 3.11a' daki gibidir.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\eta \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (3.11a)$$

$$X_\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.11b)$$

X_σ katsayısının hesabı, Eşitlik 3.11b' deki normal dağılım (Gauss fonksiyonu) fonksiyonuna göre yapılır. Burada $\mu=0$ olup, σ (standart sapma) ve η (yol kaybı katsayısı) ortam şartlarına göre değişim gösterebilen parametrelerdir ki literatürde bulunan pek çok çalışmada deneysel olarak hesaplanmışlardır [51].

3.5. Deterministik Modeller

Radyo sinyallerinin deterministik yöntemlerle modellenenebilmesi için fiziksel ortamın geometrik bileşenlerinin ve dielektrik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu özellikleri bilen radyo yayılım ortamı ışının temel unsurları olan yansıma, kırılma ve kırınımı da hesaba katarak Maxwell denklemleri yardımıyla gerçeğe yakın sonuçlar verecek şekilde modellenenebilir.

Maxwell, elektrik ve manyetik alanların yükler ve akımlar tarafından nasıl değiştirildiği ve üretildiğini açıklayan 4 denklemi esas almıştır. Her ne kadar başkaları tarafından geliştirilse de bu denklemler zamanla Maxwell denklemleri adını almıştır. Bu denklemler aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

Gauss Yasası: Herhangi bir kapalı yüzeydeki elektrik akısı, bu yüzeyde bulunan net yükün elektriksel geçirgenliğe (ϵ_0) bölümüne eşit olduğunu ifade eder.

Manyetizmada Gauss Yasası: Kapalı bir yüzeydeki manyetik alan akısının sıfır olduğunu ve dolayısıyla manyetik yüklerin olmadığını belirtir.

Faraday Yasası: Değişen bir manyetik akının oluşturduğu manyetik alan ile ilgilidir. Değişen bu manyetik alanın bir elektrik alan oluşturduğunu ifade eder.

Ampere-Maxwell Yasası: Ampere yasasının Maxwell tarafından değiştirilmiş halidir. Maxwell tarafından denklemin sağ tarafına eklenen yeni terim değişen bir elektrik alanın bir manyetik alan oluşturduğunu ifade etmektedir [17, 22, 23].

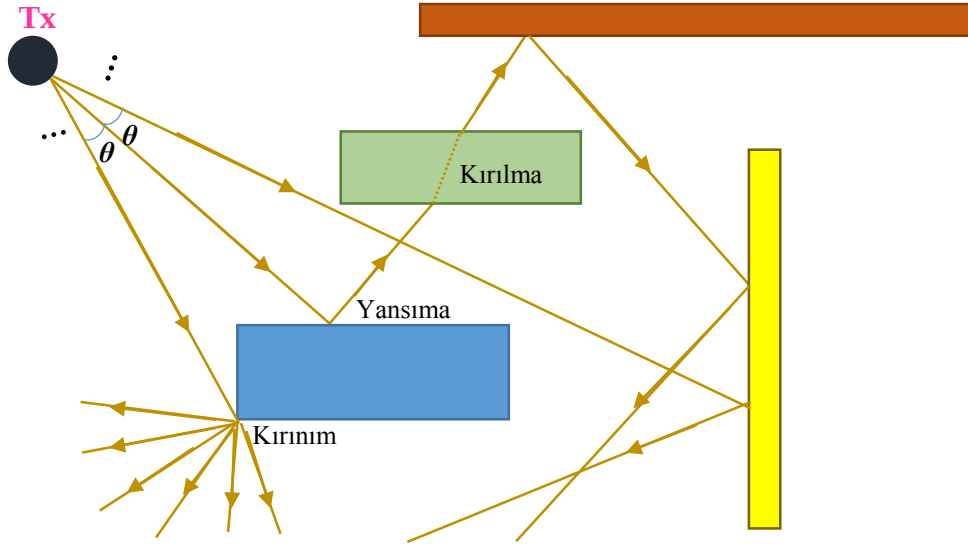
Maxwell denklemlerini çözen nümerik yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlar aşağıda belirtilmiştir.

- FDTD (Finite Difference Time Domain)
- VEP (Vector Parabolic Equation)
- MoM (Method of Moments)
- FEM (The Finite Element Method)

Deterministik yöntemlerin uygulanabilirliğinde karşılaşılan temel iki problem vardır. İlk problem Maxwell denklemlerinin getirdiği hesaplama yüküdür ikinci problem ise fiziksel ortamın dielektrik özellikleri ile birlikte gerçeğe yakın modellenmesidir. Artan işlemci gücü, bellek miktarı ve gelişen hesaplama yöntemleri ilk problemdeki sorunları azaltmakla birlikte fiziksel ortamın başarılı bir şekilde modellenmesi gerçeğe yakın sonuçların üretilmesinde büyük bir problem ve tasarım açısından zaman alıcı bir unsur olarak devam etmektedir. Diğer deterministik model ise ışın optik modelleridir. Bu tez çalışmasında geliştirilen 3Bİİ kütüphanesi de ışın başlatma modelini esas alan deterministik yöntemlerden biridir [17, 32, 33, 35-38]. Işın izleme teknikleri ışın başlatma ve ışın izleme modelleri diye ikiye ayrılır. Bu modeller aşağıda açıklanmaktadır.

3.5.1. Işın Başlatma (Ray Launching) Modeli

Işın başlatma modelinde vericiden belirli açılarla ışınlar gönderilir. Gönderilen bu ışınlar ortamda yansıma, kırılma ve kırınıma uğrar. Alıcı ile kesişen ışınlar alınan sinyalin gücünü belirler. Işın başlatma modeli ve ışının maruz kaldığı etkiler Şekil 3.1' de gösterilmiştir.

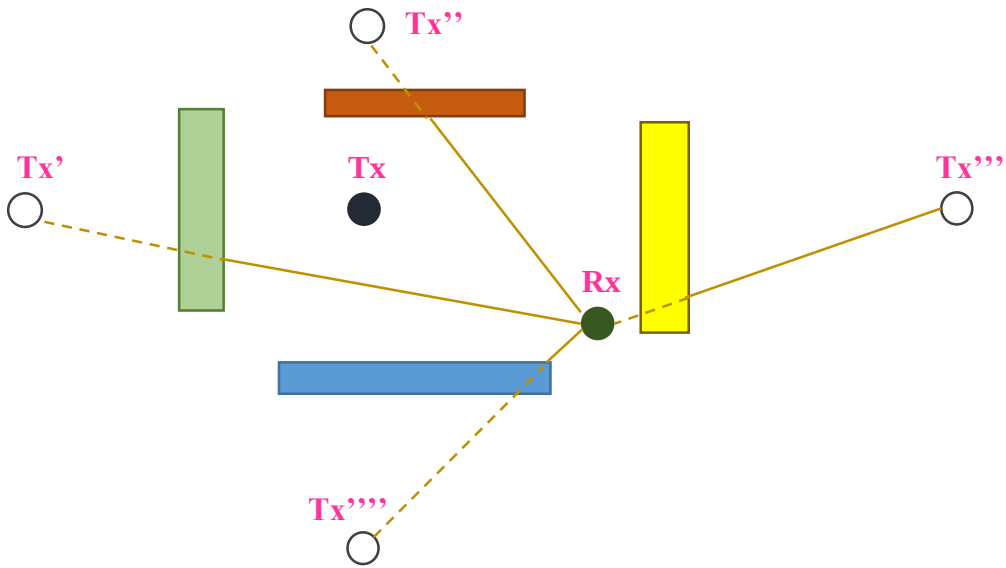


Şekil 3.1. Işın başlatma modelinde ışının maruz kaldığı etkiler

Yansıma, kırılma ve kırınım olayları verilen belirli bir sayıya ulaşıncaya kadar ve sinyalin gücü eşik değerin altına düşene kadar ortamdaki ışınların yayılımı devam eder [17, 32, 33, 35-38].

3.5.2. Işın İzleme (Ray Tracing) Model

Bu model ortamdaki yüzeyleri birer yansıtıcı olarak kabul eder. İstenen derinliğe göre vericinin yüzeylere göre yansımalarını alır. İmge metodu da denen bu yönetime göre her bir yansıma bir verici kaynağı olarak kabul edilir.



Şekil 3.2. Işın izleme yöntemi

Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi asıl vericinin (Tx) her bir yüzeye göre yansıması alınarak Tx’, Tx’’, Tx’’’ sanal vericileri bulunmuştur. Bundan sonraki aşama bu vericilerin alıcıyı (Rx) görüp görmemesidir. Verici ile alıcı arasında bir engel yoksa vericiden gönderilen sinyalin alıcıya ulaştığı varsayılır [17, 32, 33-38].

3.6. Yarı Deterministik Modeller

Yarı deterministik modeller, deterministik modellerin istatistiksel modeller veya ampirik modellerle olan kombinasyonu sonucu oluşturulmuş ve temel amacı deterministik modellerin hesaplama zamanı ve hesaplama yükü açısından iyileştirmek olan modellerdir. Dominant path model, motif model ve geometri tabanlı istatistiksel kanal modeli belli başlı yarı deterministik modellerdir [17, 32, 33, 35-38].

4. SİMÜLATÖRLER

Sistemlerin tasarımında ve maliyetlerin hesaplanmasında simülatörler önemli bir yeri teşkil etmektedir. Tasarlanacak sistem kablosuz haberleşmeyi içeriyorsa tahminler bir o kadar zorlaşacak ve radyo yayılımının maruz kaldığı birçok etki karşımıza çıkacaktır [40]. Bu bölümde, tez çalışmasında da kullanılan sensör düğümler için geliştirilmiş belli başlı simülatör programlarına değinilmektedir. Bu programlardan en çok bilinenleri şunlardır:

- NS-2 nin bir framework u olan Mannasim
- OMNET++ ın framework' leri Castalia ve MiXiM
- TOSSIM
- Cooja
- OPNET

Farklı yeteneklere sahip olan bu simülatörler desteklediği kablosuz kanal modülü, radyo modülü, MAC (Medium Access Control) protokolleri, yönlendirme protokolleri ve enerji tüketim modülüyle birbirlerinden ayrılmaktadır. Bu özelliklerin yanı sıra esnek ve geliştirilebilir olması da kullanıcılar ve geliştiriciler için önemli hususlardır.

Bu tez çalışmasında radyo yayılımı üzerine çalışıldığından simülatörleri destekledikleri kablosuz kanal modülü üzerinden değerlendirmek gerekir. Tablo 4.1' de bu simülatör programlarının destekledikleri kanal modelleri yer almaktadır.

Tablo 4.1. Simülatörler karşılaştırması [40]

Simülatör	Destekledikleri Kablosuz Kanal Modelleri
NS-2	Free space, Two-ray ground reflection, Log normal shadowing
Castalia	Free space, Temporal variation, Log normal shadowing, Additive interference
MiXiM	Log normal shadowing, Free space, Adapted free space, Jakes fading
Tossim	Log normal shadowing, Noise modeling
Cooja	Disk model, Directed graph, Multi-path ray tracing
Opnet	Free space, Log normal shadowing

5. TEZ KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALARDA KULLANILAN BİLİMSEL YÖNTEMLER VE TEKNİKLER

Bu bölümde ışının maruz kaldığı yansıma, kırılma ve kırınım olaylarının geometrilerinin ve ilgili elektromanyetik hesaplarının nasıl gerçekleştirildiğine değinilmektedir. Bu olaylar gerçekleştirilirken hangi bilimsel yöntemler ve teorilerin kullanıldığı açıklanmakta ve bu yöntem ve teorilerle ilgili kısa bilgiler verilmektedir. Ayrıca RF dalgaların maruz kaldığı yol kaybı (path loss), gölgeleme (shadowing) ve çoklu yol (multipath) etkilerinin nasıl modellendiği bu bölümde detaylı olarak anlatılmaktadır. Bu modellerden oluşturulan algoritmalar, Java ortamında yazılmış olan 3Bİ simülasyon programındaki sınıf yapıları içerisinde kullanılmıştır.

5.1. Işının Modellenmesi

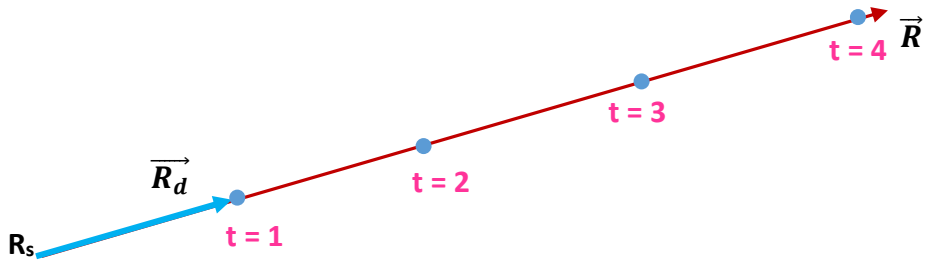
Göndericiden yayılan, yansıyan, kırılan veya kırınım sonucu oluşan ışınlar, belirli bir başlangıç noktasından belirli bir yön vektörü doğrultusunda bilgi / öz nitelik taşıyan ve aşağıdaki gibi modellenen vektörel bir büyüklüktür. Burada başlangıç noktası $R_s (x_s, y_s, z_s)$ olan ve normalize edilmiş $R_d (x_d, y_d, z_d)$ doğrultusu boyunca ilerleyen $R (x, y, z)$ ışınının gösterimi Şekil 5.1' deki gibi olup, herhangi bir andaki koordinat değerleri Eşitlik 5.1' den elde edilebilir. Burada t adım sayısını ifade etmektedir.

$$\vec{R} = R_s + t\vec{R_d} \quad (5.1a)$$

$$x = x_s + tx_d \quad (5.1b)$$

$$y = y_s + ty_d \quad (5.1c)$$

$$z = z_s + ty_d \quad (5.1d)$$

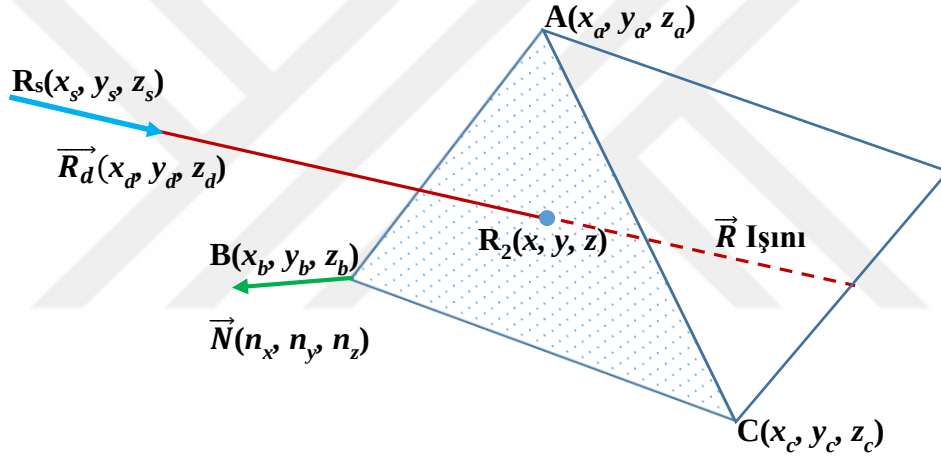


Şekil 5.1. Işının modellenmesi

Verici düğüm tarafından ortama yayılan RF dalgası belirtilen yansıma, kırınım ve kırılma sayısı kadar ortamdaki engellerle kesişimi hesaplanıp yeni ışınlar oluşturulur. Belirlenen bu sınır şartlarından herhangi birine ulaşılması durumunda yeni ışın üretme sona erer.

5.2. Işının Yüzey ile Kesişimi

Işının engellerle yansıma ve kırılma yapabilmesi için bunların yüzeyleri ile olan kesişimlerinin hesaplanması gerekmektedir. Ortamdaki tüm duvar ve nesnelerin yüzeyleri üçgenlere bölünerek tanımlandığından yüzey kesişim noktasının bulunması için ışın-üçgen kesişimi hesaplanmalıdır.



Şekil 5.2. Işın yüzey kesişimi

Literatürde ışın-üçgen kesişimiyle ilgili çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları; alan hesabıyla ışın-üçgen kesişimi, Möller ve Trumbore yöntemi, Jordan Curve teoremi ile ışın-üçgen kesişimidir [42]. Bu tez çalışmasında ışın-üçgen kesişimi, alan hesabı yöntemi kullanılarak bulunmuştur.

Işın-üçgen kesişimini hesaplamak için öncelikle üçgen yüzeyin normal vektörünün hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama için vektörel çarpımdan yararlanılır.

$$\vec{N} = \vec{BC} \times \vec{BA} \quad (5.2)$$

Eşitlik 5.3' teki gibi üçgenin yüzey denklemi yazılır.

$$n_x(x - x_a) + n_y(y - y_a) + n_z(z - z_a) = 0 \quad (5.3)$$

Eşitlik 5.3’ teki n_x, n_y, n_z değerleri üçgenin normal vektörünün (N) koordinatları; x_a, y_a, z_a değerleri üçgen yüzeyi üzerindeki herhangi bir noktanın koordinatı; x, y, z değerleri ise R ışının üçgeni kesip kesmeyeceğinin kontrol edileceği koordinatlarıdır.

Eşitlik 5.2 ‘deki gibi normal vektörü bulunduktan sonra bu vektör normalize edilir. Bundan sonraki işlem ışının yön vektörü (R_d) ile yüzeyin normal vektörünün skaler çarpım sonucunun kontrol edilmesidir.

$$\vec{N} \cdot \vec{R_d} < 0 \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.4’ teki şartın sağlanması durumunda ışının üçgenle kesişimi gerçekleşecektir. Bir sonraki aşama Eşitlik 5.5 ‘ teki gibi adım sayısını gösteren t değerinin hesaplanmasıdır.

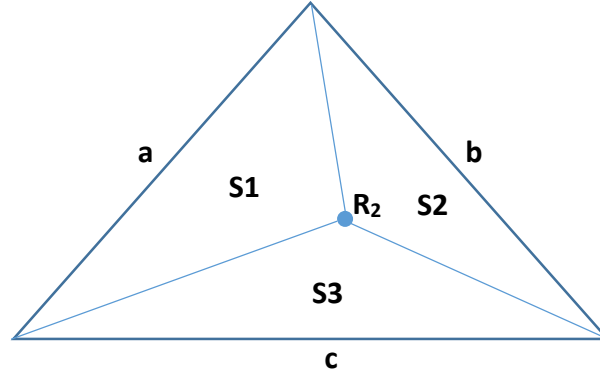
$$t = \frac{\vec{A} \cdot \vec{N} - \vec{N} \cdot \vec{R_s}}{\vec{N} \cdot \vec{R_d}} \quad (5.5a)$$

Eşitlik 5.5a’ daki A vektörü yerine üçgen üzerindeki herhangi bir nokta da seçilebilir. Eşitlik 5.5a’ nın açık ifadesi Eşitlik 5.5b’ deki gibidir.

$$t = \frac{x_a n_x + y_a n_y + z_a n_z - (x_s n_x + y_s n_y + z_s n_z)}{x_d n_x + y_d n_y + z_d n_z} \quad (5.5b)$$

t değeri hesaplandıktan sonra bu değer sıfırdan büyük olma şartına bakılır. Eğer bu değer sıfırdan küçükse ışın yüzeye ters doğrultuda ilerliyordur ve kesişim gerçekleşmeyecektir. Bu şartında sağlanması durumunda Eşitlik 5.1’ deki gibi R ışının üçgen yüzeyini kesip kesmeyeceğinin kontrol edileceği x, y, z değerleri hesaplanır.

Bundan sonraki aşama bulunan bu değerlerin üçgenin yüzeyinde bulunup bulunmadığıdır. Bunu bulabilmek için de Heron alan formülünden yararlanılır.



Şekil 5.3. Heron formülüne göre üçgen alanını hesaplama

Heron formülüne göre üçgen alanı Eşitlik 5.6' daki gibi bulunur.

$$u = \frac{a+b+c}{2} \quad (5.6a)$$

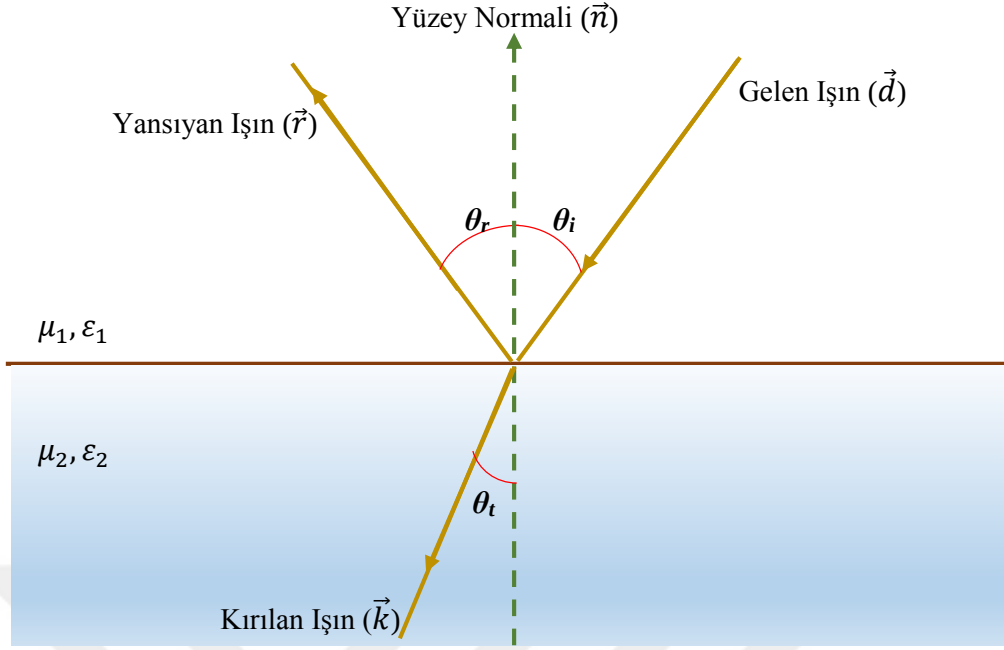
$$Alan(S) = \sqrt{u(u-a)(u-b)(u-c)} \quad (5.6b)$$

Eşitlik 5.6a' ya göre üçgenin alanı bulunduktan sonra kontrol edilen R2 noktasının (x, y, z) üçgeni ayırdığı S1, S2 ve S3 alanlarının toplamının üçgenin toplam alanına eşit olup olmadığıdır. Eğer $S1 + S2 + S3 = S$ (toplam alan) ise ışın ile üçgen kesişmiştir [41, 42]. Yukarıdaki algoritma 3Bİ yazılım kütüphanesinde ışın-yüzey kesişimi için kullanılmıştır. Ek 1' de ışın-üçgen kesişimi detaylandırılmıştır.

5.2.1. Işının Yansıması ve Kırılması

Yüzey ile kesişim noktası bulunan ışın belirlenen maksimum yansıma ve kırılma değerlerini geçmemesi durumunda yansıma ve kırılma yaparak yeni ışınlar meydana getirir. Meydana gelen bu ışınların hesaplanabilmesi için Snell yasası kullanılır.

Snell yasasına göre Şekil 5.4' de görüldüğü gibi manyetik geçirgenliği μ_1 ve yalıtkanlık sabiti ε_1 olan ortamdaki yüzeyin normaline θ_i açısıyla gelen EM düzlem dalga, manyetik geçirgenliği μ_2 ve yalıtkanlık sabiti ε_2 olan ortama geçerken θ_r açısıyla yansır ve θ_t açısıyla kırılır [6, 19, 36, 43].



Şekil 5.4. Snell yasası

Snell yasasına göre θ_i açısı θ_r açısına eşittir. Ortamların eşit manyetik geçirgenliğe ($\mu_1 = \mu_2$) sahip olması durumunda θ_i ile θ_t arasındaki bağıntı da Eşitlik 5.7' deki gibidir.

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \quad (5.7)$$

Eşitlik 5.7' de n_1 ve n_2 değerleri ortamların kırılma indisleridir. Üretilcek yeni ışınların yansıma ve kırılma açılarının bulunması ile doğrultularının hesaplanabilmesi için vektörel işlemler kullanılmaktadır. Buna göre;

$$\vec{r}_d = 2 (\vec{d} \cdot \vec{n}) \vec{n} - \vec{d} \quad (5.8)$$

Eşitlik 5.8' de gelen ışın ile yüzey normalinin skaler çarpımıyla yansıyan ışının yön vektörü (r_d) bulunur. Yine benzer şekilde n_2 ortamına kırılarak geçen k ışınının yön vektörü (k_d) ise Eşitlik 5.9' a göre bulunur [39, 42].

$$\vec{k}_d = \frac{n_1(\vec{d} - \vec{n}(\vec{d} \cdot \vec{n}))}{n_2} - \vec{n} \sqrt{1 - \frac{n_1^2(1 - (\vec{d} \cdot \vec{n})^2)}{n_2^2}} \quad (5.9)$$

Tam Yansıma ve Kritik Açı

Bazı özel durumlarda EM dalga bir yüzeye çarpması sonucu tamamı o yüzeyden yansır ve ikinci ortama geçemez. Bu özel duruma tam yansıma denir. Bu olayın gerçekleşebilmesi için ikinci ortamın yoğunluğunun birinci ortamın yoğunluğundan az olması ($n_1 > n_2$) ve EM dalganın yüzey ile yaptığı açının kritik açı denilen açıya eşit veya büyük olması gerekir [6, 19, 36, 43]. Kritik açı Eşitlik 5.10' daki gibi hesaplanır.

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (5.10)$$

Geliştirilen uygulamada ışının bulunduğu ortamın ortam katsayısı ile transmisyon yapacağı ortamın ortam katsayıları karşılaştırılarak şartın sağlanması durumunda sadece yansıyan ışın oluşturulmuştur.

Brewster Açısı

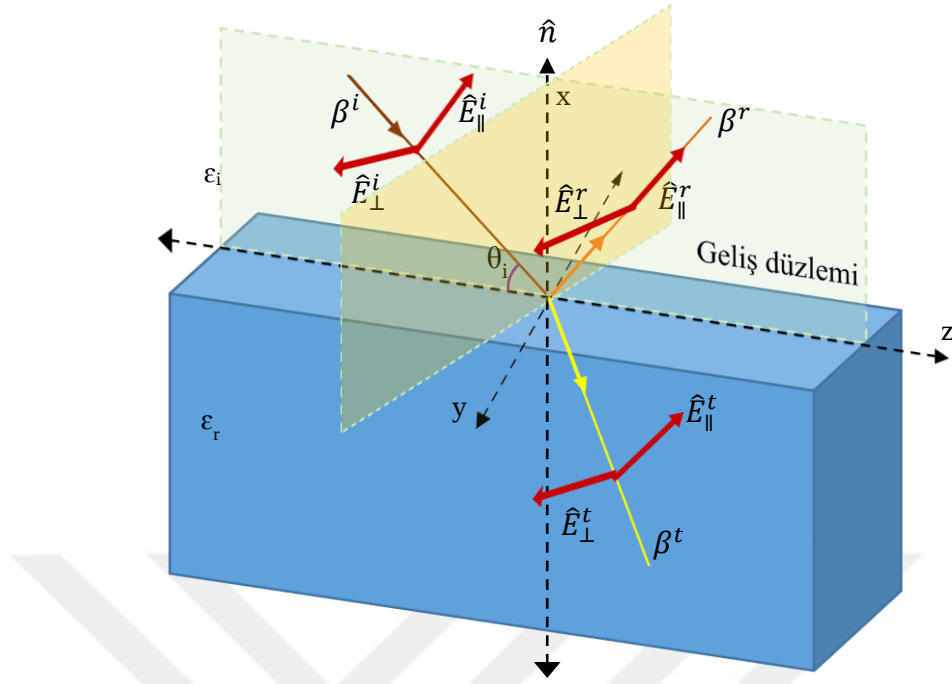
Brewster açısı, tam yansımanın tersine birinci ortamdan gelen EM dalganın tamamının kırılıp ikinci ortama geçmesini sağlayan açıdır. Brewster açısı Eşitlik 5.11' deki gibi hesaplanır.

$$\theta_B = \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (5.11)$$

Brewster açısı sadece paralel kutuplanma için hesaplanır.

5.2.2. Yansıyan ve Kırılan Işınlara Zayıflaması ve EM Hesapları

Snell yasasına göre geometrileri hesaplanan yansıyan ve kırılan ışınların EM hesapları Fresnel yasasına göre hesaplanır.



Şekil 5.5. Fresnel yasası

Fresnel yasasına göre EM dalga ($\hat{E}^i$) Şekil 5.5' te görüldüğü gibi geliş düzlemine dik ($\hat{E}_\perp^i$) ve paralel ($\hat{E}_\parallel^i$) polarizasyonlarıyla ifade edilir. Geliş düzlemi (β^i), gelen ışının yön vektörünü içeren düzlem olarak tanımlanır. ϵ_r değeri iki ortam arasındaki bağıl yalıtkanlık sabitidir. EM dalga yüzeye çarptıktan sonra bir kısmı yansır bir kısmı ise kırılarak diğer ortama geçer. Fresnel eşitlikleri yardımıyla EM dalgadaki güç kaybı bulunur [10, 11, 12, 13, 15].

$$R_\parallel = \frac{\epsilon_r \sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (5.12a)$$

$$R_\perp = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (5.12b)$$

Eşitlik 5.12a ve 5.12b' de yansıyan ışın için dik ve paralel yansıma katsayıları hesaplanır. Hesaplanan dik ve paralel yansıma katsayılarından genel yansıma zayıflama katsayısının elde edilmesiyle ilgili literatürde iki yöntem mevcuttur. Bu yöntemler Eşitlik 5.13' te ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$R_{\parallel\perp} = \sqrt{(R_{\parallel})^2 + (R_{\perp})^2} \quad (5.13a)$$

$$R_{\parallel\perp} = \frac{R_{\parallel} + R_{\perp}}{2} \quad (5.13b)$$

Yansıyan ışın için Fresnel yasasına göre zayıflama katsayısı bulunduğundan sonra mesafeye bağlı yol kaybı katsayısı Eşitlik 5.14' e göre bulunur [10, 11, 12, 13, 15].

$$A(s)_R = \frac{1}{s} \quad (5.14)$$

Eşitlik 5.13' teki s değeri yansıyan ışının uzunluğudur. Yansıyan ışın yüzeyden çıkıp bir engele temas ettikten sonra elektrik alanı Eşitlik 5.15' e göre hesaplanır [10, 11, 12, 13, 15].

$$E_{\parallel\perp}^r(s) = A(s)_R R_{\parallel\perp} E_{\parallel\perp}^i e^{-jks} \quad (5.15)$$

Yansıyan ışın için Fresnel zayıflama katsayısı ve mesafeye bağlı zayıflama katsayıları bulunduğundan sonra benzer şekilde kırılan ışın için de aynı katsayılar bulunur. Kırılan ışın için Fresnel zayıflama katsayısı Eşitlik 5.16' daki gibi bulunur.

$$T_{\parallel\perp} = 1 + R_{\parallel\perp} \quad (5.16)$$

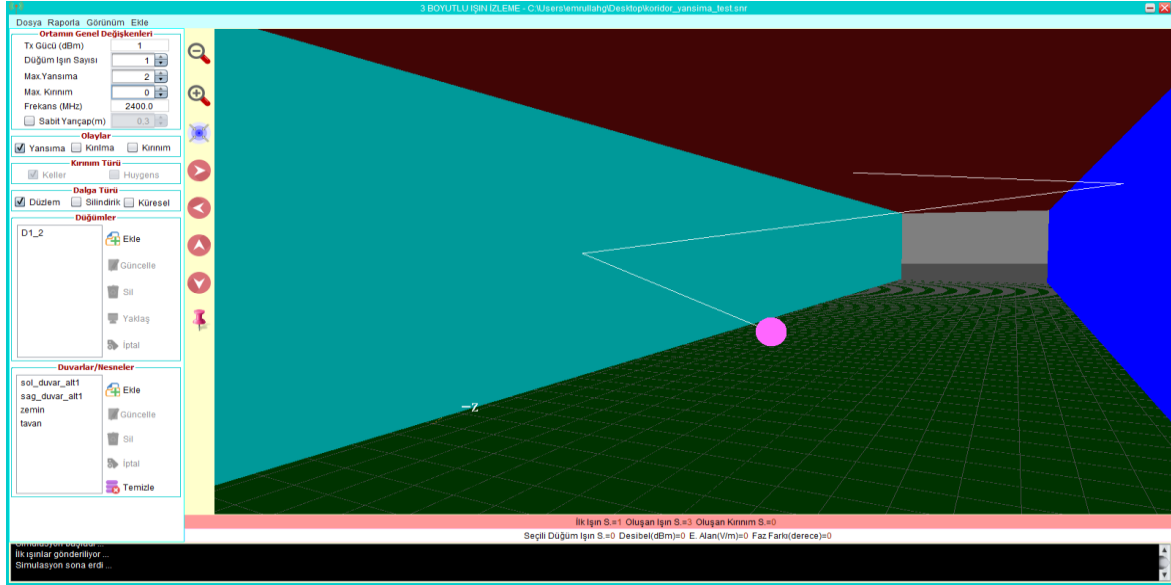
Kırılan ışın için mesafeye bağlı zayıflama katsayısı da Eşitlik 5.17' deki gibi hesaplanır [10, 11, 12, 13, 15].

$$A(s)_T = \frac{1}{s} \quad (5.17)$$

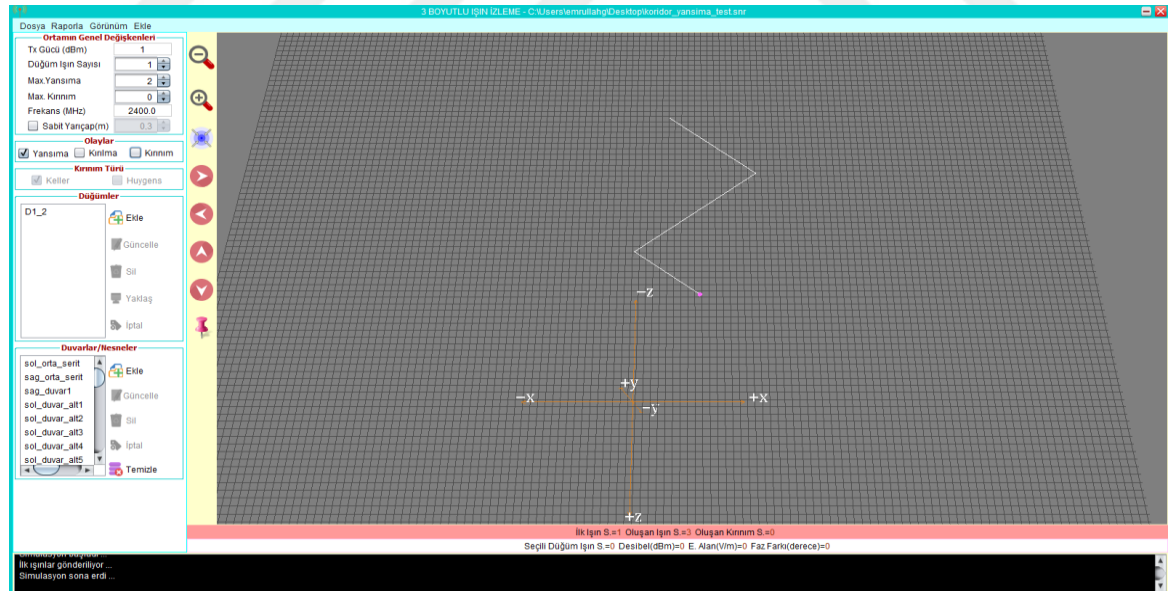
Kırılan ışının elektrik alan değeri ise Eşitlik 5.18' deki gibi hesaplanır [10, 11, 12, 13, 15].

$$E_{\parallel\perp}^t(s) = A(s)_T T_{\parallel\perp} E_{\parallel\perp}^i e^{-jks} \quad (5.18)$$

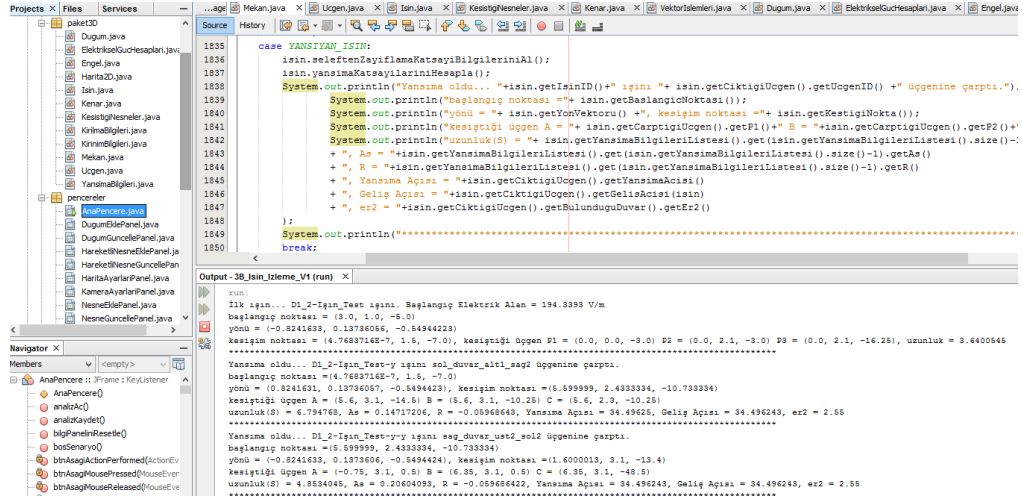
Gönderici düğümünden bir adet ışının gönderildiği ve sadece yansıma olayının hesaba katıldığı basit bir test senaryosunun 3BIİ programı ile çalıştırılması sonucu oluşan ışınlara ait ekran görüntüleri ve derleme çıktısı Şekil 5.6-5.8’ deki gibidir.



Şekil 5.6. Gönderilen bir ışının yansıması



Şekil 5.7. Gönderilen bir ışın yansımasının kuşbakışı görünümü



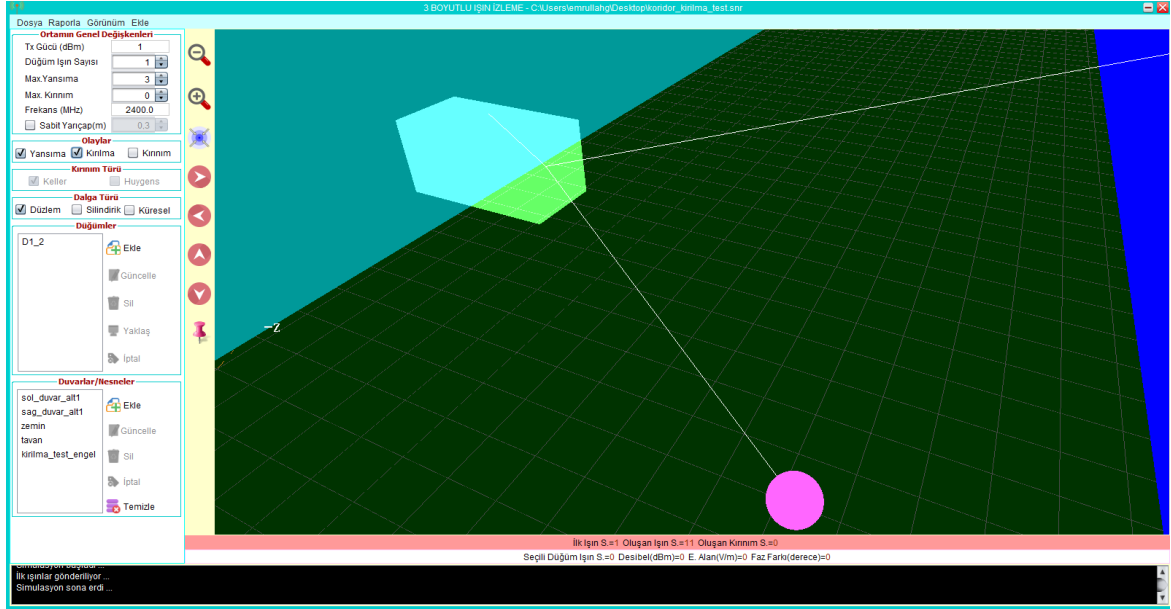
Şekil 5.8. Gönderilen bir ışın için programın çalıştırılması ve yansıma bilgilerinin yazdırılması

Bu senaryoda ilk ışın ve yansıyan 2 ışına ait hesaplanan değerler Tablo 5.1’ deki gibidir.

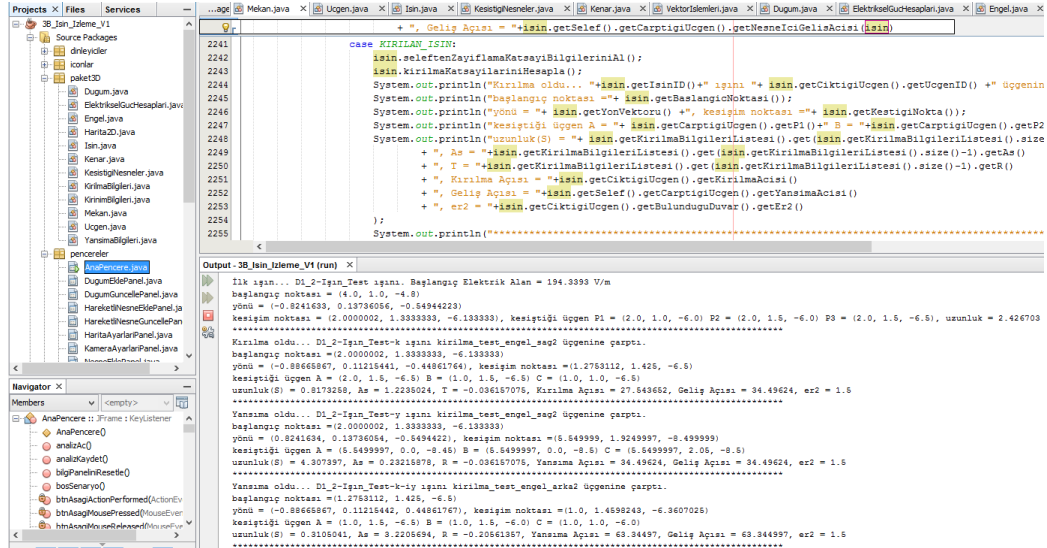
Tablo 5.1. Gönderilen tek ışın için oluşan yansıma ışınlarının hesaplanan değerleri

	1.İşın	2.İşın	3.İşın
İşın Adı	D1_2-Işın_Test	D1_2-Işın_Test-y	D1_2-Işın_Test-y-y
İşın Türü	ILK_ISIN	YANSIYAN_ISIN	YANSIYAN_ISIN
Başlangıç Noktası (x,y,z)	(3.0, 1.0, -5.0)	(0.0, 1.5, -7.0)	(5.59, 2.43, -10.73)
Yönü (x,y,z)	(-0.824, 0.137, -0.549)	(0.824, 0.137, -0.549)	(-0.824, 0.137, -0.549)
Kesişim Noktası (x,y,z)	(4.7683716 E-7, 1.5, -7.0)	(5.599, 2.433, -10.733)	(1.6, 3.1, -13.4)
Kesiştiği Üçgenin Koordinatları (A,B,C)	(0.0, 0.0, -3.0) , (0.0, 2.1, -3.0) , (0.0, 2.1, -16.25)	(5.6, 3.1, -14.5), (5.6, 3.1, -10.25) , (5.6, 2.3, -10.25)	(-0.75, 3.1, 0.5) , (6.35, 3.1, 0.5) ,(6.35, 3.1, -48.5)
Uzunluk s (m)	3.64	6.79	4.85
$A(s)_R$	-	0.147	0.206
$R_{\perp}$	-	-0.05968643	-0.059686422
Geliş Açısı (Derece)	-	34.49	34.49
Yansıma Açısı (Derece)	-	34.49	34.49
Çarptığı Yüzey Dielektrik Katsayısı (ϵ_2)	-	2.55	2.55

3Bİİ programı aracılığıyla çalıştırılan örnek bir test senaryosunda gönderici düğümden çıkan bir ışının engele çarpması sonucu oluşan kırılan ve yansıyan ışınlar ait ekran görüntüleri ve derleme çıktısı Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’ daki gibidir.



Şekil 5.9. Gönderilen bir ışının kırılması



Şekil 5.10 Gönderilen bir ışın için programın çalıştırılması ve kırılma bilgilerinin yazdırılması

Bu senaryoda ilk ışın, kırılan ışın ve nesne içindeki yansıyan ışına ait hesaplanan değerler Tablo 5.2’ deki gibidir.

Tablo 5.2. Gönderilen tek ışın için oluşan kırılma ışınlarının hesaplanan değerleri

	1.İşın	2.İşın	3.İşın
İşın Adı	D1_2-İşın_Test	D1_2-İşın_Test-k	D1_2-İşın_Test-k-iy
İşın Türü	ILK_ISIN	KIRILAN_ISIN	YANSIYAN_ISIN
Başlangıç Noktası (x,y,z)	(4.0, 1.0, -4.8)	(2, 1.33, -6.13)	(1.27, 1.42, -6.5)
Yönü (x,y,z)	(-0.82, 0.137, -0.549)	(-0.88, 0.112, -0.448)	(-0.886, 0.112, 0.448)
Kesişim Noktası (x,y,z)	(2, 1.33, -6.13)	(1.275, 1.425, -6.5)	(1.0, 1.459, -6.36)
Kesiştiği Üçgenin Koordinatları (A,B,C)	(2.0, 1.0, -6.0),(2.0, 1.5, -6.0),(2.0, 1.5, -6.5)	(2.0, 1.5, -6.5) , (1.0, 1.5, -6.5) , (1.0, 1.0, -6.5)	(1.0, 1.5, -6.5) , (1.0, 1.5, -6.0) ,(1.0, 1.0, -6.0)
Uzunluk (m)	2.426	0.817	0.31
$A(s)_R, A(s)_T$	-	1.223	3.22
$R_{\parallel}, T_{\parallel}$	-	-0.0361	-0.2056
Geliş Açısı (Derece)	-	34.49	63.34
Yansıma, Kırılma Açısı (Derece)	-	27.54	63.34
Çarptığı Yüzey Dielektrik Katsayısı(ϵ_2)	-	1.5	1.5

5.3. Nesne Kenarlarının (Edge) ve Kırınımın Modellenmesi

Nesnenin iki yüzeyinin birleştiği bölge kenar olarak tanımlanır. Ortamdaki nesne kenarları kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. Ortamdaki ışınlar nesne kenarlarıyla kesiştiklerinde kırınım olayı gerçekleşir ve Keller konisi şeklinde yeni kırınım ışınları meydana gelir.

5.3.1. Kırınım Türleri

RF dalga yayılımının modellenmesinde yansıma ve kırılma ile beraber kırınımın da önemi büyüktür. Kırınımın, RF dalga yayılımı üzerindeki etkisini hesaplayabilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [9, 44-48]. Bunlar:

1. Ampirik çözümler;
2. Knife-edge diffraction (Huygens);
3. Birden fazla Knife-edge diffraction için yaklaşımlar;
4. Yüksek frekans yöntemleri
 - GTD: geometrik kırınım teorisi
 - UTD: üniform geometrik kırınım teorisi
 - PTD: fiziksel kırınım teorisi
 - ITD: artan kırılma teorisi
5. Sayısal çözümler
 - PEM: Parabolik Eşitlik Yöntemi
 - IEM: İntegral Eşitlik Yöntemi

Her ne kadar bu tez çalışmasında kırınım modeli olarak UTD yöntemi kullanılmış olsa da ışığın temel olaylarını ve özellikle kırınım olayını başarılı bir şekilde açıklamasından dolayı aşağıda Huygens Prensibi ve Knife-Edge kırınım olayına da bu bağlamda değinilmiştir.

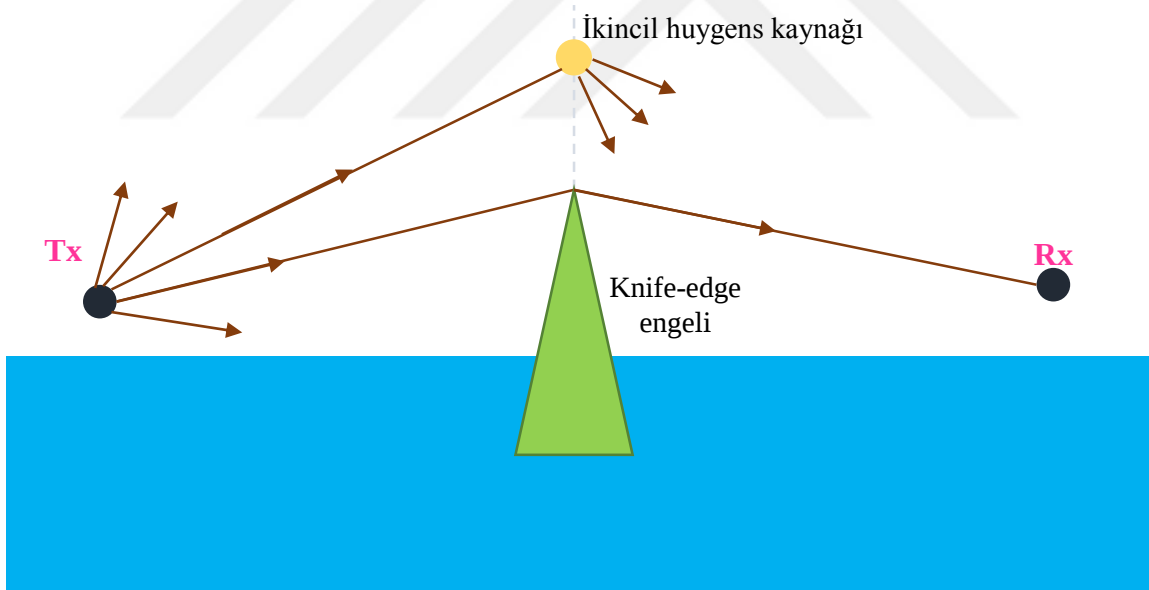
5.3.2. Huygens Prensibi

Hollandalı bir matematikçi olan Huygens ışığın dalgalar halinde yayıldığı varsayımını önceden yapılmış bazı deneylere ve optik ile uğraşan bilim adamlarının çalışmalarına dayanarak ortaya atmıştır. Bu ilke, dalgaların yayılmaları, ortam değiştirmeleri ve yansımaları gibi olayları izah edebilmek için dalga yüzeyinin her noktasını ikincil bir nokta kaynak olarak kabul eder. Bu ikincil nokta kaynakların verdikleri küresel dalgaların belli bir andaki dalga cephesi o andaki dalga yüzeyini verir.



Şekil 5.11. Huygens Prensibi

Şekil 5.11’ de görüldüğü üzere herhangi bir t anında bir dalga yüzeyinin konumu bilirse bunu izleyen $t + \Delta t$ anında dalga yüzeyinin alacağı durum, t anındaki ana dalga yüzeyini oluşturan noktaların yaydığı dalgacık yüzeylerin dalga cephesidir. Buna Huygens ilkesi denir. Huygens modeli, ışığın yansıma, kırılma ve kırınım olaylarını çok iyi açıklamaktadır [47, 49].



Şekil 5.12. Knife-Edge Kırınım

Şekil 5.12’ de görüldüğü üzere kırınımın gerçekleştiği köşeye paralel bir yüzeyde ikincil hayali bir verici olduğu varsayılır ve huygens prensibine göre bu kaynaktan RF dalga yayılımı yapıldığı kabul edilir [44, 46].

5.3.3. Kenar-Işın Kesişimi

Kırınım olayının gerçekleşebilmesi için ışın-kenar kesişiminin gerçekleşmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle bu kesişim 3 boyutlu ortamda iki doğrunun kesişimidir. Kesişim noktası Cramer yöntemiyle hesaplanmaktadır.

Denklem sayısı bilinmeyen sayısına eşit ve katsayılar matrisinin determinanı sıfırdan farklı olan bir lineer denklem sistemine Cramer sistemi denir [50]. Cramer kuralına göre;

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots a_{nn}x_n &= b_n \end{aligned} \right\} \quad (5.19)$$

Şeklindeki doğrusal denklem sisteminde x_i Eşitlik 5.20’ deki gibi çözülür.

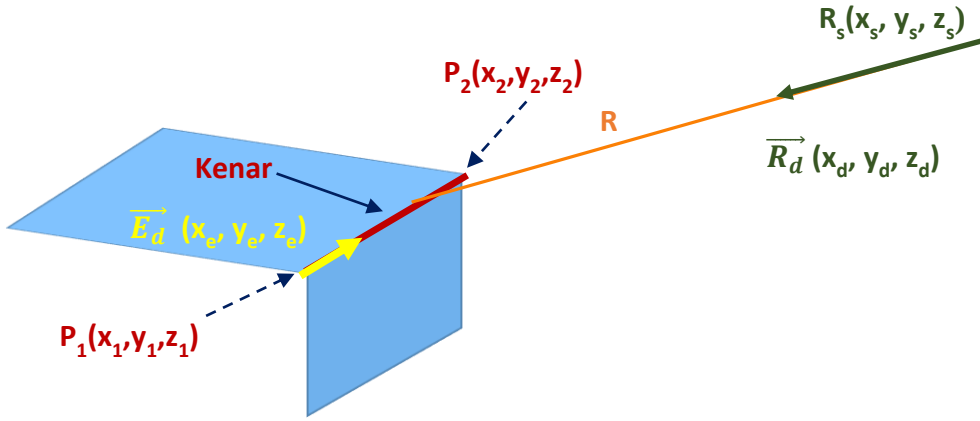
$$x_i = \frac{\det(A_i)}{\det(A)} \quad (5.20)$$

Burada $\det(A)$ matrisin determinanı, $\det(A_i)$ ’ ler ise i . sütununun b sütun vektörü ile yer değiştirilmesiyle oluşan matrisin determinantıdır. Örneğin $i=1$ ve $i=2$ için $\det(A_1)$ ve $\det(A_2)$ değerleri denklem 5.21’ deki gibidir.

$$\det(A_1) = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} \quad (5.21a)$$

$$\det(A_2) = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & b_2 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & b_n & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} \quad (5.21b)$$

Şekil 5.13’ te R_d doğrultulu R ışının başlangıç noktası P_1 ve bitiş noktası P_2 olan E_d doğrultulu kenar ile kesişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.13. Işın-kenar kesişimi

Öncelikle ışın ile kenar doğrultusunun paralel olup olmadığı kontrolü yapılır. Bunun için ışının yön vektörü ile kenarın doğrultu vektörü normalize edilip skaler çarpım yardımıyla arasındaki açı bulunur. Eğer aradaki açı 0 derece veya 180 derece ise bunlar birbirine paraleldir ve kesişim gerçekleşmeyecektir. Paralel olmaması durumunda Şekil 5.13’ te parametreleri belirtilen ışın ve kenar nesnelerinin denklemleri Eşitlik 5.22’ deki forma getirilir.

$$R_s + t\vec{R_d} = P_1 + m\vec{E_d} \quad (5.22)$$

Eşitlik 5.22’ yi, denklem 5.19’ daki Cramer formuna getirirsek;

$$tx_d - mx_e = x_1 - x_s \quad (5.23a)$$

$$ty_d - my_e = y_1 - y_s \quad (5.23b)$$

$$tz_d - mz_e = z_1 - z_s \quad (5.23c)$$

eşitlikleri elde edilir. Eşitlik 5.23’ deki denklemlerden herhangi ikisinin çözümü Cramer yöntemiyle hesaplanarak t bilinmeyeni hesaplanır. İlk iki denklem çözümünü esas alırsak;

$$a_1x + b_1y = c_1 \quad (5.24a)$$

$$a_2x + b_2y = c_2 \quad (5.24b)$$

5.24’ teki denklemleri için determinantlar 5.25’ teki gibidir.

$$|A| = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \quad (5.25a)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix} \quad (5.25b)$$

Burada önemli olan seçilecek ikili denklemlerin paydalarının sıfıra eşit olmamasıdır. Eğer herhangi biri sıfıra eşitse diğer denklem seçilmelidir. Her üç denklemin de paydası sıfır ise kesişim yoktur. Eşitlik 5.23' teki ifadelerin karşılıklarını Eşitlik 5.24' tekine göre yazarsak;

$$a_1 = x_d \quad (5.26a)$$

$$a_2 = y_d \quad (5.26b)$$

$$b_1 = -x_e \quad (5.26c)$$

$$b_2 = -y_e \quad (5.26d)$$

$$c_1 = x_1 - x_s \quad (5.26e)$$

$$c_2 = y_1 - y_s \quad (5.26f)$$

denklemleri elde edilir. t değeri için denklemi yazarsak;

$$t = \frac{\Delta_1}{|A|} = \frac{(c_1 b_2) - (b_1 c_2)}{(a_1 b_2) - (b_1 a_2)} \quad (5.27a)$$

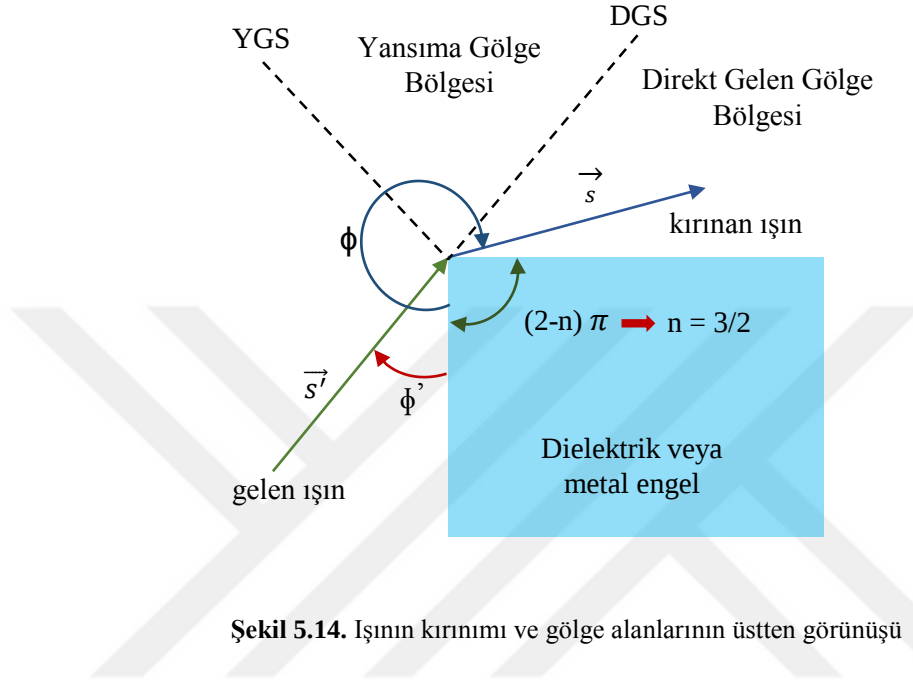
denklemi elde edilir. t değeri bulunduktan sonra Eşitlik 5.1' deki ışın denkleminde yerine koyulur. Bundan sonraki aşama bulunun bu koordinatın kenar üzerinde olup olmadığının kontrolüdür.

$$(x, y, z) = \begin{cases} x_1 \leq x \leq x_2 & \text{veya} & x_2 \leq x \leq x_1 \\ y_1 \leq y \leq y_2 & \text{veya} & y_2 \leq y \leq y_1 \\ z_1 \leq z \leq z_2 & \text{veya} & z_2 \leq z \leq z_1 \end{cases} \quad (5.27b)$$

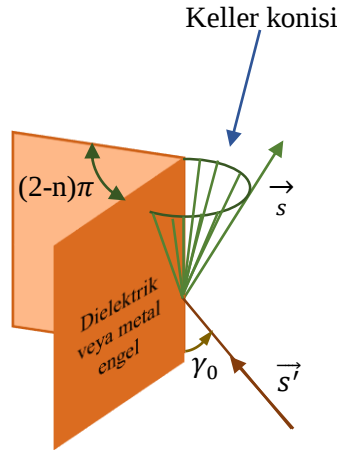
x,y,z değerleri için bu şartların sağlanması durumunda ışının kenar ile kesiştiği kabul edilir. Yukarıdaki algoritma ve hesaplamalar 3Bİ yazılım kütüphanesinde ışın-kenar kesişimi için kullanılmıştır Ek 2' de ışın-kenar kesişimiyle ilgili detay bilgilere yer verilmiştir.

5.3.4. Işın-Kenar Kesişimi Sonrası Kırınım Gerçekleşmesi ve Keller Konisi

Işının kenar ile kesişmesi sonucu oluşan kırınım sonrası oluşacak ışınlar Keller konisi şeklinde bir dağılım gösterir. Şekil 5.14' te kırınım sonucu ışınların Keller konisi şeklinde kırındığı gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Işının kırınımı ve gölge alanlarının üstten görünüşü



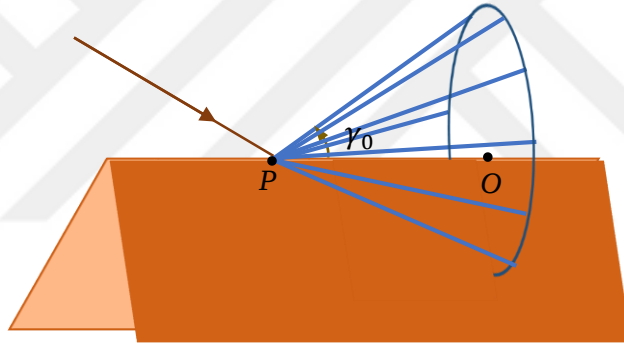
Şekil 5.15. Işının Keller konisi şeklinde kırınımının yandan görünüşü

Şekil 5.14' teki ϕ' açısı gelen s' ışının kenar nesnesini oluşturan yüzeylerden yakın yüzey ile yapılan açıdır. ϕ açısı ise yine benzer şekilde çıkan ışının yakın yüzey ile yaptığı açıdır. Engel sınıfımız birbirine 90° derece olan yüzeylerden oluştuğundan Şekil 5.15' teki n değerimiz 1.5 değerine eşit olmaktadır. YGB (Yansıma Gölge Bölgesi) alanı yansıyan

ışının engelin uzak yüzeyi ile oluşturduğu gölge alanı ifade etmektedir. Direkt gelen ışının uzak yüzey ile arasında kalan alan DGGB (Direkt Gelen Gölge Bölgesi) olarak ifade edilmiştir. Kırınım olayı ve sonrasında Keller konisi şeklinde oluşan ışınlar bu iki gölge sınırını başarılı bir şekilde açıklamakta ve bu alanlara düşen EM dalganın nasıl hesaplandığını izah etmektedir. Aksi takdirde bu gölge alanlarda hiçbir sinyal varlığından söz edilemez.

$$\gamma_0 = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{s}' \cdot \vec{E}_d}{|\vec{s}'| |\vec{E}_d|} \right) \quad (5.28)$$

Şekil 5.16'daki γ_0 açısı gelen ışının yön vektörü ($\vec{s}'$) ile kenarın yön vektörü ($\vec{E}_d$) arasındaki açıya eşittir. Eşitlik 5.28' e göre bulunur. Bu açı aynı zamanda oluşacak Keller konisinin tepe açısını da vermektedir.



Şekil 5.16. Keller konisinin oluşumu

Şekil 5.16'daki P noktası ışının kenar nesnesine çarptığı noktadır. P noktası ve γ_0 açısı bilindiğinden oluşacak kırınım ışınlarının yönlerinin hesaplanması için sanal bir çember oluşturulur. Şekil 5.16' daki O noktası bu sanal çemberin merkezidir ve Eşitlik 5.29' daki gibi hesaplanır.

$$O = P + \frac{1}{\tan(\gamma_0)} \quad (5.29)$$

O noktası bulunduğundan sonra kenar sınıfının yön vektörünün doğrultusu kontrol edilerek γ_0 açısının sinüs ve kosinüs değerleri yardımıyla her bir ışının doğrultusu hesaplanır.

5.3.5. Kırınım Işıklarının Zayıflaması ve EM Hesapları

Bu tez çalışmasında kırınım modeli olarak literatürde GTD modelinin geliştirilmiş modeli olarak bilinen UTD model kullanılmıştır. UTD model Şekil 5.14 'te görüldüğü gibi sadece yansıma ve direkt gelen ışın alanlarını açıklamakla kalmayıp aynı zamanda ışının geliş doğrultusuna göre kenar nesnesinin uzak yüzeyine düşen gölge alanının aldığı EM dalga sinyalini ve gücünü de başarılı bir şekilde modelleyen bir kırınım yöntemidir. UTD model hem gelen ışını hem de kırınan her bir ışını hesaba katarak zayıflama katsayısını hesaplar [10-13, 15].

$$D_{\parallel\perp}(L, \phi, \phi') = \frac{-e^{-\frac{j\pi}{4}}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \gamma_0} \times \left[\cot\left(\frac{\pi+(\phi-\phi')}{2n}\right) F[kLa^+(\phi-\phi')] + \cot\left(\frac{\pi-(\phi-\phi')}{2n}\right) F[kLa^-(\phi-\phi')] + R_{\parallel\perp}^0 \cot\left(\frac{\pi-(\phi+\phi')}{2n}\right) F[kLa^-(\phi+\phi')] + R_{\parallel\perp}^n \cot\left(\frac{\pi+(\phi+\phi')}{2n}\right) F[kLa^+(\phi+\phi')] \right] \quad (5.30)$$

Eşitlik 5.30' daki ϕ' ve ϕ açılarının neler olduğu Şekil 5.14' ün açıklamasında değinilmiştir. γ_0 açısı Şekil 5.16' daki keller konisinin tepe açısı, k değeri de Eşitlik 2.8b' deki açısal faz sabiti olup $2\pi/\lambda$ değerine eşittir. Eşitlikteki F ile simgelenen fonksiyon fresnel integralidir. Eşitlik 5.31' deki gibi ifade edilir [10-13, 15, 53].

$$F(S^f) = 2j\sqrt{S^f} e^{jS^f} \int_{\sqrt{S^f}}^{\infty} e^{-je^2} du \quad (5.31)$$

Fresnel integraline gelecek parametrelerin hesaplanması Eşitlik 5.32-5.35' teki gibidir [10-13, 15, 53].

$$M = \phi \pm \phi' \quad (5.32)$$

$$a^{\pm}(M) = 2\cos^2\left(\frac{2n\pi N^{\pm} - M}{2}\right) \quad (5.33)$$

$$N^{\pm} = \frac{M \pm \pi}{2n\pi} \quad (5.34)$$

Fresnel integraline gelecek L parametresinin hesaplanması dalga cephesi türüne göre farklılık göstermektedir. Literatürde yer alan düzlem, silindirik ve küresel dalga cephelerine göre hesaplamalar Eşitlik 5.35' teki gibidir.

$$L = \begin{cases} s \sin^2 \gamma_0 & \text{düzlem dalga cephesi için} \\ \frac{s.s'}{s+s'} & \text{silindirik dalga cephesi için} \\ \frac{ss' \sin^2 \gamma_0}{s+s'} & \text{küresel dalga cephesi için} \end{cases} \quad (5.35)$$

Geometrik optik + UTD tekniğinde kaynak çizgisel farz edildiğinden [55] L değerinin hesaplanması silindirik dalga cephesi hesaplamalarına göre yapılır.

Eşitlik 5.31' deki $N^{\pm}$ değeri, hesaplanan değere göre yuvarlanıp bir tamsayı elde edilir. Fresnel integralinin yaklaşık çözümü Eşitlik 5.36-5.38' e göre hesaplanır [10-13, 15, 53].

$$F(S^f) \cong \sqrt{2\pi S^f} \left[f \left(\sqrt{\frac{2\pi}{S^f}} \right) + jg \left(\sqrt{\frac{2\pi}{S^f}} \right) \right] \quad (5.36)$$

$$f(u) = \frac{1+0.926u}{2+1.792u+3.104u} \quad (5.37)$$

$$g(u) = \frac{1}{2+4.14u+3.492u^2+6.67u^3} \quad (5.38)$$

Eşitlik 5.30' daki $R_{\parallel\perp}^0$ fresnel zayıflama katsayısı sadece kenar nesnesine çarpan s' ışını için bir defa hesaplanır. $R_{\parallel\perp}^n$ fresnel zayıflama katsayısı ise kırınım olayından sonra çıkacak her ışın için ayrı ayrı hesaplanır. Bu katsayıların hesaplanması Eşitlik 5.12a, 5.12b ve 5.13' teki fresnel yansıma katsayılarının hesaplanması ile aynıdır [10-15, 53].

Kırınım olayı için UTD zayıflama katsayısı hesaplandıktan sonra kenara çarpan ve kırınım sonucu oluşan her ışın için mesafeye bağlı zayıflama katsayısı hesaplanır. Literatürde yer alan düzlem, silindirik ve küresel dalga cephelerine göre mesafeye bağlı zayıflama katsayısının hesaplanması Eşitlik 5.39' daki gibidir.

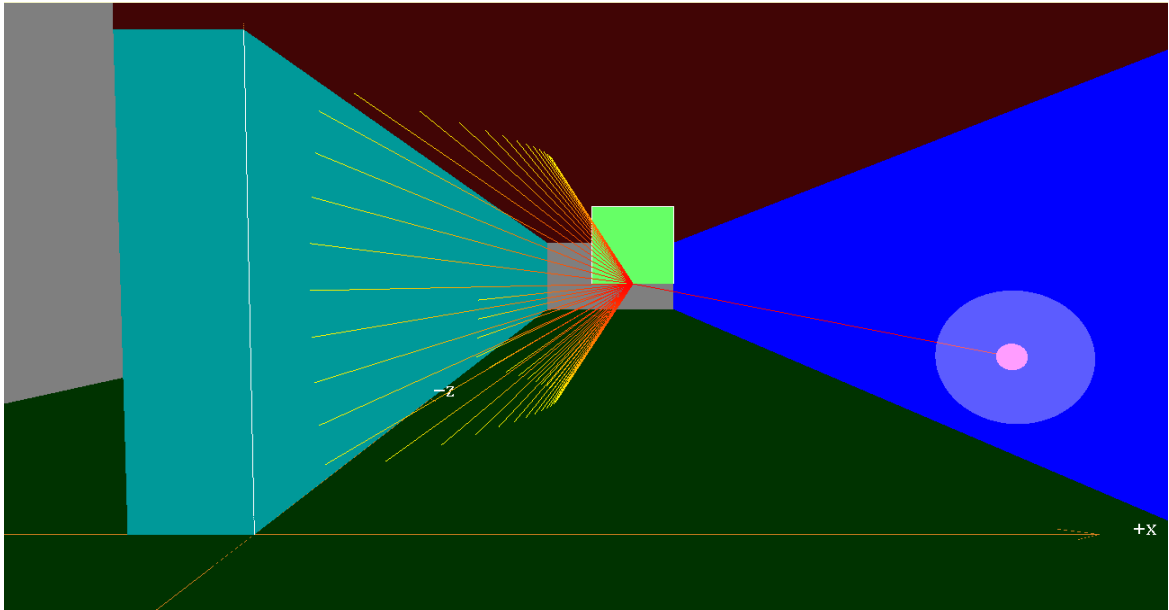
$$A(s', s)_D = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{s}} & \text{düzlem dalga cephesi için} \\ \frac{1}{\sqrt{s \sin \gamma_0}} & \text{silindirik dalga cephesi için} \\ \sqrt{\frac{s'}{s+s'}} & \text{küresel dalga cephesi için} \end{cases} \quad (5.39)$$

Eşitlik 5.35' teki L değerinin hesaplanmasında olduğu gibi mesafeye bağlı zayıflama katsayısının bulunması Eşitlik 5.39' daki silindirik dalga cephesine göre hesaplanır. Geliştirilen 3BIİ programı hesaplamalardaki farkı görebilmek amacıyla bu 3 yöntemin herhangi birinin seçilmesine izin vermektedir.

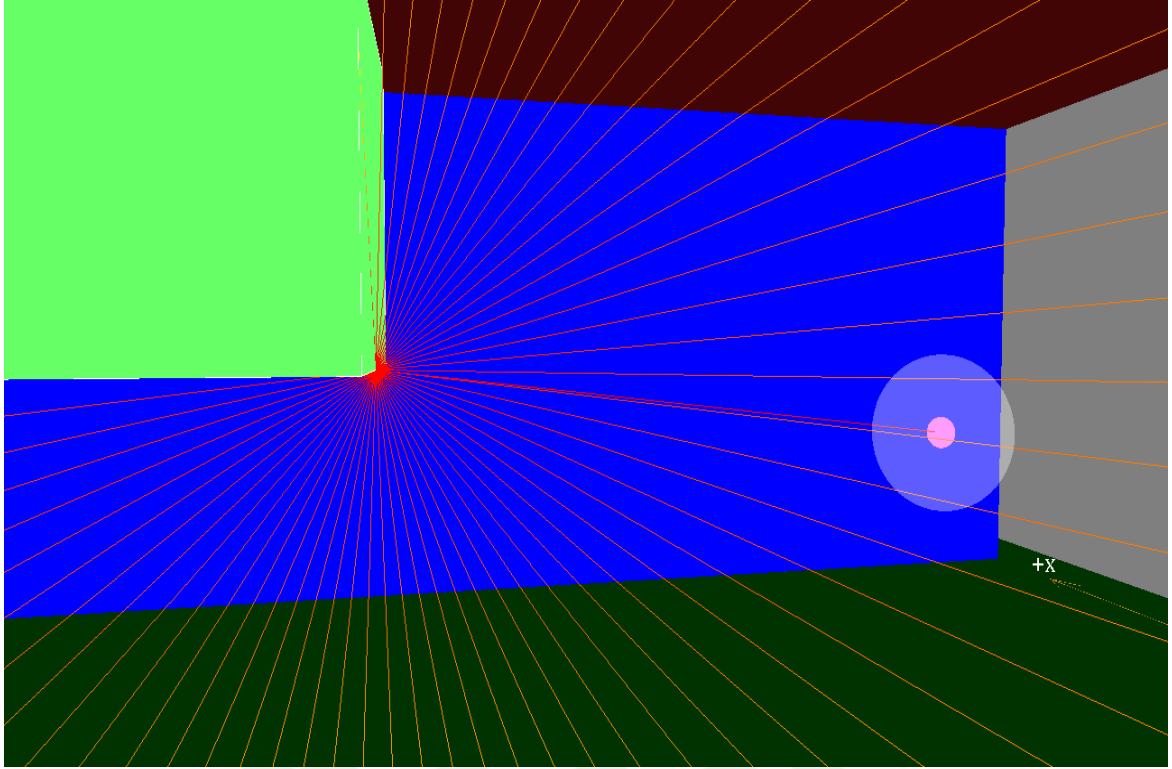
UTD zayıflama katsayısı ve mesafeye bağlı zayıflama katsayısı hesaplandıktan sonra yeni oluşacak kırınım ışınının oluşturacağı elektrik alan Eşitlik 5.40' daki gibi hesaplanır [10-13, 15, 53].

$$E_{\parallel\perp}^d(s) = A(s', s)_D D_{\parallel\perp}(L, \phi, \phi') E_{\parallel\perp}^i e^{-jks} \quad (5.40)$$

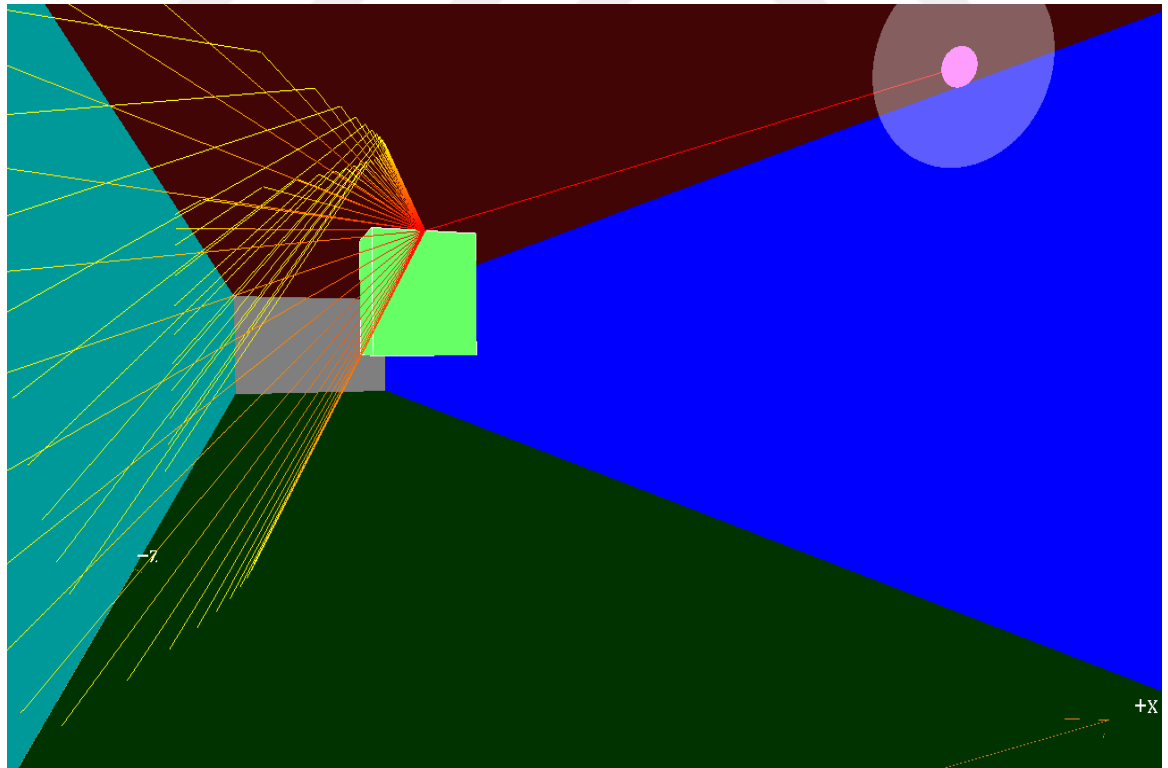
Geliştirilen 3BIİ programında, düğüm tarafından gönderilen tek bir ışının örnek bir engelden kırınıma uğraması sonucu oluşan ve keller konisi şeklinde yayılan ışınlar Şekil 5.17 - 5.23'te gösterilmiştir.



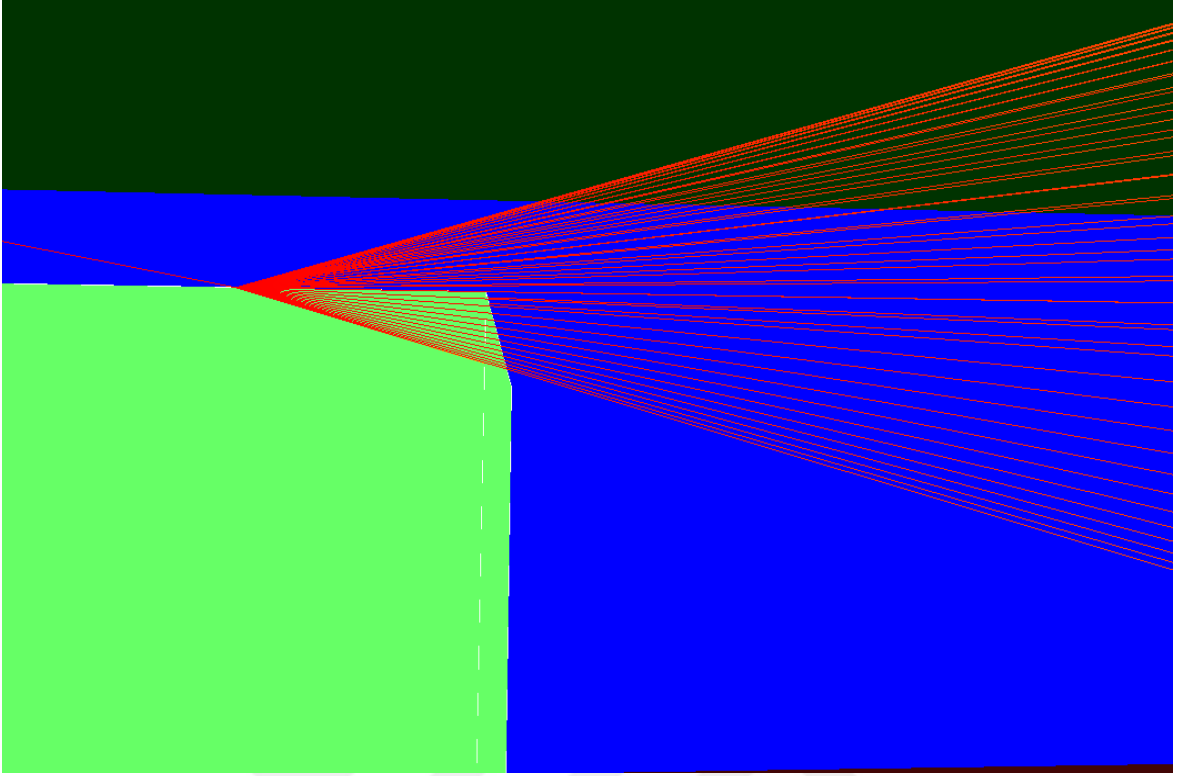
Şekil 5.17. Örnek kırınım 1



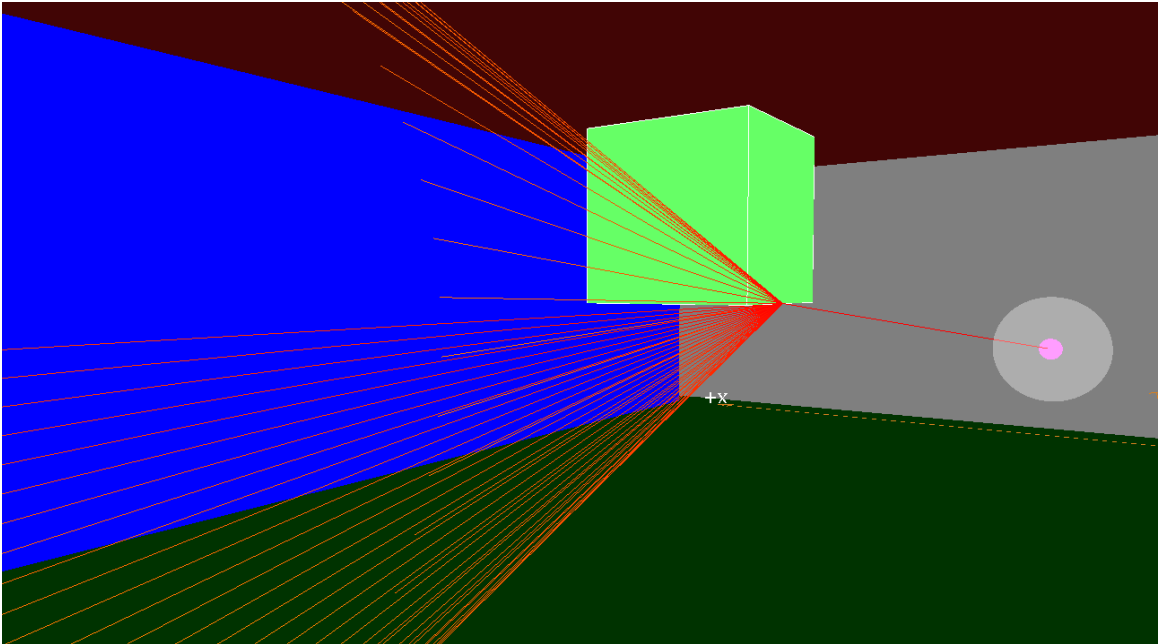
Şekil 5.18. Örnek kırınım 2



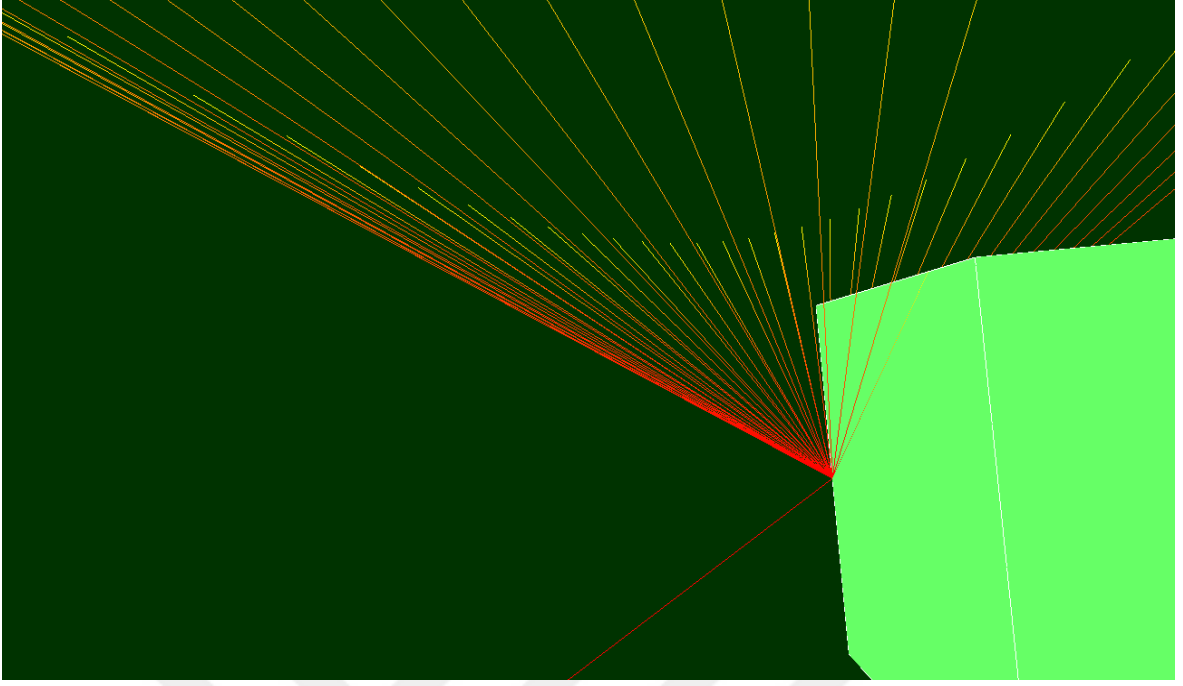
Şekil 5.19. Örnek kırınım 3



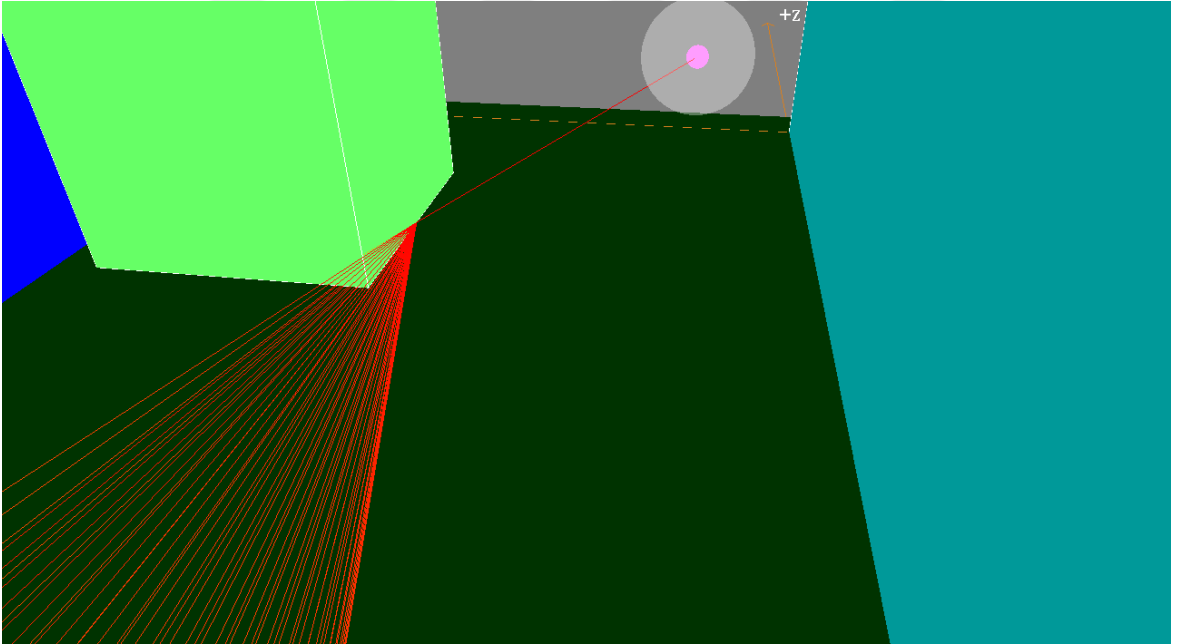
Şekil 5.20. Örnek kırınım 4



Şekil 5.21. Örnek kırınım 5

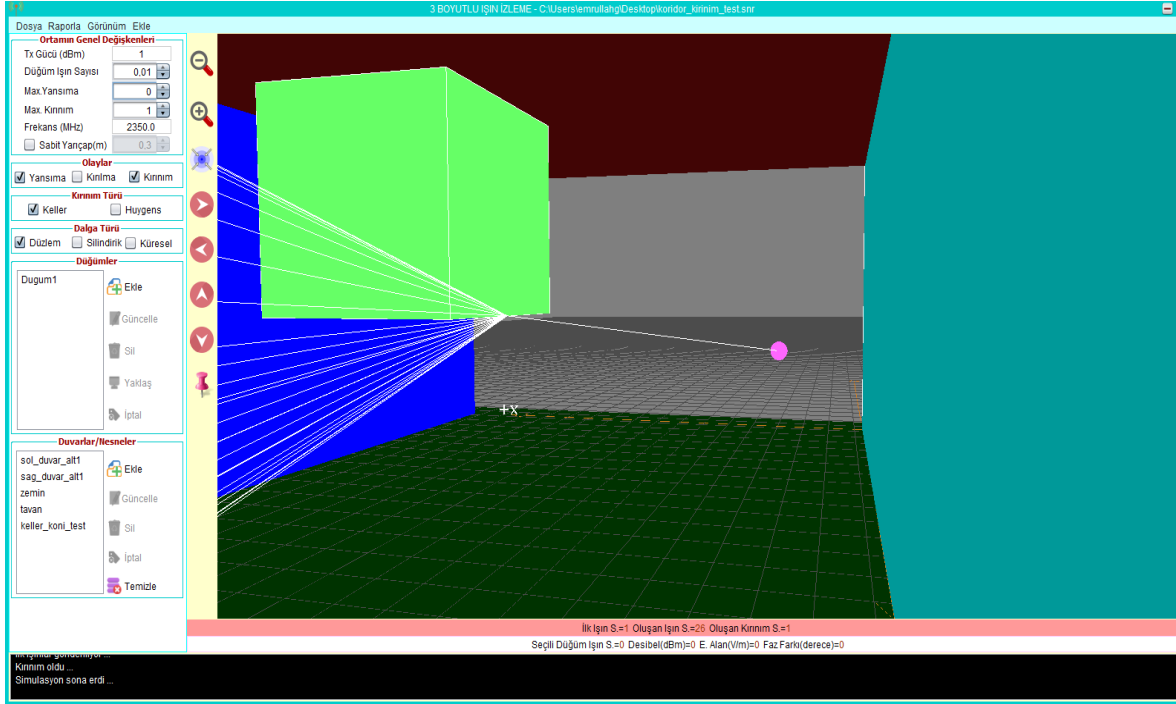


Şekil 5.22. Örnek kırınım 6

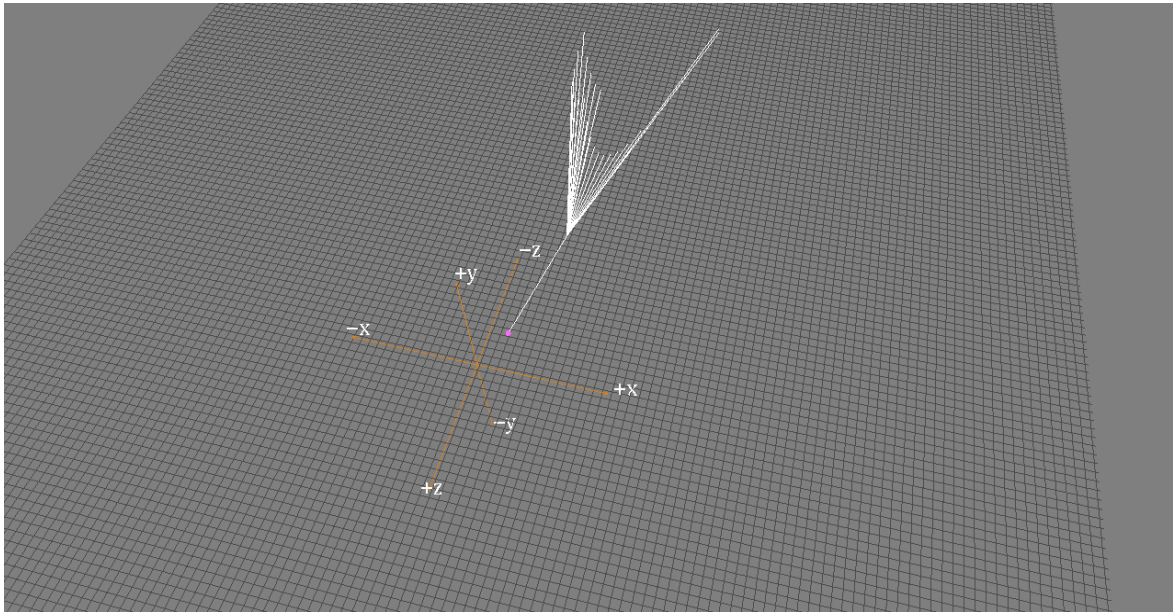


Şekil 5.23. Örnek kırınım 7

Gönderici düğünden gönderilen bir ışının engelin kenarına çarpması sonucu meydana gelen kırınım ışınlarına ait test senaryosu ve yazılım geliştirme ortamında bu ışınlara ait hesaplanan değerlerin yazdırılmasına ait ekran görüntüleri Şekil 5.24 - 5.26' daki gibidir.



Şekil 5.24. Gönderilen bir ışın için kırınımın hesaplanması



Şekil 5.25. Gönderilen bir ışın sonucu oluşan kırınım ışınlarının kuşbakışı görünümü

```

1857 case KIRINAN_ISIN:
1858     isin.seleftenZayıflamaKatsayıBilgileriniAl();
1859     isin.kirininKatsayılarınıHesapla();
1860     System.out.println("Kırınım oldu... "+isin.getIsinID()+" ışını "+isin.getCiktiğiEdge().getEdgeID()+" kenarına çarp
1861         System.out.println(" başlangıç noktası = "+ isin.getBasklangicNoktası()
1862         + ", yönü = "+ isin.getTovVektoru()
1863         + ", kesişim noktası = "+ isin.getKestigiNokta());
1864     System.out.println(" kesiştiği kenar P1 = "+ isin.getCiktiğiEdge().getP1()+" P2 = "+isin.getCiktiğiEdge().
1865     System.out.println(" uzunluk(S') = "+isin.getKirininBilgileriListesi().get(isin.getKirininBilgileriListesi
1866     +", uzunluk(S) = "+isin.getKirininBilgileriListesi().get(isin.getKirininBilgileriListesi().size()-1).getS2
1867     +", As = "+isin.getKirininBilgileriListesi().get(isin.getKirininBilgileriListesi().size()-1).getAs()
1868     +", UTD Katsayısı="+isin.getKirininBilgileriListesi().get(isin.getKirininBilgileriListesi().size()-1).getD
1869     + ", er2 = "+isin.getCiktiğiEdge().getBulunduguDuvar().getEr2());
1870     System.out.println(" gelen ışının(s') yakın yüzey ile açısı= "+isin.getSelef().getEdgeyeGelenIcinReferans
1871     + ", çıkan ışının(s) yakın yüzey ile açısı= "+isin.getEdgedenCikanIcinReferansEdgeYuzeyileAraasindakiAci());
1872
1873     System.out.println("*****");
1874     break;

```

Output - 3B_Isin_Izleme_V1 (run)

```

Kırınım oldu... Dugum1-Işın_Test-1e ışını keller_koni_test_edge2 kenarına çarptı.
başlangıç noktası = (2.0, 1.5, -5.5), yönü = (-0.04187026, 0.23745811, -0.9704949), kesişim noktası = (1.7178769, 3.1, -12.039223)
kesiştigi kenar P1 = (2.0, 1.5, -5.0) P2 = (2.0, 1.5, -6.0)
uzunluk(S') = 4.636093, uzunluk(S) = 6.738028, As = 0.38524196, UTD Katsayısı=-0.11602566 + 0.10648364i, er2 = 1.5
gelen ışının(s') yakın yüzey ile açısı= 116.56505, çıkan ışının(s) yakın yüzey ile açısı= 9.99988
*****
Kırınım oldu... Dugum1-Işın_Test-2e ışını keller_koni_test_edge2 kenarına çarptı.
başlangıç noktası = (2.0, 1.5, -5.5), yönü = (-0.08246834, 0.22657952, -0.9704949), kesişim noktası = (1.4176478, 3.1, -12.353174)
kesiştigi kenar P1 = (2.0, 1.5, -5.0) P2 = (2.0, 1.5, -6.0)
uzunluk(S') = 4.636093, uzunluk(S) = 7.0615244, As = 0.37631434, UTD Katsayısı=-0.086286016 + 0.08061517i, er2 = 1.5
gelen ışının(s') yakın yüzey ile açısı= 116.56505, çıkan ışının(s) yakın yüzey ile açısı= 20.000011
*****
Kırınım oldu... Dugum1-Işın_Test-3e ışını keller_koni_test_edge2 kenarına çarptı.
başlangıç noktası = (2.0, 1.5, -5.5), yönü = (-0.12066046, 0.20881717, -0.9704949), kesişim noktası = (1.0762398, 3.0999997, -12.936131)
kesiştigi kenar P1 = (2.0, 1.5, -5.0) P2 = (2.0, 1.5, -6.0)
uzunluk(S') = 4.636093, uzunluk(S) = 7.662204, As = 0.3612627, UTD Katsayısı=-0.037271824 + 0.03529792i, er2 = 1.5
gelen ışının(s') yakın yüzey ile açısı= 116.56505, çıkan ışının(s) yakın yüzey ile açısı= 30.000002
*****
Kırınım oldu... Dugum1-Işın_Test-4e ışını keller_koni_test_edge2 kenarına çarptı.
başlangıç noktası = (2.0, 1.5, -5.5), yönü = (-0.15498976, 0.18470961, -0.9704949), kesişim noktası = (0.6574408, 3.1, -13.906665)

```

Şekil 5.26. Gönderilen bir ışın sonucu oluşan kırınım ışınları hesaplarının yazdırılması

Kırınım 3 ışına ait hesaplanan değerler Tablo 5.3' teki gibidir.

Tablo 5.3. Gönderilen tek ışın için oluşan kırınım ışınlarının hesaplanan değerleri

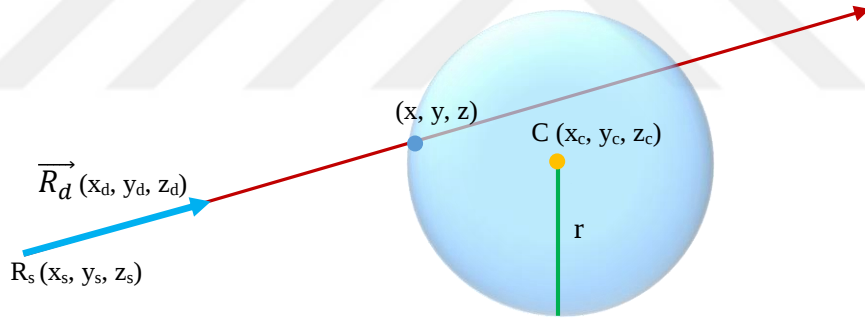
	1.İşın	2.İşın	3.İşın
İşın Adı	Dugum1-Işın_Test-1e	Dugum1-Işın_Test-2e	Dugum1-Işın_Test-3e
İşın Türü	KIRINAN_ISIN	KIRINAN_ISIN	KIRINAN_ISIN
Başlangıç Noktası (x,y,z)	(2.0, 1.5, -5.5)	(2.0, 1.5, -5.5)	(2.0, 1.5, -5.5)
Yönü (x,y,z)	(-0.041, 0.237, -0.97)	(-0.082, 0.226, -0.97)	(-0.12, 0.208, -0.97)
Kesişim Noktası (x,y,z)	(1.71, 3.1, -12.03)	(1.417, 3.1, -12.353)	(1.076, 3.09, -12.93)
Kesiştiği Kenarın Koordinatları (A,B)	(2.0, 1.5, -5.0) , (2.0, 1.5, -6.0)	(2.0, 1.5, -5.0) , (2.0, 1.5, -6.0)	(2.0, 1.5, -5.0) , (2.0, 1.5, -6.0)
Gelen Işın (S') Uzunluk (m)	4.636	4.636	4.636
Çıkan Işın (S) Uzunluk (m)	6.738	7.0615	7.662
$A(s', s)_D$	0.3852	0.3763	0.3612
$D_{ \perp}$	-0.116 + 0.10648364i	-0.0862 + 0.08061517i	-0.0372 + 0.03529792i
Gelen Işıının(S') Yakın Yüzey ile Açısı (Derece)	116.56	116.56	116.56
Çıkan Işıının(S) Yakın Yüzey ile Açısı (Derece)	9.99	20	30
Çarptığı Kenar Dielektirik Katsayısı (ϵ_2)	1.5	1.5	1.5

5.4. Kablosuz Düğümün Modellenmesi

Radyo sinyallerinin gönderilip alındığı nesneler düğümlerdir. Geometrik olarak bir küre gibi düşünülen düğümün, konumu, transmisyon gücü, alıcı-verici durumu, kapsama yarıçapı gibi parametreler isteğe bağlı olarak seçilebilir. Yansıma, kırılma ve kırınım olayları sonucu ortamda yayılan ışınların düğüm tarafından alınması ışın-küre kesişmesine bakılarak hesaplanır.

5.4.1. Işın-düğüm Kesişimi

Düğüm küre, ışın ise bir doğru olarak modellendiğinden sinyalin bir düğüm tarafından alınabilmesi için bu iki geometrik şeklin kesişiminin bulunması gerekir. Şekil 5.27’ deki gibi merkez noktası $C (x_c, y_c, z_c)$ ve yarıçapı r olan bir kürenin başlangıç noktası $R_s (x_s, y_s, z_s)$ ve doğrultusu $\vec{R_d} (x_d, y_d, z_d)$ olan bir ışın ile kesişimi şu şekilde bulunur:



Şekil 5.27. Işın-düğüm kesişiminin hesaplanması

Kürenin kartezyen denklemi Eşitlik 5.41’ deki gibidir.

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2 \quad (5.41)$$

Işın denklemi ise Eşitlik 5.42’ deki gibidir.

$$x = x_s + tx_d \quad (5.42a)$$

$$y = y_s + ty_d \quad (5.42b)$$

$$z = z_s + tz_d \quad (5.42c)$$

y,y,z değerleri küre denkleminde yerine yazılırsa Eşitlik 5.43 elde edilir.

$$(x_s + tx_d - x_c)^2 + (y_s + ty_d - y_c)^2 + (z_s + tz_d - z_c)^2 = r^2 \quad (5.43)$$

Eşitlik 5.43, $ax^2+bx+c=0$ şeklindeki ikinci derecen bir bilinmeyenli denklem formuna getirildiğinde Eşitlik 5.44 elde edilir.

$$a = x_d^2 + y_d^2 + z_d^2 \quad (5.44a)$$

$$b = 2 * (x_d(x_s - x_c) + y_d(y_s - y_c) + z_d(z_s - z_c)) \quad (5.44b)$$

$$c = (x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2 + (z_s - z_c)^2 - r^2 \quad (5.44c)$$

R_d vektörü normalize edilmiş bir vektör olduğundan $|R_d| = 1$ 'dir. Bu nedenle a değeri 1'e eşittir. Eşitlik 5.45' teki gibi diskriminant (Δ) değeri;

$$\Delta = b^2 - 4ac \quad (5.45)$$

a=1 olduğundan;

$$\Delta = b^2 - 4c \quad (5.46)$$

Eşitlik 5.46 elde edilir. $\Delta > 0$ ise ışın küreyi 2 noktadan keser, $\Delta=0$ ise 1 kesişim noktası vardır, $\Delta<0$ olması durumunda ise denklemin gerçel kökü olmayacağından kesişim yoktur. Denklemin kök veya kökleri Eşitlik 5.47' ye göre bulunur.

$$kök_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2} \quad (5.47)$$

Denklemin kök değeri bulunduktan sonra kesişim noktası da Eşitlik 5.48' e göre bulunur [42].

$$x_{1,2} = x_s + (kök_{1,2} * x_d) \quad (5.48a)$$

$$y_{1,2} = y_s + (kök_{1,2} * y_d) \quad (5.48b)$$

$$z_{1,2} = z_s + (kök_{1,2} * z_d) \quad (5.48c)$$

5.4.2. Düğümün Aldığı Toplam Gücün Hesaplanması

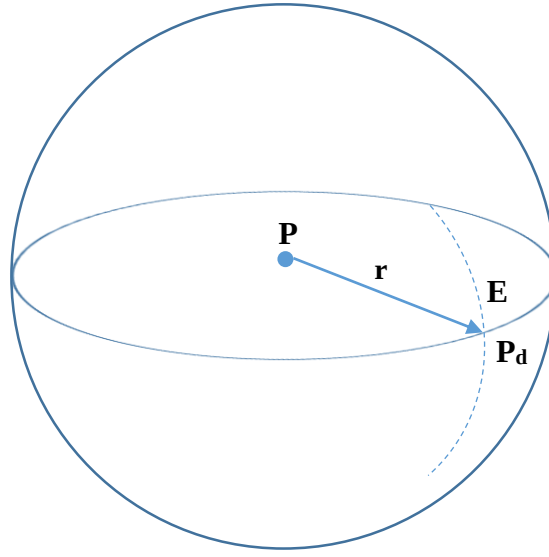
Ortamdaki direkt veya yansıma, kırılma ve kırınım sonucu düğüm ile kesişen tüm ışınlar düğüm tarafından alınır. Düğümün aldığı tek bir ışına ait çarpımsal etkileri Eşitlik 5.49a’ da, düğümün aldığı N adet ışının oluşturduğu toplam elektrik alan değeri Eşitlik 5.49b’ de verilmiştir. [10-15, 52,56].

$$E_{ışın}(l) = \frac{1}{s_f} \sqrt{\frac{P_t G_t n_0}{4\pi}} \left[\prod_i A(s_{R,i})_R R_i \right] \left[\prod_m A(s_{T,m})_T T_m \right] \left[\prod_j A(s'_{D,j} s_{D,j})_D D_j \right] e^{-jk(s'_f + \sum_i s_{R,i} + \sum_m s_{T,m} + \sum_j s_{D,j})} \quad (5.49a)$$

$$E_{toplamlam} = \sum_{l=1}^N E_{ışın}(l) \quad (5.49b)$$

Eşitlik 5.49’ daki P_t değeri watt cinsinden düğümün transmisyon gücüdür. G_t değeri anten kazancıdır, geliştirilen uygulamada bu değer 1 olarak belirlenmiştir. n_0 değeri Eşitlik 2.11’deki boşluk empedansıdır (Z_0) ve yaklaşık 377Ω (ohm)’ a eşittir. $A(s_{R,i})_R$ yansıma olaylarında meydana gelen mesafeye bağlı yol kayıpları, R_i değeri ise yansıma olayları esnasındaki zayıflama katsayılarıdır. $A(s_{T,m})_T$ kırılma olaylarında meydana gelen mesafeye bağlı yol kayıpları, T_m değeri ise kırılma olayları esnasındaki zayıflama katsayılarıdır. $A(s'_{D,j} s_{D,j})_D$ kırınım olaylarında meydana gelen mesafeye bağlı yol kayıpları, D_j değeri ise kırınım olayları esnasındaki zayıflama katsayılarıdır. Bu değerler Bölüm 5.2.2’ deki denklemlerden hesaplanmaktadır.

Başlangıçta verici durumundaki düğümler belirlenen transmisyon gücü ile ortama belli açılarla radyo sinyalleri yayarlar. Işının başlangıçtaki watt cinsinden transmisyon gücü önce güç yoğunluğuna (P_d) daha sonra da elektrik alana dönüştürülür.



Şekil 5.28. Güç yoğunluğu ve elektrik alanın hesaplanması

Şekil 5.28’ deki ifadeler şu değerlere karşılık gelir:

P: İlk andaki güç değeridir. Düğüm için ilk transmisyon gücüdür. Birimi watt (w)’tır.

P_d: r mesafe uzaklıktaki yüzeydeki güç yoğunluğudur. Birimi watt/m² ‘dir.

E: r mesafe uzaklıktaki elektrik alandır. Birimi volt/m ‘dir.

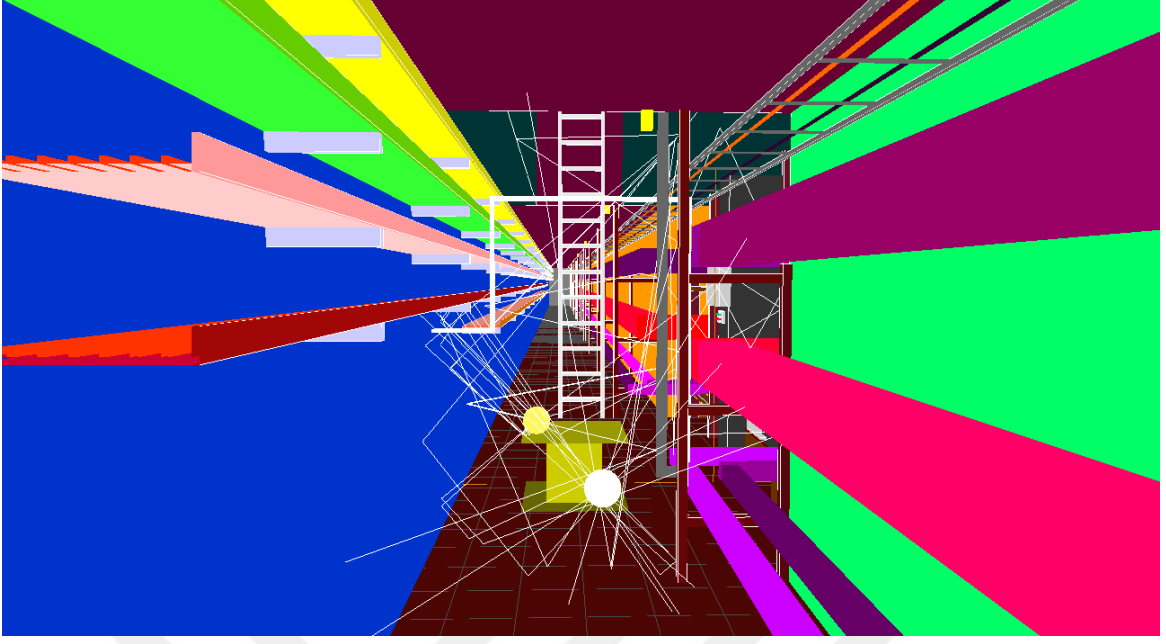
Dalga boyu λ (m) olan ve P transmisyon gücü ile gönderilen bir radyo dalgasının r (m) mesafedeki güç yoğunluğu Eşitlik 5.50’ deki gibi hesaplanır.

$$P_d = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (5.50)$$

Yine benzer şekilde r mesafe uzaklıktaki elektrik alan Eşitlik 5.51’ deki gibi hesaplanır [10-15, 52].

$$E = \sqrt{120\pi P_d} \quad (5.51)$$

3Bİİ programında örnek bir senaryoda alıcı düğüm tarafından alınan ışınlar ait ekran görüntüsü Şekil 5.29’ daki gibidir.



Şekil 5.29. Düğümün aldığı ışınlar

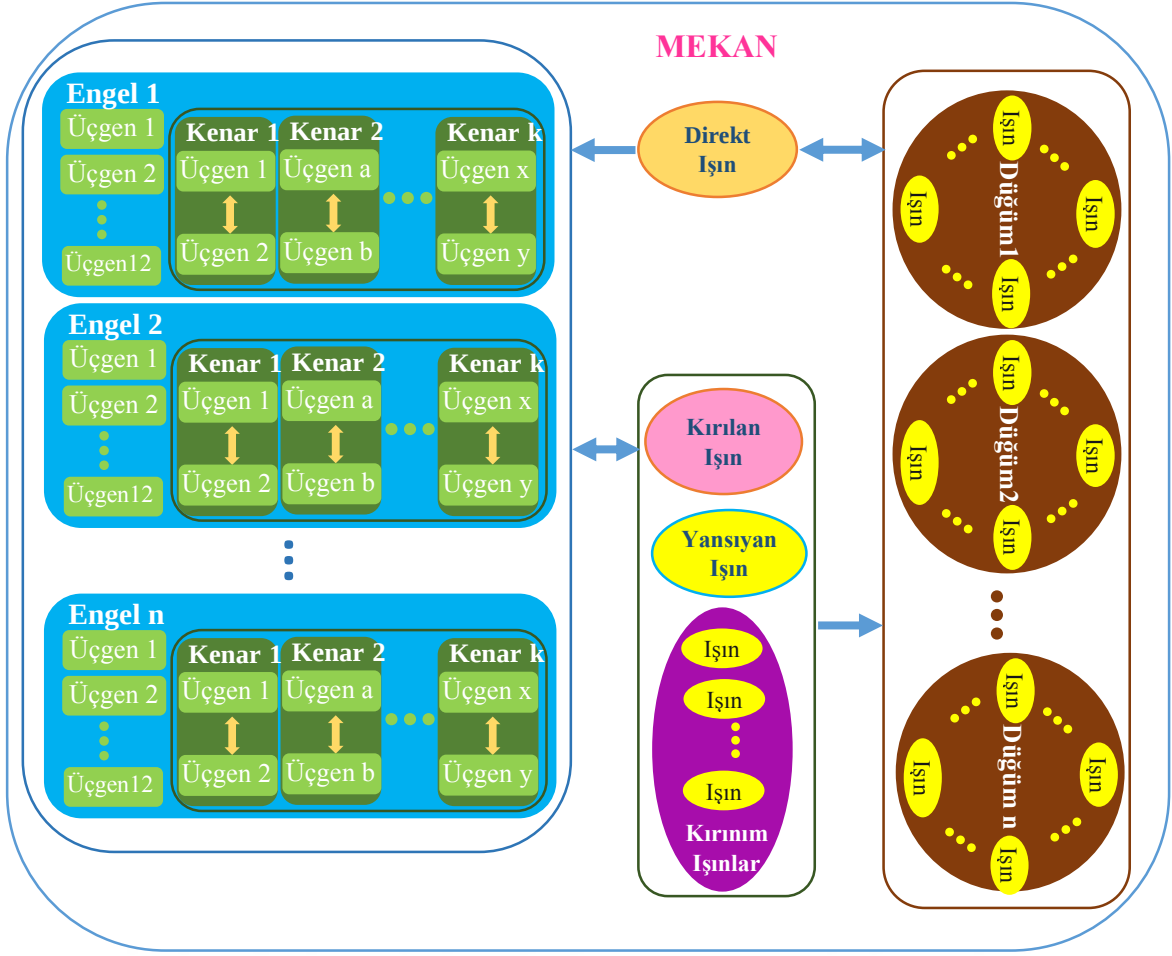
6. GELİŞTİRİLEN 3B IŞIN İZLEME (3Bİİ) PROGRAMI VE ARAYÜZÜ

Kablosuz iletişim sistemlerin yaygınlaşması RF dalga yayılımının modellenmesini daha da önemli hale getirmiştir. Radyo yayılımını modelleyen pek çok yöntem mevcuttur. Bu modellerden biri de deterministik yöntemlerdir. Deterministik yöntemler, ortamın geometrisini ve dielektrik özelliklerini hesaba katarak ışının yansıma, kırılma ve kırınım olayları sonucu maruz kaldığı etkileri Maxwell denklemleri ile çözerek başarılı sonuçlar üretir. Fakat Maxwell denklemleri çözümlerinin getirdiği karmaşıklık ve işlem yükü büyük bir dezavantajdır. Bu zorlukların önüne geçmek amacıyla yaklaşık sonuçları hesaba katan ışın izleme teknikleri kullanılmaktadır. Işın izleme tekniğinde 2 boyutlu veya 3 boyutlu olarak modellenen ortam, alıcıya ulaşan sinyalin gücünün hesaplanmasında başarılı sonuçlar üretir. Her ne kadar fiziksel ortamın modellenmesi aşamasındaki zorlukları içerse de ortamın daha da detaylı olarak modellendiği 3 boyutlu model doğal olarak 2 boyutlu modele göre daha iyi sonuçlar verir [2, 7].

Bu tez çalışmasındaki geliştirilen yazılım için nesne tabanlı programlama dili olan Java 1.8 JDK ve 3 boyutlu OPENGGL kütüphanesi olan JOGL 3D kullanılmıştır. Geliştirilen 3Bİİ yazılım aracında temel olarak ortam modelleme, ışın ve alıcı-verici düğüm özniteliklerini değiştirebilme, raporlama, ortamı gezme gibi özellikleri sağlayan kullanıcı dostu bir arayüz oluşturulmuştur. 3Bİİ programının nasıl kullanılacağı, arayüzü ve menüleri Ek 3' te detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Modüler yapıda geliştirilmiş olan 3Bİİ yazılımında, ışın, ışın-yüzey, ışın-küre kesişimleri, ışınların yansıma, kırılma ve kırınım olaylarındaki zayıflamaları, alıcı düğümdeki elektrik alan ve toplam güç değerleri daha önceki bölümlerde açıklanan modellemelere göre yapılmıştır. Geliştirilen 3Bİİ simülasyon yazılım aracının ana hatları aşağıda açıklanacaktır.

6.1. Modül Yapısı

Geliştirilen 3B Işın İzleme uygulaması çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Her biri ayrı birer sınıf olan bu bileşenlerin modül yapısı Şekil 6.1' deki gibi olup bu sınıflara aşağıda kısaca değinilmiştir.

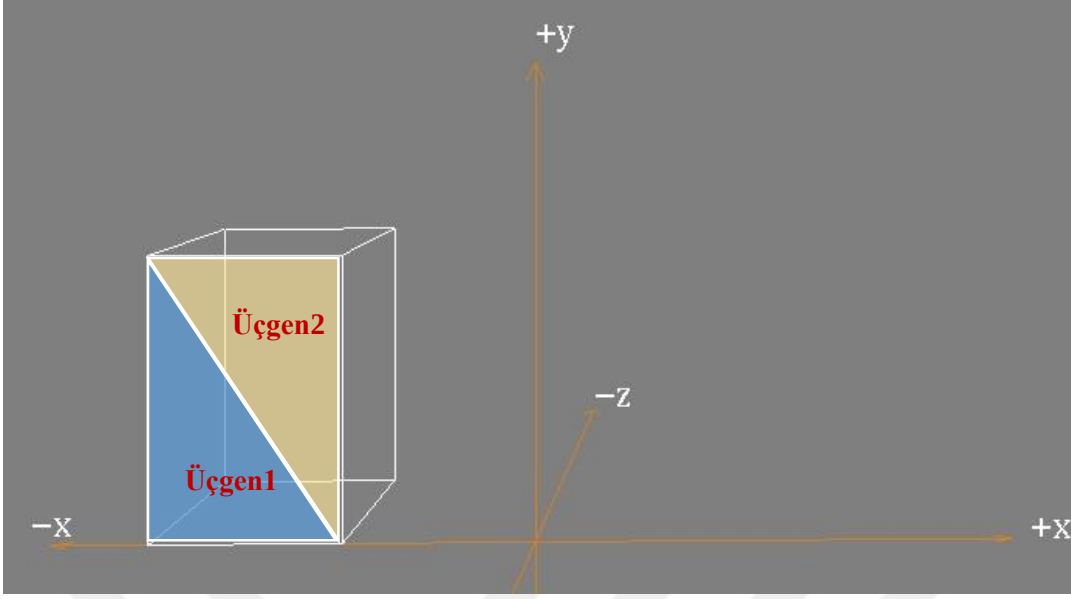


Şekil 6.1. 3Bİ programı modül yapısı

Mekan: Fiziksel ortamı modelleyen sınıftır. 3 boyutlu çizimler bu sınıf içinde yapılır. Ayrıca tüm sınıflar mekan sınıfı içinde tanımlanır ve tüm fonksiyon çağırımları bu sınıf içinde gerçekleşir.

Işın: Gönderici durumundaki düğüm nesnesinden çıkan ve mekandaki RF sinyalini modelleyen sınıftır. Üçgen ve kenar nesneleri ile kesişimi sonucu yansıma, kırılma ve kırınım olaylarına maruz kalır.

Üçgen: Fiziksel ortamdaki tüm nesneler üçgenlere bölünerek tanımlanır. Temel amacı duvar ve diğer nesneleri tanımlamak olan bu sınıf ile istenilen şekil fiziksel olarak modellenilebilir. Işının yansıma ve kırılma olayları bu sınıfta hesaplanır. Şekil 6.2’ de programın arayüzünden alınan ekran görüntüsünde bir duvarın ön yüzeyini oluşturan üçgenler gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Üçgen modülü

Şekil 6.2’ de görüldüğü gibi bir duvarı veya dikdörtgenler prizması şeklinde tanımlanan herhangi bir nesneyi her yüzeyde iki tane olmak üzere toplam on iki tane üçgen meydana getirir.

Engel: On iki tane üçgenin oluşturduğu dikdörtgenler prizmasıdır. Toplam altı yüzeye sahiptir ve her yüzey iki üçgenden oluşmaktadır. Ortamın dielektrik özellikleri bu sınıfa set edilir. Bu sınıf ayrıca kenarları da içinde barındırır.

Kenar: Aynı yüzeyde bulunmayan iki üçgenin ortak kenarlarının oluşturduğu sınıftır. Şeklin konumuna göre kullanıcı tarafından tanımlanır. Kırınım olayı ışının bu sınıf ile kesişimi sonucu meydana gelir. Kenar nesnelerin tamamı Engel sınıfı içerisinde yer almaktadır.

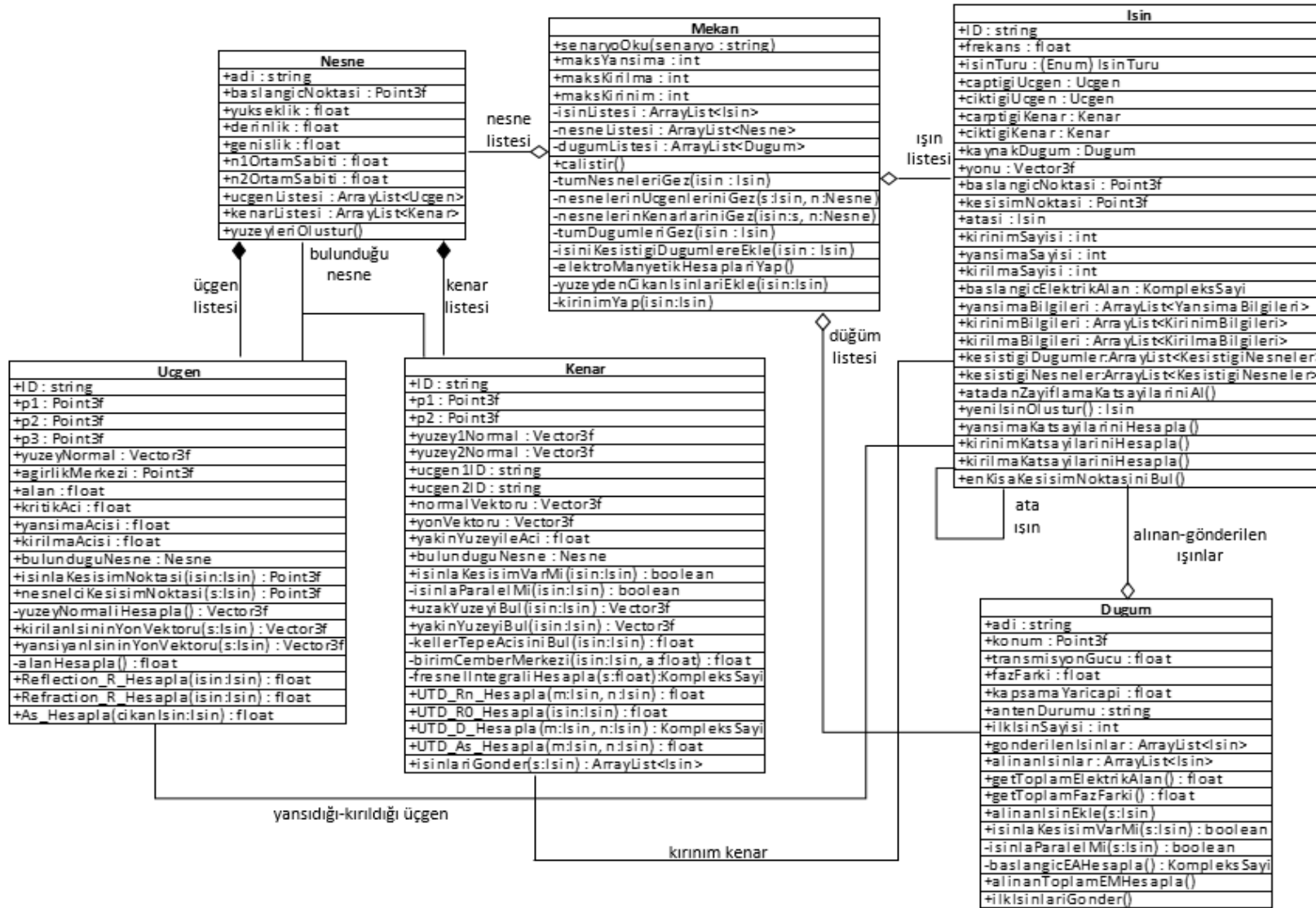
Düğüm: Radyo sinyallerini üretilip gönderen veya alıcı durumda olup bu sinyalleri alan sınıftır. Düğüm nesnesi; alıcı, verici veya hem alıcı ve verici olarak belirlenebilir. Transmisyon gücü, düğümden çıkan ışın sayısı ve düğüm kapsama yarıçapı düğüm nesnesinin tanımlanmasında belirlenen önemli parametrelerdir.

6.2. Akış Şeması ve UML Diyagramı

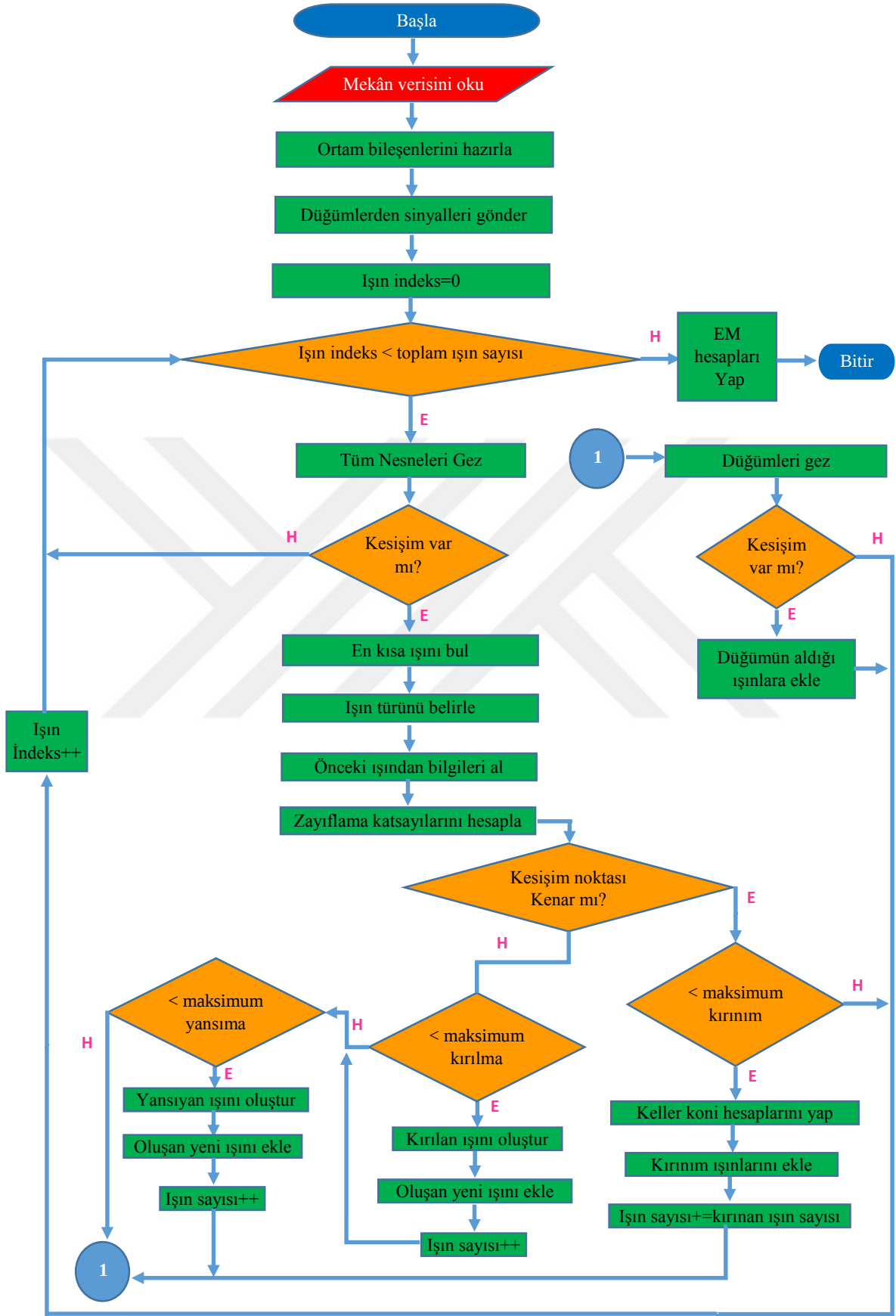
Program ilk çalışma esnasında kullanıcı tarafından tasarımı yapılan simülasyon ortamını veya daha önce oluşturulmuş .snr uzantılı dosyayı okur. Çalışılan ortam veya okunan dosya içinde; engeller, düğümler ve kenar nesneleri yer alır. Eğer önceden oluşturulan bir senaryo üzerinde simülasyon gerçekleştirilecekse okunan verilere göre ortamın 3 boyutlu geometrik

şekli oluşturulur. Bundan sonraki aşama verici durumdaki düğüm veya düğümlerin, RF sinyalleri olarak modellenen ışınlarını ortama yaymasıdır. Ortama yayılan bu ışınların üçgenler ve kenarlar ile kesişimleri hesaplanarak yansıma, kırılma ve kırınım olayları, Bölüm 5’te açıklanan model denklemlerine göre gerçekleştirilir. Senaryoda belirlenen maksimum yansıma, kırılma veya kırınım sayısına ulaşana kadar bu işlemler devam eder. RF sinyalini alan alıcı durumundaki düğümler bu sinyal ile ilgili güç hesaplamalarını yine Bölüm 5’ teki denklemlere göre gerçekleştirir. 3Bİİ programına ait UML diyagramı ve akış diyagramı Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’ teki gibidir.

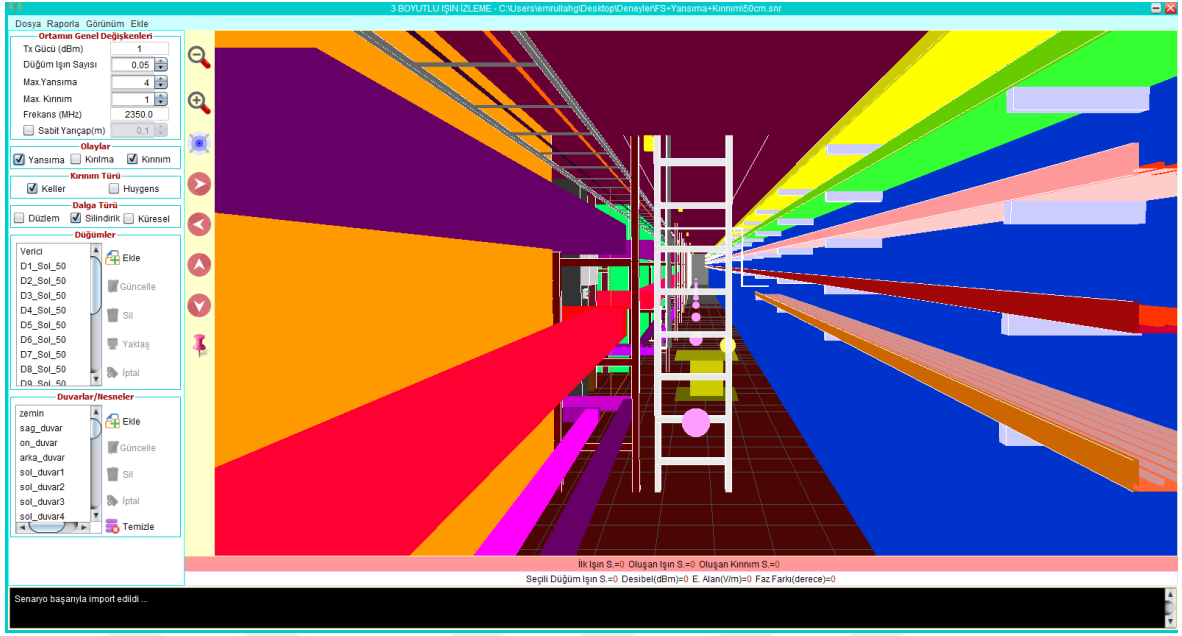




Şekil 6.3. 3BİI programının UML diyagramı



Şekil 6.4. 3BI programı akış diyagramı



Şekil 6.5. 3BIİ program genel arayüzü

Şekil 6.5’ te genel arayüz görüntüsü verilen 3BIİ yazılımı hakkındaki detaylı bilgi Ek 3’te verilmiştir.

7. SENARYOLAR

7.1. Ortam Bilgileri ve Ölçümler

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen 3Bİİ simülasyon aracının doğruluğunu test etmek için gerçek tünel ortamında yapılan ölçümler dikkate alınmıştır. Bunun için Fırat Üniversitesi Tıp Fakültesi yeraltı galerilerinde ölçümler yapılmıştır. Ölçüm alınan galeri 2 metre genişliğine, 4 metre yüksekliğinde ve 277 m uzunluğundadır. Her 80 metrede bir 8 metre genişliğinde 4 m uzunluğundaki odalar yer almaktadır. Ölçümler gerçekleştirilirken yardımcı bir aparat sayesinde alıcı düğümün zeminden yüksekliği 50 cm, 100 cm ve 200 cm olacak şekilde değiştirilmiştir. İlgili galeri gerçek boyutlar kullanılarak 3Bİİ programı aracılığıyla 3 boyutlu olarak modellenmiş ve gerçek ölçüm alınan noktalara alıcı ve verici düğümler yerleştirilerek yapılan simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Oluşturulan 3B modelde galeride orta gerilim kablolarının geçtiği tavalar, kablolar, ısı boruları, demir profiller, ızgaralar gibi toplam 1331 nesne ve engel tanımlanmıştır. Bu çalışmada yapılan modellemelerde ortamdaki metalik nesne etkileri dikkate alınmamış, malzemelerin dielektrik sabitlerinin reel kısmı alınmıştır. Örneğin beton için dielektrik katsayısı 4.6 alınmıştır. Bu ortam tasarımına ait ekran görüntüleri ve gerçek ölçüm görüntüleri Şekil 7.1 - 7.10' daki gibidir. Bununla birlikte 3Bİİ yazılımından elde edilen sonuçlar aynı zamanda profesyonel bir simülasyon yazılımı olan OMNET++ Castalia' da elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. OMNET++ Castalia simülatörü, kablosuz kanal modeli olarak Eşitlik 3.11' deki Log Normal Shadowing modelini kullanmaktadır. Bu modelde σ (standart sapma) değeri 4 ve η (yol kaybı katsayısı) 1.6 olarak alınmış, $PL(d_0)$ değeri ise 40 dBm olarak seçilmiştir.

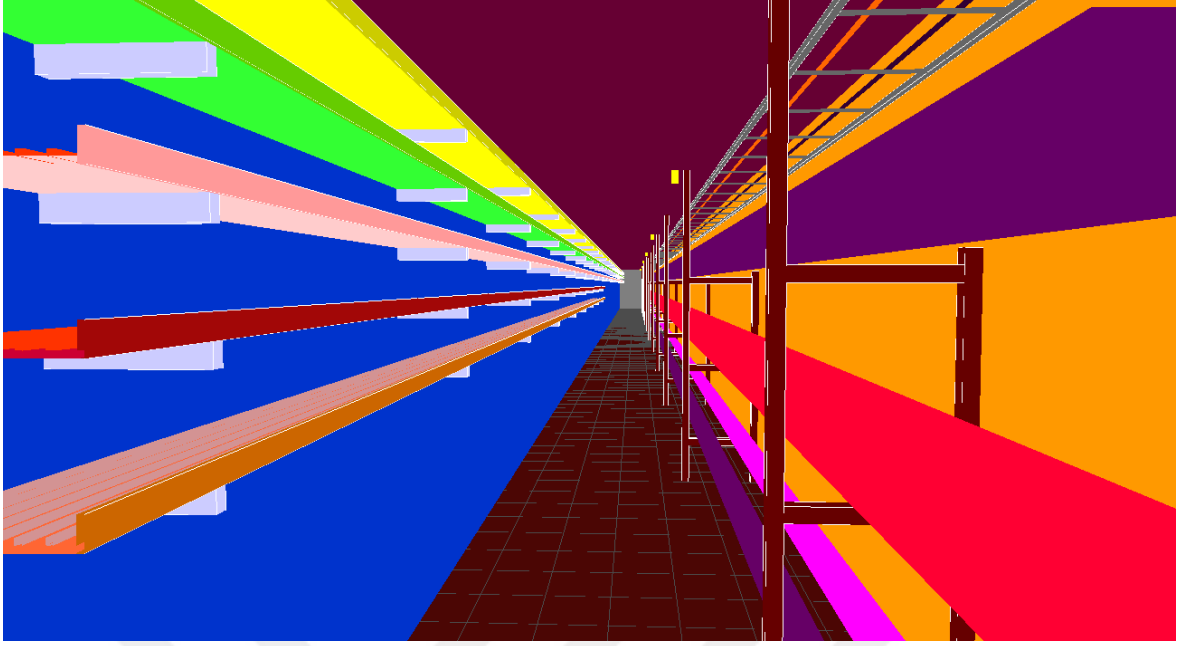
Testler farklı senaryolar için denenmiştir. Bu senaryolarda aynı ışın sayısı ve aynı düğüm kapsama yarıçapında sadece free space, free space ve yansıma ve son olarak da free space, yansıma ve kırınım senaryoları gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar uygulanırken alıcı düğümlerin yükseklik değerlerine göre senaryolar oluşturulmuştur. Yansıma ve kırınım olaylarının hesaplamaya katıldığı senaryolarda bu olayların sınır değerleri aynı tutulmuştur. Bu senaryolarda değerlendirme için RMSE (Root Mean Square Error) kriteri esas alınmış olup bu kriterin genel ifadesi Eşitlik 7.1 deki gibidir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7.1)$$

Bu eşitlikte n adet ölçüm için, P_i hesaplanan değerleri, O_i ise referans değerleri ifade etmektedir.



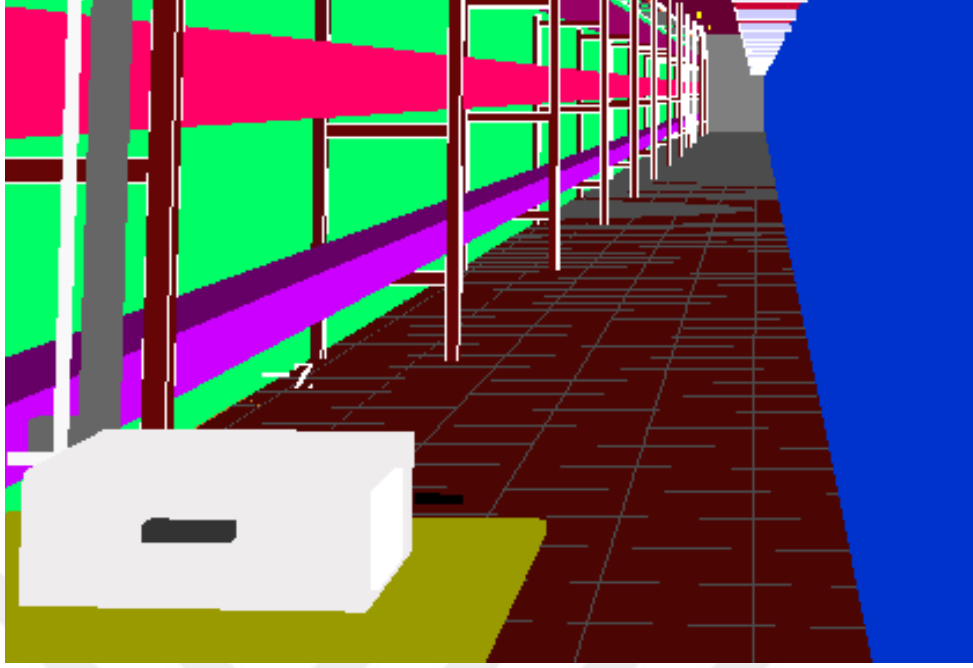
Şekil 7.1. Galeri 1. fotoğraf



Şekil 7.2. Galeri 1. fotoğrafın 3B modeli



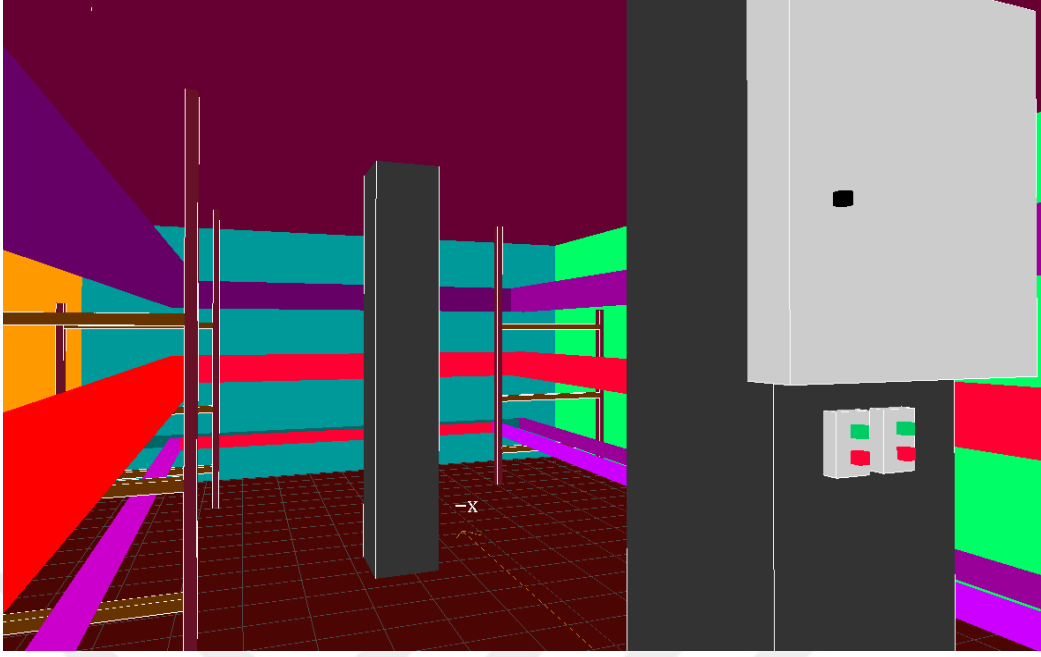
Şekil 7.3. Galeri 2. fotoğraf



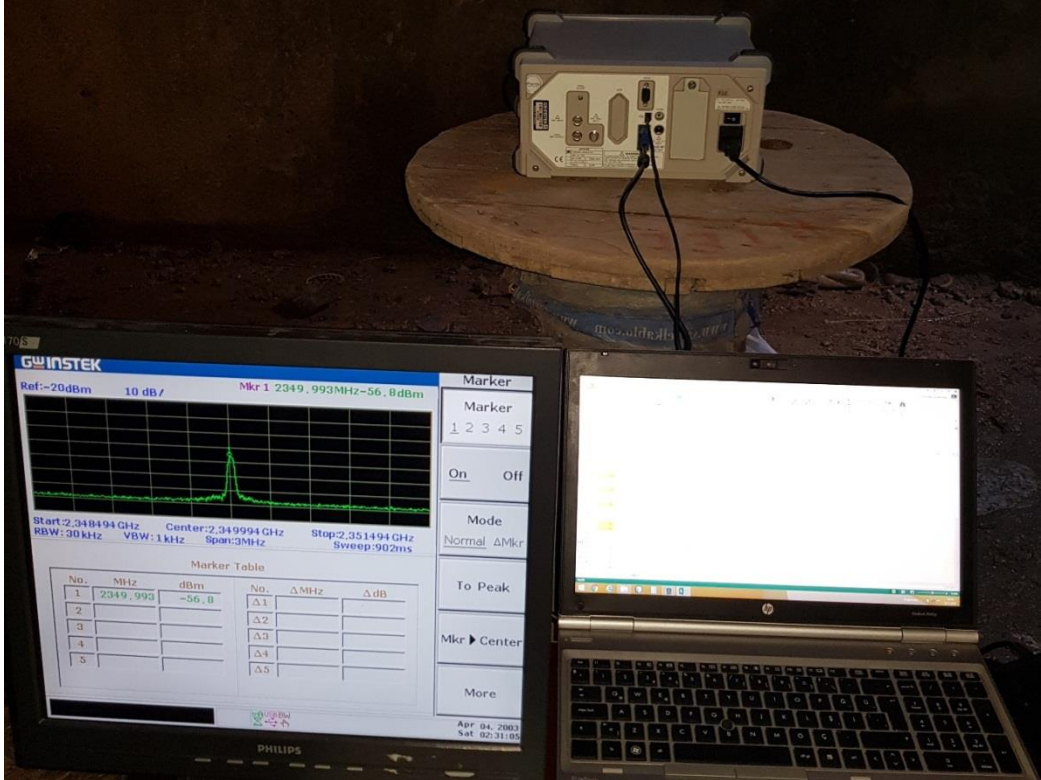
Şekil 7.4. Galeri 2. fotoğrafın 3B modeli



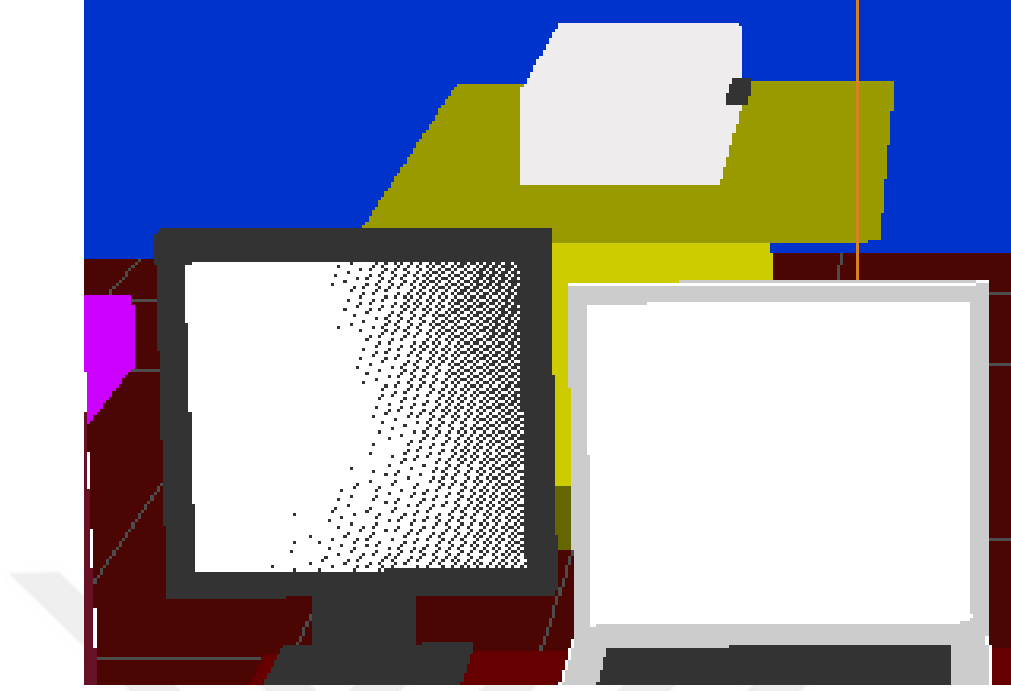
Şekil 7.5. Galeri 3. fotoğraf



Şekil 7.6. Galeri 3. fotoğrafın 3B modeli



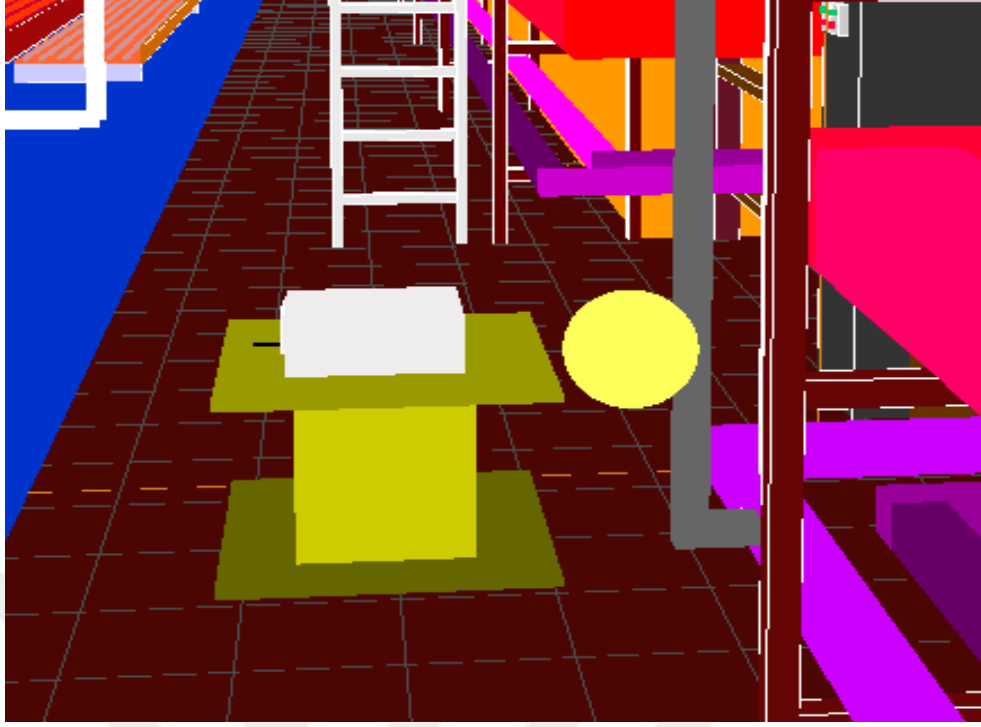
Şekil 7.7. Galeri 4. fotoğraf



Şekil 7.8. Galeri 4. fotoğrafın 3B modeli

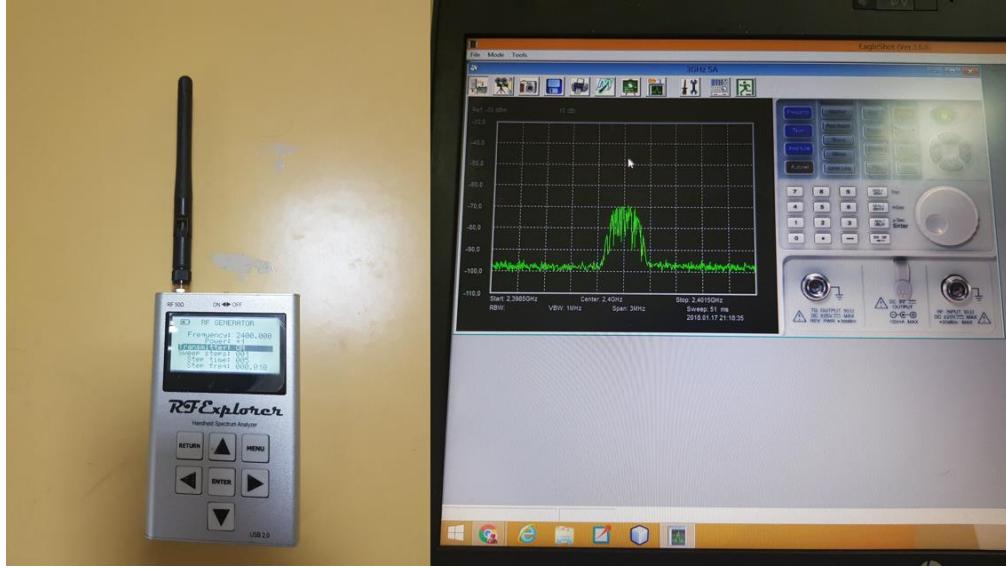


Şekil 7.9. Galeri 5. fotoğraf



Şekil 7.10. Galerî 5. fotoğrafın 3B modeli

Ölçümler esnasında sinyal üretici olarak RF Explorer Model 2.4G, spektrum analizörü olarak da GWInstek GSP-830 kullanılmıştır. Sinyaller ölçülürken spektrum analizörünün başlangıç frekansı 2.3485 GHz, merkez frekansı 2.350 GHz ve bitiş frekansı 2.3515 GHz, span değeri 3 Mhz, referans genliği (Ref) -20 dBm, RBW (Resolution BandWidth) değeri 300 kHz, VBW (Video BandWidth) değeri 10 kHz olarak belirlenmiştir. Ayrıca spektrum analizörünün yardımcı EagleShot programı kullanılarak ölçüm verileri kolaylıkla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Hesaplamalar ve modellemeler yapılırken alıcı düğümlerin yüksekliklerini ayarlamak amacıyla kullanılan aparatın etkisi ihmal edilmiş ve simülasyonlara eklenmemiştir. Ölçümler esnasında kullanılan RF sinyal üretici ve EagleShot programının arayüzü Şekil 7.11 'de gösterilmiştir.



Şekil 7.11. RF üretici ve EagleShot program arayüzü

Ölçümler esnasında 49 noktadan ölçüm alınmıştır. 3Bİİ programında ölçüm alınan bu noktalara sanal düğümler yerleştirilmiştir. Alıcı düğümlerin koordinatları Tablo 7.1-7.3’ teki gibidir.

Tablo 7.1. 50 cm yükseklikteki düğümlerin koordinat değerleri

Konum (metre)			Adı
x	y	z	
1	0,5	-2	D1_Sol_50
1	0,5	3	D1_Sag_50
1	0,5	-6	D2_Sol_50
1	0,5	7	D2_Sag_50
1	0,5	-10	D3_Sol_50
1	0,5	11	D3_Sag_50
1	0,5	-14	D4_Sol_50
1	0,5	15	D4_Sag_50
1	0,5	-18	D5_Sol_50
1	0,5	19	D5_Sag_50
1	0,5	-22	D6_Sol_50
1	0,5	23	D6_Sag_50
1	0,5	-26	D7_Sol_50
1	0,5	27	D7_Sag_50
1	0,5	-30	D8_Sol_50
1	0,5	31	D8_Sag_50
1	0,5	-42	D9_Sol_50

Tablo 7.2. 100 cm yükseklikteki düğümlerin koordinat değerleri

Konum (metre)			Adı
x	y	z	
1	1	-2	D1_Sol_100
1	1	3	D1_Sag_100
1	1	-6	D2_Sol_100
1	1	7	D2_Sag_100
1	1	-10	D3_Sol_100
1	1	11	D3_Sag_100
1	1	-14	D4_Sol_100
1	1	15	D4_Sag_100
1	1	-18	D5_Sol_100
1	1	19	D5_Sag_100
1	1	-22	D6_Sol_100
1	1	23	D6_Sag_100
1	1	-26	D7_Sol_100
1	1	-30	D8_Sol_100
1	1	35	D7_Sag_100
1	1	-42	D9_Sol_100

Tablo 7.3. 200 cm yükseklikteki düğümlerin koordinat değerleri

Konum (metre)			Adı
x	y	z	
1	2	-2	D1_Sol_200
1	2	3	D1_Sag_200
1	2	-6	D2_Sol_200
1	2	7	D2_Sag_200
1	2	-10	D3_Sol_200
1	2	11	D3_Sag_200
1	2	-14	D4_Sol_200
1	2	15	D4_Sag_200
1	2	-18	D5_Sol_200
1	2	19	D5_Sag_200
1	2	-22	D6_Sol_200
1	2	23	D6_Sag_200
1	2	-26	D7_Sol_200
1	2	-30	D8_Sol_200
1	2	35	D7_Sag_200
1	2	-42	D9_Sol_200
1	2	47	D8_Sag_200

Ölçümler 1 dBm transmisyon gücünde yapılmıştır. Yansıma olayının hesaba katıldığı senaryolarda maksimum yansıma sayısı 4, kırınım olayının hesaplamalara katıldığı senaryolarda ise maksimum kırınım sayısı 1 belirlenmiştir. Senaryo ortamında kırılma olayının meydana gelmesine yol açacak fiziksel materyaller bulunmadığından kırılma etkisi ihmal edilmiştir. Simülasyonlardaki ortak parametreler ve gönderici düğüme ait bilgiler Tablo 7.4’ teki gibidir.

Tablo 7.4. Senaryolardaki sabit parametreler

Transmisyon Gücü (dBm)	Gönderici Düğüm Konumu(x,y,z,)	Düğümünden Çıkan Işın Sayısı	Alıcı Düğüm Kapsama Yarıçap Türü	Frekans (Mhz)	Yansıma Sayısı (hesaplamda varsa)	Kırınım Sayısı (hesaplamda varsa)
1	1.4 , 0.6 , -0.5	63784	Değişken	2350	4	1

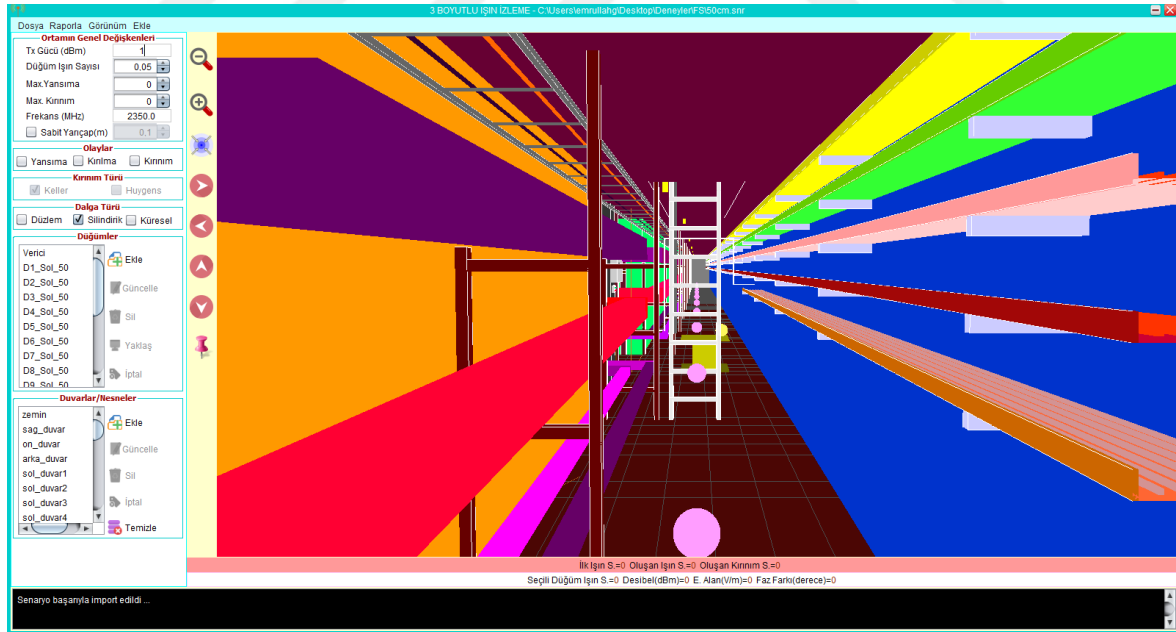
Ortam ölçüm değerleri, 3Bİİ programı ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca OMNET++ Castalia simülatörünün uygulama katmanında yazılan bir uygulama ile alınan sonuçlar kıyaslanmıştır. OMNET++ ortamında yazılan uygulamaya ait detaylar ve ekran görüntüleri Ek 4’te mevcuttur.

7.2. Free Space Senaryolar

Bu bölümdeki senaryolara sadece free space olayı dahil edilmiştir. Bu simülasyon senaryolarında gönderici düğüm sabit bir noktada tutulup alıcı düğümler farklı konumlara yerleştirilerek free space etkileri gözlemlenmiştir. Free Space senaryo sonuçlarında önemli kriterlerden biri “başarım oranı (BO)” dır. Başarım oranı kaç alıcı düğümün en az bir ışın ile kesişip kesişmediğinin ölçütüdür. Bu ölçütü kullanmanın amacı, free space deneylerde bir düğümün konumundan dolayı hiçbir ışınla kesişmemiş olma ihtimalidir. Örnek olarak 10 alıcı düğümden sadece 7 sinin en az bir ışın almış olması başarım oranının % 70 olduğu anlamına gelir. Free Space deneylerde değerlendirme bu kriter dikkate alınarak yapılmıştır. Yansıma ve kırınım olaylarının dahil edildiği diğer senaryolarda başarım oranı % 100 olduğundan, bu senaryolarda BO kriteri dikkate alınmamıştır.

Senaryo 1:

Bu senaryoda alıcı düğümlerin yerden yükseklikleri 50 cm olarak modellenmiş ve sadece free space hesaba katılmıştır. Alıcı düğümlere ait konum bilgileri Tablo 7.1’ deki gibidir. 3Bİİ programında gerçekleştirilen bu senaryoya ait ekran görüntüsü Şekil 7.12’ deki gibidir.



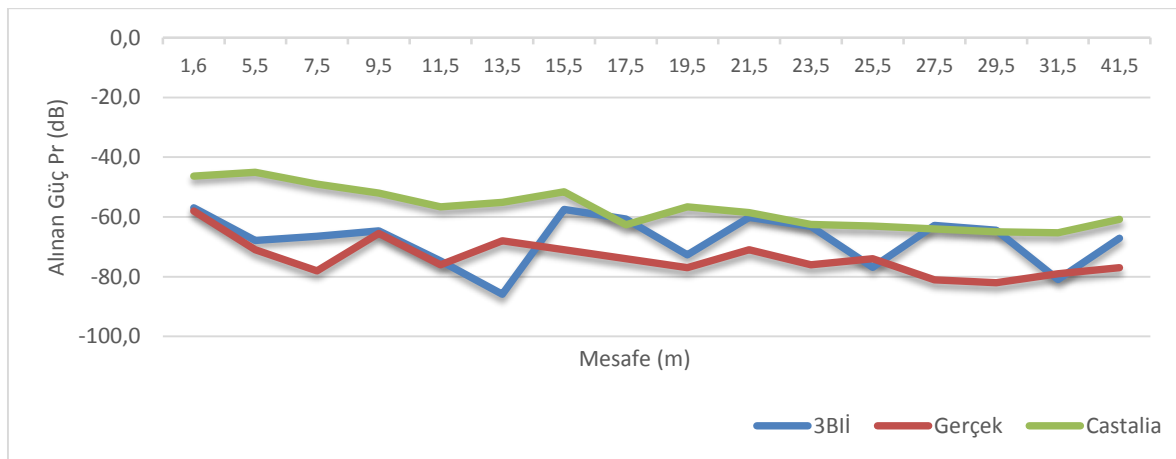
Şekil 7.12. Senaryo 1’ in çalıştırılması

3Bİİ programının analiz modülü aracılığıyla oluşturulan genel değerlendirme sonuçları Tablo 7.5’ te gösterilmektedir.

Tablo 7.5. Senaryo 1' e ait genel sonuçlar

Adı	Vericiye Uzaklık (m)	Kapsama Yarıçapı (m)	Ölçülen Güç (dBm)	Omnet++ Güç (dBm)	3Bİİ Güç (dBm)	3Bİİ Hesaplanan Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
D1_Sol_50	1,6	0,03	-58	-46,35	-57	0,2452	5
D1_Sag_50	3,5	0,0849	-67	-43,29	-	-	0
D2_Sol_50	5,5	0,1404	-71	-45	-67,9	0,07	7
D2_Sag_50	7,5	0,1961	-78	-49	-66,5	0,0821	6
D3_Sol_50	9,5	0,2518	-65,5	-52	-64,6	-0,1018	5
D3_Sag_50	11,5	0,3076	-76	-56,6	-74,7	0,032	3
D4_Sol_50	13,5	0,3633	-68	-55,08	-85,9	0,0088	2
D4_Sag_50	15,5	0,4191	-71	-51,61	-57,5	-0,2305	19
D5_Sol_50	17,5	0,4749	-74	-62,65	-60,7	0,1605	20
D5_Sag_50	19,5	0,5306	-77	-56,61	-72,7	0,0403	19
D6_Sol_50	21,5	0,5864	-71	-58,55	-60,1	-0,1711	20
D6_Sag_50	23,5	0,6422	-76	-62,5	-63,2	0,12	19
D7_Sol_50	25,5	0,698	-74	-63	-76,9	0,0249	20
D7_Sag_50	27,5	0,7537	-81	-64	-62,8	-0,1251	19
D8_Sol_50	29,5	0,8095	-82	-65	-64,5	0,1036	20
D8_Sag_50	31,5	0,8653	-79	-65,33	-81	0,0155	19
D9_Sol_50	41,5	1,1442	-77	-60,76	-67,2	0,076	20

İlk free space senaryo sonucunda başarımlı oranı (BO) % 94.11 olup Senaryo 1 sonucunda alıcı düğümlerin aldığı güç değerlerinin ortam ölçüm, Castalia ve 3Bİİ programı aracılığı ile karşılaştırması Şekil 7.13' teki gibidir.



Şekil 7.13. Senaryo 1' e ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

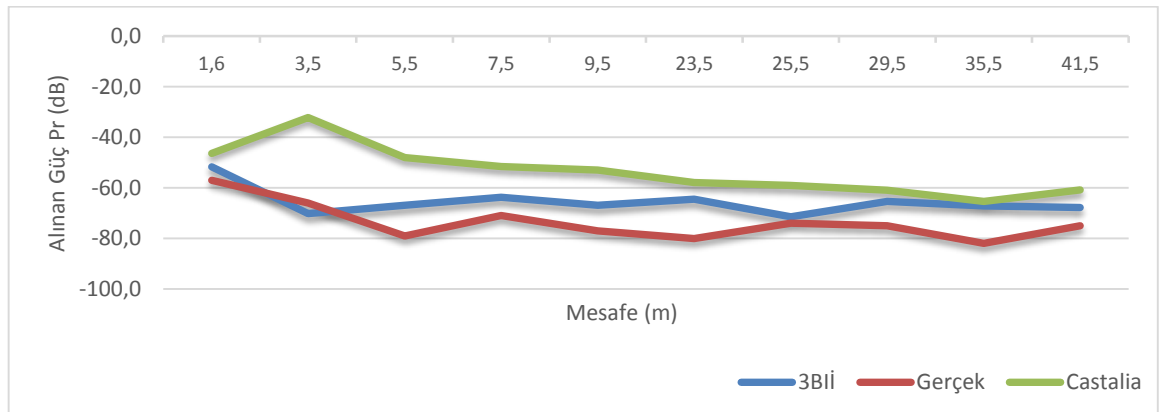
Senaryo 2:

Bu senaryoda alıcı düğümlerin yerden yükseklikleri 100 cm olarak modellenmiştir. Alıcı düğümlere ait konum bilgileri Tablo 7.2’ deki gibidir. 3Bİİ programının analiz modülü aracılığıyla oluşturulan genel değerlendirme sonuçları Tablo 7.6’ da gösterilmektedir.

Tablo 7.6. Senaryo 2’ ye ait genel sonuçlar

Adı	Vericiye Uzaklık (m)	Kapsama Yarıçapı (m)	Ölçülen Güç (dBm)	Omnet++ Güç (dBm)	3Bİİ Güç (dBm)	3Bİİ Hesaplanan Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
D1_Sol_100	1,6	0,03	-57	-46,35	-51,6	-0,4533	4
D1_Sag_100	3,5	0,0795	-66	-32,22	-70,1	0,054	7
D2_Sol_100	5,5	0,1301	-79	-48	-66,9	-0,0784	6
D2_Sag_100	7,5	0,1809	-71	-51,55	-63,8	0,112	5
D3_Sol_100	9,5	0,2317	-77	-53	-66,9	-0,0779	4
D3_Sag_100	11,5	0,2826	-69	-54	-	-	0
D4_Sol_100	13,5	0,3336	-70	-55,08	-	-	0
D4_Sag_100	15,5	0,3845	-71	-58,68	-	-	0
D5_Sol_100	17,5	0,4354	-68	-62,65	-	-	0
D5_Sag_100	19,5	0,4864	-83	-53,2	-	-	0
D6_Sol_100	21,5	0,5374	-72	-58,55	-	-	0
D6_Sag_100	23,5	0,5883	-80	-57,9	-64,5	0,1026	19
D7_Sol_100	25,5	0,6393	-74	-59	-71,5	0,0463	20
D8_Sol_100	29,5	0,7412	-75	-61	-65,4	0,0927	20
D7_Sag_100	35,5	0,8941	-82	-65,36	-67,1	0,0764	19
D9_Sol_100	41,5	1,0471	-75	-60,76	-67,8	0,0708	20

Bu senaryoda başarımlar oranı % 62.5 ‘tir. Senaryo 2 sonucunda alıcı düğümlerin aldığı güç değerlerinin ortam ölçüm, Castalia ve 3Bİİ programı aracılığı ile karşılaştırması ise Şekil 7.14’ teki gibidir.



Şekil 7.14. Senaryo 2’ ye ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

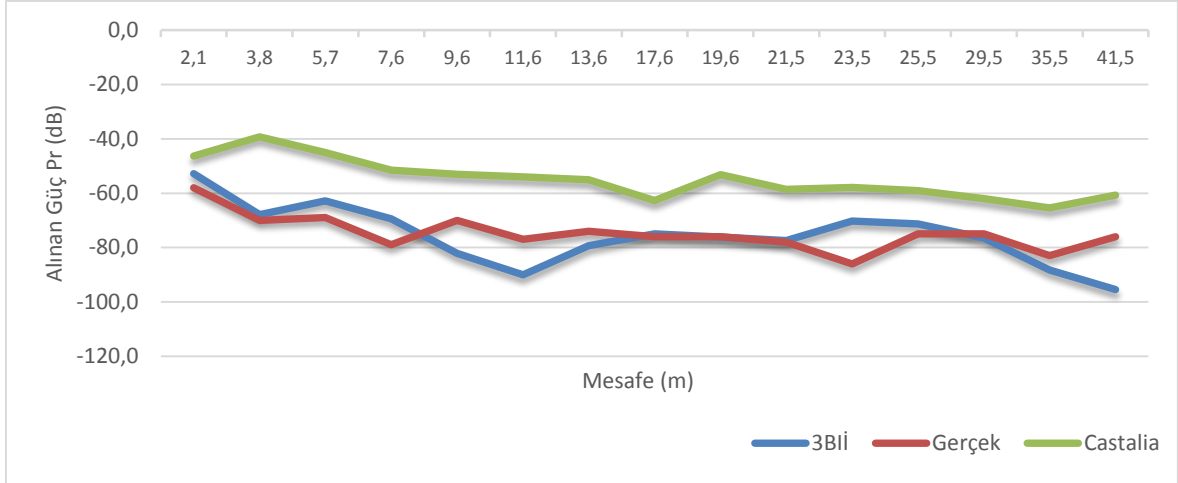
Senaryo 3:

Bu senaryoda alıcı düğümlerin yerden yükseklikleri 200 cm olarak modellenmiştir. Alıcı düğümlere ait konum bilgileri Tablo 7.3' teki gibidir. 3Bİİ programının analiz modülü aracılığıyla oluşturulan genel değerlendirme sonuçları Tablo 7.7' de gösterilmektedir.

Tablo 7.7. Senaryo 3' e ait genel sonuçlar

Adı	Vericiye Uzaklık (m)	Kapsama Yarıçapı (m)	Ölçülen Güç (dBm)	Omnet++ Güç (dBm)	3Bİİ Güç (dBm)	3Bİİ Hesaplanan Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
D1_Sol_200	2,1	0,03	-58	-46,35	-52,8	-0,395	6
D1_Sag_200	3,8	0,0738	-70	-39,22	-67,8	-0,0702	4
D2_Sol_200	5,7	0,1227	-69	-45	-62,9	-0,1245	4
D2_Sag_200	7,6	0,1729	-79	-51,55	-69,5	0,0582	4
D3_Sol_200	9,6	0,2237	-70	-53	-82,2	-0,0135	3
D3_Sag_200	11,6	0,2747	-77	-54	-90,1	0,0054	1
D4_Sol_200	13,6	0,3258	-74	-55,08	-79,3	-0,0187	2
D4_Sag_200	15,6	0,3771	-79	-58,68	-	-	0
D5_Sol_200	17,6	0,4284	-76	-62,65	-74,9	-0,0311	3
D5_Sag_200	19,6	0,4797	-76	-53,2	-76,1	0,027	6
D6_Sol_200	21,5	0,5311	-78	-58,55	-77,4	0,0233	8
D6_Sag_200	23,5	0,5825	-86	-57,9	-70,3	-0,0532	7
D7_Sol_200	25,5	0,6339	-75	-59	-71,3	0,0474	7
D8_Sol_200	29,5	0,7368	-75	-62	-76,5	-0,026	6
D7_Sag_200	35,5	0,8912	-83	-65,36	-88,2	-0,0067	3
D9_Sol_200	41,5	1,0456	-76	-60,76	-95,5	-0,0029	3

Başarım oranı % 93.75 olan Senaryo 3 sonucunda alıcı düğümlerin aldığı güç değerlerinin ortam ölçüm, Castalia ve 3Bİİ programı aracılığı ile karşılaştırması Şekil 7.15' teki gibidir.



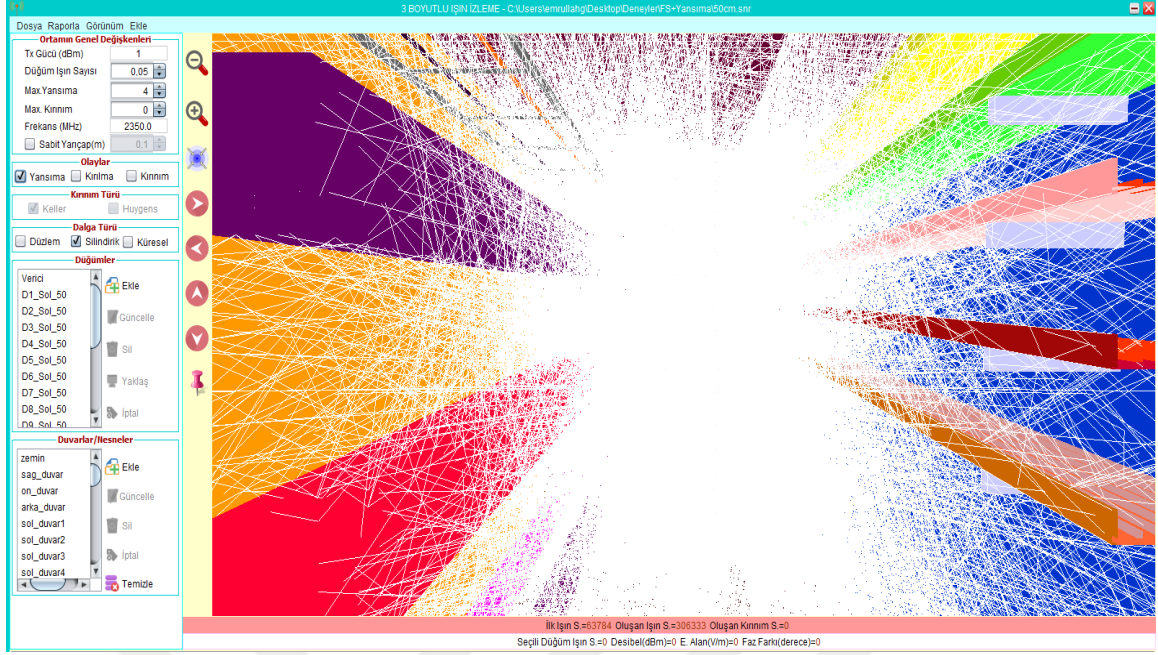
Şekil 7.15. Senaryo3' e ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

7.3. Free Space ve Yansıma Senaryoları

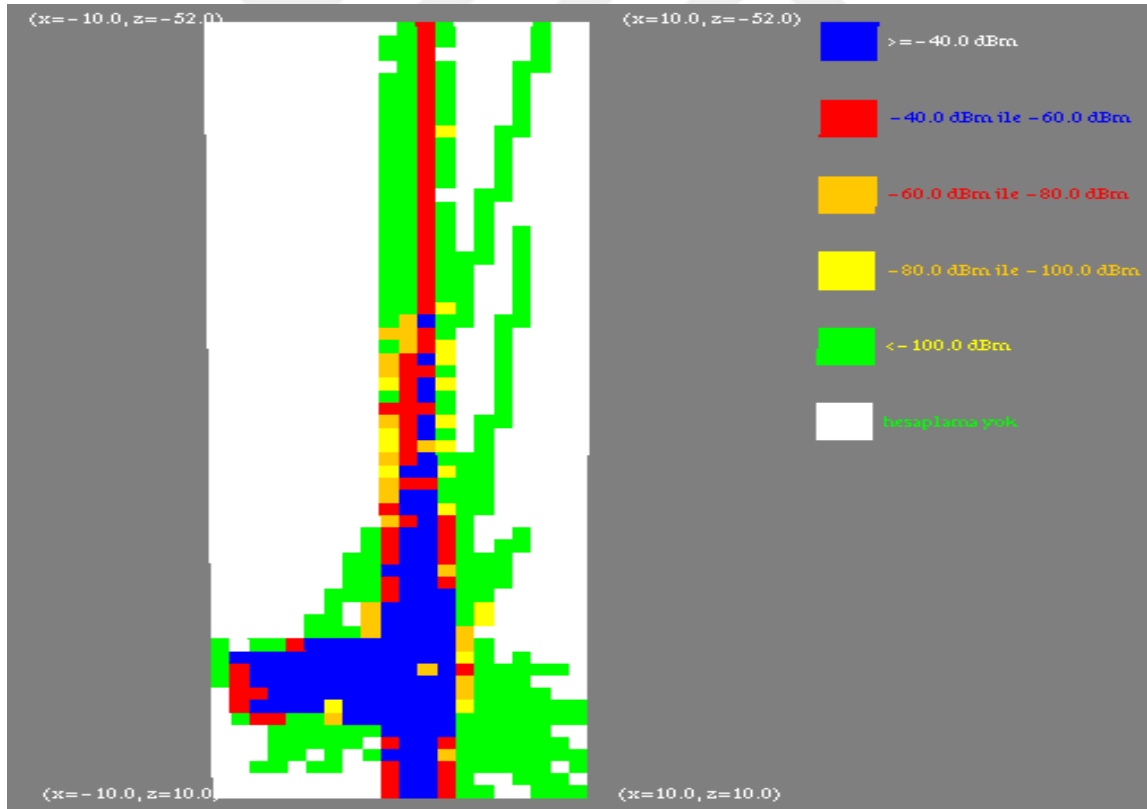
Bu bölümdeki senaryolara Free space ve yansıma olayları dahil edilmiştir. Maksimum yansıma sayısı 4 olarak belirlenmiştir. Simülasyonlarda ortam ve simülasyon parametreleri değişmediğinden her bir senaryoda 306333 ışın oluşmuştur.

Senaryo 4:

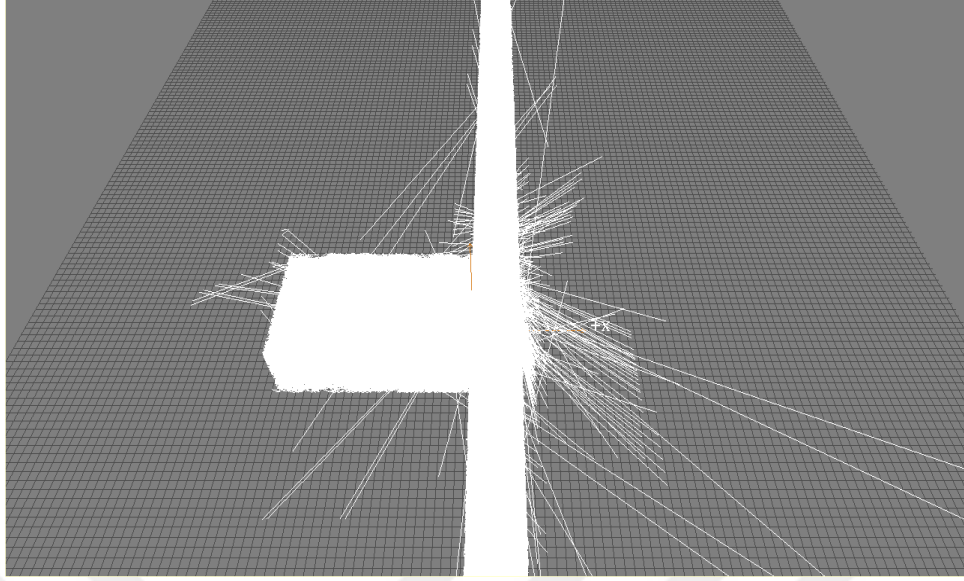
Bu senaryoda alıcı düğümlerin yerden yükseklikleri 50 cm olarak modellenmiştir. Alıcı düğümlere ait konum bilgileri Tablo 7.1' deki gibidir. Bu senaryoya ait ekran görüntüleri Şekil 7.16 – 7.18' deki gibidir.



Şekil 7.16. Senaryo 4' ün çalıştırılması



Şekil 7.17. Senaryo 4' ün 2B haritası



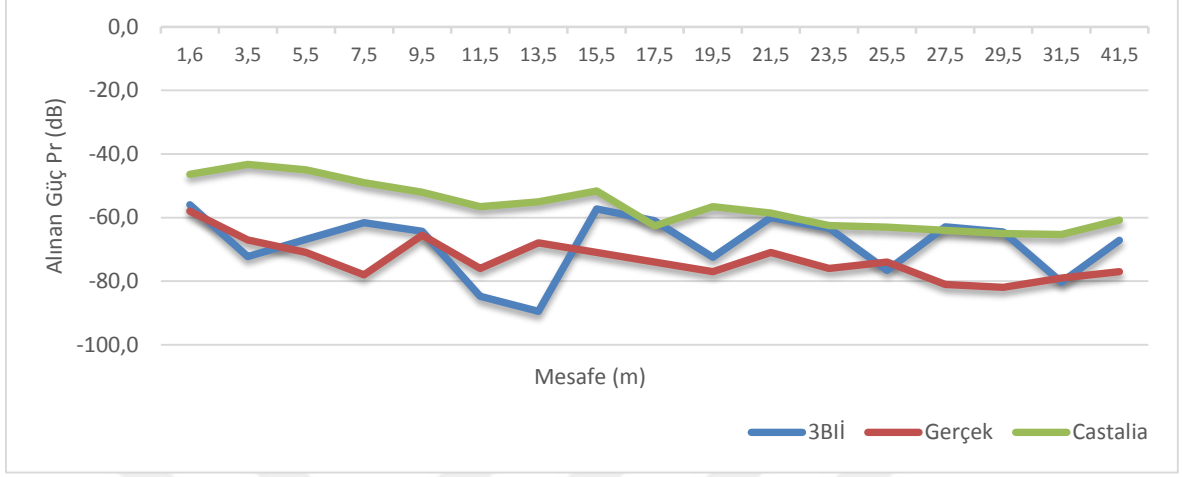
Şekil 7.18. Senaryo 4 sonucu oluşan ışınların kuşbakışı görünümü

Bu senaryoya ait genel değerlendirme sonuçları Tablo 7.8’ de gösterilmektedir.

Tablo 7.8. Senaryo 4’ e ait genel sonuçlar

Adı	Vericiye Uzaklık (m)	Kapsama Yarıçapı (m)	Ölçülen Güç (dBm)	Omnet++ Güç (dBm)	3Bİİ Güç (dBm)	3Bİİ Hesaplanan Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
D1_Sol_50	1,6	0,03	-58	-46,35	-56	0,2747	28
D1_Sag_50	3,5	0,0849	-67	-43,29	-72,3	-0,0422	39
D2_Sol_50	5,5	0,1404	-71	-45	-66,8	0,079	223
D2_Sag_50	7,5	0,1961	-78	-49	-61,6	0,1448	125
D3_Sol_50	9,5	0,2518	-65,5	-52	-64,3	-0,1053	230
D3_Sag_50	11,5	0,3076	-76	-56,6	-84,7	0,01	132
D4_Sol_50	13,5	0,3633	-68	-55,08	-89,5	0,0058	200
D4_Sag_50	15,5	0,4191	-71	-51,61	-57,2	-0,2381	343
D5_Sol_50	17,5	0,4749	-74	-62,65	-61	0,1548	396
D5_Sag_50	19,5	0,5306	-77	-56,61	-72,5	0,0412	349
D6_Sol_50	21,5	0,5864	-71	-58,55	-60	-0,1725	387
D6_Sag_50	23,5	0,6422	-76	-62,5	-63,3	0,1185	342
D7_Sol_50	25,5	0,698	-74	-63	-76,6	0,0256	368
D7_Sag_50	27,5	0,7537	-81	-64	-62,9	-0,1243	335
D8_Sol_50	29,5	0,8095	-82	-65	-64,5	0,1026	375
D8_Sag_50	31,5	0,8653	-79	-65,33	-80,3	0,0167	312
D9_Sol_50	41,5	1,1442	-77	-60,76	-67,2	0,0759	302

Senaryo 4 sonucunda alıcı düğümlerin aldığı güç değerlerinin ortam ölçüm, Castalia ve 3Bİİ programı aracılığı ile karşılaştırması Şekil 7.19’ daki gibidir.



Şekil 7.19. Senaryo 4’ e ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

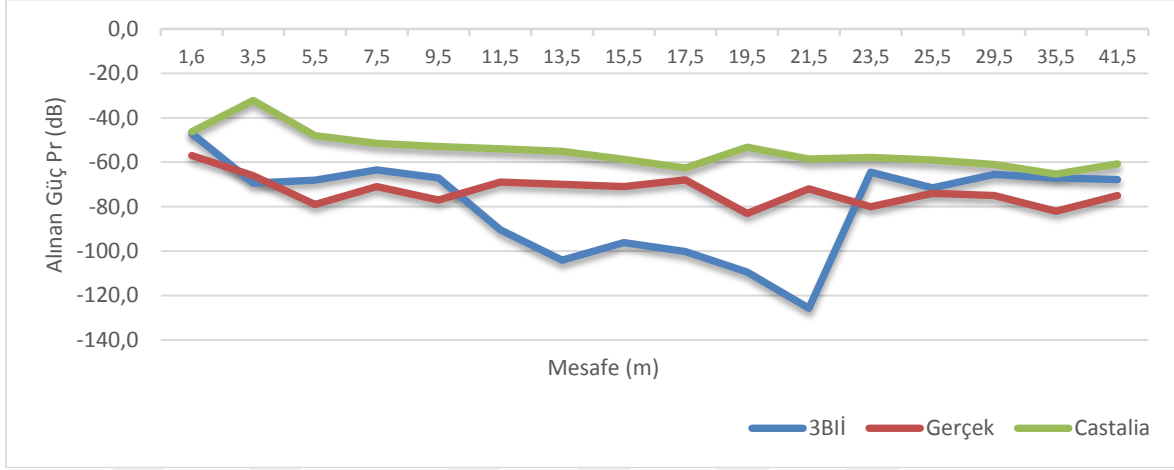
Senaryo 5:

Bu senaryoda alıcı düğümlerin yerden yükseklikleri 100 cm olarak modellenmiştir. Alıcı düğümlere ait konum bilgileri Tablo 7.2’ deki gibidir. Bu senaryoya ait genel değerlendirme sonuçları Tablo 7.9’ da gösterilmektedir.

Tablo 7.9. Senaryo 5’ e ait genel sonuçlar

Adı	İlk Vericiye Uzaklık (m)	Kapsama Yarıçapı (m)	Ölçülen Güç (dBm)	Omnet++ Güç (dBm)	3Bİİ Güç (dBm)	3Bİİ Hesaplanan Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
D1_Sol_100	1,6	0,03	-57	-46,35	-47	-0,7708	29
D1_Sag_10	3,5	0,0795	-66	-32,22	-69,3	0,0591	41
D2_Sol_100	5,5	0,1301	-79	-48	-68	-0,0687	136
D2_Sag_10	7,5	0,1809	-71	-51,55	-63,5	0,1156	58
D3_Sol_100	9,5	0,2317	-77	-53	-67,1	-0,0764	113
D3_Sag_10	11,5	0,2826	-69	-54	-90,3	-0,0053	44
D4_Sol_100	13,5	0,3336	-70	-55,08	-104,1	-0,0011	96
D4_Sag_10	15,5	0,3845	-71	-58,68	-96,1	0,0027	41
D5_Sol_100	17,5	0,4354	-68	-62,65	-100,2	0,0017	112
D5_Sag_10	19,5	0,4864	-83	-53,2	-109,3	-0,0006	102
D6_Sol_100	21,5	0,5374	-72	-58,55	-125,7	0,0001	173
D6_Sag_10	23,5	0,5883	-80	-57,9	-64,5	0,1027	304
D7_Sol_100	25,5	0,6393	-74	-59	-71,5	0,0462	361
D8_Sol_100	29,5	0,7412	-75	-61	-65,4	0,0926	369
D7_Sag_10	35,5	0,8941	-82	-65,36	-67	0,0774	306
D9_Sol_100	41,5	1,0471	-75	-60,76	-67,8	0,0708	324

Senaryo 5 sonucunda alıcı düğümlerin aldığı güç değerlerinin ortam ölçüm, Castalia ve 3Bİİ programı aracılığı ile karşılaştırması Şekil 7.20’ deki gibidir.



Şekil 7.20. Senaryo 5’ e ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

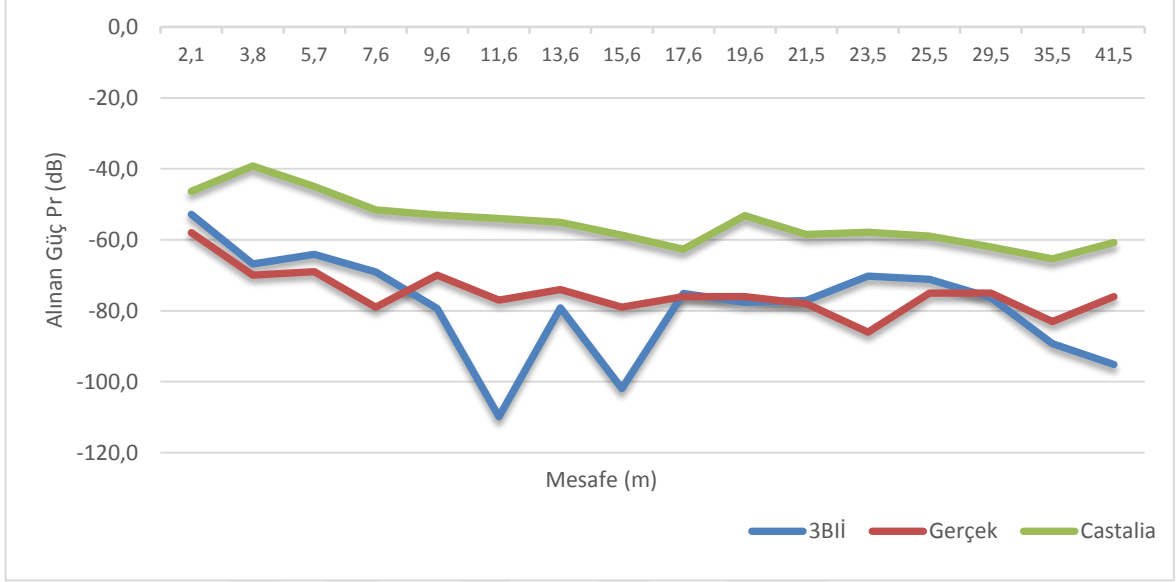
Senaryo 6:

Bu senaryoda alıcı düğümlerin yerden yükseklikleri 200 cm olarak modellenmiştir. Alıcı düğümlere ait konum bilgileri Tablo 7.3’ teki gibidir. Bu senaryoya ait genel değerlendirme sonuçları Tablo 7.10’ da gösterilmektedir.

Tablo 7.10. Senaryo 6’ ya ait genel sonuçlar

Adı	Vericiye Uzaklık (m)	Kapsama Yarıçapı (m)	Ölçülen Güç (dBm)	Omnet++ Güç (dBm)	3Bİİ Güç (dBm)	3Bİİ Hesaplanan Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
D1_Sol_200	2,1	0,03	-58	-46,35	-52,8	-0,3951	35
D1_Sag_200	3,8	0,0738	-70	-39,22	-66,8	0,0788	30
D2_Sol_200	5,7	0,1227	-69	-45	-64,1	-0,1085	78
D2_Sag_200	7,6	0,1729	-79	-51,55	-69,1	0,0609	56
D3_Sol_200	9,6	0,2237	-70	-53	-79,3	-0,0187	104
D3_Sag_200	11,6	0,2747	-77	-54	-109,8	0,0006	31
D4_Sol_200	13,6	0,3258	-74	-55,08	-79,2	-0,019	86
D4_Sag_200	15,6	0,3771	-79	-58,68	-101,9	0,0014	27
D5_Sol_200	17,6	0,4284	-76	-62,65	-75,1	-0,0304	81
D5_Sag_200	19,6	0,4797	-76	-53,2	-77,7	0,0227	84
D6_Sol_200	21,5	0,5311	-78	-58,55	-77,1	0,0242	130
D6_Sag_200	23,5	0,5825	-86	-57,9	-70,2	-0,0533	95
D7_Sol_200	25,5	0,6339	-75	-59	-71,1	0,0483	123
D8_Sol_200	29,5	0,7368	-75	-62	-76,3	-0,0265	106
D7_Sag_200	35,5	0,8912	-83	-65,36	-89,2	-0,006	80
D9_Sol_200	41,5	1,0456	-76	-60,76	-95,2	-0,003	75

Senaryo 6 sonucunda alıcı düğümlerin aldığı güç değerlerinin ortam ölçüm, Castalia ve 3Bİİ programı aracılığı ile karşılaştırması Şekil 7.21’ deki gibidir.



Şekil 7.21. Senaryo 6’ ya ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

7.4. Free Space, Yansıma ve Kırınım Senaryoları

Bu bölümdeki senaryolara Free space, yansıma ve kırınım olayları dahil edilmiştir. Maksimum yansıma sayısı 4, maksimum kırınım sayısı 1 olarak belirlenmiştir. Her simülasyon sonunda 4960407 ışın oluşmuş ve 3025 kırınım olayı gerçekleşmiştir.

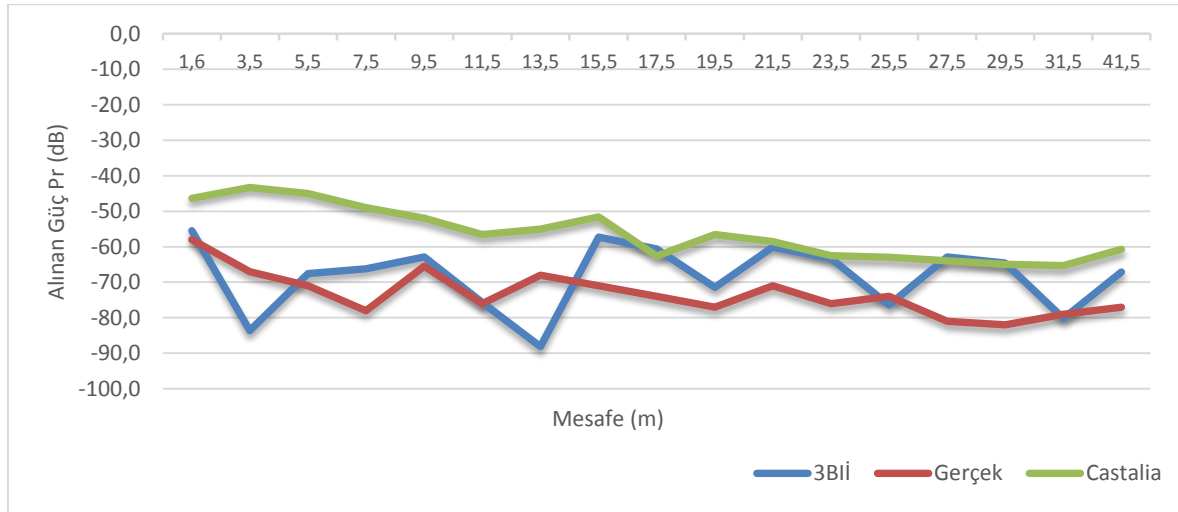
Senaryo 7:

Bu senaryoda alıcı düğümlerin yerden yükseklikleri 50 cm olarak modellenmiştir. Alıcı düğümlere ait konum bilgileri Tablo 7.1’ deki gibidir. Bu senaryoya ait genel değerlendirme sonuçları Tablo 7.11’ de gösterilmektedir.

Tablo 7.11. Senaryo 7' ye ait genel sonuçlar

Adı	Vericiye Uzaklık (m)	Kapsama Yarıçapı (m)	Ölçülen Güç (dBm)	Omnet++ Güç (dBm)	3Bİİ Güç (dBm)	3Bİİ Hesaplanan Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
D1_Sol_50	1,6	0,03	-58	-46,35	-55,5	0,2897	34
D1_Sag_50	3,5	0,0849	-67	-43,29	-83,6	0,0114	59
D2_Sol_50	5,5	0,1404	-71	-45	-67,6	0,0723	316
D2_Sag_50	7,5	0,1961	-78	-49	-66,2	0,085	229
D3_Sol_50	9,5	0,2518	-65,5	-52	-62,9	-0,1243	409
D3_Sag_50	11,5	0,3076	-76	-56,6	-75,7	0,0285	203
D4_Sol_50	13,5	0,3633	-68	-55,08	-88,1	0,0068	381
D4_Sag_50	15,5	0,4191	-71	-51,61	-57,3	-0,2362	396
D5_Sol_50	17,5	0,4749	-74	-62,65	-60,6	0,161	667
D5_Sag_50	19,5	0,5306	-77	-56,61	-71,5	0,0463	467
D6_Sol_50	21,5	0,5864	-71	-58,55	-60,1	-0,1709	540
D6_Sag_50	23,5	0,6422	-76	-62,5	-63,4	0,1175	384
D7_Sol_50	25,5	0,698	-74	-63	-76,4	0,0262	548
D7_Sag_50	27,5	0,7537	-81	-64	-62,9	-0,1242	375
D8_Sol_50	29,5	0,8095	-82	-65	-64,6	0,1022	446
D8_Sag_50	31,5	0,8653	-79	-65,33	-80,2	0,0169	407
D9_Sol_50	41,5	1,1442	-77	-60,76	-67,1	0,0765	315

Senaryo 7 sonucunda alıcı düğümlerin aldığı güç değerlerinin ortam ölçüm, Castalia ve 3Bİİ programı aracılığı ile karşılaştırması Şekil 7.22' deki gibidir.



Şekil 7.22. Senaryo 7' ye ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

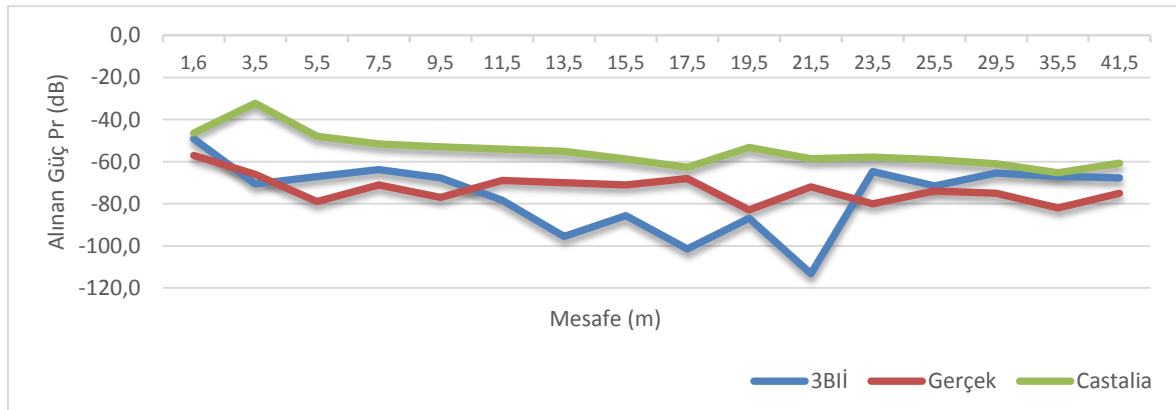
Senaryo 8:

Bu senaryoda alıcı düğümlerin yerden yükseklikleri 100 cm olarak modellenmiştir. Alıcı düğümlere ait konum bilgileri Tablo 7.2’ deki gibidir. Bu senaryoya ait genel değerlendirme sonuçları Tablo 7.12’ de gösterilmektedir.

Tablo 7.12. Senaryo 8’ e ait genel sonuçlar

Adı	Vericiye Uzaklık (m)	Kapsama Yarıçapı (m)	Ölçülen Güç (dBm)	Omnet++ Güç (dBm)	3Bİİ Güç (dBm)	3Bİİ Hesaplanan Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
D1_Sol_100	1,6	0,03	-57	-46,35	-49,2	-0,5984	35
D1_Sag_100	3,5	0,0795	-66	-32,22	-70,6	0,0511	99
D2_Sol_100	5,5	0,1301	-79	-48	-67,1	-0,0768	201
D2_Sag_100	7,5	0,1809	-71	-51,55	-63,8	0,1122	124
D3_Sol_100	9,5	0,2317	-77	-53	-67,7	-0,0714	233
D3_Sag_100	11,5	0,2826	-69	-54	-78,4	-0,0209	95
D4_Sol_100	13,5	0,3336	-70	-55,08	-95,5	-0,0029	209
D4_Sag_100	15,5	0,3845	-71	-58,68	-85,7	-0,009	68
D5_Sol_100	17,5	0,4354	-68	-62,65	-101,5	0,0015	234
D5_Sag_100	19,5	0,4864	-83	-53,2	-86,9	-0,0078	182
D6_Sol_100	21,5	0,5374	-72	-58,55	-113,3	0,0004	331
D6_Sag_100	23,5	0,5883	-80	-57,9	-64,6	0,1018	355
D7_Sol_100	25,5	0,6393	-74	-59	-71,5	0,0462	505
D8_Sol_100	29,5	0,7412	-75	-61	-65,5	0,092	439
D7_Sag_100	35,5	0,8941	-82	-65,36	-67	0,0775	343
D9_Sol_100	41,5	1,0471	-75	-60,76	-67,7	0,0711	343

Senaryo 8 sonucunda alıcı düğümlerin aldığı güç değerlerinin ortam ölçüm, Castalia ve 3Bİİ programı aracılığı ile karşılaştırması Şekil 7.23’ teki gibidir.



Şekil 7.23. Senaryo 8’ ye ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

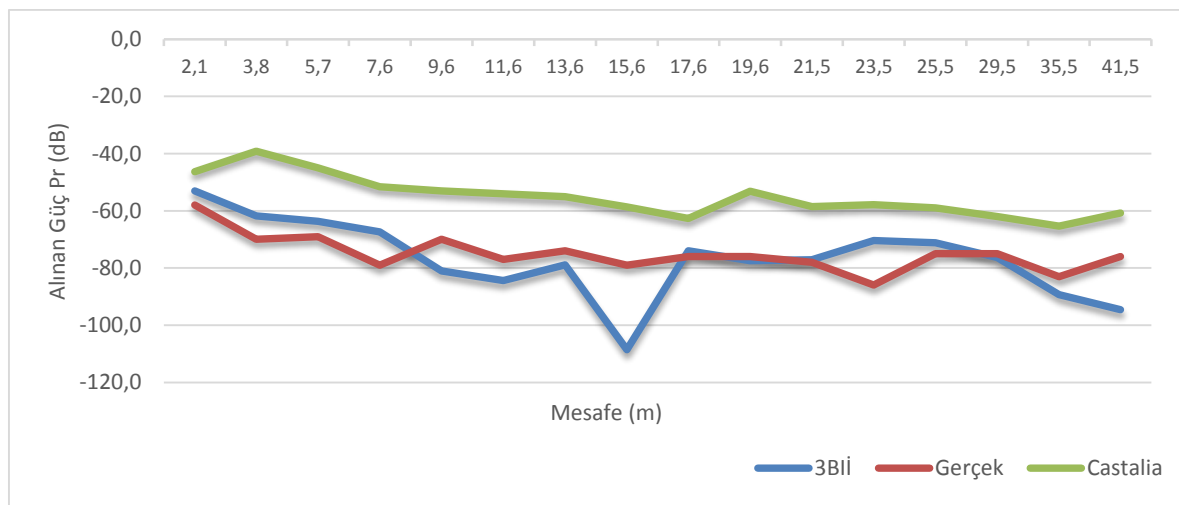
Senaryo 9:

Bu senaryoda alıcı düğümlerin yerden yükseklikleri 200 cm olarak modellenmiştir Alıcı düğümlere ait konum bilgileri Tablo 7.3’ te belirtilmiştir. Bu senaryoya ait genel değerlendirme sonuçları Tablo 7.13’ te gösterilmektedir.

Tablo 7.13. Senaryo 9’ a ait genel sonuçlar

Adı	Vericiye Uzaklık (m)	Kapsama Yarıçapı (m)	Ölçülen Güç (dBm)	Omnet++ Güç (dBm)	3Bİİ Güç (dBm)	3Bİİ Hesaplanan Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
D1_Sol_200	2,1	0,03	-58	-46,35	-53	-0,386	38
D1_Sag_200	3,8	0,0738	-70	-39,22	-61,8	0,1413	143
D2_Sol_200	5,7	0,1227	-69	-45	-63,7	-0,1136	130
D2_Sag_200	7,6	0,1729	-79	-51,55	-67,4	0,0737	107
D3_Sol_200	9,6	0,2237	-70	-53	-81	-0,0155	217
D3_Sag_200	11,6	0,2747	-77	-54	-84,4	0,0105	114
D4_Sol_200	13,6	0,3258	-74	-55,08	-79	-0,0195	237
D4_Sag_200	15,6	0,3771	-79	-58,68	-108,6	0,0006	79
D5_Sol_200	17,6	0,4284	-76	-62,65	-74	-0,0347	241
D5_Sag_200	19,6	0,4797	-76	-53,2	-77,5	0,0232	142
D6_Sol_200	21,5	0,5311	-78	-58,55	-77,1	0,0241	245
D6_Sag_200	23,5	0,5825	-86	-57,9	-70,4	-0,0522	143
D7_Sol_200	25,5	0,6339	-75	-59	-71,1	0,048	207
D8_Sol_200	29,5	0,7368	-75	-62	-76,3	-0,0266	142
D7_Sag_200	35,5	0,8912	-83	-65,36	-89,3	-0,0059	138
D9_Sol_200	41,5	1,0456	-76	-60,76	-94,6	-0,0032	90

Senaryo 9 sonucunda alıcı düğümlerin aldığı güç değerlerinin ortam ölçüm, Castalia ve 3Bİİ programı aracılığı ile karşılaştırması Şekil 7.24’ teki gibidir.



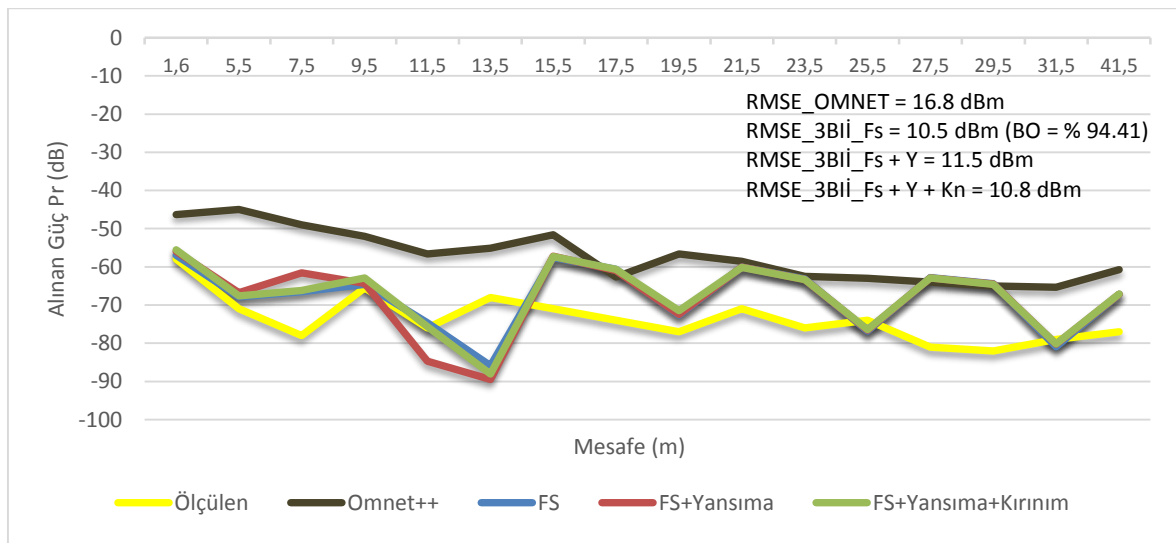
Şekil 7.24. Senaryo 9’ ye ait 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

7.5. Senaryo Değerlendirmeleri

Bütün senaryolar için referans değerler olarak ortamdan ölçülen değerler alınmıştır. OMNET++ Castalia ve 3Bİİ simülasyon aracından elde edilen sonuçların hata oranı RMSE kriterine göre belirlenmiş ve değerlendirmeler buna göre yapılmıştır.

Tablo 7.14. 50 cm senaryoları için ait genel değerlendirme tablosu

Vericiye Uzaklık(m)	Omnet++ (dBm)	Ölçülen (dBm)	3Bİİ						
			Fs	Fs + Yansıma	Fs+Y+K	RMSE Omnet++	RMSE Fs	RMSE Fs+Y	RMSE Fs+Y+K
1,6	-46,35	-58	-57,0	-56,0	-55,5	135,7	1,0	4,0	6,1
5,5	-45,00	-71	-67,9	-66,8	-67,6	676,0	9,8	17,5	11,7
7,5	-49,00	-78	-66,5	-61,6	-66,2	841,0	132,6	270,5	139,7
9,5	-52,00	-65,5	-64,6	-64,3	-62,9	182,3	0,8	1,4	6,9
11,5	-56,60	-76	-74,7	-84,7	-75,7	376,4	1,8	76,4	0,1
13,5	-55,08	-68	-85,9	-89,5	-88,1	166,9	320,7	463,2	403,4
15,5	-51,61	-71	-57,5	-57,2	-57,3	376,0	181,8	189,4	187,5
17,5	-62,65	-74	-60,7	-61,0	-60,6	128,8	178,0	169,6	178,6
19,5	-56,61	-77	-72,7	-72,5	-71,5	415,8	18,8	20,5	30,8
21,5	-58,55	-71	-60,1	-60,0	-60,1	155,0	118,6	120,2	118,4
23,5	-62,50	-76	-63,2	-63,3	-63,4	182,3	164,2	161,3	159,6
25,5	-63,00	-74	-76,9	-76,6	-76,4	121,0	8,2	6,7	5,8
27,5	-64,00	-81	-62,8	-62,9	-62,9	289,0	330,3	328,3	328,1
29,5	-65,00	-82	-64,5	-64,5	-64,6	289,0	307,6	304,6	303,4
31,5	-65,33	-79	-81,0	-80,3	-80,2	186,9	3,8	1,7	1,5
41,5	-60,76	-77	-67,2	-67,2	-67,1	263,7	96,9	96,6	98,0

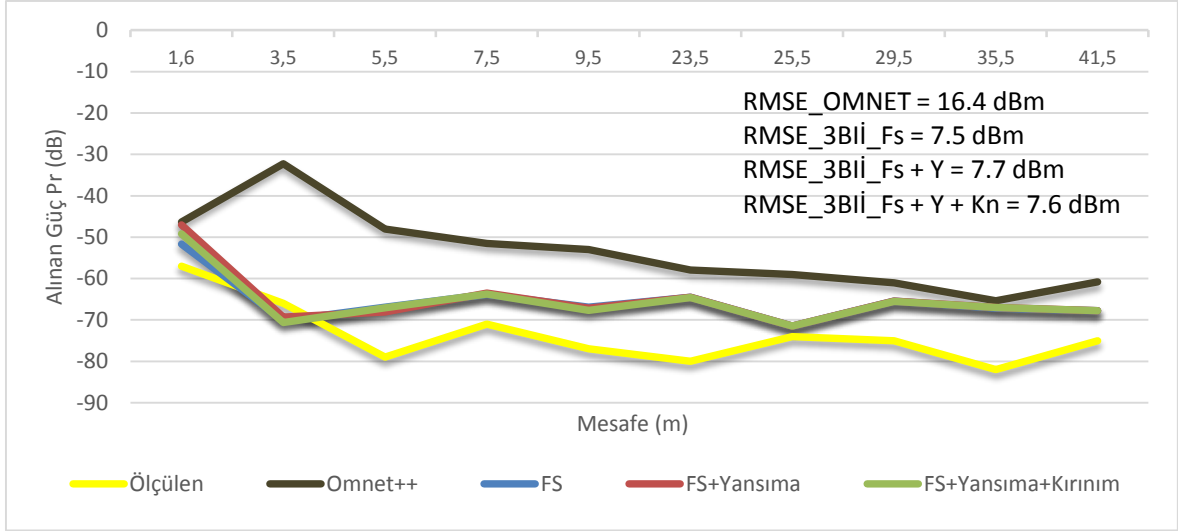


Şekil 7.25. 50 cm senaryoları için ait genel değerlendirme grafiği

Alıcı düğümlerin 50 cm yükseklikte olduğu senaryolar için elde edilen değerlendirme sonuçları Tablo 7.14’ te grafikleri ise Şekil 7.25’ te verilmiştir. Bu senaryolarda; sadece free space hesaplamanın göz önüne alındığı durumlarda 3Bİİ ile elde edilen sonuçların ölçüm değerlerine göre RMSE değerinin 10.5 dBm, OMNET++ sonuçlarının ise 16.8 dBm olduğu görülmüştür. Her ne kadar bu değer yansıma ve kırınım olaylarının dahil edildiği senaryoların RMSE değerlerinden düşük gibi görünse de başarımların %94.11 olduğu dikkate alınmalıdır. Yansıma etkisinin sadece free space senaryolarına dahil edilmesi ile başarımları %100 olmuş ve OMNET++ RMSE değerine göre %31.54 oranında iyileşme sağlanmıştır. Aynı şekilde kırınım olayının da senaryoya dahil edilmesi ile OMNET++ RMSE değerine göre iyileşme % 35.71 olmuştur. Bununla birlikte kırınım olayının dahil edilmesiyle elde edilen iyileştirme değeri, sadece yansıma etkisinin dahil edildiği senaryolardaki RMSE değerine göre % 6.08 artmıştır.

Tablo 7.15. 100 cm senaryoları için ait genel değerlendirme tablosu

Vericiye Uzaklık(m)	Omnet++ (dBm)	Ölçülen (dBm)	3Bİİ						
			Fs	Fs + Yansıma	Fs+Y+K	RMSE Omnet++	RMSE Fs	RMSE Fs+Y	RMSE Fs+Y+K
1,6	-46,35	-57	-51,6	-47,0	-49,2	113,4	28,7	99,4	60,3
3,5	-32,22	-66	-70,1	-69,3	-70,6	1141,1	17,1	11,2	21,2
5,5	-48,00	-79	-66,9	-68,0	-67,1	961,0	146,7	120,3	142,5
7,5	-51,55	-71	-63,8	-63,5	-63,8	378,3	52,0	56,1	52,3
9,5	-53,00	-77	-66,9	-67,1	-67,7	576,0	101,2	97,8	86,6
23,5	-57,90	-80	-64,5	-64,5	-64,6	488,4	238,9	238,9	236,5
25,5	-59,00	-74	-71,5	-71,5	-71,5	225,0	6,5	6,3	6,4
29,5	-61,00	-75	-65,4	-65,4	-65,5	196,0	91,5	91,3	90,3
35,5	-65,36	-82	-67,1	-67,0	-67,0	276,9	221,8	225,0	225,4
41,5	-60,76	-75	-67,8	-67,8	-67,7	202,8	52,3	52,3	52,8

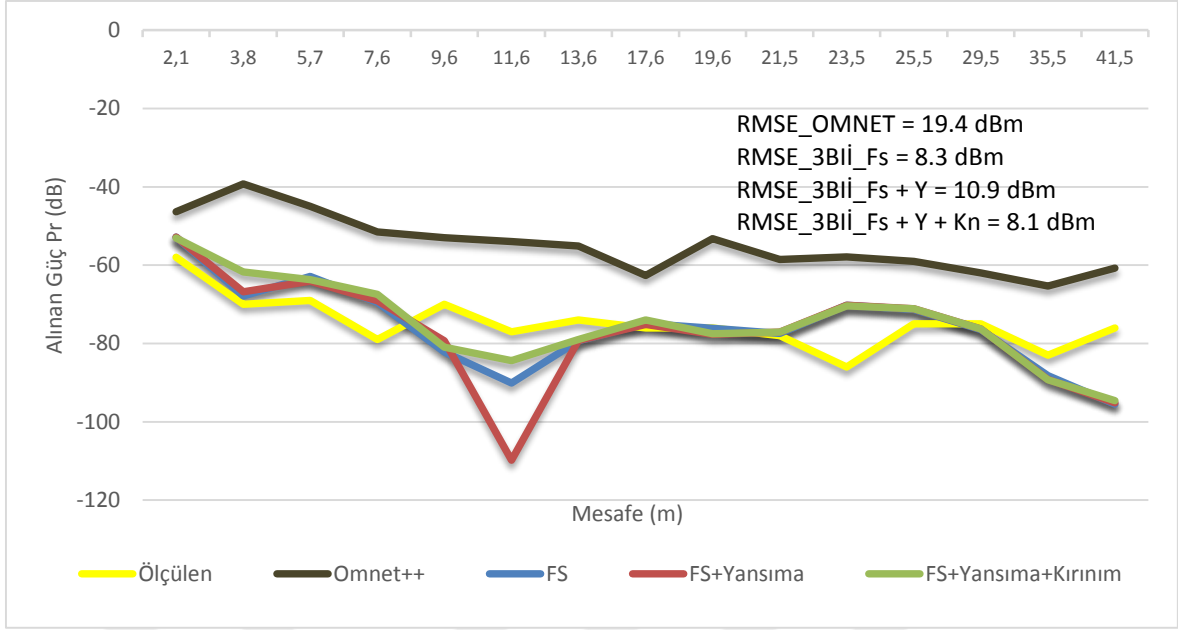


Şekil 7.26. 100 cm senaryoları için ait genel değerlendirme grafiği

Alıcı düğümlerin 100 cm yükseklikte olduğu senaryolar için elde edilen değerlendirme sonuçları Tablo 7.15' te grafikleri ise Şekil 7.26' da verilmiştir. Bu senaryolarda ise free space RMSE değerinin 7.5 dBm, OMNET++ değerinin ise 16.4 dBm olduğu görülmüştür. Benzer şekilde burada dikkate alınması gereken durum, başarımların % 62.5 gibi düşük bir değer olduğudur. Bu nedenle yansıma ve kırınım etkileri ile doğrudan kıyaslanamaz. Yansıma etkisinin dahil edilmesi ile başarımlar %100 olmuş ve OMNET++ RMSE değerine göre % 53.04 oranında iyileşme sağlanmıştır. Aynı şekilde kırınım olayının senaryoya dahil edilmesi ile OMNET++ RMSE değerine göre % 53.65 ve sadece yansıma etkisi RMSE değerine göre % 1.2 'lik bir iyileştirme olduğu görülmüştür.

Tablo 7.16. 200 cm senaryoları için ait genel değerlendirme tablosu

Vericiye Uzaklık(m)	Omnet++ (dBm)	Ölçülen (dBm)	3Bİİ						
			Fs	Fs + Yansıma	Fs+Y+K	RMSE Omnet++	RMSE Fs	RMSE Fs+Y	RMSE Fs+Y+K
2,1	-46,35	-58	-52,8	-52,8	-53,0	135,7	26,6	26,7	24,6
3,8	-39,22	-70	-67,8	-66,8	-61,8	947,4	4,6	10,0	67,8
5,7	-45,00	-69	-62,9	-64,1	-63,7	576,0	37,6	24,3	28,5
7,6	-51,55	-79	-69,5	-69,1	-67,4	753,5	90,7	98,5	134,1
9,6	-53,00	-70	-82,2	-79,3	-81,0	289,0	148,5	87,3	120,5
11,6	-54,00	-77	-90,1	-109,8	-84,4	529,0	171,0	1077,1	54,6
13,6	-55,08	-74	-79,3	-79,2	-79,0	358,0	28,5	26,9	24,6
17,6	-62,65	-76	-74,9	-75,1	-74,0	178,2	1,2	0,8	4,1
19,6	-53,20	-76	-76,1	-77,7	-77,5	519,8	0,0	2,8	2,2
21,5	-58,55	-78	-77,4	-77,1	-77,1	378,3	0,3	0,8	0,7
23,5	-57,90	-86	-70,3	-70,2	-70,4	789,6	248,1	248,4	242,6
25,5	-59,00	-75	-71,3	-71,1	-71,1	256,0	14,0	15,2	14,9
29,5	-62,00	-75	-76,5	-76,3	-76,3	169,0	2,1	1,7	1,7
35,5	-65,36	-83	-88,2	-89,2	-89,3	311,2	27,3	38,7	39,5
41,5	-60,76	-76	-95,5	-95,2	-94,6	232,3	378,6	367,3	344,9



Şekil 7.27. 200 cm senaryoları için ait genel değerlendirme grafiği

Alıcı düğümlerin 200 cm yükseklikte olduğu senaryolar için elde edilen değerlendirme sonuçları Tablo 7.16’ te grafikleri ise Şekil 7.27’ de verilmiştir. Bu senaryolarda; free space RMSE değerinin 8.3 dBm, OMNET++ değerinin ise 19.4 dBm olduğu görülmüştür. Bu durumdaki başarımların değeri ise % 93.75 ‘tir. Yansıma etkisinin dahil edilmesi ile başarımlar %100 olmuş ve OMNET++ RMSE değerine göre % 43.81 oranında iyileşme sağlanmıştır. Aynı şekilde kırınım olayının senaryoya dahil edilmesi ile OMNET++ RMSE değerine göre % 58.24 ve sadece yansıma etkisi RMSE değerine göre % 25.6 ‘lık bir iyileştirme olduğu görülmüştür.

8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında tünel, galeri v.b kapalı ortamlardaki EM dalgaların yayılımlarını incelemek için ışın izleme tekniklerine dayanan ve 3BIİ ismi verilen bir simülasyon yazılımının gerçekleştirme ve test süreci açıklanmıştır. Gerçekleştirilen 3BIİ simülasyon yazılım aracında, ilk olarak incelenecek ortamın ve içindeki nesnelerin 3 boyutlu modellenmesi yapılır. Sonra alıcı ve gönderici kablosuz düğümler istenilen koordinatlara yerleştirilir. Verici düğümden gönderilen ışınlar doğrudan veya ortamdaki nesneler ve kenarlardan dolayı yansıma, kırılma ve kırınımına uğrayarak alıcı düğümlere ulaşır. Alıcı düğümlerde, alınan tüm ışınlardan elde edilen elektrik alan şiddeti hesaplanır. Dolayısıyla tahmini zayıflama hesaplanmış olur.

Ortamın 3 boyutlu modellenmesi sürecinde, duvarların, nesnelerin kalınlıkları, dielektrik özellikleri dikkate alınmaktadır. EM dalgaların yayılma sürecinde, üç temel etki olarak; yol kaybı, gölgeleme ve çok yolluluk esas alınmıştır. Göndericiden yayılan EM dalgalarının yayılması sürecini modellemek için ışın izleme teknikleri kullanılmıştır. Işının yansıma ve kırılma olaylarının geometrik hesaplanmasında Snell yasası, kırınımın geometrik açıklanması için keller konisi yöntemi kullanılmıştır. Yansıma ve kırılmadan dolayı oluşacak EM zayıflamalar için Fresnel yasası, kırınımdan kaynaklanan zayıflamalar için de UTD yöntemi ve Fresnel yasası kullanılmıştır.

3BIİ programı ile aynı ışın sayısı ve aynı tür kapsama yarıçapında sadece free space, free space ve yansıma, free space, yansıma ve kırınım olaylarının dahil edildiği senaryolar denenmiştir. Gerçekleştirilen bu senaryolarda hesaplamaya dahil edilen olaylarla ilgili maksimum değerler sabit tutulmuştur. Bu sayede bu olayların hesaplamalardaki etkileri incelenmiştir. Bu sonuçlara göre, sadece free space etkisinin dikkate alınması durumunda, başarımlı oranı (BO) değerinin düşük çıkmasına neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle sadece free space senaryoların karşılaştırma açısından yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte free space senaryolarına yansıma etkilerinin hesaba katılması durumunda, geliştirilen 3BIİ simülatör sonuçlarının OMNET ++ Castalia simülatör yazılımının sonuçlarına göre ortalama % 42.79 oranında daha iyi yaklaşım sağladığı görülmüştür. Yansıma ve free space etkilerine ek olarak kırınım olayının da hesaba katılması ile bu iyileşme %49.2 'ye çıkmıştır. Bu şekilde kırınım etkisinin sadece yansıma sonuçlarına göre ortalama %10.96'lık olumlu bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.

3Bİİ yazılım aracının doğruluğunu göstermek için; Fırat Üniversitesi Tıp Fakültesi yeraltı galerileri ortamlarında, simülasyonda kullanılan senaryolar için ölçümler alınmıştır. Ayrıca Omnet++ simülatörünün Castalia frameworkunda ilgili galeri ortamı modellenmiş ve yazılan bir uygulama ile benzer senaryolar simüle edilmiştir. 3Bİİ, Castalia ve ortam ölçüm sonuçları karşılaştırılarak analiz edilmiş ve 3Bİİ simülasyon yazılımının gerçeğe yakın sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

Simülasyon senaryolarının çalıştırılması sonucunda elde edilen tespitler aşağıdadır;

1 - Gönderici düğümden yayılan ışınların belirli açılarla çıkmasından dolayı, kapsama yarıçapları aynı olan alıcı düğümler kaynaktan uzaklaştıkça daha az ışın tarafından kesilmektedir. Bu durumda yanlış sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu problemin düzeltilmesi amacıyla alıcı düğümlerin yarıçapları, kaynak düğüme olan mesafelerine göre arttırılmıştır. Bu problem üzerinde çalışılmayı gerektiren konulardan birisi olarak durmaktadır.

2 - Kaynaktan yayılan ışın sayısına bağlı olarak, bilgisayar hesaplama süresi de artmaktadır. Bunun için çözümlerden birincisi kaynaktan çıkacak ışın sayısını optimize etmektir. İkinci çözüm ise simülasyon programındaki hesaplama algoritmalarının iyileştirilmesi veya programın multithread yapıda geliştirilmesi olabilir. Ayrıca GPU kullanılarak hesaplama zamanı azaltılabilir.

3 - Ortamı 3 boyutlu modelle sürecinde; ortamdaki nesneleri gerek elektriksel ve manyetik özelliklerinin gerekse ortamın iklimatik şartlarının daha ayrıntılı bir şekilde hesaba katılmasının daha doğru sonuçların elde edilmesindeki rolü araştırılabilir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında EM dalgaların yayılımı gibi benzetiminin oldukça zor olduğu bir konuda, literatürde yer alan 3 boyutlu ışın izleme tekniğini temel alan bir simülasyon yazılımı geliştirilmiş olup tatminkar sonuçlar elde edilmiştir. Bu amaçla hazırlanan yazılım kütüphanesi ile gelecekte çok daha gelişmiş bir simülatör programının alt yapısı oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Wölfle, G., Wahl, R., Wertz, P., Wildbolz P. and Landstorfer, F.**, 2005. Dominant Path Prediction Model for Indoor Scenarios, German Microwave Conference, April 2005, 176-179.
- [2] **El-Kafrawy, K., Youssef, M., El-Keyi, A. and Naguib, A.**, 2010. Propagation Modeling for Accurate Indoor WLAN RSS-Based Localization, Vehicular Technology Conference Fall, October 2010, doi: 10.1109/VETECF.2010.5594108
- [3] **Stepanov, I., Herrscher, D. and Rothermel, K.**, 2005. On the Impact of Radio Propagation Models on MANET Simulation Results, Institute of Parallel and Distributed Systems, Stuttgart University, Germany.
- [4] **Mohtashami, V. and Shishegar, A.A.**, 2012. Modified Wavefront Secomposition Method for Fast and Accurate Ray-tracing Simulation, IET Microwaves, Antennas & Propagation, 16 April 2012, 295-304, doi: 10.1049/iet-map.2011.0264
- [5] **Bernardi, P., Cicchetti, R. and Tesla, T.**, 2004. An accurate UTD model for the analysis of complex indoor radio environments in microwave WLAN systems, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 7 June 2004, 1509-1520, doi: 10.1109/TAP.2004.830260
- [6] **Uzun, K.**, 2006. Kablosuz İletişim Sistemleri Bina İçi Yayılımında Engellerin Etkilerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [7] **Özdil, Ö.**, 2009. Telsiz Verici Yerelleştirme Teknikleri için NLOS/LOS Sınıflandırma Algoritmalarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [8] **Yıldırım, E.E.**, 2015. Dağlık Arazide Işın Bazlı Yöntemlere Dayanan Yayılım Modelleri, *Yüksek Lisans Tezi*, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [9] **Kaplan, N.**, 2010. Tünellerde Radyo Dalgası Yayılımı Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [10] **Remley, C.A.**, 1999. Time Domain Modeling of Electromagnetic Radiation with Application to Ultrafast Electronic and Wireless Communication Systems, *PhD Thesis*, Oregon State University.
- [11] **Askarzadeh, F.**, 2017. Diffraction Analysis with UWB Validation for ToA Ranging in the Proximity of Human Body and Metallic Objects, *PhD Thesis*, Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts.
- [12] **Hussain, S.**, 2017. Efficient Ray-Tracing Algorithms for RadioWave Propagation in Urban Environments, *PhD Thesis*, Dublin City University, Dublin, Ireland.

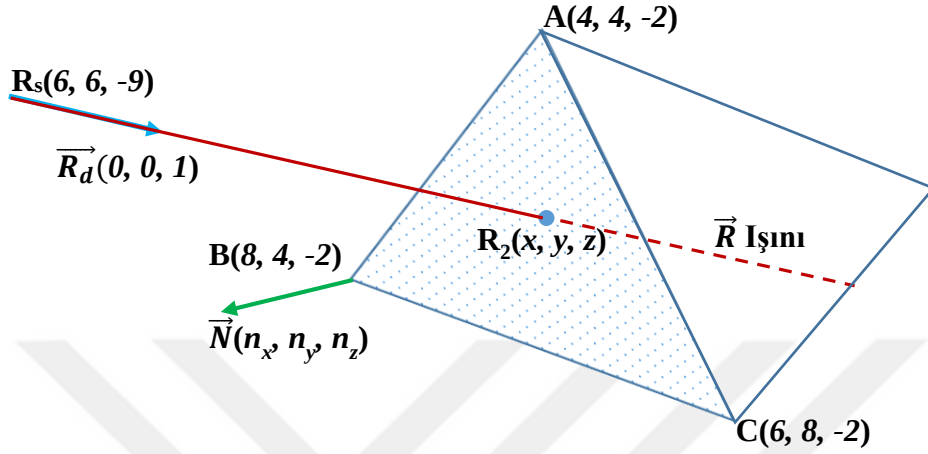
- [13] **Hammad, K.A.**, 2016. Radio Resource Management Optimization For Next Generation Wireless Networks, *PhD Thesis*, The University of Western Ontario, Canada.
- [14] **Downey, M.**, 2007. The Rapid Deployment of Wireless Networks in an Industrial Environment, *PhD Thesis*, Swinburne University of Technology, Hawthorn Victoria Australia.
- [15] **Heras, L.A.F**, 2015. Characterization of Wireless Propagation in Complex Indoor Environments, *PhD Thesis*, Institute of Smart Cities, Pamplona, Spain .
- [16] https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik_radyasyon, Elektromanyetik Radyasyon, 3 Mayıs 2017.
- [17] **Huang, Y. and Boyle, K.**, 2008. Antennas From Theory To Practice, Wiley, Liverpool University, UK.
- [18] **Yılmaz, A.**, <http://www.fizik.net.tr/site/elektromanyetik-dalgalar/>, Elektromanyetik Dalgalar, 3 Mayıs 2017.
- [19] http://www.fzk.yildiz.edu.tr/images/files/OPTIK_CALISMA%20KITABI.pdf, Fizik Lab. 3 (Optik) Çalışma Notları, 1 Haziran 2017.
- [20] http://www.bayar.edu.tr/besergil/1_emi_ozellikler.pdf, Elektromagnetik Işının Özellikleri, 3 Haziran 2017.
- [21] [https://tr.wikipedia.org/wiki/Geçirgenlik_\(elektromanyetizma\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Geçirgenlik_(elektromanyetizma)), Elektromanyetik Geçirgenlik, 3 Mayıs 2017.
- [22] **Griffiths, D.J.**, 1999. Introduction to Electrodynamics, Prentice Hall, New Jersey.
- [23] **Cheng, D.K.**, 1983. Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley, California.
- [24] **Ghasemi, A., Abedi, A. and Ghasemi F.**, 2012. Propagation Engineering in Wireless Commutation, Springer, Berlin.
- [25] **Seybold, J.S.**, 2005. Introduction to RF Propagation, Wiley-Interscience, New Jersey.
- [26] <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~tatar/fiz217/doc/F%C4%B0Z217%20bolum7c.pdf>, Elektromanyetik Dalgalar, 3 Haziran 2017.
- [27] **William, H.H. and John, A.B.**, 2012. Engineering Electromagnetics. Eighth Edition, New York.
- [28] **Zaballos, A., Corral, G., Carne, A., Pijoan J.L.**, Modeling new indoor and outdoor propagation models for WLAN, On line Available at: www.salle.url.edu/zaballos/opnet/OPNET2004b.pdf, 2004
- [29] **Gomes H.S, Fraiha S., Castro B., Cavalcante G.**, Implementation of a New Propagation Model for 5.8GHz systems in OPNET Simulator, 7th. EuCAP Conference, 2013
- [30] **Prokkola J., Braysy T., Vann T.**, On the effect of radio channel propagation models to the ad hoc network performance, Military Communications Conference, 2005

- [31] **Guo Z.**, Implementation Of Wireless Channel Propagation Models In OPNET, Master Thesis, Mid Sweden University, 2013
- [32] **Luo, M.**, 2013. Indoor radio propagation modeling for system performance prediction, , PhD Thesis, INSA de Lyon.
- [33] https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-013-electromagnetics-and-applications-spring-2009/readings/MIT6_013S09_chap11.pdf, Common Antennas and Applications, 19 Mayıs 2017.
- [34] **Saunders, S.R.**, 1991. Diffraction Modelling of Mobile Radio Wave Propagation in Built-up Areas, *PhD Thesis*, Brunel University, Uxbridge.
- [35] **Goldsmith, A.**, 2004. Wireless Communications, Stanford University, California.
- [36] **Barsocchi, P.**, 2006. Channel Models for Terrestrial Wireless Communications: a Survey, Alen Istitute for Artifical Intelligence.
- [37] **Yun, Z. and Iskander, M.F.**, 2015. Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications, IEEE Access, Vol. 3, Pages:1089-1100, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2453991
- [38] **Neskovic, A., Neskovic, N. and Paunovic, G.**, 2000. Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 3, Issue. 3, Pages: 2 – 12, doi: 10.1109/COMST.2000.5340727
- [39] <https://www.cs.utah.edu/~shirley/books/fcg2/rt.pdf>, Ray Tracing, 13 Haziran 2017.
- [40] **Stehlik M.**, 2011. Comparison of Simulators for Wireless Sensor Networks, Master Thesis, Masaryk University, Faculty of Informatics.
- [41] **Brain, C.**, 2004. Ray-Triangle Intersection, https://courses.cs.washington.edu/courses/cse457/05au/lectures/triangle_intersection.pdf, 12 Haziran 2017.
- [42] **Çakır, Ö.**, 2004. Yerel Ağdaki Kişisel Bilgisayarlarla Paralel Işın İzleme, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [43] **Başgümüş, A.**, 2016. Fresnel Yansıma Tabanlı Fiber Optik Sensör Sistemi Tasarımı ve Röle Destekli Serbest Uzay Optik Haberleşme Sistem ile İletim Optimizasyonu, *Doktora Tezi*, Uludağ Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [44] **Casciato, M.D.**, 2001. RadioWave Diffraction and Scattering Models For Wireless Channel Simulation, PhD Thesis, Michigan University.
- [45] **Santos, H.J.D.L., Sturm, C. and Ponte, J.**, 2014. Radio System Engineering:A Tutorial Approach, Springer, Heidelberg.

- [46] **Tsingos, N., Funkhouser, T., Ngan, A., and Carlbom I.**, 2001. Modeling Acoustics in Virtual Environments Using the Uniform Theory of Diffraction, Princeton University, doi: 10.1145/383259.383323
- [47] **Kapralos, B., Jenkin, M. and Milios, E.**, 2005. Acoustical Diffraction Modeling Utilizing The Huygens-Fresnel Principle, *IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications Ottawa, Ontario, Canada, 1–2 October*, doi: 10.1109/HAVE.2005.1545649
- [48] **Durgin, G.D.**, 2009. The Practical Behavior of Various Edge-Diffraction Formulas, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 51, Issue.3, 18 September, doi: 10.1109/MAP.2009.5251189
- [49] <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~tatar/fiz217/doc/F%C4%B0Z217%20bolum8c.pdf>, Huygen İlkesi ve Kırınım, 3 Haziran 2017.
- [50] **Kaplan, T.**, 2011. Lineer Denklem Sistemleri ve Uygulama Alanları, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Ü. Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [51] **Gündüzalp, E., Yıldırım, G. and Tatar, Y.**, 2015. Determination of General Parameters of WSNs Designed for 3-D Closed Environmets, *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, Vol. 3, doi: 10.17694/bajece.64249
- [52] **Arı, N., Özen, Ş.** 2008. Elektromanyetik Alanlar, Palme Yayınevi, Ankara.
- [53] https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-7-200102-S!!PDF-E.pdf, Propagation by diffraction, 3 Mayıs 2018.
- [54] **Yaman, E.**, 2011. Hastane Ortamında Elektromanyetik Alan Etkilerinin Ölçüm Yoluyla Belirlenmesi Ve Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [55] **Özgün, Ö.**, 2016. Binalar Arası Elektromanyetik Dalga Yayılımının Nümerik Modellenmesi, *EMO Bilimsel Dergi*, Cilt 6, Sayı 11, Haziran 2016
- [56] **Esposti, V.D., Fuschini, F. and Vitucci, E.M.**, 2014. Ray-Tracing-Based mm-Wave Beamforming Assessment, *IEEE Access The Journal for Rapid Open Access Publishing*, 31 October 2014, doi: 10.1109/ACCESS.2014.2365991

EKLER

EK 1. Işın-Üçgen Kesişim Örneği



Ek Şekil 1.1 Işın yüzey kesişimi

Ek Şekil 1.1’ deki gibi başlangıç noktası $R_s(6, 6, -9)$, yön vektörü $R_d(0, 0, 1)$ olan R ışınının köşe koordinatları A(4, 4, -2), B(8, 4, -2), C(6, 8, -2) olan ABC üçgenini kesip kesmeyeceğini kontrol edelim. Öncelikle BC ve BA vektörleri hesaplanır.

$$\vec{BC} = \vec{B} - \vec{C} \quad (E.1a)$$

$$\vec{BA} = \vec{B} - \vec{A} \quad (E.1b)$$

Eşitlik E.1’ deki vektörlerin 3 boyutlu koordinat değerleri yerine yazılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$x_{BC} = (8 - 6) = 2 \quad (E.2a)$$

$$y_{BC} = (4 - 8) = -4 \quad (E.2b)$$

$$z_{BC} = (2 - (-2)) = 0 \quad (E.2c)$$

$$x_{BA} = (8 - 4) = 4 \quad (E.2d)$$

$$y_{BA} = (4 - 4) = 0 \quad (E.2e)$$

$$z_{BA} = (2 - (-2)) = 0 \quad (\text{E.2f})$$

Daha sonra Eşitlik E.3' teki gibi üçgenin normal vektörünün n'_x , n'_y , n'_z değerleri bulunur.

$$n'_x = (y_{BC} * z_{BA}) - (z_{BC} * y_{BA}) \quad (\text{E.3a})$$

$$n'_y = (z_{BC} * x_{BA}) - (x_{BC} * y_{BA}) \quad (\text{E.3b})$$

$$n'_z = (y_{BC} * x_{BA}) - (x_{BC} * y_{BA}) \quad (\text{E.3c})$$

Değerleri yerine koyarsak;

$$n'_x = (-4 * 0) - (0 * 0) = 0 \quad (\text{E.4a})$$

$$n'_y = (0 * 4) - (2 * 0) = 0 \quad (\text{E.4b})$$

$$n'_z = (-4 * 4) - (2 * 0) = -16 \quad (\text{E.4c})$$

değerleri elde edilir. Eşitlik E.5' teki gibi N vektörü normalize edilir.

$$n_x = \frac{n'_x}{\sqrt{n'^2_x + n'^2_y + n'^2_z}} \quad (\text{E.5a})$$

$$n_y = \frac{n'_y}{\sqrt{n'^2_x + n'^2_y + n'^2_z}} \quad (\text{E.5b})$$

$$n_z = \frac{n'_z}{\sqrt{n'^2_x + n'^2_y + n'^2_z}} \quad (\text{E.5c})$$

Eşitlik E.5' teki değerler yerine koyulursa;

$$n_x = 0, \quad n_y = 0, \quad n_z = -1 \quad (\text{E.6})$$

değerleri elde edilir. Eşitlik E.7' deki gibi ışının yön vektörü ile üçgenin yüzey normalinin skaler çarpımı hesaplanır.

$$\vec{N} \cdot \vec{R}_d = (n_x * x_d + n_y * y_d + n_z * z_d) \quad (\text{E.7})$$

Eşitlik E.7' deki değerler yerine koyulursa;

$$\vec{N} \cdot \vec{R_d} = (0 * 0 + 0 * 0 + (-1) * (1)) = -1 \quad (\text{E.8})$$

Sonuç -1 çıkar ve bu da sıfırdan küçük olma şartını sağladığından bir sonraki adıma geçilir.

$$t = \frac{x_d n_x + y_d n_y + z_d n_z - (x_s n_x + y_s n_y + z_s n_z)}{x_d n_x + y_d n_y + z_d n_z} \quad (\text{E.9})$$

Eşitlikte E.9'da değerler yerine koyulursa;

$$t = \frac{(4*0+4*0+(-2)*(-1))-(6*0+6*0+(-9)*(-1))}{(0*0+0*0+(-1)*(1))} = 7 \quad (\text{E.10})$$

t değeri bulunur. Bu değer sıfırdan büyük olma şartını sağladığından bir sonraki adıma geçilir.

$$x = x_s + t x_d \quad (\text{E.11a})$$

$$y = y_s + t y_d \quad (\text{E.11b})$$

$$z = z_s + t y_d \quad (\text{E.11c})$$

Eşitlik E.11' deki değerler yerine koyulursa;

$$x = 6 + (7 * 0) = 6 \quad (\text{E.12a})$$

$$y = 6 + (7 * 0) = 6 \quad (\text{E.12b})$$

$$z = -9 + (7 * 1) = -2 \quad (\text{E.12c})$$

değerleri elde edilir. Bundan sonraki aşama bulduğumuz bu değerlerin üçgen üzerine düşüp düşmediğinin kontrolüdür. Öncelikle Heron yöntemine göre üçgenin toplam alanı bulunur.

$$u = \frac{|AB|+|BC|+|CA|}{2} \quad (\text{E.13})$$

denklemde yerine koyulursa;

$$u = \frac{4+4,47+6,47}{2} = 6,47 \quad (\text{E.14})$$

değeri elde edilir.

$$\text{Alan}(ABC) = \sqrt{u(u-a)(u-b)(u-c)} \quad (\text{E.15})$$

Eşitlik E.15’ deki değerler yerine koyulursa;

$$\text{Alan}(ABC) = \sqrt{6,47(6,47-4)(6,47-4,47)(6,47-4,47)} = 8 \quad (\text{E.16})$$

Eşitlik E.16’ daki sonuç elde edilir. Bulduğumuz $R_2(x,y,z)$ noktasının üçgeni ayırdığı üç alanın da benzer şekilde alanlarını bulacak olursak R_2AB , R_2AC ve R_2BC üçgenlerinin alan hesaplamaları aşağıdaki gibi olur.

R_2AB üçgeni için;

$$u_{S1} = \frac{|AB|+|R_2A|+|R_2B|}{2} \quad (\text{E.17})$$

Eşitlik E.17’ deki değerler yerine koyulursa;

$$u_{S1} = \frac{4+2,82+2,82}{2} = 4,82 \quad (\text{E.18})$$

Eşitlik E.18’ deki sonuç elde edilir. Bu değerleri Heron alan formülünde yerine yerleştirirsek;

$$\text{Alan}(R_2AB) = S1 = \sqrt{4,82(4,82-4)(4,82-2,82)(4,82-2,82)} = 4 \quad (\text{E.19})$$

Eşitlik E.19’ deki sonuç elde edilir. R_2AC üçgeni için;

$$u_{S2} = \frac{|AC|+|R_2A|+|R_2C|}{2} \quad (\text{E.20})$$

Eşitlik E.20' deki değerler yerine koyulursa;

$$u_{S2} = \frac{4,47+2,82+2}{2} = 4,65 \quad (E.21)$$

Eşitlik E.21' deki sonuç elde edilir. Bu değerleri alan formülünde yerine yerleştirirsek;

$$Alan(R_2AC) = S2 = \sqrt{4,65(4,65 - 4,47)(4,65 - 2,82)(4,65 - 2)} = 2 \quad (E.22)$$

Eşitlik E.22' deki sonuç elde edilir. R₂BC üçgeni için;

$$u_{S3} = \frac{|BC|+|R_2B|+|R_2C|}{2} \quad (E.23)$$

Eşitlik E.23' deki değerler yerine koyulursa;

$$u_{S3} = \frac{4,47+2,82+2}{2} = 4,65 \quad (E.24)$$

Eşitlik E.24' teki sonuç elde edilir. Bu değerleri yine benzer şekilde alan formülünde yerine yerleştirirsek;

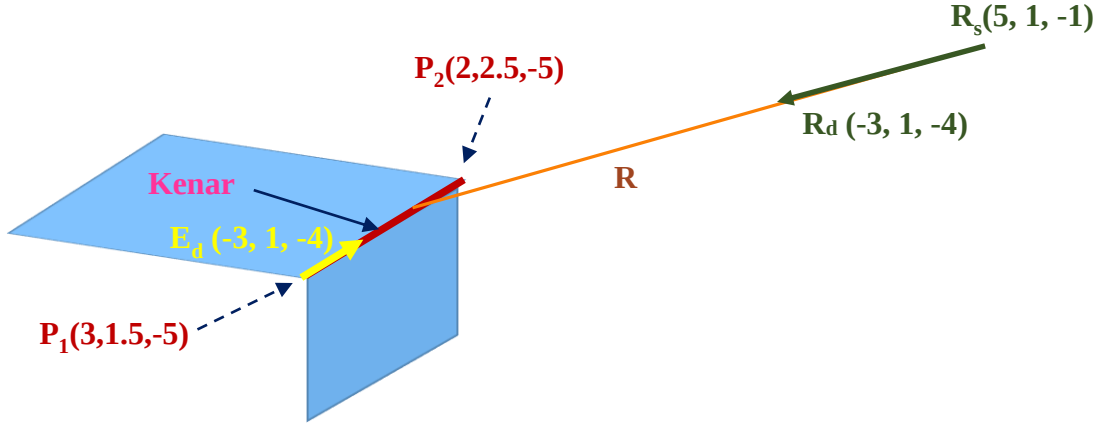
$$Alan(R_2AC) = S3 = \sqrt{4,65(4,65 - 4,47)(4,65 - 2,82)(4,65 - 2)} = 2 \quad (E.25)$$

Eşitlik E.25' teki sonuç elde edilir. En son aşama ise bulunan S1, S2, S3 alanlarının toplamının ABC üçgeninin toplam alanına eşit olup olmadığıdır. Bu alanların toplamı Eşitlik E.26' daki gibi toplanırsa;

$$S1 + S2 + S3 = 4 + 2 + 2 = 8 \quad (E.26)$$

değeri elde edilir. Bu değer ABC üçgeninin alanına eşit olduğundan R ışınının ABC üçgeni ile kesiştiği kabul edilir.

EK 2. Işın-Kenar Kesişim Örneği



Ek Şekil 2.1 Işın kenar kesişimi

Ek Şekil 2.1’ deki gibi başlangıç noktası $R_s(5, 1, -1)$ ve yönü $R_d(-3, 1, -4)$ olan R ışınının başlangıç noktası $P_1(3, 1.5, -5)$ ve bitiş noktası $P_2(2, 2.5, -5)$ olan kenarı kesip kesmeyeceğini hesaplayalım.

Öncelikle Eşitlik E.27’ deki gibi kenarın son noktasından ilk noktası çıkartılarak kenarın yön vektörü bulunur.

$$\vec{E_d} = \vec{P_2} - \vec{P_1} \quad (E.27)$$

Eşitlik E.27’ deki değerler her bir koordinat değeri için yerine yazıldığında kenarın yön vektörünün (E_d) koordinatları; $x_e = -1$, $y_e = 1$ ve $z_e = 0$ olarak bulunur. Bundan sonraki adım t değerini bulmaktır.

$$t = \frac{((-2)*(-1)) - (1)(0.5)}{(-3)*(-1) - (1*1)} = 0.75 \quad (E.28)$$

Eşitlik E.9’ daki gibi benzer şekilde değerler yerine koyulduğunda Eşitlik E.28’deki sonuç elde edilir. Örneğimizdeki koordinat değerleri ve bulunan t değeri Eşitlik 5.1’ deki gibi ışın denkleminde yerine yazılırsa;

$$x = 5 + 0.75 * (-3) = 2,75 \quad (E.29a)$$

$$y = 1 + 0.75 * 1 = 1,75 \quad (E.29b)$$

$$z = -1 + 0.75 * (-4) = -5 \quad (E.29c)$$

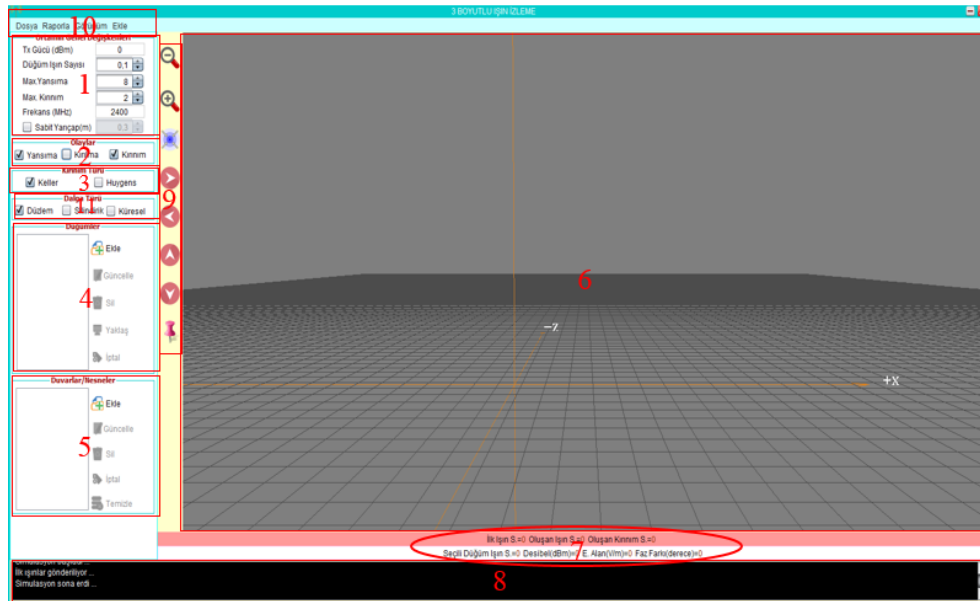
Eşitlik E.29’ daki değerler elde edilir. Bundan sonraki aşama bulunan bu koordinat noktasının kenarın üzerinde olup olmadığıdır. Kenarın başlangıç (P₁) ve bitiş noktaları(P₂) bilindiğinden bulunan bu x, y, z değerlerinin bu noktalar arasında olduğu anlaşılır.

EK 3. 3Bİİ Program Arayüzü

Geliştirilen 3Bİİ programı 11 adet panelden oluşmaktadır. Bunlar:

1. Ortam Genel Değişkenleri
2. Olaylar
3. Kırınım Türü
4. Düşümler
5. Duvarlar/Nesneler
6. 3B Ortamı
7. Bilgilendirme
8. Çıktı
9. Gezinti
10. Menü
11. Dalga Türü

panelleridir. Bu panellere ilişkin ekran görüntüsü Ek Şekil 3.1’ deki gibidir.



Ek Şekil 3.1. 3Bİİ program arayüzü

Bu panellerin hangi amaçla kullanıldığı aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

EK 3.1. Ortam Genel Değişkenleri Paneli

Bu panelde simülasyon senaryosunun genel değişkenleri seçilir. Bu değerler şunlardır:

- Tx (Transmisyon) gücü (dBm)
- Verici düğüm/düğümleden gönderilecek ışın sayısı
- Maksimum yansıma sayısı
- Maksimum kırınım sayısı
- Sinyal frekansı (Mhz)
- Düğüm kapsama yarıçapı

Bu panele ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.2' deki gibidir.



Ek Şekil 3.2. Ortam genel değişkenleri paneli

Bu parametreler kısaca şu şekilde açıklanabilir.

Tx Gücü: Gönderici düğüm/düğümleden gönderilecek ışınların dBm cinsinden başlangıçtaki transmisyon gücüdür. İlk çıkan bütün ışınlar bu değer set edilir.

Işın Sayısı: Gönderici düğüm/düğümleden gönderilecek ışın sayısı bu parametreye göre belirlenir. 0.01 - 1.0 arasında seçilen bu değer ışın sayısı ile ters orantılıdır. Seçilen değere göre çıkacak ışınların açıları da değişir.

Maksimum Yansıma: Simülasyonu sona erdirecek şartlardan biridir. Her yansıma olayı sonucu bir artan bu özellik seçilen sınır şartına ulaşınca o ışın için hesaplama sona erer ve artık ilgili ışıdan yeni ışın üretilmez.

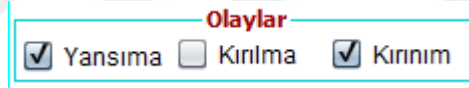
Maksimum Kırınım: Her ışının maksimum kaç kırınıma uğrayacağını belirleyen değerdir. Işın belirlenen değer kadar kırınıma uğradıktan sonra artık yeni ışın üretilmez ve hesaplama sona erer. Bütün ışınların maksimum yansıma, kırılmaya veya kırınıma uğraması sonucu simülasyon sona erer.

Frekans: RF dalganın frekansıdır. EM hesaplamalarda frekans bir parametre olduğu için farklı frekanslara göre farklı senaryolar gerçekleştirilebilir.

Kapsama Yarıçapı: Alıcı düğümlerin kasama yarıçapını belirleyen özelliktir. Düğümler bir küre şeklinde modellendiğinden kapsama yarıçapının büyük olması alınan ışın sayısını arttıracaktır. Kapsama yarıçapının sabit olarak seçilmesi bütün düğümlerin aynı yarıçapa sahip olacağını ifade eder. Değişken yarıçap seçildiğinde ise program, alıcı düğümlerin verici düğüme olan uzaklığına göre bir hesaplama yapar. Bu hesaplamayı gerçekleştirirken verici düğüm önce kendine en yakın ve en uzak alıcı düğümlerin konumlarından bir doğru denklemi üretir. Daha sonra her alıcı düğümün konumu bu denklemde yerine koyularak her düğüm için ayrı bir yarıçap hesaplanır.

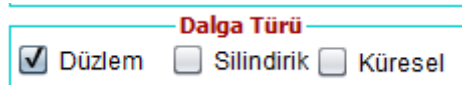
EK 3.2. Olaylar ve Dalga Türü Paneli

Simülasyon esnasında hesaplamaya katılacak olaylar bu panelden seçilir. Yansıma, kırılma ve kırınım olayları seçilerek simülasyon istenildiği gibi çalıştırılabilir. Bu panele ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.3a’ daki gibidir.



Ek Şekil 3.3a. Olaylar paneli

Yansıma olayının seçilmemesi durumunda kırılma ve kırınım olayları da gerçekleşmeyeceğinden sadece free space hesaplama gerçekleşir.



Ek Şekil 3.3b. Dalga türü paneli

Ek Şekil 3.3b’ de ekran görüntüsü verilen Dalga türü paneli ise Bölüm 5.3.5’ te anlatılan dalga cephesi türünün seçilebileceği paneldir. Seçilen dalga türü cephesine göre kırınım hesaplamaları da değişecektir.

EK 3.3. Kırınım Türü Paneli

Kırınım olayı sonucu ışınların nasıl bir dağılım göstereceğinin belirlendiği paneldir. Bu panele ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.4’ teki gibidir.



Ek Şekil 3.4. Kırınım türü paneli

Kırınım olayında ışınlar varsayılan olarak Keller Konisi şeklinde bir dağılım gösterir. Kırınım noktasının yeni bir ışın kaynağı gibi davranış göstereceği Knife-Edge diffraction modelinin test edilmesi amacıyla Huygens seçeneği eklenmiştir.

EK 3.4. Düğümler Paneli

Ortamdaki tüm düğümlerin bulunduğu paneldir. Bu panele ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.5’ teki gibidir.



Ek Şekil 3.5. Düğümler paneli

Bu paneldeki butonlar ile düğüm ekleme ve güncelleme pencereleri çağrılabilir. Ayrıca düğüm silme ve seçme butonları da bu panelde yer almaktadır.

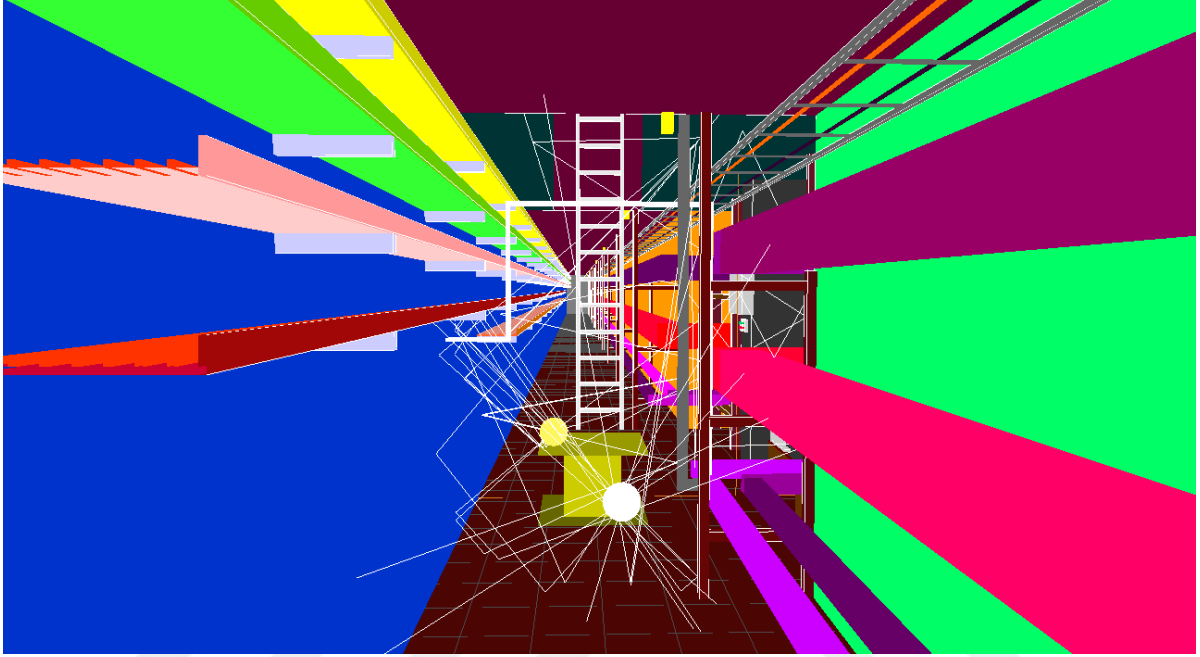
Ekle butonu tıklandığında Ek Şekil 3.6’ daki Düğüm Ekleme penceresi açılmaktadır.

Ek Şekil 3.6. Düğüm ekleme penceresi

Düğüm, bilgilerin girilip Kaydet butonuna tıklanmasıyla 3B ortama eklenir. Yine benzer şekilde listeden düğüm seçilmişse Güncelle butonuna tıklandığında Düğüm Güncelle penceresi açılır. Ek Şekil 3.7’ deki bilgiler girilerek güncelleme işlemi yapılır.

Ek Şekil 3.7. Düğüm güncelleme penceresi

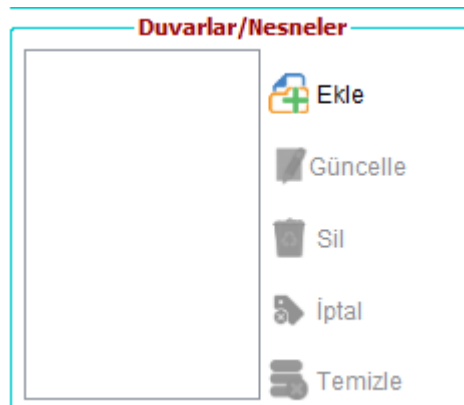
Listeden seçimi yapılan düğüm, Sil butonu ile silinir. İptal butonu ile de düğümler listesindeki seçim iptal edilir. Simülasyonun sona ermesiyle listeden düğüm seçildiğinde sadece o düğümün aldığı ışınlar gösterilir. Seçilen düğümün rengi beyaz olur. Ek Şekil 3.8' de düğümün seçilmesi sonucu 3B ortamda aldığı ışınlar gösterilmiştir.



Ek Şekil 3.8. Alıcı düğümün aldığı ışınlar

EK 3.5. Duvarlar/Nesneler Paneli

Ortamdaki tüm engellerin ve kenarların tanımlandığı paneldir. Bu panele ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.9' daki gibidir.



Ek Şekil 3.9. Duvarlar/Nesneler paneli

Bu panelde tüm engellerin, duvarların ve nesnelerin yer aldığı bir liste bulunur. Paneldeki butonlar ile nesne ekleme ve güncelleme pencereleri çağrılabilir. Nesnelerin silinmesi ve varsa listedeki seçimin iptal edilmesi fonksiyonlarını yerine getiren butonlar bu panelde yer almaktadır.

Ekle butonuna tıklandığında Ek Şekil 3.10' daki Nesne Ekleme penceresi açılmaktadır.

Nesne/Duvar Ekleme

Nesne Adı: sag_duvar1
Edge Işın S.: 0.1

Konum/Boyut

Başlangıç (X): 0
Başlangıç (Y): 0
Başlangıç (Z): 0
Genişlik: 1
Yükseklik: 1
Derinlik: 1

Renk

Renk Seç: Duvar Rengi
Opasite: 1

Dielektrik

Dielektrik Dış (er1): 1
Dielektrik İç (er2): 1.5

Kenar Edge'ler

Diagram showing a 3D wireframe of a cube with edges labeled e1 through e12. A point P is marked on the bottom edge e1.

Edge selection list:

☐ e1	☐ e2
☐ e3	☐ e4
☐ e5	☐ e6
☐ e7	☐ e8
☐ e9	☐ e10
☐ e11	☐ e12

Kaydet

Ek Şekil 3.10. Nesne/Duvar ekleme penceresi

Bu penceredeki değerler kısaca şu şekilde açıklanır:

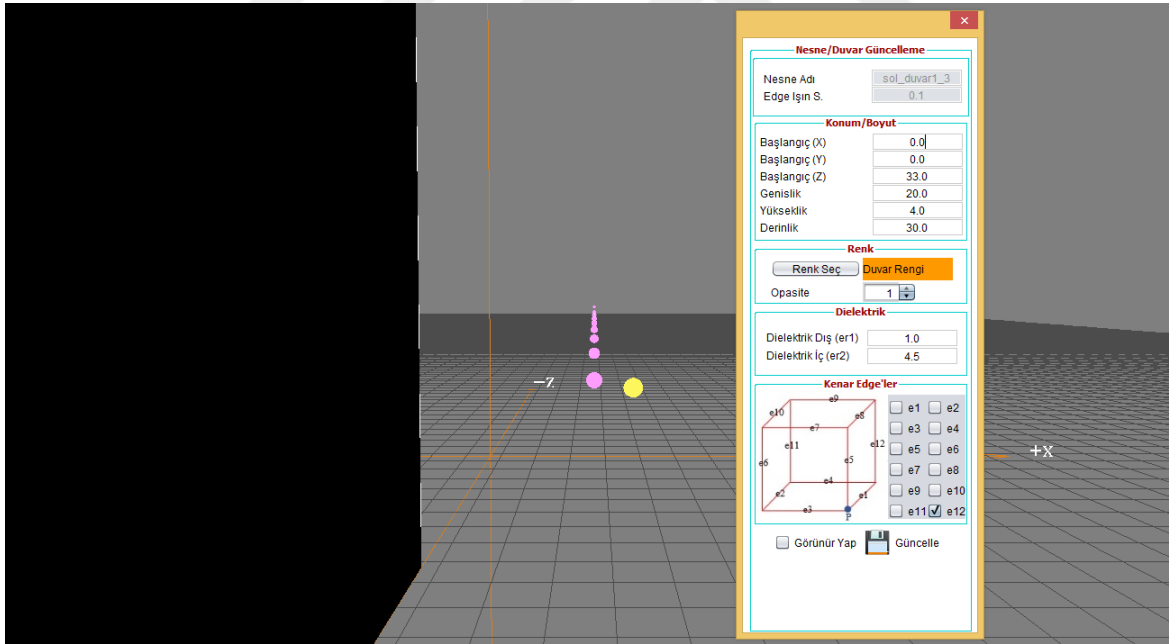
Edge Işın Sayısı: Knife-Edge kırınımına göre oluşacak ışın sayısıdır ve Ana Penceredeki ışın sayısı ile aynı olmak zorundadır. Burada sadece bilgilendirme amaçlı yer almaktadır. Keller'e göre kırınım gerçekleşecekse bu değer hesaplamaya katılmayacağından herhangi bir önemi yoktur.

Konum/Boyut: Nesnenin 3B ortamdaki konum ve boyut bilgileridir. Bu bilgilerdeki değişiklikler anında 3B ortamda görünebildiğinden nesne tanımlama kolay hale gelmektedir.

Dielektrik: Tanımlanacak nesnenin bağlı dielektrik sabiti burada girilir. Bu değerler nesnenin içi ve dışı olacak şekilde girilir.

Kenar Edgeler: Bu kısım modellenecek nesnenin kenarlarının hangilerinin kenar olarak tanımlanacağını belirler. Kutucukların işaretlenmesi o kenarın, kenar olarak modellendiğini belirtmektedir.

Güncelle butonuna tıklandığında benzer şekilde Ek Şekil 3.11' de görüldüğü üzere nesne güncelleme penceresi çıkar.



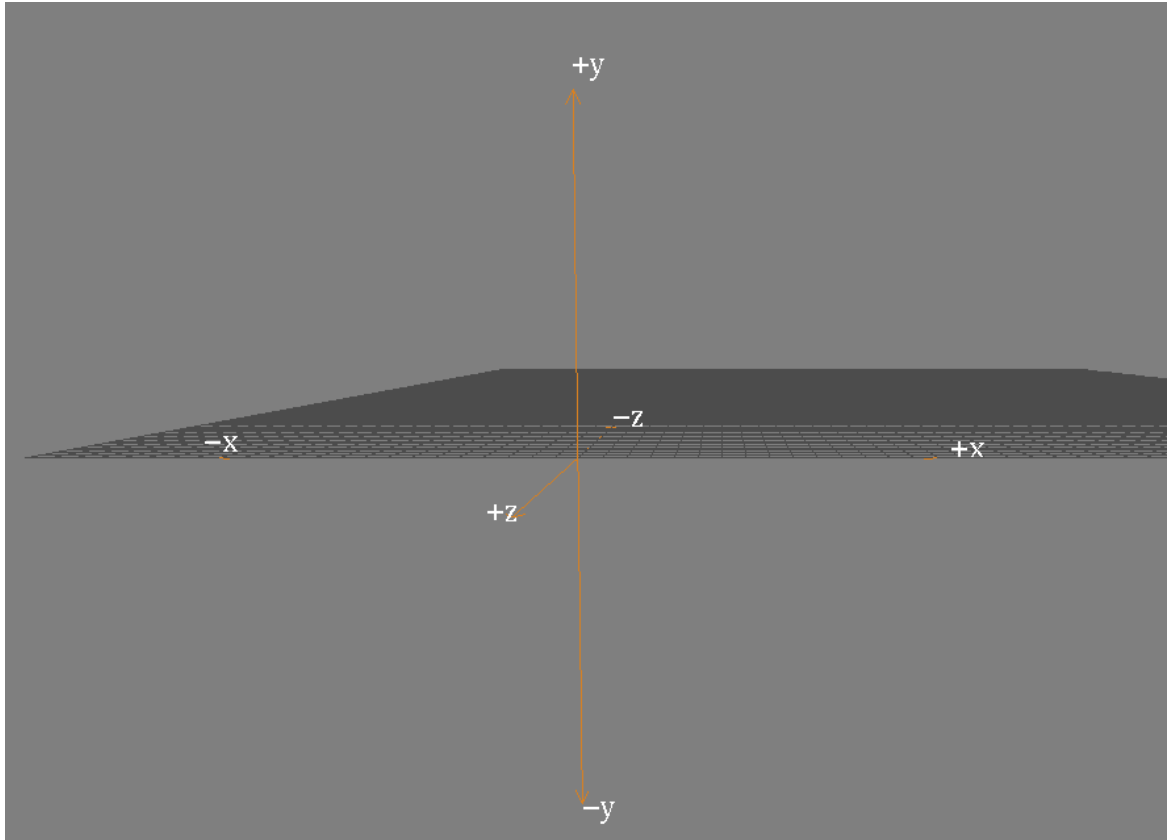
Ek Şekil 3.11. Nesne/Duvar güncelleme penceresi

Nesne güncelleme penceresi açıldığında güncellenecek nesne dışındaki diğer engeller görünmez hale gelir bu da 3B ortamın tasarımını kolaylaştırmaktadır. Pencere kapatıldığında 3B ortam tekrar eski haline döner.

Paneldeki diğer butonlardan Sil butonu seçilen engeli silerken iptal butonu listedeki seçimi iptal eder. Temizle butonu ise listedeki bütün nesneleri siler.

EK 3.6. 3B Ortam Paneli

Nesnelerin, kenarların, düğümlerin ve ışınların yer aldığı 3 boyutlu çizim ortamıdır. Bu panele ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.12’ deki gibidir.



Ek Şekil 3.12. 3B ortam paneli

Düğüm ve Nesne/Duvar panelindeki ekleme/güncelleme/silme işlemleri sonucu gerçekleşen değişiklikler bu ortama yansıtılır. Simülasyonun çalıştırılması sonucu ortaya çıkan ışınlar burada görüntülenir.

EK 3.7. Bilgilendirme Paneli

Simülasyonun sona ermesi ile ortaya çıkan bilgilerin kullanıcıya bildirildiği paneldir. Bu panele ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.13’ teki gibidir.

İlk Işın S.=0	Oluşan Işın S.=0	Oluşan Kırınım S.=0
Seçili Düğüm Işın S.=0	Desibel(dBm)=0	E. Alan(V/m)=0
Faz Farkı(derece)=0		

Ek Şekil 3.13. Bilgilendirme paneli

Gönderici düğümünden ilk anda çıkan ışın sayısı, simülasyon sonucu oluşan ışın sayısı ve gerçekleşen kırınım sayısı bu panelde gösterilir. Ayrıca simülasyon sonunda düğümler panelinden seçilen düğümün aldığı ışın sayısı, desibel (dBm) cinsinden aldığı güç miktarı, oluşan elektrik alan (V/m) bilgileri bu panelde görüntülenir.

EK 3.8. Çıktı Paneli

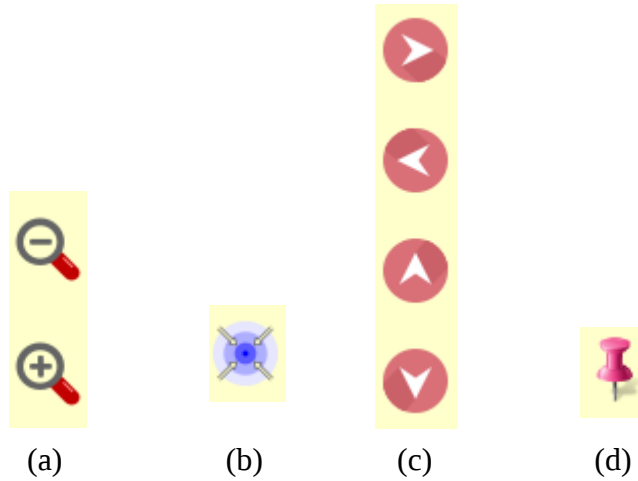
Simülasyonun çalışması esnasında kullanıcıya çeşitli bilgilerin gösterildiği paneldir. Bu panele ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.14’ teki gibidir.

Senaryo başarıyla import edildi ...
Simülasyon başladı ...
İlk ışınlar gönderiliyor ...

Ek Şekil 3.14. Çıktı paneli

EK 3.9. Gezinti Paneli

3B ortamında gezinti yapılacak butonların yer aldığı paneldir. Ek Şekil 15’ te bu butonlara ait ekran görüntüleri verilmektedir.



Ek Şekil 3.15. Gezinti paneli

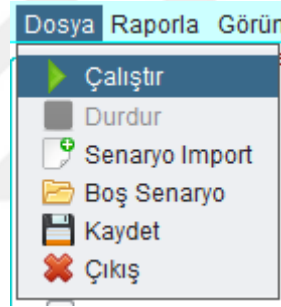
Ek Şekil 3.15.a'daki butonlar 3B ortama yaklaşma ve uzaklaşma butonlarıdır. Ek Şekil 3.15.b'deki buton ise kamera konumunu ve koordinatları başlangıç ayarlarına getiren butondur. Ek Şekil 3.15.c'deki butonlar 3B ortamda sağa, sola, ileriye ve geriye gezintilerin yapıldığı butonlardır. Ek Şekil 3.15.d'deki buton ise Ek Şekil 3.15.b'deki varsayılan kamera konumunu ve koordinatları değiştirip sabitleme işlevi gören butondur.

EK 3.10. Menüler

Program menülerinin yer aldığı paneldir. Bu menüler şunlardır.

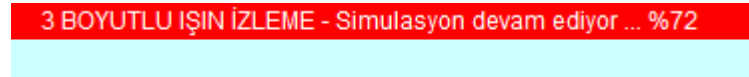
- Dosya
- Raporla
- Görünüm
- Ekle

Dosya Menüsü: Bu menüye ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.16'daki gibidir.



Ek Şekil 3.16. Dosya menüsü

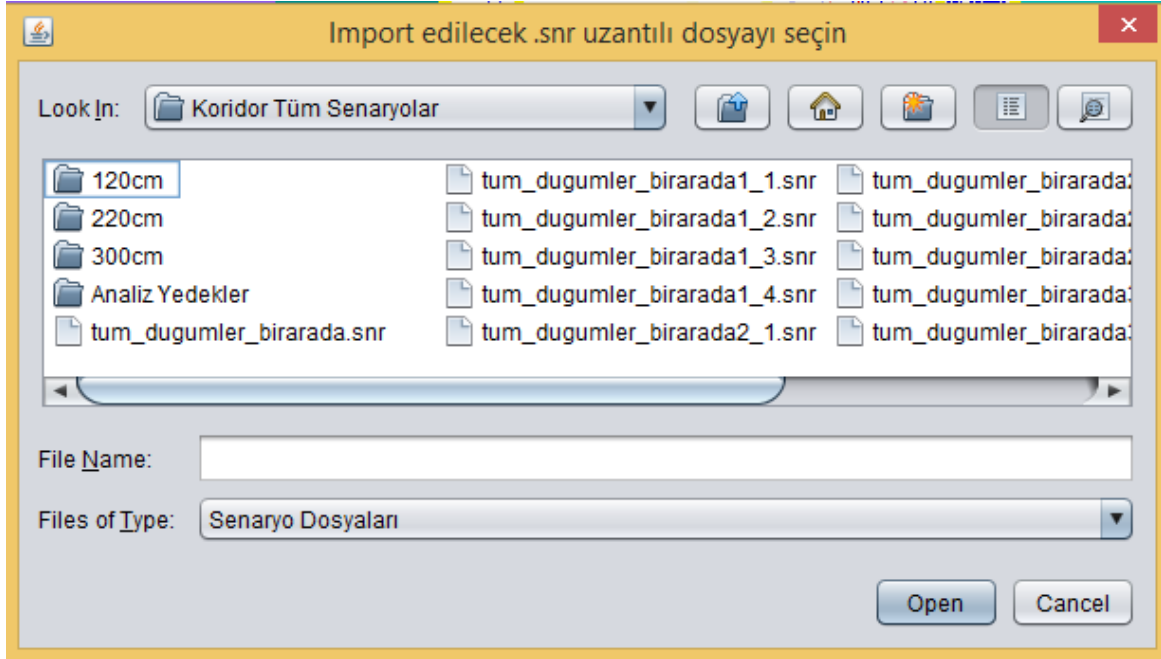
Çalıştır seçeneği ile simülasyon başlatılır. Simülasyonun başlamasıyla gönderici düğümlerden ilk ışınlar gönderilir ve hesaplamalar başlar. Simülasyonun çalışma anında program penceresinin üst çubuğu Ek Şekil 3.17' deki gibi kırmızı olur.



Ek Şekil 3.17. 3BII programı üst çubuğu

Durdur seçeneği, simülasyon sonucunda oluşan tüm ışınları silerek ortamı tasarlandığı veya import edildiği ilk haline getirir.

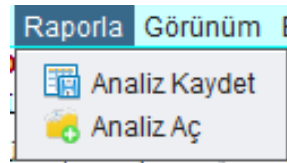
Senaryo Import seçeneği, önceden oluşturulan .snr uzantılı dosyanın programa import edilmesini sağlar. Senaryo Import seçeneği seçildikten sonra .snr uzantılı dosyayı seçmek için açılan pencere Ek Şekil 3.18’ deki gibidir.



Ek Şekil 3.18. Senaryo import penceresi

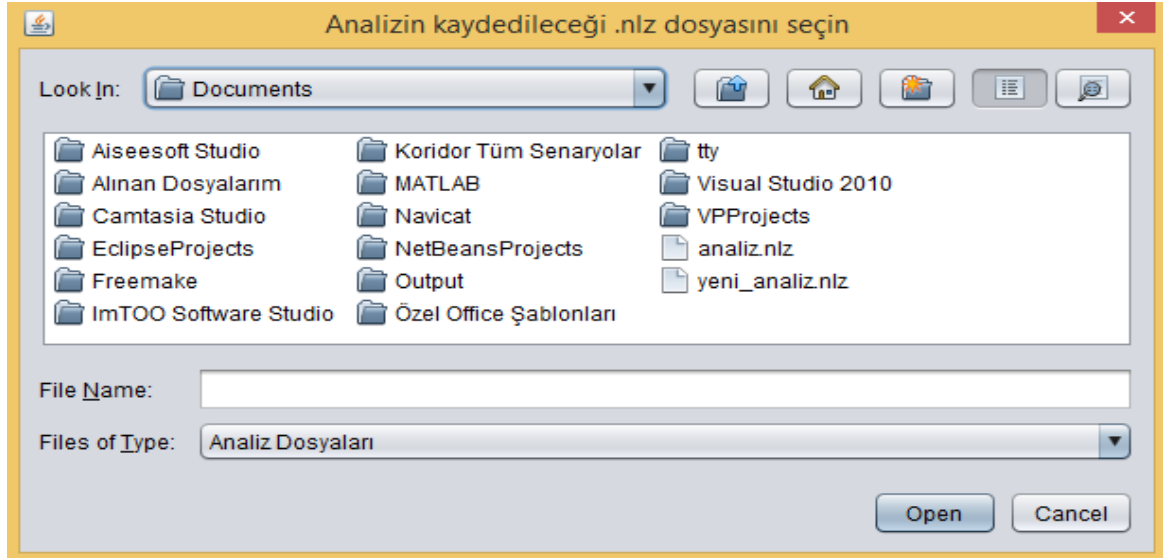
Menüdeki diğer seçeneklerden Boş senaryo seçeneği 3B ortamdaki tüm nesneleri temizleyerek başlangıçtaki ilk haline getirir. Kaydet seçeneği ile çalışılan senaryo, .snr uzantılı olarak kaydedilebilir. Daha sonra bu senaryo Senaryo Import ile tekrar çağrılabilir. Çıkış seçeneği ile de programdan çıkış sağlanır.

Raporla Menüsü: Simülasyon çalıştırıldıktan sonra simülasyona ait raporlamalar bu menü aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu menüye ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.19’ daki gibidir.



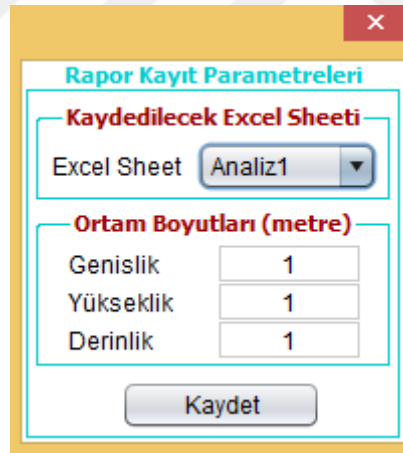
Ek Şekil 3.19. Raporla menüsü

Analiz Kaydet seçeneği ile 3Bİİ programına özgü .nlz uzantılı dosyanın seçileceği pencere açılır. Bu pencereye ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.20’ deki gibidir.



Ek Şekil 3.20. Analiz dosyası seçme penceresi

Dosya seçildikten sonra MS Excel tabanlı bir dosya olan .nlz dosyasının hangi sheet' e kayıt yapılacağını seçileceği pencere açılır. Bu pencereye ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.21'deki gibidir.



Ek Şekil 3.21. Analiz kayıt penceresi

Bu penceredeki ortam boyutları simülasyonun çalıştırıldığı ortama ait metre cinsinden mesafelerdir. Bu değerler analiz dosyasına da yazılır.

Bu menüdeki diğer seçecek olan Analiz Aç seçeneği ile .nlz uzantılı dosya seçilerek açılır. Analiz dosyasına ait ekran görüntüleri Ek Şekil 3.22 - 3.25' teki gibidir.

Gönderici			
Konum (x,y,z) (metre)			Adı
3,3	0,9	-49	Dugum Verici

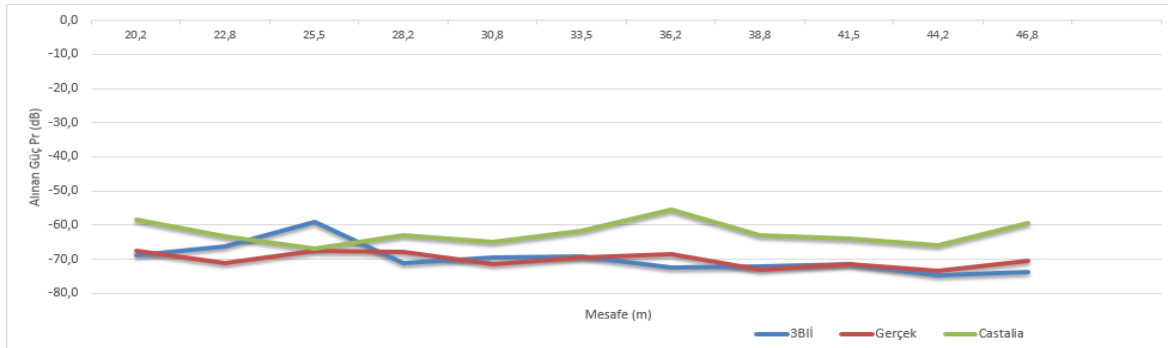
Ek Şekil 3.22. Analiz dosyasındaki gönderici düğüm bilgileri

Alıcı											
Konum (x,y,z) (metre)			Adı	İlk Vericiye Uzaklık(m)	Kapsama Yarıçapı(m)	Gerçek Ölçülen(dBm)	Omnet++ Sonuç(dBm)	Alınan Güç Pr (dBm)	Faz Farkı (Derece)	Alınan Toplam Elektrik Alan (V/m)	Kesişen Işın Sayısı
3	1,2	-29	D1_32	20,2	0,5165	-67,5	-58,45	-68,8	-40,83	-0,01	70
3	1,2	-26	D1_33	22,8	0,5833	-71	-63,47	-66,2	-51,83	-0,01	84
3	1,2	-23	D1_34	25,5	0,6527	-67,5	-67,02	-59,0	-54,76	0,02	93
3	1,2	-21	D1_35	28,2	0,7221	-68	-63,01	-71,2	-43,97	0,00	94
3	1,2	-18	D1_36	30,8	0,7889	-71,5	-64,99	-69,4	75,67	-0,01	109
3	1,2	-15	D1_37	33,5	0,8582	-69,5	-61,83	-69,1	-78,58	0,01	132
3	1,2	-13	D1_38	36,2	0,9276	-68,5	-55,42	-72,4	-58,83	0,00	133
3	1,2	-10	D1_39	38,8	0,9944	-73	-62,96	-72,3	71,11	0,00	131
3	1,2	-7,3	D1_40	41,5	1,0638	-71,5	-64,00	-71,3	-81,80	0,00	150
3	1,2	-4,6	D1_41	44,2	1,1332	-73,5	-65,96	-74,6	-46,35	0,00	231
3	1,2	-2	D1_42	46,8	1,2000	-70,5	-59,29	-73,7	60,63	0,00	365

Ek Şekil 3.23. Analiz dosyasındaki alıcı düğüm bilgileri

Genel Değerler	
Fiziksel Ortam (gen,yuk,der)	(1 ; 1 ; 1) metre
Transmisyon Gücü (watt)	0,001258925
Max Yansıma Sayısı	8
Max Kırınım Sayısı	3
Max Kırılma Sayısı	kırılma yok
Kırınım Türü	Keller
Frekans	2400
Döngü Artışı	0,250
Düğüm Kapsama Yarıçapı (m)	değişken
Çıkan Işın Sayısı	579
Toplam oluşan ışın sayısı	19396
Gerçekleşen kırınım sayısı	113

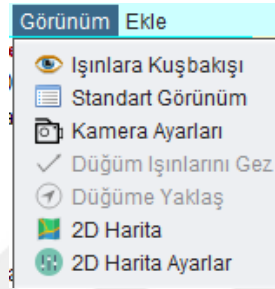
Ek Şekil 3.24. Analiz dosyasındaki simülasyon sonuç değerleri



Ek Şekil 3.25. Analiz dosyasındaki alıcı düğümlerin aldıkları güç grafiği

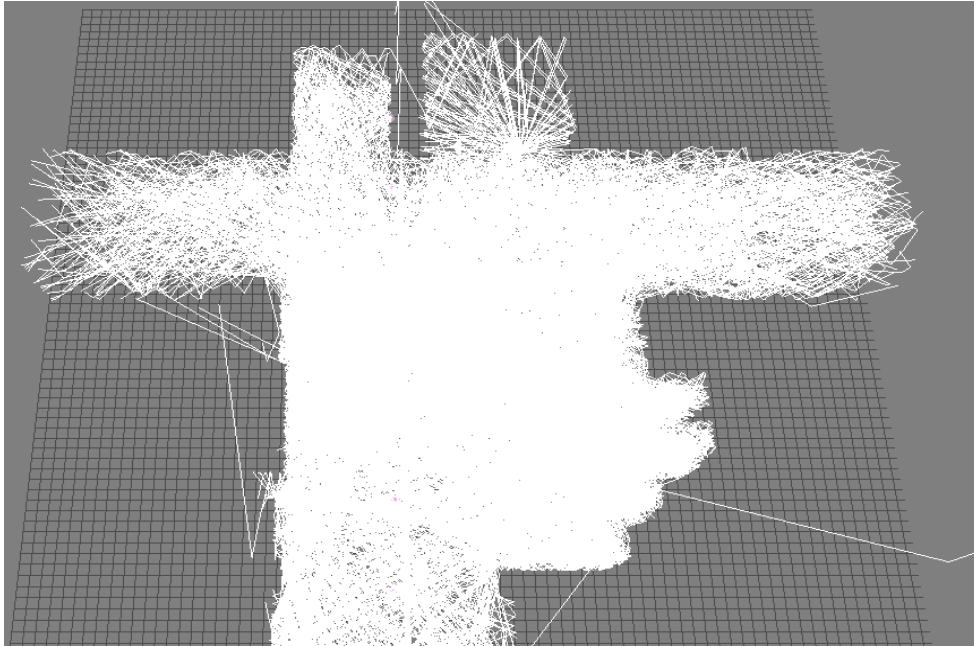
Ek Şekil 3.22’ de, simülasyondaki gönderici düğüm/düğümlere ait bilgiler yer alır. Ek Şekil 3.23’te ise alıcı düğümlere ait bilgiler yer almaktadır. Simülasyon sonucu oluşan genel istatistik bilgileri Ek Şekil 3.24 ’te yer alır. Ek Şekil 3.25’te ise ortam ölçüm sonuçları, varsa başka bir simülatöre ait ölçüm sonuçları (bu tez çalışmasında OMNET++ Castalia simülatörü) ve 3Bİİ ölçüm sonuçlarının karşılaştırmasına ait grafik yer almaktadır.

Görünüm Menüsü: Bu menüye ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.26’ daki gibidir.



Ek Şekil 3.26. Görünüm menüsü

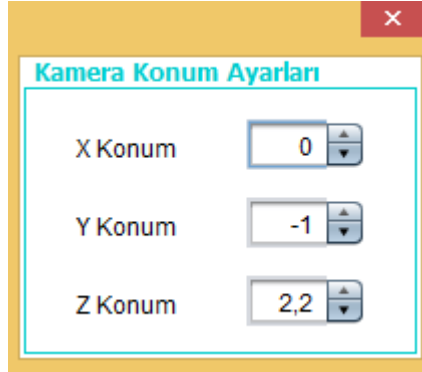
Işınlara Kuşbakışı ve 2D Harita seçenekleri simülasyon çalıştırıldıktan sonra aktif olan seçeneklerdir. Işınlara Kuşbakışı seçeneği seçildiğinde Ek Şekil 3.27’ de görüldüğü gibi ortama ait tüm nesneler görünmez hale gelip sadece ışınlar görünmektedir.



Ek Şekil 3.27. Işınları kuşbakışı görüntüleme

Standart Görünüm Ek Şekil 3.15.b’ deki butona ait aynı işlevi yerine getirmekte, kamera konumunu ve lokasyonu varsayılan konumuna getirmektedir.

Kamera Ayarları seçeneği Ek Şekil 3.28’ de ekran görüntüsü verilen pencereyi açmakta ve 3B ortamın kamera ayarlarını değiştirmektedir.



Ek Şekil 3.28. 3B ortam kamera ayarları penceresi

Düğüm Işıklarını Gez seçeneği Düğümler Panelindeki listeden herhangi bir düğüm seçildiğinde aktif olmaktadır. Seçilen düğümün aldığı ışınlar Ek Şekil 3.29’ da görüldüğü gibi tek tek gezilebilmektedir.



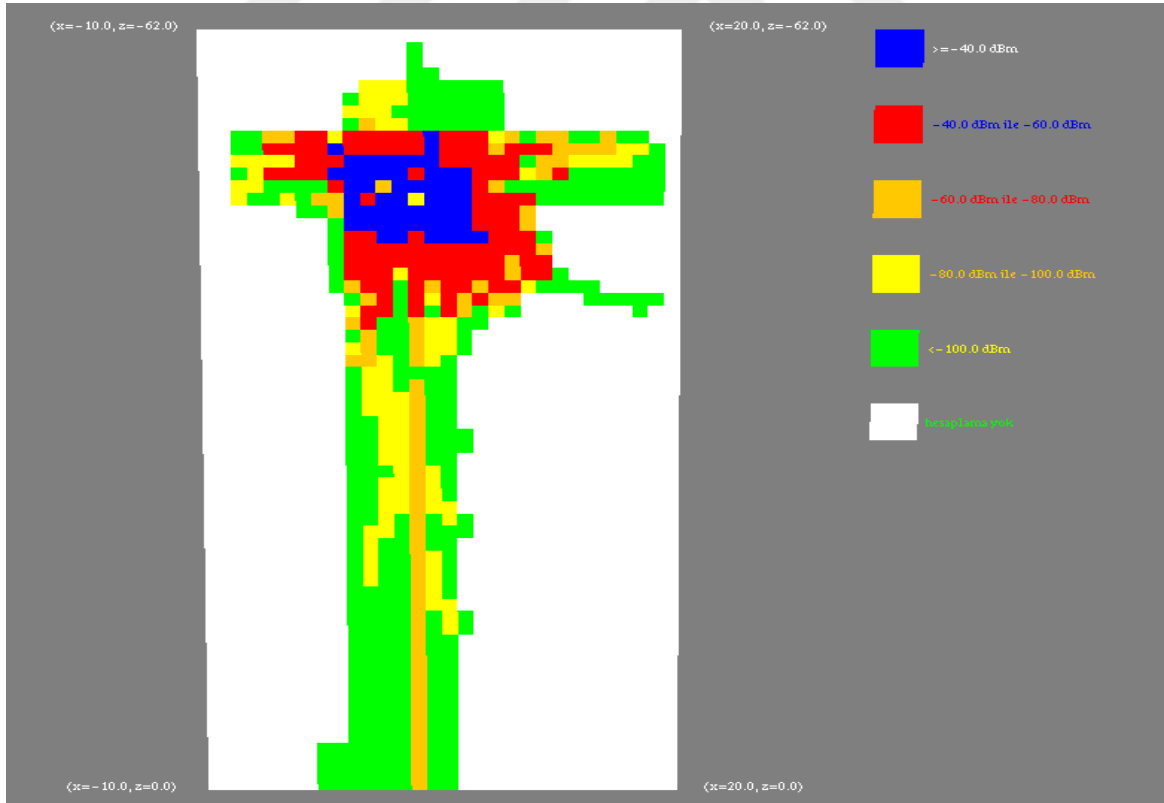
Ek Şekil 3.29. Düğümün aldığı ışınları gezme

Açılan gezinti penceresi kapatıldığında seçili düğümün aldığı tüm ışınlar gösterilir. Düğümler Panelindeki iptal tuşuna basıldığında ise seçili düğüm iptal edilerek ortamdaki tüm ışınların görünmesi sağlanır. Düğüme Yaklaş seçeneği geliştirilme aşamasındaki bir seçenektir.

2D Harita seçeneği seçildiğinde Ek Şekil 3.30’ da görüldüğü gibi bir progress bar çalışmakta varsayılan değerlere göre ortam hücrelere bölünerek her hücreye düşen ortalama güç desibel cinsinden hesaplanıp Ek Şekil 3.31’ deki gibi haritalandırılmaktadır.

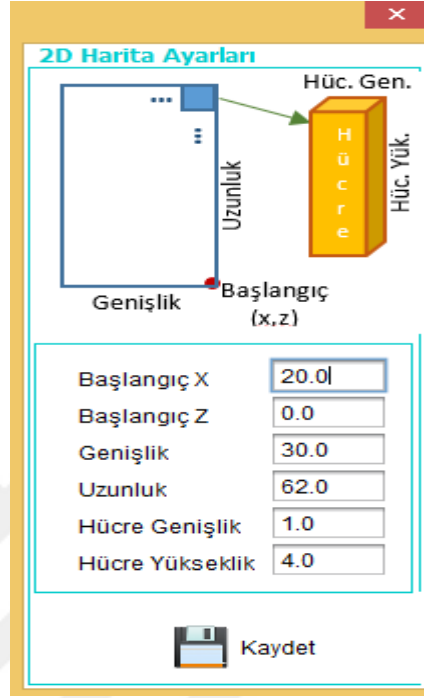


Ek Şekil 3.30. 2D harita oluşturma sürecinde progress barın çalışması



Ek Şekil 3.31. Simülasyon ortamının 2D haritası

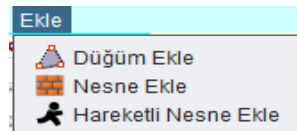
Ek Şekil 3.31’ de görüldüğü gibi ortam koordinatları ve dBm cinsinden renk aralıkları 2D haritada görünmektedir. 2D haritaya ait varsayılan ayarlar 2D Harita Ayarlar seçeneğinin seçilmesiyle açılan ve Ek Şekil 3.32’ de ekran görüntüsü verilen pencere ile değiştirilebilmektedir.



Ek Şekil 3.32. 2D harita ayarları

Başlangıç X ve Başlangıç Z değerleri 2B ortamın sağ alt köşesini belirtmekte ve haritalamanın nereden başlanacağını ifade etmektedir. Genişlik ve Uzunluk değerleri başlangıç noktasından ne kadar uzaklıktaki alanların hesaplamaya dahil edileceğini belirtmektedir. Hücre Genişlik ve Hücre Yükseklik değerleri ise başlangıç noktasından belirtilen genişlik ve uzunluktaki alanı belirtilen hücre genişliği ve uzunluğu kadar alanlara bölüp EM hesapları ona göre yapmaktadır. Hücre genişliği ne kadar az olursa hesaplama o kadar hassas olacak fakat hesaplama süresi artacaktır.

Ekle Menüsü: Bu menüye ait ekran görüntüsü Ek Şekil 3.33’ teki gibidir.

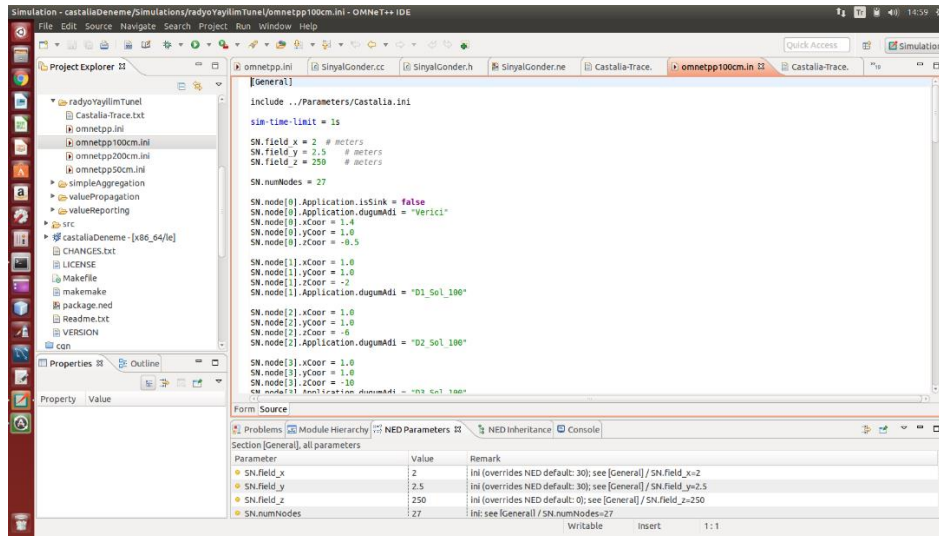


Ek Şekil 3.33. Nesne/düğüm ekleme menüsü

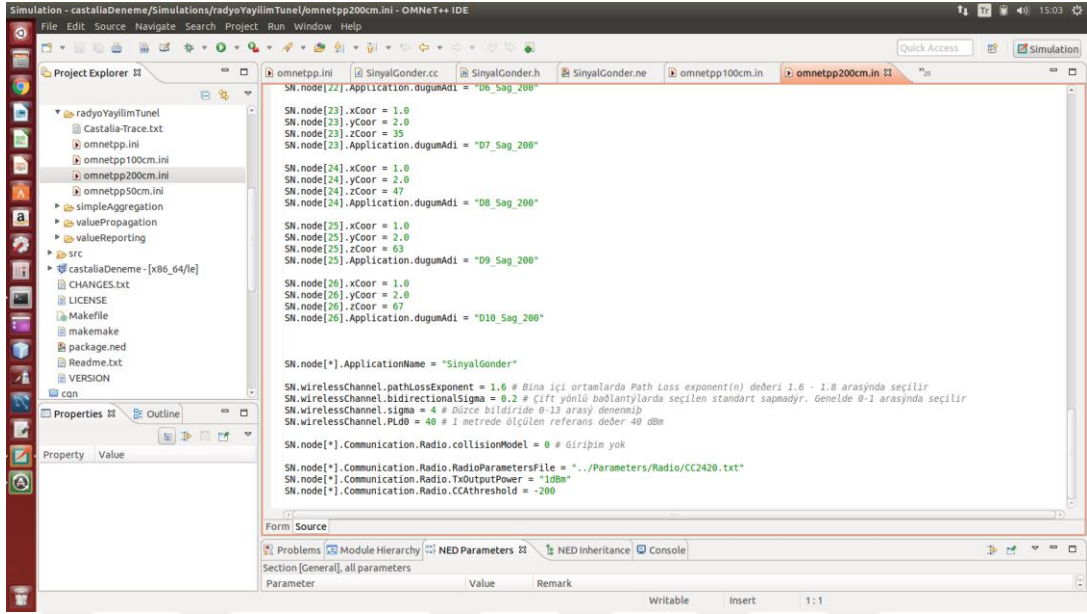
Bu menüdeki Düğüm Ekle ve Nesne Ekle seçenekleri Düğümler Paneli ve Nesne/Duvarlar Panelindeki Ekle butonunun gerçekleştirdiği aynı işlemleri yapmaktadır. Hareketli Nesne Ekle seçeneği ise henüz geliştirme aşamasındaki bir seçenektir.

EK 4. OMNET++ Castalia Uygulaması

Omnet++ simülâtörünün kablosuz sensör ağlarının simülasyonu için geliştirdiği Castalia framework'u kablosuz kanal modeli olarak bölüm 3.4.4' te anlatılan log normal shadowing yöntemini kullanır. Omnet++ simülâtöründe simülasyonu oluştururken öncelikle hangi parametrelerin ve hangi yöntemlerin kullanılacağı belirtilmelidir. Bu amaçla ortam sınırlarının ve düğüm koordinatlarının tanımlandığı 3 ayrı (omnetpp50cm.ini, omnetpp100cm.ini, omnetpp200cm.ini) konfigürasyon dosyası oluşturulmuştur. Bu dosyalarda log normal shadowing'in σ (standart sapma) değeri 4 ve η (yol kaybı katsayısı) ise 1.6 olarak belirlenmiştir. Girişimin hesaba katılmadığı bu senaryoda radyo ünitesi olarak CC2420.txt dosyasının radyo parametreleri seçilmiştir. 1 metre mesafeden ölçülen referans $PL(d_0)$ değeri 40 dBm olarak seçilmiştir. Uygulamada herhangi bir yönlendirme ve mac katmanı protokolü kullanılmamış varsayılan olarak "BypassMAC" ve "BypassRouting" değerleriyle simülasyon çalıştırılmıştır. Bu parametrelerle oluşturulan başlangıç konfigürasyon dosyalarına ait ekran görüntüleri Ek Şekil 4.1 ve Ek Şekil 4.2' deki gibidir.

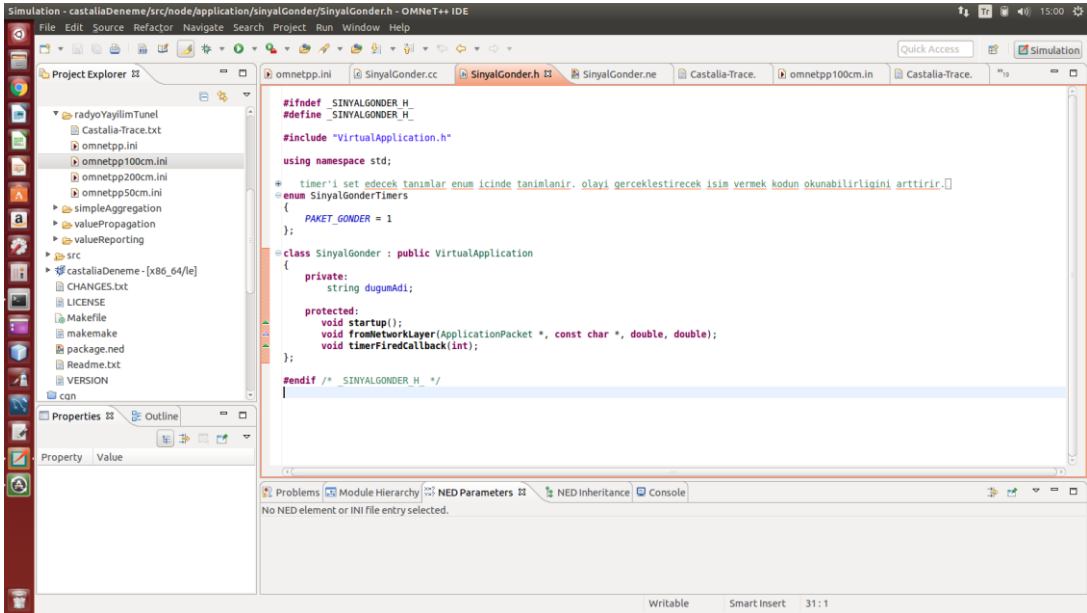


Ek Şekil 4.1. Omnet++ başlangıç konfigürasyon dosyasının (omnetpp100cm.ini) ekran görüntüsü

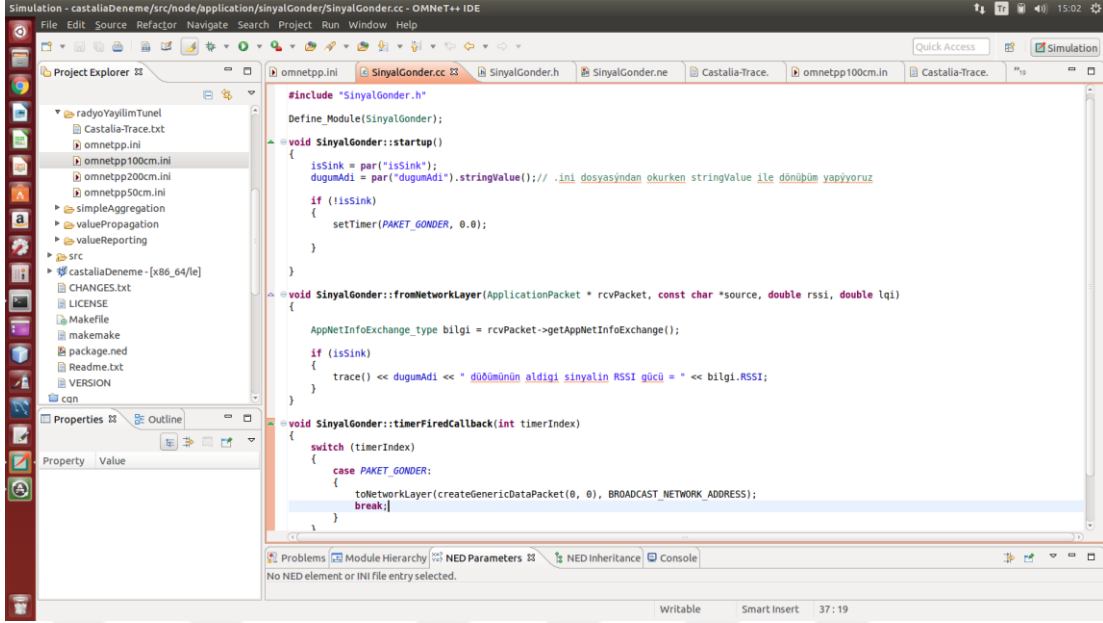


Ek Şekil 4.2. Konfigürasyon dosyasının parametreleri

Omnet++ Castalia simülatörünün application katmanında verici düğümün alıcı düğümlere paketler gönderdiği ‘SinyalGonder’ adlı bir uygulama yazılmıştır. Geliştirilen bu uygulamaya ait ekran görüntüleri Ek Şekil 4.3 – 4.4’ teki gibidir.

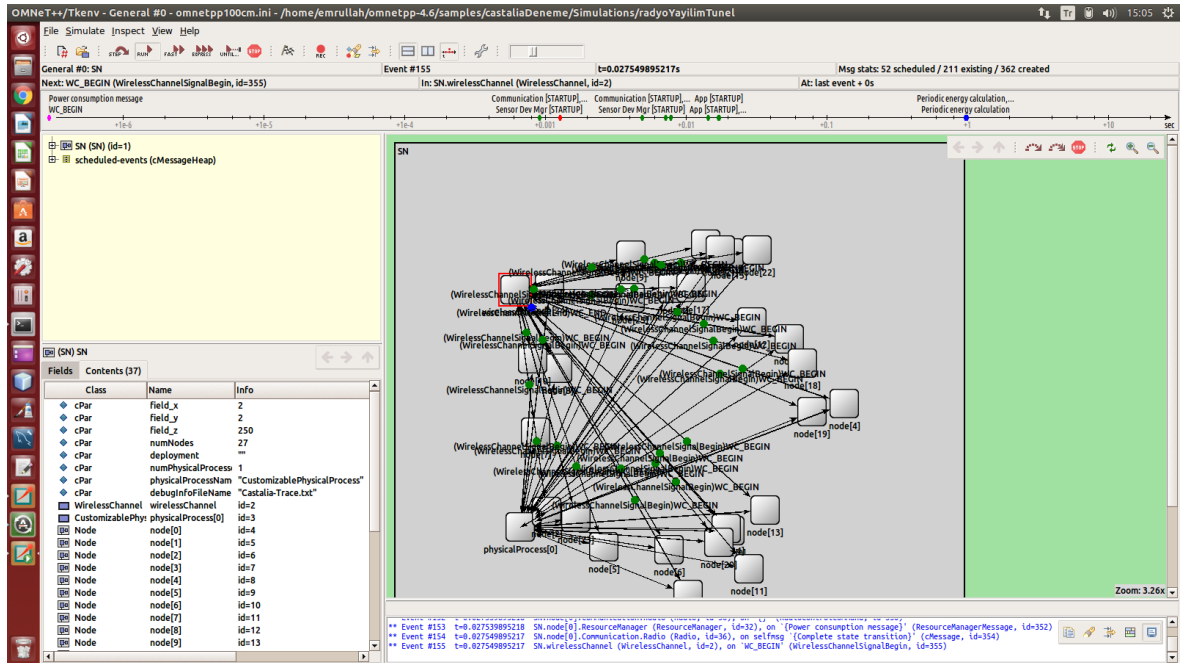


Ek Şekil 4.3. SinyalGonder uygulamasının header (.h) dosyası

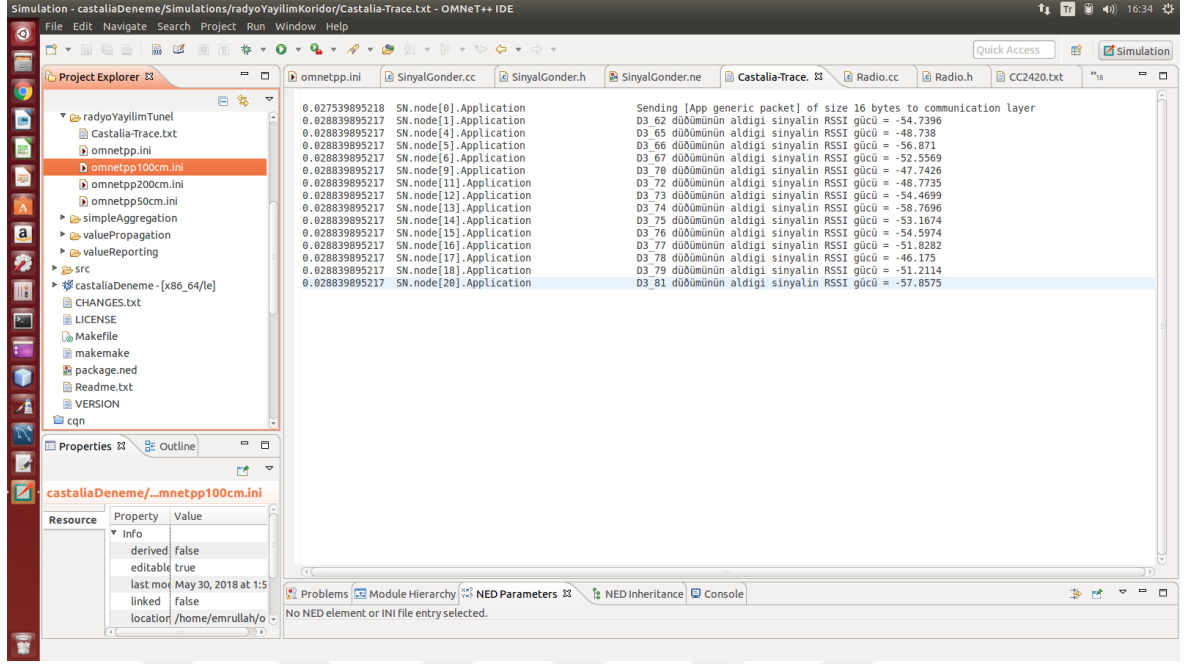


Ek Şekil 4.4. SinyalGonder uygulamasının kaynak (.cc) dosyası

Simülasyonun çalıştırılması sonucu verici düğümlerin alıcılara paket göndermesi ve simülasyon sonuçlarının yazdırıldığı Castalia-Trace.txt dosyasına ait ekran görüntüleri Ek Şekil 4.5 – 4.6’ daki gibidir.



Ek Şekil 4.5. Simülasyonun çalıştırılması



Ek Şekil 4.6. Simülasyon sonuçlarının yazdırılması

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Maden ‘de doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimlerini Elazığ ‘da tamamladı. 2007 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünü bitirdi. 2007 yılında mühendis olarak Tapu Kadastro Genel Müdürlüğünde çalışmaya başladı. 2009 yılında tayin ile Devlet Su İşleri 9.Bölge Müdürlüğü Bilgi Teknolojileri Şube Müdürlüğüne geçti ve halen burada mühendis olarak görev yapmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.

