

**RADYO DALGASI YAYILIMI MODELLEMESİ İÇİN ÇOKLU
ENGEL KIRINIM YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

**DEVELOPMENT AND COMPARATIVE ANALYSIS OF
MULTIPLE EDGE DIFFRACTION METHODS FOR
RADIOWAVE PROPAGATION MODELING**

NURİYE DİCLE TÜRKÖNE

**Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN
Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim–Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2019

Nuriye Dicle TÜRKÖNE' nin hazırladığı "Radyo Dalgası Yayılımı Modellemesi İçin Çoklu Engel Kırınım Yöntemlerinin Geliştirilmesi ve Karşılaştırmalı Analizi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa KUZUOĞLU
Başkan



Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN
Danışman



Prof. Dr. Birsen SAKA
Üye



Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL
Üye



Prof. Dr. Vakur B. ERTÜRK
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Kıymetli Annem, Babam ve Kardeşlerime...

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17 / 07 / 2019

NURIYE DİCLE TÜRKÖNE



YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

17 / 07 / 2019

NURİYE DİCLE TÜRKÖNE



ÖZET

RADYO DALGASI YAYILIMI MODELLEMESİ İÇİN ÇOKLU ENGEL KIRINIM YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Nuriye Dicle TÜRKÖNE

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

Haziran 2019, 67 sayfa

Kırınım kaybı, sabit iki anten arasındaki yayılım yolunun yakınında bulunan engellerden kaynaklanan elektromanyetik dalgadaki güç kaybı olarak ifade edilir. İyi bir haberleşme sisteminde yapılan yayının sorunsuz olarak karşı tarafa iletilmesi için kırınım kaybını en aza indirmek gerekir. Bunun için kaç adet engelin kırınım kaybına neden olduğu belirlenip, engellerin yapısı modellenir. Bir haberleşme sistemindeki kırınım kaynaklı kayıpları analiz etmek haberleşme sisteminin yapısı planlanırken büyük bir önem taşır. Bu çalışmada öncelikle kırınım kaybı hesaplamalarının temelleri anlatılmıştır. Bıçak-sırtı olarak modellenmiş tek engel için çeşitli kırınım kaybı hesaplama yöntemleri incelenmiştir. Yol profilinde birden fazla engel olması durumunda, çoklu bıçak-sırtı geometrisinde kullanılan analitik bir yöntemle kırınım kaybı tahmini yapan Vogler yöntemi tanıtılmış ve bu yöntem MATLAB® ortamında geliştirilerek benzetimler yapılmıştır. Engellerin geometrik özelliklerine göre bir takım hesaplama yöntemleri içeren, haberleşme sistemindeki kırınım kaybını tahmini olarak bulmayı hedefleyen kırınım modellerinden Epstein-Peterson, Deygout ve Giovanelli yöntemleri anlatılmış ve yöntemler MATLAB®

ortamında geliştirilerek benzetimler yapılmıştır. Vogler, Deygout ve Giovanelli yöntemlerinin benzetimlerinde özyinelemeli algoritmalar (*İng.* recursive algorithms) kullanılmıştır. Tüm yöntemler için geliştirilen MATLAB® programları çeşitli tipte ve sayıda engeller için kırınım kaybı hesapları yapabilmektedir. Geliştirilen yöntemlerden elde edilen benzetim sonuçları, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak bir performans değerlendirmesi yapılmıştır. Epstein-Peterson, Deygout ve Giovanelli yöntemlerinin doğrulukları, analitik bir yöntem olmasından dolayı Vogler yönteminden alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerle ayrıca, engeller belirli bir yarıçapa sahip yuvarlak tepeler olarak modellendiğinde oluşan kırınım kayıpları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik dalga yayılımı, kırınım kaybı, kırınım parametresi, Epstein-Peterson yöntemi, Deygout yöntemi, Giovanelli yöntemi, Vogler yöntemi

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND COMPARATIVE ANALYSIS OF MULTIPLE EDGE DIFFRACTION METHODS FOR RADIOWAVE PROPAGATION MODELING

Nuriye Dicle TÜRKÖNE

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

June 2019, 67 pages

Diffraction loss is defined as power dissipation in electromagnetic wave, which is originated through edges located near the propagation path between two fixed antennas. It is required to minimize the diffraction loss in a proper communication system in order to be able to transmit the information to the receiver without any problem. For this purpose, the number of edges that cause diffraction loss is determined and the structures of the edges are modelled. While a reliable communication system is designed, it is important to analyze the loss originating from diffraction in the communication system. In this study, the basic principles of diffraction loss calculations are explained. Several methods for diffraction loss calculations are examined for a single edge modelled as a knife-edge. In the case of multiple edges in a terrain profile, the Vogler method, which predicts the loss of diffraction by means of an analytical method, is introduced and developed in MATLAB®. Epstein-Peterson, Deygout and Giovanelli methods, which predict the diffraction loss by using the geometrical parameters of knife-edges, are introduced and developed in MATLAB®. Recursive algorithms are used for the simulation of

Vogler, Deygout and Giovanelli methods. The MATLAB[®] programs developed for all methods are able to calculate diffraction loss for various types and numbers of edges. A performance assessment is conducted through comparing the results of all methods with those in the literature. The accuracy of Epstein-Peterson, Deygout, and Giovanelli methods is compared with respect to the Vogler method that is an analytical method. By using these methods, the diffraction loss which occurs when the edges are modelled as rounded peaks (knobs) with a certain radius, is also examined.

Key words: Electromagnetic wave propagation, diffraction loss, diffraction parameter, Epstein-Peterson method, Deygout method, Giovanelli method, Vogler method.

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluŐturulmasının her aŐamasında tecrübe ve bilgi birikimi ile beni destekleyen, teŐvik eden ve eleŐtirel katkılarıyla yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN'e sabrı ve özverisinden dolayı en içten teŐekkürlerimi sunuyorum.

ASELSAN MGEO'dan mesai arkadaşlarım Doruk ÇANKAYA, Fırat GEZER, Ahmet TUNÇ ve amirlerim Gökhan TAŐKIN ve Samet KARAKAŐ'a yardımları ve önemli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Her zaman destekleriyle yanımda olan kuzenlerim Sıla TÜRKÖNE ve AyŐe Selva TÜRKÖNE'ye, arkadaşlarım İlkur ŐAHİN, İdil GÖRÜR ve Burcu SENOL'e teşekkür ederim. Ayrıca sevgili annem Halime TÜRKÖNE, babam Mücahit TÜRKÖNE'ye sağladıkları manevi destek ve bitmek bilmeyen öğrenim hayatıma gösterdikleri sabırdan dolayı teŐekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER TABLOSU

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER TABLOSU	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kırınım Kaybı	1
1.2. Tezin Amacı	4
1.3. Tezin Kapsamı	5
2. KIRINIM KAYBI.....	6
2.1. KIRINIM.....	6
2.1.1. Fresnel Bölgesi	7
2.1.2. Kırınım Kaybı	10
2.2. Tek Engel için Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımları	12
2.2.1. Bıçak-Sırtı Engeller için Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımları	12
2.2.1.1. Fresnel-Kirchhoff Kırınım Kaybı Denklemi (Yöntem 1).....	13
2.2.1.2. ITU Kırınım Kaybı Yaklaşımı [Yöntem 2].....	14
2.2.1.3. Deygout Yaklaşımı [Yöntem 3].....	14
2.2.1.4. Lee Yaklaşımı [Yöntem 4]	15
2.2.2. Yuvarlak Kenarlı Tepeler İçin Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımı .	16
2.3. Çoklu Bıçak-Sırtı Engeller İçin Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımları ..	19
2.3.1. Epstein-Peterson Yöntemi	20
2.3.2. Deygout Yöntemi	21

2.3.2.1. İki Bıçak-Sırtı Engel Bulunan Yol Profilinde Deygout Yöntemi Uygulanması.....	22
2.3.2.2. Çoklu Bıçak-Sırtı Engel Bulunan Yol Profilinde Deygout Yöntemi Uygulanması.....	23
2.3.2.3. Deygout Yöntemi için Düzeltme Terimi	27
2.3.3. Giovanelli Yöntemi.....	29
2.3.4. Vogler Yöntemi	30
3. NÜMERİK BENZETİM SONUÇLARI	34
3.1. [15]'deki Test Senaryoları Yapılan Benzetim Sonuçları.....	34
3.1.1. Çoklu Bıçak-Sırtı Kırınım Modelleri ile Kırınım Kaybı Hesaplamaları	36
3.1.2. Tek Engel için Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımları Karşılaştırılması	41
3.2. [2]'deki Test Senaryosu ile Yapılan Benzetim Sonuçları	46
3.3. Çoklu Engel için Kırınım Kaybı Modellerinin Farklı Senaryolarla Yapılan Hesaplama Karşılaştırmaları	50
3.3.1. Artan Alıcı Yüksekliği Senaryoları.....	51
3.3.2. Artan Alıcı Uzaklığı Senaryoları	53
3.3.3. Yuvarlak Kenarlı Tepelerle Artan Alıcı Yüksekliği Senaryoları.....	54
3.3.4. Çeşitli Test Senaryolarıyla Yapılan Hesaplamalar	57
4. SONUÇLAR.....	62
5. KAYNAKLAR	65

ŞEKİLLER

Şekil 2.1	Küresel kaynak için Huygens İlkesi [2]'den uyarlanmıştır	7
Şekil 2.2	Fresnel Bölgeleri [2]'den uyarlanmıştır	8
Şekil 2.3	Birinci Fresnel Bölgesi [18]'den uyarlanmıştır.....	10
Şekil 2.4	Bıçak kenarı model parametreleri [2]'den uyarlanmıştır.	11
Şekil 2.5	Bıçak-sırtı engel geometrisi	13
Şekil 2.6	Tüm yöntemler için kırınım kaybı-Fresnel kırınım parametresi grafiği	16
Şekil 2.7	Yuvarlak kenarlı tepeler geometrisi [1]	16
Şekil 2.8	Yuvarlak kenarlı tepeler geometrisi [3]	18
Şekil 2.9	Çoklu bıçak-sırtı engele sahip yol profili örneği	19
Şekil 2.10	Epstein-Peterson yöntemi için örnek yol profili	20
Şekil 2.11	Epstein-Peterson yöntemi için örnek yol profili	20
Şekil 2.12	Deygout yöntemi için örnek yol profili (iki engel)	22
Şekil 2.13	Deygout Yöntemi için Örnek Yol Profili (6 Engel) 1.....	23
Şekil 2.14	Deygout Yöntemi için Örnek Yol Profili (6 Engel) 2.....	25
Şekil 2.15	Deygout Yöntemi için Örnek Yol Profili (6 Engel) 2.....	26
Şekil 2.16	Normalize edilmiş yol profili (2 Engel).....	27
Şekil 2.17	Giovanelli yöntemi için yol profili geometrisi	29
Şekil 2.18	Vogler yöntemi geometrisi	31

Şekil 3.1	Tablo 3.1'deki yol profili senaryoları için Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler yöntemleriyle hesaplanan kırınım kaybı sonuçları grafiği	39
Şekil 3.2	[2]'de bulunan yol profili.....	47
Şekil 3.3	Vogler, Deygout, Giovanelli yöntemleri sonuçlarının [2]'deki referans sonuçları ile karşılaştırılması (Şekil 3.2'deki yol profili için)	47
Şekil 3.4	Fresnel-Kirchhoff, ITU, Deygout ve Lee tek engel için kırınım kaybı yaklaşımları kullanılarak Deygout yöntemi ile elde edilen sonuçlar ...	49
Şekil 3.5	Fresnel-Kirchhoff, ITU, Deygout ve Lee tek engel için kırınım kaybı yaklaşımları kullanılarak Giovanelli yöntemi ile elde edilen sonuçlar.	50
Şekil 3.6	Artan alıcı yüksekliği için 3 farklı test senaryosu	51
Şekil 3.7	Artan alıcı yüksekliği senaryosu (Şekil 3.6) ile çoklu engeller için kırınım kaybı hesaplama yöntemlerinden elde edilen sonuçların grafiği	52
Şekil 3.8	Artan alıcı uzaklığı için 3 farklı test senaryosu.....	53
Şekil 3.9	Artan alıcı uzaklığı senaryosu (Şekil 3.8) için elde edilen kırınım kaybı sonuçları (yatay eksen logaritmik olarak çizilmiştir).....	54
Şekil 3.10	Artan alıcı yüksekliği senaryosu (Şekil 3.6) ile Epstein-Peterson yöntemi kullanılarak farklı R'ye sahip yuvarlak kenarlı tepeler şeklinde modellenmiş engeller için elde edilen sonuçlar	55
Şekil 3.11	Artan alıcı yüksekliği senaryosu (Şekil 3.6) ile Deygout yöntemi kullanılarak farklı R'ye sahip yuvarlak kenarlı tepeler şeklinde modellenmiş engeller için elde edilen sonuçlar	56
Şekil 3.12	Artan alıcı yüksekliği senaryosu (Şekil 3.6) ile Giovanelli yöntemi kullanılarak farklı R'ye sahip yuvarlak kenarlı tepeler şeklinde modellenmiş engeller için elde edilen sonuçlar	57

ÇİZELGELER

Tablo 3.1	Örnek Yol Profillerinin Yükseklik ve Uzaklık Parametreleri ([15]'deki çalışmadan alınmıştır)	35
Tablo 3.2	Epstein-Peterson, Giovanelli ve Vogler yöntemleriyle kırınım kaybı (dB) hesaplamaları sonuçları (Tablo 3.1'deki yol profilleri ile)	36
Tablo 3.3	Deygout yöntemi ile hesaplanan kırınım kaybı (dB) sonuçları (Tablo 3.1'deki yol profilleri ile)	38
Tablo 3.4	Çoklu engeller için kırınım modelleri ile elde edilen hesaplama sonuçlarının Vogler yöntemi ile elde edilen sonuçlardan farkının ortalama ve standart sapma değerleri	40
Tablo 3.5	Vogler Yöntemi ile 6 engel için kırınım kaybı (dB) hesaplamaları.....	41
Tablo 3.6	Epstein-Peterson yöntemi ile tek engel için kırınım kaybı (dB) hesaplama yöntemleri karşılaştırılması	42
Tablo 3.7	Deygout yöntemi ile tek engel için kırınım kaybı (dB) hesaplama yöntemleri karşılaştırılması.....	44
Tablo 3.8	Deygout yöntemi 2 ile tek engel için kırınım kaybı (dB) hesaplama yöntemleri karşılaştırılması.....	45
Tablo 3.9	Giovanelli yöntemi ile tek engel için kırınım kaybı (dB) hesaplama yöntemleri karşılaştırılması.....	46
Tablo 3.10	Yol profillerinin yükseklik, uzaklık ve yarıçap parametreleri.....	58
Tablo 3.11	Vogler, Deygout, Deygout 2, Giovanelli ve Epstein-Peterson yöntemleriyle elde edilen kırınım kaybı (dB) sonuçları (Tablo 3.10'deki yol profilleri ile)	59

Tablo 3.12	Farklı frekans değerleri için Vogler, Deygout, Deygout 2, Giovanelli ve Epstein-Peterson yöntemleriyle elde edilen kırımım kaybı (dB) sonuçları (Tablo 3.10'deki 1a numaralı yol profili kullanılmıştır.).....	61
------------	--	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

λ	Dalgaboyu
v	Kırınım parametresi
c	Işık hızı
f	Frekans
,	Ondalıklı sayıları ifade etmede virgül kullanılmıştır

Kısaltmalar

GTD	Geometrical Theory of Diffraction	Geometrik Kırınım Teorisi
ITU	International Telecommunication Union	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği
LoS	Line-of-Sight	Görüş Hattı
UHF	Ultra High Frequency	Ultra Yüksek Frekans
UTD	Uniform Theory of Diffraction	Düzgün Kırınım Teorisi
VHF	Very High Frequency	Çok Yüksek Frekans

1. GİRİŞ

1.1. Kırınım Kaybı

Bir kablosuz haberleşme sistemi elektromanyetik dalgaların bir yayılım yolunda seyahat ederek haberleşmeyi sağlamasıyla oluşur. Bu yayılım yolunda alıcı ve verici anten arasında engellenmemiş bir görüş hattı (*İng.* unobstructed line-of-sight (LoS)) varsa aradaki mesafe ve elektromanyetik dalganın havada ilerlemesinden kaynaklanan bir kayıp oluşur ve buna boşluk kaybı (*İng.* free-space loss) denir [1]. Engellenmemiş görüş yolu antenler arasında hiçbir engelle karşılaşmadan düz bir çizgi çizilebilen yayılım yoludur. Bir yayılım yolunda, boşluk kaybının dışında da pek çok kayıp bulunmaktadır ve bu kayıpların hepsi boşluk kaybına eklenen ilave kayıplardır. Kırınım kaybı (*İng.* diffraction loss), yayılım yolundaki alıcı ve verici anten arasında bulunan engellerin kırınımına yol açmasından dolayı oluşan elektromanyetik dalganın gücündeki kayıpları ifade eder. İyi bir haberleşme sisteminde yapılan yayının sorunsuz olarak karşı tarafa iletilebilmesi için kırınım kaybının minimum olması gerekmektedir. Bir haberleşme sistemindeki kırınım kaynaklı kayıpları analiz etmek haberleşme sisteminin yapısı planlanırken büyük bir önem taşır.

Bir yayılım yolunda verici anten sonrasında herhangi bir engelin bulunması gölge bölgesi (*İng.* shadow region) yaratır. Fakat bu hatta bir engelin bulunması yayılım yolundaki yayını tamamen kısıtlamayabilir [2]. Ayrıca iletim hatlarında hattın engellenmemiş görüş hattında olması kırınım kaybının oluşmaması için yeterli olmaz, antenler arasındaki düz çizgiye komşu olan bir bölgenin de engel bulundurmaması gerekmektedir. Bu iki durum Huygens ilkesi ile açıklanır [3]. Huygens ilkesine göre bir elektromanyetik dalga sert bir köşeye çarptığında, bu noktada izotropik ışığı (*İng.* isotropic radiator) gibi davranan ikincil bir dalga merkezi oluşturur. Bu nedenle, daha ileri noktalardaki elektromanyetik alan, bu ikincil dalga merkezinden yayılan dalgaların toplamı kadar olur [2]. İlk merkezden yayılan dalgalarla ikincil dalga merkezinden yayılan dalgaların yol uzunlukları farklı olur. Bu durumda yayılım yolunda belirli bir yakınlığa sahip olan engeller de kırınım kaybına yol açacaktır. Bu alan antenlerin odak noktalarını oluşturduğu bir elipsoitin

hacminden oluşur (Fresnel Bölgesi). Alıcı ve verici arasındaki bir engelin Fresnel Bölgesi (*İng.* Fresnel Zone) olarak bilinen elipslerden birinci Fresnel Bölgesinin yüzde 60'ını kesmediği durumda engelin yayılım yolunu engellemeyeceği kabul edilir ve bu engel ilave kırınım kaybı getirmez [3]. Eğer bir engel birinci Fresnel Bölgesinin belirtilen kısmını yani kırınım bölgesini keserse bu engelin oluşturduğu kırınım kaybı hesaplanmalıdır [3].

Büyük mesafelerde oluşacak kırınım kaybını tahmin ederken, VHF ve UHF frekans bandlarında dalga boyu, aradaki tepeler gibi engellerin boyutlarına oranla daha kısa olduğu için, yol profili genel olarak birçok bıçak-sırtı engel olarak modellenir. Tek bıçak-sırtı geometrisinde engelin sebep olduğu kırınım kaybını desibel cinsinden hesaplamak için, Fresnel integralleriyle kırınım parametresi (v) kullanılarak hesaplamalar yapılır [3]. Kırınım fenomeni araştırmaları yapılırken daha başka yöntemlerle de kırınım katsayısı formülleri geliştirilmiştir. Keller tarafından 1962'de Geometrik Kırınım Teorisi (*İng.* the **G**eometrical **T**heory of **D**iffraction) geliştirilmiştir [4]. Kouyoumjian ve Pathak, 1974'de, GTD yönteminde bulunan optik sınırlardaki tekillikleri kaldırarak Düzgün Kırınım Teorisini (*İng.* the **U**niform **T**heory of **D**iffraction) geliştirmiştir [5].

Bullington, 1947'de yayınladığı makalesinde ise yol profilindeki tüm engelleri tek bir engelmış gibi modelleyerek yaklaşık bir model geliştirmiştir [6]. 1962'de Millington, iki engelden oluşan kırınım kayıplarını hesaplamak için Fresnel-Kirchhoff yaklaşımını kullanmıştır [7].

Çoklu engel geometrisinde, her bir engel için Fresnel integrallerinin art arda hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda n adet engel varsa n boyutlu Fresnel integrali hesaplanır ve bunu uygulamak da oldukça zordur. Bu hesaplamayı kolaylaştırmak için Vogler, 1981'de yaptığı çalışmasında bıçak-sırtı geometrisi için, Furutsu'nun sonuçlarından [8] başlayarak bir sönümlenme fonksiyonu (*İng.* attenuation function) elde ederek yüksek doğrulukta sonuçlar veren bir model geliştirmiştir [9]. Vogler çalışmasında kırınım kaybı hesabını bilgisayar ortamında yapılabilecek nümerik bir forma dönüştürmüştür. Modelde hata fonksiyonları tekrarlamalı olarak kullanılır ve bu yüzden hesaplama süresi fazladır.

Çoklu engel geometrilerinde kullanılan yöntemlerin uygulamalarının karmaşık olmasından dolayı, engellerin geometrik özelliklerine (örn. yükseklik, mesafe) göre birtakım hesaplamalar yapan kırım modelleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde amaç yol profilini geometrik hesaplarla oldukça basit formlara dönüştürmektir. Geliştirilen bu yöntemler kırım kaybını tahmini olarak hesapmaktadır.

Öncelikle 1953'te Epstein-Peterson, her bir engel için hesaplanması gereken kırım kaybını, bir önceki ve bir sonraki engellerin konumları ve yükseklikleri yardımıyla o engel için efektif bir yükseklik bulunarak hesaplanan bir yöntem geliştirmiştir [10]. Her engel için bir kırım kaybı bulunur ve bu kayıplar toplanır ve oldukça basit bir şekilde modellenir. Epstein-Peterson yöntemi, Bullington yöntemine göre oldukça iyi tahminler yapmasına rağmen yapılan analizlerde kırım kaybını olması gerekenden daha az hesapladığı görülmüştür [11]. Deygout, 1966'da kendi yöntemini geliştirmiştir [12]. Bu yöntemde ise her engel için hesaplanan kırım kayıplarıyla ana engel belirlenir ve geri kalan engeller için kırım kaybı hesaplamaları bu ana engel referans alınarak yapılmaktadır. Bu durum bulunan ana engelin sağında ve solunda kalan tüm engeller için tekrarlanarak her engel için bir kırım kaybı hesaplanır ve hesaplanan bu değerler toplanır. Yöntem çoğu yol profilinde başarılı olmasına rağmen, engeller birbirine yaklaştığında hesaplamalarda yüksek miktarda hatalı sonuçlar verdiği tespit edildiği için, Giovanelli, 1984'te yayınladığı makalesinde Deygout yönteminden yola çıktığı başka bir yöntem tanıtmaktadır [11]. Bu yöntemde ana engelin efektif yüksekliği, verici ve alıcı antenlerde sanal noktalar varmış gibi düşünülerek geometrik birtakım hesaplamalarla daha küçük bir değer olarak bulunur ve kırım kaybı bu efektif yükseklikle hesaplanır [11]. Aynı işlem tüm döngüler için devam eder. Deygout yönteminin Giovanelli yöntemine göre olması gerekenden daha yüksek kırım kayıpları hesapladığı tespit edilmiştir [11]. Epstein-Peterson yöntemine oldukça benzer bir yöntem olan Japanese yöntemi, Epstein-Peterson yöntemine düzeltme getiren geometrik bir başka yöntemdir [13]. Bu yöntemde verici anten yerine sanal bir anten bulunmaktadır ve Epstein-Peterson yöntemi ve Millington'ın Epstein-Peterson yöntemine getirdiği düzeltmenin birleşimi niteliğindedir. Causebrook düzeltme yöntemi ise Deygout yönteminin kırım kaybını olması gerekenden daha fazla hesaplaması nedeniyle bu yöntemde bir düzeltme terimi getirilerek geliştirilen

bir başka yöntemdir [14]. Son yıllarda daha güncel bir yöntem olan Slack-String yöntemi de [15]'de tanıtılmıştır.

Analitik yöntemlerden biri olan Slope-UTD modeli ise UTD modelini kullanan Vogler yöntemine göre daha az karmaşıklığa sahip fakat geometrik modellerden de daha iyi sonuçlar veren bir yöntemdir [16].

ITU (International Telecommunication Union) telekomünikasyon alanında standartları düzenleyen bir kurum olması dolayısıyla kırınım kaybı hesaplamaları için de bir takım öneri makaleleri yayınlamıştır. Bu önerilerde şu ana kadar anlattığımız kırınım metodlarından bazıları ve ITU'nun kendisinin geliştirdiği metodlar da bulunmaktadır [3].

Engellerin modellenmesi, hesaplama açısından önemli bir yer tutar. Gerçek dünyada yayılım yolundaki objeler çok daha karmaşık olmaktadır. Gerçek bir yol profilinde, tüm engellerin bıçak-sırtı olarak modellenmesinin mümkün olmadığı görülür. ITU önerilerinde [3], bıçak-sırtı olarak modellenen engellerin her birinin, belirli bir yarıçapa sahip yuvarlak tepeler olarak da modellenebileceği gösterilmiştir. Bunun için her bir engele bir düzeltme terimi getirilmesi gerekmektedir [3].

Vogler yöntemi oldukça iyi sonuçlar verdiği için yaklaşık yöntemlerin doğruluğunu ölçmede kullanılabilir. Bir kırınım kaybı hesabı yapılmak istendiğinde yaklaşık yöntemler çok daha kısa sürede sonuç vermektedir. Bu yöntemlerin hiçbiri, kullanılan yol profili ne olursa olsun mutlak bir doğru sonuç vermediği için, değişik yol profillerinde hangi yöntemin daha iyi bir performans sağladığının incelenmesi gerekmektedir. Bu şekilde değişik yol profilleri için kullanılması gereken doğru yöntem belirlenebilir. Bu tezde Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler yöntemleri MATLAB ortamında geliştirilmiş ve performansları değerlendirilmiştir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışması, bir yayılım yolunda çoklu engeller bulunması durumunda oluşan kırınım kaybının hesaplanması için bulunan Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler yöntemlerinin MATLAB ortamında geliştirilmesi ve yöntemlerin birbirleriyle

karşılaştırılmasını yapmak amacıyla düzenlenmiştir. Çalışma süresince, kırınım kaybı değişik tipte engeller düşünülerek (bıçak-sırtı ve yuvarlak köşeler gibi) farklı koşullarda değerlendirilir, her bir yöntem için MATLAB benzetimleri yapıp, yöntemler benzetimlerde hesaplamaların yapılması için gerekli zaman ve hesaplama yükü açısından karşılaştırılır. Değişik engel sayıları için benzetimler yapılarak, belirli yol profillerinin hangi yöntemlerle hesaplamaların daha uygun olduğunu bulmak amaçlanmıştır.

1.3. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Benzer problemlerle ilgili daha önce yapılmış çalışmaların incelendiği literatür taraması,
- Kullanılan yöntemlerin MATLAB ortamında programlanması ve benzetimlerinin yapılması,
- Elde edilen benzetim verileri incelenerek, ilgili hesaplamalar yapılması ve gerçeğe uygunluğunun araştırılması,
- Benzetim verilerinin derlenmesi ve yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırması,
- Sonuçların değerlendirilmesi ve gelişime açık yanlarının ortaya çıkarılması.

2. KIRINIM KAYBI

2.1. KIRINIM

Engellenmemiş görüş yolu (*İng.* unobstructed line-of-sight (LoS)) antenler arasında hiçbir engelle karşılaşmadan düz bir çizgi çizebildiğimiz yayılım yoludur. Bu görüş hattında antenler arasındaki mesafe üzerinde elektromanyetik dalganın havada ilerlemesinden kaynaklanan bir kayıp oluşur ve boş uzay kaybı (*İng.* free-space loss) denir ve denklem (2.1) ile verilen ifadeyle hesaplanır.

$$P_{BK} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (2.1)$$

λ : dalgaboyu (*m*)

R : toplam yol uzunluğu (*m*)

Boşluk kaybı desibel cinsinden hesaplanmak istendiğinde ise denklem (2.2) kullanılır.

$$P_{BK}[dB] = 32.44 + 20 \log_{10}(R_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) \quad (2.2)$$

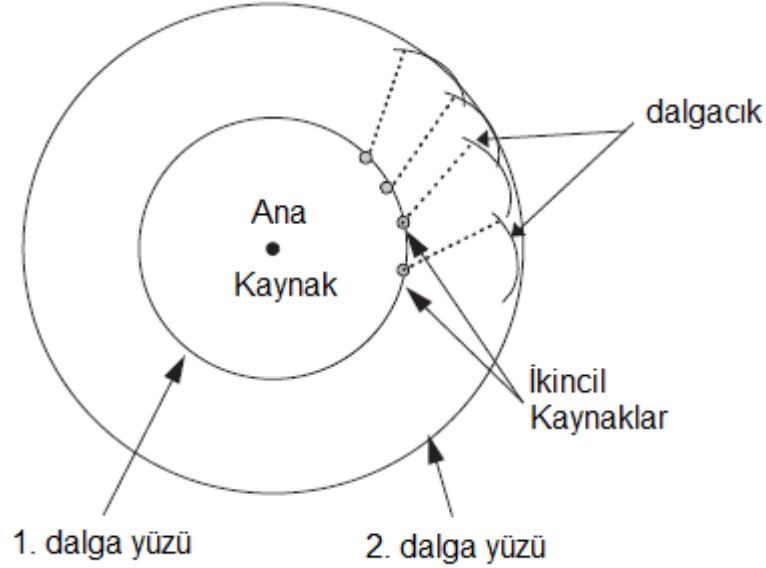
f : frekans (*MHz*)

R : toplam yol uzunluğu (*km*)

Bir yayılım yolu, boşluk kaybının dışında pek çok kayıp bulunmaktadır ve bu kayıpların hepsi boşluk kaybına eklenerek toplam yol kaybı bulunur. Bu mesafe içinde çıkıntı oluşturan engeller varsa, bunlara çarpan dalgaların kırınımı elektromanyetik dalgaların zayıflamasına yol açarlar. Bu zayıflamaya yol açan kayıp kırınım kaybıdır [1].

Kırınım, bir elektromanyetik dalganın bazı köşe noktalara çarpmasıyla bükülmesi durumuna denir. Kırınım olgusu Huygens ilkesine göre açıklanmaktadır. Huygens ilkesine göre dalga bir noktaya ulaştığında, bu noktada eşyönlü ışığıcı (*İng.* isotropic radiator) gibi davranan ikincil bir dalga merkezi oluşturur. Bu nedenle, daha ilerdeki

noktalardaki elektromanyetik alan, bu ikincil dalga merkezinden yayılan dalgaların toplamı kadar olur. Farklı olarak ilk merkezden yayılan dalgalarla bu dalgaların yol uzunlukları daha farklı olur. Huygens ilkesi Şekil 2.1'de, küresel bir dalga cephesindeki bir dizi ikincil kaynağın nasıl ortaya çıktığını göstermektedir [2].



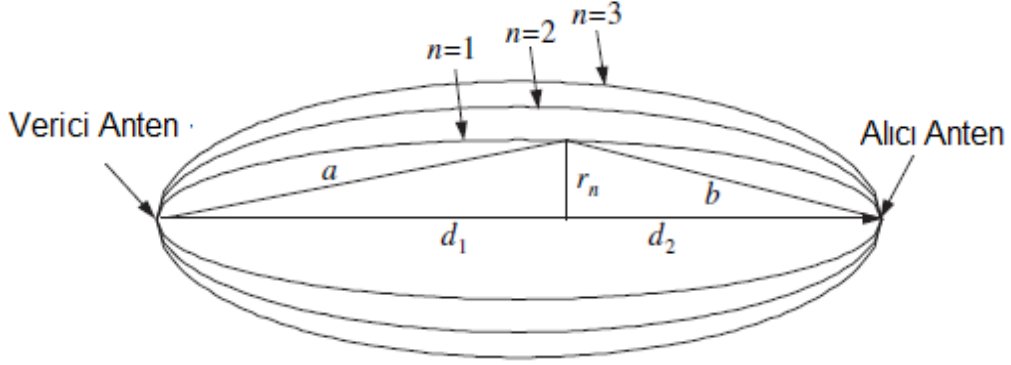
Şekil 2.1 Küresel kaynak için Huygens İlkesi [2]'den uyarlanmıştır

Bir yayılım yolunda antenler arasında engeller bulunmasına rağmen iletişim Huygens ilkesinde anlatılan ikincil kaynaklar sayesinde devam edebilir. Aradaki engeller kırınım kaybı oluşturur ve elektromanyetik dalgaların zayıflamasına neden olur [2].

2.1.1. Fresnel Bölgesi

Bir yayılım yolunda antenler arasında engel olmamasına rağmen belirli bir hacimde olan engeller de kırınım kaybı oluşmasına neden olur. Kayıpsız bir iletim için gönderici ve alıcı arasında belirli bir alanın, dalgaları yansıtarak girişime sebep olan her türlü engelden arınmış olması gerekir. Bu alan antenlerin odak noktalarını oluşturduğu bir elipsoitin hacminden oluşur ve birincil Fresnel bölgeleri (*İng.* Fresnel zone) olarak adlandırılır. Fresnel bölgeleri 1815 yıllarında Fransız mühendis

Fresnel'in optik üzerine yaptığı çalışmalar sayesinde ortaya çıkmıştır. Fresnel bölgeleri Şekil 2.2 Fresnel Bölgeleri [2]'den uyarlanmıştır'de gösterilmiştir [2].



Şekil 2.2 Fresnel Bölgeleri [2]'den uyarlanmıştır

d_1 ve d_2 : Alıcı ve verici antenin Fresnel yarıçapı hesaplanmak istenen noktaya olan yatay uzaklıkları (m)

r_n : Fresnel yarıçapı

n : Fresnel bölgesinin numarası

a ve b : Alıcı ve verici antenin Fresnel bölgesine olan uzaklıkları (m)

Burada önemli olan hacim, elektromanyetik dalga boyunun yarısı uzunluğundaki yolun bulunduğu hacimdir. Birincil Fresnel bölgesi odak noktalarında antenlerin olduğu, alıcı anten tarafından alınan dalgaların ilk dalga boyunun yarı dalga boyu kadar olduğu bir sanal dönelelipsoidtir. Birincil Fresnel bölgesinin boyutları yayın alanının ve dalga boyunun uzunlukları tarafından belirlenir [2].

$$a + b = d_1 + d_2 + \frac{n\lambda}{2} \quad (2.3)$$

Tek numaralı Fresnel bölgelerine denk gelen dalgalar eş fazlıdır ve birbirlerine eklenirler, çift numaralı Fresnel bölgeleri ise zıt fazlıdır ve birbirlerini yok ederler. Bu yüzden tek numaralı Fresnel bölgelerinde sinyaller daha iyi iletilir. Birinci Fresnel bölgesinde en güçlü sinyaller bulunur. Birinci Fresnel bölgesinde hiçbir engel bulunmuyorsa, bu yayılım yolu engellenmemiş görüş yolu (LoS) sayılabilmektedir. Genel kabul görmüş kural birinci Fresnel bölgesinin yüzde 60'ında hiçbir engelin

bulunmaması durumunda kırınım kaynaklı bir kayıp olmayacağı yönündedir. Birinci Fresnel bölgesinin yüzde 60'ı olan alan kırınım bölgesi olarak ifade edilir [17].

Bir engelin istenilen Fresnel bölgesinde olup olmadığına anlamak için Fresnel yarıçapına bakılır. Genel olarak haberleşme ortamlarında $d_1 \gg r_n$ ve $d_2 \gg r_n$ olarak düşünülür ve iyi bir yaklaşımla n 'nci Fresnel yarıçapı denklem (2.4) ile yazılır. Denklem (2.4)'te kullanılan d_1 , d_2 ve λ uzunlukları metre cinsinden verilmiştir.

$$r_n \approx \sqrt{\frac{nd_1d_2\lambda}{(d_1 + d_2)}} \quad (2.4)$$

Birincil Fresnel bölgesinin yarıçapı ise:

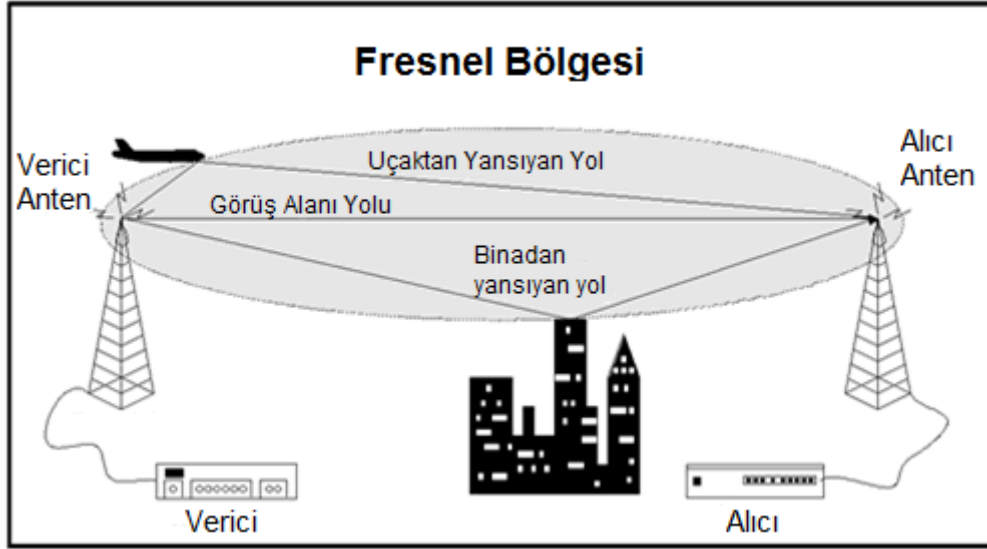
$$r_1 = \sqrt{\frac{d_1d_2\lambda}{(d_1 + d_2)}} \quad (2.5)$$

eşitliği ile yazılabilir.

n 'inci Fresnel yarıçapı daha pratik birimlerle kullanılmak istendiğinde ise denklem (2.6) kullanılabilir.

$$r_n \approx 550 \sqrt{\frac{nd_1d_2}{(d_1 + d_2)f}} \quad (2.6)$$

f : frekans (MHz)



Şekil 2.3 Birinci Fresnel Bölgesi [18]'den uyarlanmıştır.

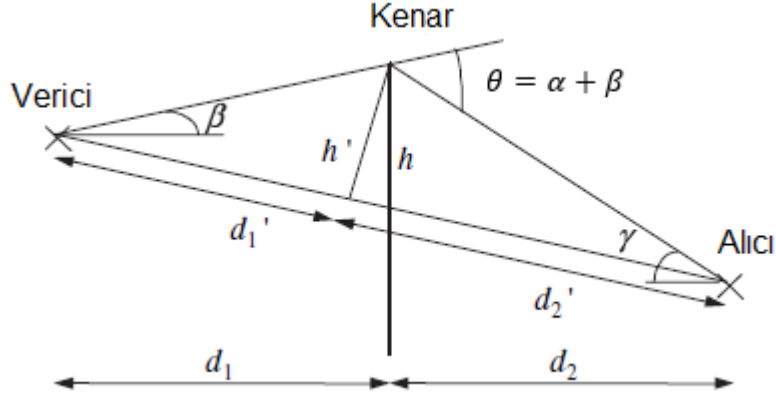
2.1.2. Kırınım Kaybı

Bir yayılım yolunda bulunan bir engelin ne kadar kırınım kaybı yarattığı kırınım parametresi kullanılarak çeşitli yöntemlerle bulunabilir. Bu yöntemlere geçmeden önce engellerin tipleri ve yol profillerinin tiplerini tanımlayalım.

Bir engel, eğer diğer engellerle hiçbir kesişim göstermiyorsa bu engel izole bir engel (*İng.* isolated obstacle) olarak tanımlanabilir [17]. Bu engelin izole sayılabilmesi için iki tarafından da en az birinci Fresnel bölgesinin 0.6'sı kadar yakınında başka bir engel olmamalıdır.

Kırınım kayıpları hesaplanırken yol topolojileri (*İng.* terrain) üçe ayrılır. Birincisi düz topoloji (*İng.* smooth terrain) olarak tanımlanır ve dünya yüzeyinin kendisi ve dünya yüzeyine benzer şekilde olan uzun düz engellerin kırınım bölgesine girmesiyle oluşur [17]. İnişli yokuşlu araziler (*İng.* rolling terrain) ise pek çok küçük tepeden oluşan topolojide arazilerdir [17]. Pek çok izole engelden oluşan araziler ise son yol topolojileri olarak verilir [17].

Kırınım, elektromanyetik dalgaların keskin noktalara çarparak ikincil dalga kaynağı oluşturmasıyla oluşur. Bu durumda keskin noktaları bıçak kenarı engeller olarak modellemek mümkün olacaktır (Şekil 2.4). Kırınım parametresi (v) yol profilinde bulunan her bir engel için alıcı ve verici antene olan uzaklığı ve dalga boyu cinsinden yazılan bir formülasyonla bulunur (Denklem 2.7) [12].



Şekil 2.4 Bıçak kenarı model parametreleri [2]'den uyarlanmıştır.

θ : kırınım açısı (rad)

α ve β : antenlerin açısı (rad)

$$v = h' \sqrt{\frac{2(d_1' + d_2')}{\lambda d_1' d_2'}} \quad (2.7)$$

h : engel yüksekliği

Bir yayılım yolunda çoğu zaman $d_1, d_2 \gg h$ olduğu için denklem (2.7) denklem (2.8)'e dönüştürülebilir.

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (2.8)$$

Kırınım parametresi (v), Fresnel zone açıklığı (h/r_n) cinsinden denklem (2.9) ile ifade edilebilir.

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = \frac{h}{r_n} \sqrt{2n} = \frac{h\sqrt{2}}{r_1} \quad (2.9)$$

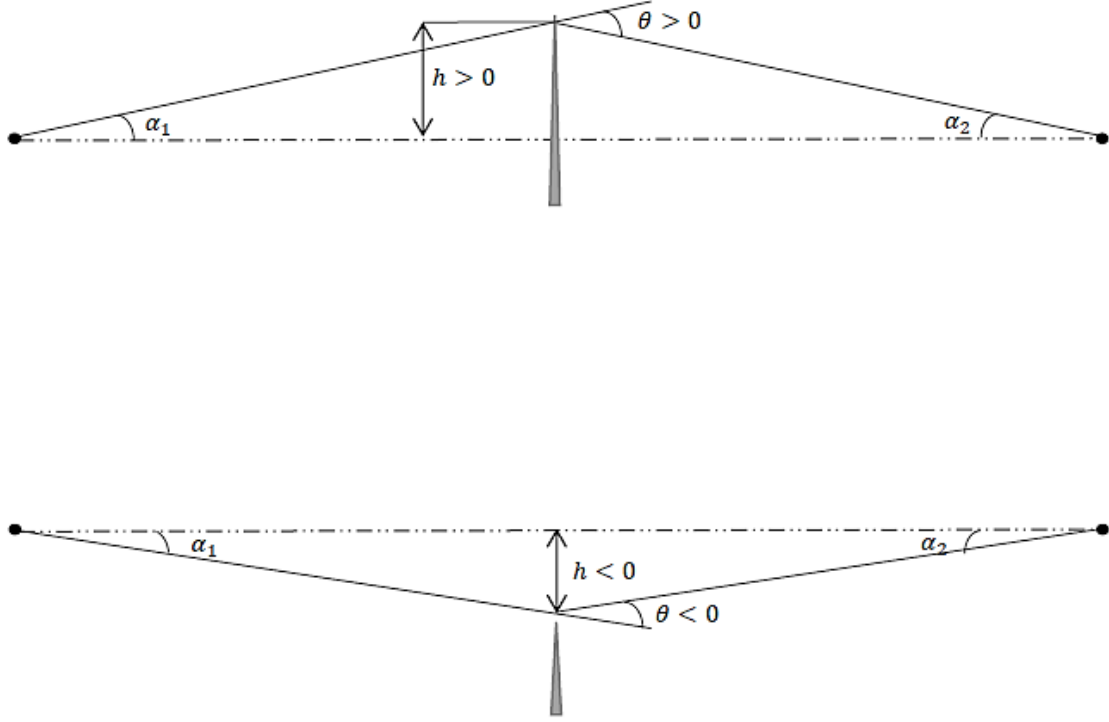
Bundan sonraki bölümlerde öncelikle yol profilinde tek engelin bulunması durumunda kırınım parametresi kullanılarak kırınım kaybı hesaplama yöntemleri tanıtılacaktır. Sonrasında ise yol profilinde birden fazla engel bulunduğu durumda kırınım kaybı hesaplamasını hesaplamaya yönelik diğer yöntemler tanıtılacaktır.

2.2. Tek Engel için Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımları

Kırınım kaybı hesaplamaları yapabilmek için engellerin şeklini ihmal edilebilir kalınlığa sahip bıçak-sırtı engeller olarak ya da üstte iyi tanımlanmış bir eğrilik yarıçapına sahip kalın, düz bir engel olarak idealleştirmek gereklidir [3]. Her bir yol profili öncelikle bıçak-sırtı engel olarak düşünülür ve getirdiği kırınım kaybı hesaplanır. Daha sonra eğer engeller belirli bir yarıçapa sahip yuvarlak tepeler olarak modellenmek isteniyor ise ekstra bir kayıp terimi daha hesaplanmalıdır.

2.2.1. Bıçak-Sırtı Engeller için Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımları

Bir bıçak-sırtı engelin geometrisi Şekil 2.5'te verilmiştir. Bu engel görüş hattını kapattığı zaman engel yüksekliği, alıcı ve verici arasında çizilen düz çizginin yukarısında kalan alan yükseklik pozitif olarak alınır ($h > 0$). Bu durumda engelin açısı ($\theta > 0$) da pozitif olacaktır. Eğer engel bu düz çizginin daha aşağısında kalıyorsa yani görüş hattını kapatmıyorsa yükseklik ve engel açısı negatif olarak alınır($h, \theta < 0$) [3].



Şekil 2.5 Bıçak-sırtı engel geometrisi

Kırınım parametresinin denklem (2.8)'de verilen eşitliği engel açısı cinsinden de yazılabilir.

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (2.10)$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (2.11)$$

2.2.1.1. Fresnel-Kirchhoff Kırınım Kaybı Denklemi (Yöntem 1)

Huygens ilkesine Fresnel integralleri uygulandığında, bıçak-sırtı engelin kırınım kaybını hesaplamak için Fresnel-Kirchhoff kırınım kaybı denklemi (denklem (2.12)) elde edilir. Bu denklem bir cosinüs (denklem (2.13)) ve bir sinüs (denklem (2.14)) Fresnel integralleriyle hesaplanır [1]. Bu fonksiyon içerisinde Fresnel integralleri bulundurması nedeniyle kırınım kaybı hesabı için kullanılan en doğru yöntemdir. Fakat aynı neden hesaplamayı süre olarak uzatmaktadır.

$$F_d(v) = \int_0^v \exp\left(j \frac{\pi s^2}{2}\right) ds = C(v) + jS(v) \quad (2.12)$$

v : kırınım parameresi

Fresnel İntegralleri:

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi s^2}{2}\right) ds \quad (2.13)$$

$$S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi s^2}{2}\right) ds \quad (2.14)$$

2.2.1.2. ITU Kırınım Kaybı Yaklaşımı [Yöntem 2]

Fresnel-Kirchhoff kırınım kaybı denklemi (Yöntem 1) Fresnel integralleri içermesi yüzünden hesaplama yapmak daha zor olduğu için, ITU tavsiyelerinde denklem (2.15)'teki formdan daha basit bir forma dönüştürülmüştür (denklem 2.16) [17]. Bu yöntem kırınım katsayısının 0.78'den büyük olduğu değerler için hesaplama yapan doğrusal bir formüldür ve desibel cinsinden ifade edilir. Yöntem 1'e göre daha kolay ve daha hızlı hesaplama sağlar.

$$J(v) = -20 \log \left(\frac{\sqrt{[1 - C(v) - S(v)]^2 + [C(v) - S(v)]^2}}{2} \right) \quad (dB) \quad (2.15)$$

$$J(v)(dB) = 20 \log_{10} |F_d(v)|$$

$$= \begin{cases} -6.9 - 20 \log_{10} \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right), & v > -0.78 \\ 0, & v \leq -0.78 \end{cases} \quad (2.16)$$

2.2.1.3. Deygout Yaklaşımı [Yöntem 3]

Deygout, 1991'de yayınladığı [19] makalesinde engellerden kaynaklanan kırınım kaybını hesaplamak için daha farklı bir yaklaşım uygulamıştır (Denklem 2.17). Bu yaklaşımda parametre olarak h/r kullanılmaktadır.

$$L(dB) = \begin{cases} 0, & h/r < -0.5 \\ 6 + \frac{12h}{r}, & -0.5 \leq h/r \leq -0.5 \\ 8 + \frac{8h}{r}, & 0.5 \leq \frac{h}{r} \leq 1 \\ 16 + 20 \log\left(\frac{h}{r}\right), & h/r > 1 \end{cases} \quad (2.17)$$

h : engel yüksekliği (m)

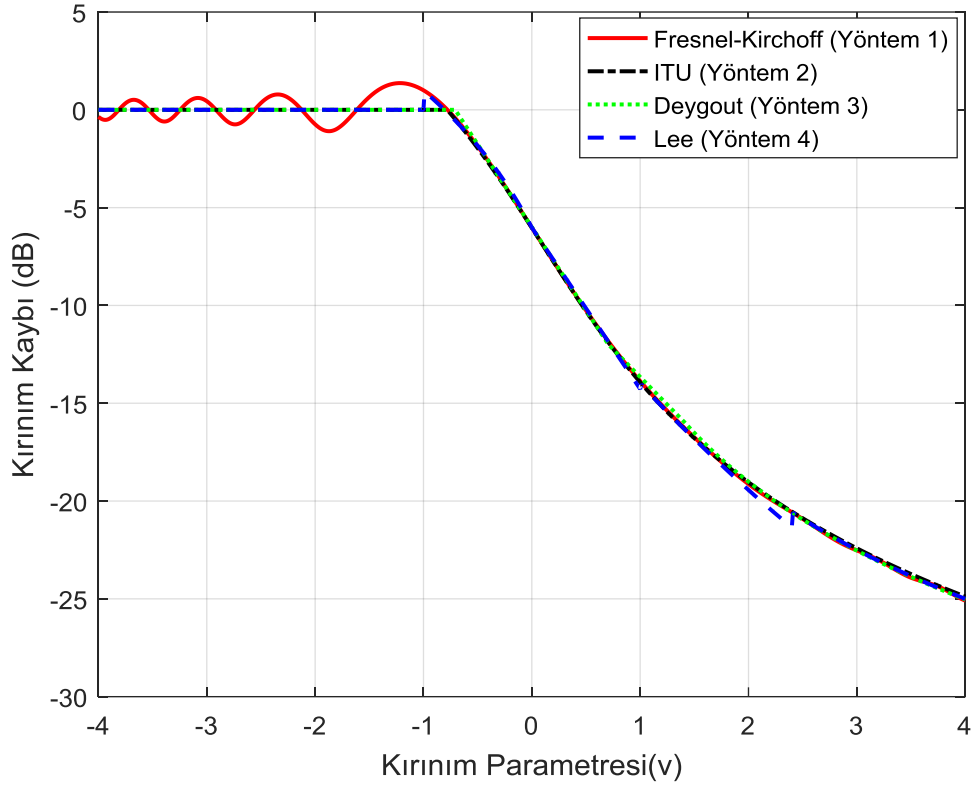
r : Birinci Fresnel bölgesinin yarıçapı (m)

2.2.1.4. Lee Yaklaşımı [Yöntem 4]

Bir bıçak-sırtı engelin kırınım kaybı hesaplanırken Fresnel-Kirchhoff Yöntemine daha uygun bir sonuç veren Lee Yaklaşımı [20] da kullanılabilinecek yararlı bir yöntemdir. Lee yaklaşımını hesaplarken kırınım katsayısı gereklidir (Denklem (2.18)).

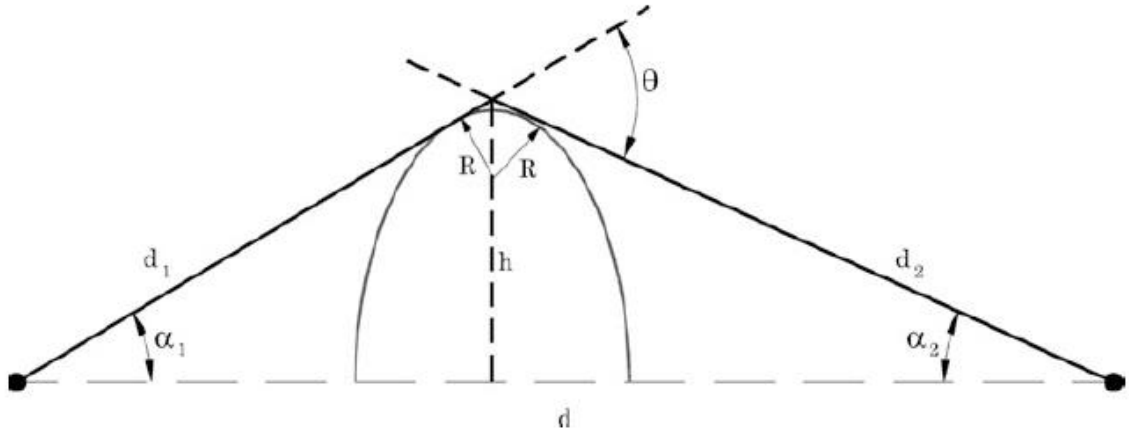
$$G_d(dB) = \begin{cases} 0, & v < -1 \\ 20 \log(0.5 - 0.62v), & -1 \leq v \leq 0 \\ 20 \log(0.5 \exp(-0.95v)), & 0 \leq v \leq 1 \\ 20 \log_{10}\left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2}\right), & 1 \leq v \leq 2.4 \\ 20 \log\left(\frac{0.225}{v}\right), & v > 2.4 \end{cases} \quad (2.18)$$

Şekil 2.16'da verilen Kırınım kaybı-Kırınım parametresi grafiğinde, Yöntem 1'in $v \leq -0.7$ 'den küçük değerler için 0 dB kırınım kaybı etrafında osilasyona sahip olduğu görülmektedir. Lee yönteminin $-1 \leq v \leq -0.78$ aralığında Yöntem 1'le daha uyumlu olduğu fakat $1.65 \leq v \leq 2.4$ aralığında ise diğer tüm yöntemlerden farklı sonuç verdiği görülmüştür. Yöntem 2 ve Yöntem 3 ise $v \leq -0.7$ 'den küçük değerler için 0 dB kırınım kaybı vermektedir.



Şekil 2.6 Tüm yöntemler için kırınım kaybı-Fresnel kırınım parametresi grafiği

2.2.2. Yuvarlak Kenarlı Tepeler İçin Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımı



Şekil 2.7 Yuvarlak kenarlı tepeler geometrisi [1]

d_1 ve d_2 : Alıcı ve verici antenin Fresnel yarıçapı hesaplanmak istenen noktaya olan yatay uzaklıkları (km)

h : engel yüksekliği (m)

α_1 ve α_2 : antenlerin açıları (rad)

θ : engel açısı (rad)

R : engelin eğrilik yarıçapı (m)

Eğer kullanılan arazinin yol profilinde yuvarlak tepelere (*Ing.* rounded edge) benzeyen yapılar bulunmakta ise bu tip engelleri üstte iyi tanımlanmış bir eğrilik yarıçapına sahip, kalın, düz engeller olarak idealleştirmek gereklidir. Bu noktada önemli olan öncelikle engeli bıçak-sırtı olarak modelleyip kırınım kaybı hesaplandıktan sonra bir düzeltme terimi eklenmesidir (Denklem (2.19)).

$$A = J(v) + T(m, n) \quad (2.19)$$

Bu noktada kırınım parametresi formülünü pratik birimlerle yazmak, $T(m, n)$ denklemini yazmayı basitleştireceğinden faydalı olacaktır. Kırınım parametresi:

$$v = 0.0316h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (2.20)$$

h : engel yüksekliği (m)

λ : dalga boyu (m)

d_1 ve d_2 : Alıcı ve verici antenin engelin uç noktasına olan uzaklıkları (km)

Ek terim olan $T(m, n)$ 'i hesaplamak için aşağıdaki formüller kullanılır:

$$T(m, n) = km^b \quad (2.21)$$

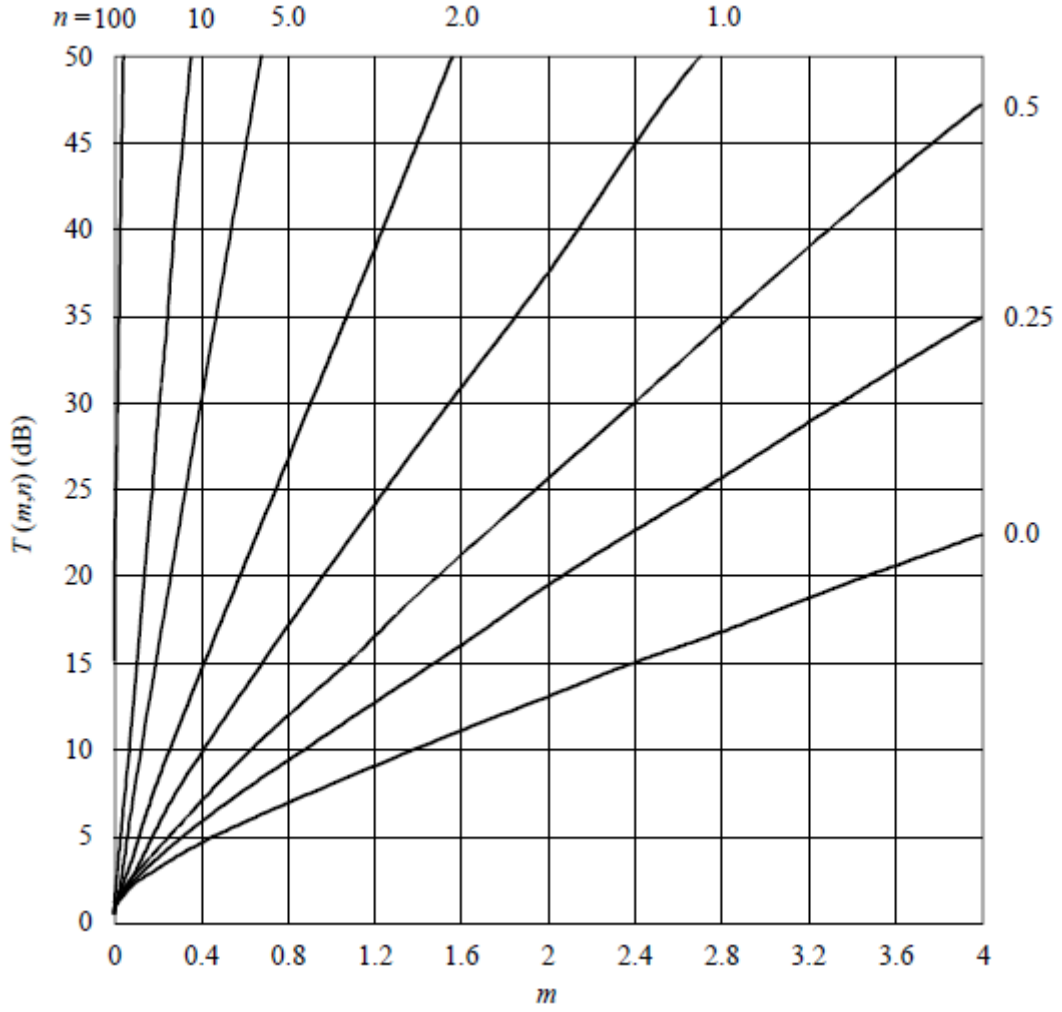
$$k = 8.2 + 12.0n \quad (2.22)$$

$$b = 0.73 + 0.27[1 - \exp(-1.43n)] \quad (2.23)$$

$$m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] / \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3} \quad (2.24)$$

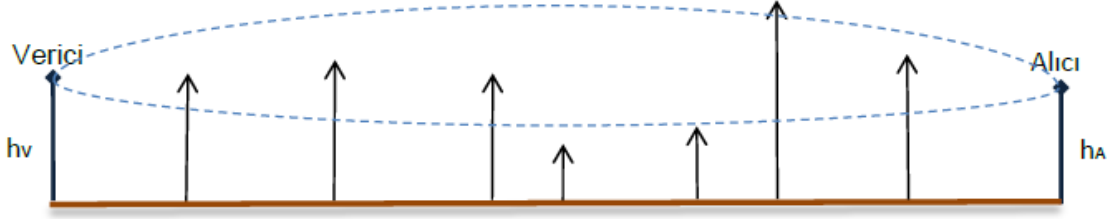
$$n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} / R \quad (2.25)$$

Yarıçap R , 0'a yaklaşırsa m ve $T(m, n)$ 0'a yaklaşır ve bu da engelin bıçak-sırtı engele dönüşmesi anlamına gelir. Ayrıca $T(m, n)$ fonksiyonu Şekil 2.8'deki grafikten de bulunabilmektedir.



Şekil 2.8 Yuvarlak kenarlı tepeler geometrisi [3]

2.3. Çoklu Bıçak-Sırtı Engeller İçin Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımları



Şekil 2.9 Çoklu bıçak-sırtı engele sahip yol profili örneği

Şekil 2.9'daki gibi bir çoklu bıçak sırtı geometrisine sahip bir yol profili, kırınım kaybı bulunmak istendiğinde tekli bıçak-sırtı engele göre daha karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir. Bu geometride birinci engele çarpan dalgalar artık düzlem dalga olmayacaktır ve deterministik bir kayıp tahmini yapmak için, her bir engel için Fresnel integrallerinin ard arda hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda N adet engel varsa N boyutlu bir Fresnel integrali hesaplanır ve bu N boyutlu Fresnel integralleri hesaplamak komplekstir ve zaman alır. Bu nedenle N boyutlu Fresnel integrallerini içermeyen çok daha basit analitik veya geometrik birtakım hesaplamalar içeren pek çok farklı model geliştirilmiştir. Bu bölümde sırasıyla Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler yöntemleri anlatılacaktır.

Kırınım kayıpları hesaplanırken her bir engel için hesaplanması gereken v parametresi için denklem 2.26'daki $v(d_a, d_b, h)$ fonksiyonu kullanılacaktır.

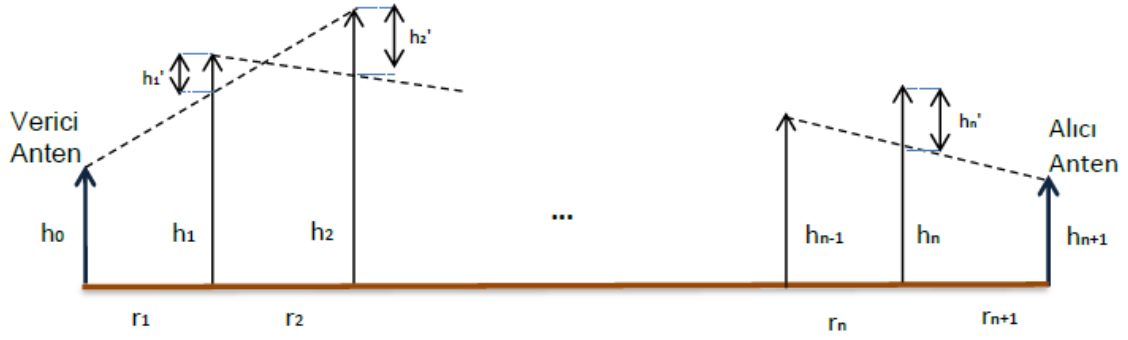
$$v(d_a, d_b, h) = h \sqrt{\frac{2(d_a + d_b)}{\lambda d_a d_b}} \quad (2.26)$$

d_a ve d_b : Kırınım kaybı hesaplanmak istenen noktaya olan yatay uzaklıklar (m)

h : Engel yüksekliği

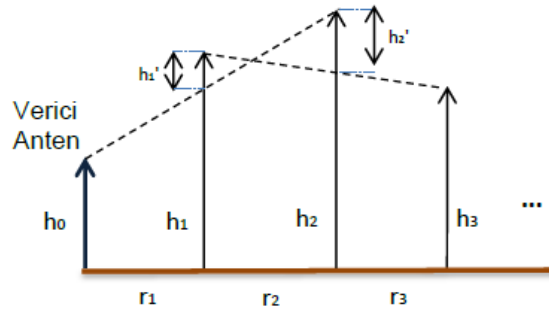
λ : Dalga boyu

2.3.1. Epstein-Peterson Yöntemi



Şekil 2.10 Epstein-Peterson yöntemi için örnek yol profili

Epstein-Peterson yöntemi geometrik hesaplamalarla Fresnel integralleri olmaksızın kırınım kaybını tahmin eden bir yöntemdir [10]. Şekil 2.10'da bir yol profilinin Epstein-Peterson yöntemi için görseli verilmiştir. Buradaki tüm engeller bıçak-sırtı olmasına rağmen, istendiği takdirde tüm engeller istenilen yarıçapa sahip yuvarlak kenarlı tepeler olarak olarak modellenebilmektedir. Ayrıca bazı engeller bıçak-sırtı bazı engeller ise istenen yarıçaplarda yuvarlak kenarlı engeller olarak da modellenebilir.



Şekil 2.11 Epstein-Peterson yöntemi için örnek yol profili

Bir engelin getirdiği kırınım kaybını hesaplamak için öncelikle kırınım parametresinin (v) hesaplanması gerekmektedir. Şekil 2.11'de Epstein-Peterson yöntemini açıklamak için örnek bir yol profilinin verici anten ve üç tane engel'in olduğu kısmı gösterilmiştir. Bu şekil üzerinden açıklamak gerekirse, birinci engelin getirdiği

kırınım kaybını hesaplamak için, öncelikle verici anten ve ikinci engelin tepe noktaları arasında sanal düz bir çizgi çekilir. Bu çizginin birinci engeli kestiği nokta ve birinci engelin tepe noktasındaki yükseklik o engel için efektif yükseklik olacaktır (h_1'). Kırınım parametresi denklem (2.26) kullanılarak hesaplandığında gerekli d_a ve d_b değerleri ise sırasıyla Şekil 2.11'deki r_1 ve r_2 değerleri olarak alınır [10]. Aynı şekilde bir sonraki engele geçildiğinde ise kırınım parametresi Şekil 2.11'deki h_2' , r_2 ve r_3 değerlerinden hesaplanır [10] (Denklem (2.27)). Diğer engeller için de aynı işlem alıcı antene kadar tekrarlanır.

$$\begin{aligned} v_1 &= v(r_1, r_2, h_1') \\ v_2 &= v(r_2, r_3, h_2') \\ v_3 &= v(r_3, r_4, h_3') \end{aligned} \quad (2.27)$$

...

Bulunan bu kırınım parametrelerinden Bölüm 2.2.1'de verilen kırınım kaybı hesaplama yöntemlerinden hangisi tercih ediliyor ise onunla kırınım kaybı hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} F_1 &= F(v_1) \\ F_2 &= F(v_2) \\ F_3 &= F(v_3) \end{aligned} \quad (2.28)$$

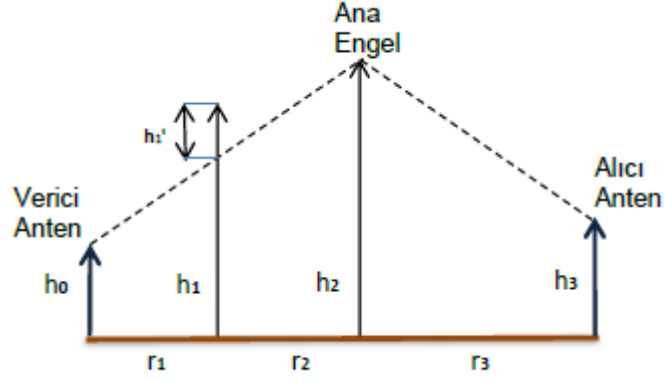
...

Her bir engel için bulunan kırınım kayıpları Denklem (2.29)'deki gibi birbirine eklenir ve bu yol profilinin toplam kırınım kaybı bulunmuş olur.

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots \quad (2.29)$$

2.3.2. Deygout Yöntemi

2.3.2.1. İki Bıçak-Sırtı Engel Bulunan Yol Profiline Deygout Yöntemi Uygulanması



Şekil 2.12 Deygout yöntemi için örnek yol profili (iki engel)

Deygout yöntemini anlayabilmek için öncelikle iki engelin bulunduğu Şekil 2.12'deki senaryo incelendiğinde, iki engelin de sanki yol profilinde başka engel bulunmuyormuş gibi verici anten ve alıcı anten mesafeleri kullanılarak kişisel kırınım parametreleri hesaplanır.

Kırınım parametresi denklem (2.26)'deki fonksiyonlarla ifade edildiğinde her bir engelin sahip olduğu kırınım parametresi denklem (2.30)'deki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} v_1 &= v(r_1, r_2 + r_3, h_1) \\ v_2 &= v(r_1 + r_2, r_3, h_2) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Bu engellerden en büyük v 'ye sahip olan bulunur ve bu engel ana engel olarak kabul edilir. Şekil 2.12'de en büyük v 'ye sahip olan engelin ikinci engel olduğu varsayılmıştır. Burada en büyük v 'ye sahip olan engel, en yüksek engel olarak verilmiş olsa da tam tersi de olabilmektedir. Ana engelin kırınım kaybı v_2 (denklem (2.31)) ile bulunur.

$$F_{AnaEngel} = F(v_2) \quad (2.31)$$

Diğer engelin kırınım kaybını hesaplamak için ana engelden verici antene bir çizgi çekilir (Şekil 2.12) ve Epstein-Peterson yönteminde olduğu gibi engelin efektif

yüksekliği h_1' bulunur. Birinci engel için v parametresi bulunan h_1' yüksekliği ile tekrar hesaplanır.

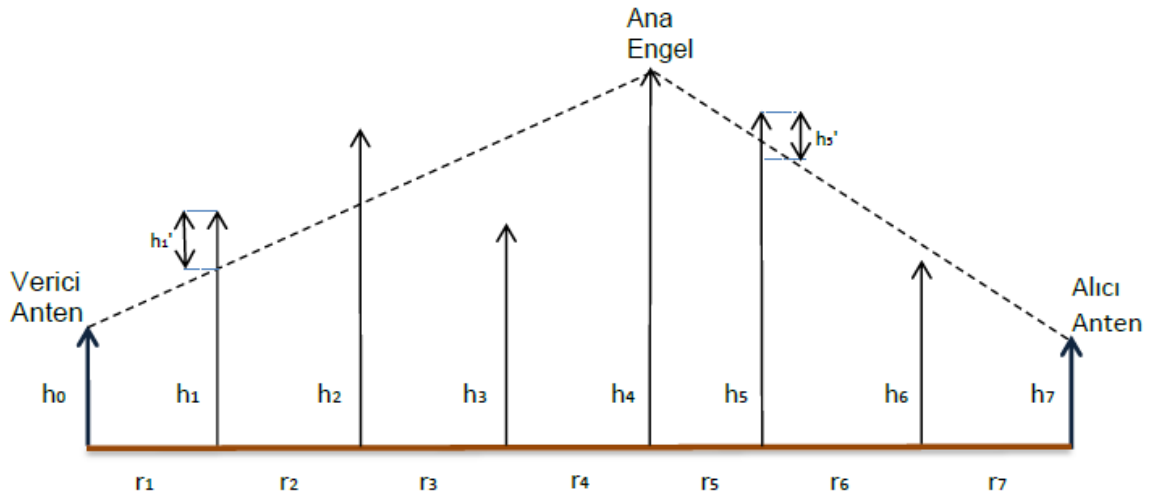
$$v_1' = v(r_1, r_2, h_1') \quad (2.32)$$

Deygout yöntemiyle toplam kırınım kaybını bulmak için birinci engel için bulunan v_1' ile kırınım kaybı bulunur ve ana engelin kırınım kaybına eklenir.

$$F_{Total} = F_{AnaEngel} + F(v_1') \quad (2.33)$$

2.3.2.2. Çoklu Bıçak-Sırtı Engel Bulunan Yol Profiline Deygout Yöntemi Uygulanması

Ortamda daha çok engel bulunduğunda ise iki engel için anlatılan Deygout yönteminin aynı şekilde tekrarlamalı bir şekilde diğer yöntemlere de uygulanması gerekmektedir. Şekil 2.13'deki yol profilinden çoklu engeller için bu yöntemin nasıl uygulanacağı açıklanmıştır.



Şekil 2.13 Deygout Yöntemi için Örnek Yol Profili (6 Engel) 1

Şekil 2.13'deki yol profilinde altı adet engel bulunmaktadır. Öncelikle tüm engeller için ayrı ayrı kırınım parametreleri hesaplanır.

$$\begin{aligned} v_1 &= v(r_1, r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6 + r_7, h_1) \\ v_2 &= v(r_1 + r_2, r_3 + r_4 + r_5 + r_6 + r_7, h_2) \\ v_3 &= v(r_1 + r_2 + r_3, r_4 + r_5 + r_6 + r_7, h_3) \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned}
v_4 &= v(r_1 + r_2 + r_3 + r_4, r_5 + r_6 + r_7, h_4) \\
v_5 &= v(r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5, r_6 + r_7, h_5) \\
v_6 &= v(r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6, r_7, h_6)
\end{aligned}$$

En yüksek kırınım parametresine sahip engel bulunur.

$$\max(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6) = v_4 \quad (2.35)$$

Dördüncü engel en yüksek kırınım parametresine sahip engel olduğu için ana engel olarak kabul edilir. Ana engelin getirdiği kırınım kaybı v_4 ile bulunur.

$$F_{AnaEngel} = F(v_4) \quad (2.36)$$

Bu engelden verici antene çizgi çekilmeden önce, ana engelin sağ tarafında kalan 1, 2 ve 3 numaralı engellerin kırınım parametreleri ana engel alıcı antenmiş gibi düşünülerek tekrar hesaplanır ve hangisinin en yüksek kırınım parametresine sahip olduğu bulunur.

$$\begin{aligned}
v_1 &= v(r_1, r_2 + r_3 + r_4, h_1) \\
v_2 &= v(r_1 + r_2, r_3 + r_4, h_2)
\end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned}
v_3 &= v(r_1 + r_2 + r_3, r_4, h_3) \\
\max(v_1, v_2, v_3) &= v_1
\end{aligned} \quad (2.38)$$

Bu üç engelden en yüksek kırınım parametresine sahip olan engel 1 numaralı engeldir. Bundan sonra ana engelden verici engele bir çizgi çekilir ve h_1' efektif yüksekliği bulunur (Şekil 2.13). Bu efektif yükseklik h_1' ile öncelikle tekrar kırınım parametresi (v_1') bulunur ve bulunan v_1' ile 1 numaralı engelin getirdiği kırınım kaybı hesaplanır.

$$v_1' = v(r_1, r_2 + r_3 + r_4, h_1') \quad (2.39)$$

$$F_1 = F(v_1') \quad (2.40)$$

Aynı işlemler ana engelin sol tarafındaki engellere de uygulanacaktır. Bu sefer ana engel verici anten olarak düşünülerek hesaplamalar yapılır.

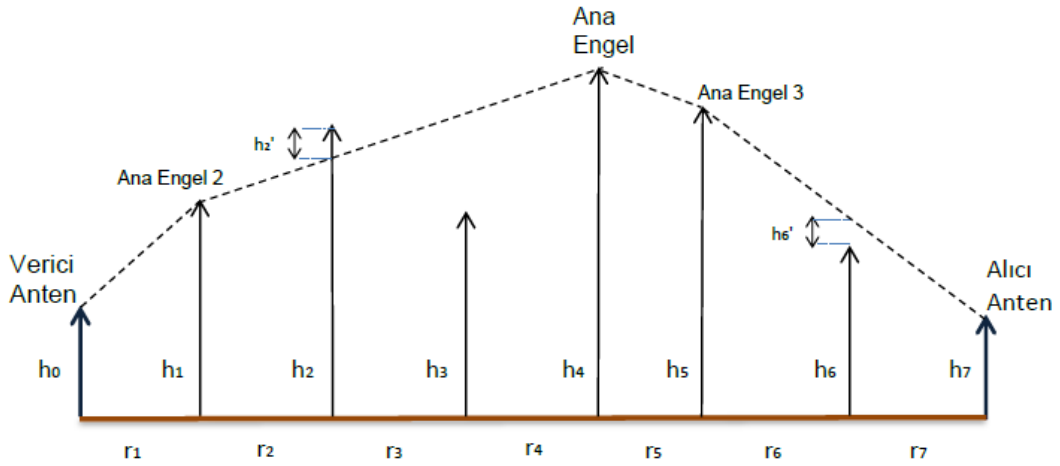
$$\begin{aligned}
v_5 &= v(r_5, r_6 + r_7, h_5) \\
v_6 &= v(r_5 + r_6, r_7, h_6)
\end{aligned} \quad (2.41)$$

$$\max(v_5, v_6) = v_5 \quad (2.42)$$

Ana engelden alıcı engele bir çizgi çekilir ve h_5' efektif yüksekliği bulunur (Şekil 2.13). Bu efektif yükseklik h_5' ile öncelikle tekrar kırınım parametresi (v_5') bulunur ve bulunan v_5' ile 5 numaralı engelin getirdiği kırınım kaybı hesaplanır.

$$v_5' = v(r_5, r_6 + r_7, h_5') \quad (2.43)$$

$$F_5 = F(v_5') \quad (2.44)$$



Şekil 2.14 Deygout Yöntemi için Örnek Yol Profili (6 Engel) 2

Ana engelin sağında ve solunda bulunan maksimum kırınım parametresine sahip engeller bir sonraki döngü için bulunan ana engellerdir. Ana engelin sol tarafında kalan engeller için Şekil 2.14'te gösterilen Ana Engel 2 (1. engel) için verici antene ve birincil ana engel için iki çizgi çizilir ve sanki toplam yol profili verici anten ve birincil ana engelmış gibi aynı işlemler uygulanır. Birinci engelin sol tarafında engel bulunmadığı için hesaplanacak bir kırınım kaybı bulunmamaktadır (Şekil 2.14), fakat sağ tarafında bulunan ikinci ve üçüncü engel için kırınım kaybının hesaplanması gerekmektedir.

$$v_2 = v(r_2, r_3 + r_4, h_2) \quad (2.45)$$

$$v_3 = v(r_2 + r_3, r_4, h_3)$$

$$\max(v_2, v_3) = v_2 \quad (2.46)$$

Birinci engelden ana engel olan dört numaralı engele çizgi çekilip ikinci engelin efektif yüksekliği bulunur h_2' . Bulunan h_2' ile:

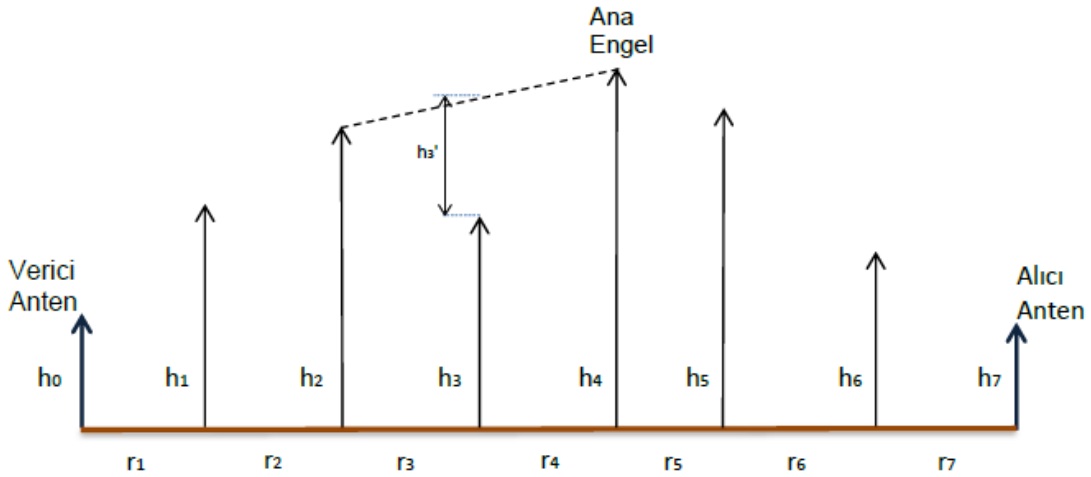
$$v_2' = v(r_2, r_3 + r_4, h_2') \quad (2.47)$$

$$F_2 = F(v_2') \quad (2.48)$$

Ana engelin sağ tarafı tekrar incelendiğinde ise ana engel 3 olarak tanımlanan engelin sağ tarafında tek engel olduğu için bu engelden alıcı antene çekilen çizginin altında kalan alan efektif yüksekliği h_6' verir. Buradaki efektif yükseklik negatiftir.

$$v_6' = v(r_6, r_7, h_6') \quad (2.49)$$

$$F_6 = F(v_6') \quad (2.50)$$



Şekil 2.15 Deygout Yöntemi için Örnek Yol Profili (6 Engel) 2

Kırınım kaybı hesaplanmayan tek engel 3 numaralı engeldir. Efektif yüksekliği bulmak için diğer bir ana engel görevi gören ikinci engelden birincil ana engele (engel 4) çizgi çekilir ve h_3' hesaplanır (Şekil 2.15).

$$v_3' = v(r_3, r_4, h_3') \quad (2.51)$$

$$F_3 = F(v_3') \quad (2.52)$$

Sonunda her bir engel için bulunan kırınım kaybı hesaplanır.

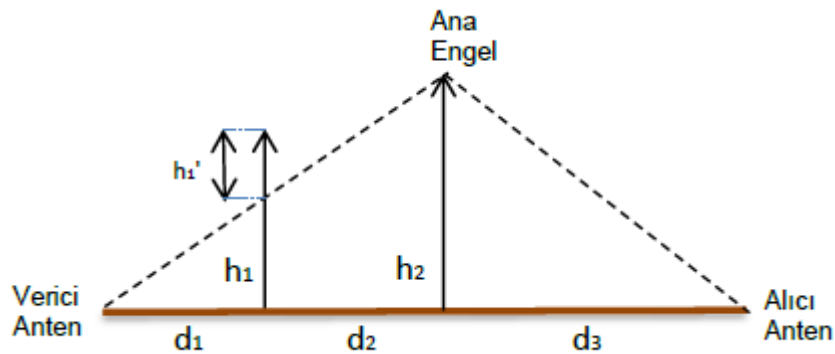
$$F_{Total} = F_{AnaEngel} + F_1 + F_2 + F_3 + F_5 + F_6 \quad (2.53)$$

Deygout yöntemi Epstein-Petersona göre uygulaması hesaplama açısından biraz daha karmaşık bir yöntemdir. Bu yöntem için algoritma geliştirildiğinde özyinelemeli (*İng.* recursive) fonksiyonlarla yazmak sonuca ulaşmak için çok daha faydalı olmaktadır.

2.3.2.3. Deygout Yöntemi için Düzeltme Terimi

Deygout [12]'deki makalesinde önceki bölümlerde anlatıldığı gibi bulunan kırınım parametrelerini bulduktan sonra kırınım kaybını Millington'un nomograph'larıyla bulunmasını önermiştir. İki engel birbirine çok yakın konumlandırıldığında Deygout yöntemi hesaplama sonucunu olması gerekenden daha fazla hesaplamaktadır. Millington'un sunduğu grafiklerin bu durumu çözmesi beklense de daha sonra yapılan çalışmalarla yöntemde bir düzeltme yapılması gerekti. Bu yüzden Deygout [19] makalesini yayınlarak soruna çözüm üretmiştir.

[19]'da Bölüm 2.2.1.3 anlatılan Yöntem 3 olarak isimlendirdiğimiz tek bıçak-sırtı engel için kırınım kaybı hesaplama yöntemi önerilmiştir. Ayrıca yöntemin kendisine de bir takım düzeltme terimi getirmiştir. Bu düzeltme terimini açıklamak için Şekil 2.16'da bulunan iki bıçak-sırtı engelin bulunduğu yol profili kullanılacaktır. Bu şekilde engellerin yükseklikleri alıcı ve verici antenin yüksekliklerine göre normalize edilmiştir.



Şekil 2.16 Normalize edilmiş yol profili (2 Engel)

İki engel arasındaki boşluklar α açısıyla denklem (2.54)'teki gibi karakterize edilmiştir.

$$\tan(\alpha) = \sqrt{\frac{d_2(d_1 + d_2 + d_3)}{d_1 d_3}} \quad (2.54)$$

Her bir engelin birinci Fresnel yarıçapı hesaplandığında denklem (2.55) ve (2.56) elde edilir.

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1(d_2 + d_3)}{d_1 + d_2 + d_3}} \quad (2.55)$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{\lambda d_3(d_1 + d_2)}{d_1 + d_2 + d_3}} \quad (2.56)$$

Bundan sonra kırınım kaybıyla aynı doğrultuda olan p ve q parametreleri tanımlanmalıdır (denklem 2.57-2.58). Burada p her zaman ana engel için hesaplanan bir parametre olmalıdır.

$$q = \frac{h_1}{r_1} \sqrt{2} \quad (2.57)$$

$$p = \frac{h_2}{r_2} \sqrt{2} \quad (2.58)$$

Eğer burada bulunan parametreler $q < p$ şeklindeyse düzeltme terimi denklem (2.59)'daki şekilde tanımlanır.

$$DT = \left(12 - 20 \log_{10} \left(\frac{2}{1 - \alpha/\pi}\right)\right) \left(\frac{q}{p}\right)^{2p} \quad (2.59)$$

Eğer $q > p$ şeklindeyse düzeltme terimi p ve q parametreleri yer değiştirilerek denklem (2.60)'daki şekilde tanımlanır.

$$DT = \left(12 - 20 \log_{10} \left(\frac{2}{1 - \alpha/\pi}\right)\right) \left(\frac{p}{q}\right)^{2q} \quad (2.60)$$

Eğer $q = p$ şeklindeyse düzeltme terimi denklem (2.61)'deki haline indirgenir. Bu durumda iki engelin yükseklikleri aynıdır.

$$DT = \left(12 - 20 \log_{10} \left(\frac{2}{1 - \alpha/\pi} \right) \right) \quad (2.61)$$

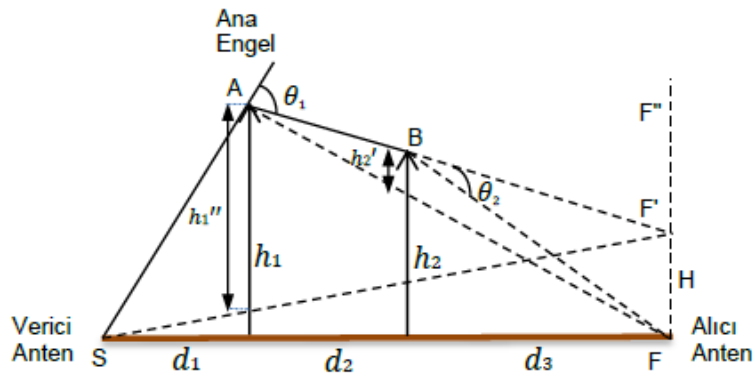
Toplam kırınım kaybını hesaplamak için Bölüm 2.3.2.1'de anlatılan şekilde ana engelin getirdiği kırınım kaybı ve diğer engelin getirdiği kırınım kaybı toplanır ve bunlardan düzeltme terimi çıkartılır.

$$F_{Total} = F_{AnaEngel} + F_1 - DT \quad (2.62)$$

Eğer bu düzeltme terimi çoklu bıçak-sırtı engeller modeline uyarlanmak istenir ise ana engel dışındaki tüm engeller için tek tek düzeltme terimi uyarlamak gerekecektir. Her bir engelin kırınım kaybını hesaplamak için hesaplanan v' parametresi bulunduğu o engel için q parametresi bulunmalı ve bir önceki döngüdeki ana engelin h ve r değerlerinden p parametresi de bulunarak düzeltme terimi bulunmalıdır. Bulunan bu düzeltme terimleri engeller için hesaplanan kırınım kaybından çıkarılmalıdır.

2.3.3. Giovanelli Yöntemi

Giovanelli yöntemi Deygout yöntemi geliştirilerek oluşturulmuş bir yöntemdir [11]. Bu yöntemde Deygout yönteminden farklı olarak ana engelin kırınım parametresi daha farklı hesaplanır.



Şekil 2.17 Giovanelli yöntemi için yol profili geometrisi

Şekil 2.17’de bir Giovanelli geometrisi gösterilmiştir. Bu şekilde birinci engel ana engel olarak bulunmuştur. Bu geometride F' noktası, AB doğrusunun FF' doğrusu üzerine izdüşümünün alınmasıyla bulunur ve buradan h_1'' uzunluğu (SF' doğrusunun üstünde kalan fazla uzunluk) şu şekilde tanımlanır [2]:

$$h_1'' = h_1 - \frac{d_1 H}{d_1 + d_2 + d_3} \quad (2.63)$$

Burada $H = h_2 + m d_3$ ve $m = (h_2 - h_1)/d_2$ şeklinde hesaplanmaktadır. İkinci engelin efektif yüksekliği h_2' ise:

$$h_2' = h_2 - \frac{d_3 h_1}{d_2 + d_3} \quad (2.63)$$

Bulunan bu yüksekliklerle kırınım kaybı hesaplanır.

$$v_1' = v(d_1, d_2 + d_3, h_1'') \quad (2.64)$$

$$F_{AnaEngel} = F(v_1') \quad (2.65)$$

$$v_2' = v(d_2, d_3, h_2') \quad (2.66)$$

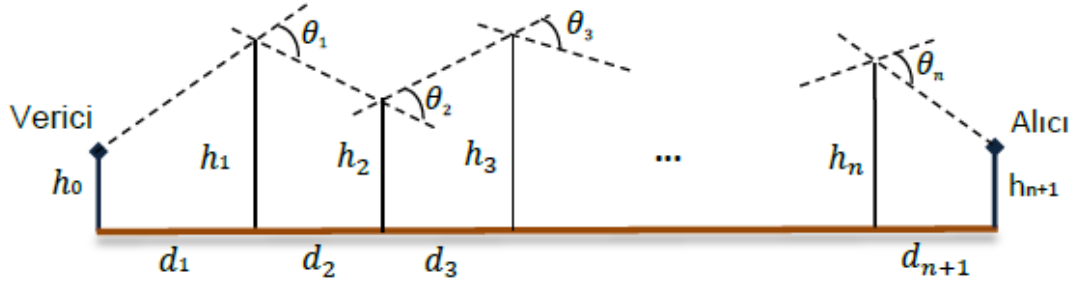
$$F_2 = F(v_2') \quad (2.67)$$

$$F_{total} = F_{AnaEngel} + F_2 \quad (2.68)$$

Giovanelli yönteminde, Deygout yönteminde olduğu gibi aynı işlemler tekrarlanarak çoklu bıçak-sırtı engeller için hesaplanabilir. Sadece ana engelin efektif yüksekliğini Giovanelli yöntemine göre değiştirmek gerekmektedir.

2.3.4. Vogler Yöntemi

Bu kısma kadar açıklanan Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli yöntemleri, geometrik özelliklere göre hesaplamalar içermektedir. Fakat Vogler yönteminde daha analitik hesaplar yapılmaktadır ve bu nedenle yapılan hesaplamalar daha güvenilir sayılmaktadır. Vogler yöntemi Furutsu'nun düz silindirik engeller dizisi için genelleştirilmiş artık serisi formülasyonundan [8] başlayarak, Fresnel-Kirchhoff teorisini kullanarak bir sönümlenme fonksiyonu türetmiştir (denklem (2.69)) [21].



Şekil 2.18 Vogler yöntemi geometrisi

$$A = \frac{1}{2^N} C_m e^{\sigma_N} \int_{\beta_1}^{\infty} \dots \int_{\beta_N}^{\infty} e^{2f} e^{-(x_1^2 + \dots + x_N^2)} dx_1 \dots dx_N \quad (2.69)$$

N : engel sayısı

Sönümlenme fonksiyonunda bulunan f, σ, β, α ve C_N parametreleri ise sırasıyla Denklem (2.70), (2.71), (2.72), (2.73) ve (2.74)'de verilmiştir [21].

$$f = \begin{cases} 0, & N = 1 \\ \sum_{m=1}^{N-1} \alpha_m (x_m - \beta_m)(x_{m+1} - \beta_{m+1}), & N \geq 2 \end{cases} \quad (2.70)$$

$$\sigma_N = \beta_1^2 + \dots + \beta_N^2 \quad (2.71)$$

$$\beta_m = \theta_m \left[\frac{ikr_m r_{m+1}}{2(r_m + r_{m+1})} \right]^{1/2}, \quad m = 1, \dots, N \quad (2.72)$$

$$\alpha_m = \left[\frac{r_m r_{m+2}}{(r_m + r_{m+1})(r_{m+1} + r_{m+2})} \right]^{1/2}, \quad m = 1, \dots, N-1 \quad (2.73)$$

$$C_N = \begin{cases} 1, & N = 1 \\ \left[\frac{r_2 r_3 \dots r_N r_T}{(r_1 + r_2)(r_2 + r_3) \dots (r_N + r_{N+1})} \right]^{1/2}, & N \geq 2 \end{cases} \quad (2.74)$$

$N = 1$ olduğunda Denklem (2.69) bilinen bir forma dönüşür ve bu denklemler ile tek engel için kırınım fonksiyonu elde edilir.

$$A(N = 1) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{\beta_1^2} \int_{\beta_1}^{\infty} e^{-(x^2)} dx \quad (2.75)$$

$$\beta_1 = \theta_1 \left[\frac{ikr_1 r_2}{2(r_1 + r_2)} \right]^{1/2} \quad (2.76)$$

Yol profilinde daha fazla engelin olduğu durumlar için Vogler, Denklem (2.69)'da integral içinde bulunan $\exp(2f)$ faktörünü güç serilerine dönüştürmüştür [21].

Sönümlenme fonksiyonu, Abramowitz ve Stegun [22] tarafından $I(n, \beta)$ olarak tanımlanan hata fonksiyonunun tekrarlamalı integralleri halinde verilmiştir (denklem (2.77)).

$$\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right) \int_{\beta}^{\infty} (x - \beta)^n e^{-x^2} dx = n! I(n, \beta) \quad (2.77)$$

Sönümlenme fonksiyonu:

$$A = \frac{1}{2^N} C_N e^{\sigma_N} \sum_{m=0}^{\infty} I_m \quad (2.78)$$

Burada tanımlanan I_m ise,

$$I_m = 2^m m! \alpha_1^m I(m, \beta_1) I(m, \beta_2) \quad N = 2 \quad (2.79a)$$

$$I_m = 2^m \sum_{m_1=0}^m \dots \sum_{m_{N-2}=0}^3 \prod_{i=1}^N \left\{ \frac{(m_{i-1} - m_{i+1})!}{(m_i - m_{i+1})!} \right\} \alpha_1^{m_{i-1} - m_i} I(n_i, \beta_i) \quad N \geq 3 \quad (2.79b)$$

$$n_i = m_0 - m_1 \quad i = 1 \quad (2.80a)$$

$$n_i = m_{i-2} - m_i \quad \begin{matrix} 2 \leq i \\ \leq N - 1 \end{matrix} \quad (2.80b)$$

$$n_i = m_{N-2} - m_{N-1} \quad i = N \quad (2.80c)$$

$k \geq N - 1$ olduğunda,

$$\alpha_N \equiv 1 \quad m_0 \equiv m \quad m_k \equiv 0 \quad (2.81)$$

Bir bilgisayar ortamında algoritma sonsuz sayıda çalıştırılmayacağından denklem (2.78) denklem (2.82) formuna dönüştürülür.

$$A = \frac{1}{2^N} C_N e^{\sigma_N} \sum_{m=0}^M I_m \quad (2.82)$$

Burada verilen M değeri hesaplamada tolere edilebilen minimum farklılığı ulaşan değer olarak belirlenmelidir.

Denklem (2.82)'de bulunan I_m 'i nümerik olarak hesaplayabilmek için öncelikle bir C fonksiyonu tanımlanmıştır (Denklem 2.83).

$$C(N-1, m_{N-2}, m_{N-3}) = (m_{N-3})! \alpha_{N-1}^{m_{N-2}} I(m_{N-3}, \beta_{N-1}) I(m_{N-2}, \beta_N) \quad (2.83)$$

Notasyon ise şu şekilde olmaktadır:

$$i = m_{N-L}, \quad j = m_{N-L-1}, \quad k = m_{N-L-2}, \quad (2.84a)$$

$$2 \leq L \leq N-2, \quad N \geq 4 \text{ iken} \quad (2.84b)$$

Bu C fonksiyonunda özyinelemeli ilişki (*İng.* recursive relationship) tanımlanmıştır,

$$C(N-1, j, k) = \sum_{i=0}^j \left\{ \frac{(k-i)!}{(j-i)!} \right\} \alpha_{N-L}^{j-i} I(k-i, \beta_{N-L}) C(N-L+1, j, k) \quad (2.85)$$

Son olarak I_m denklem (2.86) ile bulunmaktadır.

$$I_m = 2^m \sum_{m_1=0}^{m_0} \alpha_1^{m_0-m_1} I(m_0-m_1, \beta_1) C(2, m_1, m_0) \quad (2.85)$$

Burada verilen $m_0 \equiv m$ olmaktadır.

Vogler yönteminin içerdiği hata fonksiyonları bilinen algoritmalarla hesaplanabildiği için kolaylık sağlar. Fakat yöntemi geliştirirken M değerinin doğru ayarlanması ve parametrelerin düzgün tanımlanması önem taşır. Bu yöntem kompleks β parameresinden kaynaklı olarak hesaplamalarda bazı hatalar verebilmektedir [23]. Bu tez için yapılan denemelere göre, β parametresinin $-0,1 < Re\{\beta\} < 0$ olduğu durumlarda Vogler yöntemi hesaplanması gereken kırım kaybından daha büyük bir değer hesaplamaktadır. Bu nedenle Vogler yöntemi kullanılırken, β parametresine özen gösterilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu yöntem geliştirilirken yayılım yolundaki engellerin öncelikle Fresnel bölgesi içerisinde olup olmadığı hesaplanmalı ve Fresnel bölgesinin içinde olan engeller için Vogler yöntemiyle hesaplama yapmaya başlanmalıdır.

3. NÜMERİK BENZETİM SONUÇLARI

Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler yöntemleri ile kırınım kaybı hesaplamalarını yapmak amacıyla MATLAB programları geliştirilerek çeşitli benzetimler yapılmıştır. Bu MATLAB benzetimler yardımı ile istenilen yükseklik ve uzunluklarda, istenilen sayıda engel kullanarak kırınım parametresi ve engellerin getirdiği ek kırınım kaybı hesaplanabilmektedir. Bu bölümde öncelikle çoklu bıçak-sırtı kırınım modelleri için MATLAB ortamında yapılan benzetimlerin doğru geliştirildiğini ispatlamak için bazı kaynaklardan alınan test senaryoları ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çoklu engeller için geliştirilen kırınım modellerinde kullanılan, tek engel için kırınım kaybı hesaplama yöntemlerinden olan Fresnel-Kirchhoff, ITU, Deygout ve Lee yaklaşımları ile hesaplamalar yapılarak bu yöntemler karşılaştırılmıştır. Yuvarlak kenarlı tepeler için geliştirilen benzetimler Epstein-Peterson, Deygout ve Giovanelli modelleri ile değişik yol profilleri için test edilmiştir. Bu bölümde verilen sonuçlarda kırınım kaybı pozitif olarak verilmektedir.

3.1. [15]'deki Test Senaryoları Yapılan Benzetim Sonuçları

MATLAB programı ortamında geliştirilen çoklu bıçak-sırtı engeller için kırınım modelleri benzetimlerini test etmek için, [15] makalesindeki 20 adet farklı senaryo içeren yol profili örnekleri kullanılmıştır. Yol profillerine ait yükseklik ve uzaklık parametreleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Buradaki yol profillerinin kullanılmasının nedeni, [15]'de bu yol profilleri için, Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler yöntemleri kullanılarak hesaplanan kırınım kaybı sonuçlarının verilmiş olmasıdır. Bu nedenle tez için geliştirilen MATLAB benzetimlerinin doğruluğunu [15] makalesinde verilen benzetim sonuçları ile karşılaştırmak mümkün olmaktadır. Tablo 3.1'deki iletim hatlarının frekansı 1.5 GHz'dir [15].

Tablo 3.1 Örnek Yol Profillerinin Yükseklik ve Uzaklık Parametreleri ([15]'deki çalışmadan alınmıştır)

Senaryo #	Engel Sayısı	d1(m)	d2(m)	d3(m)	d4(m)	d5(m)	d6(m)	d7(m)
		h1(m)	h2(m)	h3(m)	h4(m)	h5(m)	h6(m)	h7(m)
1a	6	500	600	400	600	400	200	500
		1,6	2,2	3,4	3	2,6	1,7	0
1b	6	100	120	80	120	80	40	100
		1,6	2,2	3,4	3	2,6	1,7	0
1c	6	1000	1200	800	1200	800	400	1000
		160	220	340	300	260	170	0
1d	6	10	12	8	12	8	4	10
		1,6	2,2	3,4	3	2,6	1,7	0
1e	6	20	24	16	24	16	8	20
		0,8	1,1	1,7	1,5	1,3	0,85	0
3a	4	600	800	800	700	400		
		1,4	2,6	2	2,2	0		
3b	4	120	160	160	140	80		
		1,4	2,6	2	2,2	0		
3c	4	1200	1600	1600	1400	800		
		140	260	200	220	0		
3d	4	12	16	16	14	8		
		1,4	2,6	2	2,2	0		
3e	4	24	32	32	28	16		
		0,7	1,3	1	1,1	0		
4a	3	600	800	900	600			
		1,8	2,4	2,2	0			
4b	3	120	160	180	120			
		1,8	2,4	2,2	0			
4c	3	1200	1600	1800	1200			
		180	240	220	0			
4d	3	12	16	18	12			
		1,8	2,4	2,2	0			
4e	3	24	32	36	24			
		0,9	1,2	1,1	0			
5a	2	800	1200	800				
		2,4	2	0				
5b	2	160	240	160				
		2,4	2	0				
5c	2	1600	2400	1600				
		240	200	0				
5d	2	16	24	16				
		2,4	2	0				
5e	2	32	48	32				
		1,2	1	0				

3.1.1. Çoklu Bıçak-Sırtı Kırınım Modelleri ile Kırınım Kaybı Hesaplamaları

Epstein-Peterson, Giovanelli ve Vogler için geliştirilen benzetimlerde Tablo 3.1'de bulunan 2, 3 ve 4 engel içeren 15 adet senaryo kullanılarak yapılan kırınım kaybı hesaplamalarının sonuçları Tablo 3.2'de verilmiştir. [15] makalesinde tek engel için kırınım kaybı hesaplama yöntemlerinden ITU yaklaşımı olan Yöntem 2 kullanıldığı belirtilmiş olduğu için bu bölümde verilen sonuçlar hesaplanırken de Yöntem 2 kullanılmıştır. Hesaplamalar yapılırken antenin 1.5 GHz frekansında yayın yaptığı varsayılmıştır. Tablo 3.2'de ayrıca [15] makalesinde bu senaryolar için verilen referans sonuçlar ve benzetimlerdeki sonuçların referans değerleriyle yüzde olarak ne kadar farklı olduğu da hesaplanarak verilmiştir.

Tablo 3.2 Epstein-Peterson, Giovanelli ve Vogler yöntemleriyle kırınım kaybı (dB) hesaplamaları sonuçları (Tablo 3.1'deki yol profilleri ile)

Senaryo #	Epstein-Peterson			Giovanelli			Vogler		
	Referans Değer [15]	Hesaplanan Değer	Fark %	Referans Değer [15]	Hesaplanan Değer	Fark %	Referans Değer [15]	Hesaplanan Değer	Fark %
3a	27,77	27,77	0	27,93	27,93	0	20,45	20,6	0,76
3b	32,07	32,07	0	32,41	32,41	0	26,63	26,67	0,13
3c	95,7	95,7	0	96,71	96,81	0,11	97,21	96,91	-0,31
3d	44,63	44,63	0	45,41	45,57	0,35	43,64	43,32	-0,71
3e	32,93	32,93	0	33,31	33,32	0,03	27,86	27,86	0,03
4a	21,58	21,58	0	21,75	21,75	0	17,54	17,55	0,06
4b	25,82	25,82	0	26,2	26,2	0,01	23,23	23,22	-0,02
4c	94,25	94,25	0	96,58	96,59	0,01	96,9	96,76	-0,14
4d	39,92	39,92	0	41,02	41,05	0,07	40,55	40,43	-0,3
4e	26,7	26,7	0	27,13	27,12	0	24,38	24,37	-0,02
5a	15,37	15,37	0	15,55	15,55	0	13,99	13,99	-0,01
5b	19,35	19,35	0	19,72	19,72	0	18,63	18,62	-0,02
5c	70,51	70,51	0	71,27	71,27	0	71,45	71,33	-0,17
5d	31,75	31,75	0	32,43	32,43	0	32,24	32,14	-0,34
5e	20,17	20,16	0	20,57	20,57	0	19,56	19,55	-0,03

Tablo 3.2'ye bakıldığında, Epstein-Peterson, Giovanelli ve Vogler kırım modellerinin belirtilen senaryolar için referans değerlerle yüzde olarak oldukça az bir farka sahip olduğu görünmektedir. Üç yöntem için de yüzde 1'in altında olan bir farkla sonuçlar elde edilmiştir. Bu tabloda 6 engel bulunan senaryoların sonuçları verilmemiştir çünkü Vogler yönteminde Bölüm 2.3.4'de belirtilen β parametresinden kaynaklanan bir sorun bulunmaktadır. Bu senaryolar aşağıda ayrıca incelenecektir.

Giovanelli yöntemi geliştirilirken [11] makalesinde, kırım parametresi en büyük engelin ana engel olarak seçildiği belirtilmiştir. Fakat [15] makalesinde Givonelli yöntemi için verilen sonuçlardan, ana engelin en yüksek kırım parametresine sahip engel olarak seçilmediği, uzunluk olarak en yüksek engelin seçildiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle Tablo 3.2'de verilen sonuçlar için yapılan hesaplamalarda en yüksek uzunluğa sahip engellerin ana engel olarak seçilmesi ile yapılmıştır.

[15] makalesinde Deygout ve Giovanelli modellerinin sonuçlarına bakıldığında, sonuçların birebir aynı olarak verildiği görülmektedir. Giovanelli yönteminin Deygout yöntemini düzeltmek amacıyla geliştirildiği ve aynı yöntem ana engelin getirdiği kırım kaybı hesaplamasında bir değişiklik getirdiği düşünülürse, tamamen aynı sonuçları vermesinin bir yazım hatası olduğu düşünülebilir. Bazı koşullarda bu iki yöntem benzer sonuçlar vermekle birlikte, birebir aynı değerleri vermesi beklenmeyeceğinden, Tablo 3.2'de Deygout kırım modelinin sonuçları verilmemiştir. Bu yöntemle 2, 3, 4 ve 6 engel ile yapılan hesaplama sonuçları ayrıca Tablo 3'te verilmiştir. Deygout yöntemi için Bölüm 2.3.2.3'de anlatılan düzeltme terimi de eklenerek yöntem geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar da Tablo 3'te verilmiştir. Bu tabloda Deygout yönteminin diğer yöntemlere göre daha yüksek kırım kaybı hesapladığı görülmektedir. Deygout yöntemine eklenen düzeltme terimi ile yapılan hesaplama sonuçlarında ise kırım kaybının daha düşük olduğu hesaplandığı görülmektedir. Deygout'un [19] makalesinde bu düzeltme terimini getirmesinin amacı Deygout yönteminde bazı durumlarda kırım kaybının olması gerekenden daha fazla hesaplanıyor olması yüzünden bu hesabı doğru sonuçlara daha fazla yakınlaştırmak için daha az kayıp hesaplamaktır. Deygout yöntemi

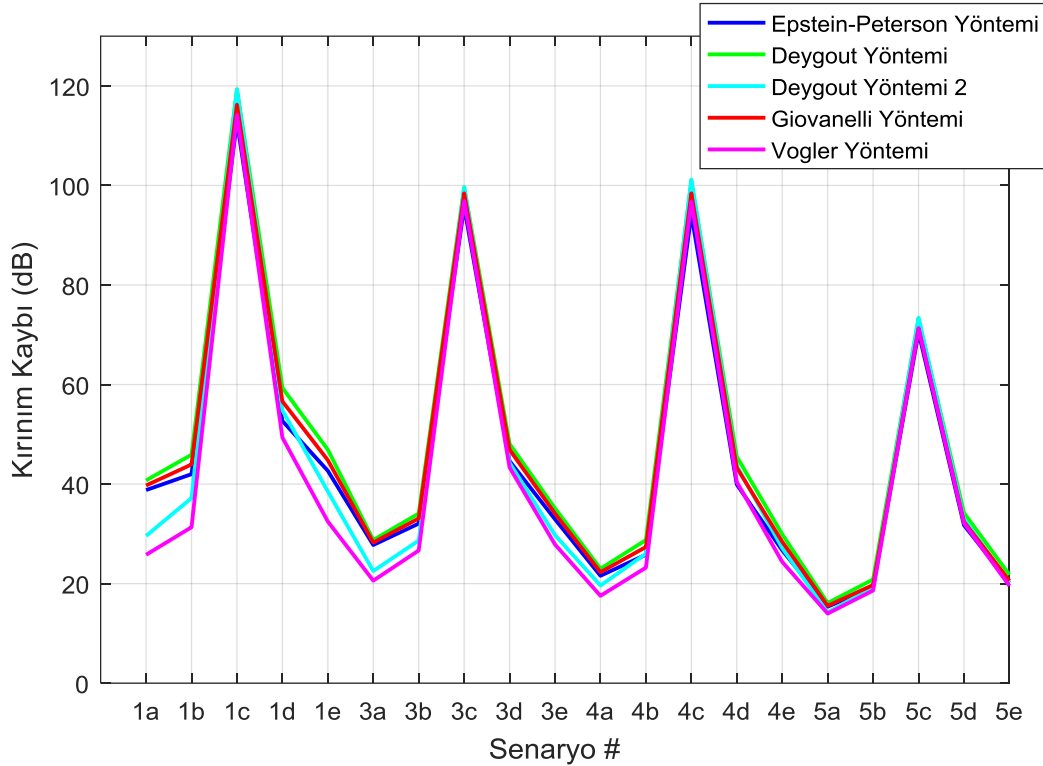
sonuçları Tablo 3.2’de bulunan Vogler yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, Deygout yöntemi 2’nin Vogler yöntemi sonuçlarına daha fazla yaklaştığı görülmektedir.

Tablo 3.3 Deygout yöntemi ile hesaplanan kırımın kaybı (dB) sonuçları (Tablo 3.1’deki yol profilleri ile)

Senaryo #	Deygout Yöntemi ile Hesaplanan Değer	Deygout Yöntemi 2 ile Hesaplanan Değer
1a	40,74	29,87
1b	45,91	37,54
1c	119,3	119,6
1d	59,33	55,74
1e	46,91	38,98
3a	28,77	22,74
3b	34,08	28,9
3c	99,61	99,58
3d	48,06	45,06
3e	35,11	30,09
4a	23	19,81
4b	28,76	26,07
4c	100,8	101
4d	45,5	44,22
4e	29,92	27,32
5a	16,11	14,35
5b	20,84	19,31
5c	73,19	73,29
5d	34,22	33,43
5e	21,78	20,3

Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler yöntemleri ile Tablo 3.1’deki her bir senaryo için tek tek bulunan kırımın kayıpları, senaryo numarasına göre Şekil 3.1’deki grafikte çizdirilmiştir. Bu grafikte yöntemlerin düşük engel sayısında oldukça

yakın kırınım kaybı sonuçları verdikleri görülmektedir. Grafikte ayrıca Deygout yönteminin düzeltme terimi ile geliştirilerek yapılan benzetim ile alınan sonuçlar da Deygout yöntemi 2 ismi ile verilmektedir. Epstein-Peterson, Deygout ve Giovanelli yöntemlerini Vogler yöntemi ile karşılaştırdığımızda ise Deygout yöntemi 2'nin Vogler yöntemine bazı noktalarda daha yakın sonuçlara ulaştığı görülmektedir. 1c, 3c, 4c ve 5c gibi kırınım kaybının yüksek olduğu noktalarda ise Deygout yöntemlerinin diğer yöntemlere göre neredeyse 2 dB civarı daha yüksek bir hesaplama yaptığı görülmektedir. Şekil 3.1'de Deygout yöntemi 2'nin düşük kırınım kaybı hesaplanan senaryolarda Vogler yöntemine daha yakın bir sonuç elde ettiği görülmektedir.



Şekil 3.1 Tablo 3.1'deki yol profili senaryoları için Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler yöntemleriyle hesaplanan kırınım kaybı sonuçları grafiği

Tüm geometrik hesaplama içeren kırınım kaybı modellerinden elde edilen hesaplama sonuçlarını Vogler yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak, yöntemlerin ne kadar doğru sonuca ulaştığının anlaşılmasını sağlamakta yardımcı olmaktadır. Bunun için Epstein-Peterson, Deygout ve Giovanelli yöntemleriyle ulaşılan kırınım kaybı sonuçlarıyla, Vogler yöntemiyle elde edilen sonuçların farkı

bulunup, Tablo 3.1'deki 20 senaryo için bulunan tüm değerlerin ortalamaları alındığında Tablo 3.4'deki sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca bu tabloda her yöntem için elde edilen sonuçların standart sapması da verilmektedir.

Tablo 3.4 Çoklu engeller için kırımım modelleri ile elde edilen hesaplama sonuçlarının Vogler yöntemi ile elde edilen sonuçlardan farkının ortalama ve standart sapma değerleri

	Epstein-Peterson Yöntemi	Deygout Yöntemi	Giovanelli Yöntemi	Deygout Yöntemi 2
Ortalama Kırımım Kaybı Farkı (dB)	4,36	6,81	5,27	3,32
Standart Sapma	5,07	5,56	5,52	2,87

Tablo 3.4'te ortalama kırımım kaybı farkının, Deygout yöntemi 2'de en az olduğu görülmektedir. Bu da bu yöntemle yapılan hesaplamaların ortalama olarak Vogler yöntemi sonuçlarına daha yakın olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu yöntemle standart sapma da oldukça düşük çıkmaktadır.

Tablo 3.2'de 6 engel bulunan senaryoların sonuçları verilmemişti. Burada Vogler yöntemi ile hesaplanan sonuçlar ayrıca incelenmektedir. Tablo 3.5'te bu yöntem ile 6 engel bulunan senaryoların sonuçları, [15] makalesinden alınan referans değerler ve bu senaryoda hesaplanan β değerleri verilmiştir. Bu tabloda 1a, 1b ve 1e senaryolarında Vogler yöntemi benzetiminin kırımım kaybını referans değerinden çok daha farklı hesapladığı görülmektedir. Bu senaryoların β değerleri incelendiğinde ise β 'nin reel değerinin negatif olduğu birkaç engel görülmektedir. Fakat 1c ve 1d senaryolarında da reel kısmı negatif olan engeller olsa da bu değerlerin negatiflikleri daha yüksektir. 1a, 1b ve 1e senaryolarında ise negatif olan β değerlerinin 0'a oldukça yakın bulunmaktadır. Bu tip senaryolarda Vogler yöntemi doğru sonuç hesaplayamamaktadır ve β değerleri için düzeltme yapılması gerekmektedir.

Tablo 3.5 Vogler Yöntemi ile 6 engel için kırınım kaybı (dB) hesaplamaları

Vogler Yöntemi								
Senaryo #	Referans Değer [15]	Hesaplanan Değer	β					
			Engel 1	Engel 2	Engel 3	Engel 4	Engel 5	Engel 6
1a	20,77	25,8	0,1 + 0,1i	-0,09 - 0,09i	0,16 + 0,16i	0,01 + 0,01i	0,11 + 0,11i	-0,04- 0,04i
1b	27,86	31,34	0,23 + 0,23i	-0,19 - 0,19i	0,36 + 0,36i	0,03 + 0,03i	0,25 + 0,25i	-0,08- 0,08i
1c	114,43	114,18	7,17 + 7,17i	-6,12 - 6,12i	11,13 + 11,13i	1,02 + 1,02i	7,93 + 7,93i	-2,6- 2,6i
1d	49,24	49,35	0,72 + 0,72i	-0,61 - 0,61i	1,11 + 1,11i	0,10 + 0,10i	0,79 + 0,79i	-0,26- 0,26i
1e	29,3	32,48	0,25 + 0,25i	-0,22 - 0,22i	0,4 + 0,4i	0,04 + 0,04i	0,28 + 0,28i	-0,09- 0,09i

3.1.2. Tek Engel için Kırınım Kaybı Hesaplama Yaklaşımları Karşılaştırılması

Her bir kırınım kaybı modelinde gerekli yükseklik ve uzunluklar bulunup, kırınım parametresi hesaplandıktan sonra engellerin getirdiği kırınım kaybı tek engel için kırınım kaybı yaklaşımları ile hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımlar Bölüm 2.2.1'de anlatılmış olup, Fresnel Kirchhoff yaklaşımı için Yöntem 1, ITU yaklaşımı için Yöntem 2, Deygout yaklaşımı için Yöntem 3 ve Lee Yaklaşımı için Yöntem 4 olarak adlandırılmıştır. Bu bölümde, kırınım kaybı modellerinde engellerin getirdiği kişisel kırınım kaybı hesaplanırken bahsedilen yöntemler kullanılarak, Tablo 3.1'de verilen 20 farklı senaryo ile test edilecek ve sonuçları karşılaştırılacaktır.

İlk olarak Epstein-Peterson kırınım modeli ile kırınım kaybı hesaplama yaklaşımları test edildiğinde Tablo 3.6'daki sonuçlar elde edilmektedir. Her bir yöntem Epstein-Peterson modeliyle ayrı ayrı hesaplandığında bulunan sonuçlar, [15]'deki referans

değerlerle farkları bulunarak yüzde olarak hesaplanmıştır ve bu yüzdeler de tabloda bulunmaktadır.

Tablo 3.6 Epstein-Peterson yöntemi ile tek engel için kırınım kaybı (dB) hesaplama yöntemleri karşılaştırılması

Senaryo #	Referans Değer [15]	Fresnel-Kirchhoff (Yöntem 1)		ITU Yaklaşımı (Yöntem 2)		Deygout Yaklaşımı (Yöntem 3)		Lee Yaklaşımı (Yöntem 4)	
		Hesaplanan Değer	Fark %	Hesaplanan Değer	Fark %	Hesaplanan Değer	Fark %	Hesaplanan Değer	Fark %
1a	38,8	38,76	-0,1	38,8	0	38,54	-0,7	38,31	-1,3
1b	42	41,89	-0,3	42	0	41,67	-0,8	41,18	-2
1c	112,85	116,1	2,89	112,8	0	112,9	0	113,2	0,3
1d	51,69	52,39	1,35	52,68	1,9	51,49	-0,4	52,69	1,9
1e	42,66	42,54	-0,3	42,67	0	42,34	-0,8	41,82	-2
3a	27,77	27,73	-0,1	27,77	0	27,56	-0,8	27,41	-1,3
3b	32,07	31,97	-0,3	32,07	0	31,96	-0,3	31,59	-1,5
3c	95,7	90,2	-5,8	95,7	0	96,06	0,4	95,97	0,3
3d	44,63	44,55	-0,2	44,63	0	44,1	-1,2	44,82	0,4
3e	32,93	32,83	-0,3	32,93	0	32,84	-0,3	32,49	-1,3
4a	21,58	21,56	-0,1	21,58	0	21,41	-0,8	21,38	-1
4b	25,82	25,76	-0,2	25,82	0	25,62	-0,8	25,47	-1,3
4c	94,25	95,15	0,96	94,25	0	94,65	0,4	94,56	0,3
4d	39,92	39,79	-0,3	39,92	0	39,34	-1,4	40,04	0,3
4e	26,7	26,64	-0,3	26,7	0	26,52	-0,7	26,35	-1,3
5a	15,37	15,35	-0,1	15,37	0	15,23	-0,9	15,19	-1,2
5b	19,35	19,29	-0,3	19,35	0	19,23	-0,6	19,07	-1,4
5c	70,51	69,42	-1,6	70,51	0	70,75	0,3	70,69	0,3
5d	31,75	31,68	-0,2	31,75	0	31,25	-1,6	31,89	0,4
5e	20,17	20,09	-0,4	20,16	0	20,08	-0,4	19,9	-1,3

[15] makalesinde de belirtildiği gibi referans olarak verilen sonuçlar Yöntem 2 kullanılarak yapıldığından, Tablo 3.6'daki sonuçlar incelendiğinde, Yöntem 2'nin neredeyse bütün senaryolarda referans değerlerle aynı sonucu verdiği görülmektedir. Diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlarda ufak farklılıklar bulunmaktadır. Bu durum kırımın parametresinin bazı değerlerinde yöntemlerin farklı sonuçlar vermesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 3.7'de ise Deygout yöntemi ile tüm tek engel için kırımın kaybı hesaplama yöntemleri kullanılarak Tablo 3.1'deki senaryoların sonuçları verilmiştir. Burada referans değerler verilmemiş olup, sadece hesaplama sonuçları verilmektedir. Tablo 3.8 ise Deygout kırımın modeline düzeltme terimi eklenerek yapılan benzetimi ile tüm tek engel için kırımın kaybı hesaplama yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu kırımın modeli Tablo 3.8'de Deygout yöntemi 2 olarak adlandırılmıştır. Bu iki tabloda da tüm yöntemlerin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 3.9'da Giovanelli yöntemi ile bütün tek engel için kırımın kaybı hesaplama yöntemleri kullanılarak Tablo 3.1'de verilen senaryolardaki hesaplanan kırımın kayıpları verilmiştir. Diğer kırımın modellerinde de olduğu gibi Giovanelli yönteminde de hesaplamada küçük farklılıklar gözlenmiştir. Bu tabloda da yöntem geliştirilirken en yüksek engellerin ana engel olarak seçilmesiyle sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3.7 Deygout yöntemi ile tek engel için kırınım kaybı (dB) hesaplama yöntemleri karşılaştırılması

Senaryo #	Fresnel-Kirchhoff (Yöntem 1) ile Hesaplanan Değer	ITU Yaklaşımı (Yöntem 2) ile Hesaplanan Değer	Deygout Yaklaşımı (Yöntem 3) ile Hesaplanan Değer	Lee Yaklaşımı (Yöntem 4) ile Hesaplanan Değer
1a	40,67	40,74	40,46	40,18
1b	45,76	45,91	45,56	45,36
1c	110,2	119,3	119,7	119,9
1d	59,28	59,33	58,52	59,08
1e	46,75	46,91	46,45	46,49
3a	28,72	28,77	28,56	28,38
3b	33,97	34,08	33,84	33,76
3c	94,02	99,61	100,2	100,1
3d	48,16	48,06	47,72	47,99
3e	35	35,11	34,77	34,92
4a	22,97	23	22,8	22,73
4b	28,68	28,76	28,72	28,51
4c	100	100,8	101,3	101,2
4d	45,6	45,5	45,2	46,12
4e	29,83	29,92	29,75	29,74
5a	16,08	16,11	15,97	15,9
5b	20,77	20,84	20,86	20,67
5c	80,91	73,19	73,51	73,45
5d	34,31	34,22	34,01	34,97
5e	21,71	21,78	21,67	21,69

Tablo 3.8 Deygout yöntemi 2 ile tek engel için kırınım kaybı (dB) hesaplama yöntemleri karşılaştırılması

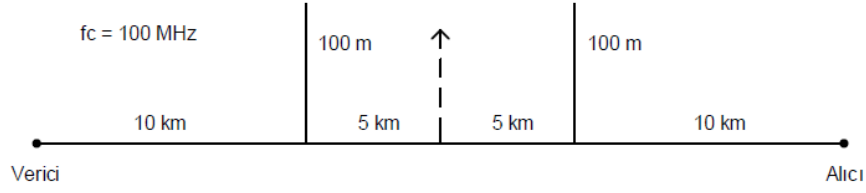
Senaryo #	Fresnel-Kirchhoff (Yöntem 1) ile Hesaplanan Değer	ITU Yaklaşımı (Yöntem 2) ile Hesaplanan Değer	Deygout Yaklaşımı (Yöntem 3) ile Hesaplanan Değer	Lee Yaklaşımı (Yöntem 4) ile Hesaplanan Değer
1a	29,8	29,87	29,59	29,31
1b	37,4	37,54	37,2	37
1c	110,5	119,6	119,6	119,9
1d	55,62	55,74	54,88	55,43
1e	38,82	38,98	38,52	38,56
3a	22,7	22,74	22,53	22,36
3b	28,79	28,9	28,66	28,57
3c	93,72	99,58	99,94	99,84
3d	44,97	45,06	44,54	44,81
3e	29,97	30,09	29,75	29,89
4a	19,78	19,81	19,62	19,55
4b	25,98	26,07	26,03	25,82
4c	100	101	101,3	101,2
4d	44,2	44,22	43,82	44,73
4e	27,23	27,32	27,16	27,15
5a	14,32	14,35	14,2	14,14
5b	19,24	19,31	19,34	19,14
5c	80,91	73,29	73,52	73,45
5d	33,44	33,43	33,15	34,1
5e	20,22	20,3	20,19	20,21

Tablo 3.9 Giovanelli yöntemi ile tek engel için kırınım kaybı (dB) hesaplama yöntemleri karşılaştırılması

Senaryo #	Referans Değer [15]	Fresnel-Kirchhoff (Yöntem 1)		ITU Yaklaşımı (Yöntem 2)		Deygout Yaklaşımı (Yöntem 3)		Lee Yaklaşımı (Yöntem 4)	
		Hesaplanan Değer	Fark %	Hesaplanan Değer	Fark %	Hesaplanan Değer	Fark %	Hesaplanan Değer	Fark %
3a	27,93	27,89	-0,1	27,93	0	27,72	-0,7	27,56	-1,3
3b	32,41	32,31	-0,3	32,41	0	32,32	-0,3	31,93	-1,5
3c	96,71	103,6	7,14	96,81	0,11	97,18	0,49	97,08	0,39
3d	45,41	45,49	0,18	45,57	0,35	45	-0,9	45,8	0,87
3e	33,31	33,21	-0,3	33,32	0,03	33,22	-0,3	32,88	-1,3
4a	21,75	21,73	-0,1	21,75	0	21,57	-0,8	21,54	-1
4b	26,2	26,14	-0,2	26,2	0,01	25,99	-0,8	25,83	-1,4
4c	96,58	97,47	0,93	96,59	0,01	97	0,44	96,9	0,33
4d	41,02	40,91	-0,3	41,05	0,07	40,57	-1,1	41,19	0,4
4e	27,13	27,06	-0,3	27,12	0	26,94	-0,7	26,75	-1,4
5a	15,55	15,53	-0,1	15,55	0	15,41	-0,9	15,36	-1,2
5b	19,72	19,66	-0,3	19,72	0	19,63	-0,5	19,46	-1,3
5c	71,27	70,13	-1,6	71,27	0	71,52	0,34	71,45	0,25
5d	32,43	32,4	-0,1	32,43	0	32	-1,4	32,65	0,68
5e	20,57	20,5	-0,4	20,57	-0	20,53	-0,2	20,34	-1,2

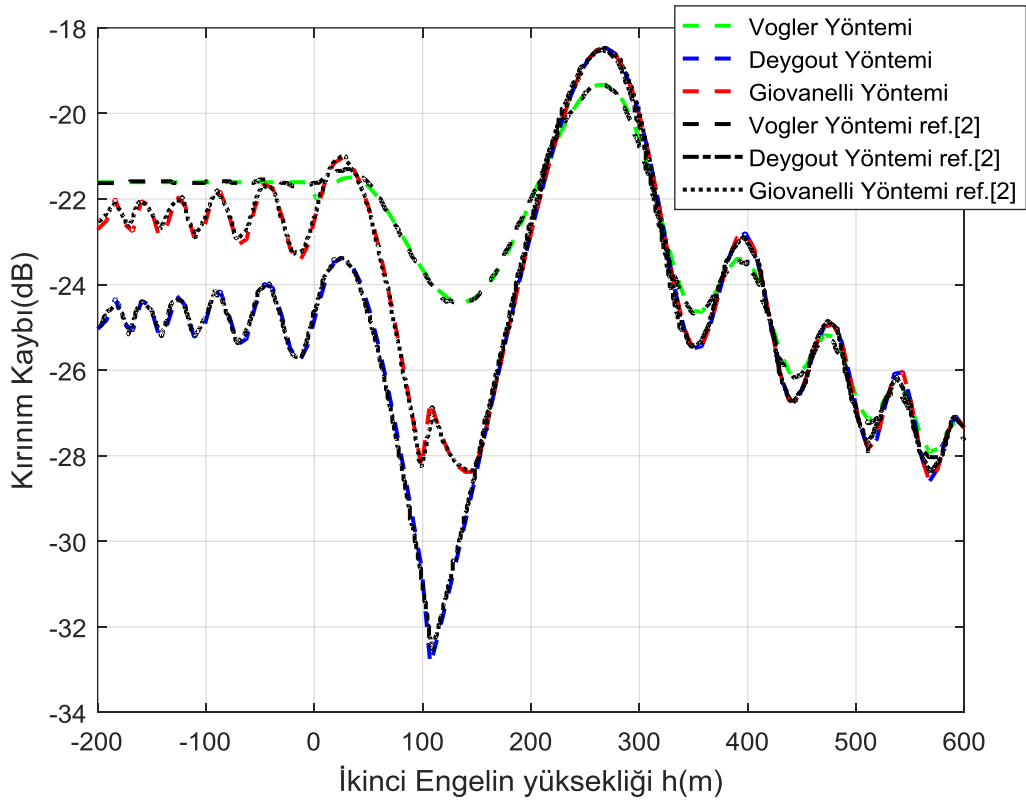
3.2. [2]'deki Test Senaryosu ile Yapılan Benzetim Sonuçları

[2]'de verilen test senaryosunun yol profili Şekil 3.2'de verilmiştir. Çoklu engeller için kırınım kaybı hesaplama yöntemlerinden Vogler, Deygout ve Giovanelli bu yol profili kullanılarak kırınım kaybı hesaplamaları yapılmıştır. Verilen örnekte 3 adet bıçaksırtı engel bulunmaktadır. Alıcı ve verici antenleri zeminde bulunur halde modellenmiştir ve ikinci engelin yüksekliği -200 metreden 600 metreye kadar çıkmaktadır. İletim hattının frekansı 100 MHz olarak verilmiştir.



Şekil 3.2 [2]'de bulunan yol profili

Şekil 3.2'deki yol profili, MATLAB programı kullanılarak yapılan benzetimlerden Deygout ve Giovanelli yöntemlerine, tek bıçak-sırtı engel için kırınım kaybı hesaplama yöntemlerinden Fresnel-Kirchhoff yöntemi olan Yöntem 1 kullanılarak uygulanmıştır. Kırınım kaybının ikinci engelin yüksekliğine göre değişim grafiği çizdirildiğinde Şekil 3.3'deki grafik elde edilmektedir. Vogler yöntemi de aynı test senaryosuna uygulanmıştır ve bu yöntemle bulunan kırınım kaybı da aynı grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Vogler, Deygout, Giovanelli yöntemleri sonuçlarının [2]'deki referans sonuçları ile karşılaştırılması (Şekil 3.2'deki yol profili için)

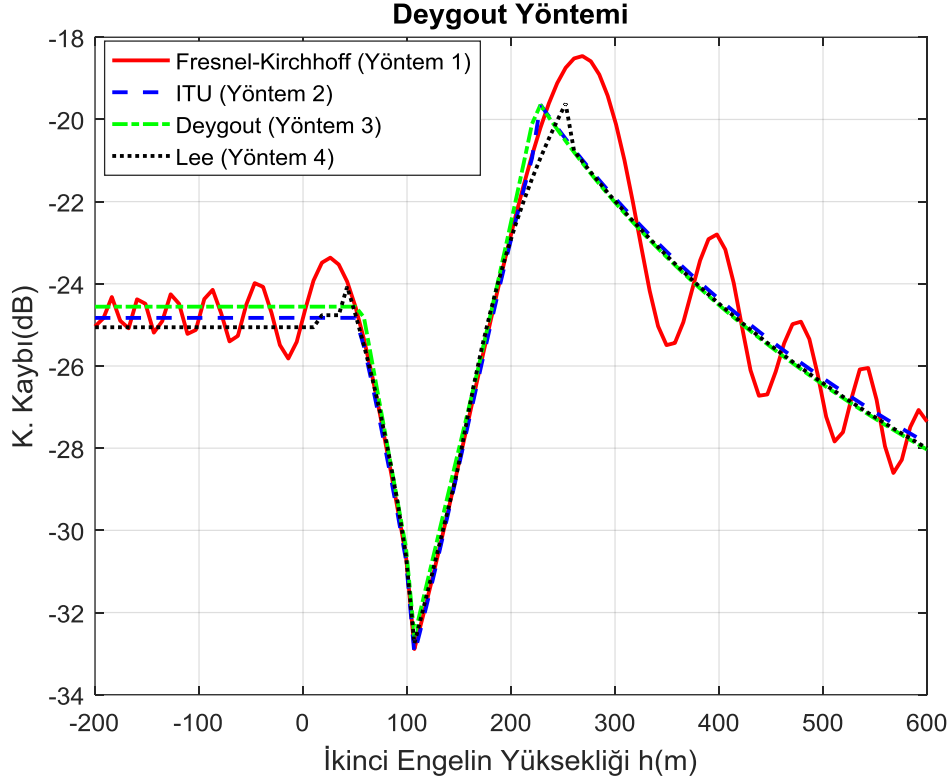
Şekil 3.3'de ayrıca [2]'de verilen sonuçlar'ın verileri bir uygulama yardımıyla [2]'de bulunan grafikten alınmıştır ve referans olarak siyah renklerle verilmektedir. Bu referans değerlerle kırınım modelleri için geliştirdiğimiz modellerin sonuçlarına baktığımızda bütün yöntemlerin verdiği sonuçların örtüştüğü görülmektedir.

Şekil 3.3 incelendiğinde $h_2 < 40$ metre olan kısımlarda ikinci engelin Fresnel bölgesine girmemesinden dolayı model iki engele sahip bir yol profili gibi davranır ve kırınım kaybı bu iki engel için sabit değerler etrafında hesaplanır. Yöntemlerde görülen sabit engeller etrafında dalgalanmalar kırınım kaybının her yeni yükseklik için farklı olarak hesaplanmasından kaynaklanır. Bu bölgede Giovanelli yöntemi Vogler yöntemi ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 0.5 dB fazla kırınım kaybı hesaplamıştır. Deygout yöntemi ise 3 dB civarı daha fazla hesaplama yapmıştır.

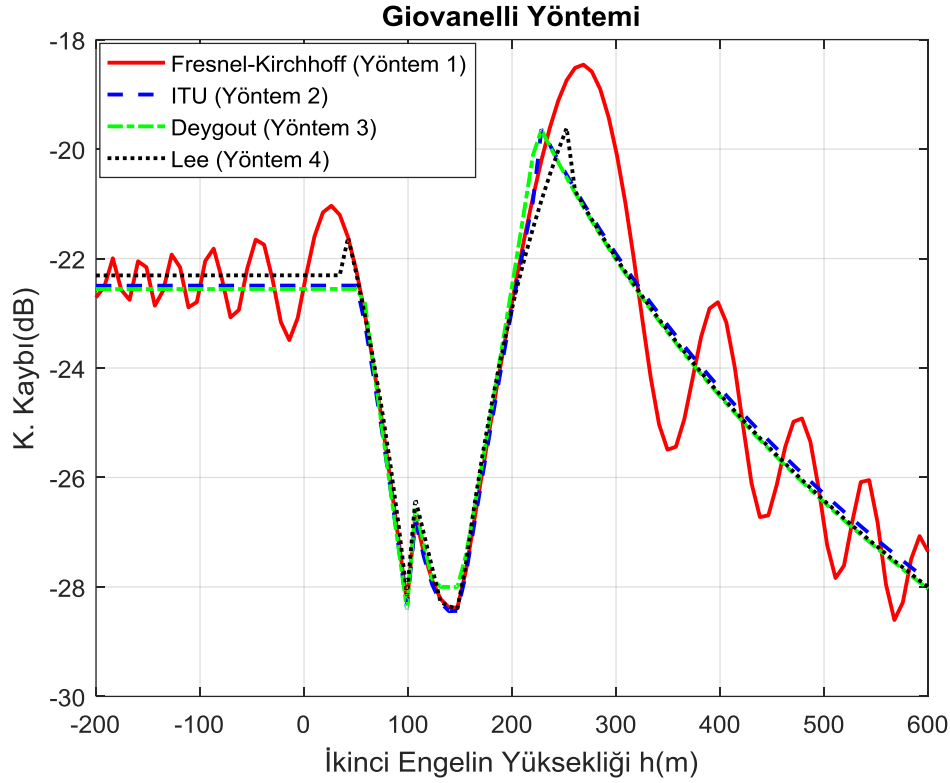
Deygout ve Giovanelli yöntemleri $h_2 = 100$ metre olduğunda engellerin hepsinin boyu eşit olduğu için baskın bir engel olmamasından kaynaklı olarak yanlış hesaplama yapmaktadır. $h_2 = 150$ metre olduğunda ise efektif yükseklik (h') 0 olduğu için Giovanelli yöntemi sanal anten yükseklikleri için uygun bir değer bulamaz ve bu noktadan sonra Deygout ve Giovanelli yöntemi aynı sonucu vermeye başlamaktadır. Giovanelli yönteminin getirdiği düzeltme bu noktadan sonra etkili olmaz. $h_2 = 200$ metreyi geçtikten sonra ise ikinci engel en baskın engel olur ve tüm yöntemler yaklaşık aynı sonucu vermektedir.

Tek engel için kırınım kaybı yaklaşımlarından Yöntem 1 kullanıldığında yöntemin Fresnel integralleri içermesi sebebiyle diğer kırınım kaybı formülleriyle yapılan hesaplamalardan çok daha uzun sürede hesaplama yaptığı görülmüştür. Bu nedenle diğer tek engel için kırınım kaybı yaklaşımları ile de benzetimler tekrarlanmıştır. Aynı test senaryosu Giovanelli ve Deygout yöntemlerine ayrı ayrı uygulanarak 4 adet tek engel için kırınım kaybı yaklaşımları kullanılmıştır. Deygout yöntemi için tüm hesaplamalar Şekil 3.4'te Giovanelli için yapılan hesaplamalar ise

Şekil 3.5'de verilmiştir. Vogler yönteminde ise tek engel için kırınım kaybı yaklaşımları kullanılmadığı için bu yöntemle tekrar bir hesaplama yapmaya gerek yoktur.



Şekil 3.4 Fresnel-Kirchhoff, ITU, Deygout ve Lee tek engel için kırınım kaybı yaklaşımları kullanılarak Deygout yöntemi ile elde edilen sonuçlar



Şekil 3.5 Fresnel-Kirchhoff, ITU, Deygout ve Lee tek engel için kırınım kaybı yaklaşımları kullanılarak Giovanelli yöntemi ile elde edilen sonuçlar

Şekil 3.4 ve

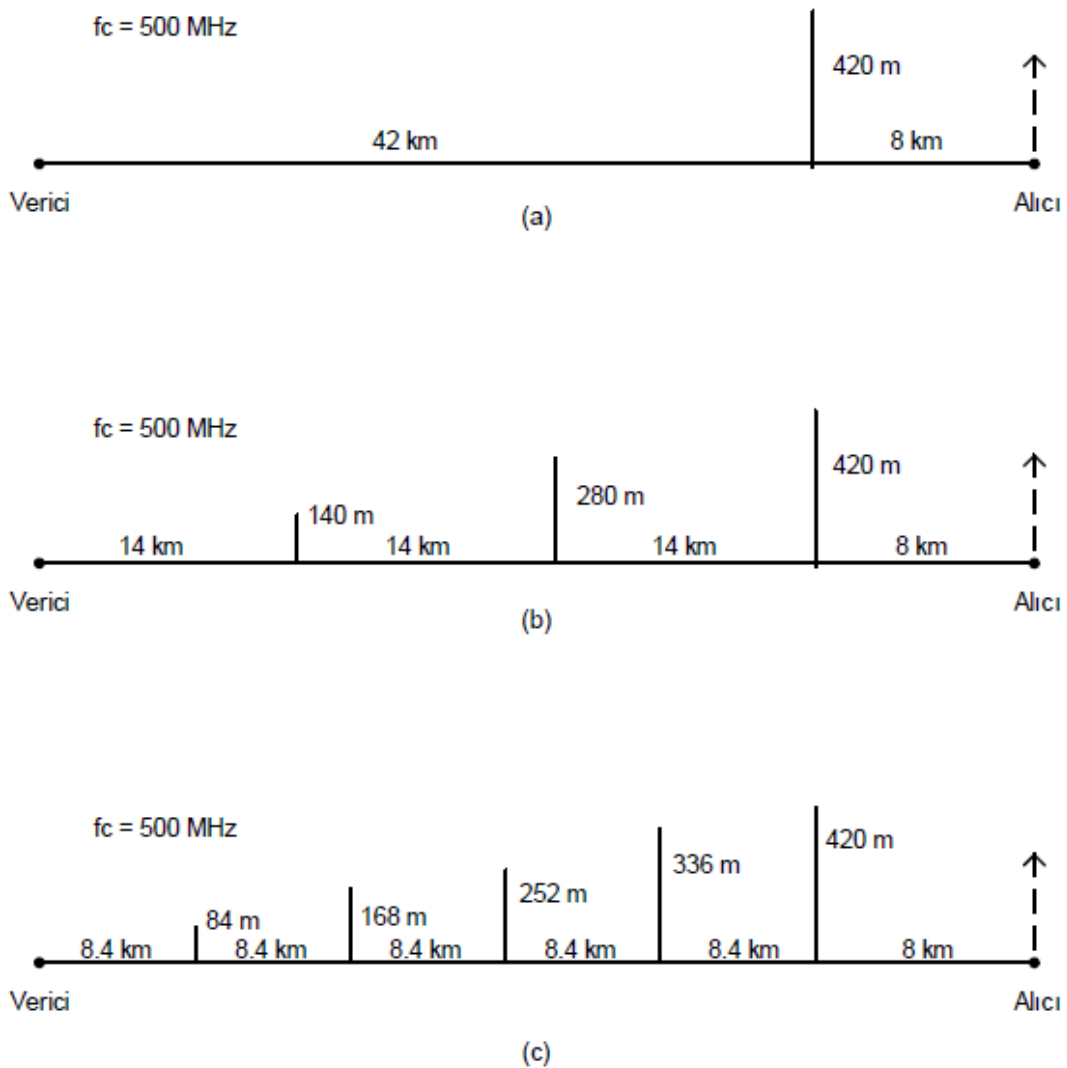
Şekil 3.5 incelendiğinde ilk olarak $h_2 = -200$ metreden $h_2 = 50$ metre civarına kadar Yöntem 1'in bu yüksekliklerde sonuçların belli ofset değerleri etrafında dalgalandıkları görülmektedir. Aynı şekilde $h_2 = 200$ metre sonrasında da aynı şekilde dalgalanma gözlemlendiği görülmüştür. Diğer yöntemler ise daha sabit artışlar ya da azalışlar göstermektedir. Yöntemlerin $h_2 = 200$ metreden $h_2 = 250$ metre arasında ufak farklılıklara sahip olduğu görülmektedir. Bu da bazı kırınım parametresi değerlerinde yöntemlerin farklı değerler hesaplamasından kaynaklanmaktadır.

3.3. Çoklu Engel için Kırınım Kaybı Modellerinin Farklı Senaryolarla Yapılan Hesaplama Karşılaştırmaları

Bu bölümde Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler yöntemleri modellenen farklı senaryo tipleriyle karşılaştırılmıştır. Yol profilleri bıçak-sırtı ve belirli yarıçapa sahip yuvarlak tepeler olarak modellenmiştir.

3.3.1. Artan Alıcı Yüksekliği Senaryoları

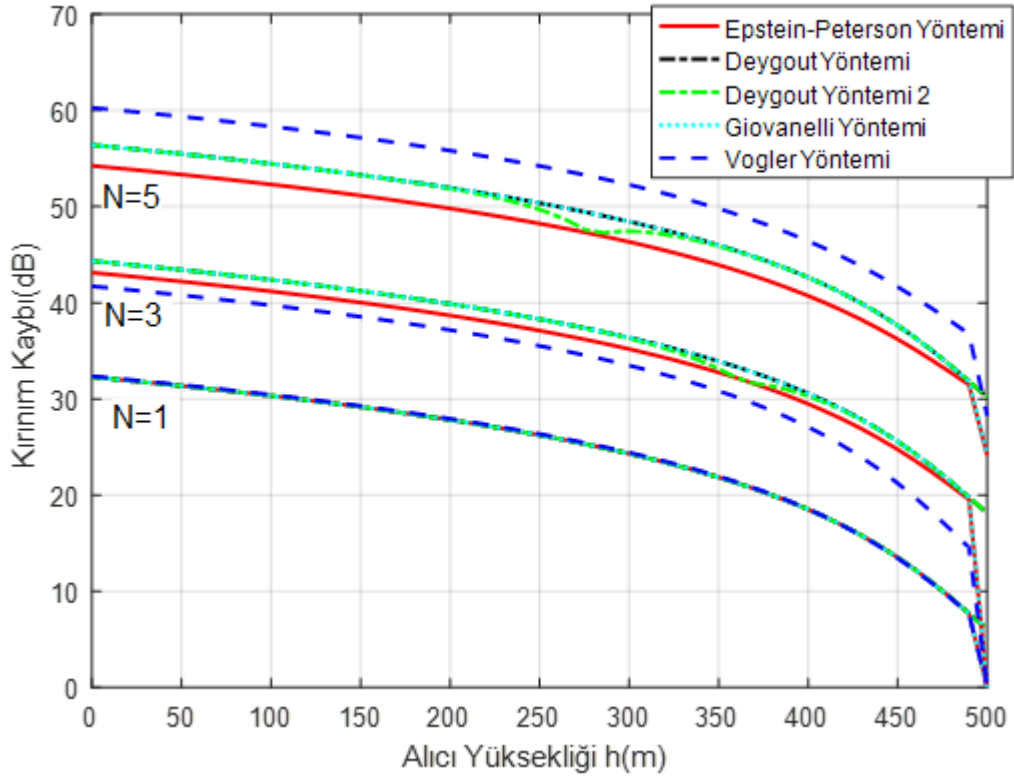
Artan alıcı yüksekliği senaryosunda 3 farklı yayılım yolu için 500 MHz frekansında çoklu engeller için kırınım kaybı modelleri ile kırınım kayıpları hesaplanmaktadır. Birinci yol profilinde tek bir engel bulunurken, ikinci yol profilinde 3, üçüncü yol profilinde ise 5 engel bulunmaktadır ve tüm engeller bıçak-sırtı olarak modellenmiştir. Her bir alıcının yüksekliği ise 0 metreden 500 metreye kadar belli aralıklarla artırılmaktadır. Kullanılan yol profilleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Artan alıcı yüksekliği için 3 farklı test senaryosu

Şekil 3.6'da verilen yol profillerinde alıcı yüksekliği artırılarak Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler kırınım modelleri ile kırınım kayıpları hesaplanmıştır.

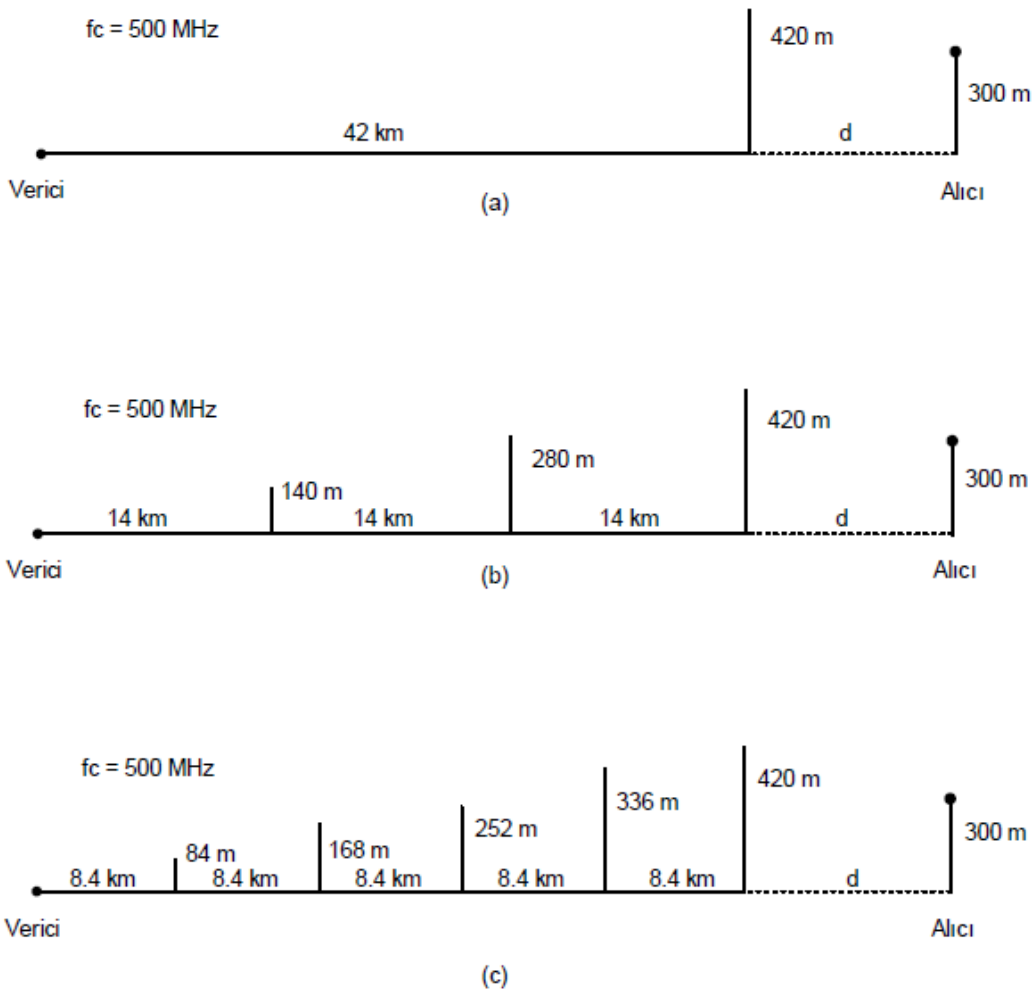
Hesaplanan kırınım kayıpları grafiği Şekil 3.7’de verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi engel sayısı arttıkça kırınım kaybı artmaktadır. Engel sayısı 1 olduğunda tüm yöntemler aynı sonucu vermektedir. Şekilde Giovanelli ve Deygout yöntemlerinin neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmektedir. Bu durum Şekil 3.6’daki yol profillerinde engellerin konum ve yüksekliklerinden dolayı efektif yüksekliğin sıfır olmasından kaynaklanmadır. Efectif yükseklik 0 olduğunda Giovanelli yönteminin sanal anten boylarını 0 ya da negatif olarak hesaplamasından dolayı Giovanelli yöntemi hesaplamalarda Deygout yöntemi ile aynı sonuçları vermektedir. Vogler yöntemi ile 5 engelin bulunduğu durumda diğer yöntemlere göre daha fazla kırınım kaybı hesaplanırken 3 engelin bulunduğu durumda ise daha az kırınım kaybı hesaplanmıştır. Alıcı yüksekliği 500 metreye ulaşırken engeller Fresnel bölgesinden çıkmaya başladığı için hesaplanan kırınım kaybı tüm yöntemlerde 0’a yaklaşmaktadır.



Şekil 3.7 Artan alıcı yüksekliği senaryosu (Şekil 3.6) ile çoklu engeller için kırınım kaybı hesaplama yöntemlerinden elde edilen sonuçların grafiği

3.3.2. Artan Alıcı Uzaklığı Senaryoları

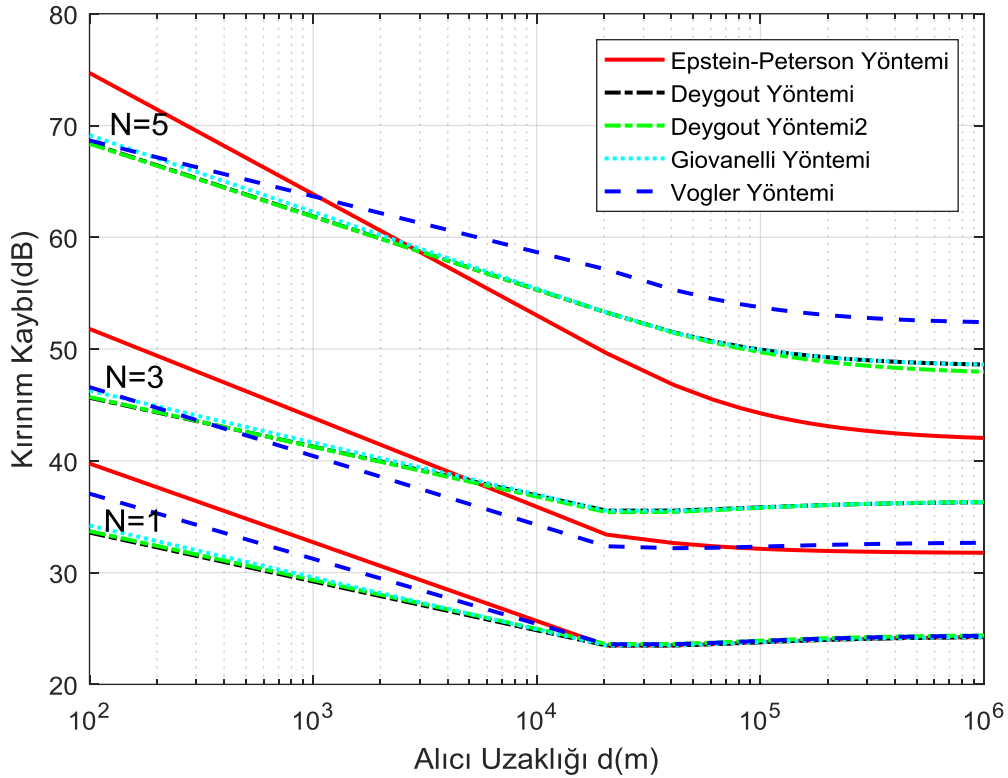
Artan alıcı uzaklığı senaryosunda ise 3 farklı yayılım yolu için 500 MHz frekansında çoklu engeller için kırınım kaybı modelleri ile kırınım kayıpları hesaplanmaktadır. Bu senaryoda farklı olarak alıcının uzaklığı 100 metreden 1000 kilometreye kadar artırılmıştır. Birinci yol profilinde tek engel bulunurken, ikinci yol profilinde 3, üçüncü yol profilinde ise 5 engel bulunmaktadır ve tüm engeller bıçak-sırtı olarak modellenmiştir. Alıcı anten 300 metre yüksekliğindedir. Kullanılan yol profilleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8 Artan alıcı uzaklığı için 3 farklı test senaryosu

Şekil 3.8’de verilen yol profilleri alıcı uzaklığı artırılarak Epstein-Peterson, Deygout, Giovanelli ve Vogler kırınım modelleri ile kırınım kayıpları hesaplanmıştır. Hesaplanan kırınım kayıpları grafiği Şekil 3.9’da verilmiştir. Görüldüğü gibi engel

sayısı arttıkça kırımim kaybı artmaktadır. Artan alıcı yüksekliği grafiğinde (Şekil 3.7) olduğu gibi, Şekil 3.9'da da Giovanelli ve Deygout yöntemlerinin neredeyse aynı sonuçları verdiği görölmektedir. Tek engelin bulunduğu test senaryosunda alıcı engellerden çok uzaklaştığında tüm yöntemler aynı sonucu vermektedir. Bunun nedeni hesaplanan kırımim kaybı çok düştüğü için yöntemler arası farkların önemsiz hale geliyor olmasındandır. Bütün engel sayılarında Epstein-Peterson yönteminin başlangıçta daha yüksek kırımim kaybı hesapladığı görölmüştür. Engel çok uzak noktalara ulaşmaya başladığıında 3 engel varken Epstein-Peterson yönteminin Vogler yöntemi sonuçlarına daha çok yaklaştığı görölmektedir. 5 engelin olduğu durumda ise Deygout ve Giovanelli yöntemlerinin Vogler yöntemi sonuçlarından yaklaşık 4 dB daha az sonuçlar ile biraz daha yakın bir sonuç vermiştir.

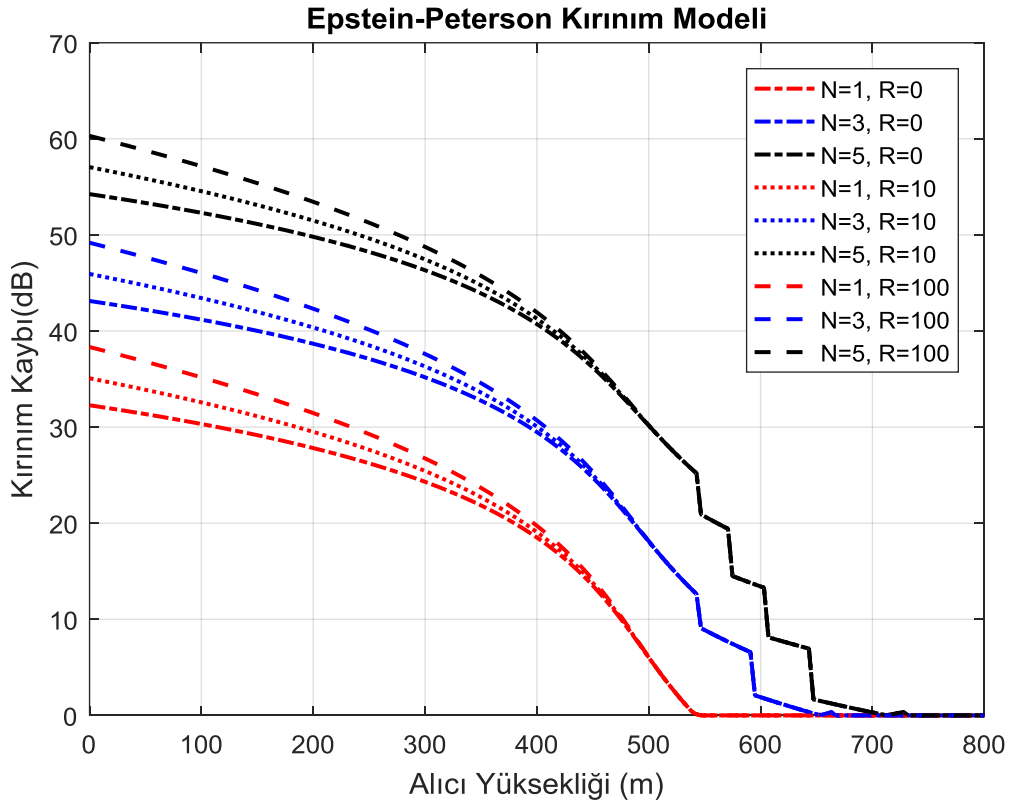


Şekil 3.9 Artan alıcı uzaklığı senaryosu (Şekil 3.8) için elde edilen kırımim kaybı sonuçları (yatay eksen logaritmik olarak çizilmiştir)

3.3.3. Yuvarlak Kenarlı Tepelerle Artan Alıcı Yüksekliği Senaryoları

Bu test senaryosunda Bölüm 3.1.1'de yapıldığı gibi alıcının yüksekliği 0'dan başlanarak belli aralıklarla 800 metreye kadar artırılmıştır. Aynı şekilde birinci yol

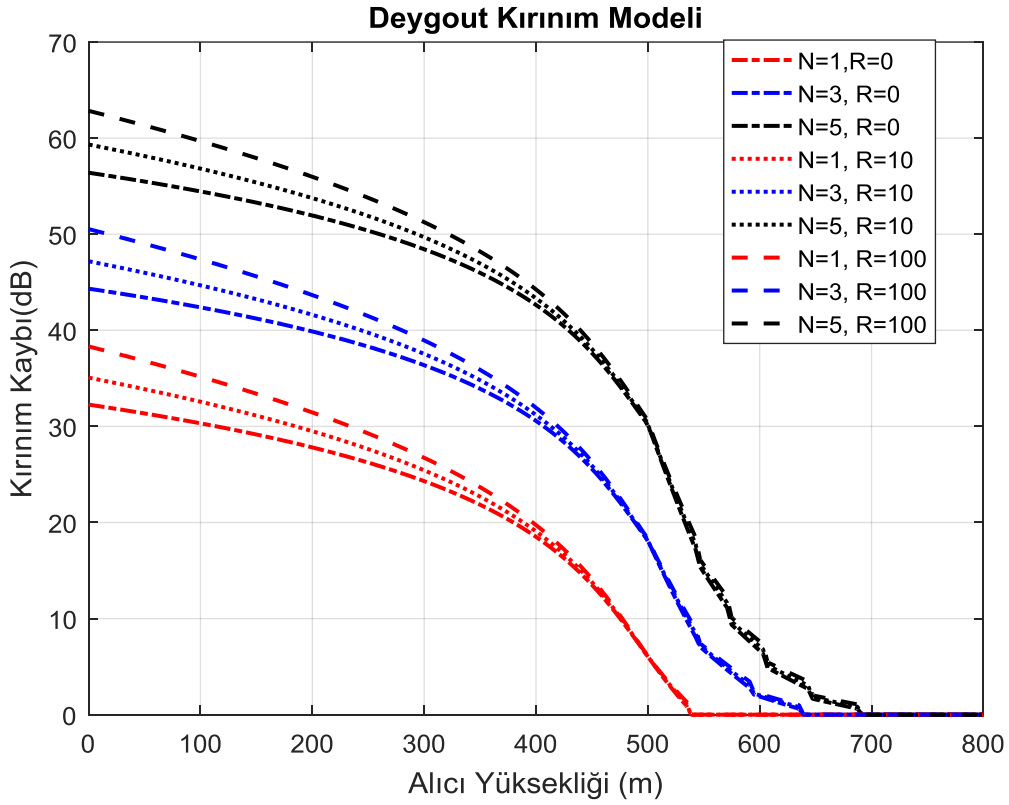
profilinde tek engel bulunurken, ikinci yol profilinde 3, üçüncü yol profilinde ise 5 engel bulunmaktadır. Kullanılan engeller, bıçak sırtı engeller yerine yuvarlak kenarlı tepeler şeklinde modellenmiştir. Yuvarlak tepelerin yarıçapları R olarak belirlenmiştir ve R'nin 0, 10 ve 100 m değerleri için Epstein-Peterson, Deygout ve Giovanelli yöntemleriyle 500 MHz'de kırımım kayıpları hesaplanmıştır. Vogler yöntemi yuvarlak kenarlı tepeler olarak modellenmiş engeller için bir hesaplama yapamadığı için bu bölümde Vogler yöntemi ile bir hesaplama yapılmamıştır. Bu senaryoda kullanılan yol profilleri Şekil 3.6'daki ile aynıdır fakat farklı olarak R'nin değerine göre engeller sabit R yarıçapına sahip yuvarlak tepeler olarak modellenebilmektedir. R yarıçapı 0 olduğunda engeller bıçak-sırtı modele dönüşmektedir.



Şekil 3.10 Artan alıcı yüksekliği senaryosu (Şekil 3.6) ile Epstein-Peterson yöntemi kullanılarak farklı R'ye sahip yuvarlak kenarlı tepeler şeklinde modellenmiş engeller için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.10'daki grafikte Epstein-Peterson çoklu engel kırımım modeli kullanılarak artan alıcı yüksekliği senaryosuyla değişik R değerleri ile alınan sonuçlar

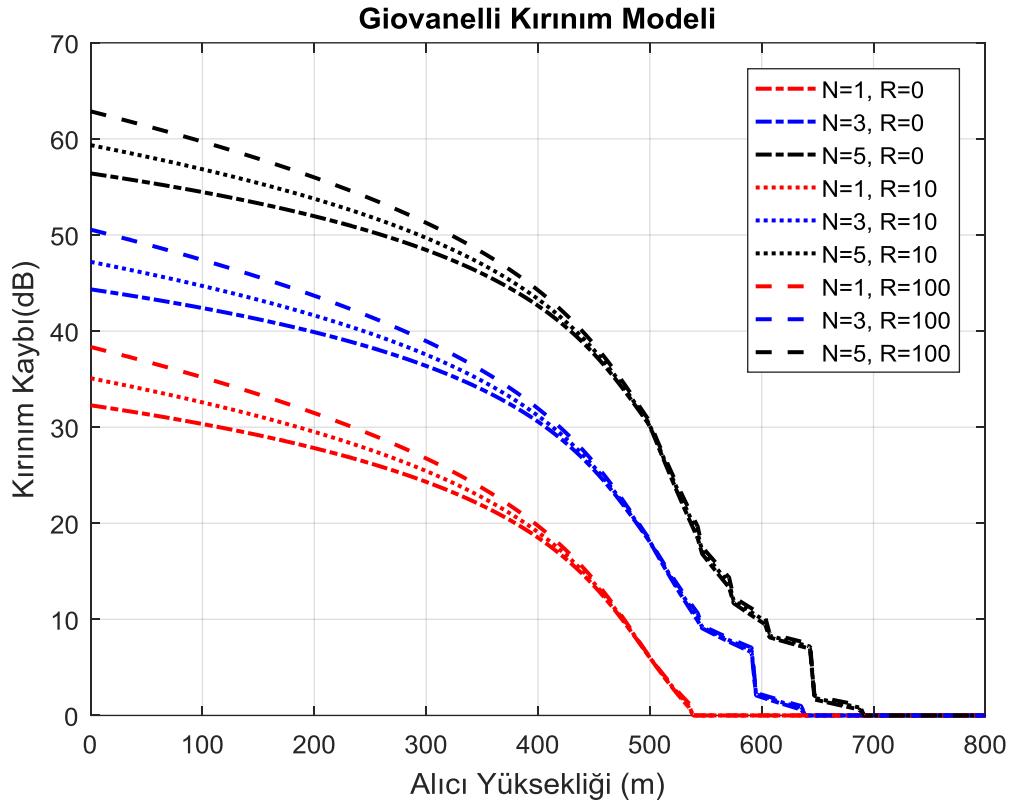
gösterilmektedir. Kırmızı renkle gösterilen çizgiler engel sayısının bir olduğu sonuçları vermektedir. Engellerinin hepsinin $R = 10$ m olarak modellenmesi ilk başta kırınım kaybında 3 dB'lik bir artış yaratmıştır. $R = 100$ m olarak modellendiğinde ise bıçak-sırtı engel senaryosundan yaklaşık olarak 6 dB'lik artışa sebep olmuştur. Alıcı yüksekliği yükseldikçe engellerin yarattığı kırınım etkisinin azalmasından kaynaklı olarak engelin yuvarlak tepeler olarak modellenmesinin getirdiği ek kırınım kaybı da azalmaktadır.



Şekil 3.11 Artan alıcı yüksekliği senaryosu (Şekil 3.6) ile Deygout yöntemi kullanılarak farklı R'ye sahip yuvarlak kenarlı tepeler şeklinde modellenmiş engeller için elde edilen sonuçlar

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'ye bakıldığında Epstein-Peterson yöntemi sonuçlarıyla benzer sonuçlar alındığı görülmektedir. Alıcı yüksekliği 500 metre üzerine çıktığında ise yöntemler Fresnel bölgesi hesaplarında kullanılan kırınım kaybının farklı şekillerde hesaplanmasından kaynaklı olarak farklı yollarla 0 dB'ye ulaşmaktadırlar. Deygout Yöntemi 2'nin Şekil 3.6'daki yol profilinde standart

Deygout yöntemi ile benzer sonuçlar vermesinden dolayı bu yöntem burada kullanılmamıştır.



Şekil 3.12 Artan alıcı yüksekliği senaryosu (Şekil 3.6) ile Giovanelli yöntemi kullanılarak farklı R'ye sahip yuvarlak kenarlı tepeler şeklinde modellenmiş engeller için elde edilen sonuçlar

3.3.4. Çeşitli Test Senaryolarıyla Yapılan Hesaplamalar

Önceki bölümlerde kullanılan test senaryolarında efektif yükseklik h' genel olarak 0 çıkmaktadır. Bu bölümde h' 'in farklı değerler aldığıında, daha yüksek engel sayılarındaki değişik test senaryolarını karşılaştırmak amacıyla geliştirilen kırınım modelleri benzetimleri ile hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca Bölüm 3.3.3'de tüm engellerin aynı yarıçapa sahip olduğu yuvarlak kenarlı olarak modellenmiş engeller test senaryoları ile farklı engel sayıları için çeşitli hesaplamalar yapılmıştı. Bu bölümde ise bazı engeller bıçak-sırtı, bazı engeller ise yuvarlak kenarlı engeller olarak modellenmek üzere, farklı engel tiplerinin aynı ortamda bulunduğu senaryolar kullanılarak kırınım kaybı hesaplamaları yapılmıştır.

Tablo 3.10 Yol profillerinin yükseklik, uzaklık ve yarıçap parametreleri

Senaryo #	Anten 1							Anten 2
		d1(m)	d2(m)	d3(m)	d4(m)	d5(m)	d6(m)	d7(m)
	h0(m)	h1(m)	h2(m)	h3(m)	h4(m)	h5(m)	h6(m)	h7(m)
		R1(m)	R2(m)	R3(m)	R4(m)	R5(m)	R6(m)	
1a		10000	5000	10000	15000	15000	25000	15000
	0	50	120	200	600	100	80	0
		0	0	0	0	0	0	0
1b		10000	5000	10000	15000	15000	25000	15000
	0	50	120	200	600	100	80	0
		10	10	10	10	10	10	0
1c		10000	5000	10000	15000	15000	25000	15000
	0	50	120	200	600	100	80	0
		100	100	100	100	100	100	0
1d		10000	5000	10000	15000	15000	25000	15000
	0	50	120	200	600	100	80	0
		0	0	10	100	10	0	0
1e		10000	5000	10000	15000	15000	25000	15000
	0	50	120	200	600	100	80	0
		100	10	10	0	0	0	0
2a		10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
	0	200	200	200	200	200	200	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
2b		10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
	0	200	200	200	200	200	200	0
		10	10	10	10	10	10	0
2c		10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
	0	200	200	200	200	200	200	0
		100	100	100	100	100	100	0
2d		10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
	0	200	200	200	200	200	200	0
		0	0	10	100	10	0	0
2e		10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
	0	200	200	200	200	200	200	0
		100	10	10	0	0	0	0

Tablo 3.10'da 10 adet yol profilinin mesafe, yükseklik ve yarıçap değeri verilmiştir. İletim yolundaki yayın frekansı 100 MHz olarak belirlenmiş ve hesaplamalar bu frekans değerinde yapılmıştır. Yol profillerinin hepsinin 6 engele sahip olduğu senaryolar için Tablo 3.11'de Tablo 3.10'da verilen yol profilleri için Vogler, Deygout, Deygout 2, Giovanelli ve Epstein-Peterson yöntemleri ile yapılan hesaplamalardan elde edilen kırımim kaybı sonuçları verilmektedir. Vogler yöntemi yuvarlak kenarlı tepeler olarak modellenmiş engellere uygulanamadığı için, bu tip engel içeren yol profillerinde bu yöntemle hesaplama yapılmamıştır.

Tablo 3.11 Vogler, Deygout, Deygout 2, Giovanelli ve Epstein-Peterson yöntemleriyle elde edilen kırımim kaybı (dB) sonuçları (Tablo 3.10'deki yol profilleri ile)

Senaryo #	Vogler Yöntemi ile Hesaplanan Değer(dB)	Deygout Yöntemi ile Hesaplanan Değer(dB)	Deygout Yöntemi 2 ile Hesaplanan Değer(dB)	Giovanelli Yöntemi ile Hesaplanan Değer(dB)	Epstein-Peterson Yöntemi ile Hesaplanan Değer(dB)
1a	17,73	26,18	23,03	26,18	44,26
1b	-	27,21	24,06	27,21	45,64
1c	-	28,44	25,29	28,44	47,27
1d	-	27,88	24,73	27,88	45,97
1e	-	26,74	23,59	26,74	44,87
2a	44,85	58,91	51,82	57,71	53,91
2b	-	60,21	53,13	58,93	56,5
2c	-	61,89	54,81	60,51	59,53
2d	-	59,12	52,03	57,92	55,25
2e	-	60,32	53,23	58,94	55,92

Tablo 3.10'da bulunan 1 numaralı yol profillerinde, dördüncü engel diğer engellere göre daha uzun modellenerek iletim yolunda dominant bir engelin olduğu bir senaryo kurgulanmıştır. Tablo 3.11'de 1a numaralı senaryonun sonuçlarına bakıldığında tüm yöntemler ile kırımim kaybı Vogler yöntemine göre daha fazla

hesaplandığı görülmektedir. Epstein-Peterson yöntemi ile hesaplanan değer Vogler yöntemi ile karşılaştırıldığında, bu yöntemin Vogler yönteminden 26.53 dB fazla hesapladığı görülmektedir. Bu yöntem diğer yöntemlere göre Vogler yöntemi ile en uzak tahmini yapan yöntemdir. 1b ve 1c numaralı yol profillerine bakıldığında yuvarlak kenarlı engellerin yarıçapının artması, her yöntemde, engellerin yuvarlak kenarlı engel olması nedeniyle gelen ek kırınım kaybını artırdığı görülmüştür. 1d senaryosunda en yüksek engel en fazla yarıçapa sahip senaryo olarak modellenmiştir. Bu model, dominant engel dışındaki engellerin yuvarlak engel yarıçapının daha fazla alınması şeklinde bir test senaryosu olan 1e modeliyle karşılaştırıldığında baskın engelin yuvarlak kenarlı olduğu senaryoda daha fazla kırınım kaybı hesaplandığı görülmektedir. Bu şekilde bir engelin diğer engellere göre daha baskın olduğu bir senaryoda Deygout yöntemi 2'nin kullanılması Vogler yöntemine daha yakın bir kırınım kaybı tahmini sağlamaktadır. 1a'dan 1e'ye kadar olan senaryolarda Deygout ve Giovanelli yöntemlerinin tamamen aynı sonucu verdiği görülmektedir. Bunun nedeni ise daha önce de belirtildiği gibi Giovanelli yönteminde efektif anten yüksekliğinin sıfır olmasıdır.

2 numaralı yol profillerinde engellerin hepsinin boyu 200 metre olarak verilmektedir ve engeller yol profiline eşit dağılmıştır. Böyle bir senaryoda 2a sonuçlarından da görüleceği gibi kırınım modellerinin hepsi Vogler yöntemi sonuçlarından 7 dB'den daha fazla kırınım kaybı hesapladığı görülmektedir. Deygout yöntemi 2 bu test senaryosunda da, Vogler yöntemine daha yakın bir kırınım kaybı hesaplamıştır. Epstein-Peterson yönteminin sonuçları, diğer yöntemlere göre Vogler yöntemi ile daha az farka sahiptir. 2d ve 2e senaryoları incelendiğinde ise bu senaryolarda verici antene yakın olan engellerin yuvarlak kenarlı olması kırınım kaybını daha çok artırmaktadır.

Tablo 3.12 Farklı frekans değerleri için Vogler, Deygout, Deygout 2, Giovanelli ve Epstein-Peterson yöntemleriyle elde edilen kırımım kaybı (dB) sonuçları (Tablo 3.10'deki 1a numaralı yol profili kullanılmıştır.)

Frekans (MHz)	Vogler Yöntemi ile Hesaplanan Değer(dB)	Deygout Yöntemi ile Hesaplanan Değer(dB)	Deygout Yöntemi 2 ile Hesaplanan Değer(dB)	Giovanelli Yöntemi ile Hesaplanan Değer(dB)	Epstein-Peterson Yöntemi ile Hesaplanan Değer(dB)
100	17,73	26,18	23,03	26,18	44,26
1000	26,42	33,65	33,23	33,65	60,24
1500	33,01	35,42	35,20	35,41	64,40
2000	36,72	36,67	36,56	36,67	67,52

Tablo 3.10'da 1a numarası ile verilen test senaryosu farklı frekans değerleri kullanılarak kırımım kaybı hesaplamaları yapıldığında Tablo 3.12'de görülen sonuçlar elde edilmektedir. Bu tablo incelendiğinde düşük frekans değerlerinde hesaplanan kırımım kaybı değerlerinin kırımım modelleri arasında oldukça farklı olduğu görülmektedir. Fakat frekans değeri arttıkça Epstein-Peterson yöntemi haricindeki tüm kırımım modelleri ile hesaplanan kaybın Vogler yöntemi sonuçlarına yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında radyo dalgası yayılımı modellenmesi için kullanılan çoklu engel kırınım modelleri geliştirilmiş ve analiz edilmiştir. Bir haberleşme sistemindeki kırınım kaynaklı kayıpları analiz etmek, haberleşme sisteminin yapısı planlanırken büyük bir önem taşımaktadır. Düzgün bir şekilde çalışan bir haberleşme sisteminde yayının sorunsuz olarak karşı tarafa iletilebilmesi için kırınım kaybını en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada öncelikle kırınım ve kırınım kaybı hesaplamalarının temelleri anlatılmıştır. Bıçak-sırtı olarak modellenmiş tek engel için Fresnel-Kirchhoff, ITU, Deygout ve Lee yöntemleri ile kırınım kaybı hesaplanması anlatılmıştır. Bu yöntemlerin bazı kırınım parametresine sahip noktalarda farklı kayıp değerleri verdikleri görülmüştür.

Çoklu bıçak-sırtı geometrisinde kırınım kaybı hesaplaması yapılmak istendiğinde kullanılan analitik bir yöntem olan Vogler yöntemi tanıtılmış ve bu yöntem MATLAB® ortamında geliştirilerek benzetimler yapılmıştır. Vogler yöntemi geliştirilmesi oldukça zor bir yöntem olmasının yanında diğer yöntemlere göre oldukça fazla sürede sonuç hesaplanmaktadır. Örnek olarak, 6 engelli bir yol profilinde hesaplama yapılırken diğer yöntemler 0.06 saniye gibi bir sürede hesaplama yaparken, Vogler yöntemi aynı hesaplama için 81.4 saniye gibi bir süre harcamaktadır. β parametresinin $-0,1 < Re\{\beta\} < 0$ olduğu durumlarda Vogler yöntemi hesaplanması gereken kırınım kaybından daha büyük bir değer hesaplamaktadır. Bu nedenle hesaplama yapılırken kullanılan β parametresine de özel bir önem göstermek gerekmektedir. Vogler yönteminin gerektirdiği süre ve hesaplama zorlukları nedeni ile yaklaşık hesaplama yapan kırınım modellerini (Deygout, Giovanelli, Epstein-Peterson) kullanmak çok daha kullanışlı olmaktadır. Ayrıca Vogler yönteminde engelleri yuvarlak kenarlı tepeler olarak modellemek mümkün değildir.

Yol profilinde birden fazla engel olması durumunda, çoklu bıçak-sırtı geometrisi için geometrik hesaplama teknikleri kullanarak kırınım kaybı tahmini yapılabilen Deygout, Giovanelli ve Epstein-Peterson yöntemleri ile kırınım kaybının nasıl hesaplandığı anlatılmış, yöntemler MATLAB® ortamında geliştirilerek benzetimler

yapılmıştır. Ayrıca Deygout yöntemi için [19] makalesinde anlatılan düzeltme terimi ile Deygout yöntemi için ikinci bir model daha geliştirilmiştir. Vogler, Deygout ve Giovanelli yöntemlerinin benzetimlerinde özyinelemeli algoritmalar (*Ing.* recursive algorithms) kullanılmıştır. Tüm yöntemler için geliştirilen MATLAB® programları çeşitli tipte ve sayıda engeller için kırınım kaybı hesapları yapabilmektedir. Bu yöntemleri doğrulamak için çeşitli makaleler ve çalışmalar incelendikten sonra, öncelikle benzetimlerde geliştirilen algoritmaların doğruluğunu ispatlamak amacı ile [15] ve [2] kaynaklarından faydalanılmıştır. Bu kaynaklarda verilen yol profilleri ve çoklu kırınım kaybı modelleri hesaplama sonuçları ile bu tez için geliştirilen benzetimler kullanılarak ulaşılan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu sonuçlar, tek engel için kırınım kaybı yöntemleri ile de hesaplanmış ve farkları değerlendirilmiştir.

Elde edilen benzetim sonuçlarının birbirleriyle karşılaştırılarak performans değerlendirmesi yapılması için çoklu kırınım kaybı yöntemleri çeşitli yol profilleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Epstein-Peterson, Deygout ve Giovanelli yöntemlerinin doğrulukları, analitik bir yöntem olmasından dolayı Vogler yönteminden alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bunun için tüm engellerin bıçak-sırtı olarak modellendiği üç farklı yol profili ile alıcı yüksekliği artırılmış ve tüm yöntemlerle kırınım kaybı hesaplamaları yapılmıştır. Bu senaryo ile alıcı yüksekliği arttıkça engeller Fresnel bölgesinden çıkarken yöntemlerin nasıl bir davranış gösterdiği incelenmiştir. Aynı şekilde yine tüm engellerin bıçak-sırtı olarak modellendiği üç farklı yol profili ile bir de alıcı uzaklığı sürekli artırılmış ve tüm yöntemlerle kırınım kaybı hesaplanmıştır. Artan alıcı uzaklığı senaryosu, yöntemlerde yeterince uzaklıktan sonra sabit bir kırınım kaybı hesaplandığını göstermiştir. Artan alıcı yüksekliği senaryosundaki engeller yuvarlak kenarlı tepeler olarak modellenmiş ve bir de bu şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Yuvarlak kenarlı tepelerin yarıçapı arttıkça, engelin yuvarlak kenarlı olmasından dolayı gelen ek kırınım kaybı daha da artmıştır.

Altı engel bulunan başka tipte senaryoları incelemek için bir engelin diğer engellere göre dominant olduğu bir senaryo oluşturulmuş, bu senaryoda engelleri bıçak-sırtı ve yuvarlak kenarlı tepeler olarak modellenmiştir. Bu tipte bir senaryoda Epstein-

Peterson modelinin olması gerekenden çok daha yüksek değerde kırımım kaybı hesapladığı gözlemlenmiştir. Farklı tipte engeller aynı yol profilinde modellenmiş ve yuvarlak kenarlı engellerin konumuna göre daha yüksek kayıp getirebileceği görölmüştür. Aynı yükseklikte engellerin olduğu bir senaryo kurulup böyle bir senaryoda kırımım modellerinin hepsinin daha yüksek kayıplar hesapladığı görölmüştür. Bu senaryoda da engeller farklı tiplerde modellenerek değişik hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca baskın engele sahip olan test senaryosu için farklı frekanslarda kırımım kayıpları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda Epstein-Peterson yöntemi haricindeki kırımım modellerinin, frekans arttıkça Vogler yöntemine yakın sonuçlar verdiği görölmüştür.

Bütün hesaplamalarda ortak olarak görölen sonuç, Deygout yöntemine ek düzeltme terimi getirildiğinde yapılan hesaplamaların Vogler yöntemine çok daha fazla yaklaşmış olduğudur. Deygout ve Giovanelli yöntemleri yol profilinin tipine göre bazı durumlarda benzer sonuçlar da verebilmektedir. Bu iki yöntem kırımım kaybını Vogler yönteminden her zaman daha fazla hesaplamaktadır ve bu fazlalık ise genel olarak çok büyük farklara çıkmamaktadır. Deygout ve Giovanelli yöntemi bir yol profilinde dominant bir engelin olduğu durumlarda Vogler yöntemine daha yakın sonuçlar bulmaktadır. Epstein-Peterson yöntemi ise dominant bir engel olduğunda Vogler yöntemine daha yakın sonuçlar verememektedir ama geliştirilmesi en kolay kırımım modeli olduğu görölmüştür. Ayrıca yöntem, alıcı antenin çok uzaklaştığı durumlarda bazı engel sayılarında Vogler sonuçlarına çok yaklaşsa da bazı engel sayılarında sonuçların farkı fazla miktarda artmaktadır. Bütün yöntemlere bakıldığında efektif yüksekliğin sıfır olduğu yol profillerinde Deygout, Epstein-Peterson ve Giovanelli yöntemleri dışında başka tipte hesaplama yöntemlerinin kullanılması gerektiği görölmektedir. Yüksek frekanslara sahip iletim yolunda Epstein-Peterson yöntemi dışındaki modellerin Vogler yöntemine daha yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] A. Ghasemi, F. Ghasemi, A. Abedi, Propagation Engineering in Wireless Communications, Springer, **2012**.
- [2] S. R. Saunders, A. A. Zavala, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Wiley, Second Edition, **2007**.
- [3] International Telecommunication Union, Propagation By Diffraction, ITU-R Recommendation P.526-5.
- [4] J. B. Keller, Geometrical theory of diffraction, Journal of the Optical Society of America, 52 (2), 116–130, **1962**.
- [5] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface, Proceedings of IEEE, 62, 1448–1461, **1974**.
- [6] K. Bullington, Radio Propagation at frequencies above 30 megacycles, Proc. I. R. E., vol. 35, pp. 1122-1136, October **1947**.
- [7] G. Millington, R. Heaitt, F. S. Immirzi, Double knife-edge diffraction in field-strength predictions, IEE Monograph 507E, pp. 419-429, March **1962**.
- [8] K. Furutsu, On the theory of radio wave propagation over inhomogeneous earth, J. Res. VBS (Radio Propagation), vol. 67D, p. 39, January **1963**.
- [9] L. E. Vogler, The Attenuation of Electromagnetic Waves By Multiple Knife-Edge Diffraction, NTIA Report, October **1981**
- [10] J. Epstein, D. W. Peterson, An experimental study of wave propagation at 850 Mc/s, Proc. IEEE, vol. 41, pp. 595-611, May **1953**.
- [11] C. L. Giovanelli, An analysis of simplified solutions for multiple knife-edge diffraction, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 32 (3), 297-301, **1984**.
- [12] J. Deygout, Multiple knife-edge diffraction of microwaves, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. AP-14, no.4, pp. 480-489, **1966**.
- [13] N. Blaunstein, Radio Propagation in Cellular Networks, Artech House, London, **2000**.

- [14] J. H. Causebrook and B. Davies, Tropospheric radio wave propagation over irregular terrain: the computation of field strength for UHF broadcasting, BBC Research Report 43, **1971**.
- [15] T.L. Rusyn, A study of the 'slack-string' knife-edge diffraction model, The 3rd European Conference on Antennas and Propagation, **2009**.
- [16] Vaughan R. and Andersen J.B., Channels, Propagation and Antennas for Mobile Communications, IEE Press, London, **2002**.
- [17] International Telecommunication Union, Propagation By Diffraction, ITU-R Recommendation P.526-13.
- [18] Anonim, Birinci Fresnel Bölgesi, https://www.cobham.com/static/GMS%20Calc%20Files/calc_define.asp (Erişim tarihi: 16 Mayıs 2019).
- [19] J. Deygout, Correction Factor for Multiple Knife-Edge Diffraction, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 39, no.8, pp. 1256-1258, **1991**.
- [20] Rappaport T.S., Wireless Communications: Principles and Practice, Prentice Hall PTR, New Jersey, **1996**.
- [21] L. E. Vogler, An attenuation function for multiple knife-edge diffraction, Radio Science, vol. 17, no. 6, pp. 1541-1546, **1982**.
- [22] Abramowitz, M. and I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions, Appl. Math. Set., vol. 55, National Bureau of Standards, Washington, D.C., **1964**
- [23] C. Tzaras and S.R. Saunders, Rapid, uniform computation of multiple knife-edge diffraction, ELECTRONICS LETTERS 4th February 1999 Vol. 35 No. 3, **1999**.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/~~DOKTORA~~ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 12/06/2019

Tez Başlığı / Konusu: **Radyo Dalgası Yayılımı Modellemesi İçin Çoklu Engel Kırınım Yöntemlerinin Geliştirilmesi ve Karşılaştırmalı Analizi**

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 77 sayfalık kısmına ilişkin, 12/06/2019 tarihinde ~~çalışmam~~/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dahil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Nuriye Dicle TÜRKÖNE

12/06/2019

Öğrenci No: N15223267

Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN
(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : NURİYE DİCLE TÜRKÖNE
Doğum yeri : ÇUBUK / ANKARA
Doğum tarihi : 07/02/1992
Medeni hali : BEKAR
Yazışma adresi : -
Telefon : -
Elektronik posta adresi : ndicleturkone@gmail.com
Yabancı dili : İNGİLİZCE

EĞİTİM DURUMU

Lisans : HACETTEPE ÜNİ., ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜH.
Yüksek Lisans : HACETTEPE ÜNİ., ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜH.

İŞ TECRÜBESİ

2016-2017 Endoks Enerji, Sayısal Tasarım Mühendisi
2017- ASELSAN A.Ş., Sayısal Tasarım Mühendisi