

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LEO-GEO-YER HABERLEŞME SİSTEMİNİN TASARIMI VE
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ**

DOKTORA TEZİ

Elektronik Yük. Müh. Ümit Cezmi YILMAZ

**MART 2016
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LEO-GEO-YER HABERLEŞME SİSTEMİNİN TASARIMI VE
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ**

Elektronik Yüksek Müh. Ümit Cezmi YILMAZ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :15/02/2016
Tezin Savunma Tarihi :18/03/2016**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR

Trabzon 2016

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Elektrik–Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında
Ümit Cezmi YILMAZ Tarafından Hazırlanan**

**LEO-GEO-YER HABERLEŞME SİSTEMİNİN TASARIMI VE
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 01 / 03 / 2016 gün ve 1642 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. İnan GÜLER

Üye : Prof. Dr. Erkan AFACAN

Üye : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Haydar KAYA

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tuğrul ÇAVDAR

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı çerçevesinde hazırlanmış olan bu tezde, Dünya yüzeyinden görüntü, video veya herhangi bir bilimsel ve/veya askeri amaçlı verinin en kısa sürede ve en güvenli şekilde ana kontrol istasyonuna aktarılması için sistem tasarım parametreleri ele alınmış ve Türkiye odaklı olarak iyileştirmeler önerilmiştir. Yapılan iyileştirmeler ve geliştirmeler sistemin her aşamasında benzetimler ve örneklemeler ile açıklanmıştır.

Tez çalışmam boyunca akademik desteğini ve değerli fikirlerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’a teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunuyorum. Ayrıca tez izleme jürimde bulunan ve değerli önerileri ve fikirleriyle yönlendirmelerde bulunan değerli hocalarım Sayın Yrd.Doç.Dr. Haydar KAYA ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Tuğrul ÇAVDAR’a çok teşekkür ediyorum.

Çalışmalarında ve koşuşturmalarında yardımlarını esirgemeyen değerli dostlarım başta Hayati TÜRE olmak üzere, Mevlüt TOPALOĞLU, Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan ÇAKIR, Yrd. Doç. Dr. Emre ÖZKOP, Yrd. Doç. Dr. Yusuf SEVİM, Yrd. Doç. Dr. Ayhan YAZGAN, Yrd. Doç.Dr. Emin TUĞCU ve Arş. Gör. Zeynep HASIRCI’ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Tüm hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili aileme, bana çalışmalarımın her aşamasında her türlü zorluğa rağmen destek olan eşim Yasemin AYDIN YILMAZ ve hayat enerjim, oğlum Miraç Emin YILMAZ’a en içten şükranlarımı sunuyorum.

Bu tezin, konu hakkına çalışan diğer araştırmacılara ve ülkemizin gelişmesine katkıda bulunmasını temenni ederim.

Ümit Cezmi YILMAZ

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “LEO-GEO-YER Haberleşme Sisteminin Tasarımı ve Performansının İyileştirilmesi: Türkiye Örneği” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/03/2016.

Ümit Cezmi YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Uydular Arası İletişimin Gelişimi	3
1.2.1. Uydular Arası İletişimde RF ve Optik Karşılaştırılması	7
1.3. Uydu-Yer İletişiminin Gelişimi.....	9
1.4. Çalışılan Sistemin Temel Bileşenleri.....	12
1.4.1. LEO ve GEO Uyduları Arası Optik İletişim Sisteminin Temel Bileşenleri.....	14
1.4.1.1. Lazer Kaynakları ve Gauss Işıma Profili.....	14
1.4.1.2. Foto Detektörler.....	17
1.4.1.2.1. PIN Foto-detektörler.....	18
1.4.1.2.2. APD Foto- detektör.....	19
1.4.1.3. Optik Haberleşme Alıcı Çeşitleri.....	23
1.4.1.4. Doğrudan Algılayıcılar	23
1.4.1.5. Eş Zamanlı (Homodyne) Algılama.....	24
1.4.1.6. Ara-kathı (Heterodyne) Algılama.....	25
1.4.1.7. İki Uydu Arasında Optik Bağlantı Bütçesi	26
1.4.1.7.1. Titreşim Etkisi ve Kaynakları	28
1.4.1.7.2. Odaklama Hatası.....	31
1.4.1.8. GEO Uyduyu Arama Seçenekleri.....	32
1.4.1.9. LEO ve GEO Uyduların Birbirlerini Bulması	34
1.4.2. Uzaydaki Bir Yörüngenin Elemanları	36

1.4.2.1.	Yörünge Parametrelerinden Kartezyen Koordinatlara Dönüşüm.....	38
1.4.2.2.	Kartezyen Koordinatlardan Yörünge Parametrelerine Dönüşüm.....	39
1.4.2.3.	Bir GEO Uydunun Nominal Kontrol Çevrimi.....	40
1.4.2.3.1.	Kuzey/Güney Manevrası	41
1.4.2.3.2.	Doğu/Batı Manevrası.....	42
1.4.3.	GEO Uydu-Yer Arası İletişim Sisteminin Temel Bileşenleri	42
1.4.3.1.	Etkin Yönsesiz Yayılan Güç (EIRP)	44
1.4.3.2.	Uydu İletişiminde İletim Kayıpları.....	44
1.4.3.2.1.	Serbest Uzay Kaybı	44
1.4.3.2.2.	Uydu İstasyon Uzaklığı (D).....	46
1.4.3.2.3.	Atmosferik Kayıplar	46
1.4.3.2.4.	Yağmurun Etkisi.....	47
1.4.3.2.5.	Anten Odaklama Kaybı	52
1.4.3.2.6.	Kazanç Gürültü Sıcaklığı Oranı (G/T)	52
1.4.3.2.7.	Isıl Gürültü.....	52
1.4.3.2.8.	Sistem Sıcaklığı	53
1.4.3.2.9.	İşaret Gürültü Gücü Oranı (C/N).....	54
1.4.3.2.10.	İstasyon-Çeşitleme Kazancı.....	55
1.5.	Mevcut Kullanılan Sistem: Göktürk-2 Uydusu	57
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	60
2.1.	Giriş	60
2.2.	Türkiye Hedef Kapsama Alanı Seçimi	63
2.3.	Türkiye İçin En Uygun LEO Yörüngesinin Belirlenmesi	64
2.4.	Bir GEO Uydunun Yörüngesi İçin Hata Analizi.....	67
2.4.1.	TÜRKSAT-3A Örneği.....	68
2.4.2.	LEO-GEO Arasındaki Bağlantıda Doppler Etkisi.....	70
2.5.	GEO Uydu Yörünge Hatasının Düzeltilmesi ve LEO Uydunun GEO Uyduyu Bulma Süresinin Kısaltılması	73
2.5.1.	Benzetim Çalışması ve Sonuçları	78
2.6.	GEO – Yer İstasyon(ları) Arası Haberleşme ve Yer İstasyonlarının Konumlarının Belirlenmesi	87
2.6.1.	Yer İstasyonları Konumu Seçimindeki Kısıtlamalar	89
2.6.2.	Yer İstasyonlarının Konumlarının Belirlenmesi Algoritması	91
2.6.3.	Türkiye İçin Q/V Bantta Çalışan İstasyon Konumlarının Belirlenmesi.....	94

2.7.	Türkiye Geneli İçin İstasyon Çeşitlemesi Tekniğinin Uygulanması.....	97
2.8.	LEO- GEO-Yer Arası Haberleşme Sisteminin Modellenmesi.....	100
2.8.1.	LEO-GEO Arası Optik Haberleşme	101
2.8.1.1.	LEO-GEO Arası Optik Bağlantı Simulink Modeli	104
2.8.1.2.	GEO-Yer Bağlantısının Modellenmesi.....	111
2.8.1.3.	LEO-GEO-Yer Bağlantı Sisteminin Modellenmesi	113
3.	SONUÇLAR.....	116
4.	ÖNERİLER.....	118
5.	KAYNAKLAR	119
6.	EKLER	127
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

LEO-GEO-YER HABERLEŞME SİSTEMİNİN TASARIMI VE PERFORMANSININ
İYİLEŞTİRİLMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Ümit Cezmi YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR
2016, 126 Sayfa, 19 Sayfa Ek

Yeryüzünden bilimsel, askeri veya kamu amaçlı herhangi bir görüntünün toplanması için LEO uydular yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kullanılan LEO uydunun yörüngesine bağlı olarak kurulan yer istasyonları, uydu ile sınırlı bir haberleşme süresine sahip olmakta ve genelde kutup bölgesinde başka bir ülke topraklarına konuşlandırılmaktadır. Ancak bir GEO uydunun LEO uydudan gelen verileri anahtarlayarak doğrudan yere ulaştırma fikri, gün geçtikçe daha ilgi çekici olmaktadır. Konu hakkında yapılan çalışmalar ve testler, iki uydu arasında lazer haberleşmenin kullanılabileceğini ve GEO uydudan yer istasyonuna/istasyonlarına verinin aktarılması için de RF kullanılabileceğini göstermiştir. Yapılan bu çalışmada, Türkiye odaklı olarak LEO-GEO-Yer haberleşme sistemi iyileştirilmiş, geliştirilen çözümler ile sistemin kesintisizlik yüzdesi artırılmış ve belirlenen bir hedef bölgeden daha fazla verinin toplanılması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uydular arası iletişim, Uydu haberleşmesi, Q/V-bant, uydular arası lazer haberleşme, Q/V-bant yer istasyonu seçimi

PhD. Thesis

SUMMARY

DESIGN AND PERFORMANCE IMPROVEMENT OF LEO-GEO-GROUND STATION
COMMUNICATION SYSTEM: TURKEY EXAMPLE

Ümit Cezmi YILMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. İsmail Hakkı ÇAVDAR
2016, 126 Pages, 19 Pages Appendix

The LEO satellite have been used commonly to collect information from Earth surface for science, military or any other governmental missions. The satellite then transmits the collected data to the dedicated ground stations in polar region or inside the target country. Because of the limited observation of these ground stations, the LEO satellite has limited time interval for data transmission. On the other hand, using a GEO satellite to relay the data to the main ground station is becoming more popular recently because of its advantages. There are also successful experiments and studies on the subject. In this study, a system consists of LEO-GEO and Ground station is suggested and some system parameters are improved. By doing so, an uninterruptable and more data transmission is achieved from LEO to Ground stations via GEO satellite for Turkey example. The laser communication link between LEO and GEO is selected. From GEO to Ground; RF link is selected.

Key Words: Intersatellite link, interorbit link, Satellite communication, Q/V-band, intersatellite laser communication, determination of Q/V-band ground station

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. LEO-GEO-Yer haberleşme sistemi (ölçeksiz).....	13
Şekil 2. Elektromanyetik spektrum	15
Şekil 3. Gauss lazer profili gösterimleri	16
Şekil 4. APD İçin Kazanç Öngerilim Grafiği [43]	20
Şekil 5. Tipik bir APD için SNR M grafiği	22
Şekil 6. Genel bir doğrudan lazer alıcı diyagramı [44]	24
Şekil 7. Genel bir evre uyumlu doğrudan alıcı diyagramı [44]	24
Şekil 8. Genel bir eş zamanlı alıcı diyagramı [44]	25
Şekil 9. Tipik bir uydular arası optik bağlantı	26
Şekil 10. Lazer haberleşmede arama, bulma fazı örneği	33
Şekil 11. Lazer haberleşmede hassas ABT fazı örneği	33
Şekil 12. Lazer haberleşmede örnek bir arama, bulma ve takip fazı.....	35
Şekil 13. Uzayda yörünge elemanları [53]	37
Şekil 14. Yörünge düzlemindeki yörünge elemanları	37
Şekil 15. Bir GEO uydu için manevra çevrim planı.....	40
Şekil 16. Boylam penceresi örneği (42 derece doğu).....	40
Şekil 17. Kuzey/Güney manevrası	41
Şekil 18. Doğu manevrası.....	42
Şekil 19. Uydu-Yer İletişim Bağı	43
Şekil 20. Uydu-Yer İletişiminde atmosferik kayıplar	47
Şekil 21. Yağmur zayıflatması için yer istasyonu uydu yolu [62]	50
Şekil 22. Göktürk-2 yer istasyonları kapsama alanları ve yörüngesi (2 boyutlu)	58
Şekil 23. Göktürk-2 yer istasyonları kapsama alanları ve yörüngesi (3 boyutlu)	58
Şekil 24. Göktürk-2 uydusu ile yer istasyonlarına bir günlük erişim örneği.....	59
Şekil 25. Örnek bir erişimde optik haberleşme fazları	61
Şekil 26. LEO-GEO uydular arası iletişim senaryosu: Türkiye örneği (ölçeksiz)	62
Şekil 27. Türkiye merkezli seçilen örnek bir hedef bölge.....	63
Şekil 28. Toplam erişim süresi, LEO uydu yörünge eğikliği ve irtifası ile değişimi	65
Şekil 29. LEO ve Göktürk-2 uydularının karşılaştırılması.....	66

Şekil 30. Göktürk-2 ve önerilen LEO uydunun Türkiye üzerinden geçiş yörüngeleri	67
Şekil 31. GEO uydu yörünge kontrol çevrimi	69
Şekil 32. TÜRKSAT-3A (GEO) yörünge hataları (2010 yılı için)	70
Şekil 33. Optik bağlantı için örnek Doppler kaymaları	71
Şekil 34. GEO uydu yörüngesindeki yarıasal eksen, yörünge eğikliği ve dışmerkezlilik hatalarında Doppler hatası	72
Şekil 35. GEO uydu yörüngesindeki RAAN, AoP ve Gerçek ayrıklık hatalarında Doppler hatası	73
Şekil 36. LEO uyduya göre teorik ve gerçek GEO uydu konumları	75
Şekil 37. GEO uydu yörüngesinin düzeltilme akış diyagramı	77
Şekil 38. GEO, boylam hata: 0.000 derece, yörünge eğikliği hata:0.005 derece	81
Şekil 39. GEO, boylam hata: 0.000 derece, yörünge eğikliği hata:0.010 derece	81
Şekil 40. GEO, boylam hata: 0.000 derece, yörünge eğikliği hata:0.020 derece	82
Şekil 41. GEO, boylam hata: 0.000 derece, yörünge eğikliği hata:0.040 derece	82
Şekil 42. GEO, boylam hata: 0.010 derece, yörünge eğikliği hata:0.000 derece	83
Şekil 43. GEO, boylam hata: 0.008 derece, yörünge eğikliği hata:0.000 derece	83
Şekil 44. GEO, boylam hata: 0.008 derece, yörünge eğikliği hata:0.004 derece	84
Şekil 45. GEO, boylam hata: 0.005 derece, yörünge eğikliği hata:0.005 derece	84
Şekil 46. GEO, boylam hata: 0.005 derece, yörünge eğikliği hata:0.010 derece	85
Şekil 47. GEO, boylam hata: 0.010 derece, yörünge eğikliği hata:0.010 derece	85
Şekil 48. GEO, boylam hata: 0.030 derece, yörünge eğikliği hata:0.030 derece	86
Şekil 49. Uydu mesafe ölçüm sistemi	89
Şekil 50. GEO uydu spot kapsama alanı	91
Şekil 51. İstasyon çiftlerinin seçilmesi için önerilen akış diyagramı	93
Şekil 52. Türkiye için birleşik korelasyon sonuçları	94
Şekil 53. Türkiye örneği için olası istasyon yerleşimi(Örnek No: I, D=90cm)	97
Şekil 54. Türkiye illerinde haftalık yağmur düşümleri.....	98
Şekil 55. Avrupa için Köppen- Geiger iklim sınıflandırması.....	99
Şekil 56. LEO-GEO-Yer Bağlantı Modeli gösterimi	100
Şekil 57. Optik bir terminal için kazanç ve odaklama kayıpları örneği	103
Şekil 58. Toplam Kazanç – Anten çapı	104
Şekil 59. LEO-GEO optik haberleşme modeli (a) LEO_Tx, (b) GEO_Rx.....	105
Şekil 60. Benzetimler için kullanılan titreşim modeli	105
Şekil 61. Alıcı ve vericideki titreşim örnekleri	106

Şekil 62. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma= 1\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)	107
Şekil 63. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma= 1.5\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)	107
Şekil 64. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma= 2\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)	108
Şekil 65. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma= 2.5\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)	108
Şekil 66. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma= 3\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)	109
Şekil 67. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma= 3.5\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)	109
Şekil 68. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma= 4\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)	110
Şekil 69. LEO-GEO optik haberleşme benzetim sonuçları.....	111
Şekil 70. RF bağlantı kesintisizliği ve GEO-Yer bağlantı bütçesi	113
Şekil 71. LEO-GEO-Yer sisteminde bağlantı kesintisizliği ve BER	114
Şekil 72. LEO-GEO-Yer bağlantı kesintisizliği, optik anten çapı ve BER.....	115
Ek Şekil 1. Ardahan ili yağmur hızı dönüşümü.....	142
Ek Şekil 2. İzmir ili yağmur hızı dönüşümü.....	142
Ek Şekil 3. Kahramanmaraş ili yağmur hızı dönüşümü	143
Ek Şekil 4. Adıyaman ili yağmur hızı dönüşümü.....	143

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Uydular arası iletişim tarihçesi.....	7
Tablo 2. Optik ve RF haberleşme karşılaştırmaları.....	8
Tablo 3. Frekans bantları.....	12
Tablo 4. Detektör Çeşitleri.....	17
Tablo 5. Si, Ge ve InGaAs PIN foto-diyotlar için genel parametreler [42].....	23
Tablo 6. Si, Ge ve InGaAs APD foto-diyotlar için genel parametreler [42].....	23
Tablo 7. Atmosferik zayıflama örnekleri.....	47
Tablo 8. k_H için katsayılar.....	48
Tablo 9. k_V için katsayılar.....	48
Tablo 10. α_H için katsayılar.....	49
Tablo 11. α_V için katsayılar.....	49
Tablo 12. Göktürk-2 yörünge parametreleri.....	57
Tablo 13. Göktürk-2 uydusu günlük erişim süreleri örneği.....	59
Tablo 14. GÖKTÜRK-2 ile önerilen LEO uydunun karşılaştırılmaları.....	66
Tablo 15. TÜRKSAT-3A uydu üzerindeki yörünge hesaplama hataları.....	69
Tablo 16. GEO uydu yörünge parametreleri.....	78
Tablo 17. Optik haberleşme parametreleri.....	79
Tablo 18. Simülasyon sonunda ulaşılan iyileştirmeler.....	80
Tablo 19. Benzetim sonucuna göre günlük kazanılan veri miktarı.....	87
Tablo 20. Türkiye örneği için sabit kabul edilen bağlantı değerleri.....	92
Tablo 21. Türkiye için anten özelliği örnekleri.....	95
Tablo 22. Türkiye örneği için olası istasyonlar ve erişilen SNR.....	96
Tablo 23. Tüm Türkiye illeri için yağmur yağma korelasyonu.....	98
Tablo 24. LEO-GEO optik bağlantı modeli parametreleri.....	101
Tablo 25. LEO-GEO bağlantısında seçilen PIN diyot parametreleri.....	102
Tablo 26. GEO-Yer RF bağlantı parametreleri.....	111
Tablo 27. RF bağlantı yüzdesi ve bağlantı bütçesi parametreleri.....	112
Ek Tablo 1. LEO-GEO arası optik bağlantı bütçesi.....	127
Ek Tablo 2. Türkiye için seçilen hedef bölge sınır koordinatları.....	128
Ek Tablo 3. Türkiye illeri için birleşik korelasyon katsayıları.....	133

Ek Tablo 4. GEO-Yer arası RF bağlantı bütçesi örneği-1.....	140
Ek Tablo 5. GEO-Yer arası RF bağlantı bütçesi örneği-2.....	141



SEMBOLLER DİZİNİ

°	: Derece
AEHF	: Advanced Extremely High Frequency
BER	: Bit Error Rate
BIF	: Ara frekans gürültü bant genişliği
c	: ışık hızı, 299792458 m/s
COMETS	: Communication and Broadcasting Engineering Test Satellite
D _R	: Alıcı çapı
DRTS	: Data Relay Test Satellite
D _T	: Verici çapı
EDRS	: European Data Relay System
EIRP	: Equivalent Isotropically Radiated Power
ESA	: European Space Agency
F	: Aşırı gürültü faktörü
G	: Foto-dedektörün kazancı
GEO	: Geostationary Earth Orbit (Yerdurağan Yörünge)
GMES	: Global Monitoring for Environment and Security
GPS	: Global Positioning System
G _R	: Alıcı kazancı
G _T	: Verici kazancı
h	: Plank sabiti, 6.624 10 ⁻³⁴ Js
hf	: Veri hızı
h _v	: Foton enerjisi
I _{bk}	: Güçlendirilmiş arkaplan akımı
I _D	: Toplam kaçak akım
I _{dm}	: Güçlendirilmiş akım
I _{DS}	: Yüzey kaçak akımı
I _{dsig}	: Alıcıya gelen işaretin dc bileşeni
I _{ka}	: Dedektör karanlık akımı
I _s	: Güçlendirilmiş yüzey akımı

I_{sdd}	: Akım yoğunluğu
I_{shot}	: Saçma gürültü akımı
I_{sig}	: Alıcıya gelen işaret
ISL	: Inter-Satellite Link, Uydular arası iletişim
I_t	: Dedektör toplam akımı
ITU	: International Telecommunication Union
i_{LO}	: Yerel karıştırıcı gürültüsü
k	: Boltzman sabiti, $1.374 \cdot 10^{-23}$ J/K
k_y	: Yalıtkanlık oranı
K_{eff}	: Efektif iyonizasyon katsayısı
L	: Besleyici kazancı
LASER	: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LEO	: Low Earth Orbit (Dünyaya Yakın Yörünge)
L_G	: Yağmur yolu yatay bileşeni
L_{PR}	: Alıcıda oluşan odaklama kaybı
L_{PT}	: Vericide oluşan odaklama kaybı
L_R	: Alıcı sistem kayıpları
L_S	: Serbest uzay yol kaybı
L_s	: Yağmur yolu uzunluğu
L_T	: Verici sistem kayıpları
M	: APD kazancı
MEO	: Medium Earth Orbit
MILSTAR	: Military Strategic and Tactical Relay
n'	: Bit başına alınan foton sayısı
OOP	: On Orbit Propagator
OSNR	: Optical Signal to Noise Ratio, Optik İşaret Gürültü Oranı
p	: RF kanal için azami kesintisizlik yüzdesi
P_{alc}	: Dedektöre gelen optik sinyal gücü
PAT	: Pointing Acquisition and Tracking
P_R	: Alıcıya ulaşan güç
P_s	: Gelen optik güç
P_T	: Verici gücü
q	: elektronun yükü, 1.6×10^{-19} C

Q	: Kuantum etkinliği
r	: Detektör duyarlılığı
R	: Alıcı-verici arasındaki mesafe
R_f	: Geri besleme direnci
RF	: Radyo Frekansı
R_o	: $M=1$ olduğu zamanki gerçek dedektör kazancı
R_r	: Yağmur hızı
SDS	: Small Demonstration Satellite
SILEX	: Semiconductor Intersatellite Link Experiment
SNR	: Signal to Noise Ratio, İşaret Gürültü Oranı
TAR	: Turn Around Ranging
TDRSS	: Tracking and Data Relay Satellite System
T_e	: Eşdeğer gürültü sıcaklığı
T_o	: Ortam sıcaklığı
v	: Çizgisel hız
YB	: Yörünge Belirleme
Z_o	: Karakteristik empedans
$\delta\gamma$: Yer istasyonu anteni mesafe ölçüm hassasiyeti
$\delta\theta$: Yer istasyonu anteni açısız ölçüm hassasiyeti
η	: Kuantum etkinliği
θ	: Rastgele odaklama hatası
λ	: Dalga boyu
π	: Pi sayısı
ρ	: Birleşik korelasyon katsayısı
ρ_n	: Logaritmik korelasyon katsayısı
ρ_w	: Günlük yağmur korelasyon katsayısı
σ	: Standart sapma
σ_{DS}	: Karanlık akım gürültüsü
σ_n	: Optik alıcı toplam gürültü
σ_{SS}	: Sinyal kuantum gürültüsü
σ_{TM}	: Optik alıcı ısız gürültü
υ	: Lazer frekansı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bilindiği gibi LEO (Low Earth Orbit- Yere Yakın Yörünge-) uydular yeryüzüne yakın yörüngelere yerleştirilirler ve Dünya etrafındaki dönüşleri esnasında yer yüzeyinden veri toplamaya çalışırlar. Bu uyduları kullanarak yer yüzeyinden veri toplamak ise birçok ülkenin kullandığı bir sistemdir. Söz konusu bu LEO uydular genellikle, birkaç yüz km ile 1500 km arasındaki irtifalarda bulunabilirler [1]. Öte yandan, bir LEO uydunun yörünge parametrelerinin seçimi yörüngedeki görevini başarılı yerine getirebilmesi için oldukça önemlidir [2].

Yer yüzeyinden toplanan veriler; video, görüntü, harita vb olabileceği gibi, toplanış amaçları da; askeri, siyasi, bilimsel, doğal afet durumları, orman alanları kontrolü ve kaçak yapılaşma gibi çeşitlilik gösterebilirler. Türkiye dâhil olmak üzere, çoğu stratejik konuma sahip ülke, kendi toprakları ve çevre ülkeler (özellikle tehdit oluşturabilecek ülkeler) üzerindeki verileri almak konusunda daha hassas ve istekli olabilmektedir [3].

Özellikle askeri amaçla toplanan verilerin işlenecekleri yer istasyonuna ulaşması için hali hazırda geleneksel olarak kullanılan yöntem farklı şekillerde olabilmektedir [4]. Bunlar;

1. LEO uydunun yörüngesini, her turda kutuplardan geçecek şekilde seçmek ve Dünya etrafındaki her turunda kutup dairesindeki bir yer istasyonunda verilerin toplanıp karasal hat veya yer istasyonundan GEO (Geostationary Earth Orbit, Yere göre durağan yörünge) uydu anahtarlaması ile hedef yer istasyonuna ulaştırmak,

2. LEO uydunun hedef yer istasyon kapsamı alanı üzerinden her geçişinde üzerindeki verileri indirmek,

3. 1. ve 2. maddelerin birlikte kullanılması.

Bu yöntemler, sistemin işleyişi amacıyla düşünüldüğünden oldukça elverişli olmakla birlikte, veriye ulaşma süresinin nispeten daha uzun olması ve özellikle kutup bölgesinde toprağa sahip başka bir ülkede yer istasyonuna ihtiyaç duyması gibi sebeplerden dolayı dezavantajlı ve nispeten daha az güvenilir olmaktadır [4].

İşte bu noktada, kendi toprakları üzerinden ve çevresinden en fazla veriyi toplamak ve mümkün olduğunca hızlı, güvenilir ve başka ülke(ler)den bağımsız olarak ilgili yer

istasyonuna ulaştırmak amacıyla gerekli olan sistem olarak LEO-GEO-Yer arası haberleşme sistemi ortaya çıkmaktadır.

Bu sistemde, LEO uydunun topladığı verilerin, ilgili yer istasyonuna/istasyonlarına belirlenen bir GEO uydudan anahtarlayarak gönderilmesi, LEO uydunun topladığı verilerin ilgili yer istasyonuna ulaşma süresini oldukça kısaltacak ve diğer ülke topraklarında konuşlandırılmış bir yer istasyonundan da bağımsız olacaktır [5], [6], [7]. Ancak bu durumda da sistemin kesintisiz ve verimli çalışması, hedef bölge veya bölgelerden en kısa zamanda ana istasyona veri aktarması gibi isterlerin de sağlanması gereklidir.

Yapılan bu çalışmada, tüm sistemin daha verimli ve daha güvenilir olabilmesi için çözümler geliştirilmiş ve bu öneriler benzetimler ile de desteklenmiştir.

Çalışmanın ilk kısmında, LEO ve GEO uydu yörüngeleri ve uydular arası haberleşmenin temel bileşenleri aktarılmıştır. Bu temel bilgileri açıklarken tasarlanan sistem iki parçada incelenmiştir. İlk parçada LEO ile GEO uydu arasındaki optik bağlantının geçmişi ve bu bağlantı için gerekli temel bileşenler, ikinci parçada ise GEO uydudan Yer'e olan bağlantının tarihi ve bu bağlantı için kullanılan temel parametreler açıklanmıştır.

2012 yılı sonunda uzaya fırlatılan Göktürk-2 uydusu ile kullanılan LEO uydu sistemi ilk kısımda örneklenmiş ve açıklanmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında ise ilk önce Türkiye odaklı bir hedef bölge seçilmiştir. Daha sonra, seçilen hedef bölge için istenilen verinin hızlı, güvenilir ve mümkün olduğunca kesintisiz alınması üzerinde yoğunlaşılmıştır. Bu amaçla Türkiye ve çevresindeki coğrafi bölge hedefi için örnek bir uydu sistemi önerilmiştir. Bu amaca uygun olarak, söz konusu bölgeden görüntü alırken sadece Türkiye ile veri alış-verişini sağlamak amaçlanmıştır.

Çalışmanın düzenlenmesinde sırası ile aşağıdaki konularda iyileştirmeler önerilmiş ve geliştirilen yöntemler açıklanmıştır. Bunlar;

- Türkiye ve çevresi için en uygun LEO uydunun yörünge özelliklerinin belirlenmesi,
- LEO uydudan alınan verinin GEO uyduya mümkün olduğunca hızlı bir şekilde aktarılmasının başlatılması ve bunu sağlamak için arama-bulma fazının kısaltılması,
- GEO uyduya aktarılan verinin, zaman kısıtlaması ve kaybı olmadan gönderilmesi için Türkiye içerisinde, en uygun yer istasyonlarının konumlarının belirlenmesi ve bu belirleme sırasında uydu operasyonları da göz önüne alınarak maliyetinin azaltılması,
- Tüm sistem için örnek bir bağlantı bütçesinin sunulması ve tüm sistemin modellenmesi, olarak sıralanabilir.

1.2. Uydular Arası İletişimin Gelişimi

Temelde uydular arası iletişim, 1970'li yılların başında düşünce olarak başlamıştır. Radyo Amatörleri Uydu Birliği (AMSAT) 1970'li yılların başında uzaya gönderdiği OSCAR 6, 7 ve 8 uydularında, uydular arası haberleşme tekrarlayıcısı kullanmıştır [8]. Böylece AMSAT, uydular arası basit bir yönsemez tekrarlayıcı sistemini ilk tanıtan grup olmuştur.

1976 yılına gelindiğinde, Lincoln Laboratuvarının geliştirdiği test uyduları LES-8 ve LES-9'in, uzun mesafe sayısal iletişimde kullanması amaçlamıştır. Bu uydular GEO yörüngede birbirleri ile 90 derece boylam farkı olacak şekilde konumlandırılmıştır [9]. Her ne kadar 60 GHz üzerini test etmeyi amaçlamışlarsa da o zamanki test donanımlarının kapasite kısıtlamaları nedeniyle Ka-bantta (36 -38 GHz arasında) uydular arası haberleşmeyi test edebilmişlerdir [10]. Sonuçta, uydular arası haberleşme LES-8 ve LES-9 arasında da düşünülmüş ancak o zamanki teknolojinin bunu desteleyememesi nedeniyle bundan vazgeçilmiştir [9].

Öte yandan, 1983 yılından başlayarak NASA, bir seri GEO uyduyu uzaya fırlatmış ve bunların 300 km ile 1000 km irtifaları arasında yerleştirilen LEO uydular ile haberleşmesini amaçlamıştır. TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System) adı verilen bu sistem sayesinde uydu haberleşme sisteminin erişim süresinin uzatılması hedeflenmiştir. Daha önceden Mercury, Gemini ve Apollo görevlerindeki araçların, atmosfere girme sıcaklığından dolayı iletişim kesintisi (re-entry blackout) yaşanırken, 'space shuttle' görevlerinde TDRSS sayesinde bu kesintiden kurtulmuşlardır. Bahsedilen TDRSS sistemi, NASA'nın Hubble teleskopu, LANDSAT ve ISS gibi birçok görevinde kullanılmıştır [11].

Amerika Birleşik Devletlerinde bu gelişmeler olurken Rusya'nın yanıtı çok gecikmemiş ve 1985-1995 yılları arasında 'Luch' adını verdikleri sistemi devreye almışlardır. Bu sayede, Rus kozmonotlar gemilerdeki istasyonlar yerine GEO yörüngedeki uydular ile haberleşme sağlamış ve gemilerin maliyetinden haftalık 5 milyon dolar tasarruf edilebilmiştir [8]. Ku-bant frekans aralığında haberleşen bu LEO ve GEO uydular üzerinden, MIR uzay istasyonu ve Buran aracı ile haberleşme sağlanmıştır. Kullanılan frekansa bağlı olarak 0.5, 1 ve 5 derece hüzmeye genişliğine sahip antenler bu uydular üzerine entegre edilmiştir [12]. Bu uyduların devamı niteliğinde üç farklı Luch uydusunun da fırlatılması ve ISS ile haberleşmesi planlanmıştır.

Amerika ve Rusya'da bu gelişmeler yaşanırken, yarışa, 1994 yılında Japon uzay ajansı, o zamanki adıyla NASDA (2003 yılında adı JAXA olarak değiştirilmiştir) ETS-6 ile dâhil olmaya çalışmıştır. Bu uydu üzerinde, S-bant, Ka-bant ve optik uydular arası haberleşme sistemi kurulmuştur. Nominal veri hızı 300 kbps azami 1.5 Mbps olarak S-bant haberleşmeye ilaveten 23-26 GHz bandında azami 10 Mbps haberleşme hedefi bulunmaktadır [13]. Bunlara ilaveten ETS-6'daki, optik verici, GaAlAs lazer diyot ile 1 Mbps haberleşme veri hedefine ve 0.0001° odaklama hassasiyetine sahip olarak tasarlanmıştır [14].

1997 yılına gelindiğinde ise, uydular arası haberleşmeden faydalanarak Dünya üzerinde telefon haberleşmesini LEO uydular ile yapmayı hedefleyen Iridium serisi uydular Motorola tarafından üretilmiştir. Her birinde 6 uydu bulunan 11 yörüngede toplam 66 LEO uydudan oluşan sistem aynı anda 4 bağlantıyı 13.18-13.38 GHz bandında kurabiliyor ve azami 10 Mbps haberleşme hızına erişebiliyordu [15]. Bu uydu sisteminin yeryüzündeki telefon şebekesine bağlantısı ise Arizona ve Hawaii'de konuşlandırılmış yer sistemleri ile sağlanmakta idi [16]. Önceleri Iridium'u geliştiren mühendisler 1980'lerin sonlarında yüksek hızlı optik bağlantının kurulması için resmi destekli çalışmalar yapmış ancak o zaman için RF'e kıyasla daha karmaşık ve yüksek riskli olduğu için tercih edilmemiştir [16].

1998 yılında 840 aktif yakın yörünge uydusunu barındıracak Teledesic sistemi önerilmiş ancak yatırım maliyetleri nedeniyle 288 MEO (Medium Earth Orbit) uydu olarak güncellenmiştir. Bu sistemin 12 yörüngede 24'er uydunun Ka-bant ile haberleşmesi planlanmıştı. Şubat 1998'de Teledesic, T1 test uydusu yörüngeye yerleştirilmiştir. 120 kg ağırlığındaki bu uydu 18.8-19.3 GHz aşağı bağlantı frekansı ve 28.6-29.1 GHz yukarı bağlantı frekansı ile azami 64 Mbps veri hızına sahipti [17]. Ancak o yıllarda 46 uydusu ile ticari olarak başarı sağlayamayan Globalstar'dan sonra, 2002 yılında Teledesic çalışmaları da durdurulmuştur.

Öte yandan, ETS-6 uydusundan sonra NASDA, 1998 yılında COMETS (Communication and Broadcasting Engineering Test Satellite) (ETS-7) uydusunu geliştirmiştir. Bu proje ile hem LEO uydular ile haberleşme, hem de bu haberleşme vasıtasıyla uydunun uzaydaki konumunu bulmayı hedeflemiştir. NASDA, COMETS'i TDRS ve ESA (European Space Agency)'nın veri anahtarlama uyduları haberleşebilecek şekilde uyumlu tasarlamıştır. S-bant ve Ka-bant uydular arası iletişim ve uydu yer arasında K-bant haberleşme yeteneğine sahip olan COMETS, S-bantta 100 bps - 300 kbps arası veri gönderme, 100 bps - 6 Mbps arasında ise veri alma kapasitesine sahipti. Ka-bantta ise 100

bps ile 300 kbps veri gönderme, 1 ile 120 Mbps aralığında ise veri alma kapasitesine sahipti. Bu haberleşmeler için BPSK ve QPSK modülasyonlarını kullanabilecek şekilde tasarlanmıştı [18]. Ancak, COMETS uydusu fırlatıcı roket hatası nedeniyle yörüngesine ulaşamamıştır.

1994 ile 2003 yılları arasında ise MILSTAR (Military Strategic an Tactical Relay) Amerika Hava Kuvvetlerinin yapısı altında hayata geçirilmiştir. 2 adet Milstar-1 düşük veri hızı, 4 adet Milstar-2 ise orta veri hızlı uydular arası iletişim yararlı yüküne sahip uydulardı [19]. Esasında, tüm Milstar uyduları 44 GHz yukarı bağlantı, 20 GHz aşağı bağlantı ve 60 GHz uydular arası bağlantı frekansı kullanıyordu [20]. Fırlatılma sırasında kaybedilen Milstar-2 haricindeki tüm Milstar uyduları aktif olarak kullanılmaktadır [21].

2001 yılına gelindiğinde ESA, Artemis ismini verdikleri ve üzerinde Ka-bant, S-bant ve optik haberleşme yükleri bulunan bir GEO uydunun, anahtarlama amacıyla kullanılması için çalışmalarını tamamlamıştır [22]. Optik haberleşme için ise SILEX (Semiconductor Intersatellite Link Experiment) sistemi geliştirilmiş ve hem Artemis (OPALE(Optical Payload for Inter Satellite Link Experiment) modülü) hem de LEO yörüngeye yerleştirilmiş olan Fransa yapımı SPOT-4 (PASTEL(PAssager SPOT de Télécommunication Laser) modülü) uydusuna monte edilmiştir. SPOT-4, 50 Mbps veri hızı ile Artemis'e başarılı bir şekilde veri göndermiştir. Artemis ayrıca, ESA'nın Envisat uydusunun verilerinin 3'te 2'sini 26 GHz Ka-bantta anahtarlamaştır. Öte yandan, 2002 yılında Japon'ların Adeos-II uydusu yörüngeye oturtulmuş ve Artemis ile haberleşme sağlamıştır.

Uydular arasındaki Optik haberleşmenin en önemli adımlarından biri de 2005 yılında Japonların OICETS uydusu ile Artemis arasında gerçekleştirilmiştir. 50 Mbps veri hızı ile OICETS'ten Artemise, 2 Mbps ile Artemis'ten OICETS'e çift yönlü optik haberleşme gerçekleştirilmiştir [23]. OICETS üzerindeki optik haberleşme yararlı yükü iki kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlardan biri kaba mekanik odaklama üzerine yerleştirilmiş hassas optik odaklama, diğeri ise uydu gövdesi içerisinde bulunan ve diğeri tüm bileşenleri içeren kısımdır [23].

Bu gelişmelere ilaveten, JAXA'nın Kodama adını verdiği veri anahtarlama test uydusu DRTS (Data Relay Test Satellite) Eylül 2002'de GEO yörüngeye yerleştirilmiştir. Uydu, görevine başladıktan sonra S-bantta ve optik ile LEO uydular ile haberleşme süresini %2'den %60'a çıkarmıştır. Kodama, yine JAXA tarafından geliştirilen yer gözlem uydusu DAICHI ile 278 Mbps veri hızında optik haberleşme sağlamıştır. Kodama aynı zamanda OICETS, SDS-1 (Small Demonstration Satellite-1) ve ESA'nın Envisat uyduları ile de haberleşmiştir

[24]. Bunlara ilaveten Kodama, ISS'teki Japon modülü olan Kibo ile de haberleşerek astronotların aktivitelerini canlı yayınlamıştır [25].

2010 yılında ise ömürlerinin sonuna yaklaşan Amerikan Milstar uydu sisteminin yerini alması amacıyla AEHF (Advanced Extremely High Frequency) uydusu GEO yörüngeye yerleştirilmiştir [26]. AEHF uydusu, 44 GHz yukarı bağlantı, 20 GHz aşağı bağlantı ve 60 GHz uydular arası bağlantı frekanslarını kullanmakta ve Milstar-2'nin 10 Mbps ve diğer AEHF uydularının 60 Mbps veri kapasitelerini desteklemektedir [26].

Günümüzde ise Iridium firması ikinci nesil Iridium Next uydu filosunu kuracağını ve bunu 2017 yılı sonunda hizmete vermeyi amaçladığını açıklamıştır. Bunlara ilaveten, Avrupa'da ESA'nın öncülüğünde uydu kullanarak veri anahtarlama konusunda yapılan görüşmeler 2008 yılından sonra hız kazanmış ve Ekim 2010 yılında Astrium GmbH çatısı altından EDRS (European Data Relay System) konsorsiyumu ile GMES (Global Monitoring for Environment and Security) programı başlatılmıştır.

Kasım 2012'de EDRS yapımı tamamlanmıştır ve Ekim 2014'te, Alphasat (GEO) ve Copernicus programı kapsamındaki Sentinel-1A (LEO) uyduları ilk kez haberleşmiştir. Temmuz 2015'te ise birbirinden 45000 km uzaklıktaki bu uydular arasında 1.8 Gbps veri hızında lazer haberleşme gerçekleştirilmiştir. Alman TESAT firması tarafından geliştirilen Sentilen-1A ve -1B'yi ise Sentilen-2A ve -2B'nin izlemesi planlanmaktadır [27]. Gelecekte ise 7.2 Gbps lazer haberleşme hızı hedeflenmektedir [28].

Böylelikle ESA gelecekte 1.8 Gbps ve üzeri hızlarda GEO uydular ile LEO uydular, uçaklar ve uluslar arası uzay istasyonu arasında haberleşme hedeflemekte ve bu sayede alınan verilerin neredeyse gerçek zamanlı olarak GEO uydudan aktarılmasını amaçlamaktadır.

Öte yandan ESA, konu hakkındaki çalışmalarını sürdürmekte ve uzun vadeli anlaşmalar yapmaktadır. JAXA da optik haberleşme ağırlıklı uydular arası iletişim çalışmalarında yeni nesil uydular ile devam etmeyi planlamaktadır. Aşağıdaki Tablo 1, uydular arası haberleşmenin bahsedilen tarihçesini özetlemektedir [29].

Görüldüğü gibi, her ne kadar geçmişte, uydular arasında haberleşme için ilk zamanlarda RF tercih edilmiştir. Ancak, optik teknoloji alanındaki gelişmeler, fiber optik sistemlerin kullanılmaya başlanması ve yaygınlaşması ile karasal alanda hatırı sayılır tarihçenin oluşması gibi nedenler gelecekte uydular ve yörüngeler arası optik haberleşmenin yaygınlaşmasına imkân sağlayacağı açıktır. İletişimde ihtiyaç duyulan veri hızı da optik haberleşmenin kullanılmasını daha cazip kılmaktadır [30].

Tablo 1.Uydular arası iletişim tarihçesi

Fırlatılma Yılı	Uydu adı/adları	Uydular arası Haberleşme Frekansı
1972-1978	OSCAR 6, 7, 8	146 MHz
1976	LES-8 ve LES-9	36, 38 Ghz
1983-2013	TDRSS	C, Ku, Ka
1985-1995	Luch	UHF, Ka
1994	ETS-6	2, 23, 32 GHz,
1997	Navstar Block IIR	UHF
1997	Iridium	23 GHz
1998	Comets (ETS-7)	2 GHz
1994-2003	MilSTaR I/II	60 GHz
1998	Spot-4	Optical
2001	Artemis	S, Ka Optik
2002	Envissat	S-bant
2002	Adeos-II	2 GHz, 26 GHz
2005	OICETS	Optik
2010	AEHF, SV-1	60 GHz
2015	EDRS-A	Optik
2017 (plan)	Iridium Next	23 GHz
2017 (plan)	EDRS-C	Optik
2019 (plan)	JDRS (Japanese Data Relay Satellite)	RF, Optik

1.2.1. Uydular Arası İletişimde RF ve Optik Karşılaştırılması

Bahsedildiği gibi uydular arası iletişimin kurulması, verinin güvenliği ve veriye ulaşma zamanı gibi sorunların çözümüne yardımcı olmaktadır. Üzerinde çalışılan bu sistemde LEO uydu topladığı veriyi GEO uyduya aktarmakta, Dünya ile eşzamanlı olan GEO uydu da aldığı veriyi işlemeksizin ve zaman kaybetmeksizin -sadece anahtarlayarak- kapsama alanı içerisindeki hedef yer kontrol istasyonuna/istasyonlarına göndermektedir. Yer istasyonunda/istasyonlarında toplanan ve birleştirilen veri de son haline getirilmektedir.

Bilindiği gibi, uyduların tasarımları yapılırken, hesaba katılan parametrelerden biri de uydunun ağırlığı ve boyutlarıdır. Uyduların fırlatma maliyetlerinin azaltılması ve ömürlerinin uzun olması istenirken bunu sağlamanın yollarından biri de ağırlığın ve boyutların mümkün olduğunca azaltılmasıdır. Tasarımlarda bu hususlar dikkate alınarak daha hafif ve küçük boyutlu uydular tasarlanmaya gayret edilir. Öte yandan, uydular

arasında iletişim yapabilen bir sistemin kurulumunda da ağırlık ve boyut kadar, ulaşılabilecek veri miktarı da önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu hızı sağlarken, çevre koşullarından etkilenme ve girişim etkilerinin minimum olduğu frekans bantlarının seçilmesi de haberleşme kalitesi açısından önemli olmaktadır. International Telecommunication Union (ITU) bu amaçla frekans tahsisinde bulunmuş ve uydular arası iletişim için 22, 24, 25, 27, 32, 54, 56, 59, 64, 66, 116-120,130-134, 167-174, 185-190 ve 192-200 GHz gibi bir kısım bantlarda frekanslar ayrılmıştır. Öte yandan, optik haberleşme için ise 890 nm-1550 nm gibi dalga boylarında ve RF'deki gibi girişimlerden uzak taşıyıcılar seçilebilmektedir.

Optik ve RF haberleşmenin birbirine göre üstünlükleri ve dezavantajları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Optik ve RF haberleşme karşılaştırmaları

Haberleşme	Üstünlükleri	Dezavantajları
Optik/Lazer	Veri Hızı Ağırlık Güç harcaması Girişim Regülasyon gerektirmeyişi	Geliştirme aşamasında, Maliyet, Odaklama zorlukları
RF	Tarihçe ve yaygınlık Ekipman olanakları Maliyet	Girişim, Regülasyon gerekliliği, Güç harcaması, Ağırlık, Boyut

Sonuçta, uzay ortamında LEO-GEO arasındaki bir haberleşmede lazerlerin kullanılması, ağırlık, boyut, güç harcaması gibi birçok faydalar getirirken [31], [32], anten hızmesinin dar olması odaklama ve takip sorunlarını beraberinde getirmektedir [33]. Ancak lazer haberleşmesinin cazibesi, ulaşabileceği veri hızı ve girişimden etkilenmeyişi gibi nedenlerle artmakta ve RF'e göre daha avantajlı olmaktadır [5].

Çalışma kapsamında, uydular arası iletişim için avantajları ve ileride teknolojik olarak daha uygulanabilir olacağı düşüncesi ile optik haberleşme kullanılmıştır.

1.3. Uydu-Yer İletişiminin Gelişimi

Uydular kullanılarak yer ile uluslararası haberleşme sistemi kurma fikri, ilk olarak bir bilim kurgu yazarı ve fizikçi olan Sir. Arthur C. Clarke'ın 1945 yılında British Magazine Wireless World dergisinde yayınlanan yazısından ortaya çıkmıştır.

Yazıda “Tüm problemler, 24 saatlik yörünge periyodu olan uydular tarafından çözülebilir. Bu uydular Dünya'nın ekvator düzleminde yer almalıdır. Böylece Dünya'dan bakıldığında uydular hep sabit noktada görülecektir. Bu, yeryüzüne yerleştirilmiş alıcıların işini son derece kolaylaştıracaktır.” denilmiştir. Ancak, Sovyetler Birliği SPUTNIK I uydusunu uzaya fırlatana kadar, uydu fırlatmaya uygun bir roket teknolojisi geliştirilememiş ve Clarke'ın öngördüğü, GEO yörüngeye ulaşabilmek ancak 1963 yılında mümkün olmuştur.

Uydu haberleşmesi alanındaki gerçek anlamda ilk deneme ise, ABD hükümetinin SCORE Projesi çerçevesinde 18 Aralık 1958'de fırlattığı bir uydu ile gerçekleştirilmiştir. İlk haberleşme uyduları arasında yer alan ve 12 Ağustos 1960'ta fırlatılan "ECHO 1" plastikten yapılmış ve ince bir alüminyum katmanla kaplanmış bir balondur ve şişirildiğinde çapı 30 metreye ulaşıyordu. Uydu, yerdeki bir istasyondan aldığı radyo sinyallerini bir başka istasyona yansıtıyor, ses dalgalarını her iki doğrultuda da gönderebiliyordu. ECHO 1, deneysel nitelikte olmak üzere telefon ve veri iletişimde kullanıldı. 25 Haziran 1964'te fırlatılan ve ilk ABD-SSCB ortak uzay çalışması olan "ECHO 2" ise plastik ve alüminyum metal yapraklardan yapılmış büyük bir balon biçimindeydi. İngiltere'de Manchester yakınlarındaki Jodrell Bank Gözlemevi'nden gönderilen bir radyo sinyali ECHO 2 tarafından yansıtılarak Rusya'da Gorki yakınlarındaki Zimenki Gözlemevi'ne iletilebilmiştir.

İlk aktif (alıcı ve verici donanımı içeren) uydu olan "TELSTAR 1" uydusu ise, 10 Temmuz 1962'de yörüngeye oturtuldu ve ilk kez canlı televizyon yayınları ile telefon konuşmalarının Atlas Okyanusunun bir yanından diğer yanına iletilmesinde kullanıldı. Bu uydu, yerden aldığı sinyalleri güçlendirerek başka bir yer istasyonuna gönderebiliyordu. Yalnızca 77 kg ağırlığında olan ve 3600 güneş pili aracılığıyla yeniden doldurulabilen nikel kadmiyum bataryalarla donatılmış TELSTAR 1'de 1000'in üzerinde transistör bulunuyordu. Uydunun merkezinde, sinyalleri yalnız kendi gücüyle 10 bin kez, başka elemanların yardımıyla da çok daha fazla güçlendirebilecek bir yürüyen dalga lambası (Travelling Wave Tube) bulunuyordu. TELSTAR 1'in 10 Temmuz 1962'de fırlatılmasından sonra, Maine'deki Andover yakınlarında bulunan hareketli bir dev anten, uydu yörünge üzerinde uygun bir noktaya (yeröte noktası 5600 km) yaklaştığında uyduya kenetlendi. Bir kaç dakika sonra

Atlas Okyanusunun ötesine iletilen ilk televizyon görüntüleri İngiltere ve Fransa'daki vericiler aracılığıyla Avrupa'ya yayınlandı. TELSTAR 1 aracılığıyla telefon, telgraf, veri, telefoto ve faks iletimleri de başarıyla gerçekleştirildi.

TELSTAR 1, Şubat 1963'e kadar başarıyla kullanıldı. Bu tarihten sonra uydu yörüngesinden çıktı ve kullanılmaz hale geldi. 7 Mayıs 1963'te biraz daha ağır olmakla birlikte temel olarak TELSTAR 1'e benzeyen "TELSTAR 2" fırlatıldı ve daha uzak bir yörüngeye (yeröte noktası 10.720 km) oturtuldu. Bunu izleyen "TELSTAR" uyduları daha uzak dairesel yörüngelere yerleştirilerek konumlarının yere göre sabit kalması sağlandı.

Tam adı International Telecommunications Satellite Organization (Uluslararası Uydu Haberleşmesi Örgütü) olan INTELSAT, 1964'te ABD'nin öncülüğünde 19 ülkenin haberleşme ve PTT idareleri tarafından bir 'şirketler birliği' şeklinde kuruldu. Kendi haberleşme uyduları ve bunları yerden denetleyen istasyonları bulunan INTELSAT, 1998 yılı sonunda yörüngedeki uydu sayısını 31'e ulaştırmış ve geçen zaman içinde bu sayıyı artırmıştır. Kuruluşundan sonraki birkaç yıl içinde ise üye sayısı hızla artan INTELSAT, bugün dünya ülkelerinden çoğunun haberleşme kuruluşlarını kapsar duruma gelmiştir.

Bu uyduların ilki olan "Early Bird" (sonradan "INTELSAT 1"adıyla anılmıştır) 1965'te Atlas Okyanusu üzerinde, ekvator hizasında yere göre durağan bir yörüngeye oturtuldu. Sonraki yıllarda Büyük Okyanus ile Hint Okyanusunun üzerinde yörüngeye yerleştirilen INTELSAT serisine ait çok sayıda uydu aracılığıyla dünyanın her tarafından ulaşılabilen bir ticari haberleşme sistemi kuruldu.

Uydu haberleşmesinin tarihsel gelişim aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- 1929 : Hermann Noordung, The Problem of Space Flight (uzay uçuşu problemi) kitabında dünyaya göre sabit yörünge kavramının tanımlanması,
- Mayıs 1945 : Artuhur C. Clarke Dünya haberleşmesinin ve yayıncılığının yere göre sabit uydular aracılığı ile nasıl yapılabileceğinden bahsetmesi,
- 4 Ekim 1957 : Sovyetler Birliği tarafından Sputnik I yapay uydusunun yörüngeye yerleştirilmesi ve ilk kez uydudan yayınlanan radyo dalgalarının yeryüzünden alınması,
- 18 Aralık 1957 : ABD Hükümetince gerçekleştirilen SCORE projesi kapsamında uydu yapılarak yörüngeye yerleştirilmesi,
- Mart 1959 : Pierce'ın uydu haberleşmesi olasılıklarından söz eden makalesinin yayınlanması,

- Ağustos 1960 : Echo-I isimli balon biçimindeki uydunun Amerika Birleşik Devletleri tarafından 1600 km yükseklikteki yörüngeye yerleştirilmesi. İki yer istasyonu arasında pasif telefon ve televizyon anahtarlanması, 1 ve 2.5 Ghz'lik sinyallerin aktif anahtarlanması,
- 1962 : Yerel ve uluslararası haberleşme için Comsat (ABD)'in kuruluşu,
- 1964 : 19 Kurucu üye ülke tarafından INTELSAT (Uluslararası uydu haberleşmesi) organizasyonunun kuruluşu,
- 1964 : Tokyo Olimpiyat oyunlarının uydu aracılığıyla yayınlanması,
- Nisan 1965 : Intelsat organizasyonuna ait, yeryüzüne göre sabit ilk ticari haberleşme uydusunun fırlatılması.
- Şubat 1976 : Amerika'nın ilk deniz haberleşme uydusu olan Marisat'ı uzaya fırlatılması,
- Haziran 1977 : EUTELSAT Organizasyonunun kuruluşu,
- Haziran 1979 : 26 kurucu ülke tarafından Inmarsat (Uluslararası Deniz Haberleşme Uyduları) organizasyonu kuruluşu,

Bu tarihlerden sonra, dünyanın birçok ülkesi uydu fırlatma yarışına girmiş ve kendi uydularına sahip olmak için çalışmalar yürütmüştür.

Türkiye'de ise GEO uydu konusundaki tecrübeler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- 21 Aralık 1990 : TÜRKSAT-1A ve TÜRKSAT-1B uydularının üretimi ve yörüngeye yerleştirilmesi için Fransız Aerospatiale ile sözleşmenin imzalanması,
- 24 Ocak 1994 : TÜRKSAT-1A'nın fırlatıldıktan 12 dakika sonra fırlatıcı roket arızası nedeniyle kaybedilmesi. Sigorta şartları gereği TÜRKSAT-1C uydusunun yapımının başlaması,
- 11 Ağustos 1994 : TÜRKSAT-1B 'nin fırlatılması, 42° doğu boylamına yerleştirilmesi,
- 10 Temmuz 1996 : TÜRKSAT-1C'nin fırlatılması, 31.3° doğu boylamına yerleştirilmesi,
- 27 Eylül 1996 : TÜRKSAT-1B ve TÜRKSAT-1C'nin konumlarının değiştirilmesi,
- 10 Ocak 2001 : TÜRKSAT-2A'nın fırlatılması, 42° doğu boylamına yerleştirilmesi,
- Kasım 2005 : TÜRKSAT-1B'nin görev süresinin tamamlanması,
- 13 Haziran 2008 : TÜRKSAT-3A'nın fırlatılması, 42° doğu boylamına yerleştirilmesi,
- 22 Eylül 2010 : TÜRKSAT-1C'nin görev süresinin tamamlanması,

- 14 Şubat 2014 : TÜRK SAT-4A'nın fırlatılması, 42° doğu boylamına yerleştirilmesi,
 16 Ekim 2015 : TÜRK SAT-4B'nin fırlatılması, 50° doğu boylamına yerleştirilmesi,

LEO uydular konusunda ise Türkiye'deki çalışmalar Tübitak Uzay öncülüğünde Bilsat ile başlamış ve 2011 yılında RASAT'ın uzaya gönderilmesi ile devam etmiştir. 2012 yılında ise Türkiye'nin son LEO uydusu Göktürk-2 uzaya gönderilmiş ve o tarihten bu yana yeryüzünden görüntü toplamaya devam etmektedir [1].

Öte yandan, giderek artan uydu sayısı nedeniyle aralarındaki olası mesafeler azalmış ve birbirlerini etkileme sorunlarını ortaya çıkarmıştır. Özellikle GEO yörüngede, uydu sayısının artması kullanılabilir frekanslara olan talebi de artırmıştır. Günümüzde daha çok Ku-bant haberleşme ağırlıklı olmakla birlikte, daha alt bantlar da uydu haberleşmesi için değişik maksatlarla kullanılmaktadır. Ayrıca Ka-bant, Q/V-bant gibi daha yüksek frekanslar giderek daha yaygın hale gelmektedir [34].

Gelişen teknolojiye bağlı olarak yer ve uydu donanımlarının tasarımları daha fazla bant genişliğinin bulunabileceği daha yüksek frekanslardan, Q/V, W bantları gibi bantları daha cazip hale getirmektedir. Üretici firmalar da bu istekleri karşılayabilecek ekipman üretimi yarışına girmektedirler. Tablo 3, bahsedilen bu haberleşme bantlarının frekans aralıklarını göstermektedir. Şunu da belirtmek gerekir ki söz konusu frekanslarda farklı kuruluş ve bölgelerin farklı kullanışları olmaktadır.

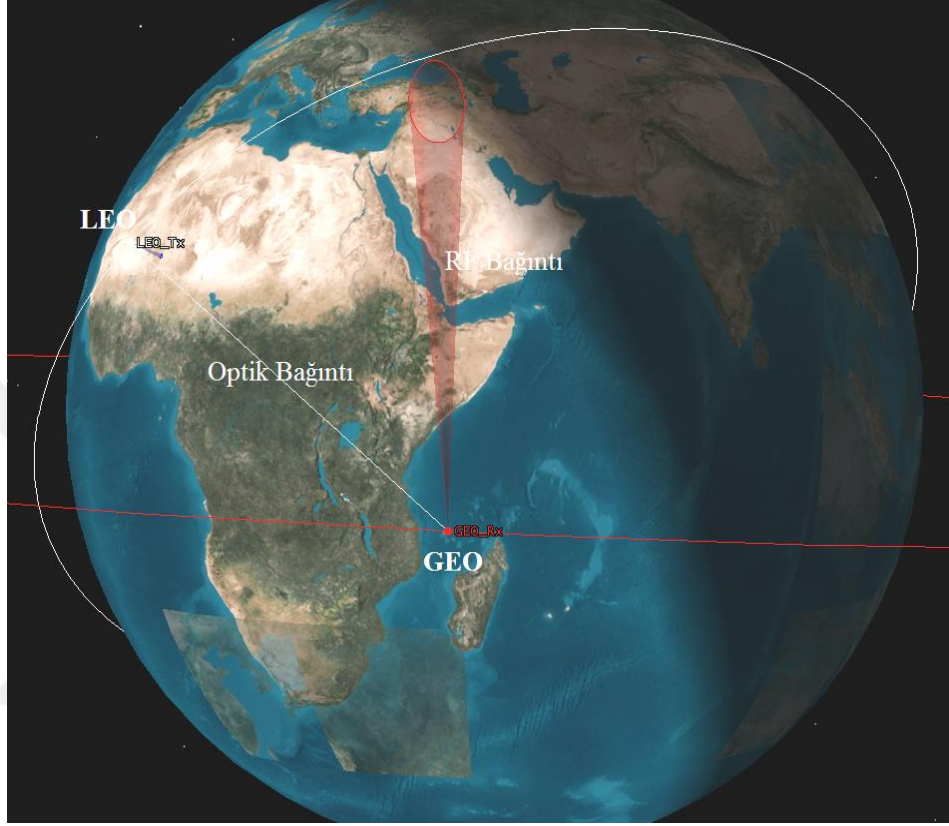
Tablo 3. Frekans bantları

Bant	Frekans aralığı [GHz]
Ka	26.5 – 50
Q	33 – 40
V	40 – 75
W	75 – 110

1.4. Çalışılan Sistemin Temel Bileşenleri

Çalışma kapsamında önerilen sistem temelde iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki LEO uydu ile GEO uydu arasındaki optik bağlantı, ikincisi ise GEO uydu ile yer arasındaki RF bağlantıdır. GEO uydu ile yer arasında RF bağlantı önerilmesinin nedeni, atmosferik olaylara optik bağlantıya göre daha dayanıklı olmasıdır. Ancak kullanılan

frekansa bağılı olarak bu haberleşme sisteminde ortaya çıkan sorunlar için de çalışma kapsamında öneriler getirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 1, tanımlanan bu sistemi ölçeşsiz olarak göstermektedir.



Şekil 1. LEO-GEO-Yer haberleşme sistemi (ölçeşsiz)

Anlatıldığı üzere, LEO uydu yeryüzünden topladığı, mümkün olduğunca fazla miktardaki veriyi, en kısa zamanda yer istasyonuna/istasyonlarına ulaştırma amacındadır. GEO uydu ile kurulan optik iletişim sonrası veriler GEO uyduya aktarılır ve GEO uydu aldığı verileri RF taşıyıcı ile modüle ettikten sonra kendisi için tahsis edilmiş yer istasyonuna gönderir. Buradaki önemli bir nokta ise optik ve RF haberleşme hızlarının birbirleri ile mümkün olduğunca yakın, idealde ise aynı olması gerekliliğidir. Zira sistemin, gerçek zamanlı çalışması durumunda genel hızını, en düşük hız bileşeninin belirleyeceği açıktır. Dolayısıyla, optik hıza erişmesi için RF kısmında daha fazla bant genişliğine ihtiyaç vardır. Günümüzde yoğun olarak kullanılan Ku-bant ve popülerliği giderek artan Ka-bant'larda bu gereklilikleri karşılayacak kadar geniş bir bant bulmak neredeyse imkânsızdır [34]. Bu yüzden daha geniş bantların bulunabileceği Q/V-bant veya W-bant gibi yüksek frekans

bantları, bu haberleşme kısmı için daha uygun mütalaa edilmektedir. Ancak frekansın artırılması, beraberinde başka sorunları da getirmektedir. Bilindiği gibi uydu haberleşmesinde, özellikle 10 GHz üzerinde, yağmur zayıflatması oldukça etkili olmaktadır ve bağlantı bütçelerinde yer istasyonunun konumuna göre hesaba katılması gerekmektedir. Q/V-bant gibi yüksek frekanslara çıkıldığında ise bu hesap oldukça önem kazanmaktadır. Bağlantı bütçesini ve kesintisizlik oranını karşılamak için ise EIRP seviyesi, verici anten çapının, veya alıcı anten çapının artırılması gibi çözümler gerekmektedir. Ancak önerilebilecek çözümler daha çok yer istasyonu tarafında uygulanabilir durumdadır. Zira uydu tarafında ağırlık, boyut (fırlatıcı roket kısıtlaması), maliyet gibi birçok kısıtlamalar mevcuttur. Yer tarafında ise gerekli miktarda anten çapının sağlanması bazen olanaksız veya maliyetli olabilmektedir. Dolayısıyla, RF kısmındaki kesintisizlik yüzdesini artırmak için istasyon-çeşitlemesi en uygun yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [35], [36], [37]. Bu sayede birbirinden farklı yağmur rejimlerinde bulunan iki (veya daha çok) istasyon kurularak elde edilen istasyon-çeşitlemesi kazancı ile bağlantı bütçesi istenilen seviyeye getirilebilir. Bu istasyonların, GEO uydu ile haberleşmeye ek olarak, uydunun yörüngesini belirlemek amacıyla da kullanılması, kurulum ve işletme maliyetlerini de azaltacaktır.

1.4.1. LEO ve GEO Uyduları Arası Optik İletişim Sisteminin Temel Bileşenleri

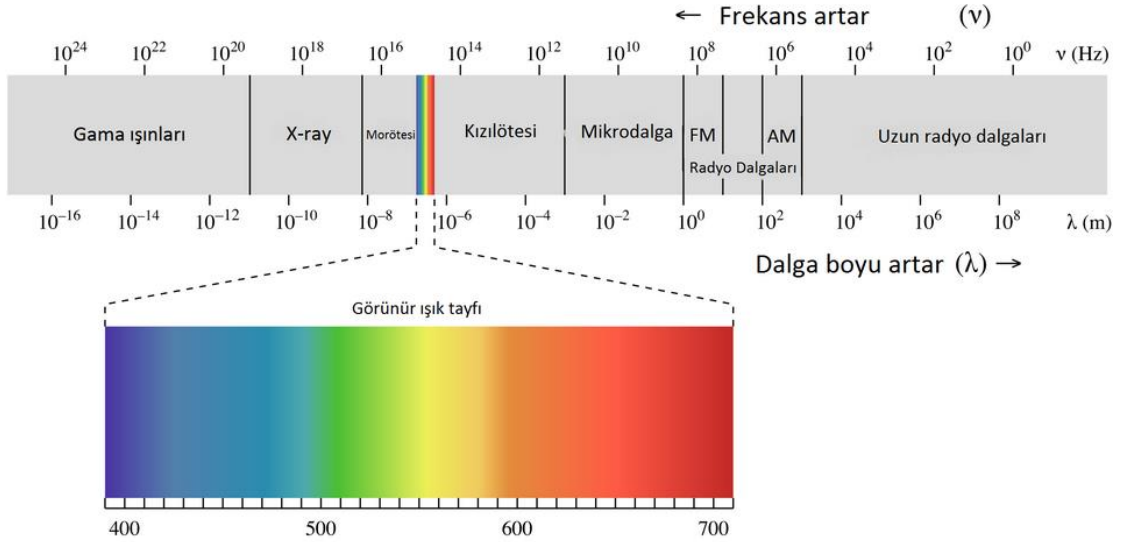
Bahsedildiği gibi, çalışmanın temelinde LEO uydu yeryüzünden topladığı verileri GEO uyduya aktarmakta ve GEO uydu da aldığı bu verileri zaman kaybetmeksizin yer istasyonuna göndermektedir. LEO ile GEO uydular arasındaki iletişimin optik olarak yapılmasından yola çıkarak bu kısımda söz konusu optik haberleşme bileşenleri açıklanacak ve optik bağlantı bütçesi üzerinde durulacaktır.

1.4.1.1. Lazer Kaynakları ve Gauss Işıma Profili

Optik haberleşme için en önemli parametrelerden biri hiç şüphesiz vericidir. Bu amaçla lazerler kullanılmaktadır. LAZER (Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) aynı dalga boyu, faz ve doğrultuda elektromanyetik bir ışımadır. Görünür veya kızıl ötesi dalga boyunda olabilirler. Günümüzde çeşitli dalga boylarında çıkış

işareti bulunan farklı boyut ve farklı malzemelerle üretilen pek çok lazer çeşidi bulunmaktadır [38].

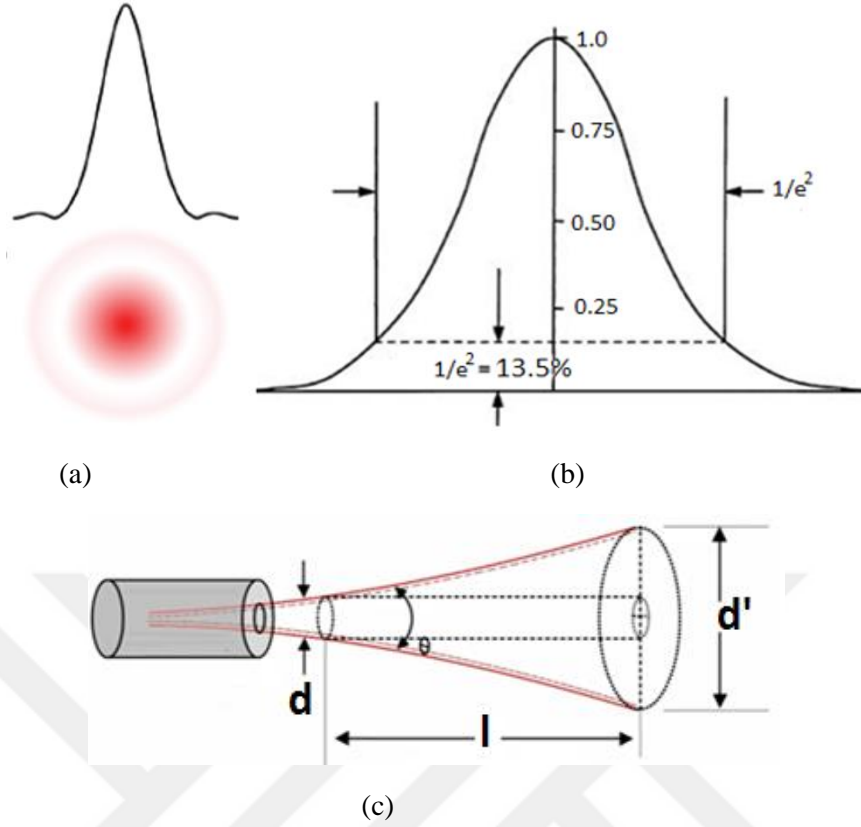
Aşağıdaki Şekil 2, içerisinde lazer bandının da bulunduğu elektromanyetik spektrumu detaylı olarak göstermektedir. Lazer işaretler daha ziyade ‘Kızılötesi’ olarak ifade edilen kısımda yer almaktadır.



Şekil 2. Elektromanyetik spektrum

Karakteristikleri gereği lazer kaynakları oldukça dar bir hüzmeye ışın yaparlar. İdealde ise Gauss profili şeklinde ışın yapılması beklenir. Gauss profiline sahip bir ışın, eksen merkezinde azami şiddette ışın gönderirken, ışın merkezinden dışa doğru gidildiğinde dairesel olarak ışın şiddeti düşer [39]. Bu lazer kaynaklar, kullanılan malzemeye göre gaz, katıhal veya yarıiletken lazerler olabilirler [38].

Aşağıdaki Şekil 3, Gauss lazer profiline sahip bir lazer kaynağını göstermektedir.



Şekil 3. Gauss lazer profili gösterimleri

Şekilde, (a) örnek bir lazerin hüzme şeklini, (b) bu hüzmenin hesap aralıklarını ve (c) lazerin iletişim esnasındaki davranışını göstermektedir.

Şekilden de görüldüğü gibi bir lazerin l uzaklığında oluşturduğu hüzme ıraksaklığı;

$$\text{Hüzme Iraksaklığı} = 2 \arctan \left(\frac{d' - d}{2l} \right) \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada d kaynağın çıkışındaki hüzme açısı, d' hedefteki hüzme genişliği ve l iki nokta arasındaki uzaklıktır.

l_0 maksimum parlamanın olduğu noktanın merkezden olan radyan uzaklığı ve 'e' doğal sayı olmak üzere,

$$\text{Spot Boyutu} = \frac{l_0}{e^2} \quad (2)$$

olarak tanımlanır.

Bu çalışma kapsamında, bahsedilen Gauss profiline sahip lazer kaynağı kullanılarak hesaplamalar ve modellemeler yapılmıştır.

1.4.1.2. Foto Detektörler

Optik haberleşme sistemlerinin tasarımlarında lazerler kadar detektörler de önemli sistemlerdir. Detektörler, kendilerine ulaşan optik ışını algılamak, takip etmek ve elektriksel sinyale dönüştürmek amacıyla kullanılabilir. Sistemde kullanılan dalga boyu ve diğer tüm sistem parametrelerinin gerekliliğine göre kullanılması gereken detektör belirlenir. Tablo 4'te, farklı detektör türleri ve kullanım amaçları açıklanmıştır.

Tablo 4. Detektör Çeşitleri

Uygulama	Detektör Türü	Malzeme
İletişim	APD	Silikon, InGaAs, InGaAsP
	PIN	Silikon, InGaAs, InGaAsP
	CCD	Silikon
	PMT	Katıhal silikon fotokatod
Sinyal Toplama	CCD	Silikon
	CID	Silikon
	QAPD	Silikon
	QPIN	Silikon, InGaAs
İzleme	CCD	Silikon
	CID	Silikon
	QAPD	Silikon
	QPIN	Silikon, InGaAs

APD: Avalanche Photo Diode
 PIN: P-Intrinsic-N Photodiode
 CCD: Charge Coupled Device
 PMT: PhotoMultiplier Tube
 CID: Charge Injection Device
 Q: Quadrant

Bu çalışma içerisinde, optik haberleşmede yaygın olarak kullanılan PIN ve APD'a değinilecektir.

1.4.1.2.1. PIN Foto-detektörler

Bu foto-detektörler, gelen optik gücü, detektör duyarlılığı parametrelerine göre elektriksel sinyale dönüştürürler. Bu değerlerin hesaplanması için aşağıdaki eşitliklerden faydalanılır.

$$r = \frac{\eta q \lambda}{h c} \quad (3)$$

$$I_s = P_{alc} r \quad (4)$$

Burada, r detektör duyarlılığı [A/W], I_s detektörün çıkış akımı [A], P_{alc} detektöre gelen optiksel sinyal gücü [W], η detektörün kuantum etkinliği, h Plank sabiti, q elektron yükü, λ kullanılan lazerin dalga boyu ve c ışık hızıdır.

PIN diyot kullanan alıcı modelinde toplam detektör çıkış akımı ise aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$I_t = I_s + P_{ap}r + I_{ka} \quad (5)$$

Bu eşitlikte, P_{ap} arkaplan gürültü gücü nedeniyle oluşan akım ve I_{ka} detektör karanlık akımıdır.

Alıcıda oluşan gürültü ise detektöre gelen sinyalden kaynaklanan kuantum gürültüsü (σ_s^2), arkaplan gürültüsü (σ_{ap}^2), ısı gürültüsü (σ_{th}^2) ve detektör karanlık akımının (σ_{ka}^2) oluşturduğu karanlık gürültüsünün toplamıdır. B , bant genişliği ve R_L detektör yük direnci olmak üzere bu gürültüler aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_s^2 = 2qI_sB \quad (6)$$

$$\sigma_{ap}^2 = 2qI_{ap}B \quad (7)$$

$$\sigma_{ka}^2 = 2qI_{ka}B \quad (8)$$

$$\sigma_{th}^2 = \frac{4ktB}{R_L} \quad (9)$$

Sonuçta toplam gürültü gücü;

$$\sigma_n^2 = \sigma_s^2 + \sigma_{ap}^2 + \sigma_{ka}^2 + \sigma_{th}^2 \quad (10)$$

Buna göre, işaret gürültü oranı (SNR)

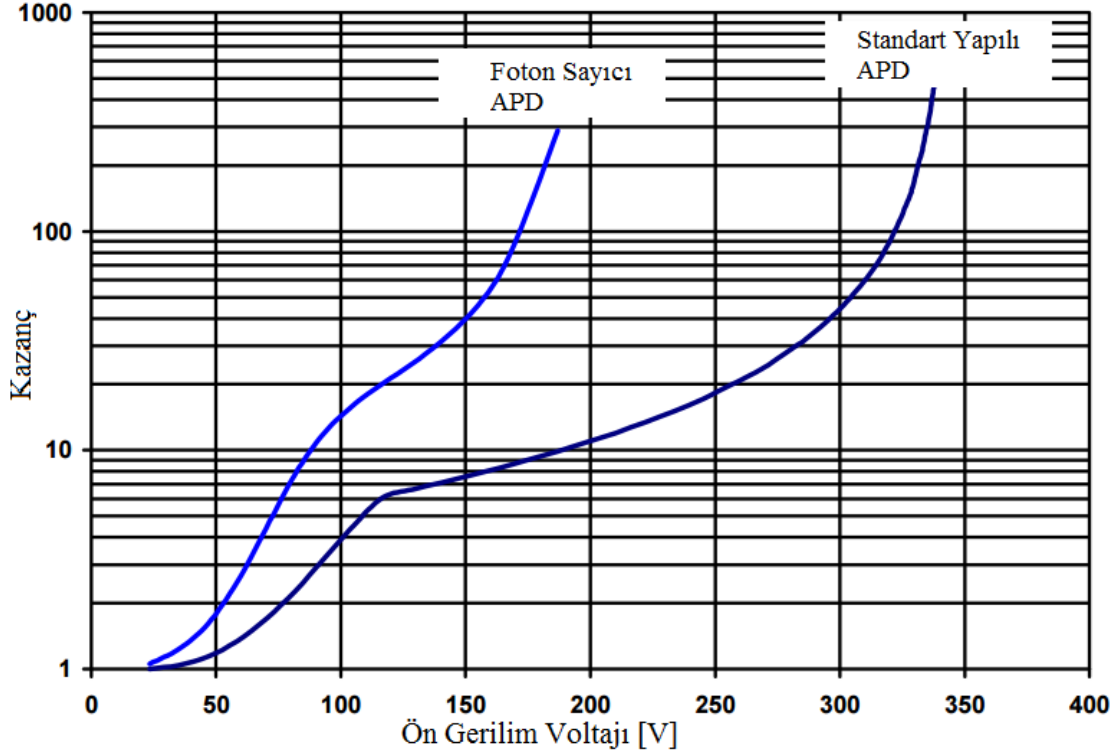
$$SNR = \frac{I_s^2}{\sigma_n^2} \quad (11)$$

olur.

1.4.1.2.2. APD Foto- detektör

APD foto diyot, uzay çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir detektördür. Şekil 4'ten de görüldüğü gibi, söz konusu diyot girişine uygulanan öngerilim (bias) değeri ile farklı kazanç adımlarında çalışmaktadır.

Detektörlere rastgele ulaşan fotonların oluşturduğu elektron-delik çiftlerinin sayısı Poisson dağılımıyla belirlenir ve birincil elektron-delik çiftleridir. APD çığ kazancı mekanizmasıyla bunlara tepki olarak ikincil çiftler üretilir. APD çıkış akımını oluşturan bu ikincil elektron-delik çiftlerinin sayısı McIntyre-Conradi dağılımıyla bulunur [40] [41] [42].



Şekil 4. APD için Kazanç ve Ön Gerilim Grafiği [43].

APD kazancı, uygulanan bias gerilime bağlı bir fonksiyondur. Şekil 4, APD diyotu için kazanç ve ters gerilim grafiği örneklerini göstermektedir.

APD çıkış akımı, $I_{\text{çıkış}}$, aşağıdaki şekilde ifade edilir. Denklem, bu akımın bağlı olduğu parametreleri göstermektedir.

$$I_{\text{çıkış}} = M R_o P_s \quad (12)$$

Burada, $I_{\text{çıkış}}$ APD diyotun çıkış akımı, M APD kazancı, R_o kazancın $M=1$ olduğundaki 'gerçek kazanç' ve P_s gelen optik gücü göstermektedir.

Bir APD detektörde, göz önünde bulundurulması gereken bir diğer faktör de oluşan gürültüler ve bunların kaynaklarıdır. Bu gürültü kaynakları temelde iki kısımda incelenebilir. Bunlar; saçma gürültüsü (shot noise) ve APD kaçak akımı. Saçma gürültüsü, karanlık akımdan kaynaklı rastgele bir Poisson fonksiyonu şeklindedir.

Burada B ; dedektörün bant genişliğidir. APD için bu durum biraz daha farklıdır. Bulk (yığın) akımı I_{DB} ile diyot kazancı ' M ' çarpılır. I_{DS} , yüzey kaçak akımı olmak üzere, toplam kaçak akım;

$$I_{tka} = I_{DS} + I_{DB} M \quad (13)$$

olur. Sonuçta, karanlık ortam için toplam tayf (spectral) gürültü akımı (i_n),

$$i_n = \sqrt{[2q(I_{DS} + I_{DB} M^2 F) B]} \quad (14)$$

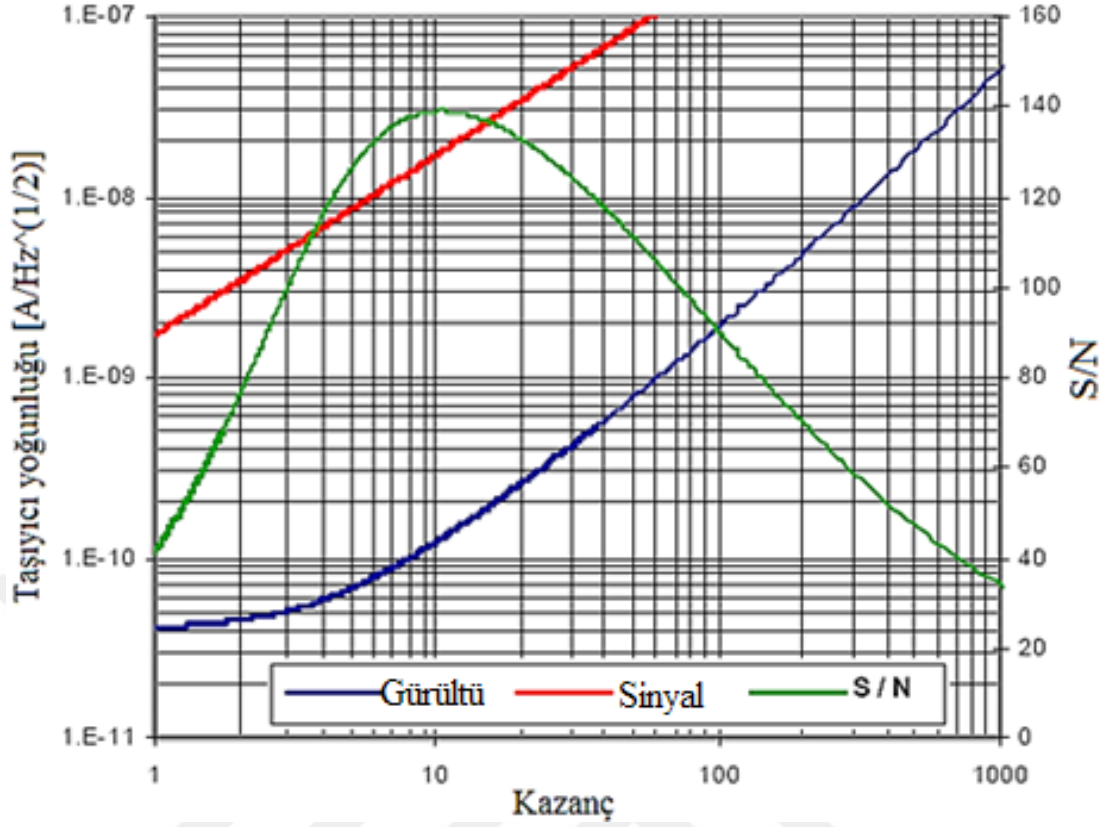
şeklinde elde edilir. Burada, F aşırı gürültü faktörüdür ve eşitlik (16)'da verilmiştir.

Yukarıda anlatılanlar ışığında aydınlık ortam için toplam gürültü akımı ise aşağıdaki gibi olur.

$$i_n = [2q(I_{DS} + (I_{DB}M^2 + R_o \lambda M^2 P_s) F) B]^{0.5} \quad (15)$$

PIN diyotla kıyaslandığında APD detektörler aynı kuantum etkinliği değeri için \sqrt{F} kadar kötü bir SNR sağlayabilirler.

Yukarıdaki formülden de görüleceği gibi, arka plandan gelen bozucu akım, SNR'de çok etkilidir. APD'nin kazancı arttığında SNR artmakta ancak diyot girişindeki gürültüyü de yükselttiğinden bu artış bir süre sonra bozucu etki yapmaktadır. Bu yüzden en uygun 'M' değerinde sistemin çalışması, SNR oranını artıracak ve alıcıda alınan (bit hata olasılığı: Bit Error Rate) BER değerini azaltacaktır. Şekil 5, alıcıya gelen işaret ve gürültünün, APD kazancı ile olan ilişkisini göstermektedir. Dolayısıyla Şekil 5'te gösterildiği gibi en uygun M değeri kullanılarak azami SNR değerine ulaşılabilir.



Şekil 5. Tipik bir APD için SNR - Kazanç grafiği

Anlaşılabileceği gibi, en uygun APD detektör seçilmesi, F faktörüne de bağlıdır. M değeri, Silikon APD'ler için 50 ile 1000 arasında değişirken Ge ve InGaAs için 10 ile 40 arasında değişir.

k_y , yalıtkanlık oranı olmak üzere, F gürültü faktörünün hesaplanması ise aşağıdaki gibidir.

$$F = k_y M + (1 - k_y) \left(2 - \frac{1}{M}\right) \quad (16)$$

Aşağıdaki Tablo 5, PIN foto-diyotlar için genel parametreleri verirken Tablo 6, APD foto-diyotlar için genel tasarım parametrelerini göstermektedir.

Tablo 5. Si, Ge ve InGaAs PIN foto-diyotlar için genel parametreler [42].

Parametre	Birim	Si	Ge	InGaAs
Dalga boyu	nm	400-1100	800-1650	1100-1700
Duyarlılığı	A/W	0.4-0.6	0.4-0.5	0.75-0.95
Karanlık Akım	nA	1-10	50-500	0.5-2.0
Yükseliş Zamanı	ns	0.5-1	0.1-0.5	0.05-0.5
Bant Genişliği	GHz	0.3-0.7	0.5-3	1-2
Öngerilim Voltajı	V	5	5-10	5

Tablo 6. Si, Ge ve InGaAs APD foto-diyotlar için genel parametreler [42].

Parametre	Birim	Si	Ge	InGaAs
Dalga boyu	nm	400-1100	800-1650	1100-1700
Çığ Kazancı	-	20-40	10-200	10-40
Karanlık Akım	nA	0.1-1	50-500	0.10-50 (M=10)
Yükseliş Zamanı	ns	0.1-2	0.5-0.8	0.1-0.5
Kazanç x Bant Genişliği	GHz	100-400	2-10	20-250
Öngerilim Voltajı	V	150-400	20-40	20-30

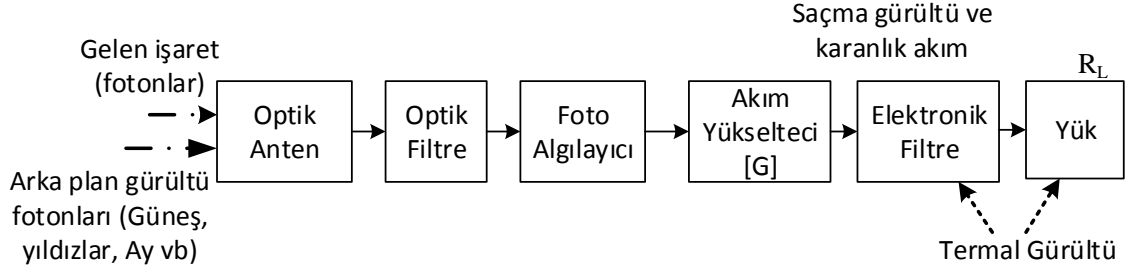
1.4.1.3. Optik Haberleşme Alıcı Çeşitleri

Optik haberleşme için kullanılan modülasyon teknikleri RF haberleşmeye benzer şekildedir. Esasında, birçoğu da RF tekniklerinden lazer sistemlere miras kalmıştır. Modülasyon tekniklerini farklı biçimlerde sınıflandırmak mümkündür. Ancak öncelikle iki ana sınıfa; “doğrudan” ve “evre-uyumlu” algılama olarak ayırmak yararlı olacaktır. Doğrudan algılamalı sistemler için sayısal temel bant modülasyonlar kullanılır. Evre-uyumlu sistemler için ise eşzamanlı (homodyne) ve ara-katlı (heterodyne) modülasyon tekniklerinden söz edilebilir.

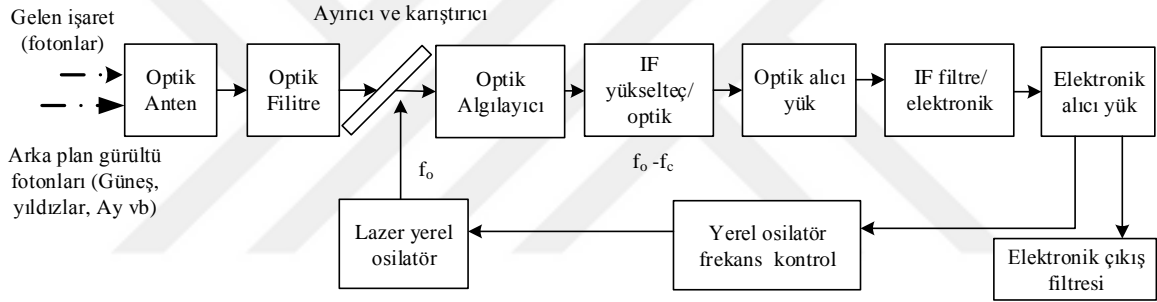
1.4.1.4. Doğrudan Algılayıcılar

Doğrudan algılamada gelen fotonlar fotodetektörde elektrik akımına dönüştürülürler. Çıkan işaret güçlendirilir ve filtreden geçirilir. Evre uyumlu algılamada ise fotodetektör çıkışı, alıcıya gelen optik işaret yerel bir lazer kaynağı ile çarpılır. Bunun sonucunda çıkan ara frekans ise fotodetektörde elektrik akımına dönüştürülür. Demodülatör, kullanışlı olan

işaret kısmını algılayarak demodülasyon yapar [44]. Aşağıdaki Şekil 6 ve Şekil 7, bahsedilen bu alıcı diyagramlarını göstermektedir.



Şekil 6. Genel bir doğrudan lazer alıcı diyagramı [44].



Şekil 7. Genel bir evre uyumlu doğrudan alıcı diyagramı [44].

1.4.1.5. Eş Zamanlı (Homodyne) Algılama

Anlatımı basitleştirmek amacıyla, alıcıya gelen işaret $r(t) = \pm A \cos(\omega_o t)$ olarak gösterilmiş olsun. Burada, A gelen optik işaretin genliğidir ve gelen ortalama foton sayısı ile orantılıdır. Burada örneğin işaret PSK (Phase Shift Keying) işareti ve $+A \cos(\omega_o t)$ ikili "1" i, $-A \cos(\omega_o t)$ ikili "0" ı gösteriyor olsun. İdeal bir eşzamanlı algılayıcı işarete tam olarak aynı frekans ve fazda yerel bir işaret ekler.

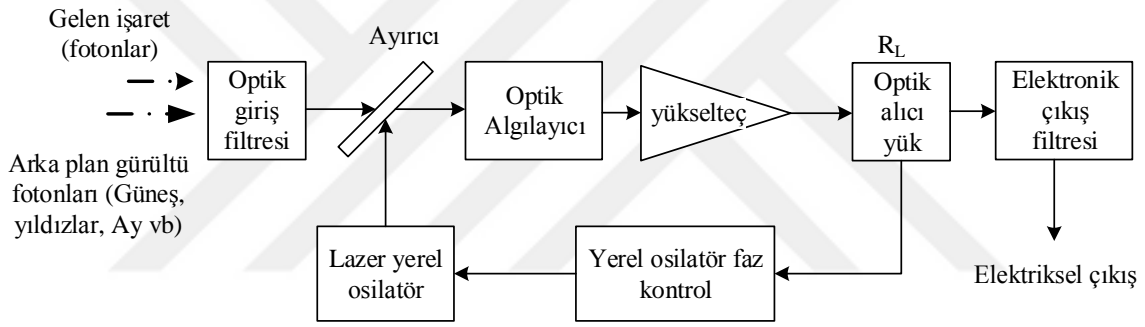
$$s(t) = B \cos(\omega_o t) \quad (17)$$

Buradan

$$x(t) = r(t) + s(t) = (A \pm B) \cos(\omega_0 t) \quad (18)$$

yazılabilir.

Burada 'B', 'A'dan çok daha büyük bir işaret genliğidir. Böylece alıcı elektroniğindeki ısı gürültüden etkilenmesinin önüne geçilmiş olur. Foto-detektördeki optik güç ise $(B \pm A)^2$ ile orantılı olur. Bu durumda alıcıya T zaman aralığında gelen ortalama foton sayısı $K(B \pm A)^2 T$ olur. Algılama sistemi, esasında birim sembol zamanında gelen fotonları sayar. Bu yüzden, örneğin PIN fotodetektörde her sembol zamanından sonra integratör sıfırlanmalıdır. Eğer B yeterince büyükse, PIN foto-detektöre gelen foton sayısı da fazladır. Bu durumda daha az bir elektriksel yükselteç gerekir [44]. Şekil 8, eş zamanlı bir algılayıcının genel diyagramını göstermektedir.



Şekil 8. Genel bir eş zamanlı alıcı diyagramı [44].

1.4.1.6. Ara-katlı (Heterodyne) Algılama

Bu algılama, eşzamanlı algılamaya benzer ancak yerel lazer frekansı, taşıyıcı lazer frekansından farklıdır. Bu yüzden doğrudan taban bant yerine bir ara frekansa (IF) dönüşüm olur. Radyo haberleşmesinde uzun yıllardır kullanılmasına karşın optik haberleşmede kullanım temelleri 1955'ten önce gerçekleşmemiştir [44].

Yerel osilatörün çıkışı,

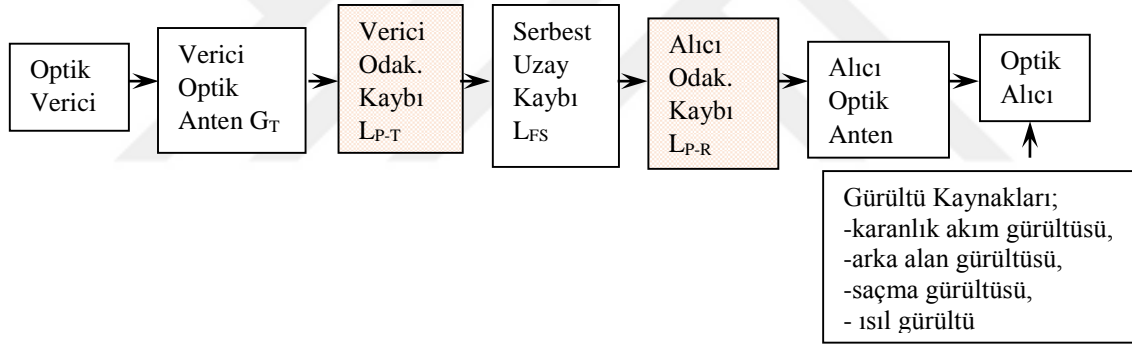
$$s(t) = B \cos(\omega_1 t) \quad (19)$$

olmak üzere gelen işaretle toplamı, $x(t) = \pm A \cos(\omega_0 t) + B \cos(\omega_1 t)$ olur [44].

Öte yandan, arka-plandan gelen gürültü, alıcıya gelen bilgi fotonlarını etkileyen ve istenmeyen fotonlardır. Bu fotonlar Ay'dan, yıldızlardan, gökyüzünden veya Dünya'dan yansıyan bozucu fotonlar olabilir. Bununla birlikte bu fotonların gücü genellikle güneş ışımından 40 dB daha düşük mertebededir. Özellikle Dünya parlaması güneş parlamasının 0.013 katı kadardır [44].

1.4.1.7. İki Uydu Arasında Optik Bağlantı Bütçesi

Temelde lazer işaretin uzayda yayılımı RF'e benzemektedir. Bu bölümde verilen formüller alıcı ile vericinin birbirine kilitlenmeleri durumundaki formüllerdir. Uygulamada ise uzay ortamında hareket halinde bulunun bir LEO ve bir GEO uydunun birbirine odaklanıp kilitlenmesi bir dizi kaba ve bunu takiben hassas hesaplamaları gerektiren bir dizi işlem gerektirir.



Şekil 9. Tipik bir uydular arası optik bağlantı

RF haberleşmesindeki “bit başına düşen enerji”, lazer haberleşmesinde “bit başına düşen foton sayısı” ile, “bit başına düşen gürültü gücü” ise lazer haberleşmesi için “bit başına düşen gürültü foton sayısı” olarak kullanmak gerekir. Sonuçta, lazer haberleşme için elimize işaret fotonunun, gürültü fotonuna oranı gelmiş olur.

Esasında bu bağlantı bütçesinin hesabında alıcı ve verici devrelerdeki kayıpları ve sistemin marjlarını da hesaba katmak gereklidir.

Alıcıya gelen gürültü fotonları arasında daha önce bahsedildiği gibi özellikle Güneşten gelenler en büyük etkiye sahiptirler. Dolayısıyla bu etkilerin zamanları hesaplanabilir. Ancak söz konusu bu etkiyi minimize etmek için en uygun modülasyon tekniği olarak eşzamanlı BPSK uydular arası optik iletişimde önerilmektedir [45].

Uyduların, dolayısıyla anten hüzmelerinde oluşan titreşimler ile odaklama kaybindan kaynaklı etkiler hesaba katıldığında, bit başına alınan foto elektron sayısı aşağıdaki gibi olur.

$$n' = \frac{P_T L_T G_T G_R L_R Q L_{PT} L_{PR}}{L_s h \nu h_f} \quad (20)$$

Burada, n' bit başına alınan foto elektron sayısı olmak üzere, P_T vericiden çıkan lazer optik gücü, L_T verici sisteminde kaybolan toplam sinyal, L_s serbest uzay yol kaybı, ν kullanılan lazerin frekansı, h Plank sabiti, $h\nu$ fotonun enerjisi, h_f bit hızı, Q alıcının kuantum etkinliği, L_R alıcı sisteminde kaybolan toplam sinyal, L_{PT} vericide oluşan odaklama kaybı ve L_{PR} alıcıda oluşan odaklama kaybını göstermektedir [46].

Alıcı ve vericinin anten kazançları ise RF'de olduğu gibi hesaplanabilir.

$$G_T = \left(\frac{\pi D_T}{\lambda}\right)^2 \eta_T \quad (21)$$

$$G_R = \left(\frac{\pi D_R}{\lambda}\right)^2 \eta_R \quad (22)$$

G_T vericinin kazancı, D_T verici optik teleskopunun çapı, G_R alıcının kazancı, D_R alıcı optik teleskopunun çapıdır. η_T ve η_R ise verici ve alıcı optik verimleridir. Uydular arası mesafeden kaynaklı serbest uzay yol kaybı ise aşağıdaki gibidir. Burada R alıcı ile verici (LEO ile GEO uydu) arasındaki mesafeyi göstermektedir [46]. Şüphesiz LEO ile GEO arasındaki mesafe haberleşme boyunca değişmektedir. Bu yüzden bağlantı bütçelerinde azami mesafenin kullanılması gerekecektir.

$$L_s = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (23)$$

Yukarıdaki eşitlikte görüldüğü gibi alıcı ve verici antenin odaklama kayıpları alıcıya gelen işaretin gücünün düşmesine ve sistemde oluşan hatalı bitlerin artmasına yol açmaktadır. Açıkça görülmektedir ki iki uydu arasındaki mesafe arttıkça bu odaklama kaybı da artacaktır. Bu odaklama kayıpları aşağıdaki gibi Rayleigh dağılımı ile hesaplanabilir [44], [47], [48].

$$f(\theta_{az}) = 1/\{(2\pi)^{1/2}\sigma_{az}\}e^{-\{(\theta_{az}-\mu_{az})^2/2\sigma_{az}^2\}} \quad (24)$$

$$\theta_R^2 = \theta_{az}^2 + \theta_{el}^2 \quad (25)$$

$$\sigma_R^2 = \sigma_{az}^2 + \sigma_{el}^2 \quad (26)$$

$$f(\theta_T) = \frac{\theta_T}{\sigma_T^2} e^{-\left\{\frac{\theta_T}{2\sigma_T^2}\right\}} \quad (27)$$

Burada θ rastgele odaklama titreşimi, μ ortalama değeri ve σ ise bu titreşimin standart sapmasıdır. Aynı formüller alıcı içinde yazılabilir. Sonuçta titreşimden kaynaklı odaklama kayıpları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$L_{PT} = e^{-G_T\theta_T^2} = e^{-\left\{\frac{\pi D_T}{\lambda^2}\theta_T^2\right\}} \quad (28)$$

$$L_{PR} = e^{-G_R\theta_R^2} = e^{-\left\{\frac{\pi D_R}{\lambda^2}\theta_R^2\right\}} \quad (29)$$

Dolayısıyla, alıcıya gelen fotonların sayısı ve enerjisi alıcı ve vericinin odaklanmasıyla doğru orantılıdır. Bu yüzden alıcıda veya vericide meydana gelebilecek odaklama kayıpları SNR'nin azalmasına ve BER'in artmasına neden olacaktır. Bu odaklama kayıplarının en büyük nedeni ise alıcı ve/veya vericideki titreşimlerdir. Ayrıca uydular arası iletişim sistemi tasarımı için teleskop yarıçapı, güç, boyut, veri hızı, hedeflenen BER gibi birçok kısıtlama değerlendirilerek sistem tasarımına gidilmelidir [46].

Ek-1'de örnek bir LEO-GEO arası optik haberleşme için bağlantı bütçesi verilmiştir.

1.4.1.7.1. Titreşim Etkisi ve Kaynakları

Alıcıya gelen foton sayısındaki etkiyi test etmek için bir uydunun titreşim etkilerinin ne olduğu üzerinde durulması gerekmektedir.

Uydunun bulunduğu ortamdan, dâhili ekipmanların çalışmalarından ve lazer haberleşme modülünün takip ve odaklamalarından kaynaklı titreşim etkileri bulunmakta ve

bu titreşim etkileri alıcıya ulaşan lazer gücünün azalmasına ve BER'in buna bağlı olarak artmasına neden olmaktadır.

Daha öncede belirtildiği gibi uydu üzerindeki titreşimin kaynakları değişik olabilir. Bu sebepler dâhili olabileceği gibi harici etkiler de olabilir. Ancak, uydu içinde çalışan ve uydunun konum ve yörünge kontrolü için kullanılan donanımlar birçok titreşim gürültüsünün kaynağıdır [47]. Bu gürültü kaynaklarını inceleyen çalışmalar ayrıca bulunmaktadır [48].

Uydunun platformundan kaynaklı iki tip titreşimden söz edilebilir. Bunlar;

- uydunun katı kütesinin hareketinden kaynaklı düşük frekanslı titreşimler,
- uyduya etkiyen kuvvetler;
 - o solar basınç,
 - o termal bükülme,
 - o mikro meteorlar,
 - o Güneş ve Ayın çekim kuvvetleri,

Bunlara ilaveten,

- uydu içerisindeki anahtarlama sistemlerinin çalışması,
- iticiler çalışması,
- antenlerin odaklanması,
- jiroskoptan kaynaklı gürültü, güneş panellerinin ve tekerleklerin dönmesi vs...

gibi orta frekanslı gürültü kaynakları titreşime neden olmaktadır. Genelde bu titreşimlerin, alçak frekans bileşenleri nispeten yüksek genlik, yüksek frekans bileşenleri ise düşük genlikli olarak karşımıza çıkmaktadır. ESA'nın OLYMPUS uydusu üzerinde yaptığı çalışmalar platform üzerindeki titreşimlerin temelde 300 Hz'in altında olduğunu göstermiştir.

ESA, SILEX modülünün açıl momentum değişiminin güç dağılımını f , titreşim frekansına göre aşağıdaki formüldeki gibi modellemiştir [46].

$$S(f) = \frac{160}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \mu rad^2 / Hz, \quad f_0 = 1Hz \quad (30)$$

Öte yandan NASA/GSFC, LANDSAT-4 için 125 Hz'in altında rastlantısal değişen titreşimlere ilaveten, üç harmonikli bir titreşim modeli ortaya koymuştur. Bu harmonikler;

- Güneş panellerinin hareketinden kaynaklı 1 Hz frekanslı 100 µrad rms değerinde bir harmonik,
- Reaksiyon tekerlekleri ve ikinci harmoniklerinden kaynaklı, 4 µrad rms te 100 Hz frekanslı,
- 0.6 µrad rms değerinde 200 Hz'lik titreşim değerleridir.

Uydu üzerinde bu harmonik titreşimlerden başka Rayleigh dağılımı gösteren titreşimler de gözlemlenmiştir [47].

Esasında, uydu üzerindeki titreşim kaynaklarından en etkili olan tekerleklerden kaynaklı olan titreşimdir. Zira jiroskop dışındaki donanımlar, uydular birbirini bulurken kapatılarak titreşimin etkili olduğu süre kısaltılabilir.

Dolayısıyla bulma zamanı için tekerleklerden kaynaklı titreşim düşünülmesi hataya neden olmaz.

Yukarıda anlatılan ESA'nın kullandığı titreşim modeline benzer şekilde Japonların kullandığı titreşim modeli aşağıdaki gibidir [46];

$$S(f) = \frac{160}{1 + (f/10)^2} \mu\text{rad}^2 / \text{Hz} \quad (31)$$

Formüllerden anlaşılacağı gibi SILEX için 16 µrad, NASDA için ise 50 µrad rms değerinde titreşim modellenmektedir [46]. Ancak düşük frekanslı ve yüksek değerli titreşim kaynakları (Örneğin güneş panelleri) haberleşme ve arama-bulma fazlarında kısıtlı bir süre durdurularak iletişim sisteminin düzgün çalışması sağlanabilir.

Öte yandan şunu da belirtmek gerekir ki titreşimin etkisini azaltmak için aşağıdaki gibi çözümler de önerilebilir [49]. Bunlar;

- Bant genişliği adaptasyonu
- Hüzme genişliği adaptasyonu
- Güç Kontrolü
- Kodlama Tekniği
- Kanal Çeşitleme
- Titreşimin aktif veya pasif olarak izolasyonu
- Öz-ayarlamalı ileri besleme

1.4.1.7.2. Odaklama Hatası

Optik bir sistemde odaklama hatası farklı kaynaklardan gelebilir. Temelde iki kaynaktan ‘takip’ (tracking) ve ileri odaklama (point ahead) (veya geriye odaklama (point behind)) hatalarından kaynaklanır. İleri odaklama hatası, iki eksenle bileşeni olan bir hatadır. Her bir eksen hatası RSS (root sum square) olarak eklenir. σ_{track} olarak rastlantısal bir hata ve σ_{point} olarak ileri odaklama hatası, bias hata olarak eklenir. Toplam σ hatası ise bu iki hatanın toplamı olur [46].

$$\sigma = \sigma_{\text{track}} + \sigma_{\text{point}} \quad (32)$$

$$\sigma_{\text{track}} = \sqrt{\sigma_{\text{microvib}}^2 + \sigma_{\text{attitude}}^2 + \sigma_{\text{coarse}}^2 + \sigma_{\text{fine}}^2} \quad (33)$$

$$\sigma_{\text{point}} = \sqrt{\sigma_{\text{ephemeris}}^2 + \sigma_{\text{logic}}^2 + \sigma_{\text{command}}^2 + \sigma_{\text{sensor}}^2 + \sigma_{\text{calibration}}^2 + \sigma_{\text{deform}}^2} \quad (34)$$

Burada;

σ_{microvib} , uydu platformundaki mikro titreşimler,

σ_{attitude} , uydu platformundaki aksenel hatalar,

σ_{coarse} , artık kaba hatalar,

σ_{fine} , hassas takip hataları,

$\sigma_{\text{ephemeris}}$, uydu yörüngesindeki hatalar,

σ_{logic} , kullanılan yörünge modeli ve hesaplamalarından kaynaklı hatalar,

σ_{command} , kuantalama ve komut çevirmeden kaynaklı hatalar,

σ_{sensor} , sensörün ileri veya geri odaklama hataları,

$\sigma_{\text{calibration}}$, kalibrasyon hataları,

σ_{deform} , optik sistemdeki dalganın deformasyonuna bağlı hatalardır.

Bu hatalar birbiriyle benzeşmediği sürece RSS olarak toplanabilirler [46]. İletim mesafesi arttıkça bu hataların etkileri de artacaktır. Bu durumda vericinin, alıcının ilerleyen

zaman içerisindeki pozisyonunu hesaplayarak işaret göndermesi gerekmektedir. Bu odaklama prosedürüne “ileri bakış-point ahead-” adı verilir. ‘R’ iki uydu arasındaki iletim mesafesi olmak üzere, ‘c’ ışık hızıyla ilerleyen işaretin iki uydu arasında gidiş ve gelişte geçirdiği zaman olmak üzere τ_c [46];

$$\tau_c = \frac{2R}{c} \text{ olur.} \quad (35)$$

‘v’ teğetsel hızıyla yörüngesinde dönen bir uydu için bu süre içerisinde kat ettiği mesafe ise ‘ $v\tau_c$ ’ olur.

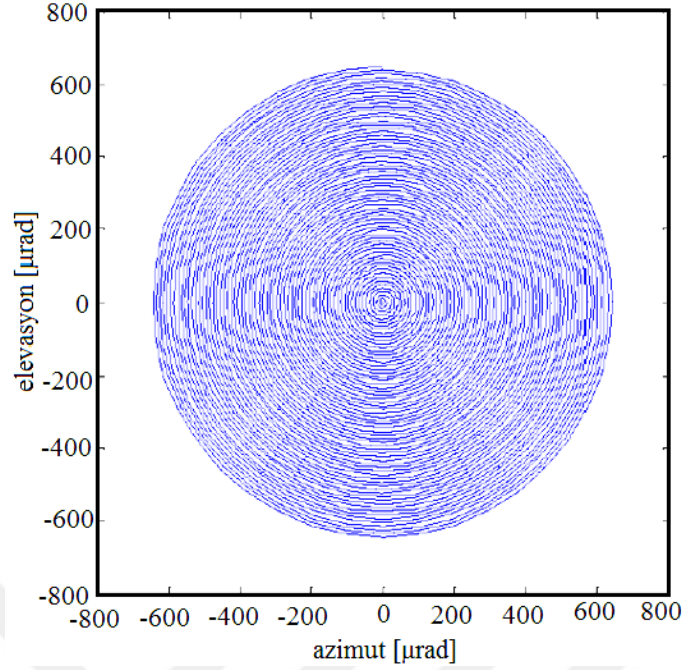
Buna göre ileri bakış açısı ‘ θ_L ’;

$$\theta_L \cong \frac{\tau_c v}{R} = \frac{2v}{c} \text{ olur.} \quad (36)$$

1.4.1.8. GEO Uyduyu Arama Seçenekleri

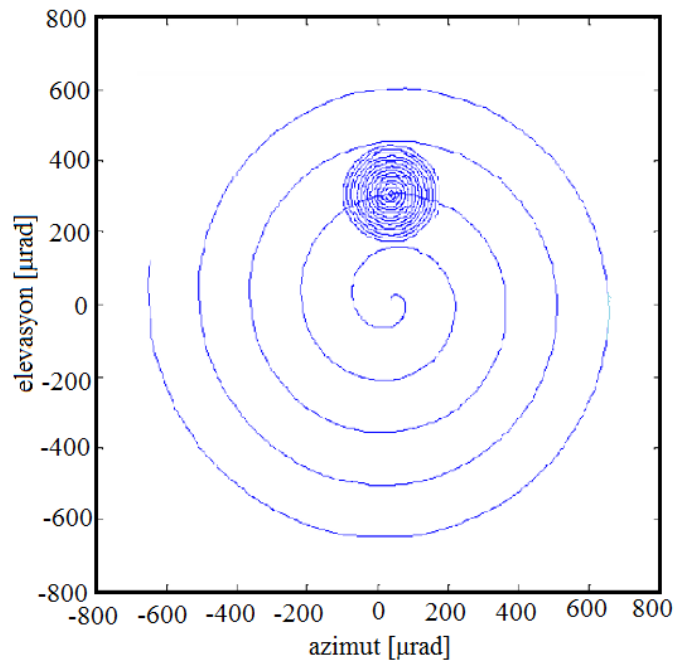
LEO ve GEO uyduların, iletişime başlamadan önce birbirlerini bulması ve alıcı ile verici terminallerin birbirlerine kilitlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden haberleşme fazı öncesinde Arama Bulma ve Takip Etme (ABT) (Pointing-Acquisition-Tracking: PAT) fazı olarak adlandırılan fazın sorunsuz olarak ve mümkün olduğunca kısa sürede tamamlanması gerekmektedir [50].

Şekil 10’ dan görüldüğü gibi, hedefteki uyduyu aramak için iki çeşit teknik önerilebilir. Birinci teknikte tümüyle hassas arama önerilmektedir. Burada hedef uydu dairesel hareketlerle hassas bir şekilde aranmaktadır. Arama yapılan hüzmünün genişliği ± 600 μ rad kadardır.



Şekil 10. Lazer haberleşmede arama, bulma fazı örneği

Şekil 11'deki ikinci arama tekniğinde ise önce hızlı bir arama yapıp hedef uydu kabaca bulunduğundan sonra daha hassas arama ile hedefteki uydunun bulunup haberleşmenin başlaması sağlanmaktadır. Bu teknikte de kabaca arama yapılan katı açısı ± 600 μrad iken hassas arama yaklaşık ± 200 μrad içerisinde yapılmaktadır.



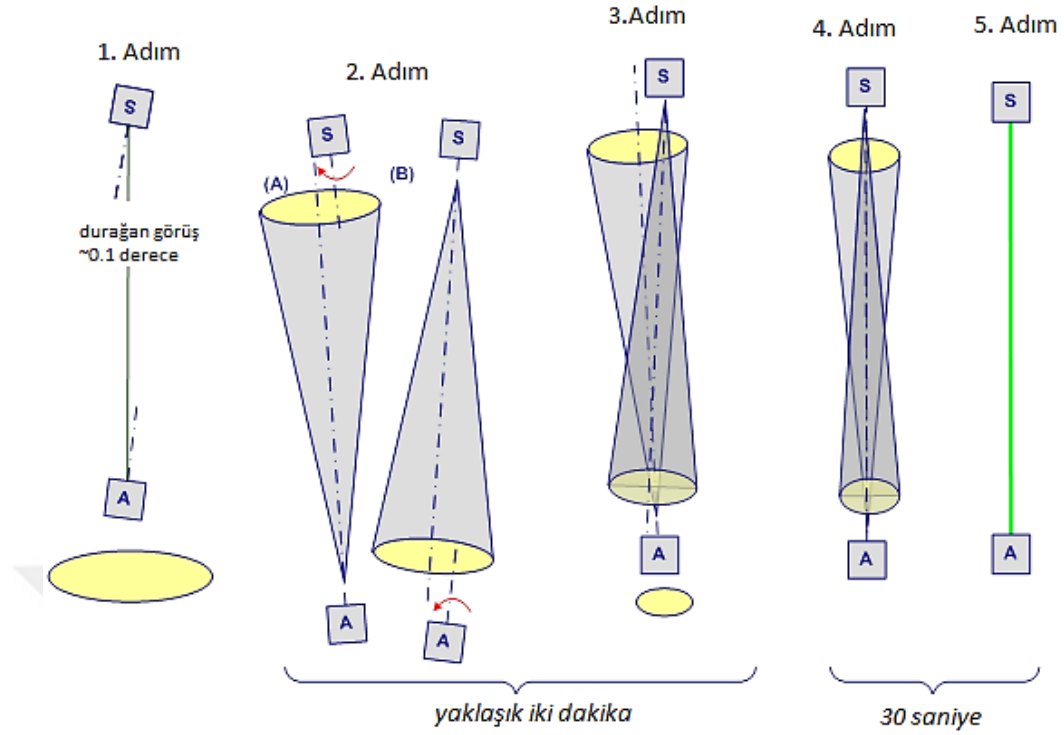
Şekil 11. Lazer haberleşmede hassas ABT fazı örneği

Yukarıdaki arama teknikleri de dikkate alındığında hedef bir uydunun ne kadar hassasiyetle konumlandırılması gerektiği sorusu ortaya çıkar.

Buna göre kabaca hesaplamak için GEO uydunun uzayda bulunduğu konumda 10 km'nin altında bir hata olması halinde aramanın yapılması gereken alan çapı 600 µrad altında kalabilmektedir. Ancak, bu haberleşmenin başlaması için yeterli değildir. Haberleşmenin başlaması ve uyduların birbirlerine kilitlenmesi için çok daha hassas bir odaklama yapılması ve uydu platformlarının titreşimlerden mümkün olduğunca arındırılması gerekmektedir.

1.4.1.9. LEO ve GEO Uyduların Birbirlerini Bulması

Haberleşmeye başlayacak olan uydular ilk önce birbirlerinin görüş alanına girmeli ve hemen ardından alıcı ve verici terminallerinin birbirlerine doğru bakmaları gerekmektedir. Bu süreç, önce LEO uydu üzerinde koşan hedef uydunun (GEO uydunun) yörünge bilgilerini kullanarak “kabaca bulma” ile başlar. İki uydu birbirini bulduktan sonra, elektro-optik sistem yardımıyla “hassas odaklama” yapılır. Haberleşmeye başlamak için ise alıcı ve verici birbirlerine kilitlenerek “odaklama ve takip” fazını başlatırlar [51]. Eğer uyduların konumları birbirine göre oldukça iyi bir doğrulukla bilinebiliyorsa, ABT fazı o kadar erken tamamlanabilir. Bu ise haberleşme fazına daha erken başlamayı ve daha fazla veriyi zaten kısıtlı olan erişim süresinde alıcıya ulaştırmayı sağlar [52]. Şekil 12’de adımları gösterilen örnek bir kilitlenme fazı bulunmaktadır. Örnekte bu süre yaklaşık 2-2.5 dakika kadar sürmektedir.



Şekil 12. Lazer haberleşmede örnek bir arama, bulma ve takip fazı

1. Adım: Durağan görüş; uyduların birbirini aramaya başlamaları için yaklaşık 0.1 derece hassasiyetle bu açının bilinmesi gerekir.

2. Adım: Kabaca bulma İşlemi;

(A); LEO uydu 0.1 derece çevresinde tarama yaparak GEO uyduyu arar ve taranan alanın genişliğini azaltmaya başlar.

(B); GEO uydu da LEO uydu gibi 0.1 derece çevresinde tarama yaparak LEO uyduyu arar ve taranan alanın genişliğini azaltmaya başlar.

3. Adım: Hassas Bulma İşlemi; her iki uydu birbirini bulduktan sonra tarama alanı hassasiyetini yaklaşık 250 μ rad'a indirir.

4. Adım: Takip Etme; her iki uydu birbirini 15 μ rad'lık bir açı içerisinde takip etmeye başlar.

5. Adım: İletişim; uydular birbiriyle, bağlantı bütçesinde belirlenen şekilde optik iletişime başlar.

2. ve 3. adımlarda uyduların birbirlerini bulması yaklaşık 2 dakikalık bir süre alabilir. Uyduların birbirlerini bulduktan sonra takip etmeye başlamaları ise 30 saniye civarındadır. Bu parametreler SILEX lazer haberleşme sistemini yapan TESAT verilerine göre [6].

Buraya kadar bahsedilen uyduların “konumları” denilince akla uzaydaki Kartezyen koordinatları gelir. Ancak, hesaplamalarda her zaman aynı koordinat sistemi kullanılmaz ve kullanılan koordinat sistemleri arasında anlaşılabilirliği artırmak için dönüşümler yapılır.

Önceki kısımlarda sıkça bahsedilen ve uyduların yörüngedeki konumları ile yakından ilgili olan yörünge elemanlarını da açıklamak gerekmektedir. Böylelikle, bir uzay cisminin uzaydaki konumu anlaşılabilir, hesaplanabilir ve istenilen eksen takımına dönüştürülebilir. Öte yandan, şunu da belirtmek gerekir ki tüm gök cisimleri uzaydaki hareketleri esnasında birçok bozucu kuvvete maruz kalırlar. Uydular için bu bozucu kuvvetlerin düzeltilmesi amacıyla manevralar yapılır. Bu manevralar ise periyodik olarak hesaplanır ve uygulanırlar.

Aşağıdaki kısımlarda, bir uydunun uzaydaki konumu ve GEO uydunun kontrolü konusunda kısaca bilgi verilmiştir.

1.4.2. Uzaydaki Bir Yörüngenin Elemanları

Yörünge elemanları olarak adlandırılan beş bağımsız değişken ile uzaydaki bir cismin veya uydunun yörüngesinin boyutu, şekli, yönlendirilmesi tam olarak tanımlanabilir. Altıncı bir parametre ile uzay aracı yörünge üzerine belirli bir zaman için konumlandırılır [53].

Şekil 13 ve Şekil 14’de uzayda ve yörünge düzleminde yörünge elemanları açıklanmıştır.

Burada;

a, yarı asal eksen; yörünge boyutunu belirleyen sabit,

e, dış merkezlik; yörünge şeklini belirleyen sabit,

i, yörünge eğikliği; uydunun bulunduğu yörünge düzlemiyle ekvator düzlemi arasındaki açı,

Ω , yükselme düğümü açısı; yörünge düzleminde, uzay aracının ekvator düzlemini güneyden kuzeye geçerken kestiği nokta ile bahar gündönümü referans doğrultusu arasındaki açı,

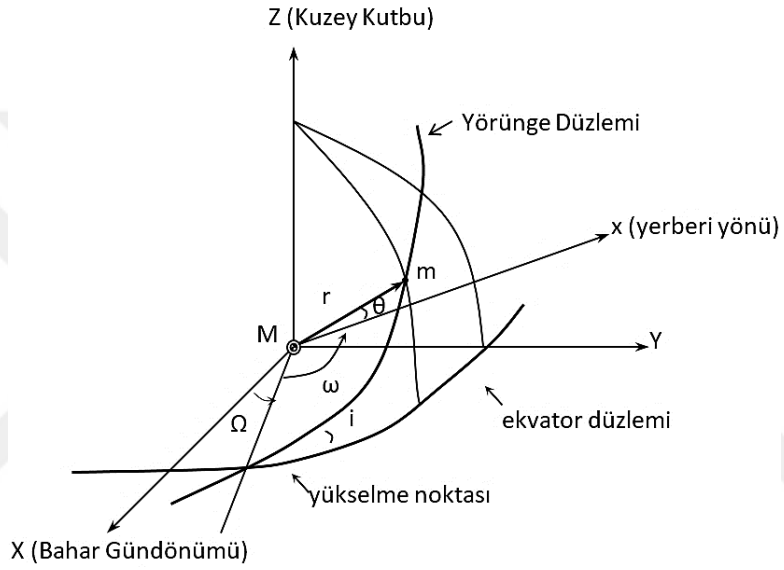
ω , yerberi argümanı; yükselme noktası ile yerberi noktası arasındaki açı (çekim kuvveti merkezine (Dünyaya) en yakın nokta),

θ , gerçek ayıklık; uydunun bulunduğu konum ile yerberi doğrultuları arasındaki açıdır ki kütle problemi için, zamana bağlı tek değişkendir. Yukarıda tanımlanan parametreler Şekil 13’te kesit olarak gösterilen yörünge düzlemi ve ekvator düzlemi kullanılarak

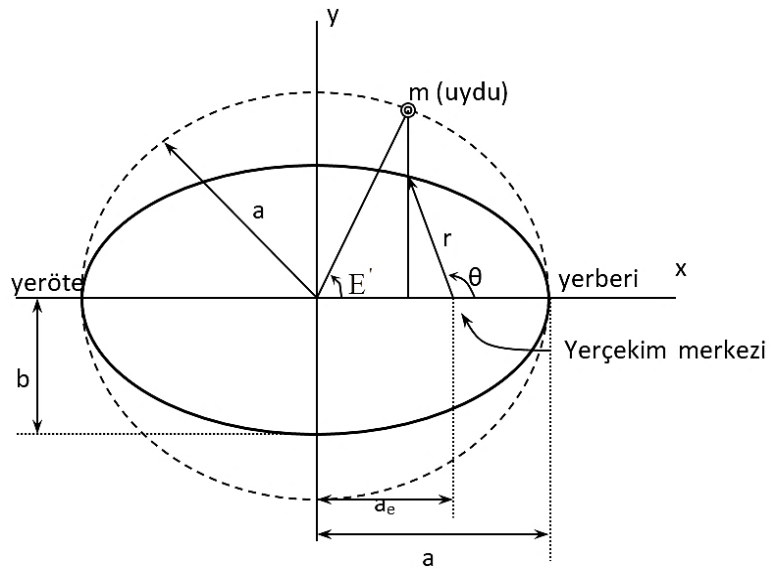
görselleştirilmiştir. Ayrıca Şekil 14, yörünge düzlemindeki değişkenleri Dünya çekim merkezi örneğine göre göstermektedir.

Şekil 14'ten dış merkezlilik aykırılığı E' ile gerçek aykırılık θ arasındaki aşağıdaki ifade çıkartılabilir.

$$\tan \frac{E'}{2} = \left(\frac{1-e}{1+e} \right)^{1/2} \tan \frac{\theta}{2} \quad (37)$$



Şekil 13. Uzayda yörünge elemanları [53]



Şekil 14. Yörünge düzlemindeki yörünge elemanları

1.4.2.1. Yörünge Parametrelerinden Kartezyen Koordinatlara Dönüşüm

Bozucu ivmelerin hesabında kullanmak veya uydunun uzaydaki konumunu hesaplamak amacıyla yörünge parametrelerinden Kartezyen koordinatlara geçmek gerekebilir. Bu koordinatlar, Dünya merkezine göre uydunun hız ve konum bilgilerini gösterir [54].

$$r = \frac{a(1-e^2)}{(1+e \sin \theta)} \quad (38)$$

$$v = \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{a(1-e^2)}} \quad (39)$$

olmak üzere konumlar;

$$x = r[\cos(\theta + \omega) \cos \theta - \cos i \sin(\theta + \omega) \sin \Omega] \quad (40)$$

$$y = r[\cos(\theta + \omega) \sin \Omega + \cos i \sin(\theta + \omega) \cos \Omega] \quad (41)$$

$$z = r \sin(\theta + \omega) \sin i \quad (42)$$

Her bir eksendeki hızlar ise;

$$V_x = v[(e + \cos \theta)(-\sin \omega \cos \Omega - \cos i \sin \Omega \cos \omega) - \sin \theta (\cos \omega \cos \Omega - \cos i \sin \Omega \sin \omega)] \quad (43)$$

$$V_y = v[(e + \cos \theta)(-\sin \omega \sin \Omega + \cos i \cos \Omega \cos \omega) - \sin \theta (\cos \omega \sin \Omega + \cos i \cos \Omega \sin \omega)] \quad (44)$$

$$V_z = v[(e + \cos \theta) \sin i \cos \omega - \sin \theta \sin i \sin \omega] \quad (45)$$

olarak tanımlanabilir.

1.4.2.2. Kartezyen Koordinatlardan Yörünge Parametrelerine Dönüşüm

Yörüngeyi şekli, boyutu, ekvator düzlemine göre konumu, uydunun bu yörünge üzerindeki yerini belirlemek için Kartezyen koordinatlardan yörünge parametrelerine geçmek gerekebilir [55]. Aşağıdaki formüllerle bu dönüşüm gerçekleştirilebilir.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (46)$$

$$v = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (47)$$

$$c = \sqrt{(yV_z - zV_y)^2 + (zV_x - xV_z)^2 + (xV_y - yV_x)^2} \quad (48)$$

$$\varepsilon = \frac{rv^2}{\mu} - 1 \quad (49)$$

olmak üzere, Kepler yörünge parametreleri;

$$a = \frac{r}{(1-\varepsilon)} \quad (50)$$

$$e = \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{(1-\varepsilon^2)(xV_x + yV_y + zV_z)^2}{r^2 v^2}} \quad (51)$$

$$i = \arccos \left[\frac{(xV_y - yV_x)}{c} \right] \quad (52)$$

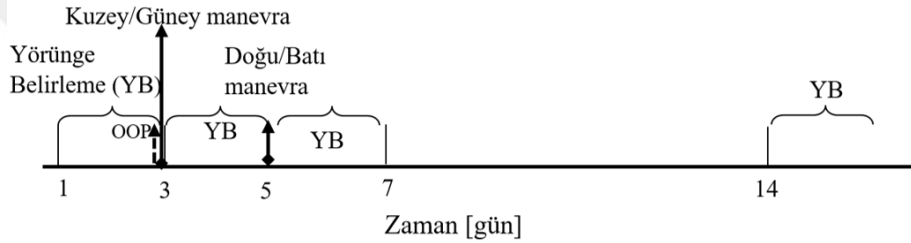
$$\Omega = \arctan \left(\frac{zV_x - xV_z}{yV_z - zV_y} \right) + \frac{\pi}{2} \quad (53)$$

$$\theta = \left[\frac{\left(\frac{a(1-\varepsilon^2)}{r} \right) - 1}{e} \right] \cdot \text{sign}(xV_x + yV_y + zV_z) \quad (54)$$

$$\omega = \arccos \left[\frac{x \cos \Omega + y \sin \Omega}{r} \right] \cdot \text{sign}[(y \cos \Omega - x \sin \Omega) \cos i] - \theta \quad (55)$$

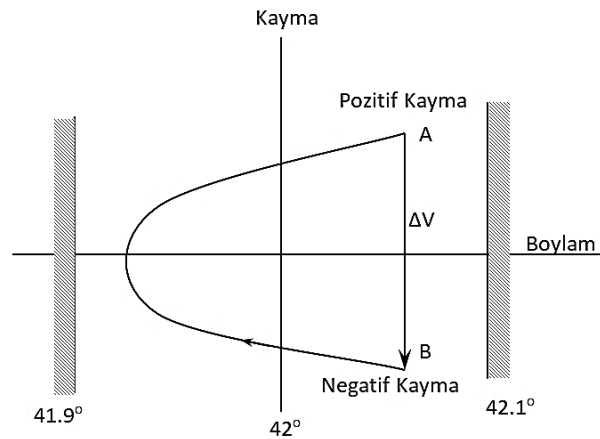
1.4.2.3. Bir GEO Uydunun Nominal Kontrol Çevrimi

Bir GEO uydusu, üzerine etkiyen bozucu etkiler nedeniyle sahip olduğu yörüngede sürekli bozulmaya maruz kalır. Uydusu üzerindeki yakıtlar kullanılarak yapılan periyodik manevralar ile bu etkiler giderilmeye çalışılır. Genelde kullanılan manevra tekniği Şekil 15'te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi örnek bir manevra çevriminde ilk önce Kuzey/Güney manevrası ve daha sonra Doğu/Batı manevrası yapılmaktadır. Öte yandan, uydunun yerde hesaplanan hassas yörüngesi Kuzey/Güney manevrası öncesi de uyduya yüklenmektedir. Bu işleme OOP (On Orbit Propagator) güncellemesi denir. Bu operasyonun zamanı ve sıklığı uydusu platformuna veya üreticiye göre farklılık gösterebilir.



Şekil 15. Bir GEO uydusu için manevra çevrim planı

Genelde kullanılan bu nominal konum-koruma çevriminde uydunun yörünge düzleminin ekvator düzlemiyle yaptığı açının korunması için Kuzey/Güney manevrası, boylam penceresinde tutmak için ise Doğu/Batı manevrası yapılır. Şekil 16, nominal bir boylam penceresini ve kontrol sınırlarını göstermektedir.

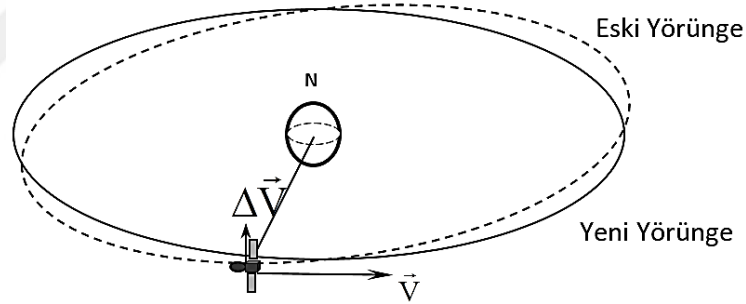


Şekil 16. Boylam penceresi örneği (42 derece doğu)

Kuzey/Güney manevrası, Doğu/Batı manevrasından 3-4 gün önce yapılır. Böylece Kuzey/Güney manevrasından kaynaklanabilecek hataların katlanarak büyümesine engel olunur. Doğu/Batı manevrasında bu etkileri de içeren düzeltme manevrası yapılır [56]. Şekil 16, Doğuya doğru kayan bir uyduya ΔV kadar bir çizgisel hız eklenerek kayma doğrultusundaki değişimi göstermektedir. Uydu bu manevradan sonra batıya doğru kaymaya başlar ancak doğudaki çekim devam ettiği için bir süre sonra yeniden aynı yöne doğru hızlanır.

1.4.2.3.1. Kuzey/Güney Manevrası

GEO uydular, idealde tipik olarak ekvator düzleminin ± 0.1 derecelik bir pencerede bulunurlar. Uydunun yörünge düzleminin ekvator düzlemi ile yaptığı açının korunması amacıyla yükselme veya alçalma düğümlerinde yapılır.

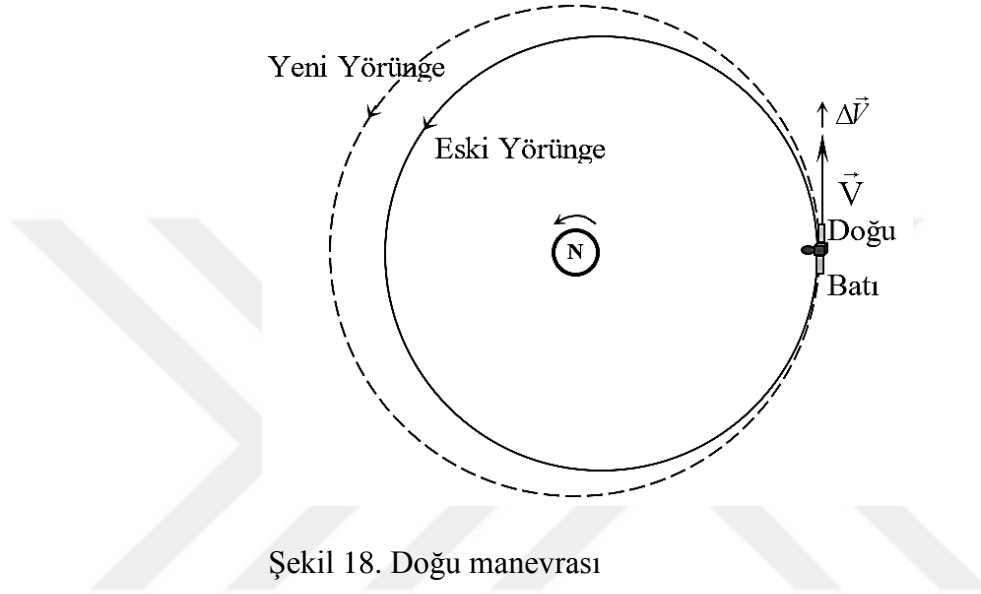


Şekil 17. Kuzey/Güney manevrası

Şekil 17'den de görüldüğü gibi Kuzey/Güney manevrası yükseliş noktasında, yörünge düzlemine dik bir ΔV eklenerek yapılır. Bu durumdaki eski ve yeni yörüngeler Şekil 17'de gösterilmiştir. Uydunun bir aylık yaptığı kuzey manevrasında harcadığı yakıt yaklaşık olarak bir yılda doğu manevrasında harcadığı yakıtı denktir. Bu yüzden, bu manevraların yönü oldukça hassas bir şekilde hesaplanmalıdır.

1.4.2.3.2. Doğu/Batı Manevrası

Doğu manevrasında V çizgisel hızıyla gitmekte olan uyduya kayma yönünde ΔV hızı eklenir. Bu durumda uydu hızlanır ve bir üst yörüngeye çıkar böylece Dünyaya göre batıya kaymaya başlar.



Şekil 18. Doğu manevrası

Şekil 18, örnek bir doğu manevrası öncesi ve sonrası GEO uydu yörüngesini göstermektedir. Bu manevra ile uydunun hem yörünge şekli düzeltilir hem de boylam penceresindeki kontrolü sağlanmış olur.

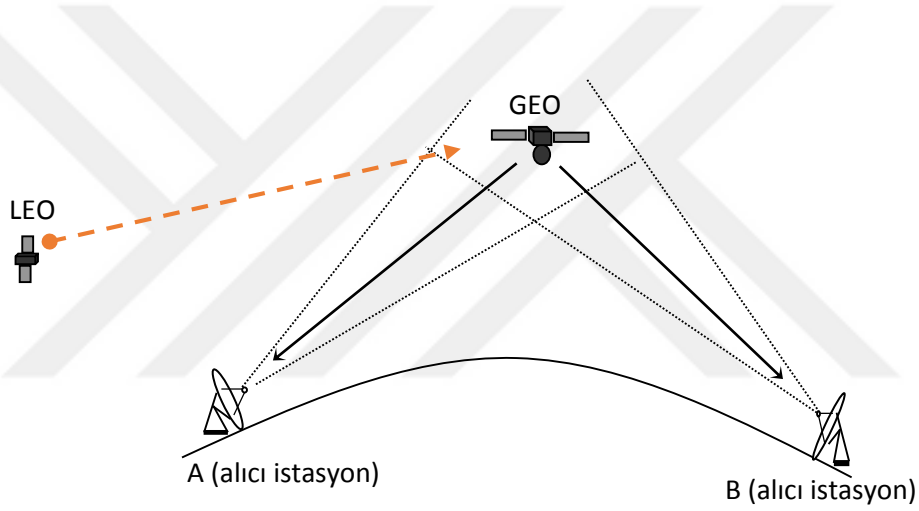
1.4.3. GEO Uydu-Yer Arası İletişim Sisteminin Temel Bileşenleri

Esasında bir uydu, yerden aldıkları sinyali güçlendirerek ve frekansını değiştirerek kapsama alanındaki kullanıcılara yeniden gönderir. Dolayısıyla, temelde bir tekrarlayıcıdır. Ancak, çalışma kapsamında uydu ile yer arasındaki iletişim sistemi, GEO uydudan yere doğru olacak şekilde tasarlanmış ve bu kapsamda açıklanmıştır.

GEO uydu, LEO uydunun gönderdiği veriyi aldıktan ve demodüle ettikten sonra RF taşıyıcıya uygun şekilde yeniden modüle eder ve güçlendirerek yere gönderir. Kapsama alanı içerisinde bulunan yer istasyonu/istasyonları ise uydu üzerindeki aynı frekansa sahip yerel

osilatör ile gelen işareti karıştırır ve çıkıştaki istenilen işaret demodüle edilerek ulaşılmış olur [57].

Bilindiği gibi bir haberleşme sisteminin analizi yapılırken temel performans ölçütü bir noktadan gönderilen işaretin başka bir noktadaki alıcı tarafından alınabilmesidir. Uydu haberleşmesinde bu performans kriterlerini birçok bileşen oluşturur. Başlıca kriterler ise, uydunun veri gücü, atmosferik dağılıma etkileri, uydu ve yer istasyonlarındaki gürültülerdir. Çoğu durumda ise uydu verici gücü en önemli parametredir. Yağmur zayıflatması gibi atmosferik olaylar ise 10 GHz'in üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Frekans yükseldikçe yağmur zayıflatması hesaba katılması gereken önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 19. Uydu-Yer İletişim Bağı

Şekil 19, LEO uydudan aldığı veriyi aktaran bir GEO uydu ve olası yer istasyonu/istasyonlarına olan aşağı bağlantıyı göstermektedir.

GEO uydu ile yer arasındaki bağlantı bütçesi hesaplanırken, söz konusu bağlantıdaki tüm bileşenlerin etkileri ortaya koyulmalıdır. Aşağıdaki bölümlerde tüm bu etkiler tanımlanmış ve açıklanmıştır.

1.4.3.1. Etkin Yönsesiz Yayılan Güç (EIRP)

EIRP, verici anten kazancı ile verici gücünün fonksiyonu olarak ifade edilir.

$$EIRP_{dBW} = 10 \log P_T + G_{TdBi} \quad (56)$$

P_T : verici anten giriş gücü [W]

G_{TdBi} : verici anten kazancı [dBi]

Bir uydunun EIRP seviyesinin kontrol edilmesi son derece önemlidir. Çünkü yüksek EIRP seviyesi işaretler arasında girişime yol açarken, düşük EIRP seviyesi sağlanması beklenen haberleşme servisindeki performansı düşürür.

1.4.3.2. Uydu İletişiminde İletim Kayıpları

1.4.3.2.1. Serbest Uzay Kaybı

P_T gücü yayan yönsesiz bir anten tüm yönlere eşit ışınım yapar ve anten hüzmesi küre şeklindedir. D uzaklığındaki birim alandaki güç;

$$W = \frac{P_T}{4\pi D^2} \text{ W / m}^2 \quad (57)$$

olarak ifade edilir.

Verici anten enerjiyi odakladığından (57) ifadesi;

$$W = \frac{G_T P_T}{4\pi D^2} \text{ W / m}^2 \quad (58)$$

veya

$$W_{dBW/m^2} = EIRP_{dBW} - 20 \log D - 71_{dB} \quad (59)$$

olarak yazılabilir.

$$G_T P_T = \text{EIRP} \quad (60)$$

W : aydınlatma seviyesi

D : mesafe [km]

$$71_{\text{dB}} = 10 \log (4\pi \cdot 10^6)$$

Bu durumda, alıcı antende oluşan güç yoğunluğu ile alıcı antenin etkin yüzey alanı çarpımı alıcıdaki gücü verir [58].

Alıcı antenin etkin yüzey alanı A_e ise;

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_R \quad (61)$$

alıcıdaki güç;

$$P_R = W \cdot A_e \quad (62)$$

$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \cdot P_T \cdot G_T \cdot G_R \quad (63)$$

olarak bulunur.

$\left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2$ ifadesi serbest uzay kaybı (L_{FS}) olarak ifade edilir.

$$L_{\text{FS}} = 20 \log D + 20 \log f + 92.44 \quad [\text{dB}] \quad (64)$$

D : alıcı ile verici arasındaki uzaklık [km]

f : kullanılan frekans [GHz]

$92.44_{\text{dB}} = 20 \log (4\pi 10^{12}/c)$ ifadesinden gelen sabit.

c : ışık hızı

(73) ifadesi desibel olarak ifade edildiğinde ve (70) ifadesi de kullanıldığında,

$$P_{RdBW}=EIRP-L_{FS}+G_R \quad (65)$$

olarak alıcıdaki işaret seviyesi gösterilebilir.

1.4.3.2.2. Uydu İstasyon Uzaklığı (D)

Yere göre durağan yörüngedeki bir uydudan, Dünyadaki bir yer istasyonunda olan uzaklık D, şu şekilde ifade edilebilir [59].

$$D = \sqrt{r^2 + S^2 - 2rS(\cos C)} \quad (66)$$

r :ekvator yarıçapı 6378.144 km

S :Yermerkezinden uyduya olan uzaklık 42165.8 km

$$C = \cos^{-1}\{\cos \theta_1 \cos(\theta_s - \theta_e)\} \quad (67)$$

θ_1 : yer istasyonunun bulunduğu enlem

θ_s : uydunun bulunduğu boylam

θ_e : yer istasyonun bulunduğu boylam

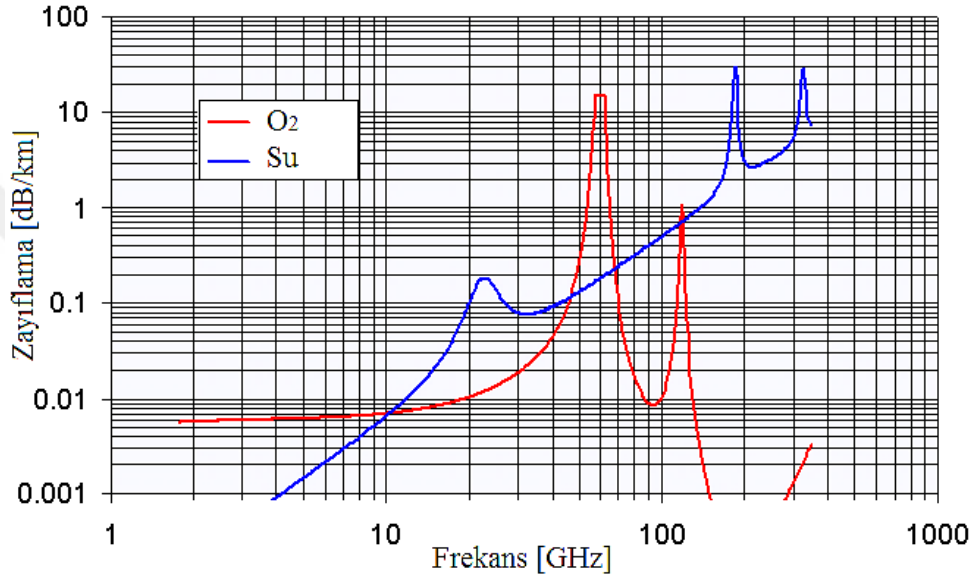
1.4.3.2.3. Atmosferik Kayıplar

Atmosferde, pencere adı verilen, radyo dalgalarında düşük zayıflama oluşturan bantlar bulunmaktadır. Radyo dalgalarının zayıflamalarında atmosferdeki oksijen ve su buharı ana etkilendirler. Bu özellik, kullanılan işaretin frekansına, yükselme açısına, deniz seviyesinden yüksekliğe ve mutlak neme bağlı olarak değişir. 10 GHz altındaki frekanslarda genelde ihmal edilebilir. Ancak 10 GHz üzerinde ve özellikle düşük yükselme açısı kullanılan durumlarda önem kazanır. Şekil 20, uydu-yer bağlantısı için atmosferik kayıpları göstermektedir.

Tablo 7’de, 10° yükselme açısı için atmosferik kayıplar örneklenmiştir [59].

Tablo 7. Atmosferik zayıflama örnekleri

Atmosferik Kayıp [dB]	Kullanılan Frekans [GHz]
0.25	2<f<5
0.33	5<f<10
0.53	10<f<13
0.73	13<f



Şekil 20. Uyduların yer ile iletişimde atmosferik kayıplar

1.4.3.2.4. Yağmurun Etkisi

Uyduların haberleşmesini etkileyen en önemli etkilerden biri de yağmurdur. Yağmur, radyo dalgasında saçılma ve emilme şeklinde zayıflamaya yol açar. Yağmur zayıflaması frekansla doğru orantılıdır. Yani, frekans yükseldikçe bu zayıflama da artmaktadır.

Yağmur zayıflamasının hesaplanmasında istatistiksel verilerin de kullanılması gerekmektedir. R_r , saatte düşen yağmur değeri olmak üzere [60],

$$\gamma_R = k_r R_r^\alpha \text{ [dB/km]} \quad (68)$$

Yağmur zayıflama değerini verir.

Burada;

$$\log_{10} k_r = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (69)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (70)$$

olmaktadır.

Burada,

f: kullanılan frekans [GHz]

k_r : kullanılan kutuplanmaya göre k_H (yatay) veya k_v (dikey).

α : kullanılan kutuplanmaya göre α_H (yatay) veya α_v (dikey).

olmaktadır.

Aşağıdaki Tablo 8, Tablo 9, Tablo 10 ve Tablo 11, yukarıdaki formüllerde geçen değişkenlerin değerlerini göstermektedir.

Tablo 8. k_H için katsayılar

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33980	-0.10008	1.131	-0.18961	0.7115
2	-0.35351	1.2697	0.454		
3	-0.23789	0.86036	0.1535		
4	-0.94158	0.64552	0.1682		

Tablo 9. k_v için katsayılar

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.8106	-0.16398	0.633
2	-3.44965	-0.22911	0.5106		
3	-0.39902	0.73042	0.119		
4	0.50167	1.07319	0.272		

Tablo 10. α_H için katsayılar

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

Tablo 11. α_V için katsayılar

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

Yukarıdaki ifadeler yatay veya dikey kutuplanmalı dalga kullanıldığında geçerlidir. Eğer dairesel kutuplu bir RF taşıyıcı kullanılacaksa k_r ve α değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$k_r = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2 \quad (71)$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2k_r \quad (72)$$

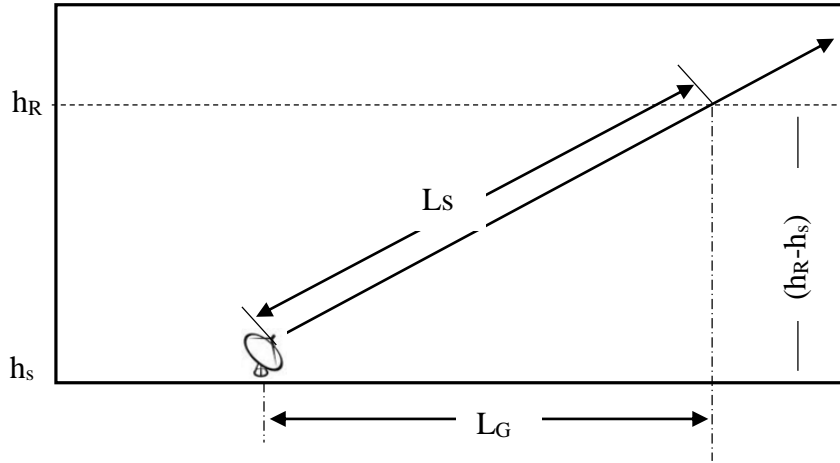
Burada,

θ ; ilgili yolun yükselme açısı,

τ ; yatay eksene göre kutuplanma açısıdır. Dairesel kutuplanma için 45 derecedir [60].

Bu tanımlara ilaveten haberleşmenin kesintisizlik yüzdesine bağlı terimlerinin hesaplanması da gerekmektedir [61].

Şekil 21'de, uydu haberleşmesi için yağmur yolu gösterilmiştir. Bu şekilde, h_R yağmur yüksekliği olmak üzere 5 derece ve üzeri elevasyon açısına sahip antenler için yağmur yolu aşağıdaki gibi hesaplanabilir [61].



Şekil 21. Yağmur zayıflatması için yer istasyonu uydu yolu [62].

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin\theta} \text{ [km]} \quad (73)$$

Burada θ alıcı anten için elevasyon açısı, h_s istasyonun deniz seviyesinden yüksekliğidir.

Yağmur yolunun yatay bileşeni (L_G) ise geometriden [62];

$$L_G = L_s \cos\theta \quad (74)$$

olarak bulunur.

İstatistiksel olarak zamanın %0.01'i için yatay indirgeme faktörü $r_{0.01}$;

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (75)$$

şeklinde verilir.

Burada, f kullanılan frekanstır.

Benzer şekilde dikey ayarlama faktörü $v_{0.01}$;

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin\theta} \left(31(1 - e^{-(\theta/(1+\kappa))}) \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45} \quad (76)$$

ile verilir.

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) \text{ [derece] ara de\u011fi\u015fen olmak \u00fczere,} \quad (77)$$

E\u011fer ζ elevasyon a\u00e7ısı θ ' dan b\u00fcy\u00fckse;

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad (78)$$

Di\u011fer durumlarda;

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \text{ olarak kullanılır.} \quad (79)$$

\u00d6te yandan e\u011fer yer istasyonun enlemi ' ϕ ' 36 derece Kuzey veya G\u00fcney'den daha k\u00fc\u00e7\u00fckse $\kappa = 36 - |\phi|$ olarak alınır. Di\u011fer durumlarda sıfır '0' dır.

Efektif olan yolun uzunlu\u011fu ise

$$L_E = L_R v_{0.01} \text{ km olarak bulunabilir.}$$

\u0130statistiksel olarak yıllık ortalamada %0.01'in \u00fczerindeki ya\u011fmur zayıflamaları ise;

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \text{ dB olarak hesaplanır.}$$

Sonuçta yıllık olarak %0.01'in \u00fczerindeki zayıflamaların a\u015ılması durumundaki zayıflamalar %0.001 ile %5 aralığında a\u015a\u011fıdaki gibi hesaplanabilir.

E\u011fer; $p \geq \%1$ veya $|\phi| \geq 36^\circ$ ise $\beta = 0$;

E\u011fer $p < \%1$ ve $|\phi| < 36^\circ$ ve $\theta \geq 25^\circ$ ise $\beta = -0.005(|\phi| - 36)$ ' dır.

Di\u011fer durumlarda;

$$\beta = -0.005(|\phi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin(\theta)$$

olmak \u00fczere ba\u011flantı b\u00fct\u00e7esinde yer alacak ya\u011fmur zayıflatması a\u015a\u011fıdaki \u015ekilde hesaplanır.

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \text{ dB} \quad (80)$$

Burada p sistem i\u00e7in izin verilen azami kesinti y\u00fczdesidir [62].

1.4.3.2.5. Anten Odaklama Kaybı

Uydu ile haberleşme sırasında, yerdeki anten uydudan maksimum güç alabilecek şekilde yerleştirilir. Fakat uygulamada, kazancın düşmesine neden olabilecek odaklama hatası bulunmaktadır. Kazançtaki bu kayıp anten boyutu, kullanılan takip sistemi ile ilişkilidir. Genellikle 1 dB'nin altında değerlere ulaşabilmektedir [59].

1.4.3.2.6. Kazanç Gürültü Sıcaklığı Oranı (G/T)

Bütün haberleşme sistemlerinde, gürültü sistemin tümünü etkileyen en önemli faktördür. G/T_{dBK} alıcı sistemde ölçülen 'iyilik' faktörü olarak bilinir. G/T , anten kazancının, antendeki toplam sistem sıcaklığına oranı olarak tanımlanır [59].

$$G/T_{dB/K} = Gain_{dB} - 10 \log T_{sistem} \quad (81)$$

G ; sistemin net kazancı,

T ; sistemin gürültü sıcaklığıdır.

Sistemde, G/T 'nin büyük olması sistemin daha iyi olduğunu gösterir.

1.4.3.2.7. Isıl Gürültü

Isıl gürültü, yükteki elektronların rasgele hareketinden kaynaklanan gerilim gürültüsüdür. Uygun yükte sonlandırılmış bir sistemdeki toplam gürültü gücü [59];

$$P_r = k T B \quad (82)$$

ile verilir. Burada;

k : Boltzman sabiti [J/K]

T : Eşdeğer gürültü sıcaklığı [K]

B : Gürültü bant genişliği [Hz]

olarak tanımlanmaktadır.

Görüldüğü gibi, yük, uygun yükle sonlandırılmış alıcıya maksimum gürültü gücünü gönderir. Gürültü gücü, gürültü kaynağının sıcaklığıyla doğru orantılıdır. Alıcının kendi gürültüsü de eklendiğinde, alıcı çıkışındaki toplam gürültü;

$$N_T = (kTB)G + \Delta N \quad (83)$$

olur. Burada;

$(kTB)G$: Alıcı girişindeki güç alıcı kazancı ile çarpıldığında çıkıştaki gürültü gücü

ΔN : Alıcı tarafından sisteme eklenen gürültü gücü

$$\Delta N = kT_e B \quad (84)$$

T_e : Alıcı eşdeğer gürültü sıcaklığı [K]

olarak verilmektedir.

1.4.3.2.8. Sistem Sıcaklığı

Yer istasyonunun gürültü sıcaklığı; alıcı gürültü sıcaklığı ve antenin gürültü sıcaklığından oluşur. Burada antenin gürültü sıcaklığına, besleyiciden, dalga kılavuzlarından ve antende toplanan uzay gürültüleri de dâhildir [57].

$$T_{\text{sistem}} = \frac{T_{\text{anten}}}{L} + \left(1 - \frac{1}{L}\right) T_o + T_e \quad (85)$$

L : besleyici kazancı sayısal değeri

T_e : alıcı eşdeğer gürültü sıcaklığı

T_o : ortam sıcaklığı [K]

T_{anten} : anten eşdeğer gürültü sıcaklığı, üretici firma tarafından verilir.

(85) eşitliğinden de görüldüğü gibi dalga kılavuzu kayıpları sistem gürültü sıcaklığı üzerinde kayda değer etki gösterir. Örneğin anten ile alıcı arasındaki 0.3 dB'lik bir kayıp, sistem gürültü sıcaklığında yaklaşık 19K'e karşılık gelir. Bu yüzden besleyici kaybı mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır. Aksi halde, düşük gürültülü anten ve LNA (Low

Noise Amplifier) kullanmanın avantajları ortadan kalkmış olur. Bu yüzden LNA'lar, anten besleme ünitelerine mümkün olduğunca yakın yapılırlar [57].

1.4.3.2.9. İşaret Gürültü Gücü Oranı (C/N)

Bir iletişim bağıının performansını tanımlayan önemli parametrelerden biri de C/N'dir. C/N alıcıdaki taşıyıcı gücün, alıcı sistemdeki toplam gürültü gücüne oranıdır [59].

$$C/N = \frac{P_R}{P_n} \quad (86)$$

$$P_R = G_T P_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \quad (87)$$

$$P_n = k T B \quad (88)$$

buradan da görüldüğü gibi bağlantı bütçesi parametreleri ve alıcının karakteristikleri alıcıdaki C/N'yi etkiler. Buna göre;

$$C/N_{dB} = EIRP_{dB} - L_{FS_{dB}} + G/T_{dB/K} - 10 \log k - 10 \log B \quad (89)$$

LFS : serbest uzay kaybı

G/T : alıcının değer faktörü

k : Boltzman sabiti, dB olarak -228.6 dBW/K

B : taşıyıcının kapladığı bant genişliği

Alicının bant genişliği modülasyona bağlı olduğundan, bu parametre kullanılmadan normalize edilmiş C/N_o değeri hesaplanır [63].

$$C/N_o = EIRP_{dB} - L_{FS_{dB}} + G/T_{dB/K} - 10 \log k \quad (90)$$

veya benzer şekilde taşıyıcı gücünün sistem gürültü gücüne oranı;

$$C/N_{dB/K} = EIRP_{dB} - L_{FS_{dB}} + G/T_{dB/K} \quad (91)$$

aydınlatma seviyesi kullanılarak;

$$C/N_{dBK} = W_{dBW/m^2} + G/T_{dB/K} - G1_{m^2_{dBm^2}} \quad (92)$$

burada $G1$ %100 verimle çalışan $1m^2$ yüzey alanlı antenin kazancıdır.

$$G1_{m^2_{dBm^2}} = 20 \log f + 21.4_{dB} \quad (93)$$

f kullanılan frekanstır. C/N_o değeri bit başına düşen enerjinin de hesaplanmasına olanak sağlar.

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C}{N_o_{dBHz}} - 10 \log(\text{bithızı}) \quad (94)$$

1.4.3.2.10. İstasyon-Çeşitleme Kazancı

Yukarıda da bahsedildiği gibi, yüksek frekansta tasarlanan bir Uydu-Yer bağlantısı, yağmur gibi atmosferik olaylara oldukça bağlı olmaktadır. Dolayısıyla iletişimdeki kesintisizliği artırmanın en pratik çözüm yolu; birbirinden uzakta iki farklı istasyon kullanmaktır [64]. İstasyon-çeşitlemesi olarak adlandırılan bu sistem ile istasyonlardan en az biri uydu ile sürekli iletişimde olacak şekilde konumlandırılmaya çalışılır. Bu şekilde bir konumlandırma, bağlantı bütçesinde kazanca neden olmaktadır. Elde edilen bu İstasyon-çeşitlemesi kazancı aşağıdaki gibi hesaplanabilir [60].

d : istasyonlar arası mesafe

A : istasyonun tek başına yağmur zayıflatması

f : kullanılan işaretin frekansı [GHz]

θ : yükselme açısı

ψ : 90 derecen küçük olacak şekilde istasyonlar arasındaki azimut açısı.

Ayrık olmaya bağlı terim;

$$G_d = a(1 - e^{-bd}) \quad (95)$$

Burada;

$$a = 0.78A - 1.94(1 - e^{-0.11A}) \quad (96)$$

$$b = 0.59(1 - e^{-0.1A}) \quad (97)$$

Frekansa bağılı olan terim;

$$G_f = e^{-0.025f} \quad (98)$$

Yükselme açısına bağılı olan kazanç terimi;

$$G_\theta = 1 + 0.006\theta \quad (99)$$

İfadeden temel bağımlı terimin:

$$G_\psi = 1 + 0.002\psi \quad (100)$$

Net istasyon-çeşitleme kazancı;

$$G = G_d \cdot G_f \cdot G_\theta \cdot G_\psi \quad [\text{dB}] \quad (101)$$

olarak hesaplanır.

Buraya kadar olan kısımlarda, optik ve RF bağlantı için gerekli olan temel bileşenler aktarılmıştır. Çalışmada önerilecek sistem iyileştirmeleri ile mevcut kullanılan sistemin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için ise hiç şüphesiz mevcut sistemin bilinmesi gereklidir. Aşağıdaki bölümlerde Göktürk-2 uydusu referans alınarak mevcut sistem performansı kısaca aktarılmıştır.

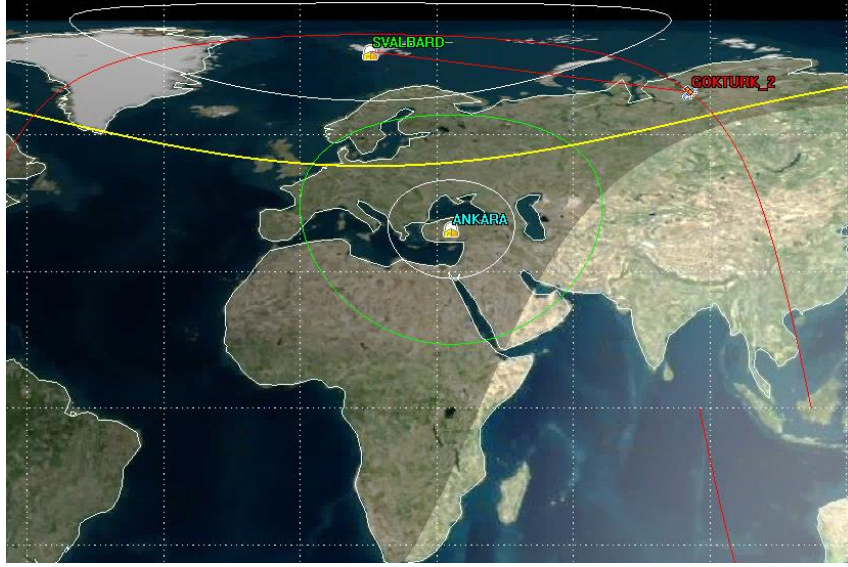
1.5. Mevcut Kullanılan Sistem: Göktürk-2 Uydusu

Hâlihazırda Türkiye'nin sahip olduğu RASAT ve Göktürk-2 uyduları kendileri için tanımlanan görev senaryolarına göre görevlerini sorunsuz yerine getirmektedir. 2012 yılı sonunda uzaya fırlatılan Göktürk-2 uydusunun topladığı veriler Ankara'da bulunan merkezde işlenmektedir [1]. Ankara Ahlatlıbel'de bulunan ana yer kontrol istasyonuna ilaveten, Norveç'in Svalbard şehrindeki yer istasyonuna da uydunun Dünya etrafında her dönüşünde toplanan veriler indirilmekte ve Ankara'ya aktarılmaktadır. Göktürk-2'nin başlıca yörünge ve görev özellikleri Tablo 12'de verilmiştir [65].

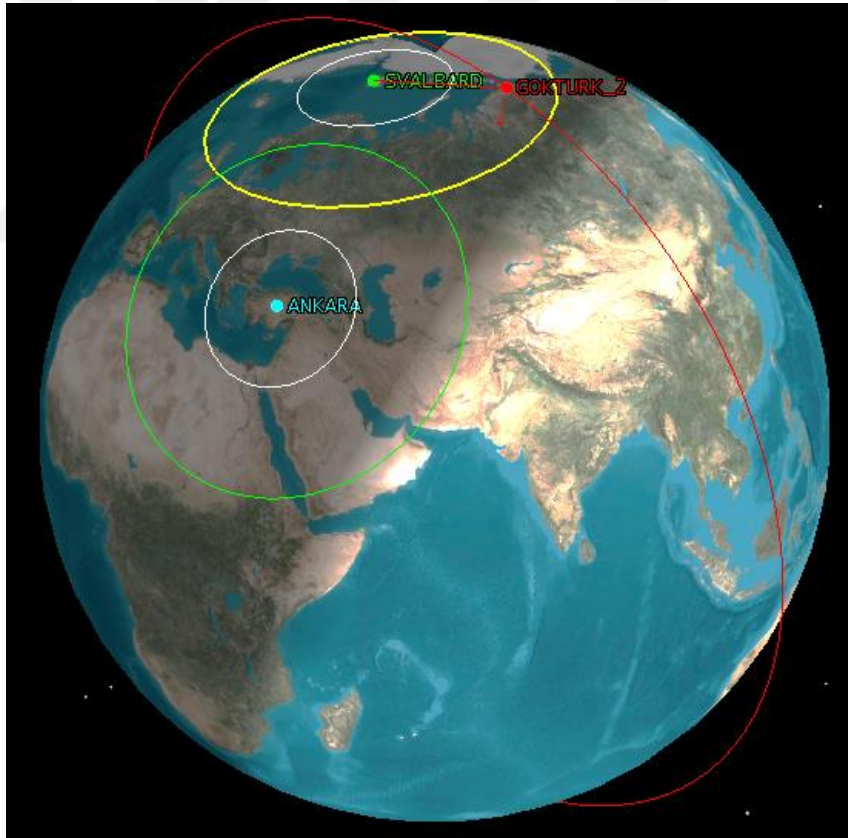
Tablo 12. Göktürk-2 yörünge parametreleri

İrtifa	686 km dairesel, güneşe eş zamanlı
Günlük tur sayısı	14.6245
Tekrar ziyaret periyodu	2.5 gün
Ekvator ile yaptığı açı	98.15 derece
Görüntü çözünürlüğü	2.5 m
1 Kare görüntü alanı	20 km x 20 km
Görüntü indirme hızı	100 Mbps
Görüntü depolama kapasitesi	45 kare (kayıpsız sıkıştırma ile)

Şekil 22 ve Şekil 23 ise kurulu olan sistemi, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak istasyonların kapsama alanları ile birlikte göstermektedir.



Şekil 22. Göktürk-2 yer istasyonları kapsama alanları ve yörüngesi (2 boyutlu)



Şekil 23. Göktürk-2 yer istasyonları kapsama alanları ve yörüngesi (3 boyutlu)

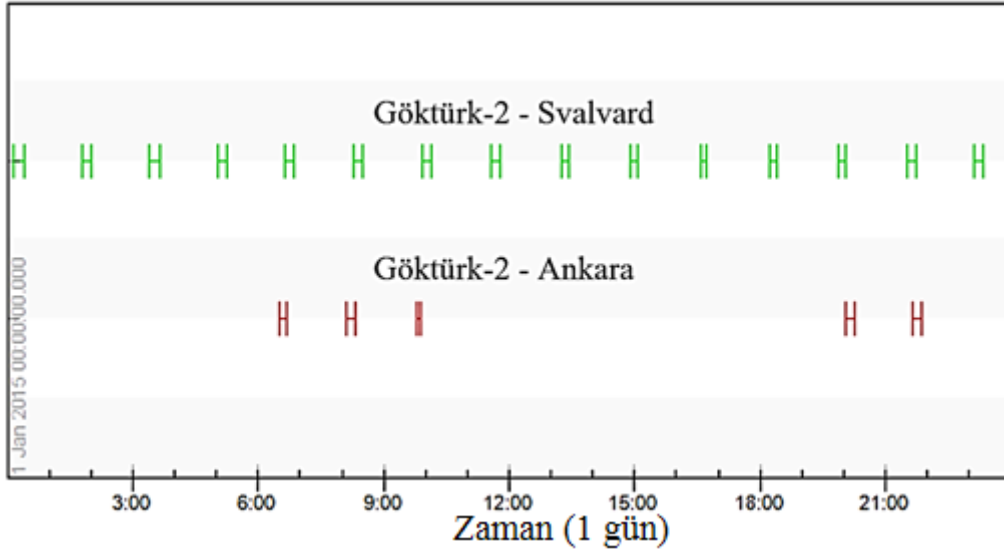
Mevcut sistem ve yörünge parametreleri, AGI firması tarafından STK programı kullanılarak oluşturulmuştur. Tablo 13, Göktürk-2 uydusunun istasyonlara olan erişim sürelerini bir gün örneği için özetlemektedir.

Tablo 13. Göktürk-2 uydusu günlük erişim süreleri örneği

Erişim Bilgileri	Göktürk-2 / Ankara	Göktürk-2 / Norveç	birim
Asgari	7.0	9.0	dakika
Azami	13.6	13.7	dakika
Ortalama	11.4	12.23	dakika
Toplam	56.9	184.4	dakika
Erişim Sayısı	5	15	Gün ⁻¹

Göktürk-2 uydusu yukarıda bahsedilen yer istasyonlarına yaklaşık olarak 2800 km yaklaştığında haberleşme imkânına sahiptir. En uzun geçiş süresi ise yaklaşık 14 dakika sürmekte ve Ankara kapsama alanlarından günde yaklaşık olarak iki kez geçmektedir.

Şekil 24, Göktürk-2'nin istasyonlarına olan günlük erişim sürelerini ve sıklıklarını göstermektedir.



Şekil 24. Göktürk-2 uydusu ile yer istasyonlarına bir günlük erişim örneği

Yukarıdaki açıklamalardan da görüldüğü gibi mevcut durumda Göktürk-2 uydusu Ankara ve/veya Svalbard istasyonları kapsama alanına girdiğinde söz konusu istasyonlara veri göndermeye başlayabilir. Bu erişim süreleri ise günlük toplamda Tablo 13'de görüldüğü gibi Ankara için 1 saatin altında, Svalbard için ise 3 saat kadardır. Uydu, yörüngesi sayesinde ise tüm Dünya kapsamına sahiptir ve tüm Dünya üzerinden veri toplayabilir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Yapılan çalışmada, yere yakın yörüngede faaliyet gösterecek bir LEO uydunun topladığı verilerin yere göre durağan bir GEO uydu kullanılarak hedef yer istasyonuna/istasyonlarına ulaştırılması, bütün bir sistem olarak ele alınmış ve bu sistemin tasarım parametrelerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu iyileştirmeler temelde iki kısımda araştırılmıştır. Bunlar;

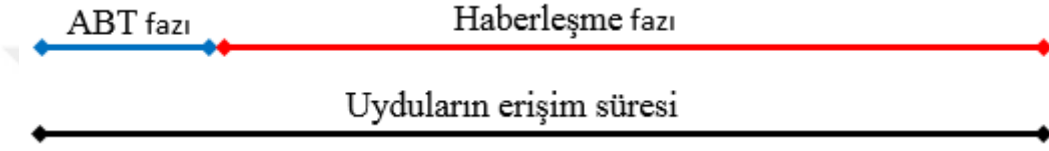
- (1) LEO ile GEO arasında, LEO uydudan GEO uyduya doğru olan optik bağlantı,
- (2) GEO ile Yer arasında, GEO uydudan Yer istasyonu/istasyonlarına olan RF bağlantı,

Görülen sorunlar ve önerilen çözümler ise aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- LEO uydu kullanıcıları hiç şüphesiz toplanan verilere en kısa zamanda ulaşmak isterler. Verilere ulaşırken de bu verilerin mümkün olduğunca başka kullanıcıların eline geçmeksizin ve güvenli bir şekilde alınması gerekecektir. İstenilen bir yeryüzü kesimi için veri toplama periyodunun artırılmasının da, gerek askeri gerekse doğal afet ve kamu hizmetleri gibi uygulamalar için fayda sağlayacağı açıktır. Göktürk-2 gibi genel olarak kullanılan LEO uydularının yörüngesi tüm Dünya kapsamını hedef almakla birlikte özel koşullar için zaman zaman yetersiz kalabilmektedir. Yapılan çalışmanın ilk kısmında öncelikle Türkiye odaklı bir hedef coğrafi alan belirlenmiştir. Daha sonra, üzerinden daha fazla veri almak maksadıyla seçilen bu örnek Türkiye bölgesi için en uygun LEO uydu yörüngesi önerilmiş ve çalışmanın diğer adımlarında bu LEO uydu yörüngesi kullanılmıştır. Yapılan bu iyileştirme ile örnek Türkiye alanı için yıllık veri toplama miktarı Göktürk-2 uydusu ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, hedef bölgeye odaklı bir LEO yörünge seçimi ile bu bölge üzerinden daha fazla verinin toplanabileceği gösterilmiştir.
- Sistemde GEO uydu, LEO uydunun gönderdiği verileri optik kanal ile alacaktır. Dolayısıyla optik işaretin GEO uyduyu oldukça hassas bir şekilde bulması gerekmektedir. Ancak, uydular üzerinde sürekli hesaplanan yörüngede herhangi bir hata olması durumunda GEO uydu, olması gereken yerden farklı yerde olabilir. Bir GEO uydunun yörüngesinde ne kadar hatalı bulunabileceğini anlamak için TÜRKSAT-

3A gerçek verileri kullanılarak 2010 yılı için bir çalışma yapılmış ve ikinci bölümde aktarılmıştır.

- Sistemin tasarımı gereği, LEO uydunun topladığı verileri GEO uyduya kısıtlı bir zaman içerisinde aktarması gerekmektedir. Veri yükünün fazla olması nedeniyle bu kısımda optik iletişim önerilmiştir. Öte yandan, optik iletişimde anten hüzmelerinin dar olması nedeniyle, haberleşme fazına başlamadan önce uyduların birbirine arama-bulma fazında (ABT) kilitlenmesi gerekmektedir. Ancak bu arama-bulma fazı sorunsuz tamamlandıktan sonra haberleşme fazına geçilebilmektedir.



Şekil 25. Örnek bir erişimde optik haberleşme fazları

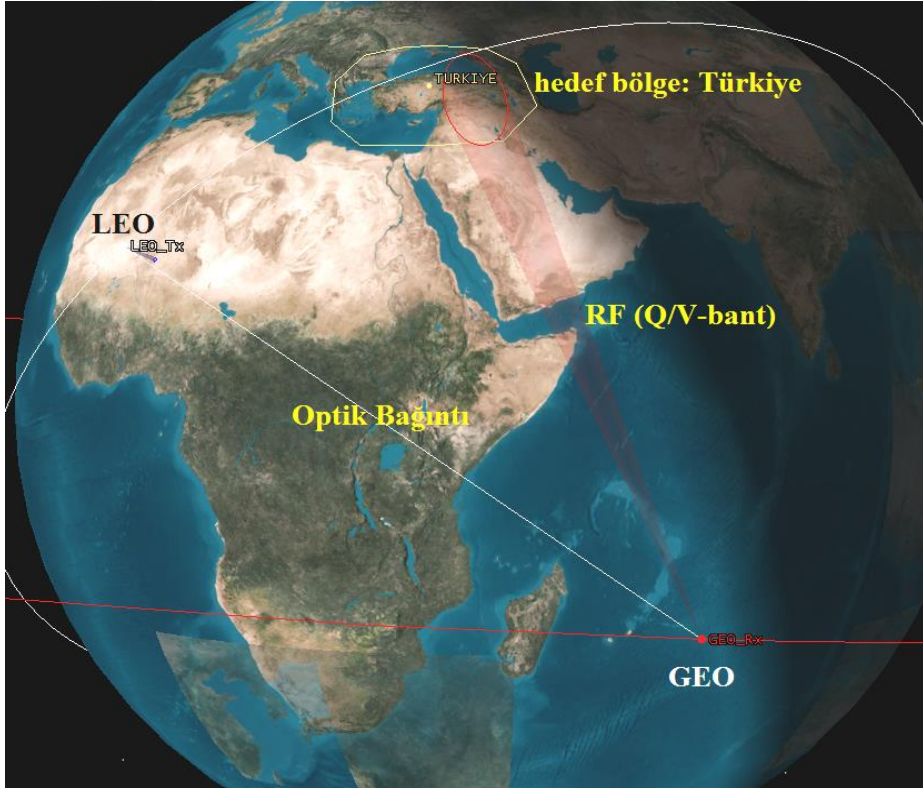
Şekil 25'te gösterildiği gibi ABT fazının erken tamamlanması haberleşme fazına daha erken başlanmasını sağlamakta ve ilgili erişim süresi içerisinde iletebilecek veri miktarını artırmaktadır. Çalışmanın üçüncü kısmında arama-bulma fazının daha hızlı tamamlanması için geliştirilen yöntem anlatılmıştır.

- GEO uydu, LEO uydudan aldığı verileri zaman kaybetmeksizin ilgili yer istasyonuna/istasyonlarına anahtarlmalıdır. Bu bağlantıda kullanılan veri hızı, en az LEO-GEO optik haberleşme veri hızı kadar olmalıdır. Zira sistemin veri hızını en düşük hız bileşeni belirleyecektir. GEO'dan Yer istasyonuna olan böyle bağlantıda veri hızını artırmak ise geniş bir haberleşme bandı gerektirmektedir. Ancak yaygın olarak kullanılan Ku ve giderek yaygınlaşan Ka uydu haberleşme bantlarında doluluk oranı oldukça yüksektir. Bu nedenle, gerekli bant genişliğini bulmak amacıyla Q/V-bant gibi daha yüksek frekans bantlarına yönelim gerekmektedir. Ancak, bilindiği gibi 10 GHz üzerindeki frekanslar yağmur zayıflatmasına daha fazla maruz kalmaktadır ve bağlantı bütçesi için bu zayıflatmaların hesaba katılması gerekmektedir. Öte yandan, söz konusu sistem tasarımı uyarınca, verinin gecikmesi ve kaybolmasının asgariye indirgenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, yağmur zayıflatmasının etkisini en aza indirmek için en az iki farklı yer istasyonu kurulması çalışmada önerilmiştir. Bu durumda ise ortaya çıkan sorun, yer istasyonlarının seçiminin nasıl, hangi kısıtlara göre olacağı ve bu

istasyonların maliyetlerinin de en aza indirgenmesi olmaktadır. Çalışmanın dördüncü kısmında en uygun yer istasyonlarının konumlarının seçimi amacıyla geliştirilen yöntem ve Türkiye için uygulama örneği verilmiştir. Bu kısımda yer istasyonlarının konumları seçilirken bu istasyonların aynı zamanda GEO uyduların kontrolü için de kullanılması planlanmış ve uydunun kontrolü için gerekli maliyet oldukça azaltılabilmektedir.

- Çalışmanın bir diğer bölümünde ise GEO uyduların kontrolü düşünülmesinin daha geniş bir kapsama alanı için istasyon-çeşitlemesi uygulanması durumunda en uygun şehirlerin seçilmesine pratik bir çözüm aranmıştır. Bu amaçla iklim sınıflandırılmasının da kullanılabileceği sayısal veriler ile desteklenerek gösterilmiştir.
- Çalışmanın son kısmında ise tüm sistemin çalışması modellenmiş ve basit bir titreşim modeli ile benzetim sonuçları sunulmuştur. Genelde, özellikle haberleşme bağlantısı tasarımcıları için bu modelin faydalı olması hedeflenmiştir. Benzetim sonuçları, teorik hesaplama sonuçları ile karşılaştırılmış ve oldukça yakın sonuçlara ulaşılmıştır.

Üzerinde çalışılan sistemin genel görüntüsü Şekil 26’da ölçeksiz olarak gösterilmiştir.



Şekil 26. LEO-GEO uydular arası iletişim senaryosu: Türkiye örneği (ölçeksiz)

2.2. Türkiye Hedef Kapsama Alanı Seçimi

Daha önce de bahsedildiği gibi, LEO uyduların yörüngesi ihtiyaç duyulan hizmete göre seçilebilir. Kutup bölgesindeki bir veriye/görüntüye veya tüm Dünya kapsamına ihtiyaç duymayan bir LEO uydu ise daha düşük yörünge eğikliğine sahip bir yörüngeye yerleştirilebilir ve istenilen hedef bir bölge üzerinden toplam geçiş süresi artırılmaya çalışılabilir.

Özellikle güvenlik ve askeri nedenlerle sadece söz konusu ülke ihtiyaçları için bir hedef bölge de seçilebilir. Çalışma kapsamında, Şekil 27’de gösterildiği gibi Türkiye odaklı bir kapsama alanı seçilmiştir. Bu kapsama alanı seçilirken Türkiye etrafındaki karasuları, Ortadoğu ve yakın komşular da dikkate alınmıştır. Şüphesiz, seçilen bu hedef bölgenin dışında kalan alanlar için de veri toplanabilecektir. Amaç, seçilen bu bölgeden toplanabilecek veriyi artırmaktır.



Şekil 27. Türkiye merkezli seçilen örnek bir hedef bölge

Bu çalışma için seçilen hedef bölge, gerekli ihtiyaca göre değiştirilebilir, genişletilebilir veya daraltılabilir. Yapılabilecek bu gibi değişiklikler, LEO uydu yörünge ve/veya sistem parametrelerinde de az veya çok bir değişikliğe neden olacaktır. Dolayısıyla herhangi bir değişiklik yapılması durumunda yeni kapsama alanı için en uygun LEO uydu yeniden seçilmelidir. Çalışma için seçilen bu bölgenin köşe koordinatları Ek-2’de verilmiştir.

2.3. Türkiye İçin En Uygun LEO Yörüngesinin Belirlenmesi

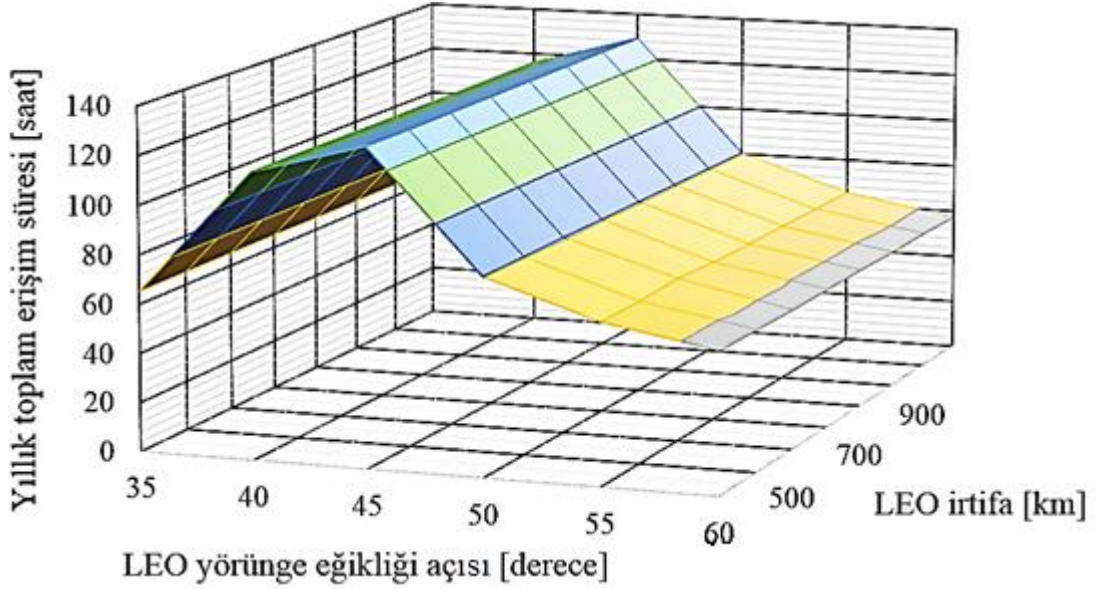
Çalışmanın bu kısmında Bölüm 2.2’de seçilen hedef bölge için, değişik LEO yörünge senaryoları değerlendirilmiş ve bu hedef kapsama alanından en fazla görüntü alma imkânına sahip LEO uydu yörüngesine ulaşılmıştır. Bahsedildiği gibi, farklı bir coğrafya alanı seçilmesi durumunda da benzer bir kapsama alanı tanımlanıp LEO uydu yörüngesi belirlenebilir.

Bölüm 1.4.2.1’de de anlatıldığı gibi, uyduların konumlarını belirlemek için Kepler Parametreleri kullanılmaktadır. Toplam 6 adet parametrenin belirli bir tarih ve zaman için bilinmesi durumunda, ileriye dönük olarak uydunun yörüngesi hesaplanabilir. LEO uydular için ise yörüngelerini belirleyen en önemli iki yörünge parametresi; yerden olan irtifası ve ekvator düzlemi ile yörünge düzlemi arasındaki açı olarak tanımlanabilir.

Bilindiği gibi Türkiye, etrafındaki ülkeler ve denizlerle birlikte oldukça stratejik bir konuma sahiptir [3]. Bu nedenle hedef bölgenin seçimi ülke sınırlarının dışını da kapsayacak şekilde yapılmıştır.

Bahsedilen Türkiye hedefli kapsama alanından, toplamsal olarak azami görüntü alabilecek şekilde LEO uydunun irtifası ve yörünge eğikliği açısı değiştirilerek analizler yapılmıştır. AGI firması tarafından geliştirilen STK programı ile yapılan bu analizler sonucunda, uydu yörüngesinin ekvator düzlemi ile yaptığı yörünge eğikliği (inclination (i)) parametresinin söz konusu süre üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür. Uydunun irtifası, yörünge eğikliğine göre daha az etkili olmakla birlikte bu parametrenin seçilmesi görüntü çözünürlüğü gibi diğer etkilere bağlı olarak değişecektir. Şekil 28, Şekil 27’de, seçilen kapsama alanı için LEO uydu yörünge parametreleri ile yıllık toplam erişim süresi (diğer bir deyişle yıllık toplam görüntü alma süresi) arasındaki bağlantıyı göstermektedir.

Bu bölümde yapılan analizlerde LEO uydunun görüntü alanı Göktürk-2 uydusunda olduğu gibi 20 km x 20 km olarak kabul edilmiştir. Bu amaçla Göktürk-2 sensör hüzmesi STK programı senaryosu için 1.67° x 1.67°, LEO uydu sensör hüzmesi ise 2.29° x 2.29° olarak girilmiştir.



Şekil 28. Toplam erişim süresi, LEO uydu yörünge eğikliği ve irtifası ile değişimi

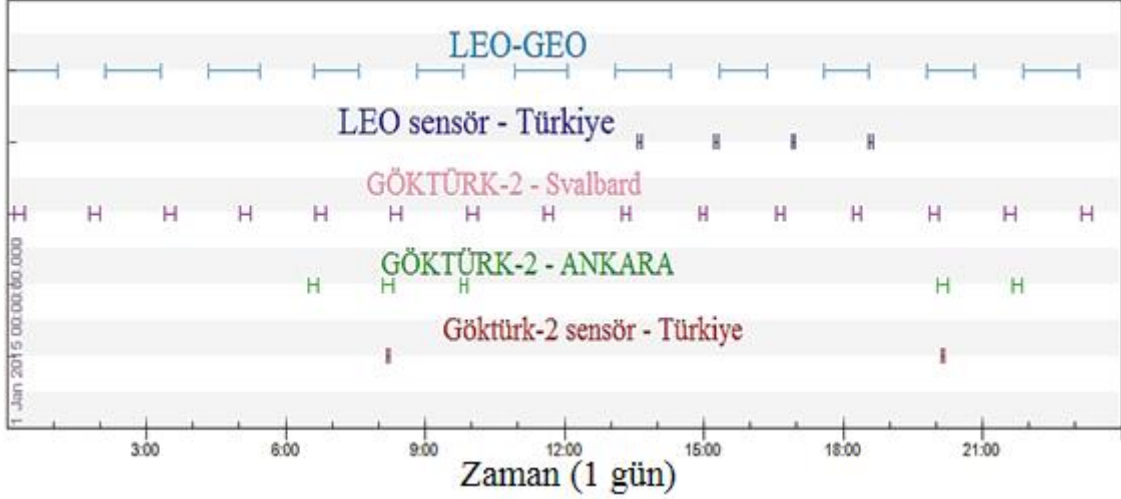
Şekilden de görüldüğü gibi, 45 derece eğimli ve 500 km irtifadaki bir LEO uydu belirlenen hedef bölge için oldukça kullanışlı olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, bahsedilen yörüngede bulunan bir LEO uydu kullanılacaktır. Çalışma içerisinde “LEO uydu” denildiğinde de bu seçilen uydu kastedilecektir. Öte yandan şunu da belirtmek gerekir ki, 45 derece eğimli yörüngede bulunan bir LEO uydu, Kuzey yarımkürede 45 derece enlemden daha kuzeyi, Güney yarımkürede ise 45 derece enlemden daha güneyi izleyemeyecektir. Dolayısıyla tüm Dünya kapsamından yapılan fedakârlık, istenilen hedef bölgedeki toplam izleme süresinde artışı beraberinde getirecektir [66].

Bahsedildiği gibi Göktürk-2 uydusu, 98 derece eğimli bir yörüngede yerleşmiştir. Yapılan analizler sonucunda Şekil 27’de belirlenen kapsama alanından yıllık toplamda yaklaşık 47 saatten az görüntü alınabileceği hesaplanmıştır. Öte yandan 45 derece eğim ve 500 km irtifadaki örnek bir LEO uydu, aynı kapsama alanını toplamda 134.46 saat/yıl olacak şekilde izleme imkânına sahip olacaktır.

Bu sonuca göre, belirlenen Türkiye kapsama alanı hedefi için önerilen LEO uydu, yıllık toplam erişim süresinde Göktürk-2 uydusuna kıyasla yaklaşık olarak %188.48 artış sağlamaktadır.

Göktürk-2 uydusunun kendisi için tanımlanan yer istasyonları ile iletişim kurabileceği zaman dilimleri ile bu kısımda belirlenen LEO uydu ile Ankara ve örnek bir GEO uyduyu görme aralıkları aşağıda verilmiştir. Bu örnek GEO uydu 31° Doğu boylamında kabul edilmiştir. Diğer boylamlar için LEO-GEO arası erişim sürelerinde ihmal edilebilecek kadar

fark olurken erişim zamanları farklılık gösterebilecektir. Şekil 29’da, aynı zamanda LEO uydu algılayıcısı (LEO_sensör Türkiye) ile Göktürk-2 uydusu algılayıcısı (Göktürk-2 sensör – Türkiye) için Türkiye hedef bölgesi üzerinden görüntü alma süreleri gösterilmiştir.



Şekil 29. LEO ve Göktürk-2 uydularının karşılaştırılması

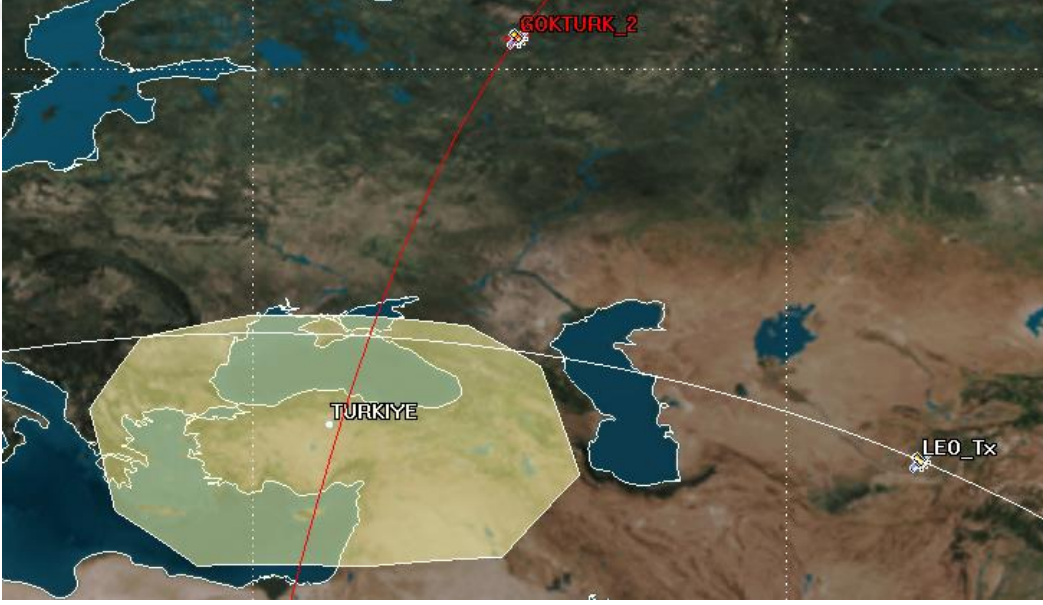
Şekil 29’dan da görüldüğü gibi çalışma kapsamında önerilen LEO uydu, Göktürk-2 uydusuna kıyasla Türkiye hedef bölgesinden daha sık ve günlük olarak daha fazla veri toplayabilmektedir. Benzer şekilde LEO uydu, GEO uydu ile gün içerisinde daha uzun haberleşme imkânına sahiptir. Tablo 14, yukarıdaki şekilde verilen sonuçları, bir yıllık örnek için rakamsal olarak ifade etmektedir.

Tablo 14. GÖKTÜRK-2 ile önerilen LEO uydunun karşılaştırılmaları

01.01.2015 00:00 GMT – 01.01.2016 00:00 GMT	GÖKTÜRK-2	LEO
Türkiye bölgesi üzerinden görüntü alma [SAAT x YIL ⁻¹]	46.611	134.466
Alınan görüntülerin ana istasyona ulaşması [SAAT x YIL ⁻¹]	Ankara: 369.561 Svalbard:1102.015 Toplam: 1471.576	GEO ile:5154.504 Ankara: 439.761 Toplam:5594.265

Tablo 14’te verilen sonuçlar da teyit etmektedir ki, önerilen Türkiye hedef bölgesi için en uygun LEO uydunun kullanılması durumunda ilgili bölge üzerinden daha sık ve uzun dönem toplamında daha fazla veri alınabilmektedir. Ayrıca, GEO uydu ile LEO uydunun yıllık toplamsal erişim süresi Göktürk-2 uydusu ile kıyaslandığında yaklaşık 4 kat daha fazla artış imkânı getirmektedir.

Öte yandan Türkiye’nin Dünya üzerindeki konumu Doğu-Batı yönünde daha geniş olması nedeniyle önerilen LEO uydu Türkiye hedef bölgesi üzerinden daha uzun geçiş süresine ve veri toplama şansına sahip olmaktadır. Örneğin, Şekil 30’daki gösterimde LEO uydu Türkiye hedef bölgesinden Göktürk-2’ye göre 20 saniye daha uzun geçiş yapmaktadır.



Şekil 30. Göktürk-2 ve önerilen LEO uydunun Türkiye üzerinden geçiş yörüngeleri

2.4. Bir GEO Uydunun Yörüngesi İçin Hata Analizi

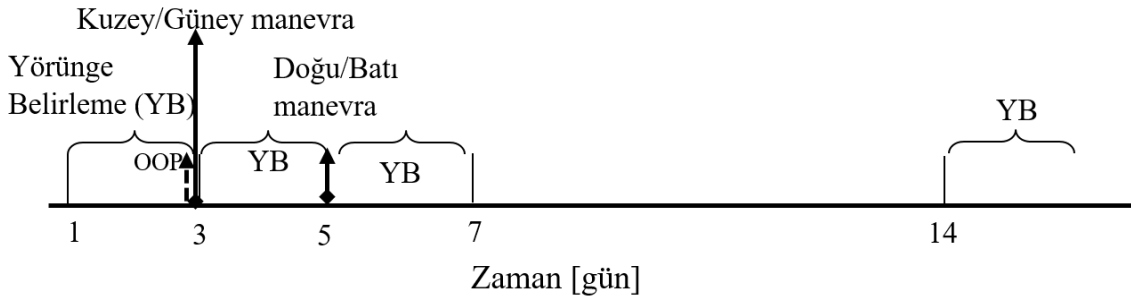
Uzayda bulunan tüm cisimler gibi uydular da yörüngelerini bozan birçok kuvvete maruz kalmaktadırlar. Uydular, kendilerine etkiyen bozucu kuvvet nedeniyle, kendileri için belirlenen yörüngeden sapma eğilimi gösterirler. Öte yandan, günümüz teknolojisinde GEO uydular, üzerlerinde bulunan bilgisayar vasıtasıyla tüm donanımların aktivitelerini izleme ve kontrol etmenin yanı sıra, uzayda bulunduğu konumu da belli bir hassasiyetle hesaplayabilme kapasitesine sahiptirler. Bu kabiliyet, hem uydu üreticileri arasında hem de aynı üretici için farklı uydu platformlarında farklılık gösterebilmektedir.

Daha önce de aktarıldığı gibi, üzerinde çalışılan bu sistemde LEO uydu, optik iletişime başlamak için GEO uydunun bulunduğu konuma odaklanmaktadır. Dolayısıyla, GEO uydu yerinin tam olarak bilinmesi, LEO uydu ile aralarındaki haberleşmenin başlaması için son derece önemlidir. İdealde, GEO uydunun yeri hatasız biliniyorsa, ABT fazı zaman kaybetmeksizin tamamlanıp doğrudan haberleşme fazına geçilebilir. Bu yüzden GEO uydunun kendi hesapladığı yörüngesindeki hatanın ne kadar olduğunu bilmek son derece önemlidir. Öte yandan, günümüzde LEO uydular uzaydaki konumlarını üzerlerindeki GPS (Global Positioning System) alıcılar sayesinde, hassas bir şekilde bilebilmektedir [67], [68].

Çalışmanın bu kısmında, uzaydaki bir GEO uydunun yörüngesindeki hatanın ne kadar olabileceği üzerinde durulmuş ve gerçek verilerle inceleme yapılmıştır. Bu amaçla, TÜRKSAT-3A uydusu üzerinde koşan yörünge programı sonuçları ile yerde periyodik olarak hesaplanan yörünge sonuçları 2010 yılı için kıyaslanmış ve uydunun yörüngesindeki muhtemel hatalar araştırılmıştır.

2.4.1. TÜRKSAT-3A Örneği

TÜRKSAT-3A uydusu Fransız Thales Alenia Space (TAS) firması tarafından SB4000 platformunda üretilmiş ve 2008 yılında uzaya gönderilmiştir. Uydu, gönderildiği tarihten itibaren 42° derece doğu boylamında sorunsuz olarak operasyonel hayatına devam etmektedir. TÜRKSAT-3A'nın konum kontrol stratejisi Şekil 31'de gösterildiği gibi, 2 haftalık çevrimler halinde Kuzey-Güney ve sonrasında Doğu-Batı manevraları şeklindedir. Uydu üzerinde koşan yörünge yazılımı üzerindeki hesaplama ve yuvarlama hataları zaman içinde artmakta ve yenileri ile güncellenmeleri gerekmektedir. Bu nedenle TÜRKSAT-3A uydusu için her Kuzey-Güney manevrası öncesinde yerde hesaplanan yörünge parametreleri uçuş bilgisayarına yüklenmekte ve uydu üzerindeki yazılım bu zamandan itibaren daha yeni ve daha doğru yörünge ile ileri tarihli yörüngeyi gerçek zamanlı olarak sürekli hesaplamaktadır. Şekil 31, yörünge belirleme (YB) için yapılan 48 saatlik ölçümleri, OOP (On-Orbit Propagator Update: uydu üzerinde koşan yörünge parametrelerinin ilk değerlerinin güncellenmesi) uydu yörüngesindeki güncellemeleri, Kuzey/Güney ve Doğu/Batı manevralarını göstermektedir.



Şekil 31. GEO uydu yörünge kontrol çevrimi

Bahsedildiği gibi, GEO uydunun konumunun LEO uydu tarafından hassas bilinmesi, LEO uydunun GEO uyduyu bulma fazını önemli ölçüde azaltacaktır. Şekil 25’te basitçe gösterildiği gibi daha uzun bir arama-bulma fazı, zaten kısıtlı olan haberleşme süresini daha da azaltacak ve her bir erişim aralığı için toplamda daha az veri GEO uyduya aktarılabilecektir.

Bu tez kapsamında, 2010 yılı için TÜRK SAT-3A uydusu üzerinde koşan yörünge yazılımının hatalarını tespit etmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada yer istasyonunda yörünge belirlemek amacıyla yapılan ölçüm sonuçlarına dayalı yörünge ile uydunun üzerinde koşan yörünge arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Burada hatadan kasıt; uydunun teorik olarak bilinen yeri (uydu üzerinde yüklü olan yörünge) ile gerçek yörüngesi (yerde yeniden ve daha güncel hesaplanan) arasındaki farktır. Çalışmanın sonucunda ulaşılan yörünge parametrelerindeki yıllık hatalar Tablo 15’te özetlenmiştir [69].

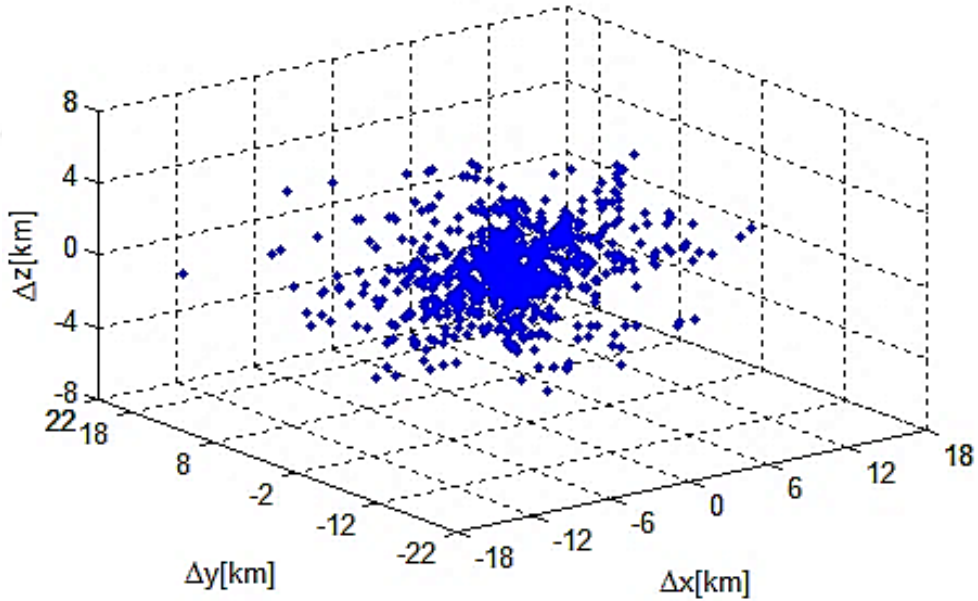
Tablo 15. TÜRK SAT-3A uydu üzerindeki yörünge hesaplama hataları

Parametre	Azami	Asgari	Ortalama	Std. Sapma	Birim
Δa	1.714	0.00144	0.6415	0.399	km
Δi	0.00862	1.59e-07	0.002	0.00192	derece
Δe	3.294e-5	5.55e-09	4.77e-06	5.3e-6	-
$\Delta RAAN$	11.546	9.18e-05	2.0263	2.2452	derece
Δ Gerçek Ayrıklık	4.1619	7.74e-06	0.6219	0.5921	derece
ΔAoP	11.669	1.207e-04	2.18	2.1702	derece
Δx	16.283	5.47e-03	3.1232	2.9645	km
Δy	27.38	1.13e-03	2.888	2.6346	km
Δz	6.2129	6.75e-03	1.5243	1.22	km
ΔV_x	1.5617	5.80e-05	0.21327	0.195	m/s
ΔV_y	1.1834	2.258e-04	0.2172	0.2165	m/s
ΔV_z	0.6775	3.284e-05	0.125	0.141	m/s
Δ Konum	21.756	1.43e-01	5.166	3.307	km

Tabloda, konumda olabilecek en kötü hata, her eksendeki hataların geometrik toplamı şeklinde olacaktır.

$$\Delta\text{Konum} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (102)$$

Tablo 15’te gösterildiği gibi uzaydaki konum hatasının yıllık ortalaması 5.116 km olurken standart sapması 3.307 km olarak bulunmuştur. Yıllık olarak bu hatanın, %0.266’sı 20 km’nin üzerinde, %0.532’sinin 15 km ile 20 km arasında, %9.587’sinin ise 10 km ile 15 km arasında ve %89.61’inin ise 10 km’nin altında olduğu görülmüştür [69]. Uyduların birbirlerine göre konumları uzayda sürekli değişkenlik göstereceğinden GEO uydunun yörünge doğruluğunu tanımlamak için (100) eşitliğinde verilen ‘ ΔKonum ’un kullanılması daha tedbirli olacaktır. Şekil 32, 2010 yılı için TÜRKSAT-3A GEO uydusunun konumundaki hataları göstermektedir.



Şekil 32. TÜRKSAT-3A (GEO) yörünge hataları (2010 yılı için)

2.4.2. LEO-GEO Arasındaki Bağlantıda Doppler Etkisi

Bilindiği gibi alıcı ile vericinin göreceli hızları kullanılan haberleşme sinyalinde Doppler etkisine neden olmaktadır. Bu etki göreceli hız ile doğru, kullanılan işaretin dalga

boyu ile ters orantılıdır. LEO ile GEO uydular arasındaki optik haberleşmede de bu olay geçerlidir. f_d , Doppler kayması olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilebilir [70].

$$f_d = \pm \frac{v}{\lambda}$$

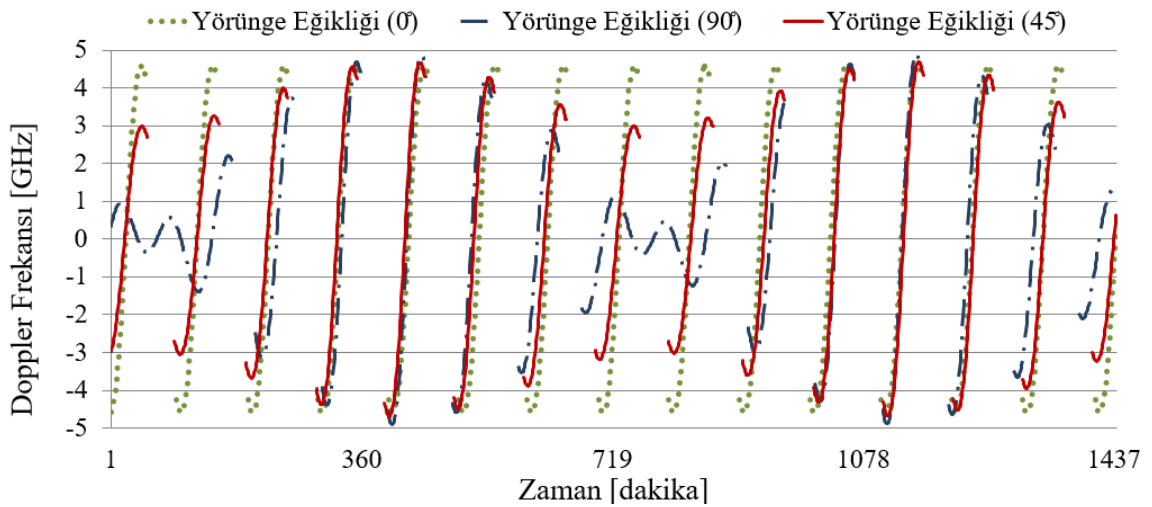
Burada

v : LEO ve GEO uyduların birbirlerine göre göreceli hızları,

λ : kullanılan lazerin dalga boyudur.

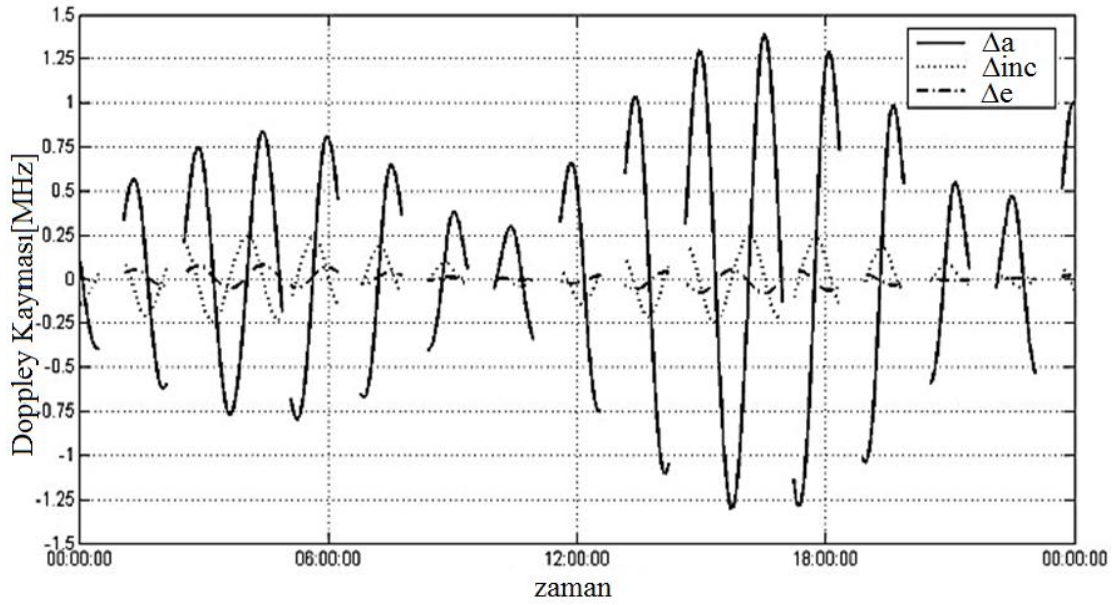
Lazerin dalga boyunun oldukça küçük olması nedeniyle söz konusu Doppler kayması RF'ten daha da fazladır. Şekil 33, ekvator düzleminde, kutup düzleminde (90 derece yörünge eğikliği) ve 45 derece yörünge eğikliğinde 1550 nm dalga boyundaki bir lazer ile haberleşen LEO-GEO arası bağlantı için görülebilecek Doppler kaymalarını bir gün için göstermektedir.

Kesintinin olduğu yerler uyduların birbirlerini görmediği ve haberleşmenin olmadığı zamanlardır. Haberleşmenin başladığı ve bittiği yerlerde ise Doppler kayması pozitif veya negatif olarak en büyük değerine ulaşmaktadır. LEO uydu Dünyanın arkasında kaybolmadan önce GEO uyduya göre göreceli hızı değiştiğinden Doppler etkisi de bir miktar değişmektedir.

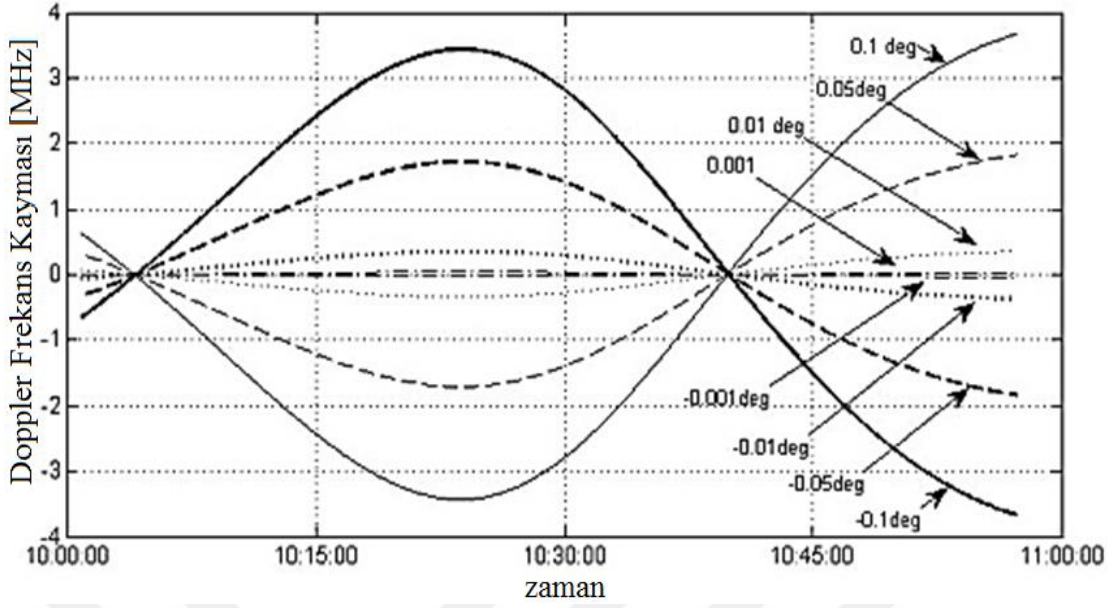


Şekil 33. Optik bağlantı için örnek Doppler kaymaları

Şekilden de görüldüğü gibi haberleşme sırasında Doppler kayması, optik haberleşme frekansına (dalga boyuna) bağlı olarak değişmekle birlikte, verilen örnekler için 5 GHz'e kadar ulaşabilmektedir. Dolayısıyla tasarlanması gereken alıcının bu frekans kaymasını tolere edebilecek şekilde olması gerekmektedir. Öte yandan, önceki bölümde bahsedilen GEO uydunun yörüngesindeki hatalar, az bir miktar da olsa, bu kaymaların hesaplanan değerlerden sapmasına neden olacaktır [71]. Tablo 15'teki TÜRKSAT-3A bir yıllık yörünge parametrelerindeki hatalara bağlı olarak görülen Doppler kaymasındaki hatalar Şekil 34 ve Şekil 35'te verildiği gibi analiz edilmiştir. Şekil 34, bir günlük erişim örnekleri için sonuçları içerirken, Şekil 35, bir günlük erişimler içerisinde en kötü durum ele alınarak görselleştirilmiştir. Bu şekillerde Δa , Δinc ve Δe sırasıyla, uydunun yarıasal eksen, yörünge düzlemi ile yaptığı açı ve dışmerkezlilik parametrelerindeki hatalardır.



Şekil 34. GEO uydu yörüngesindeki yarıasal eksen, yörünge eğikliği ve dışmerkezlilik hatalarında Doppler hatası



Şekil 35. GEO uydu yörüngesindeki RAAN, AoP ve Gerçek ayrıklık hatalarında Doppler hatası

Bahsedilen bu hatalar genelde oldukça düşük mertebelerde olmasına karşın, tasarlanacak olan sistemin bunu telafi edebilecek şekilde olması gerekmektedir [71]. Örneklerde görülmektedir ki, alıcıdaki olası frekans kilitleme devresinin Doppler kaynaklı beklenen hatalara ilaveten ± 4 MHz daha geniş bir kapasiteye sahip olması gerekmektedir.

2.5. GEO Uydu Yörünge Hatasının Düzeltilmesi ve LEO Uydunun GEO Uyduyu Bulma Süresinin Kısaltılması

Bahsedildiği gibi, GEO uydu üzerine yerleştirilmiş optik alıcı ile LEO uydu üzerine yerleştirilmiş optik verici terminalleri, haberleşmeye başlamadan önce uzayda birbirlerini bulmalı ve kilitlemelidirler. Bu ABT fazının sorunsuz tamamlanması sonrasında gönderilmek istenen veri GEO uyduya aktarılır. Bu işlemden sonra GEO uydu, gelen veriyi RF taşıyıcı ile modüle ederek verinin işlenmesi için tanımlanan yer istasyonlarına aktarabilir.

Esasında, söz konusu ABT fazının hızlı tamamlanabilmesi için hem LEO hem de GEO uydunun uzaydaki konumunun mümkün olduğunca hassas bilinmesi gerekmektedir. LEO uyduların GPS uydularının altında hizmet etmeleri ve üzerlerindeki GPS alıcılar sayesinde kendi yörüngelerini oldukça hassas bilmektedirler [68], [72]. Bu hassasiyet cm seviyelerine kadar sağlanabilmektedir [73], [74], [75], [76].

Ancak, optik hüzmeye genişliğinin nispeten dar olması, ABT işleminin tamamlanmasını zorlaştırmakla birlikte, değişik arama ve tarama yöntemleri de önerilmektedir [77]. Önerilen bu sistemlerin içerisinde, daha önceki bölümlerde bahsedilen spiral tarama yönteminin ise en uygun yöntem olduğu belirtilmektedir [77], [78]. Bu yüzden, çalışmanın bu kısmındaki sonuçları sunarken spiral tarama yöntemi göz önüne alınmıştır.

Bölüm 1.4.1.7.2 içerisinde de aktarıldığı gibi, odaklama hataları içerisinde uydunun yörünge hataları da bulunmaktadır. Bu yörüngedeki hatalarının düzeltilmesi elektro-optik sistemin takip işlevi için önemlidir [79].

LEO uydusu, uzaydaki kendi konumunu oldukça hassas bildiğinden, tek yapması gereken GEO uydunun yerini mümkün olduğunca hızlı tespit etmesidir. GEO uydunun yörüngesinin LEO uydusu üzerinde de sürekli hesaplandığı (yörünge yazılımının sürekli koştuğu) göz önüne alındığında, LEO uydunun, optik işareti GEO uyduya hassas bir şekilde yönlendirmesi gerekmektedir. Bu yönlendirme için LEO uydudan GEO uyduya tanımlı gerekli olan azimut ve elevasyon açıları ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

Azimut:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{(x_{geo} - x_{leo})}{(y_{geo} - y_{leo})} \right] \quad (103)$$

Elevasyon:

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{(z_{geo} - z_{leo})}{\sqrt{(x_{geo} - x_{leo})^2 + (y_{geo} - y_{leo})^2}} \right] \quad (104)$$

Burada x, y, z LEO veya GEO uydunun uzaydaki Kartezyen koordinatlarıdır ve aynı eksen takımına göre hesaplanmaktadır. Kepler parametreleri ile Kartezyen koordinatlar arasındaki dönüşüm Bölüm 1.4.2.1 ve Bölüm 1.4.2.2'de verilmiştir.

Öte yandan, GEO uydunun yörünge parametrelerinin herhangi birindeki hata bu açıların başlangıç değerlerinde de hataya neden olacaktır. Söz konusu olabilecek hatalar oldukça küçük olduğundan, hangi yörünge parametresinin azimut ve elevasyon açılarını nasıl etkilediğini bulmak için aşağıdaki gibi toplamsal türev alınabilir [52].

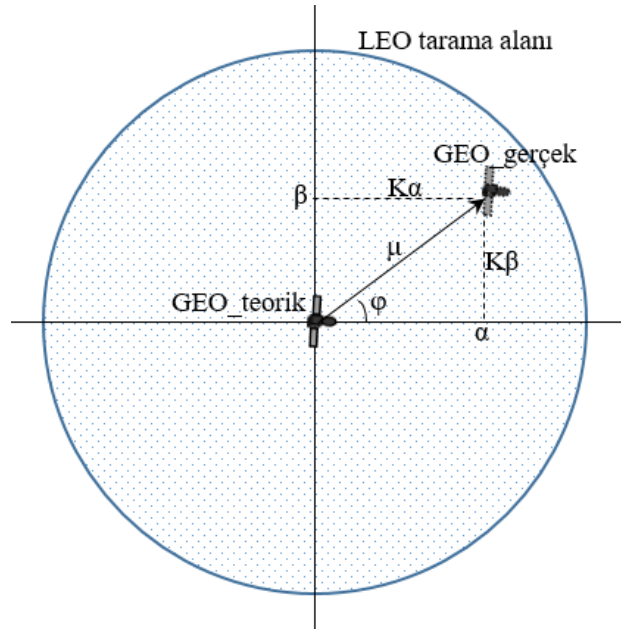
$$(x, y, z, V_x, V_y, V_z)_{leo, geo} = f(a, e, inc, \omega, \Omega, \theta)_{leo, geo} \quad (105)$$

$$\Delta\alpha = \frac{\partial\alpha}{\partial a}\Delta a + \frac{\partial\alpha}{\partial e}\Delta e + \frac{\partial\alpha}{\partial i}\Delta i + \frac{\partial\alpha}{\partial\theta}\Delta\theta + \frac{\partial\alpha}{\partial\omega}\Delta\omega + \frac{\partial\alpha}{\partial\Omega}\Delta\Omega \quad (106)$$

$$\Delta\beta = \frac{\partial\beta}{\partial a}\Delta a + \frac{\partial\beta}{\partial e}\Delta e + \frac{\partial\beta}{\partial i}\Delta i + \frac{\partial\beta}{\partial\theta}\Delta\theta + \frac{\partial\beta}{\partial\omega}\Delta\omega + \frac{\partial\beta}{\partial\Omega}\Delta\Omega \quad (107)$$

Yukarıdaki formüllerdeki $\Delta\alpha$ ve $\Delta\beta$ değerleri, yörünge parametrelerinin her birindeki hatalara bağlı olarak gerçekleşen azimut ve elevasyon açılarındaki hatalardır. Buradaki hatadan maksat, uydu üzerine yüklenmiş yörünge bilgisi (teorik yörünge) ile tarama fazı sonrası gerçekleşen (gerçek yörünge) arasındaki farktır. Ek-3, yukarıdaki formüllerde geçen tüm kısmi türevlerin hesabını içermektedir.

Öte yandan, azimut ve elevasyon açılarına en fazla etki, boylam ve yörünge eğikliğinden kaynaklanmaktadır. Diğer terimler nispeten daha az hataya neden olmaktadır. Sonuçta, yörünge eğikliğindeki hata elevasyonda, boylamdaki hata ise azimutta etkisini daha fazla göstermektedir. Dolayısıyla bu iki parametredeki hataların düzeltilmesi GEO uydunun gerçek konumunun da daha kolay ve hızlı bulunmasına imkân sağlayacaktır. Şekil 36, LEO uydudan bakıldığında GEO uydunun teorik ve gerçek konumlarını göstermektedir. Teorik olarak GEO uydu tarama alanının merkezinde olmalıdır.



Şekil 36. LEO uyduya göre teorik ve gerçek GEO uydu konumları

Bahsedilen bu hata, kutupsal koordinatlarda ‘ ε ’ ile gösterildiğinde, aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir. Burada μ hatanın genliği iken, φ hatanın açısal değeridir.

$$\varepsilon = \mu e^{-j\varphi} \quad (108)$$

Hatanın toplam genliği ise azimut ve elevasyon hatalarının geometrik toplamına eşit olacaktır. Yukarıdaki denklemde geçen hatanın genlik ve açı değerleri aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\mu = \sqrt{K\alpha^2 + K\beta^2} \quad (109)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{K\beta}{K\alpha}\right) \quad (110)$$

Burada $K\alpha$ ve $K\beta$ sırasıyla azimut ve elevasyon hata açılarıdır.

Çalışmanın bu kısmında azimut ve elevasyon açılarındaki hatalardan yola çıkarak GEO uydunun yörüngesindeki muhtemel hataların bulunması amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yöntemle; birinci gün gerçekleşen tarama fazları sonrasında her bir erişim için azimut ve elevasyon hataları bulunmuş ve ikinci gün için GEO uydunun bilinen yörüngesinde düzeltmeler yapılmıştır. Yapılan düzeltmeler sonrası ikinci günden başlayarak GEO uydunun konumu, LEO uydunun tarama alanı merkezine göre 200 μ rad’a hassasiyetle sağlanmıştır.

Bahsedilen GEO yörünge için en büyük etkilere sahip olan boylam ve yörünge eğikliği hataları aşağıdaki gibi bulunabilir [52].

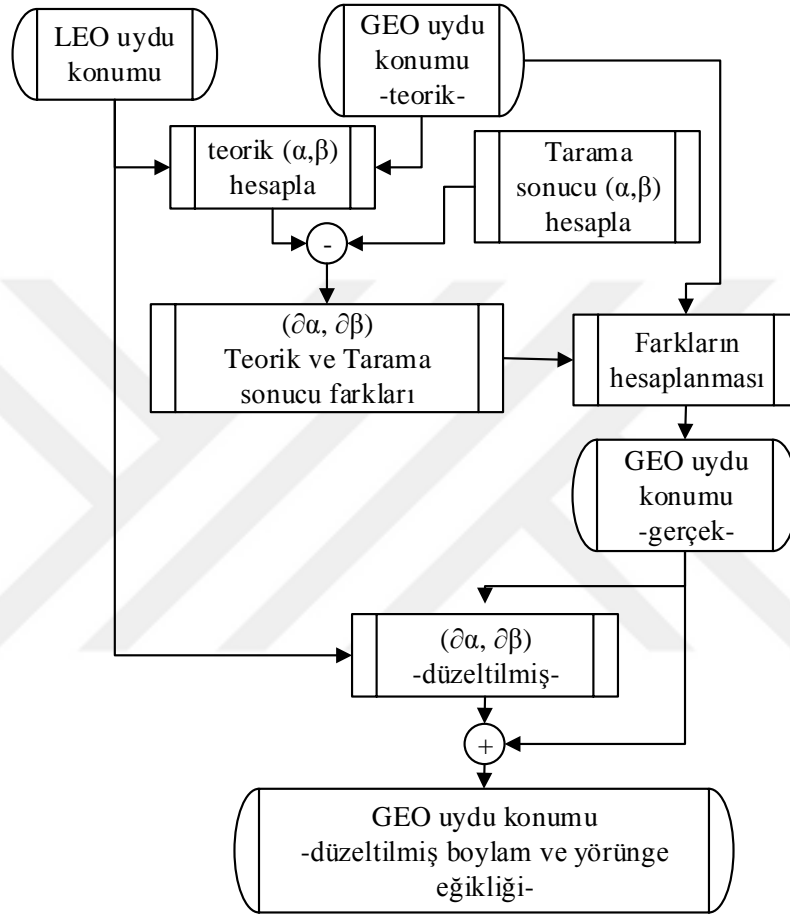
$$\delta_{inc} = \frac{(\mu \cdot \sin(\varphi)_{\min} + \mu \cdot \sin(\varphi)_{\max})}{2} \quad (111)$$

$$\delta L = \text{mean}(\mu \cdot \cos(\varphi)) \quad (112)$$

Burada;

δ_{inc} : GEO uydunun yörünge eğikliğindeki hata,
 δL : GEO uydunun boylamındaki hatadır.

Söz konusu iyileştirmenin nasıl yapıldığı Şekil 37'deki hesaplama akış diyagramı ile de gösterilmektedir.



Şekil 37. GEO uydu yörüngesinin düzeltilme akış diyagramı

Diyagramdan da görüldüğü gibi, birinci gün teorik GEO değerleri kullanılarak tarama yapılmış ve sonuçta, GEO uydunun yörüngesindeki hataya bağlı olarak farklı azimut ve elevasyon açıları bulunmuştur. İlk gün bulunan bu değerler olması gereken (teorik) değerler ile karşılaştırılmış ve ikinci gün GEO uydu boylam ve yörünge eğikliği üzerindeki olası hatalar düzeltilerek bulma fazı gerçekleştirilmiştir [52].

Bu işlem sonunda hatalar bulunduktan sonra ikinci günden başlayarak yeni boylam ve yörünge eğikliği açıları aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$inc_{düzeltilmiş} = inc_{teorik} + \delta inc \quad (113)$$

$$L_{düzeltilmiş} = L_{teorik} + \delta L \quad (114)$$

Yukarıda açıklaması verilen ve çalışma kapsamında geliştirilen yöntemin çalışması yapılan benzetimlerle desteklenmiştir. Sonuçta, hataların düzeltilmesi sonrasında LEO uydu, başlangıç yörüngesinde hataları bulunabilen bir GEO uyduyu daha hızlı bulabilmekte ve haberleşme fazına daha hızlı geçebilmektedir. Böylece her erişim için daha fazla veri GEO uyduya aktarılabilmektedir.

2.5.1. Benzetim Çalışması ve Sonuçları

Önerilen düzeltmenin sağlıklı çalışıp çalışmadığını göstermek için bir seri benzetim yapılmış ve sonuçlar grafikler ile aşağıda aktarılmıştır. Bu benzetimler için LEO uydu yörüngesi daha önce Türkiye için bulunan en uygun yörünge olarak seçilirken GEO uydu için Tablo 16'daki gibi örnek bir yörünge seçilmiştir. Tablo 16, aynı zamanda tarama fazı için kullanılan parametreleri de içermektedir. Öte yandan tablodan da görüldüğü gibi uydunun boylam ve yörünge eğikliği parametreleri dışındaki parametrelere de bir miktar hata eklenerek benzetim programı zorlanmaya çalışılmıştır.

Tablo 16. GEO uydu yörünge parametreleri

Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Tarama çakışma faktörü	η	0.1	-
Sistemin cevap süresi	t	0.001	saniye
GEO yarıasal eksen hatası	Δa	30	m
GEO, yörünge dışmerkezlilik hatası	Δe	3e-6	-
GEO yarıasal eksen	a_{geo}	42165.8	km
GEO dışmerkezlilik	e_{geo}	50e-5	-
GEO yörünge eğim	inc_{geo}	0.06	derece
GEO yükseliş düğümü	Ω_{geo}	280.0	derece
GEO yerberi argümanı	w_{geo}	255.0	derece
GEO Boylam	L_{geo}	31.0	derece
Yörünge zamanı (LEO ve GEO için)	T_o	01.01.2014 00:00	

Aşağıdaki Tablo 17 ise optik bağlantı için ele alınan temel parametreleri göstermektedir. Bu parametreler temelde Sentinel verileri referans alınarak önerilmiştir [23].

Tablo 17. Optik haberleşme parametreleri

Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Optik dalgaboyu	λ	1550	nm
Verici (Tx) optik anten çapı	T _X	16	cm
Alıcı (Rx) optik anten çapı	R _X	16	cm
Verici gücü	P _t	5	W
Alıcı ve vericideki kayıplar	L _{TX} , L _{RX}	1	dB
Veri Hızı	h _f	2000	Mbps
Bağlantı mesafesi	d	45000	km
Alıcı ve Verici verimlilikleri	η_{TX} , η_{RX}	0.65	-

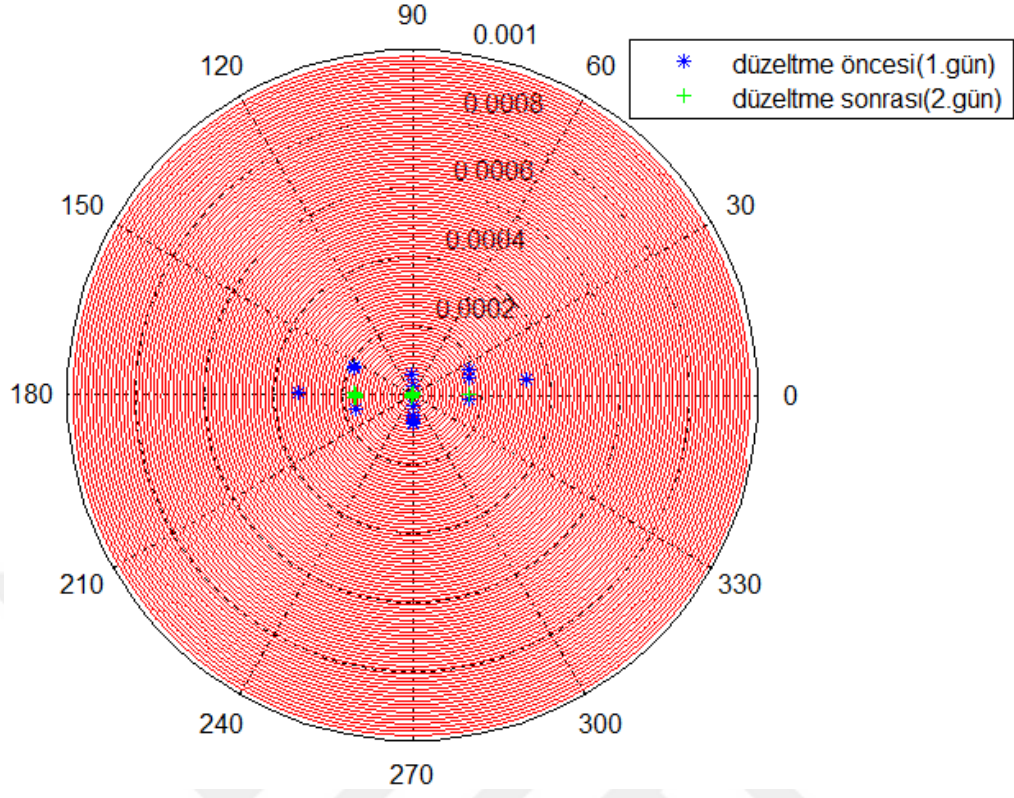
Yukarıda verilen girdiler kullanılarak her bir durum için farklı benzetimler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 18’de özetlenmiştir. Tablonun ilk iki sütunu boylam ve yörünge eğikliği için girilen hataları göstermektedir. Üçüncü sütun, hatalar varken birinci gündeki erişimler için ortalama ABT süresini verirken, dördüncü sütun ikinci günden sonra, GEO uydudaki hatalar düzeltilince, günlük ortalama ABT süresini içermektedir. Düzeltme sonrası bulunan gerçek boylam ve yörünge eğikliği değerleri beş ve altıncı sütunda aktarılmıştır. Bu iki sütundaki değerlerin nominal değerler ile hata değerleri toplamına mümkün olduğunca yakın olması gerekmektedir. Tablonun son sütununda ise ilk iki gün için düzeltme öncesi ve düzeltme sonrası tarama sonuçlarının görselleştirildiği şekil numaraları verilmektedir.

Tablo 18. Simülasyon sonunda ulaşılan iyileştirmeler

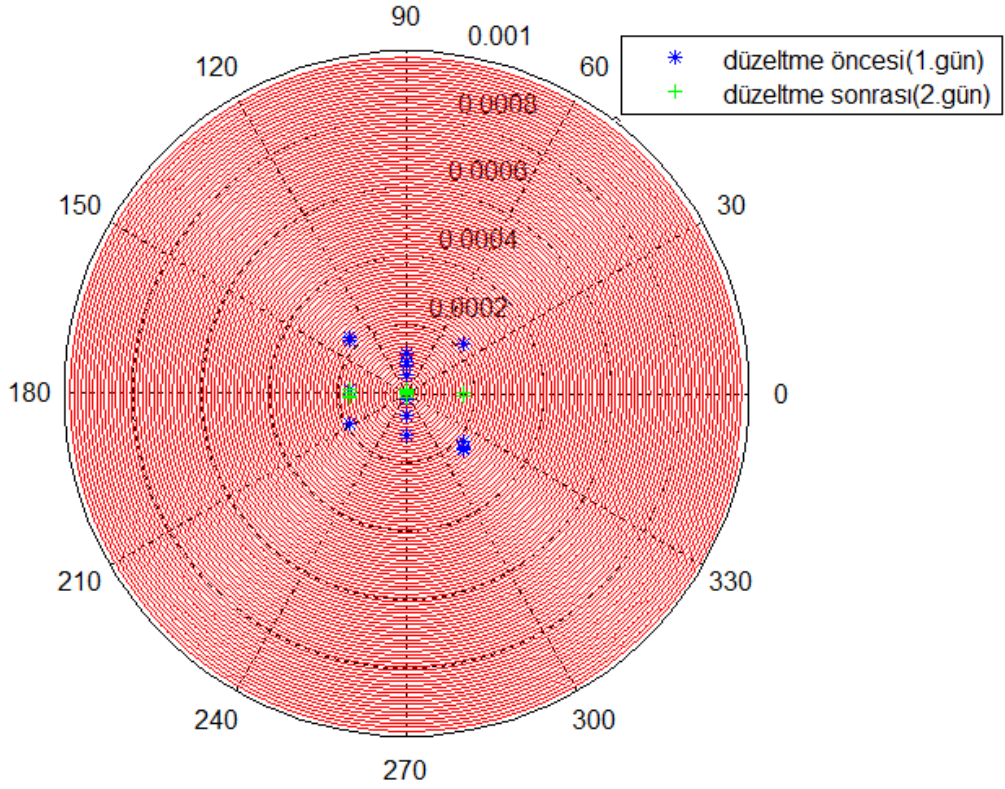
Boylam hata [derece]	Yörünge eğikliği hata [derece]	Ortalama günlük erişim süresi		Düzeltilme sonrası		
		Düzeltilme öncesi (1.gün) [s]	Düzeltilme sonrası (2.gün) [s]	Boylam Nominal: 31.0°	Yörünge eğikliği Nominal: 0.06°	Şekiller
0.000	0.005	204.6	118.54	31.0	0.0647	Şekil 38
0.000	0.010	200.7	104.0	31.0	0.0694	Şekil 39
0.000	0.020	487.5	75.8	31.0013	0.0788	Şekil 40
0.000	0.040	1627.4	123.2	31.0006	0.0979	Şekil 41
0.010	0.000	273.0	88.9	31.0095	0.0598	Şekil 42
0.008	0.000	169.1	133.9	31.007	0.0598	Şekil 43
0.008	0.004	222.1	89.8	31.0063	0.0637	Şekil 44
0.005	0.005	191.3	103.6	31.0044	0.0646	Şekil 45
0.005	0.010	172.8	104.5	31.0038	0.0694	Şekil 46
0.010	0.010	391.9	104.5	31.0095	0.0693	Şekil 47
0.030	0.030	2323.8	182.8	31.0254	0.088	Şekil 48

LEO uydusu, GEO uydusu olması gereken yer olan taramanın merkezinden başlayarak spiral şekilde taramaya başlar. Benzetim sonuçlarında verilen şekillerde, tarama yolu kırmızı çizgi ile gösterilirken, mavi yıldız (*) ile gösterilen veriler birinci gün hatalar henüz düzeltilmemişken GEO uydunun LEO uydusu bakışına göre konumu her bir erişim başlangıcı için gösterilmiştir. Şekillerde yeşil artı (+) ise, ikinci gün için aynı erişimlerin düzeltilmesi sonrasında GEO uydunun ilk başlangıç konumu verilmiştir.

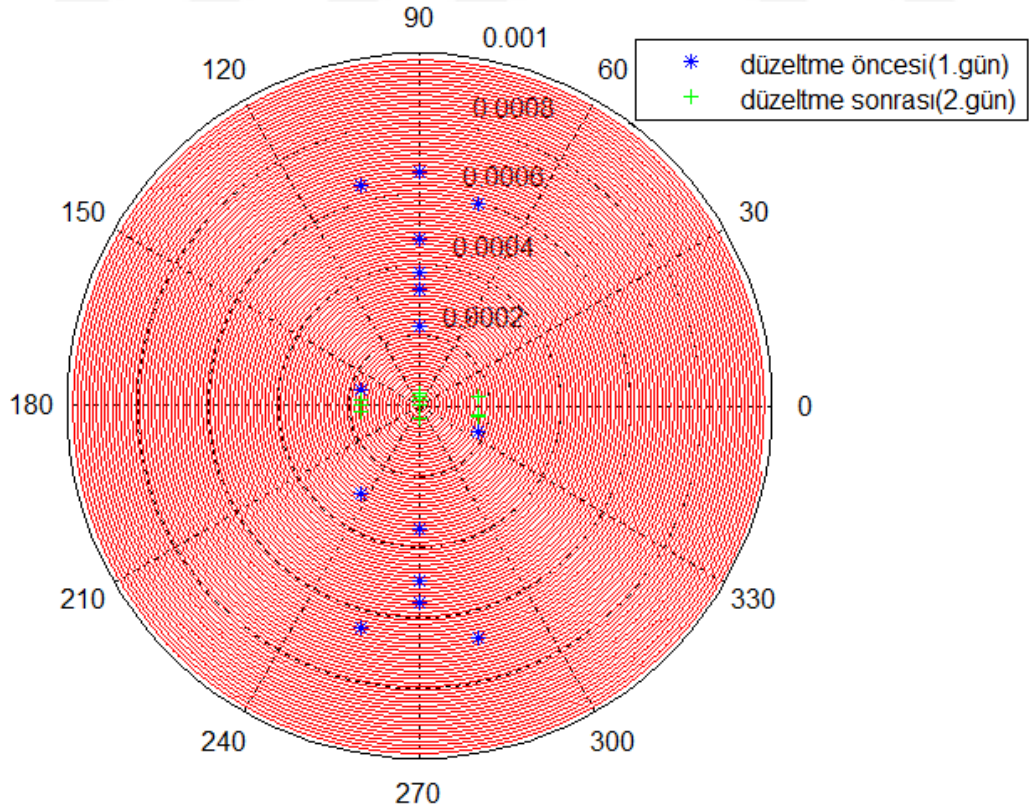
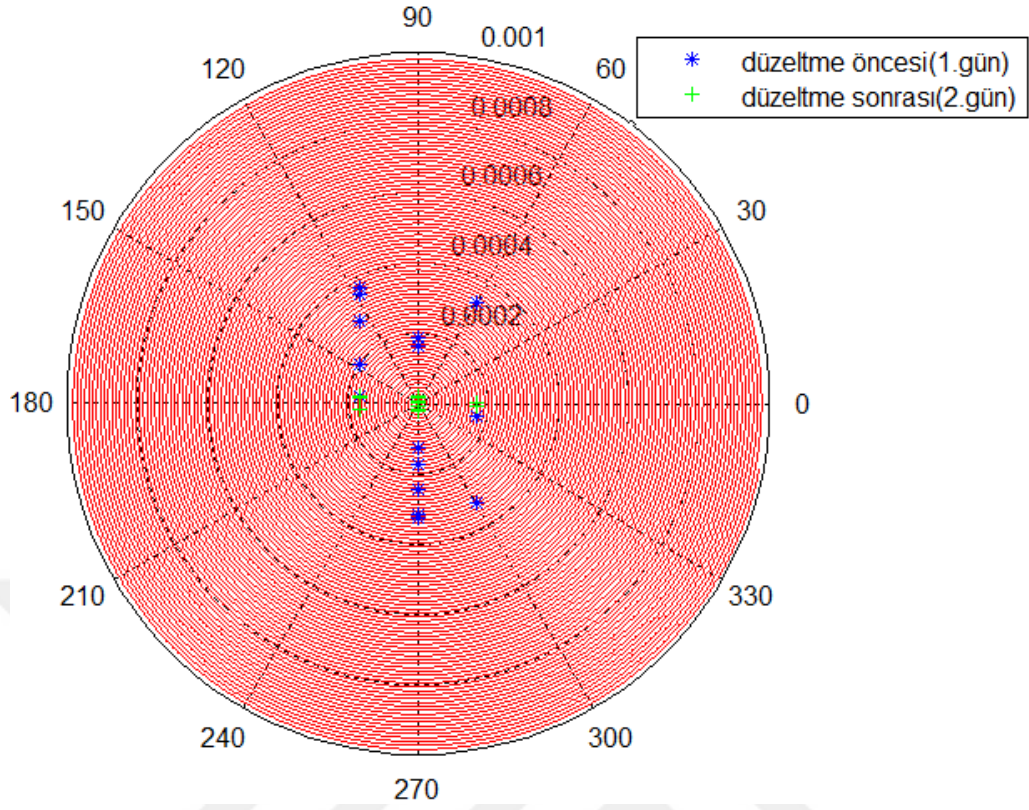
Şekillerden de görüldüğü gibi ikinci gün sonrasında idealde tüm sonuçların tarama alanının merkezinde olması gerekmektedir. Ancak, uydusu yörüngesindeki diğer hatalar ve bu hataların günlük değişim ortalamaları sıfır olmadığı için bu mümkün olmamaktadır.

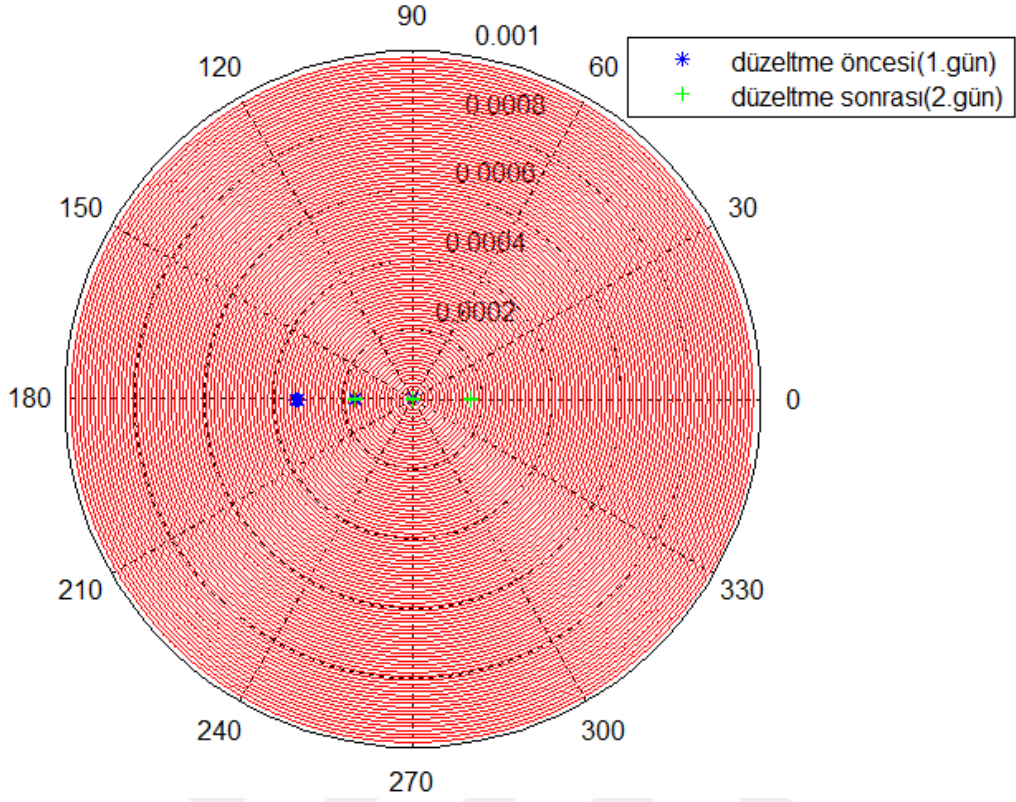


Şekil 38. GEO, boylam hata: 0.000 derece, yörünge eğikliği hata:0.005 derece

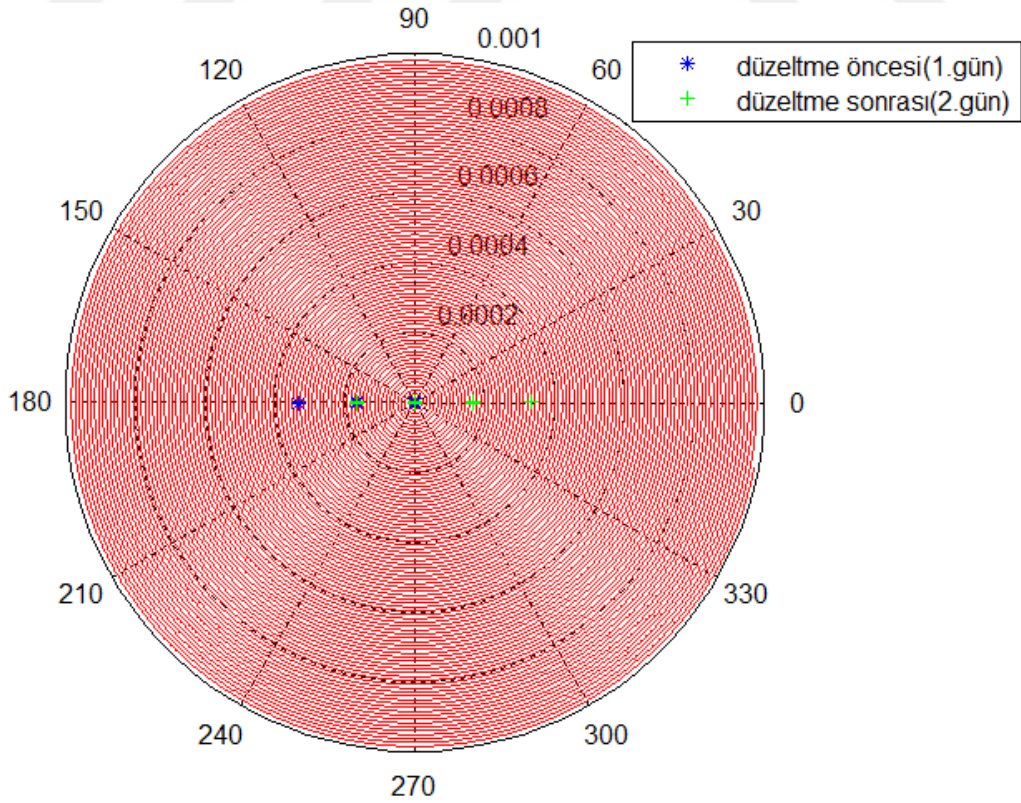


Şekil 39. GEO, boylam hata: 0.000 derece, yörünge eğikliği hata:0.010 derece

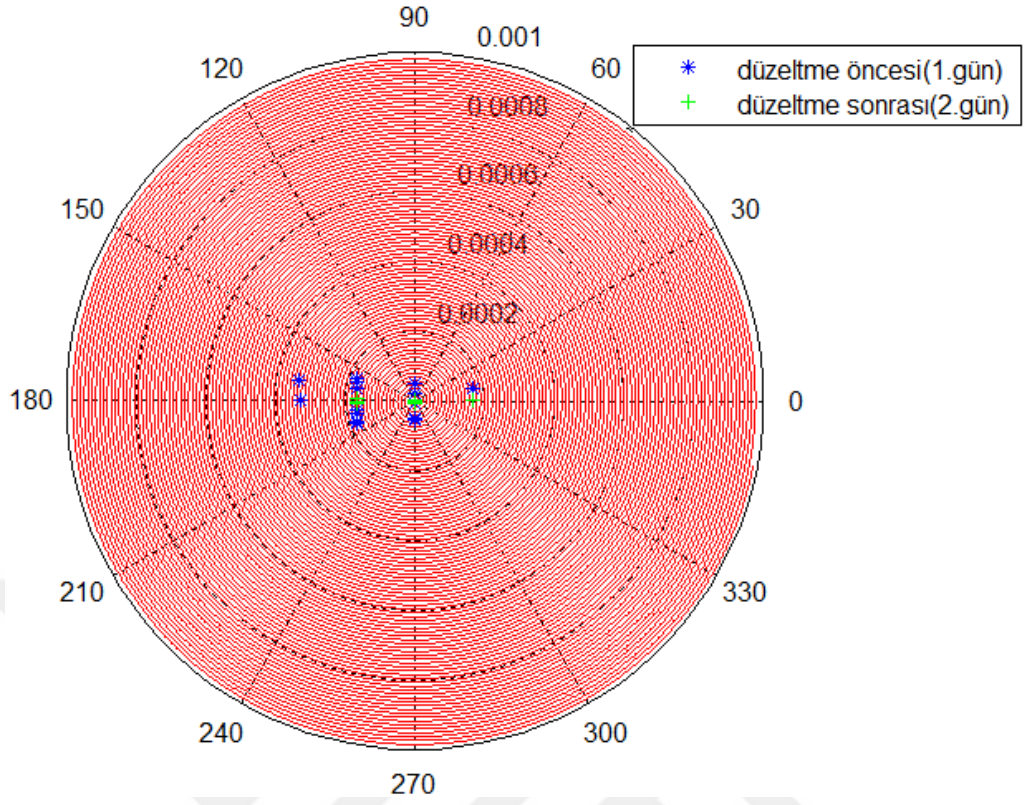




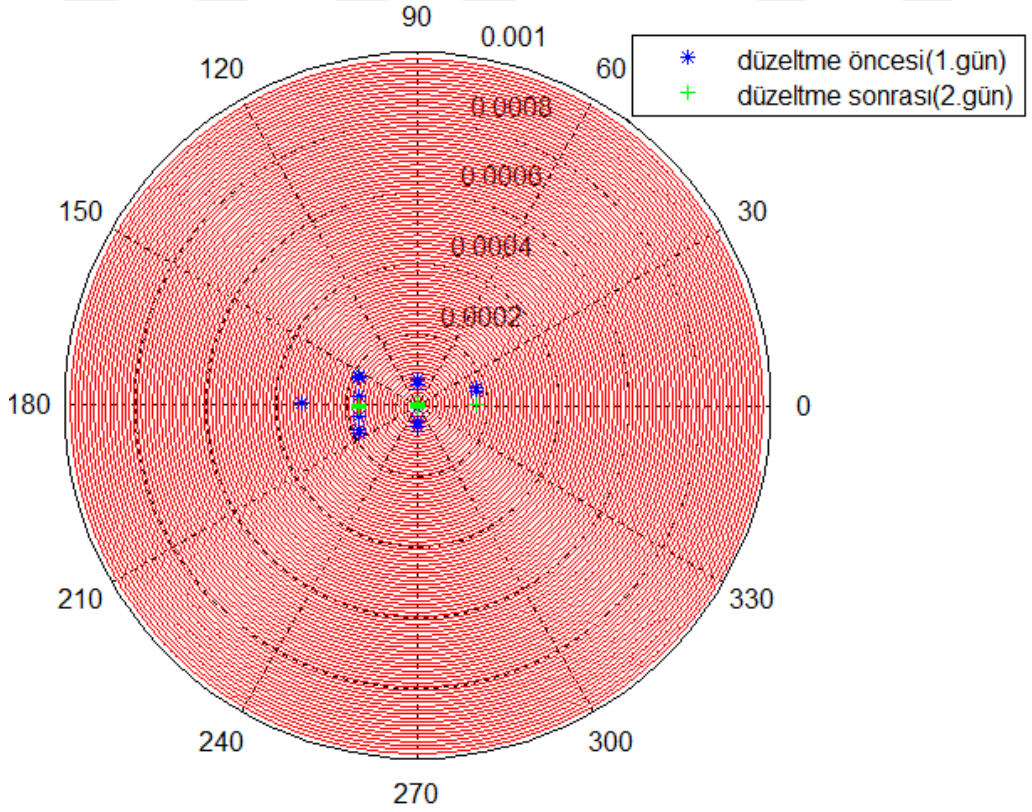
Şekil 42. GEO, boylam hata: 0.010 derece, yörünge eğikliği hata:0.000 derece



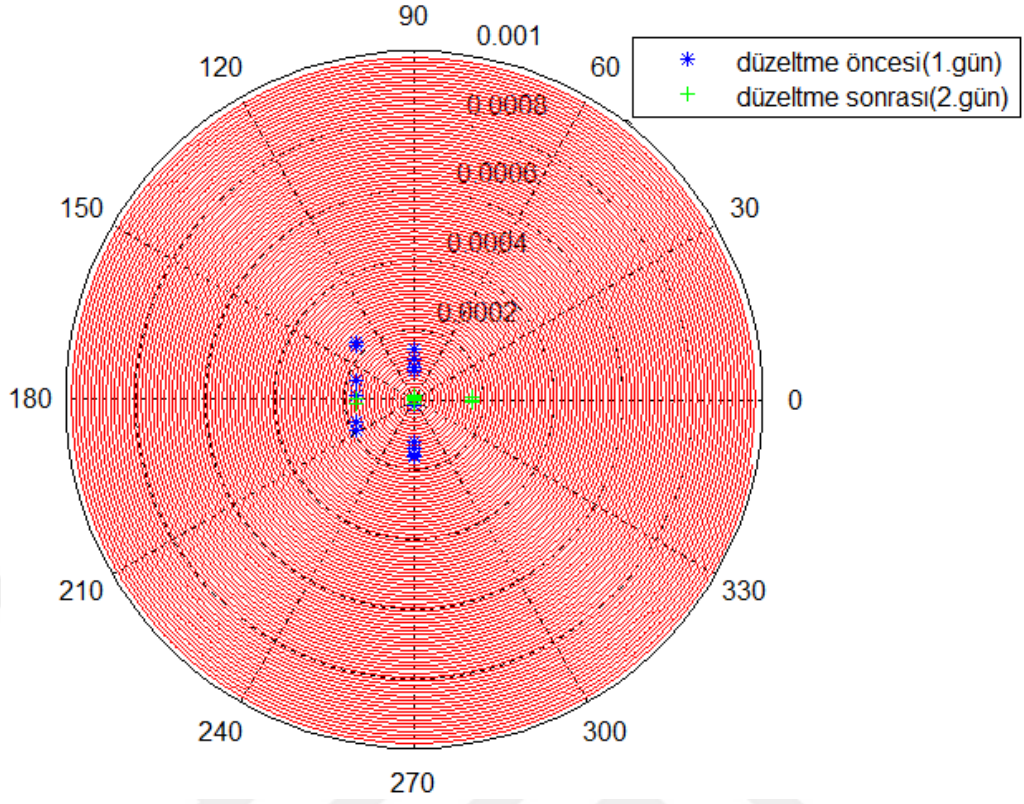
Şekil 43. GEO, boylam hata: 0.008 derece, yörünge eğikliği hata:0.000 derece



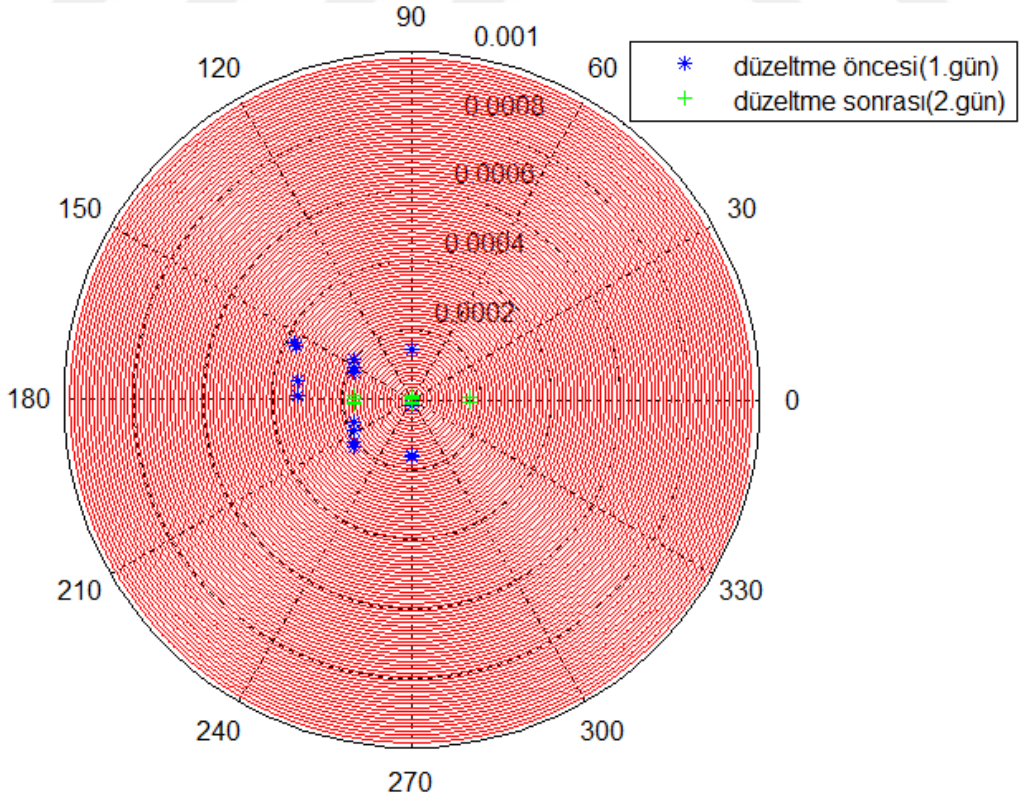
Şekil 44. GEO, boylam hata: 0.008 derece, yörünge eğikliği hata:0.004 derece



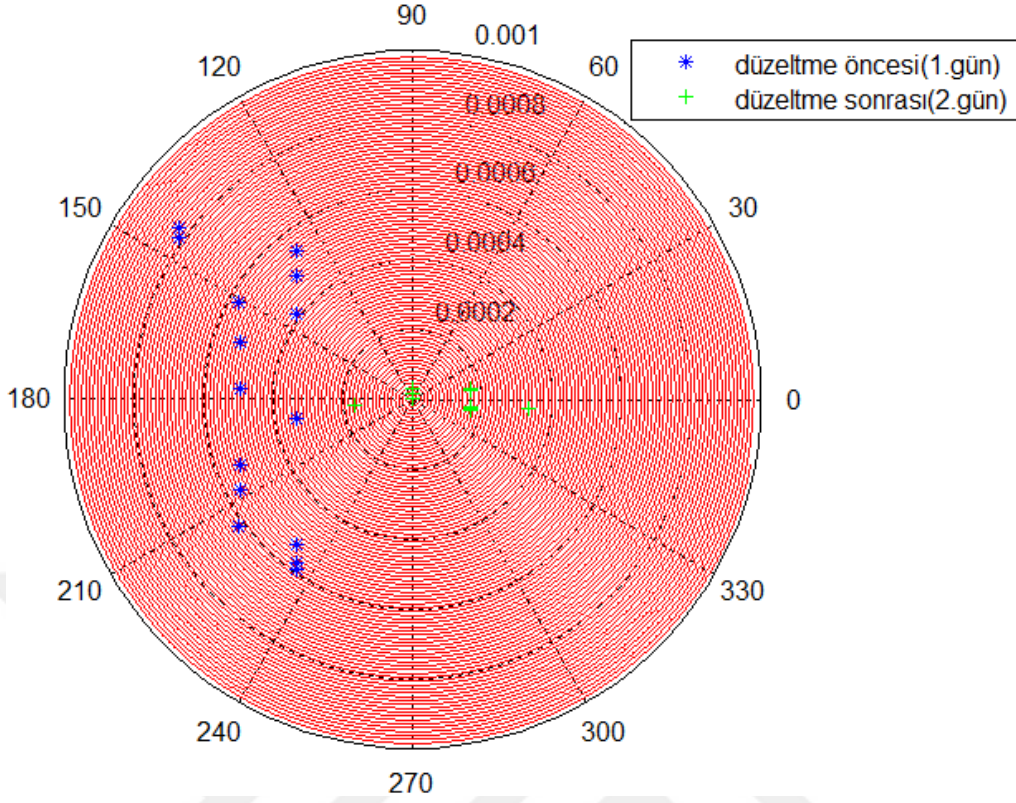
Şekil 45. GEO, boylam hata: 0.005 derece, yörünge eğikliği hata:0.005 derece



Şekil 46. GEO, boylam hata: 0.005 derece, yörünge eğikliği hata:0.010 derece



Şekil 47. GEO, boylam hata: 0.010 derece, yörünge eğikliği hata:0.010 derece



Şekil 48. GEO, boylam hata: 0.030 derece, yörünge eğikliği hata:0.030 derece

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi olası bir GEO uydu yörünge hatasının düzeltilmesi sonrasında GEO uydu 200 μ rad'lık bir hata dairesi içerisinde bulunabilmektedir. Ayrıca, örneklerde aktarıldığı ve şekillerde gösterildiği gibi tarama fazı ikinci günden itibaren belirgin bir miktarda düşürülebilmiş ve böylece haberleşme fazı için daha fazla zaman ayrılmıştır. Böylece her bir erişim imkânı için iletilebilecek veri miktarı artırılmıştır. Basit bir hesapla Tablo 18'deki hata örnekleri için günlük kazanılan veri miktarı Tablo 19'da gösterilmiştir.

Tablo 19. Benzetim sonucuna göre günlük kazanılan veri miktarı

Boylamdaki hata [derece]	Yörünge eğikliğindeki hata [derece]	Günlük kazanılan veri miktarı [Gbyte]
0.000	0.005	21.5
0.000	0.010	24.1
0.000	0.020	102.9
0.000	0.040	376.0
0.010	0.000	46.0
0.008	0.000	8.8
0.008	0.004	33.0
0.005	0.005	21.9
0.005	0.010	17.1
0.010	0.010	71.6
0.030	0.030	535.2

Tablodan da görüldüğü gibi, geliştirilen yöntem ile, günlük tüm erişimlerdeki iyileştirmelerden birkaç Gbyte'dan birkaç yüz Gbyte'a kadar fazla verinin LEO uydudan GEO uyduya aktarılabilmesi sağlanmıştır.

2.6. GEO – Yer İstasyon(ları) Arası Haberleşme ve Yer İstasyonlarının Konumlarının Belirlenmesi

Çalışmanın şimdiye kadar aktarılan kısmında LEO uydunun yörüngesi, belirlenen bir hedef bölge üzerinde azami geçiş sağlayacak şekilde planlanmış ve topladığı verileri GEO uyduya gönderirken daha uzun iletişim süresi sağlayacak şekilde iyileştirmeler yapılmıştır. Bundan sonraki kısımda ise GEO uyduya ulaşan verinin hedef yer istasyonuna ulaşması konusu ele alınacaktır.

Sistemin tasarımı gereği GEO uydu, kendisine ulaşan veriyi zaman kaybetmeksizin yer istasyonuna aktarmalı ve bu sırada hem veri hızını hem de veri kesintisizliğini en iyi şekilde sağlamalıdır.

Daha önceki bölümlerde bahsedilen LEO-GEO bağlantısı arasındaki modelleme ve iyileştirmelere ilaveten, bu bölümde GEO uydudan yer kontrol istasyonuna ham verinin işlenmek üzere aktarılması üzerinde durulacaktır. LEO uydudan optik kanal ile GEO uyduya aktarılan verinin (görüntü, video vs), GEO uydu üzerinde elektriksel sinyale çevrildikten sonra GEO ile yer arasındaki kanala uygun bir taşıyıcı ile aktarılması gerekecektir. Bu

bağlantı için optik kanal kullanılması konusunda çalışmalar olmakla birlikte, tarihçeli ve yaygın olarak kullanılan RF taşıyıcı çalışma içerisinde önerilmiştir. Öte yandan, bu kanal için veri hızı en az optik veri hızı kadar olmalıdır ki tüm sistem sağlıklı ve kesintisiz olarak çalışabilsin. Daha önce de bahsedildiği gibi böyle bir veri hızı isteği; daha geniş bir frekans bandı gerektirmektedir. Uydu haberleşmesinde yaygın olarak kullanılan Ku ve Ka frekans bantlarında böyle geniş bir bant bulmak oldukça zordur [34]. Dolayısıyla karşımıza Q/V ve/veya W bant gibi yüksek frekans bantları çıkmaktadır. 40 GHz ve üzeri olan bu frekans bantlarında ise yağmur zayıflatması çok önemli bir sorun olmaktadır [80]. Bu zayıflama nedeniyle de verinin kaybolmaması için farklı yöntemler önerilmektedir [35], [36], [37]. Önerilen yöntemlerden biri olarak ise “birbirinden farklı konumlarda iki veya daha fazla yer istasyonu kullanılması (istasyon-çeşitlemesi)” en uygun, nispeten daha ucuz ve kolay uygulanabilir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır [36].

Bu durumda, sistemin geliştirilmesinde görülen en önemli sorun ise bu istasyonların konumlarının nasıl belirlenmesi gerektiği olmaktadır. Bu belirleme işlemi için öncelikle girdiler aşağıdaki gibi belirlenebilir.

- İstasyonlardan en az birinin GEO uydu ile mümkün olduğunca haberleşme halinde bulunması gereklidir.
- Tüm sistemin maliyetinin mümkün olduğunca azaltılması gerekmektedir.
- Maliyet azaltılmasına bağlı olarak, önerilen istasyonların aynı zamanda GEO uyduyu da kontrol edebilecek ve konumunu hassas olarak ölçebilecek kapasitede olması gerekmektedir.

Sayılan bu hipotezler ışığında konumlarının belirlenmesi gereken istasyon çiftleri hem GEO uydunun LEO uydudan anahtarlayarak aktardığı verileri toplayacak hem de GEO uydunun uzaydaki kontrolü, gözlemi ve yörünge hesabı için gerekli olacak iki yönlü mesafe ölçüm işlevlerini yerine getirebilecek teknik yeterlilikte olmalıdır.

Bahsedilen bu iki yönlü mesafe ölçümü için, anten hassasiyetlerine bağlı olarak, iki istasyonun birbirinden uzak olması gerekmektedir. Bu uzaklık aynı zamanda birbirine daha az benzer yağış rejimi olan bölgeler için de geçerlidir.

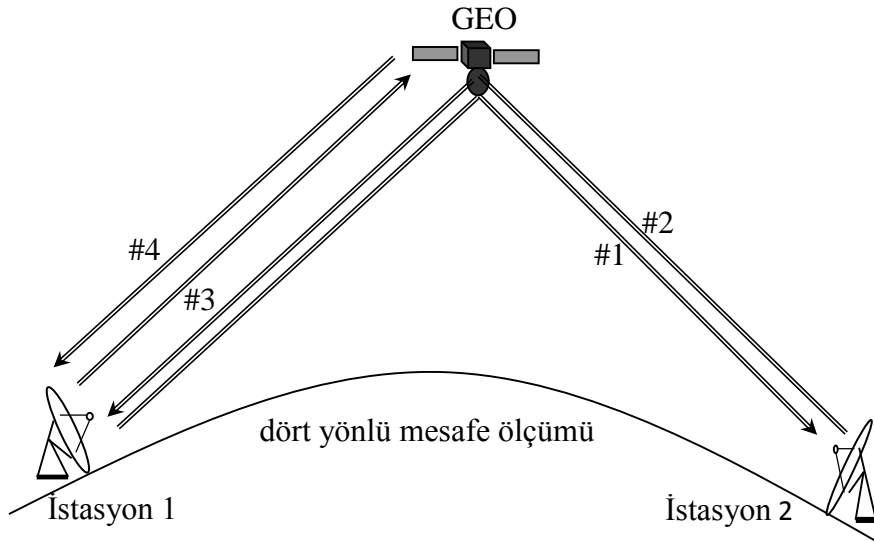
Sonuçta, iki istasyonun birbirinden uzak olması hem yörünge hesabındaki hassasiyeti artıracak hem de daha az benzerlik gösteren yağış bölgesi seçimi sağlanmış olacaktır. Ancak, bu durumda da istasyonlar aynı kapsama alanı içinde ise daha düşük EIRP'ye sahip olacaktır. Dolayısıyla iki istasyonun konumunun seçimi; gerekli RF gücünü sağlayacak kadar birbirine

yakın, ancak gerekli ölçüm hassasiyeti ve yağış rejimi farklılığı sağlayacak kadar da uzak olmalıdır [81].

Yapılan çalışmada yukarıda belirtilen bu önemli kıstaslar göz önüne alınarak Yer İstasyonlarının konumlarının seçimini iyileştirmek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

2.6.1. Yer İstasyonları Konumu Seçimindeki Kısıtlamalar

GEO uyduların yörüngesini tespit etmek için kullanılan değişik yöntemler mevcuttur. Bunlardan biri de yaygın olarak kullanılan ve TÜRKSAT'ın da kullandığı tek bir yer istasyonu antenin GEO uydu ile arasındaki mesafe ile bu mesafenin ölçüldüğü zamandaki anten azimut, elevasyon bilgileri ile GEO uydunun yörüngesini hesaplamaktır. Ancak bu yöntem oldukça hassas takip ve nispeten pahalı sistemler gerektirmektedir. Bir diğer yöntem ise GEO uydu operatörleri arasında giderek yaygınlaşan birbirinden uzaktaki iki istasyon ile 2 veya 4 yönlü mesafe verileri ile ölçümün yapılmasıdır [82], [83]. En basit ifade ile dört yönlü mesafe ölçümü aşağıdaki Şekil 49'da gösterildiği gibi uydu ile istasyonlar arasında radyo dalgasının geçirdiği zaman gecikmesi ölçülerek uydunun konumunun hesaplanması işlemine dayanır.



Şekil 49. Uydu mesafe ölçüm sistemi

Bu sistemin kurulum ve işletim maliyeti hem nispeten daha ucuz hem de GEO uydunun kontrolü için sağladığı ölçüm hassasiyeti de oldukça yüksektir. TAR (turn around

ranging) olarak adlandırılan 2 istasyon kullanma durumundaki en kritik parametre ise istasyonlar arasındaki mesafenin ne kadar olacağıdır.

İki istasyon arasında gerekli olan asgari mesafe (d_t) aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanabilir [82].

$$d_t = 2 \frac{\delta y}{\delta \theta} \quad (115)$$

Burada;

δy : mesafe ölçüm hassasiyeti [metre],

$\delta \theta$: açısal ölçüm hassasiyetidir [radyan].

Formülden de görüldüğü gibi, daha düşük açısal hassasiyet, istasyonların birbirine daha yakın olmalarını gerektirirken, daha kötü bir mesafe ölçüm hassasiyeti ise istasyonların birbirinden daha uzak olmasını gerektirmektedir.

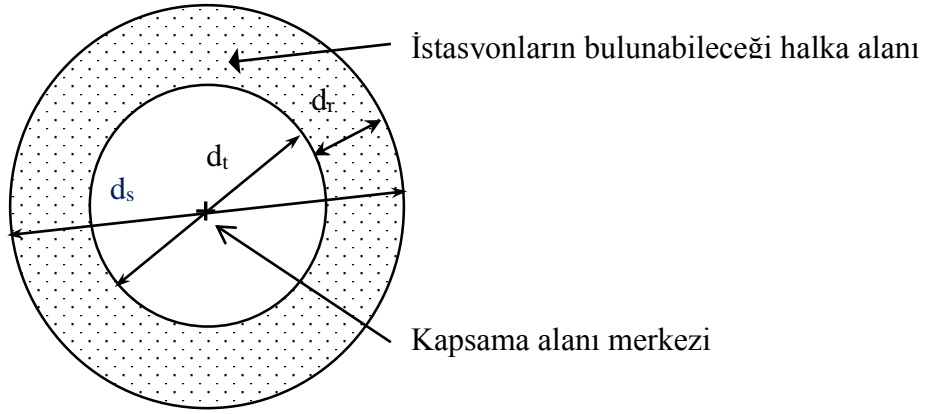
Öte yandan, bahsedildiği gibi göz önüne alınması gereken diğer bir konu ise tercihen aynı kapsama alanı içinde bulunan istasyonların sahip olacakları EIRP değerleridir. Uydu üzerindeki anten çapı arttıkça kapsama alanı daralacak ve nispeten daha yüksek EIRP değeri sağlanabileceken, uydu üzerindeki antenin çapının azalması tam tersine kapsama alanının genişlemesine ve gücün dağılmasına neden olacaktır [84].

Uydu üzerinde parabolik bir anten kullanıldığı varsayıldığında yeryüzündeki kapsama alanı çapı (d_s) aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$d_s = l \tan \left(\frac{\lambda}{D_s \sqrt{\eta}} \right) \quad (116)$$

Burada, l GEO uydu ile kapsama alanı merkezi arasındaki mesafe, λ kullanılan RF işaretin dalga boyu, D_s uydu üzerinde kullanılan antenin çapı ve η uydu üzerindeki antenin verimidir.

Teorik olarak en uygun yer istasyonları kapsama alanının kenarlarında ve birbirinden mümkün olduğunca uzak olarak seçilmeli, öyle ki, $d_s = d_t$ kistası sağlanabilsin. Ancak, pratikte tüm ülkelerin bu şekilde yerleştirilebilecek istasyonları bulunmayabilir. Dolayısıyla Şekil 50’de gösterildiği gibi halka şeklindeki bir bölgenin tanımlanması gerekmektedir.



Şekil 50. GEO uydu spot kapsama alanı

Yukarıdaki şekilde belirtilen halkanın genişliği (d_r) ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$d_r = \frac{d_s - d_t}{2} \quad (117)$$

$\tan\left(\frac{\lambda}{D\sqrt{\eta}}\right) \cong \left(\frac{\lambda}{D\sqrt{\eta}}\right)$ olduğu varsayıldığında bu denklem,

$$d_r = \frac{1\lambda}{2D\sqrt{\eta}} - \frac{\delta\gamma}{\delta\theta} \quad (118)$$

şeklinde de yazılabilir.

2.6.2. Yer İstasyonlarının Konumlarının Belirlenmesi Algoritması

Çalışmanın bu kısmında uzun mesafeli istasyon çeşitlemesi ve istasyonların yağış rejimleri kullanılarak geliştirilen yöntem anlatılacaktır. Burada, anlatım için sistemin bazı parametreleri sabit kabul edilmiştir. Sabit kabul edilen bu parametreler Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20. Türkiye örneği için sabit kabul edilen bağlantı değerleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Kesintisizlik yüzdeleri (her iki istasyon)	α_{av}	99.95	%
Alıcı anten çapları	Dr	5	m
Alıcı anten verimlilikleri	η_{Rx}	0.65	-
Atmosferik kayıplar (gaz, vs)	Lg	1	dB
Odaklama ve yönelim kayıpları	Lp	1	dB
GEO uydu boylamı (Doğu)	L	50.00	Derece
GEO uydu anten çapı	D	60, 90, 110	cm
Verici anten verimi	η_{Tx}	0.65	-
Kullanılan frekans (Dairesel kutuplu)	f	40.00	GHz
Verici kayıpları	Lt	1.00	dB
Verici Gücü	Pt	150.00	W
Yuvarlama faktörü	α	0.35	-
Bant Genişliği	BW	800.00	MHz

Hesabın ilk kısmında önerilen; uzun dönem günlük yağmur ortalamaları korelasyonu ile tüm olası şehir çiftlerinin kullanılmasıdır. Bu çalışmada, Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan veriler kullanılarak Türkiye'deki tüm şehirler için uzun dönem günlük yağmur korelasyon katsayısı, günlük ortalama yağış miktarı 2 mm/saat olacak şekilde, aşağıdaki gibi hesaplanmış ve tablanmıştır.

$$\rho_w = \frac{\sum(C_A C_B) - \frac{\sum C_A \sum C_B}{N}}{\sqrt{\sum C_A^2 - \frac{\sum C_A^2}{N}} \sqrt{\sum C_B^2 - \frac{\sum C_B^2}{N}}} \quad (119)$$

Burada

ρ_w : günlük yağmur doğrulama katsayısı,

C_A ve C_B : ilgili şehirlerin uzun dönem günlük yağmur ortalamaları,

N : toplam kullanılan veri miktarıdır.

Sonuçlar -1 ile +1 aralığında değişecektir. Sonuçların -1 veya bu değere yakın olması, kullanılan şehirlerin yağmur rejimlerinin birbirinden oldukça farklı olduğu ve her iki istasyonun aynı anda yağmur almadığı anlamına gelir. Eğer sonuçlar +1 veya bu değere yakın ise, kullanılan şehir çifti ya birbirine çok yakın veya benzer yağmur rejimine sahip demektir.

Öte yandan şehirlerin birbirine olan uzaklığını (d) göz önüne alarak logaritmik doğrulama katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Bu hesap $d > 50$ km için geçerlidir [36], [85], [86].

$$\rho_n = 0.94 \exp\left(-\frac{d}{30}\right) + 0.06 \exp\left(-\left(\frac{d}{500}\right)^2\right) \quad (120)$$

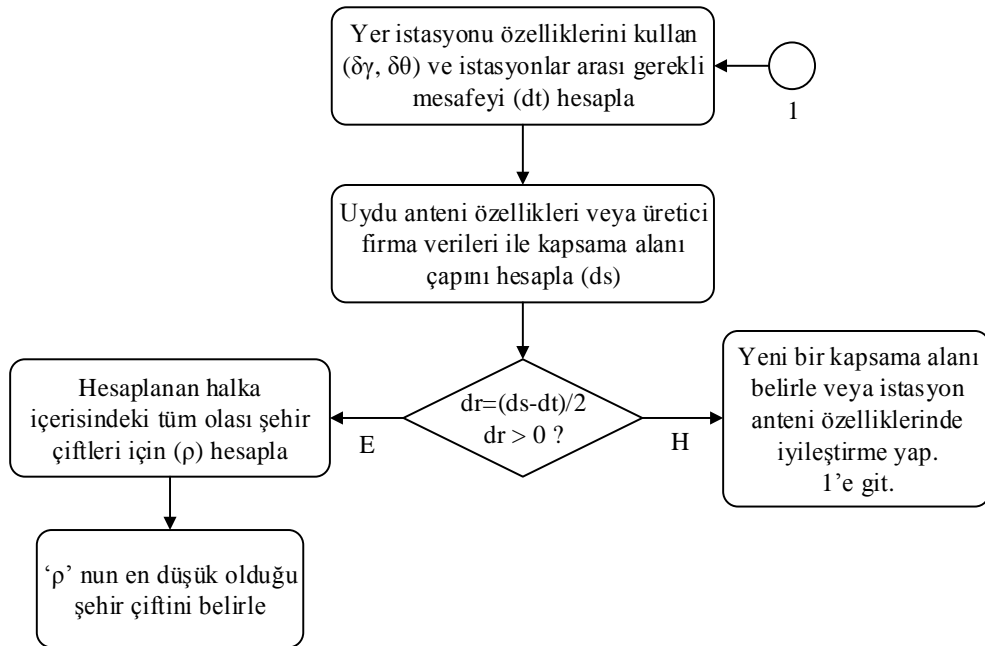
Benzer şekilde, ρ_n , logaritmik korelasyon katsayısı da Türkiye'deki tüm olası şehir çiftleri için hesaplanmıştır.

Sonuçta, belirlenmesi gereken, iki istasyonun konumlarının yeterli hassasiyette yörünge tayini için birbirinden uzak, ancak aynı kapsama alanı içerisinde ve daha yüksek EIRP değerine sahip olacak kadar da birbirine yakın olmalarıdır. Dolayısıyla, istasyonlar arası mesafe (d) aslında Şekil 50'de belirlenen halka içerisinde olmalıdır ($dt < d < ds$). Hesaplanan bu iki değer yine tüm şehir olasılıkları için çarpımı sonucunda en küçük değere sahip olan şehir çifti, aradığımız en uygun şehirler olacaktır [81].

$$\rho = \rho_w \rho_n \quad (121)$$

Türkiye'deki tüm şehir çiftleri için bu sonuçlar Ek-4'te verilmiştir.

Şekil 51, bu belirleme işlemi için geliştirilen akış diyagramını göstermektedir.

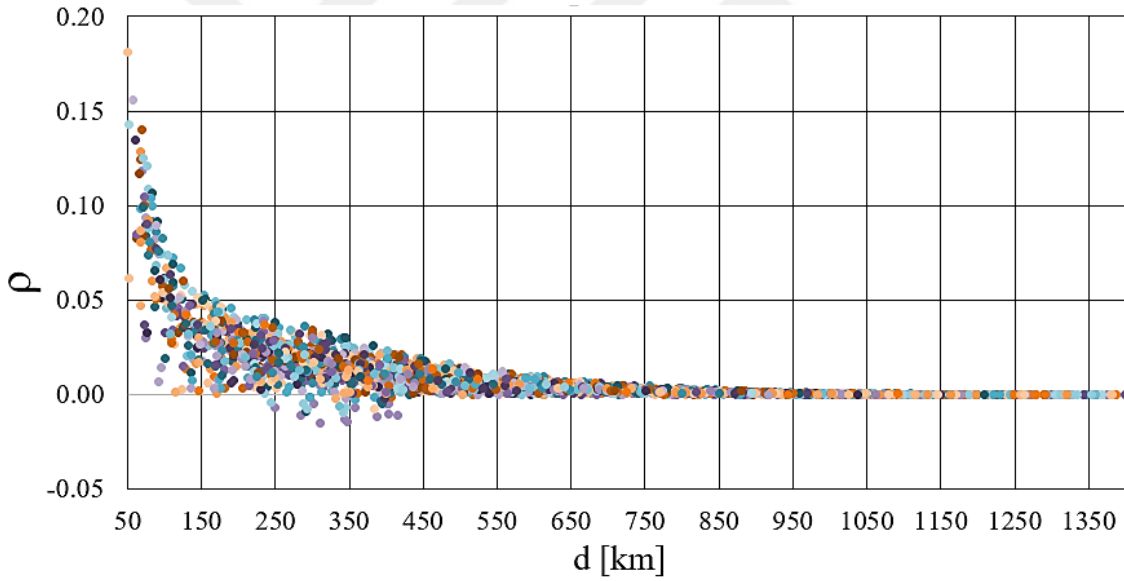


Şekil 51. İstasyon çiftlerinin seçilmesi için önerilen akış diyagramı

Sonuçta, uygulamada birden fazla yer istasyonu çiftleri bulunabilir ve en uygun olan istasyon çifti bu çiftler arasından seçilebilir. Bulunan bu çiftlerden en düşük birleşik korelasyon değerine sahip olan istasyon çifti en cazip olan olmakla birlikte, daha farklı alternatiflerin bulunması için d_r arama halkası genişletilebilir ve bağlantı bütçeleri karşılaştırılabilir.

2.6.3. Türkiye İçin Q/V Bantta Çalışan İstasyon Konumlarının Belirlenmesi

Bölüm 2.6.2’de bahsedilen yöntem, Türkiye için uygulanmış ve olası tüm illerin ikili kombinasyonları için bahsedilen doğrulama katsayıları hesaplanmıştır. Aşağıdaki Şekil 52, Türkiye için tüm olası birleşik korelasyon sonuçlarını aralarındaki mesafe 50 km’den fazla olan şehir çiftleri için göstermektedir.



Şekil 52. Türkiye için birleşik korelasyon sonuçları

Şekilden de görüldüğü gibi birbirleri arasında 200 km ile 450 km kadar mesafe bulunan bazı şehirler için birleşik korelasyon değeri negatiftir ki bu, hem uzaklık hem de yağmur rejimi olarak en cazip istasyon konumları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu istasyonlarda kurulabilecek antenlerin özellikleri, iki yönlü mesafe ölçüm işlemi için de belirlendiğinde tüm sistem, hem haberleşme hem de GEO uydunun konumunu hesaplamak için kullanılabilir.

Çalışmanın bu kısmında, mesafe hassasiyetinin 10 ile 20 metre, açısal ölçüm hassasiyetinin 5 ile 20 miliderece arasında olduğu dikkate alınmış [82] ve Tablo 20’de verilen değerler kullanılarak her iki istasyon için farklı hassaslık örnekleri ile GEO-Yer arasındaki bağlantı bütçesi oluşturulmuştur. Bu bütçeler oluşturulurken istasyon-çeşitlemesi kazancı da hesaba katılmıştır. Ek-5’te bu amaçla örnek bir RF bağlantı bütçesi verilmiştir.

Tablo 21. Türkiye için anten özelliği örnekleri

Örnek Numarası	$\delta\gamma$ [m]	$\delta\theta$ [mdeg]	d_t [km]
I	20	7	327.4
II	20	8	287.5
III	20	9	254.6
IV	20	10	229.2
V	10	10	114.6
VI	15	10	171.9

Tablo 21’in son sütununda verilen d_t değeri, örnek hassasiyet değerleri için iki istasyon arasında gerekli olan asgari mesafe (d_t) kilometre olarak hesaplanıp verilmiştir. Bölüm 2.6.1’de de bahsedildiği gibi iki istasyonun sağlıklı mesafe ölçümü yapabilmesi için bu mesafeden daha uzakta kurulmaları gerekmektedir.

Bundan sonra yapılması gereken, GEO uydunun gönderdiği verileri almak için bağlantı bütçesinin sağlanması ve bunun için gerekli olacak şekilde EIRP değerinin alıcı istasyonda olmasını sağlamaktır. EIRP değeri ise uydu üzerindeki antenin boyutuna yakından bağlıdır. Eğer anten çapı büyürse kapsama alanı daralır ve aynı güç daha dar bir alana daha yoğun ulaştırılabilir. Eğer uydudaki anten çapı küçülürse daha geniş kapsama alanı sağlanabilir ancak bu sefer de alıcıdaki güç yoğunluğu azalacaktır.

Aşağıdaki Tablo 22, Tablo 20’de verilen uydu anten çapları referans alınarak Türkiye içerisindeki olası istasyonların kurulabileceği şehirleri ve bu şehirlerdeki istasyonlarda sağlanan SNR’leri göstermektedir.

Tablodaki şehir kodları; AR: Ardahan, AT: Artvin, BG: Bingöl, KR: Kars, MS: Muş, RZ: Rize ve TN: Tunceli şeklindedir.

Tablo 22. Türkiye örneği için olası istasyonlar ve erişilen SNR

	Örnek No	İstasyon#1: SNR [dB]	İstasyon#2: SNR [dB]	ρ	d_r [km]
D = 110 cm ds = 302 km	I	$d_s < d_t$		-	-
	II	BG:24.8	KR:21.4	-0.0091	7.3
	III	AR:22.9	MS:25.8	-0.0113	23.7
	IV	AR:22.9	MS:25.8	-0.0113	36.4
	V	AT:19.2	KR:21.4	-0.0135	93.7
	VI	AR:22.3	RZ:13.0	-0.0132	65.1
D = 90 cm ds = 369 km	I (Şekil 53)	AR:20.9	TN:22.6	-0.0147	20.8
	II	AR:20.9	BG:23.1	-0.0152	40.8
	III	AR:20.9	BG:23.1	-0.0152	57.2
	IV	AR:20.9	BG:23.1	-0.0152	69.9
	V	AR:20.9	BG:23.1	-0.0152	127.2
	VI	AR:20.9	BG:23.1	-0.0152	98.65
D = 60 cm ds = 553 km	I	AR:17.3	TN:19.00	-0.0147	112.8
	II	AR:17.5	BG:19.6	-0.0152	132.8
	III	AR:17.5	BG:19.6	-0.0152	149.2
	IV	AR:17.5	BG:19.6	-0.0152	161.9
	V	AR:17.5	BG:19.6	-0.0152	219.2
	VI	AR:17.5	BG:19.6	-0.0152	190.6

Tablodan da fark edilebileceği gibi Ardahan hemen hemen bütün iller için ikinci istasyon adaydır.

Yukarıdaki tabloda adı geçen şehirlerin yerleşimi Şekil 53’de verilmiştir. Şekilde, I. örnek için GEO uydu verici anten çapı 90 cm iken d_t ve d_s çemberleri gösterilmiştir. Kırmızı renkli olarak gösterilen çember, istasyonların arasında bulunması gereken asgari mesafeyi (kapsama alanını) verirken, mavi renkli çember istasyonların birbiri arasında olabilecek azami mesafeyi vermektedir. Bu örnek için Ardahan ve Tunceli en uygun şehir çiftleri olarak karşımıza çıkmaktadır ki aynı zamanda birbirinden en uzak konumdadırlar. Bu iki şehir arasındaki mesafe 347 km’dir.

Öte yandan, birbirinden bağımsız yağmur rejimi için gerekli olan bu mesafe Japonya için 400 – 600 km [87] arasında hesaplanmış iken İtalya için 150 km kadar verilmektedir [85]. Çalışma kapsamında görüldüğü gibi bu değer Türkiye için 200-450 km arasında değişmektedir.



Şekil 53. Türkiye örneği için olası istasyon yerleşimi(Örnek No: I, D=90cm)

Öte yandan, şunu da hatırlatmak gerekir ki, haberleşme için kesintisizlik yüzdesi artırılmaya çalışılırken benzer durum ölçüm işlemleri için de geçerlidir. Ancak, yapılan ölçümlerin sayısı olabilecek kesintiler hesaba katılarak artırılabilir. Pratikte %40 ölçüm sayısı marjı yeterli olmaktadır [81].

2.7. Türkiye Geneli İçin İstasyon Çeşitlemesi Tekniğinin Uygulanması

Bölüm 2.6'da iki farklı yer istasyonunun konumlarının belirlenmesi, GEO ile yer arasında Q/V-bant haberleşmesi kullanılması durumuna ilaveten GEO uydunun yörüngesinin belirlenmesi kriteri de göz önüne alınarak açıklanmıştır. Genel olarak bu gibi yüksek frekans bantlarında daha dar kapsama alanları kullanılarak daha yüksek EIRP seviyeleri elde edilebilir. Örneğin Ka-bant faydalı yüküne sahip olan ve Ekim 2015 tarihinde 50° Doğu boylamına yerleştirilen TÜRKSAT-4B uydusu Türkiye üzerinde 3 farklı kapsama alanına sahiptir. Bu kısımda ise daha düşük frekansta GEO – Yer haberleşme bandı kullanan veya tüm Türkiye kapsama alanına sahip bir GEO uydu için istasyon-çeşitlemesi kullanılması halinde bu istasyonların seçimi ele alınacaktır.

Tüm Türkiye kapsama alanını kullanarak haberleşme istasyon çeşitlemesi kullanacak bir sistemin veya farklı kapsama alanı içerisinde istasyon kurulacak bir sistemin gerekmesi durumunda istasyonlar birbirlerinden oldukça uzak olabilecektir. Bu durumda ise çözülmesi

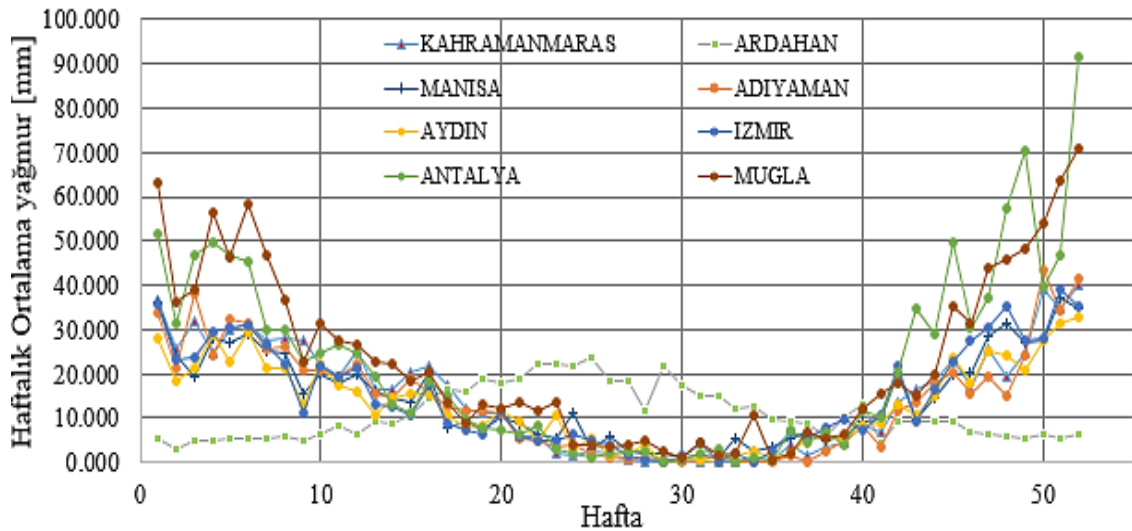
gereken istasyonların kurulması gereken şehirlerdeki yağmur rejimlerinin nasıl olacağıdır. Bu amaçla Bölüm 2.6’da anlatılan yağmur ortalamaları korelasyonuna benzer şekilde bir çözüm getirilebilir ve ρ_w ’nin hesaplanması yeterli olur.

Tüm Türkiye illeri için ρ_w hesaplandığında en düşük değerler aşağıdaki Tablo 23’teki gibi sıralanmaktadır.

Tablo 23. Tüm Türkiye illeri için yağmur yağma korelasyonu

Şehir çiftleri	ρ_w	Mesafe [km]
Ardahan - İzmir	-0.4671	1361.2
Ardahan - Kahramanmaraş	-0.4637	635.8
Ardahan - Adıyaman	-0.4527	533.6
Ardahan - Antalya	-0.4517	1137.9
Ardahan - Aydın	-0.4472	1324.3
Ardahan - Muğla	-0.4372	1308.4
Ardahan - Manisa	-0.4285	1327.3

Tablo 23’ten de görüldüğü gibi tüm olası istasyon çiftlerinde Ardahan ortak ildir. Tablodaki tüm illerin haftalık yağmur miktarları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



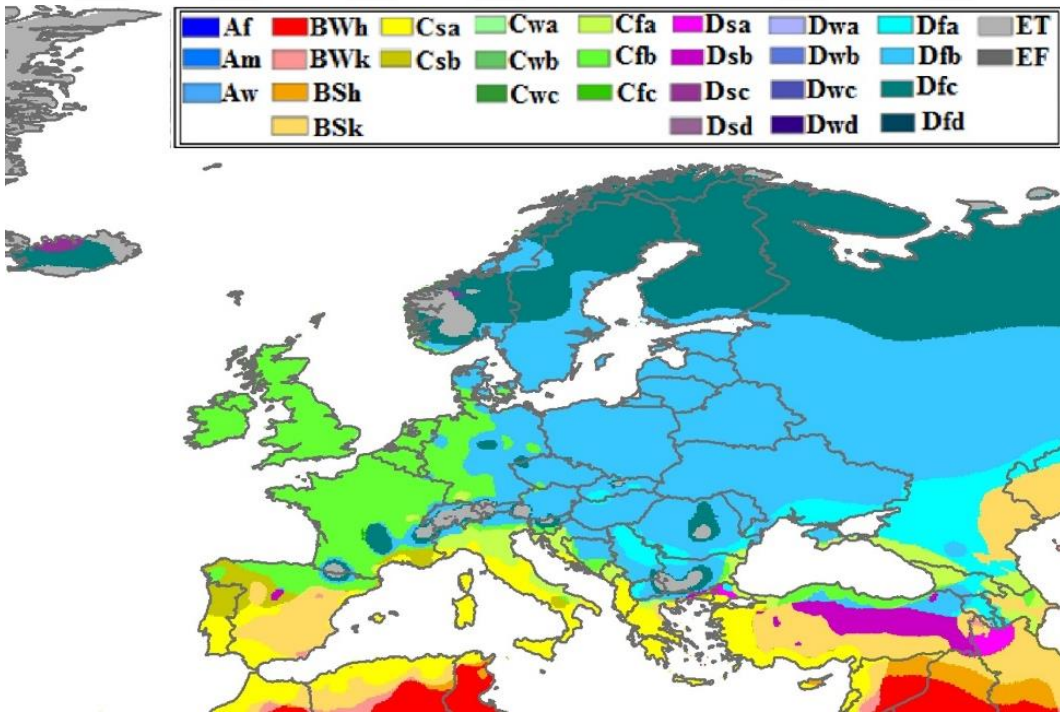
Şekil 54. Türkiye illerinde haftalık yağmur düşümleri

Şekil 54’ten de görüldüğü gibi, gerçekten de mevsimsel olarak Ardahan diğer illere göre oldukça farklı yağmur rejimine sahiptir. Ardahan’a benzer şekilde komşusu Kars da

yaklaşık aynı yağmur düşümü ortalamasına sahiptir. Hiç şüphesiz bunun ana sebebi coğrafi konumu ve sahip olduğu iklimin özelliklerinin yansımalarıdır.

Öte yandan, 100 yıldan uzun süredir yeryüzündeki iklimlerin sınıflandırılması yapılmakta ve bu sınıflar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sınıflandırma ilk olarak Wladimir Köppen tarafından 1900 yılında formüle edilmiştir [88]. Bu zamandan sonra da bu sınıflandırma konusunda birçok çalışma yapılmıştır [88]. Köppen sınıflandırması 5 ana kuşakta ve 24 tipte bulunmaktadır. Şekil 55, Türkiye’yi de kapsayan Avrupa Köppen- Geiger iklim sınıflandırmasını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi Ardahan ve Kars çevresi, diğer tüm Türkiye bölgelerinden farklı olarak Dfa olarak sınıflandırılırken, tabloda adı geçen diğer tüm iller Csa iklim sınıfında yer almaktadır.

Dolayısıyla tüm Türkiye kapsama alanı veya daha geniş bir coğrafyada farklı ülke toprakları arasında istasyon çeşitlemesi kullanılacaksa “iklim sınıflandırması”nın kullanılabilir olduğu görülmüştür. Bu durumda, en azından Türkiye için, Dfa-Csa iklim sınıfı çiftleri oldukça cazip olmaktadır. Bu iklim sınıflarından “Csa : Kış ılık, yazı sıcak ve kurak iklim (Akdeniz iklimi)”, “Dfa : Kış ılık yazı uzun ve sıcak, her mevsimi yağışlı iklim” olarak tanımlanmıştır. Diğer tüm sınıfların açıklaması [88] içeriğinde detaylandırılmıştır.



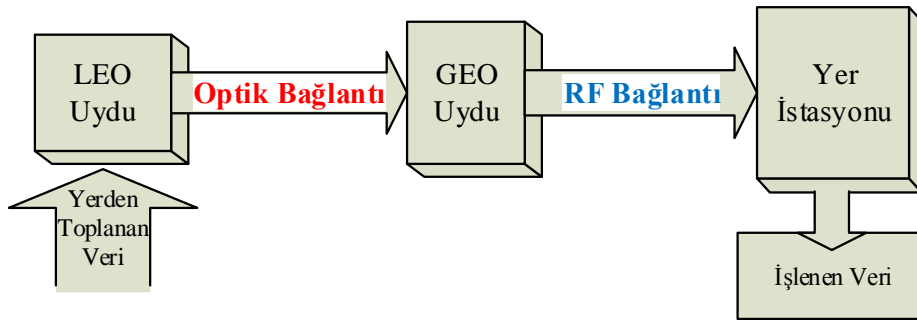
Şekil 55. Avrupa için Köppen- Geiger iklim sınıflandırması

Öte yandan yukarıdaki açıklamalara istinaden kurulması gereken GEO – Yer arasındaki RF bağlantı bütçesinde yağmur hızına ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye’de Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından son yıllarda kurulan otomatik ölçüm istasyonları 1 saatlik aralıklar ile ölçüm yapma ve ana istasyona gönderme kabiliyetindedir. Ancak, bağlantı bütçelerindeki yağmur zayıflatmasını bulmak için yağmur hızı istatistiği için en az 1 dakikalık aralıklar önerilmektedir. ITU tarafından yayınlanan Recommendation 837-6’a göre bir saatlik veriler 1 dakikalık olarak tahmin edilip bağlantı bütçesinde kullanılabilir [89]. Ek-7 Ardahan, İzmit, Kahramanmaraş ve Adıyaman illeri için yapılan dönüşüm grafiklerini içermektedir.

2.8. LEO- GEO-Yer Arası Haberleşme Sisteminin Modellenmesi

Çalışmanın bu kısmında LEO uydu tarafından yerden toplanan ham verinin, optik bağlantı ile GEO uyduya ve GEO uydudan da konumları daha önceki kısımda en uygun şekilde belirlenmiş olan yer istasyonlarına aktarılması modellenmiştir. Bu modelleme yapılırken önce iki kısım altında ayrı ayrı anlatılmış ve sonra tüm sistemin bir bütün olarak çalışması gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar teorik hesaplama ve benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hedef olarak teorik SNR sonuçlarına 1 dB yakınlık aranmıştır.

Geliştirilen modelin ana işlevi Şekil 56’da kabaca gösterilmiştir.



Şekil 56. LEO-GEO-Yer Bağlantı Modeli gösterimi

2.8.1. LEO-GEO Arası Optik Haberleşme

Söz konusu model, MATLAB/Simulink kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan lazer dalga boyu değişiklik gösterebilmekle birlikte, çalışma için 1550 nm dalga boyu seçilmiştir. Öte yandan alıcı foto diyot olarak PIN foto diyot seçilmiş ve modellenmiştir. Bu diyodun seçilmesinin başlıca sebebi ise fiber optik haberleşmede oldukça yaygın kullanılması ve uzay şartlarında benzer donanımların geliştirilmesinin nispeten daha kolay ve ekonomik olmasıdır. Tablo 24, model için kullanılan temel sistem parametrelerini göstermektedir. Tablodaki veri hızı seçilen hedefi gösterirken diğer parametreler Sentinel uydusu referans alınarak belirlenmiştir. LEO ile GEO arasındaki mesafe ise sürekli değiştiğinden azami mesafe olarak 45000 km seçilmiştir. Öte yandan alıcı ve vericideki titreşim değerleri için Güneş panellerinin durdurulduğu varsayılmıştır.

Tablo 24. LEO-GEO optik bağlantı modeli parametreleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Veri Hızı	h_f	2	Gbps
Tx Gücü	P_T	5	W
Dalga boyu	λ	1550	nm
Tx verimliliği	η_T	0.65	-
Rx verimliliği	η_R	0.65	-
Optik Kayıplar Loss (Tx, Rx)	L_{OT}, L_{OR}	1	dB
Tx titreşimi	θ_{Tx}	2.95	μ rad
Rx titreşimi	θ_{Rx}	2.95	μ rad
Azami Bağlantı Uzaklığı	z	45000	km

Bağlantı için seçilen PIN foto diyotun parametreleri ise Tablo 25'teki gibi alınarak modellenmiştir.

Tablo 25. LEO-GEO bağlantısında seçilen PIN diyot parametreleri

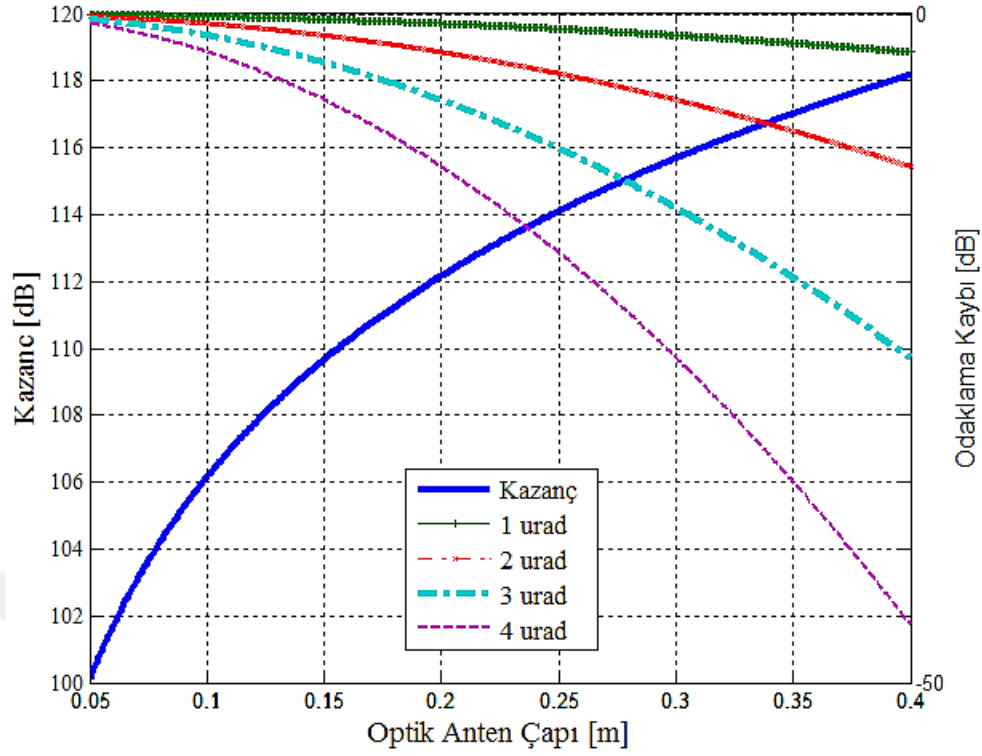
Parametre	Sembol	Değer	Birim
Bant Genişliği	B	1e8	Hz
Sıcaklık	T	300	Kelvin
Arkaplan Gürültü Akımı	I _{bg}	2.44e-10	A
Yük Direnci	RL	1e8	Ohm
Karanlık Akım	I _{ka}	1e-10	A
Kuantum Verimliliği	η	0.65	-
Detektör Hassasiyeti	r	0.81	A/W

Tablodan da görülebileceği gibi, alıcı ve verici terminallerinin anten çapları verilmemiştir. Zira uyduların titreşim profilleri biliniyorsa bu değer optimize edilebilir.

Modelleme kapsamında en uygun anten çapı aşağıdaki gibi hesaplanmış ve kullanılmıştır.

Bölüm 1.4.1.7’de bahsedildiği gibi alıcı ve verici anten kazançları ilgili terminal açıklığı ve kullanılan lazerin dalga boyunun bir fonksiyonudur. İlgili bölümde aktarıldığı gibi optik antenlerin hem kazancı ve hem kayıpları anten çapına bağlı terimlerdir. Bu yüzden, anten çapının seçimi en uygun optik bağlantı bütçesi için önemlidir. Aşağıdaki Şekil 57, yukarıdaki ifadelerdeki optik anten kazancı ve odaklama kayıpları arasındaki ilişkiyi vermektedir. Şekil, 1550 nm dalgaboyu kullanan bir lazer haberleşmesi için 1 μ rad’dan 4 μ rad’a kadar olan değişik titreşim seviyelerinde odaklama kayıplarını da göstermektedir.

Şekil 57’den de görüldüğü gibi anten çapı arttıkça kazancı da artmaktadır. Ancak terminalin titreşim seviyesine bağlı olarak odaklama kaybı da artmaktadır. Dolayısıyla, toplam kazancın azami olduğu en uygun anten çapı değeri bulunmalıdır.



Şekil 57. Optik bir terminal için kazanç ve odaklama kayıpları örneği

Anten kazancı ve odaklama kaybı formüllerindeki ortak parametrenin anten çapı olduğundan yola çıkarak, alınan işaretin gücünün (P_R) azami olduğu anten çapı değerini bulmak için eşitliğin, 'D' anten çapına göre kısmi türevi alınıp sifıra eşitlenirse en uygun anten çapı değeri bulunabilir. Alıcıya ulaşan işaret gücü hesabı için ise Bölüm 1.4.1.7'de aktarılan bağlantı bütçesi formülü kullanılabilir.

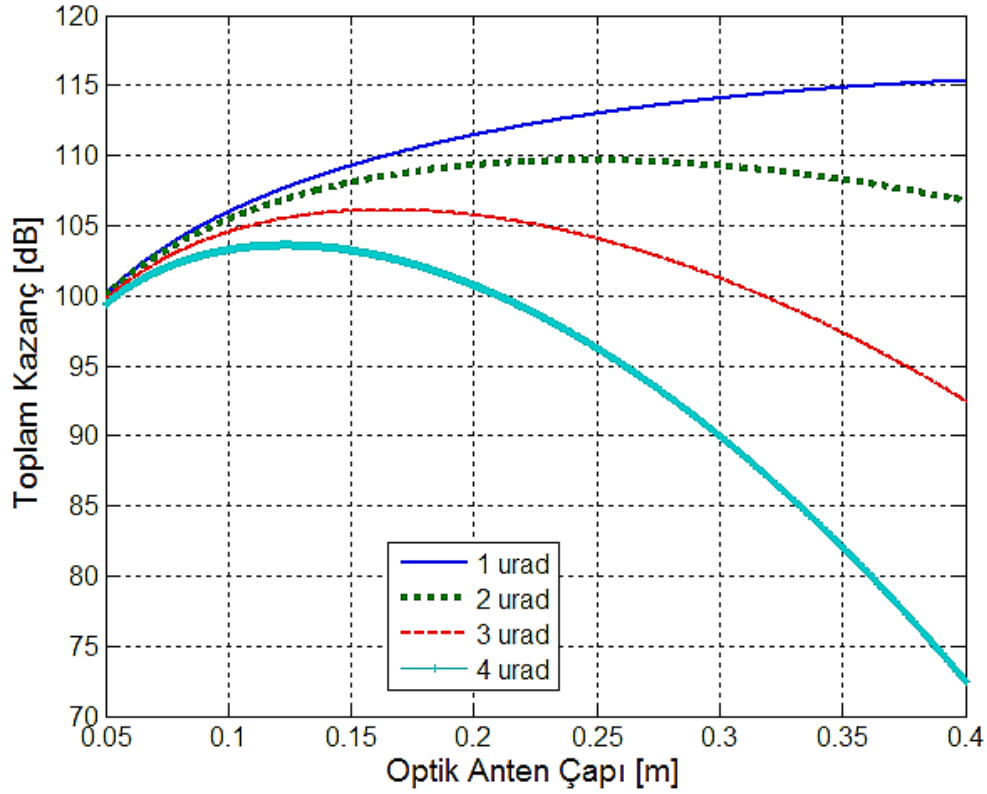
$$\frac{\partial P_R}{\partial D} = 0 \quad (122)$$

Denklemden D çözüldüğünde en uygun anten çapı,

$$D_{\text{opt}} = \frac{\lambda}{\pi\theta} \quad (123)$$

olarak bulunur.

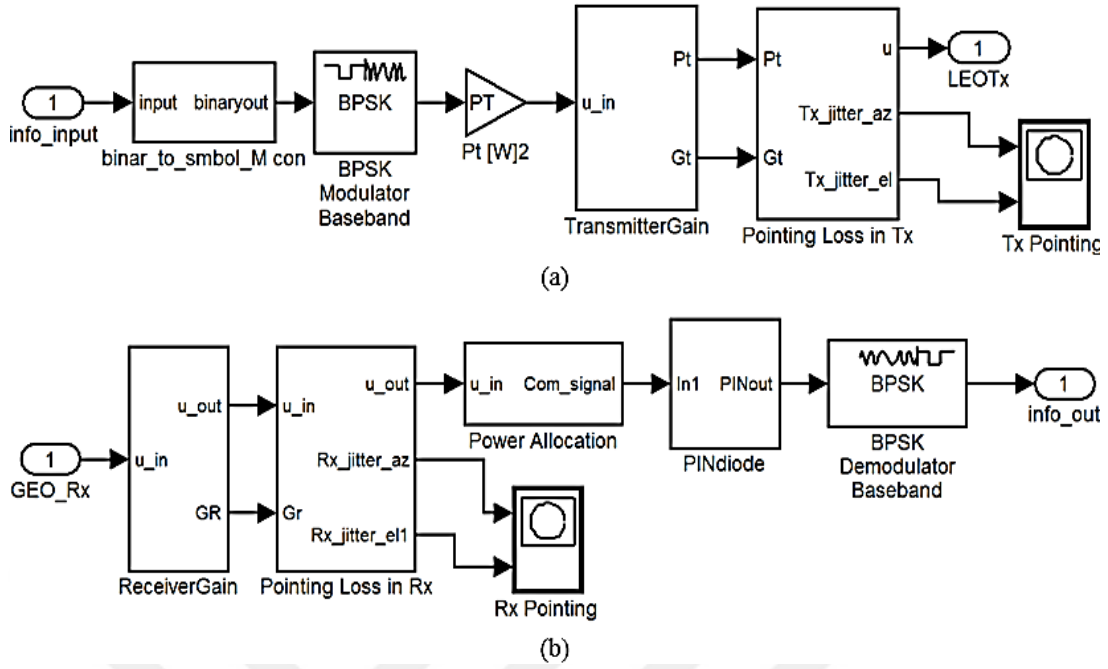
Burada, P_R alıcıya ulaşan güç, λ kullanılan lazerin dalga boyu, θ en uygun çapının hesaplanmasının istendiği antenin titreşim değeridir. 1550 nm dalga boyu ve 1 μ rad'dan 4 μ rad'a kadar olan titreşim değerleri için toplam anten kazancı (anten kazancı + titreşim kaybı) Şekil 58'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi toplam kazancın azami değerine ulaştığı bir anten çapı değeri bulunmaktadır. Terminalin titreşimi arttıkça en uygun anten çapı değeri azalmaktadır.



Şekil 58. Toplam Kazanç – Anten çapı

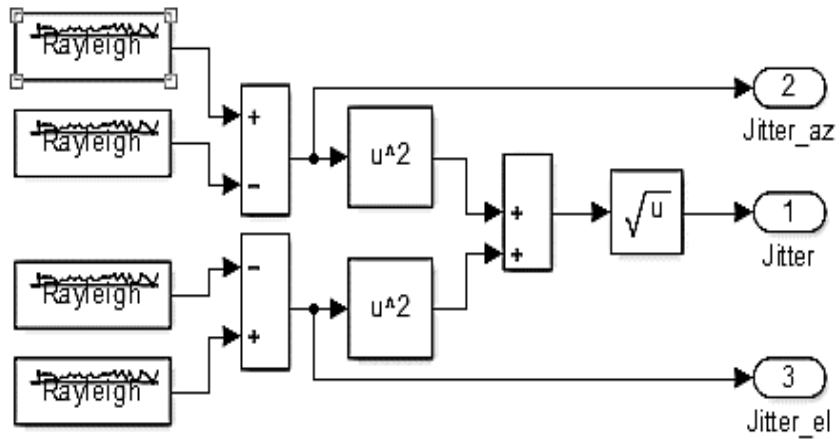
2.8.1.1. LEO-GEO Arası Optik Bağlantı Simulink Modeli

Çalışma kapsamında LEO uydudan GEO uyduya lazer haberleşme için Simulink'te aşağıdaki gibi bir model geliştirilmiştir.



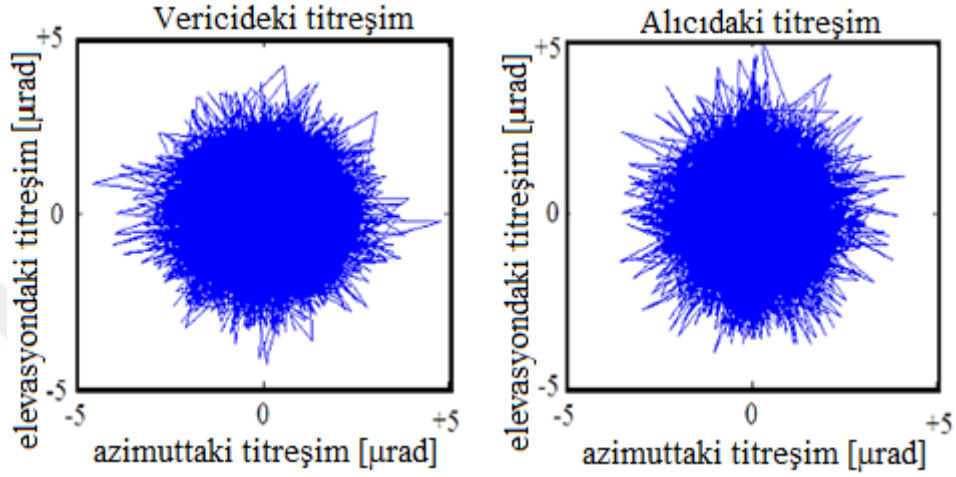
Şekil 59. LEO-GEO optik haberleşme modeli (a) LEO_Tx, (b) GEO_Rx

Bölüm 1 kapsamında bahsedildiği gibi alıcı ve verici optik terminallerin titreşim profilleri Rayleigh dağılımı olarak alınabilir. Buradan yola çıkarak, titreşimin etkisini hesaba katmak için ise Rayleigh gürültü blokları kullanılmış ve her bir blok için ayrı başlangıç değerleri girilerek bir biri ile benzeşen gürültü değerlerinden kaçınılmıştır. Aşağıdaki Şekil 60, simulinkte tasarlanan titreşim modeli bloğunu göstermektedir. Görüldüğü gibi her iki ekseninde de gürültüler tanımlanmıştır.



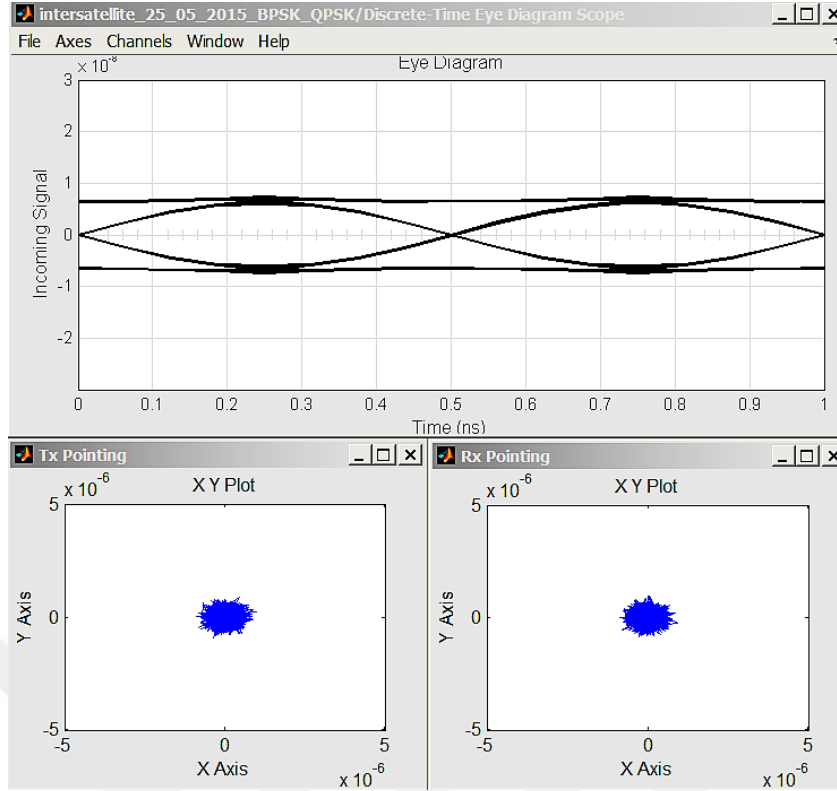
Şekil 60. Benzetimler için kullanılan titreşim modeli

Öte yandan, anlatımı ve sonuçtaki görselliği kolaylaştırmak için alıcı ve verici titreşimlerinin genlikleri ile terminal çapları aynı alınmıştır. Şekil 60’da gösterilen modelin kullanılması ile aşağıdaki Şekil 61’te gösterildiği gibi alıcı ve vericide örnek titreşim değerlerine ulaşılmıştır.

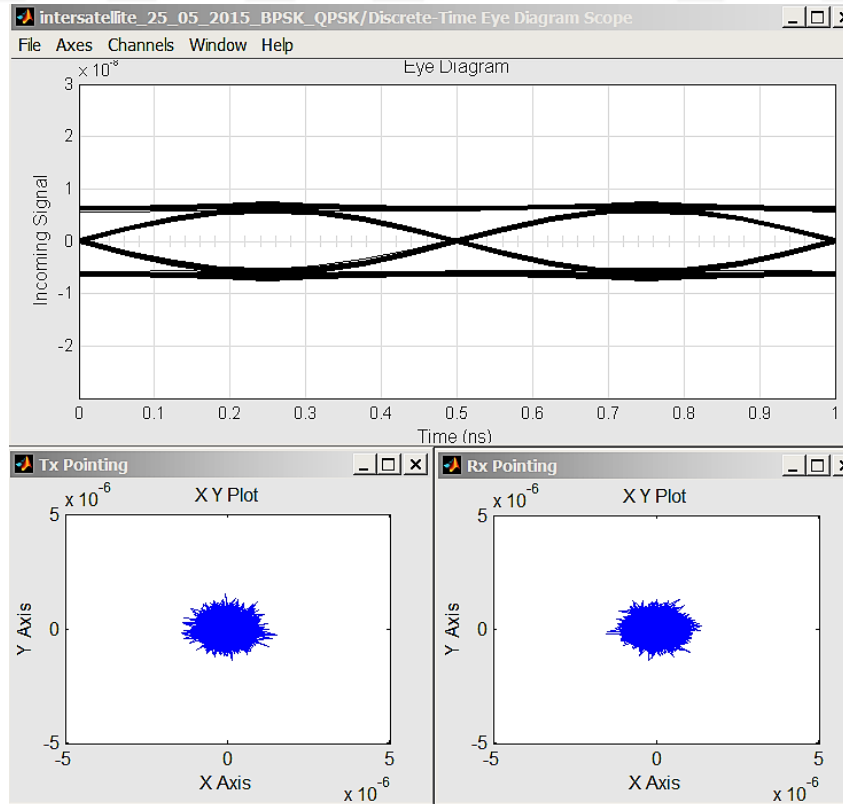


Şekil 61. Alıcı ve vericideki titreşim örnekleri

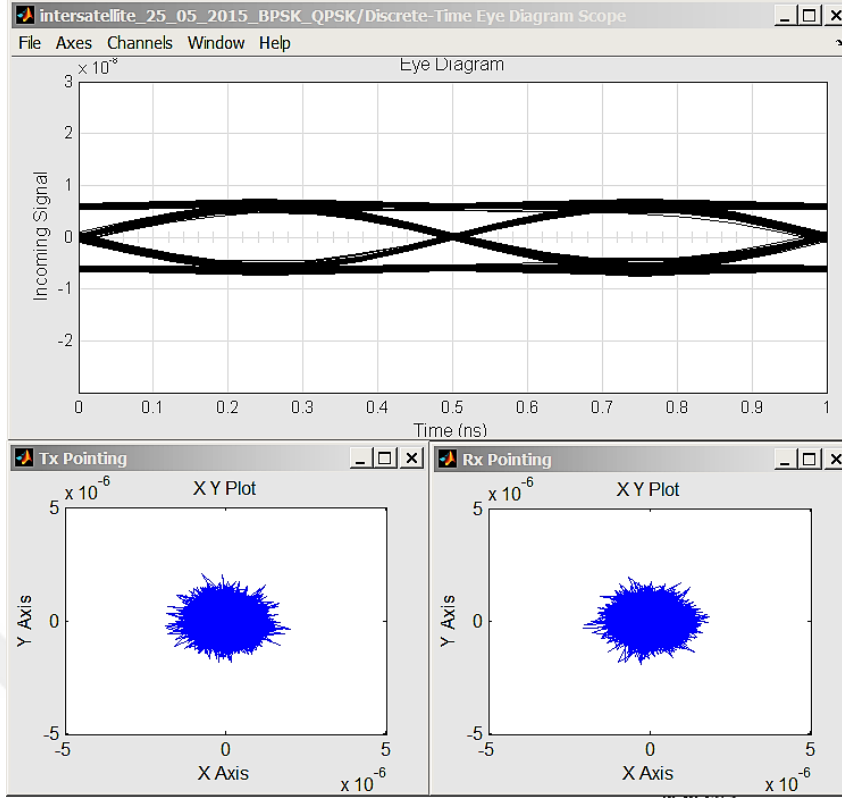
Bu model kullanılarak farklı titreşim değerlerinin göz diyagramı sonuçları 16 cm çapındaki alıcı ve verici terminaller için aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, titreşim değeri arttıkça göz diyagramı dağılmakta ve BER değeri artma eğilimine girmektedir.



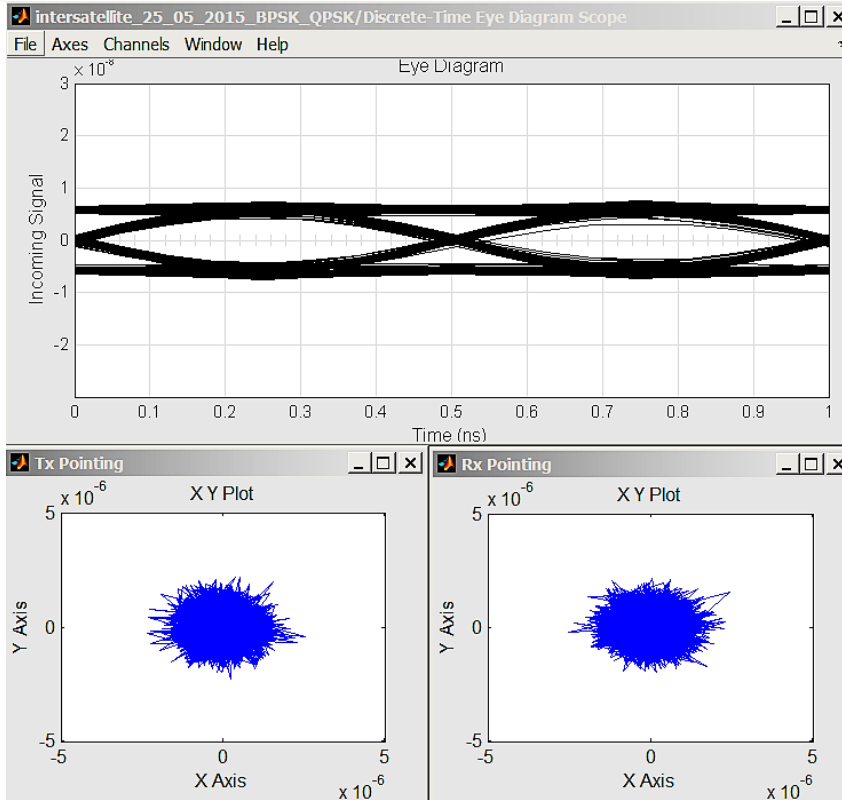
Şekil 62. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma = 1 \mu\text{rad}$, $D = 16 \text{ cm}$)



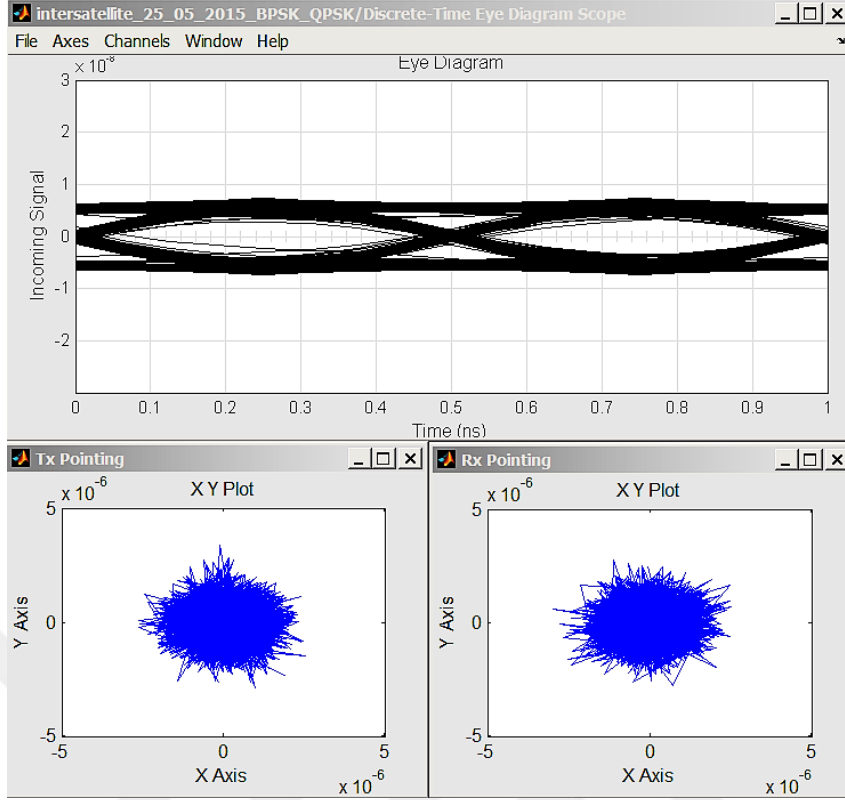
Şekil 63. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma = 1.5 \mu\text{rad}$, $D = 16 \text{ cm}$)



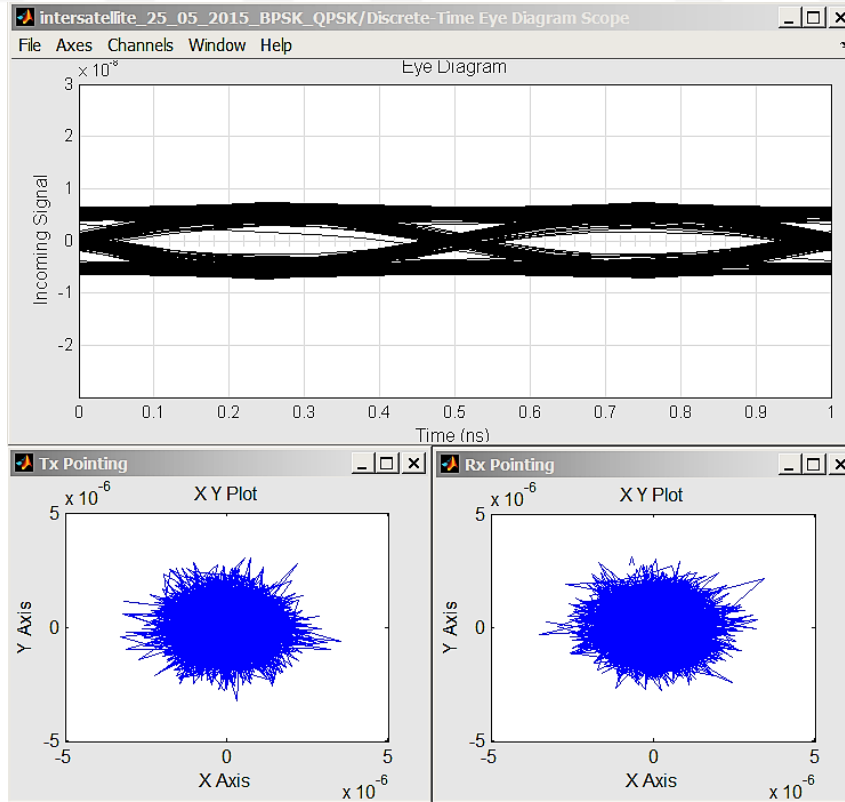
Şekil 64. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma = 2\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)



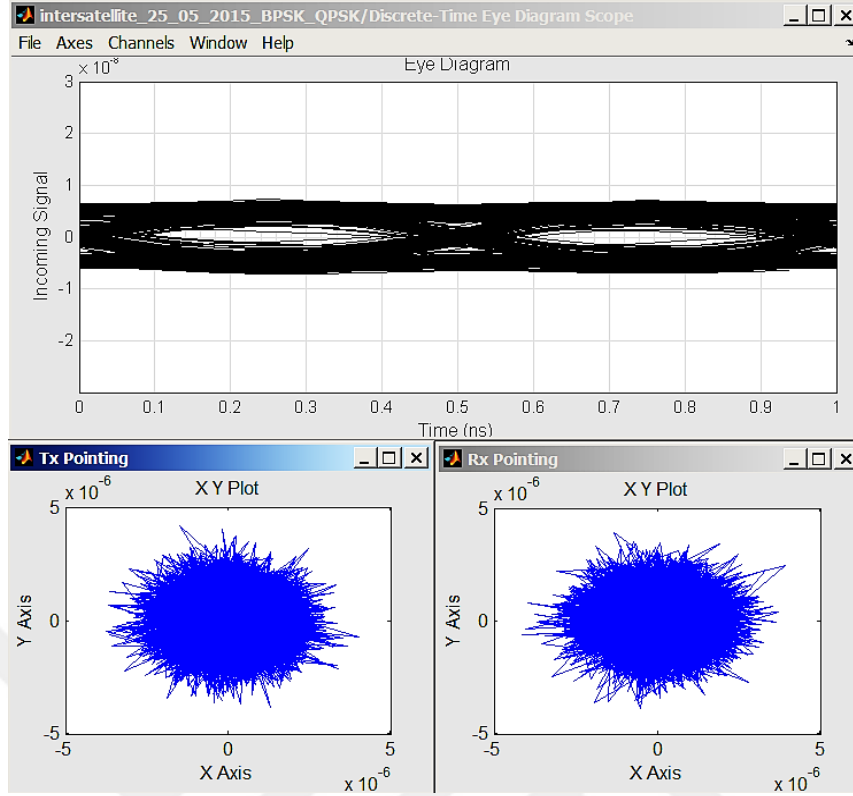
Şekil 65. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma = 2.5\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)



Şekil 66. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma=3\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)



Şekil 67. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma=3.5\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)

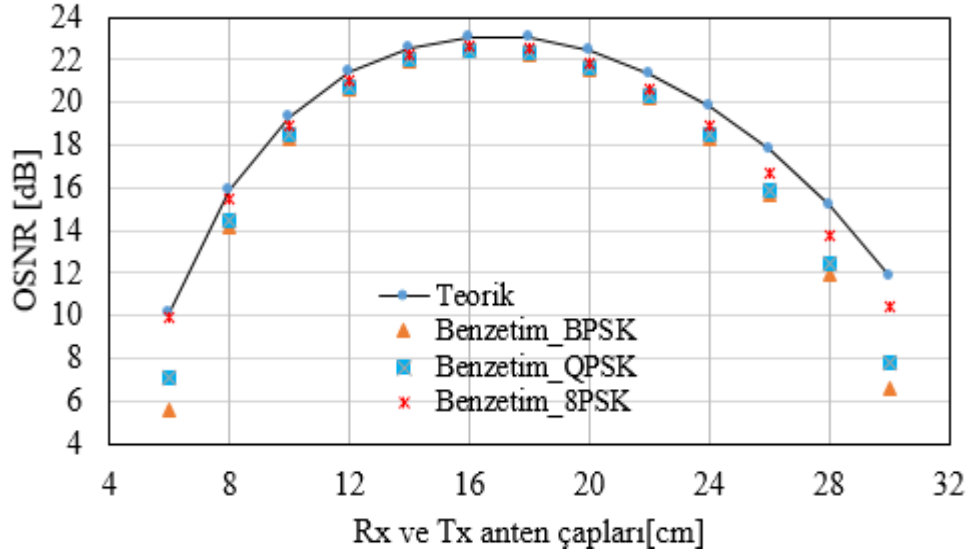


Şekil 68. Optik bağlantı göz diyagramı ve titreşimler ($\sigma=4\mu\text{rad}$, $D=16\text{ cm}$)

Şekil 62’den Şekil 68’e kadar görüldüğü gibi aynı anten çapları için göz diyagramları çizildiğinde titreşim değeri arttıkça alınan işaretteki bozulmalar da artmaktadır.

Öte yandan, oluşturulan model için LEO-GEO arasında BPSK, QPSK ve 8PSK modülasyonları ile benzetimler de yapılmıştır. Bu benzetimlerde, Tablo 24’teki optik bağlantı parametreleri kullanılmış ve teorik değerlerle karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar Şekil 69’da özetlenmiştir. Şekildeki OSNR, optik işaret gürültü gücünü göstermektedir.

Şekil 69’dan da görüldüğü gibi sunulan model, özellikle optimum anten çapı ve bu değere yakın değerler için teorik verilere oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Birçok durumda teorik değere olan yaklaşım 1 dB’nin de oldukça altında gerçekleşmiştir. Ancak optik anten çapı çok büyük ve çok küçük olduğunda modelin yaklaşımı kötüleşmektedir. Zira çok büyük optik antenlerde titreşim kaybının arttığı, çok küçük antenlerin de yeterli kazanç sağlayamayacağı açıktır.



Şekil 69. LEO-GEO optik haberleşme benzetim sonuçları

2.8.1.2. GEO-Yer Bağlantısının Modellenmesi

Haberleşmenin bu adımı için hâlihazırda Matlab tarafından sağlanan 'RF link' Simulink modeli ihtiyaca uygun olarak güncellenerek kullanılmıştır. Ancak bu modelleme yapılırken, Bölüm 1.4.3.2.10'da anlatılan istasyon-çerçitleme kazancı da modele dâhil edilmiştir. Söz konusu model kurulurken Tablo 26'daki parametreler kullanılmıştır. Bu parametrelerin kullanılmasıyla oluşturulan örnek bir bağlantı bütçesi Ek-6'da verilmiştir. Çalışma içerisinde görüleceği gibi Ardahan-Tunceli, Ardahan-Bingöl gibi istasyon çiftleri oldukça ideal görünmektedir. Bunun nedeni ise Ardahan ve çevresindeki illerin (örneğin Kars) diğer birçok şehre göre farklı yağmur rejimine sahip olmasıdır [88].

Tablo 26. GEO-Yer RF bağlantı parametreleri

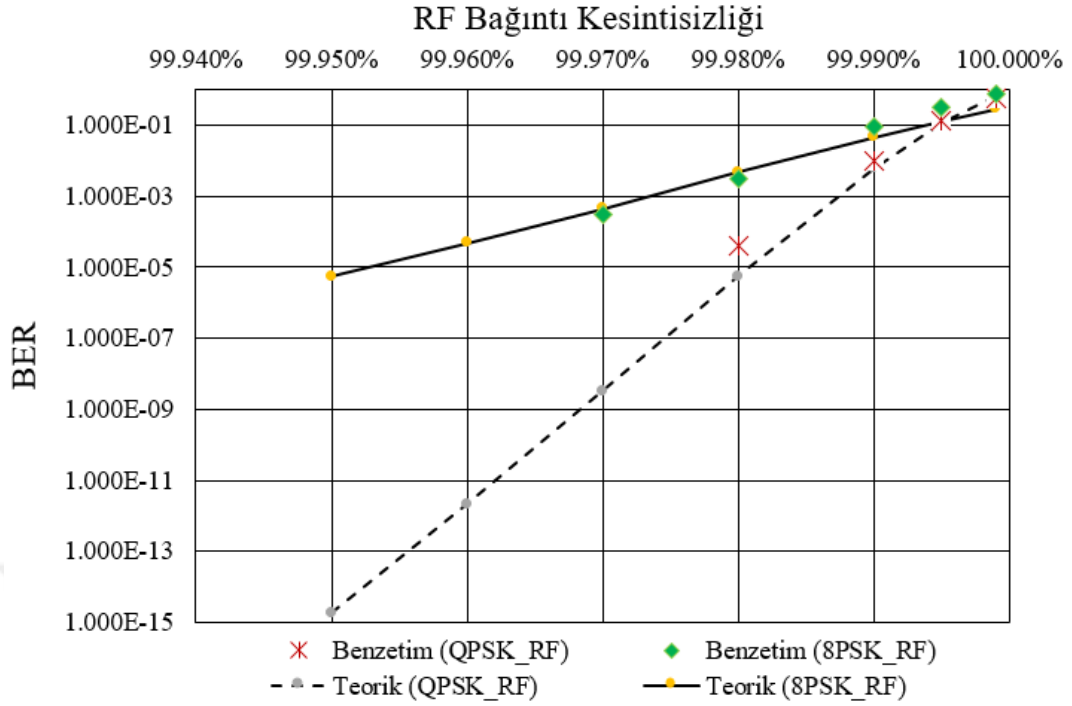
Parametre	Sembol	Değer	Birim
GEO uydu verici anten çapı	D_S	80	cm
GEO uydu anten verimliliği	η_T	0.65	-
Kullanılan Frekans (dairesele kutuplu)	f	40	GHz
Verici gücü	PT	51.76	dBm
Yer istasyonu alıcı anten çapı	DR	4	m
Yer istasyonu alıcı anten verimliliği	η_R	0.65	-
Bağlantı uzaklığı (yaklaşık)	d	37600	km
İlave iletişim kayıpları	LA	2	dB

Tablo 26'daki değerler kullanılarak Türkiye içerisinde, Ardahan ve Bingöl'de örnek olarak seçilen iki farklı istasyon için kesintisizlik yüzdeleri ile bağlantı bütçeleri Bölüm 1.4.3'te detayları verildiği gibi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda yağmur zayıflatması ve istasyon-çeşitleme kazancı aşağıdaki Tablo 27'deki gibi karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 27. RF bağlantı yüzdesi ve bağlantı bütçesi parametreleri

RF bağlantı Kesintisizlik yüzdesi	Ardahan		Bingöl	
	Yağmur Zayıflatması[dB]	İstasyon-eşitleme kazancı[dB]	Yağmur Zayıflatma[dB]	İstasyon-eşitleme kazancı[dB]
99.950%	16.52	5.66	13.25	4.48
99.960%	18.26	6.31	14.67	5.01
99.970%	20.66	7.22	16.64	5.76
99.980%	24.36	8.63	19.70	6.92
99.990%	31.50	11.39	25.64	9.21
99.995%	39.46	14.49	32.32	11.82
99.999%	58.90	22.09	48.98	18.39

Bu bölümde bahsedilen RF bağlantı modeli benzetimleri ise QPSK ve 8PSK için yapılmış ve sonuçlar teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu kısım için yapılan benzetimler sonunda teorik veriler ile yaklaşımlar aşağıdaki Şekil 70'te gösterilmiştir. Gösterilen sonuçlar sadece Ardahan için olsa da benzetim sonuçlarının teorik verilerle doğruluğunu gösterecek kadar hassas olduğu görölmüştür.



Şekil 70. RF bağlantı kesintisizliği ve GEO-Yer bağlantı bütçesi

Şekil 70'ten de görüldüğü gibi, bağlantı kesintisizliği isteği arttıkça alıcıda bağlantı bütçesindeki kayıplar artacak ve dolayısıyla alıcıdaki SNR azalacaktır. Buna bağlı olarak da BER artacaktır. Benzetimlerde, 8PSK için kesintisizlik yüzdesinin %99.96'dan, QPSK için %99.97'den daha küçük olduğu durumlar için BER oldukça azalmakta ve grafikte gösterilmeyecek kadar ihmal edilebilecek değerlere ulaşmaktadır.

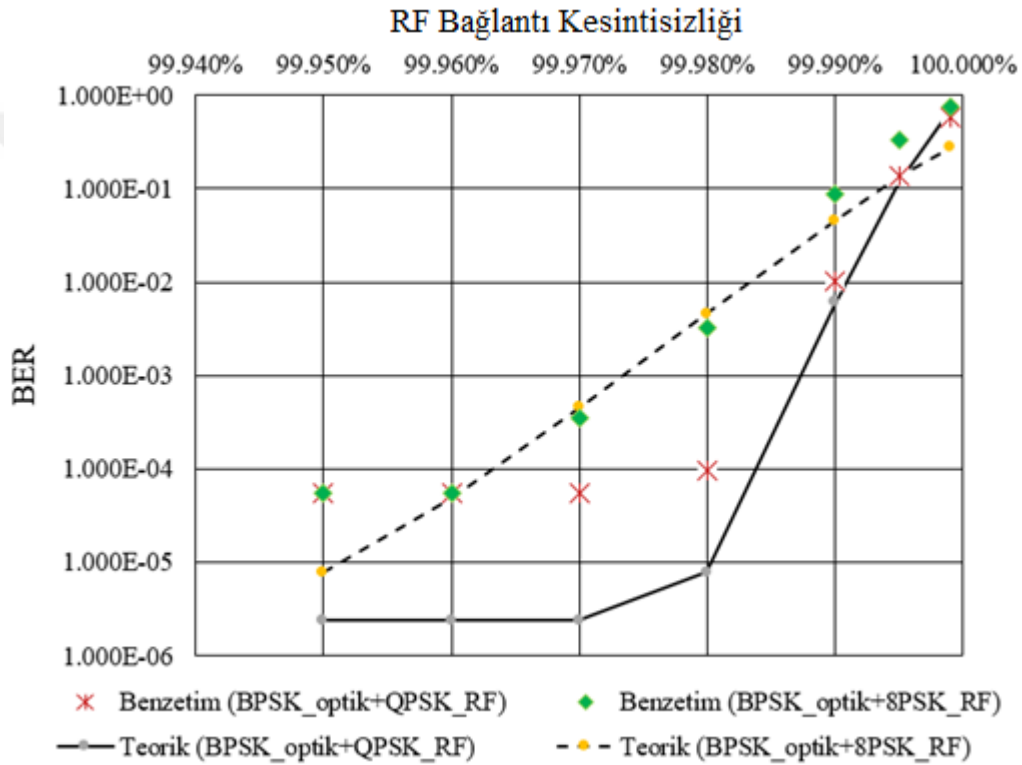
2.8.1.3. LEO-GEO-Yer Bağlantı Sisteminin Modellenmesi

LEO'dan alınan işaretin GEO uydu anahtarlaması ile Yer istasyonuna/istasyonlarına ulaşması gerekmektedir. Dolayısıyla, bu modelleme için GEO uydu optik alıcısına ulaşan bit dizisi GEO uydu RF verici modelinin istediği sembollere dönüştürülmüş ve yer istasyonunda da yeniden sembolden bit dizisi haline çevrilmiştir. Bu bit-sembol ve sembol-bit dönüşümü sayesinde Şekil 56'da gösterildiği gibi LEO uydudan Yer istasyonuna kadar kesintisiz bir bağlantı modellenenmiştir.

Tüm bu bağlantı sisteminin en kötü durumdaki bit-hata-olasılığı ise aşağıdaki gibi olacaktır.

$$BER_{Sistem} = BER_{LEO-GEO} + BER_{GEO-Yer} \quad (124)$$

Gösterimi basitleştirmek için bir önceki bölümde aktarılan LEO-GEO optik bağlantıda BPSK modülasyonu kullanılmıştır. LEO-GEO optik haberleşme kanalında BPSK modülasyonu kullanırken, GEO-Yer arasındaki RF haberleşme kanalında QPSK ve 8PSK modülasyonları ile yapılan benzetim sonuçları ile teorik değerler ile karşılaştırmaları Şekil 71’de verilmiştir.

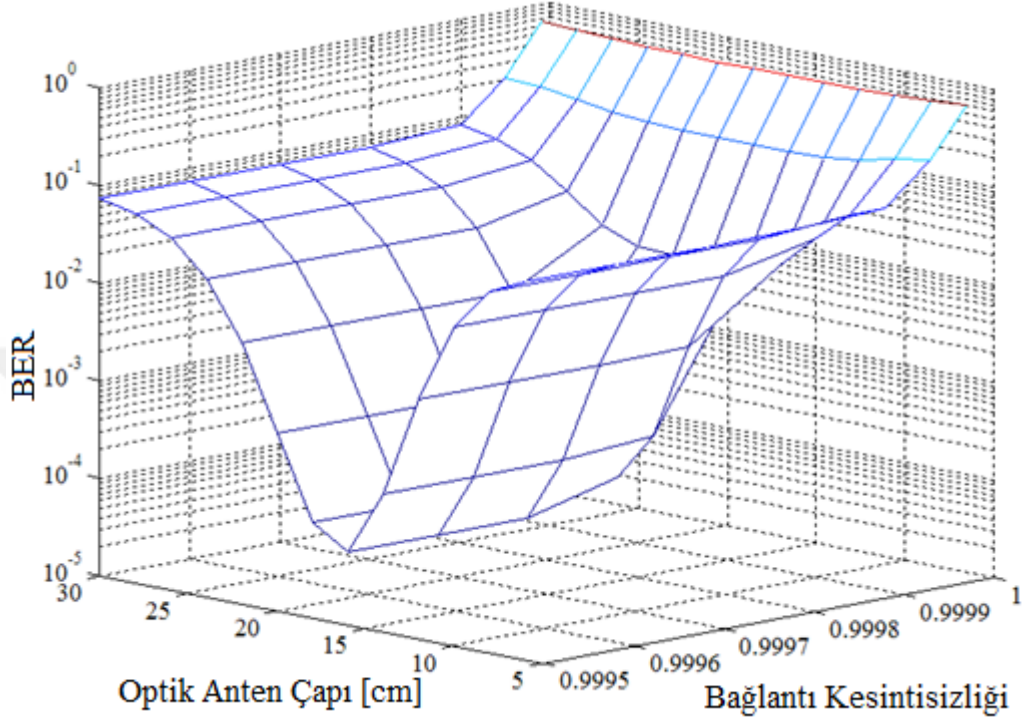


Şekil 71. LEO-GEO-Yer sisteminde bağlantı kesintisizliği ve BER

Şekilden de görüldüğü gibi, RF kanalında QPSK modülasyonu bu sistem parametreleri için %99.97 kesintisizliğe kadar nispeten daha düşük BER sağlayabilirken, 8-PSK modülasyonu tüm benzetimlerde 1×10^{-5} BER’in üzerinde (daha kötü) verim sağlayabilmiştir. Şekil 71’den görüldüğü gibi, RF bağlantı kesintisizliği değeri %99.96’dan daha düşük olduğunda aynı değeri vermektedir. Bunun sebebi, bu tasarım örneği için optik bağlantı kısmındaki BER’in sistemde belirleyici olarak karşımıza çıkmasıdır.

Yukarıdaki benzetimlerden de anlaşılacağı gibi, sistemin sağlıklı çalışabilmesi için hem optik kanal hem de RF kanal bağlantı parametrelerinin dikkatli seçilmesi

gerekmektedir. Uyduların titreşimleri, yer istasyonlarının konumları ve aralarındaki mesafe, GEO uydu üzerindeki anten çapı ve çıkış gücü gibi parametreler yer istasyonuna ulaşan işaretin BER değerini doğrudan belirleyecektir.



Şekil 72. LEO-GEO-Yer bağlantı kesintisizliği, optik anten çapı ve BER

Yukarıdaki Şekil 72’de LEO ile GEO arasında BPSK, GEO ile Yer İstasyon arasında ise QPSK modülasyonu kullanılması halinde kilit sistem parametreleri ile BER arasındaki ilişki görülmektedir. Görüldüğü gibi, optik anten çapı ve yer istasyonu için istenilen kesintisizlik yüzdesi seçimi, alıcıda ulaşılan bit hata olasılığının belirlenmesi noktasında oldukça önemlidir. Optik anten çapları belirlenirken ise kullanılan uyduların titreşim özelliklerinin iyi tespit edilip en uygun optik terminalin belirlenmesi gerektiği açıktır.

3. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışma ile LEO uydu kullanılarak Dünya üzerinden veri toplama sistemine geliştirmeler yapılmış ve önerilen LEO-GEO-Yer sistemi Türkiye örnekleri ilgili kısımlarda aktarılmıştır. Sistemin farklı kısımlarında iyileştirmeler ve geliştirmeler önerilmiş ve bu sayede amaçlanan ‘daha fazla verinin daha güvenli ve daha az kesintiye maruz kalarak Türkiye üzerinden toplanması’ hedefine yaklaşım artırılmıştır.

Önerilen LEO uydu yörüngesi ile Türkiye ve çevresindeki bölge üzerinden veri toplama süresi ile ilgili olarak Göktürk-2 uydusu ile kıyaslandığında %188’e varan oranda artış sağlanmıştır.

Ayrıca, LEO ile GEO arasında analiz edilen optik bağlantının iyileştirilmesi için de çalışmalar yapılmıştır. LEO uydu ile arasındaki bağlantı açıları (azimut ve elevasyon) kullanılarak GEO uydunun yörünge parametrelerinde olası hatalar düzeltilmeye çalışılmıştır. Önerilen yöntem ile bu hatalardan boylam ve yörünge eğikliği hatalarında iyileştirmeler yapılmış ve LEO uydunun tarama alanı ikinci günden başlayarak 200 µrad’a kadar azaltılabilmektedir. Bu hataların iyileştirilmesi sonucunda, GEO uydunun yörüngesindeki hatalara bağlı olmakla birlikte, GEO uyduya günlük aktarılan verinin miktarında birkaç Gbyte’tan birkaç yüz Gbyte’a kadar artışa ulaşılmıştır.

GEO uydunun gönderdiği verileri almak ve işlemek için kurulabilecek yer istasyonlarının konumları hakkında yapılan çalışma kısmında ise, en uygun yer istasyonu konumlarının belirlenmesi için geliştirilen yöntem anlatılmıştır. Bu istasyonların hem GEO uydudan veri alma hem de GEO uydunun uzaydaki konumunu hesaplamak gibi ana işlevleri aynı anda yerine getirmesinin maliyet ve işletme için faydaları göz önüne alınarak, istasyon çeşitlemesi yöntemi önerilmiştir. Bu amaçla birbirinden farklı konumlarda iki yer istasyonu önerilmiştir. İstasyonların konumlarının belirlenmesi için birleşik korelasyon olarak adlandırılan yöntem tez kapsamında geliştirilmiştir. Bu sayede bağlantı kesintisizliğinde tek istasyona kıyasla artırım sağlanmıştır. Tez içerisinde verilen örnek için bağlantı kesintisizliği %99.89’dan %99.95’e yükseltilebilmiştir. Benzer şekilde QPSK modülasyonu kullanan GEO-Yer RF kanalı için 10^{-6} BER istendiği durumda bağlantı kesintisizliğinin %99.959’dan %99.986’a kadar yükseltilebildiği görülmüştür. Bahsedilen kesintisizlik yüzdesine ulaşırken daha ucuz yer antenlerinin kullanılabilmesi de sağlanmıştır. Örneğin hassas takip kabiliyeti gerektirmeyen ve tez içerisinde önerilen istasyonlara benzer şekilde, 2.4 m çapında antenler

kullanan iki istasyonun maliyeti 200-250 bin dolar arasında değişirken, hassas takip kabiliyeti olan ve yaklaşık 7 m çapındaki bir istasyon anteninin maliyeti 2 ile 2.5 milyon dolar arasında olmaktadır. Görüldüğü gibi, önerilen iyileştirmeler ile yaklaşık 10^3 da 1 maliyete, hem daha ucuza daha hassas, hem de RF haberleşmede daha az kesinti yüzdesine sahip sistem tasarlanabilmiştir.

Tüm Türkiye kapsama alanı (veya daha farklı ve nispeten geniş bir kapsama alanı) içerisinde iki farklı istasyon kurulması gerektiğinde ise iklim sınıflandırmasının pratik bir şekilde kullanılabilceğı gösterilmiştir. Bu durumun, GEO uydu üzerinde Q/V bant yerine daha düşük frekans bantlarının kullanılması durumunda kullanışlı olabileceğı öngörülmüştür.

Çalışmanın son kısmında ise optik bağlantıda titreşim modelini tanımlamanın pratik bir yöntemi sunulmuş ve bu amaçla Simulink'teki Rayleigh gürültü blokları kullanılmıştır. Yapılan benzetim sonuçları optik anten çapları optimum değerde veya bu değere yakınen oldukça doğru sonuç vermekte ve genelde 1 dB'nin oldukça altında kalmaktadır.

Tüm sistemin parametrelerinin seçiminde ise, hem uyduların titreşim özelliklerinin hem de yer istasyonlarının konumlarının seçilmesinin önemi, çalışma içerisinde benzetimle gösterilmiştir. Sonuçta, alıcı istasyonda erişilebilecek bağlantı kesintisizliği ve alıcı istasyonlarda görülecek bit hata olasılığının iyileştirilmesinin bu parametrelere yakından bağlı olduğu gösterilmiştir.

Sonuç olarak, önerilen sistemde geliştirilen iyileştirmeler ile;

- LEO uydunun hedef bölge üzerinden topladığı günlük veri miktarı artırılmış,
- LEO uydunun GEO uyduya her erişim için aktarabileceğı veri miktarı artırılmış,
- GEO uydudan aktarılan verilerin Yer istasyonuna aktarımı daha kesintisiz hale getirilmiş,
- Konumları en uygun şekilde seçilen istasyon antenleri ile GEO uydunun yörüngesinin de belirlenebileceğı gösterilmiş ve sistemin kurulum maliyeti 1/10 oranında azaltılmıştır.
- Birbirinden uzak konumlandırılacak istasyonlar için iklim sınıflandırmasının kullanılabilceğı gösterilmiştir.

4. ÖNERİLER

Çalışma içerisinde sistem, bütün olarak ele alınmış ve bu sistemin kısımları için geliştirmeler yapılmıştır. GEO uydunun yörüngesinde boylam ve yörünge eğikliği açısından düzeltmelerin katkısının daha büyük olduğu saptanmış bu değerlerin düzeltilmesi tez kapsamında sağlanmıştır. İlerleyen çalışmalarda etkileri daha az olmasına rağmen diğer tüm yörünge parametrelerinin düzeltilmesi için çalışmalar yapılabilir. Öte yandan, mevcut sistemde düzeltmeler için 24 saatin geçmesi gerekirken bu sürenin kısaltılması aktarılabilecek veri miktarını daha da artıracaktır.

GEO uydunun yere aktaracağı verilerin optik kanal kullanarak yapılması için çalışmalar da ayrıca yürütülebilir. Bunun için şehirler için bulutsuzluk oranı çalışması yapılabilir.

Tek bir LEO uydu yerine LEO uydulardan oluşan bir uydu takımı ile toplanan veri miktarı artırılabilceği gibi aynı yerden daha sık veri alınması da sağlanabilir. Ancak bu durumda tüm sistemin maliyeti artacaktır. Bu gibi faktörler göz önüne alınarak farklı sistemlerin tasarlanması yoluna da gidilebilir.

Öte yandan, LEO ve GEO uydularının gerek donanım ve gerekse yörüngelerinin tasarımı sırasında bir takım kriterlere de uygun olması gerekmektedir. Bunlara örnek olarak; uluslar arası gerekliliklerin sağlanması, yer yüzeyinden toplanması hedeflenen veriye göre LEO uydunun görev yükünün ve ilgili ekipmanlarının belirlenmesi, her iki uydunun titreşim profillerinin mümkün olduğunca bilinmesi sayılabilir. Zira her iki uydu için kritik tasarım gözden geçirme aşamasına gelmeden önce sistemin içerisinde belirsizliklerinin ortadan kaldırılmış olması gereklidir.

Ayrıca veri alınması hedeflenen bölge üzerinden azami geçiş süresinde LEO uydunun yörünge eğikliği açısı en fazla etkiye sahiptir. LEO uydunun irtifası ise daha az etkisi vardır. Ancak görev yüküne ve üzerindeki kamera ve algılayıcı gibi ekipmanların kapasitelerine göre LEO uydunun irtifası da değerlendirilmelidir.

5. KAYNAKLAR

1. Teke, M., Tevrizoğlu, İ., Öztoprak, F., Demirkese, C., Açıkğöz, İ. S., Gürbüz, S. Z., Kıpçü, R. ve Avenoğlu, B., GEOPORTAL: TÜBİTAK UZAY Satellite Data Processing and Sharing System, 7th International Conference on Recent Advances in Space Technology, İstanbul Türkiye, 2015.
2. Taini, G., Pietropaolo, A. ve Notarantonia, A., Criteria and Trade-offs for LEO Orbit Design 2008, Big Sky, MT: IEEE., 1 – 11.
3. Özalp, T., Space as a strategic vision for Turkey and its people, Space Policy,25 (2009) 224-235.
4. De Carlo, P. M., Roberta, L., Marano, G. ve Luca, G. FD., Intersatellite link for Earth Observation Satellites Constellation, SPACEOPS, June 2006, Rome., 1-12.
5. Mulholland, J. E. ve Cadogan, S. A., Intersatellite Laser Crosslinks, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 32,3 (1996) 1011-1020.
6. Sodnik, Z., Furch, B. ve Lutz, H., Free-Space Laser Communication Activities in Europe: SILEX and beyond, 19th Annual Meeting of the IEEE, Lasers and Electro-Optics Society(LEOS), October 2006, Montreal., 78-79.
7. Karafolas, N., Sodnik, Z., Armengol, J. MP. ve Mckenzie, I., Optical Communications in Space, IEEE,Optical Network Design and Modelling International Conference, February 2009, Branucschweis., 1-6.
8. Donaldson, M., Anderson, L. ve Bartamian, L., Communications Satellites, Fifth Edition , AIAA: Aerospace Press Series, Los Angeles CA, 2007.
9. Collins, L. J., Jones, L. R., McElroy, D. R., Siegel, D. A., Ward, W. W. ve Willim, D. K., LES-8/9 communications system test results, 7th Communications Satellite Systems Conference, Nisan 1978, San Diego, CA, U.S.A., 471-478.
10. Solman, F. J., Berglund, C. D., Chick, R. W. ve Clifon, B. J., The K/a/-band systems of the Lincoln Experimental Satellites LES-8 and LES-9, 7th Communications Satellite Systems Conference, Nisan 1978, San Diego,CA,U.S.A., 208-215.
11. Vaughn, S. ve Sorace, R., Demonstration of the TDRS Ka-band Transponder, MILCOM 2000, 21st Century Military Communications Conference, Ekim 2000, Los Angeles, California.,2, 1055-1065.

12. Clark, P. S., Russian Geosynchronous Orbit Satellites, Journal of the British Interplanetary Society, 54,1 (2001) 55-72.
13. Tanaka, M., MATsumoto, Y., Yamamoto, S., Suzuki, K. ve Arimoto, Y., Antenna Pattern Measurement of S-band Active Phased Array on ETS-VI, Electronics and Communications in Japan, 80,4 (1997) 29-38.
14. Wilson, K. E., Lesh, J. R., Araki, K. ve Arimoto, Y., Overview of the Ground-to-Orbit Lasercom Demonstration (GOLD), Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, 1997, G.S. Mecherle.,2990, 23-30.
15. Pratt, S., Rainess, R., Fossa, C. ve Temple, M., An operational and performance overview of the Iridium low earth orbit satellite system, IEEE Communications Surveys Tutorials, 2,2 (1999) 2-10.
16. Fossa, C., Raines, R., Gunsch, G. ve Temple, M., An overview of the Iridium (r) low earth orbit (LEO) satellite system, IEEE Aerospace and Electronics Conference, 1998, Naecon., 152-159.
17. Sturza, M. A., Architecture of the Teledesic Satellite System, International Mobile Satellite Conference, 1995, Ottawa, Canada., 212-220.
18. Ohkawa, M., Takahashi, T., Li, H. B., Iigusa, K. ve Wakana, H., COMETS 21-GHz Advanced Satellite Broadcasting Experiments-Evaluation of Trellis coded 8-PSK Performance, IEEE Transactions on Broadcasting, 46,2 (2000) 144-151.
19. Griffith, D., Johnson, R., Unkauf, M. ve Moy, A., Modelling performance improvements in MILSTAR MDR networks with demand assigned multiple access (DAMA), IEEE MILCOM 1999 Military Communication Conference, Kasim 1999, New Jersey.,2, 1353-1357.
20. Einhorn, A. ve Miller, J., Spectrum management issues related to the AEHF system, Military Communications Conference, Ekim 2007, Florida., 1-7.
21. Leonard, W., MILSTAR and DOD teleport, MILCOM 2000, 21 st Century Military Communications Conference , Ekim 2000, LA, California.,2, 1181-1186.
22. Garcia-Talavera, R., Sodnik, , López, , Alonso-Sánchez, , Viera, ve Oppenhauser, , Preliminary results of the in-orbit test of ARTEMIS with the Optical Ground Station, Free-Space Laser Communication Technologies XIV, Ocak 2002, California.,4635, 38-49.
23. Sodnik, Z., Furch, B. ve Lutz, H., Optical intersatellite communication, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 16,5 (2010) 1051-1057.

24. Shimoda, H., Overview of GCOM, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011, Vancouver, Canada., 4134-4137.
25. Matuoka, M. ve Kodama, S., Coseismic displacement measurement of the 2010 el mayor, mexico earthquake by subpixel correlation from optical satellite images, 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Temmuz 2011, Vancouver, Canada., 4010-4013.
26. Mallette, L., An introduction to satellite based atomic frequency standards, 2008 IEEE Aerospace Conference, Mart 2008, Big Sky, MT., 1-9.
27. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/edrs> 20 Eylül 2015
28. <https://artes.esa.int/news/sentinel-alphasat-laser-link-stable-robust> 20 Ekim 2015
29. Muri, P. ve McNair, J., A survey of communication sub-systems for intersatellite linked systems and cubesat missions, Journal of Communication, 7,4 (2012) 290-308.
30. Begley, D. L., Free-Space Laser Communications: The Agony and the Ecstasy, Laser and Electro-Optics Society 1999 12th Annual Meeting, November 1999, San Francisco.,1, 43-44.
31. Hashim, A. H., Modeling and Performance Study of Inter-Satellite Optical Wireless Communication System, International Conference on Photonics (ICP), Mayıs 2010, Langkawi, Kedah., 1-4.
32. Krainak, M. A., Inter-satellite communications optoelectronics research at the Goddard Space Flight Center, Aerospace and Electronic Systems Magazine, 7,9 (1992) 44-47.
33. Arnon, S. ve Kopeika, N. S., The performance limitations of free space optical communication satellite networks due to vibrations—analog case, Optical Engineering, 36,1 (1997) 175-182.
34. Koudelka, O., Schmidt, M. ve Ebert, J., Design of a 40/50 GHz satellite ground station for fade mitigation experiments, Acta Astronautica, 86,1 (2013) 68-76.
35. Koudelka, O., Q/V-band communication and propagation experiments using ALPHASAT, Acta Astronautica, 69,11-12 (2011) 1029-1037.
36. Panagopoulos, A. D., Arapoglou, P. DM., Kanellopoulos, J. D. ve Cottis, P. G., Long-term rain attenuation probability and site diversity gain prediction formulas, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 53,7 (2005) 2307 - 2313.

37. Fiser, O., Site Diversity Gain Estimated from Rain Rate Records, Radioengineering, 12,1 (2003) 8-11.
38. Kuhn, K. J., Laser Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
39. Alda, J., Laser and Gaussian beam propagation and transformation." Encyclopedia of optical engineering, Encyclopedia of optical engineering, 1,1 (2003) 999-1013.
40. Conradi, J., The Distribution of Gain in Uniformly Multiplying Avalanche, IEEE Transactions on Electron Devices, 19,6 (1972) 713-718.
41. McIntyre, R., The Distribution of Gain in Uniformly Multiplying Avalanche, IEEE Transactions on Electron Devices, 19,6 (1972) 703-712.
42. Keiser, G., Optical Communications Essentials, 1st , McGraw-Hill, New York, 2003.
43. Optoelectronics, P. ,Aplication Notes, High Performance Sensors. http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-6538APP_AvalanchePhotodiodesUsersGuide.pdf
44. Aviv, D. G., Laser Space Communications, 1st , Artech House, London, 2006.
45. Smutny, B. ve Lange, R., Homodyne BPSK based Optical Inter-Satellite Link, AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Haziran 2006, San Diago.,1, 1-10.
46. Hemmati, H., Near Earth Laser Communication, First Edition , CRC Press, New York, 2008.
47. Chen, C. C. ve Gardner, C. S., Impact of random pointing and tracking errors on the design of coherent and incoherent optical intersatellite communication links, IEEE Transactions Communication, 37,3 (1989) 252-260.
48. Yin, K., Jiang, H., Yang, H., Qiong, W. U. ve Yu-Lan, Q. I., Effect of Satellite Vibration on Performance of Free-space Optical Communication , Journal of Communcation and Computer, 4,1 (2007) 41-45.
49. Arnon, S. ve Kopeika, N. S., Laser satellite communication networks-vibration effects and possible solutions, Proceedings of the IEEE, 85,10 (1997) 1646 - 1661.
50. Baister, G. C. ve Gatenby, P. V., Why optical communication links are needed for future satellite constellations, IEEE Colloquium, What's New in Satellite Communications, April 1996, London., 601-610.

51. Arnon, S., Rotman, S. ve Kopeika, N. S., Optimum transmitter optics aperture for satellite optical communication, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 34,2 (1998) 590 - 596.
52. Yılmaz, Ü. C. ve Çavdar, İ. H., Simplified Solution for Osculating Keplerian Parameter Corrections of GEO Satellite for Intersatellite Optical Link, Advances in Space Research, 55,7 (2015) 1878-1884.
53. Roy, A. E., Orbital Motion, 4th , 1, Institute of Physics Publishing, London, 2005.
54. Standish, E. ve Williams, J. G., Orbital Ephemerides of the Sun, Moon and Planets. ,NASA.
ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/ioms/ExplSupplChap8.pdf, 01 Eylül 2015
55. Aerospatiale, E., Turksat Engineering Training Documents, Alcatel, Cannes, 1993.
56. Maral, G., Bousquet, M. ve Sun, Z., Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology, 5th , Wiley & Sons Ltd, UK, 2009.
57. Ha, T. T., Digital Satellite Communications, 2nd , McGraw Hill, New York, 1990.
58. Roddy, D., Satellites Communications, 3rd , McGraw Hill International, Singapore, 2001.
59. Intelsat, Earth Station Technology, Washington, DC, 1999.
60. ITU-R, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, Recommendation ITU-R P. 838-3, Geneva, 2005.
61. ITU-R, Rain height model for prediction methods, Recommendation ITU-R P.839-4, Genevo, 2013.
62. ITU-R, Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems, Recommendation.P.618-11, Geneva, 2013.
63. Chetty, P., Satellite Technology and Its Applications, 1st , TAB Books Inc, PA, 1988.
64. Rossi, T., De Sanctis, M., Di Mattia, D. ve Ruggieri, M., Performance analysis and optimization of site diverstiy techniques for EHF satellite links, IEEE Aerospace Conference, March 2011, Big Sky, MT., 1-11.
65. <http://uzay.tubitak.gov.tr/tr/projeler/gokturk-2>, 15 Aralık 2015

66. Yılmaz, Ü. C. ve Çavdar, İ. H., Türkiye Kapsaması İçin En Uygun Yakın Yörünge Uydu Eğikliği Açısının Hesabı ve Potansiyel bir TÜRK SAT Uydu ile Optik İletişimde Doppler Frekans Kaymasına Etkisi, Çankaya Üniversitesi, 4. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Nisan 2011, Ankara., 312-317.
67. Fu, L. L., Christensen, E. J., Yamarone, C. A., Lefebvre, M., Menard, Y., Dorrer, M. ve Escudier, P., TOPEX/POSEIDON mission overview, Journal of Geophysical Research, 99,C12 (1994) 24369-24381.
68. Bertiger, W. I., Bar-Sever, Y. E., Christensen, E. J., Davis, E. S., Guinn, J. R., Haines, B. J., Ibanez-Meier, R. W., Jee, J. R., Lichten, S. M., Melbourne, W. G., Muellerschoen, R. J., Munson, T. N., Vigue, Y., W, S. C., Yunck, T. P., Schutz, B. E., Abusali, P. A., Rim, H. J., Watkins, M. M. ve Willis, P., GPS precise tracking of TOPEX/POSEIDON: results and implications, Journal of Geophysical Research, 99,C12 (1994) 24449–24464.
69. Yılmaz, Ü. C., Çavdar, İ. H. ve Şakacı, C., Determining the Accuracy of the On Board Propagation Software for Optical Intersatellite Link, SPACOMM, The Fourth International Conference on Advances in Satellite and Space Communication, Nisan 2012, Chamonix/Mont Blanc., 36-40.
70. Proakis, G. ve Salehi, M., Communication Systems Engineering, 2nd , Prentice-Hall, New Jersey, 2002.
71. Yılmaz, Ü. C. ve Çavdar, İ. H., The Effects of Orbital Parameters Accuracy on Doppler Frequency Shift for Intersatellite Optical Communication, AICT2013, The 7th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, Ekim 2013, Baku, Azerbaijan., 1-3.
72. Dow, J. M., Neilan, R. E. ve Gendt, G., The International GPS Service: celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade, Advances in Space Research, 36,3 (2005) 320-326.
73. Jaggi, A., Hugentobler, U., Bock, H. ve Beutler, G., Precise orbit determination of GRACE using undifferenced or doubly differenced GPS data, Advances in Space Research, 39,10 (2007) 1612-1619.
74. Haines, B., Bar-Server, Y., Bertiger, W., Desai, S. ve Willis, P., One-centimeter orbit determination for Jason-1: new GPS-based strategies, Marine Geodesy, 27,1-2 (2004) 299-318.
75. Kang, Z., Tapley, B., Bettudpur, S., Ries, J., Nagel, P. ve Pastor, R., Precise orbit determination for the GRACE mission using only GPS data, Journal of Geodesy, 80,6 (2006) 322-331.
76. Kroes, R., Montenbruck, O., Bertiger, W. ve Visser, P., Precise GRACE baseline determination using GPS, GPS Solutions, 9,1 (2005) 21-31.

77. Tolker, N. T. ve Oppenhauser, G., In-orbt test result of an operational intersatellite link between Artemis and SPOT 4, Free-Space Laser Communication Technologies, XIV, April 2002, San Jose CA.,4635, 1-15.
78. Li, X., Yu, S., Ma, J. ve Tan, L., Analytical expression and optimization of spatial acquisition for intersatellite optical communications, Optical Express, 19,3 (2011) 2381-2390.
79. Arnon, S., Power versus stabilization for laser satellite communication, Applied Optics, 38,15 (1999) 229-3233.
80. Arbesser-Rastburg, B., Radiowave propagation modelling for new satcom services at Ku-band and above, COST 255 Final Report, ESA Publications Divisions, SP-1252, 2002.
81. Yılmaz, Ü. C. ve Çavdar, İ. H., Determination of the Ground Station Locations for both Dual-Site Ranging and Site-Diversity at Q/V-band Satellite Communication for an Intersatellite System Scenario, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 16,3 (2015) 445-450.
82. Soop, E. M., Handbook of Geostationary Orbits, , Kluwer Academic Publishers, Microsom Inc, California, 1983.
83. Possner, M. P., Fadrique, F. M., Mate, A. A., Garcia, G., Byram, S., Choon, C. P. ve Hasnibi, W., Operational and Performance Aspects of a Turn-Around Tracking System, SpaceOps 2010, April 2010, Huntsville, Alabama., 2374-2381.
84. Blanco, M., Protected SATCOM On-Demand for Mobile Terminals: Waveform and System/Terminal Tradeoff, 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Eylül 2010, California., 253-265.
85. Barbaliscia, F. ve Paraboni, A., Joint statistics of rain intensity in eight Italian locations for satellite communication networks, Electronic Letters, 18, (1982) 118-119.
86. Luglio, M., Mancini, R., Riva, C., Paraboni, A. ve Barbaliscia, F., Large scale site diversity for satellite communication networks, International Journal of Satellite Communication, 20,4 (2002) 251-260.
87. Otsu, Y., Takahashi, Y. ve Kozu, T., Simultaneous occurrence probabilities of rainfall among nine locatio in Japan, Electronic Letters, 22, (1986) 937-938.
88. Peel, M. C., Finlayson, B. L. ve McMahon, T. A., Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, Hydrology and Earth System Science, 11, (2007) 1633-1644.

89. ITU, Characteristics of precipitation for propagation modelling, Recommendation P.618-11, ITU-R, Geneva, 2012.



6. EKLER

Ek 1. LEO-GEO arası optik bağlantı bütçesi örneği

Ek Tablo 1. LEO-GEO arası optik bağlantı bütçesi

Bağlantı Parametreleri	Değer	Birim	Değer	Birim
LEO Uydu irtifası	500	km		
Veri hızı	2000	Mbps		
Verici (Tx) Teleskop Çapı	16	cm	0.16	m
Alıcı (Rx) Teleskop Çapı	16	cm	0.16	m
Lazer Dalga boyu	1550	nm		
Tx Gücü	5000	mW	5	W
LEO-GEO arası mesafe (azami)	44310	km		
Tx titreşimi	2.9	µrad	2.9E-06	rad
Rx titreşimi	2.9	µrad	2.9E-06	rad
Tx huzme açıcı	9.6875	µrad	9.69E-06	rad
Titreşimden kaynaklık kayıp (Tx)	0.41294	-	-3.84	dB
Titreşimden kaynaklık kayıp (Tx)	0.41294	-	-3.84	dB
Lazerin GEO uydudaki genişliği	0.42925	km	429.25	m
Huzme merkezinden azami sapma	128.499	m	0.1285	km
Alıcıda oluşan güç yoğunluğu			1.44E-05	W/m ²
Verici Verimi	0.65		-1.8709	dB
Alıcı Verimi	0.65		-1.8709	dB
Verici				
Verici Gücü			36.9897	dBm
Verici Kazancı			110.219	dB
Vericideki Optik Kayıp			-1	dB
Kanal				
Serbest Uzay Kaybı			-291.108	dB
Alıcı				
Alıcı Kazancı			110.219	dB
Alıcıdaki Optik Kayıp			-1	dB
Alıcıya ulaşan güç	3.087E-08	W	-47.104	dBm
Takip için ayrılan güç			-3.0103	dB
Alınan efektif güç	9.74E-09	W	-50.115	dBm

Ek 2. Türkiye için seçilen hedef bölge sınır koordinatları

Ek Tablo 2. Türkiye için seçilen hedef bölge sınır koordinatları

Enlem [derece]	Boylam [derece]
44.9194	23.7066
46.1631	29.8102
46.1091	36.7857
45.5683	42.12
43.2972	46.1719
37.1867	48.3774
32.5904	44.0177
32.0496	36.2215
32.1037	26.8353
35.186	22.2191
40.9179	20.783

Ek 3. GEO yörünge hatalarının azimut(β) ve elevasyon(α) açılarına etkisi

$$\begin{bmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\alpha}{\partial a} & \frac{\partial\alpha}{\partial e} & \frac{\partial\alpha}{\partial i} & \frac{\partial\alpha}{\partial\theta} & \frac{\partial\alpha}{\partial\omega} & \frac{\partial\alpha}{\partial\Omega} \\ \frac{\partial\beta}{\partial a} & \frac{\partial\beta}{\partial e} & \frac{\partial\beta}{\partial i} & \frac{\partial\beta}{\partial\theta} & \frac{\partial\beta}{\partial\omega} & \frac{\partial\beta}{\partial\Omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta e \\ \Delta i \\ \Delta\theta \\ \Delta\omega \\ \Delta\Omega \end{bmatrix}$$

$$\Delta\alpha = \frac{\partial\alpha}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial\alpha}{\partial e} \Delta e + \frac{\partial\alpha}{\partial i} \Delta i + \frac{\partial\alpha}{\partial\theta} \Delta\theta + \frac{\partial\alpha}{\partial\omega} \Delta\omega + \frac{\partial\alpha}{\partial\Omega} \Delta\Omega$$

$$\Delta\beta = \frac{\partial\beta}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial\beta}{\partial e} \Delta e + \frac{\partial\beta}{\partial i} \Delta i + \frac{\partial\beta}{\partial\theta} \Delta\theta + \frac{\partial\beta}{\partial\omega} \Delta\omega + \frac{\partial\beta}{\partial\Omega} \Delta\Omega$$

Bu matriste aşağıdaki terimler birbirine eşittir.

$$\frac{\delta\alpha}{\delta\Omega} = \frac{\delta\beta}{\delta\Omega} = \frac{\delta\beta}{\delta\omega} = \frac{\delta\beta}{\delta\theta} = A_1$$

$$\frac{\delta\alpha}{\delta\omega} = \frac{\delta\alpha}{\delta\theta} = A_2$$

Bu terimler matriste yerine konulduğunda aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{bmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\alpha}{\partial a} & \frac{\partial\alpha}{\partial e} & \frac{\partial\alpha}{\partial i} & A_1 & A_1 & A_1 \\ \frac{\partial\beta}{\partial a} & \frac{\partial\beta}{\partial e} & \frac{\partial\beta}{\partial i} & A_1 & A_2 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta e \\ \Delta i \\ \Delta\theta \\ \Delta\omega \\ \Delta\Omega \end{bmatrix}$$

a: GEO uydunun yörüngesinin yarı asal eksen uzunluğu,

e: GEO uydunun yörüngesinin dışmerkezliliği,

i: GEO uydunun yörünge eğikliği açısı,

θ : GEO uydunun gerçek ayrıklığı,

ω : GEO uydunun yörüngesinin yerberi argümanı,

Ek-3'ün devamı

Ω : GEO uydunun yörüngesinin yükseliş düğümü,

LEO_x: LEO uydunun konumunun Kartezyen koordinatlarda x bileşeni,

LEO_y: LEO uydunun konumunun Kartezyen koordinatlarda y bileşeni,

LEO_z: LEO uydunun konumunun Kartezyen koordinatlarda z bileşeni,

olmak üzere;

$$\frac{\partial \alpha}{\partial a} =$$

$$\begin{aligned} & ((1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(\theta + \omega) * \sin(i)/((a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - \text{LEO_x})^2 + (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - \text{LEO_y})^2)^{1/2} - 1/2 * (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(\theta + \omega) * \sin(i) - \text{LEO_z})/((a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - \text{LEO_x})^2 + (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - \text{LEO_y})^2)^{3/2} * (2 * (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - \text{LEO_x}) * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) + 2 * (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - \text{LEO_y}) * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega))))/(1 + (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(\theta + \omega) * \sin(i) - \text{LEO_z})^2/((a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - \text{LEO_x})^2 + (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - \text{LEO_y})^2)) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial e} =$$

$$\begin{aligned} & ((-2 * a * e/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(\theta + \omega) * \sin(i) - a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta))^2 * \sin(\theta + \omega) * \sin(i) * \cos(\theta))/((a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - \text{LEO_x})^2 + (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - \text{LEO_y})^2)^{1/2} - 1/2 * (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(\theta + \omega) * \sin(i) - \text{LEO_z})/((a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - \text{LEO_x})^2 + (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - \text{LEO_y})^2)^{3/2} * (2 * (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - \text{LEO_x}) * (-2 * a * e/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta))^2 * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) * \cos(\theta)) + 2 * (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - \text{LEO_y}) * (-2 * a * e/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta))^2 * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) * \cos(\theta))))/(1 + (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(\theta + \omega) * \sin(i) - \text{LEO_z})^2/((a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - \text{LEO_x})^2 + (a * (1 - e^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - \text{LEO_y})^2)) \end{aligned}$$

Ek-3'ün devamı

$$\frac{\partial \alpha}{\partial i} =$$

$$\begin{aligned} & (a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(\theta + \omega) * \cos(i)/((a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \\ & (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x)^2 + (a * (1 - e.^2)/(1 + e * \\ & \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - LEO_y)^2)^{(1/2)} - 1/2 * (a * \\ & (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(\theta + \omega) * \sin(i) - LEO_z)/((a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \\ & (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x)^2 + (a * (1 - e.^2)/(1 + e * \\ & \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - LEO_y)^2)^{(3/2)} * (2 * (a * \\ & (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x) * a \\ & * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega) - 2 * (a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) \\ & * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - LEO_y) * a * (1 - e.^2)/(1 + e * \\ & \cos(\theta)) * \sin(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)))/(1 + (a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(\theta + \omega) * \sin(i) \\ & - LEO_z)^2/((a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \\ & \sin(\Omega)) - LEO_x)^2 + (a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta \\ & + \omega) * \cos(\Omega)) - LEO_y)^2)) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial a} =$$

$$\begin{aligned} & ((1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)))/(a * \\ & (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x) - (a * \\ & (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - LEO_y)/(a * \\ & (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x)^2 \\ & * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)))/(1 + (a * \\ & (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - LEO_y)^2/(a * \\ & (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x)^2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial e} =$$

$$\begin{aligned} & ((-2 * a * e/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - a * \\ & (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta))^2 * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) * \cos(\theta))/(a * \\ & (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x) - \\ & (a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - \\ & LEO_y)/(a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) \\ & - LEO_x)^2 * (-2 * a * e/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \\ & \sin(\Omega)) - a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta))^2 * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) \\ & * \cos(\theta)))/(1 + (a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \\ & \cos(\Omega)) - LEO_y)^2/(a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \\ & \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x)^2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial i} =$$

$$\begin{aligned} & (-a * (1 - e.^2)/(1 + e * \cos(\theta)) * \sin(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega))/(a * (1 - e.^2)/(1 + e * \\ & \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x) - (a * (1 - e.^2)/(1 + \\ & e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \sin(\Omega) + \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \cos(\Omega)) - LEO_y)/(a * (1 - e.^2)/(1 + \\ & e * \cos(\theta)) * (\cos(\theta + \omega) * \cos(\Omega) - \cos(i) * \sin(\theta + \omega) * \sin(\Omega)) - LEO_x)^2 * a * (1 - \end{aligned}$$

Ek-3'ün devamı

$$\frac{e^2}{(1 + e \cdot \cos(\theta))} \cdot \sin(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega) / (1 + (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega) + \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega)) - LEO_y)^2 / (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega)) - LEO_x)^2$$

A₁=

$$\begin{aligned} & (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (-\sin(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega) + \cos(i) \cdot \cos(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega)) / (a \\ & \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega)) - LEO_x) - \\ & (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega) + \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega)) - \\ & LEO_y) / (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega)) \\ & - LEO_x)^2 \cdot a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta)) \cdot (-\sin(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \cos(i) \cdot \cos(\theta + \omega) \cdot \\ & \sin(\Omega)) / (1 + (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega) + \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \\ & \cos(\Omega)) - LEO_y)^2 / (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \cos(i) \cdot \sin(\theta + \\ & \omega) \cdot \sin(\Omega)) - LEO_x)^2 \end{aligned}$$

A₂=

$$\begin{aligned} & (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot \cos(\theta + \omega) \cdot \sin(i) / ((a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot \\ & (\cos(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega)) - LEO_x)^2 + (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \\ & \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega) + \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega)) - LEO_y)^2)^{1/2} - 1/2 \cdot (a \\ & \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \sin(i) - LEO_z) / ((a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot \\ & (\cos(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega)) - LEO_x)^2 + (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \\ & \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega) + \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega)) - LEO_y)^2)^{3/2} \cdot (2 \cdot (a \\ & \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega)) - LEO_x) \cdot a \\ & \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta)) \cdot (-\sin(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \cos(i) \cdot \cos(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega)) + 2 \cdot (a \\ & \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot (\cos(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega) + \cos(i) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega)) - LEO_y) \\ & \cdot a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta)) \cdot (-\sin(\theta + \omega) \cdot \sin(\Omega) + \cos(i) \cdot \cos(\theta + \omega) \cdot \cos(\Omega))) / (1 \\ & + (a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \cos(\theta))) \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \sin(i) - LEO_z)^2 / ((a \cdot (1 - e^2) / (1 + e \cdot \\ & \cos(\theta))). \end{aligned}$$

Ek 4. Türkiye illeri için birleşik korelasyon sonuçları (p)

Ek Tablo 3. Türkiye illeri için birleşik korelasyon katsayıları

	ADANA	ADIYAMAN	AFYONKAR	AKSARAY	AMASYA	ANKARA	ANTAKYA	ANTALYA	ARDAHAN	ARTVIN
ADANA										
ADIYAMAN	0.0331									
AFYONKARAHISAR	0.0099	0.0036								
AKSARAY	0.0272	0.0183	0.0199							
AMASYA	0.0134	0.0136	0.0103	0.0245						
ANKARA	0.0117	0.0073	0.0280	0.0278	0.0265					
ANTAKYA	0.0493	0.0358	0.0051	0.0200	0.0084	0.0081				
ANTALYA	0.0184	0.0062	0.0196	0.0126	0.0033	0.0086	0.0111			
ARDAHAN	0.0019	0.0091	0.0000	0.0005	0.0009	0.0003	0.0021	0.0002		
ARTVIN	0.0035	0.0132	0.0002	0.0026	0.0069	0.0010	0.0032	0.0003	0.0301	
AYDIN	0.0064	0.0015	0.0190	0.0085	0.0021	0.0090	0.0035	0.0303	0.0000	0.0001
BALIKESIR	0.0030	0.0008	0.0106	0.0055	0.0020	0.0080	0.0014	0.0160	0.0000	0.0001
BARTIN	0.0056	0.0030	0.0030	0.0034	0.0080	0.0078	0.0020	0.0052	0.0009	0.0013
BATMAN	0.0105	0.0322	0.0007	0.0070	0.0071	0.0022	0.0155	0.0009	0.0116	0.0162
BAYBURT	0.0003	0.0021	0.0009	0.0062	0.0104	0.0035	0.0017	0.0002	0.0201	0.0098
BILECIK	0.0062	0.0025	0.0315	0.0138	0.0095	0.0253	0.0030	0.0135	0.0001	0.0003
BINGOL	0.0141	0.0405	0.0012	0.0097	0.0118	0.0037	0.0159	0.0014	0.0151	0.0230
BOLU	0.0082	0.0038	0.0209	0.0180	0.0162	0.0365	0.0040	0.0068	0.0001	0.0008
BURDUR	0.0123	0.0041	0.0457	0.0201	0.0072	0.0166	0.0069	0.0460	0.0001	0.0002
BURSA	0.0059	0.0019	0.0217	0.0105	0.0062	0.0175	0.0028	0.0150	0.0001	0.0002
CANAKKALE	0.0015	0.0004	0.0074	0.0026	0.0011	0.0046	0.0007	0.0112	0.0000	0.0000
CANKIRI	0.0094	0.0066	0.0181	0.0220	0.0248	0.0616	0.0048	0.0046	0.0003	0.0007
CORUM	0.0078	0.0054	0.0107	0.0217	0.0838	0.0301	0.0040	0.0010	0.0013	0.0022
DENIZLI	0.0103	0.0029	0.0305	0.0138	0.0040	0.0143	0.0060	0.0340	0.0001	0.0001
DIYARBAKIR	0.0159	0.0421	0.0014	0.0103	0.0097	0.0036	0.0195	0.0017	0.0113	0.0162
EDIRNE	0.0005	0.0001	0.0032	0.0009	0.0007	0.0026	0.0002	0.0034	0.0000	0.0000
ELAZIG	0.0139	0.0391	0.0026	0.0167	0.0155	0.0067	0.0170	0.0019	0.0050	0.0139
ERZINCAN	0.0049	0.0129	0.0019	0.0113	0.0164	0.0056	0.0061	0.0003	0.0045	0.0111
ERZURUM	0.0009	-0.0025	0.0004	0.0036	0.0050	0.0014	0.0001	0.0003	0.0267	0.0023
ESKISEHIR ANADO	0.0041	0.0015	0.0341	0.0092	0.0074	0.0206	0.0017	0.0081	0.0000	0.0000
GAZIANTEP	0.0410	0.0725	0.0045	0.0194	0.0112	0.0071	0.0481	0.0090	0.0052	0.0082
GIRESUN	0.0050	0.0084	0.0005	0.0026	0.0091	0.0007	0.0027	0.0011	-0.0071	0.0148
GOZTEPE/ISTANBUL	0.0038	0.0015	0.0094	0.0055	0.0043	0.0092	0.0016	0.0124	0.0001	0.0002
GUMUSHANE	0.0049	0.0110	0.0018	0.0106	0.0193	0.0070	0.0048	0.0002	0.0093	0.0170
HAKKARI	0.0031	0.0153	0.0001	0.0017	0.0023	0.0005	0.0051	0.0001	0.0101	0.0126
ISPARTA	0.0136	0.0050	0.0456	0.0193	0.0069	0.0175	0.0087	0.0564	0.0001	0.0003
IZMIR	0.0037	0.0009	0.0126	0.0046	0.0012	0.0051	0.0020	0.0247	0.0000	0.0000
KAHRAMANMARAS	0.0471	0.0673	0.0064	0.0259	0.0163	0.0115	0.0450	0.0113	0.0059	0.0088
KARABUK	0.0042	0.0026	0.0095	0.0097	0.0144	0.0243	0.0019	0.0029	0.0000	0.0004
KARAMAN	0.0303	0.0153	0.0174	0.0381	0.0108	0.0155	0.0212	0.0212	0.0004	0.0010
KARS	0.0016	0.0075	0.0000	0.0001	0.0002	0.0001	0.0016	0.0001	0.1181	0.0135
KASTAMONU	0.0012	0.0022	0.0085	0.0092	0.0179	0.0245	0.0015	0.0028	0.0022	0.0012
KAYSERI	0.0180	0.0166	0.0095	0.0413	0.0254	0.0201	0.0169	0.0036	0.0006	0.0038
KILIS	0.0411	0.0524	0.0043	0.0185	0.0097	0.0067	0.0668	0.0094	0.0041	0.0062
KIRIKKALE	0.0153	0.0088	0.0209	0.0303	0.0293	0.1347	0.0085	0.0081	0.0000	0.0017
KIRKLARELI	0.0007	0.0002	0.0033	0.0014	0.0013	0.0037	0.0003	0.0037	0.0000	0.0000
KIRSEHIR	0.0212	0.0150	0.0186	0.0766	0.0302	0.0357	0.0140	0.0109	0.0005	0.0029
KOCAELI	0.0051	0.0021	0.0131	0.0071	0.0055	0.0135	0.0023	0.0109	0.0002	0.0003
KONYA	0.0191	0.0091	0.0255	0.0363	0.0123	0.0195	0.0117	0.0225	0.0002	0.0008
KUTAHYA	0.0096	0.0034	0.0016	0.0159	0.0096	0.0248	0.0048	0.0235	0.0001	0.0003
MALATYA	0.0177	0.0984	0.0040	0.0206	0.0172	0.0096	0.0214	0.0028	0.0032	0.0104
MANISA	0.0045	0.0011	0.0163	0.0057	0.0017	0.0071	0.0024	0.0256	0.0000	0.0001
MARDIN	0.0143	0.0382	0.0007	0.0070	0.0061	0.0020	0.0198	0.0014	0.0114	0.0151
MERSIN	0.1285	0.0292	0.0100	0.0257	0.0092	0.0101	0.0377	0.0261	0.0016	0.0025
MUGLA	0.0083	0.0020	0.0170	0.0074	0.0016	0.0061	0.0049	0.0393	0.0000	0.0001
MUS	0.0082	0.0276	0.0006	0.0063	0.0082	0.0021	0.0105	0.0006	0.0113	0.0221
NEVSEHIR	0.0242	0.0208	0.0163	0.1241	0.0279	0.0263	0.0218	0.0087	0.0005	0.0037
NIGDE	0.0357	0.0193	0.0136	0.1005	0.0217	0.0207	0.0226	0.0094	0.0004	0.0030
ORDU	0.0068	0.0110	0.0015	0.0059	0.0162	0.0016	0.0037	0.0015	0.0050	0.0160
OSMANIYE	0.0603	0.0309	0.0066	0.0211	0.0134	0.0097	0.0504	0.0077	0.0025	0.0034
RIZE	0.0019	0.0052	0.0002	0.0007	0.0004	0.0017	0.0010	0.0003	0.0132	0.0291
SAMSUN	0.0071	0.0091	0.0041	0.0124	0.0466	0.0101	0.0036	0.0021	0.0027	0.0064
SANLIURFA	0.0268	0.1001	0.0023	0.0135	0.0089	0.0046	0.0323	0.0046	0.0080	0.0105
SIIRT	0.0074	0.0269	0.0004	0.0048	0.0058	0.0015	0.0106	0.0005	-0.0127	0.0181
SINOP	0.0052	0.0056	0.0026	0.0047	0.0152	0.0067	0.0025	0.0028	0.0037	0.0042
SIVAS	0.0153	0.0227	0.0078	0.0267	0.0361	0.0199	0.0142	0.0027	0.0003	0.0104
TEKIRDAG	0.0016	0.0004	0.0066	0.0029	0.0016	0.0045	0.0006	0.0080	0.0000	0.0001
TOKAT	0.0113	0.0138	0.0077	0.0236	0.0988	0.0186	0.0086	0.0020	0.0015	0.0097
TRABZON	0.0030	0.0082	0.0001	0.0017	0.0052	0.0001	0.0017	0.0004	0.0068	0.0201
TUNCELI	0.0184	0.0460	0.0023	0.0142	0.0168	0.0067	0.0192	0.0024	-0.0147	0.0231
USAK	0.0100	0.0034	0.0008	0.0153	0.0061	0.0200	0.0059	0.0290	0.0001	0.0002
VAN	0.0019	0.0088	0.0001	0.0017	0.0030	0.0006	0.0030	0.0001	0.0051	0.0122
YOZGAT	0.0238	0.0203	0.0175	0.0395	0.0504	0.0361	0.0169	0.0103	0.0019	0.0059
ZONGULDAK	0.0059	0.0028	0.0035	0.0029	0.0061	0.0057	0.0019	0.0063	0.0008	0.0008

Ek-4'ün devamı

	AYDIN	BALIKESIR	BARTIN	BATMAN	BAYBURT	BILECIK	BINGOL	BOLU	BURDUR	BURSA
ADANA										
ADIYAMAN										
AFYONKARAHISAR										
AKSARAY										
AMASYA										
ANKARA										
ANTAKYA										
ANTALYA										
ARDAHAN										
ARTVIN										
AYDIN										
BALIKESIR	0.0253									
BARTIN	0.0049	0.0071								
BATMAN	0.0001	0.0001	0.0003							
BAYBURT	0.0000	0.0000	0.0012	0.0120						
BILECIK	0.0205	0.0227	0.0164	0.0004	0.0004					
BINGOL	0.0003	0.0002	0.0010	0.0581	0.0178	0.0008				
BOLU	0.0089	0.0132	0.0269	0.0010	0.0015	0.0360	0.0019			
BURDUR	0.0264	0.0130	0.0034	0.0007	0.0004	0.0200	0.0011	0.0137		
BURSA	0.0268	0.0430	0.0174	0.0003	0.0001	0.0905	0.0006	0.0272	0.0191	
CANAKKALE	0.0270	0.0325	0.0056	0.0000	0.0000	0.0176	0.0001	0.0077	0.0099	0.0282
CANKIRI	0.0043	0.0032	0.0063	0.0020	0.0056	0.0165	0.0039	0.0290	0.0107	0.0091
CORUM	0.0016	0.0020	0.0035	0.0026	0.0097	0.0111	0.0049	0.0185	0.0060	0.0055
DENIZLI	0.0577	0.0231	0.0048	0.0004	0.0000	0.0219	0.0006	0.0141	0.0480	0.0264
DIYARBAKIR	0.0003	0.0002	0.0008	0.1083	0.0111	0.0008	0.0693	0.0016	0.0013	0.0005
EDIRNE	0.0096	0.0159	0.0033	0.0000	0.0000	0.0091	0.0000	0.0053	0.0026	0.0124
ELAZIG	0.0005	0.0004	0.0004	0.0379	0.0273	0.0015	0.0594	0.0030	0.0023	0.0009
ERZINCAN	0.0002	0.0002	0.0004	0.0210	0.0818	0.0011	0.0356	0.0026	0.0011	0.0005
ERZURUM	0.0000	0.0000	0.0011	0.0085	0.0747	0.0001	0.0118	0.0006	0.0001	0.0001
ESKISEHIR ANADO	0.0098	0.0122	0.0063	0.0004	0.0005	0.0823	0.0005	0.0253	0.0133	0.0202
GAZIANTEP	0.0024	0.0012	0.0031	0.0261	0.0021	0.0029	0.0303	0.0044	0.0057	0.0026
GIRESUN	0.0003	0.0003	0.0078	0.0048	0.0075	0.0007	0.0096	0.0006	0.0005	0.0010
GOZTEPE/ISTANBUL	0.0186	0.0263	0.0193	0.0002	0.0001	0.0328	0.0005	0.0162	0.0104	0.0681
GUMUSHANE	0.0001	0.0002	0.0011	0.0149	0.0940	0.0011	0.0231	0.0034	0.0010	0.0004
HAKKARI	0.0000	0.0000	0.0000	0.0402	0.0092	0.0001	0.0322	0.0002	0.0001	0.0000
ISPARTA	0.0261	0.0125	0.0035	0.0009	0.0004	0.0182	0.0014	0.0157	0.3750	0.0178
IZMIR	0.0913	0.0340	0.0049	0.0001	0.0000	0.0166	0.0002	0.0057	0.0193	0.0262
KAHRAMANMARAS	0.0035	0.0019	0.0043	0.0242	0.0018	0.0046	0.0300	0.0066	0.0076	0.0042
KARABUK	0.0027	0.0063	0.0617	0.0009	0.0018	0.0158	0.0015	0.0512	0.0042	0.0108
KARAMAN	0.0114	0.0057	0.0035	0.0043	0.0023	0.0110	0.0060	0.0111	0.0220	0.0088
KARS	0.0000	0.0000	0.0007	-0.0066	0.0247	0.0001	0.0091	0.0001	0.0000	0.0001
KASTAMONU	0.0013	0.0004	0.0029	0.0004	0.0061	0.0098	0.0009	0.0207	0.0018	0.0013
KAYSERI	0.0026	0.0019	0.0014	0.0104	0.0146	0.0077	0.0137	0.0134	0.0085	0.0047
KILIS	0.0026	0.0012	0.0028	0.0229	0.0019	0.0028	0.0256	0.0042	0.0056	0.0025
KIRIKKALE	0.0063	0.0054	0.0037	0.0028	0.0050	0.0171	0.0047	0.0238	0.0153	0.0108
KIRKLARELI	0.0080	0.0138	0.0043	0.0000	0.0000	0.0089	0.0000	0.0053	0.0032	0.0131
KIRSEHIR	0.0071	0.0058	0.0063	0.0059	0.0069	0.0140	0.0085	0.0191	0.0161	0.0112
KOCAELI	0.0159	0.0182	0.0274	0.0003	0.0002	0.0840	0.0007	0.0307	0.0100	0.0606
KONYA	0.0119	0.0076	0.0042	0.0024	0.0022	0.0141	0.0035	0.0137	0.0259	0.0115
KUTAHYA	0.0283	0.0269	0.0110	0.0006	0.0002	0.0788	0.0010	0.0271	0.0287	0.0492
MALATYA	0.0009	0.0007	0.0005	0.0319	0.0229	0.0023	0.0379	0.0044	0.0034	0.0015
MANISA	0.0858	0.0417	0.0057	0.0001	0.0000	0.0202	0.0002	0.0074	0.0210	0.0295
MARDIN	0.0002	0.0001	0.0006	0.1253	0.0041	0.0004	0.0451	0.0009	0.0008	0.0003
MERSIN	0.0092	0.0040	0.0057	0.0078	0.0009	0.0067	0.0106	0.0068	0.0150	0.0071
MUGLA	0.0910	0.0231	0.0040	0.0002	0.0001	0.0148	0.0003	0.0069	0.0276	0.0202
MUS	0.0001	0.0001	0.0003	0.0741	0.0213	0.0003	0.0913	0.0009	0.0005	0.0002
NEVSEHIR	0.0055	0.0039	0.0022	0.0095	0.0100	0.0115	0.0133	0.0164	0.0141	0.0081
NIGDE	0.0052	0.0036	0.0026	0.0089	0.0081	0.0093	0.0117	0.0155	0.0137	0.0074
ORDU	0.0005	0.0006	0.0094	0.0061	0.0075	0.0017	0.0120	0.0022	0.0013	0.0016
OSMANIYE	0.0030	0.0015	0.0029	0.0146	0.0035	0.0037	0.0166	0.0055	0.0059	0.0035
RIZE	0.0001	0.0001	0.0045	0.0011	0.0067	0.0001	0.0040	0.0004	0.0000	0.0003
SAMSUN	0.0012	0.0011	0.0112	0.0036	0.0073	0.0050	0.0081	0.0073	0.0029	0.0037
SANLIURFA	0.0010	0.0005	0.0014	0.0367	0.0030	0.0013	0.0381	0.0023	0.0029	0.0011
SIIRT	0.0001	0.0001	0.0002	0.1210	0.0123	0.0002	0.0503	0.0006	0.0004	0.0002
SINOP	0.0014	0.0023	0.0261	0.0013	0.0008	0.0062	0.0034	0.0077	0.0022	0.0063
SIVAS	0.0014	0.0012	0.0021	0.0165	0.0244	0.0053	0.0246	0.0107	0.0050	0.0031
TEKIRDAG	0.0168	0.0244	0.0084	0.0000	0.0000	0.0152	0.0001	0.0073	0.0064	0.0259
TOKAT	0.0012	0.0015	0.0040	0.0095	0.0203	0.0061	0.0154	0.0122	0.0047	0.0037
TRABZON	0.0001	0.0002	0.0039	0.0067	0.0142	0.0004	0.0122	0.0006	0.0003	0.0004
TUNCELI	0.0006	0.0004	0.0021	0.0412	0.0185	0.0016	0.1067	0.0036	0.0020	0.0012
USAK	0.0427	0.0263	0.0083	0.0005	0.0001	0.0347	0.0009	0.0200	0.0399	0.0367
VAN	0.0000	0.0000	0.0000	0.0289	0.0171	0.0001	0.0234	0.0002	0.0001	0.0000
YOZGAT	0.0065	0.0058	0.0101	0.0083	0.0075	0.0155	0.0134	0.0239	0.0129	0.0124
ZONGULDAK	0.0062	0.0091	0.1810	0.0002	0.0010	0.0185	0.0009	0.0325	0.0040	0.0213

Ek-4'ün devamı

	CANAKKALE	CANKIRI	CORUM	DENIZLI	DIYARBAKIR	EDIRNE	ELAZIG	ERZINCAN	ERZURUM	ESKISEHIR A
ADANA										
ADIYAMAN										
AFYONKARAHISAR										
AKSARAY										
AMASYA										
ANKARA										
ANTAKYA										
ANTALYA										
ARDAHAN										
ARTVIN										
AYDIN										
BALIKESIR										
BARTIN										
BATMAN										
BAYBURT										
BILECIK										
BINGOL										
BOLU										
BURDUR										
BURSA										
CANAKKALE										
CANKIRI	0.0019									
CORUM	0.0006	0.0423								
DENIZLI	0.0192	0.0070	0.0033							
DIYARBAKIR	0.0001	0.0035	0.0044	0.0007						
EDIRNE	0.0262	0.0017	0.0002	0.0063	0.0000					
ELAZIG	0.0002	0.0071	0.0094	0.0011	0.0527	0.0001				
ERZINCAN	0.0001	0.0071	0.0111	0.0004	0.0235	0.0001	0.0514			
ERZURUM	0.0000	0.0026	0.0048	0.0000	0.0069	0.0000	0.0231	0.0366		
ESKISEHIR ANADO	0.0093	0.0143	0.0089	0.0143	0.0006	0.0066	0.0015	0.0012	0.0004	
GAZIANTEP	0.0006	0.0059	0.0041	0.0044	0.0333	0.0002	0.0270	0.0106	0.0015	0.0016
GIRE SUN	0.0002	0.0013	0.0011	0.0003	0.0067	0.0002	0.0102	0.0139	0.0013	0.0001
GOZTEPE/ISTANBUL	0.0272	0.0065	0.0023	0.0157	0.0004	0.0162	0.0006	0.0003	0.0001	0.0126
GUMUSHANE	0.0000	0.0093	0.0160	0.0003	0.0173	0.0001	0.0312	0.0926	0.0310	0.0014
HAKKARI	0.0000	0.0005	0.0008	0.0000	0.0311	0.0000	0.0213	0.0137	0.0085	0.0000
ISPARTA	0.0094	0.0124	0.0059	0.0408	0.0017	0.0032	0.0025	0.0011	0.0001	0.0131
IZMIR	0.0344	0.0020	0.0005	0.0337	0.0002	0.0139	0.0003	0.0000	0.0000	0.0051
KAHRAMANMARAS	0.0009	0.0087	0.0069	0.0062	0.0311	0.0003	0.0273	0.0114	0.0021	0.0028
KARABUK	0.0022	0.0272	0.0151	0.0053	0.0013	0.0023	0.0021	0.0025	0.0008	0.0150
KARAMAN	0.0032	0.0139	0.0090	0.0173	0.0068	0.0013	0.0096	0.0054	0.0012	0.0091
KARS	0.0000	0.0007	0.0016	0.0000	0.0073	0.0000	0.0013	0.0103	0.0374	0.0000
KASTAMONU	0.0018	0.0508	0.0370	0.0009	0.0006	0.0005	0.0017	0.0047	0.0039	0.0104
KAYSERI	0.0009	0.0201	0.0251	0.0045	0.0136	0.0006	0.0251	0.0209	0.0090	0.0071
KILIS	0.0005	0.0054	0.0044	0.0045	0.0289	0.0002	0.0242	0.0085	0.0012	0.0017
KIRIKKALE	0.0035	0.0766	0.0360	0.0101	0.0045	0.0016	0.0091	0.0074	0.0022	0.0151
KIRKLARELI	0.0230	0.0027	0.0012	0.0066	0.0000	0.1426	0.0001	0.0001	0.0000	0.0074
KIRSEHIR	0.0034	0.0274	0.0274	0.0109	0.0084	0.0013	0.0148	0.0114	0.0032	0.0110
KOCAELI	0.0182	0.0083	0.0049	0.0161	0.0006	0.0080	0.0008	0.0002	0.0002	0.0151
KONYA	0.0040	0.0169	0.0119	0.0165	0.0039	0.0020	0.0070	0.0045	0.0010	0.0142
KUTAHYA	0.0193	0.0162	0.0099	0.0356	0.0011	0.0095	0.0017	0.0009	0.0000	0.0849
MALATYA	0.0003	0.0097	0.0106	0.0019	0.0378	0.0002	0.0897	0.0364	0.0171	0.0025
MANISA	0.0354	0.0031	0.0009	0.0380	0.0002	0.0134	0.0003	0.0001	0.0000	0.0078
MARDIN	0.0000	0.0016	0.0018	0.0005	0.1036	0.0000	0.0310	0.0128	0.0015	0.0002
MERSIN	0.0024	0.0084	0.0047	0.0133	0.0128	0.0008	0.0104	0.0024	0.0016	0.0036
MUGLA	0.0225	0.0029	0.0007	0.0771	0.0004	0.0072	0.0005	0.0001	0.0001	0.0076
MUS	0.0000	0.0021	0.0031	0.0002	0.0511	0.0000	0.0393	0.0294	0.0208	0.0003
NEVSEHIR	0.0020	0.0234	0.0249	0.0094	0.0131	0.0010	0.0219	0.0163	0.0061	0.0081
NIGDE	0.0016	0.0180	0.0188	0.0092	0.0122	0.0009	0.0192	0.0142	0.0047	0.0082
ORDU	0.0003	0.0008	0.0053	0.0006	0.0088	0.0002	0.0121	0.0149	0.0013	0.0000
OSMANIYE	0.0008	0.0068	0.0069	0.0051	0.0186	0.0002	0.0188	0.0118	0.0011	0.0025
RIZE	0.0000	0.0033	0.0037	0.0000	0.0032	0.0000	0.0016	0.0007	0.0073	0.0003
SAMSUN	0.0007	0.0105	0.0184	0.0016	0.0054	0.0005	0.0109	0.0115	0.0025	0.0036
SANLIURFA	0.0002	0.0037	0.0033	0.0020	0.0476	0.0001	0.0334	0.0119	0.0017	0.0007
SIIRT	0.0000	0.0015	0.0020	0.0002	0.0494	0.0000	0.0326	0.0206	0.0090	0.0002
SINOP	0.0015	0.0031	0.0024	0.0017	0.0025	0.0010	0.0036	0.0028	0.0014	0.0023
SIVAS	0.0005	0.0196	0.0255	0.0025	0.0212	0.0004	0.0335	0.0321	0.0145	0.0043
TEKIRDAG	0.0444	0.0020	0.0003	0.0114	0.0001	0.0413	0.0002	0.0002	0.0000	0.0092
TOKAT	0.0006	0.0181	0.0332	0.0025	0.0122	0.0005	0.0235	0.0278	0.0123	0.0051
TRABZON	0.0001	0.0000	0.0005	0.0001	0.0097	0.0001	0.0112	0.0161	0.0033	0.0001
TUNCELI	0.0002	0.0069	0.0078	0.0012	0.0515	0.0001	0.1561	0.0809	0.0084	0.0012
USAK	0.0232	0.0106	0.0049	0.0633	0.0009	0.0103	0.0015	0.0007	0.0000	0.0278
VAN	0.0000	0.0006	0.0015	0.0000	0.0217	0.0000	0.0216	0.0181	0.0174	0.0001
YOZGAT	0.0032	0.0362	0.0738	0.0102	0.0118	0.0017	0.0179	0.0141	0.0029	0.0119
ZONGULDAK	0.0076	0.0033	0.0049	0.0054	0.0007	0.0043	0.0006	0.0003	0.0009	0.0049

Ek-4'ün devamı

	GAZIANTEP	GIRESUN	GOZTEPE/IS	GUMUSHAI	HAKKARI	ISPARTA	IZMIR	KAHRAMAI	KARABUK	KARAMAN
ADANA										
ADIYAMAN										
AFYONKARAHISAR										
AKSARAY										
AMASYA										
ANKARA										
ANTAKYA										
ANTALYA										
ARDAHAN										
ARTVIN										
AYDIN										
BALIKESIR										
BARTIN										
BATMAN										
BAYBURT										
BILECIK										
BINGOL										
BOLU										
BURDUR										
BURSA										
CANAKKALE										
CANKIRI										
CORUM										
DENIZLI										
DIYARBAKIR										
EDIRNE										
ELAZIG										
ERZINCAN										
ERZURUM										
ESKISEHIR ANADO										
GAZIANTEP										
GIRESUN	0.0067									
GOZTEPE/IS	0.0018	0.0015								
GUMUSHAI	0.0079	0.0191	0.0001							
HAKKARI	0.0111	0.0019	0.0000	0.0093						
ISPARTA	0.0071	0.0005	0.0120	0.0009	0.0001					
IZMIR	0.0014	0.0002	0.0197	0.0001	0.0000	0.0191				
KAHRAMAI	0.1399	0.0083	0.0028	0.0096	0.0095	0.0093	0.0020			
KARABUK	0.0026	0.0022	0.0091	0.0033	0.0001	0.0051	0.0012	0.0040		
KARAMAN	0.0195	0.0024	0.0058	0.0050	0.0010	0.0231	0.0070	0.0234	0.0050	
KARS	0.0044	0.0051	0.0001	0.0112	-0.0060	0.0001	0.0000	0.0049	0.0002	0.0001
KASTAMON	0.0022	0.0038	0.0021	0.0082	0.0001	0.0020	0.0023	0.0025	0.0331	0.0030
KAYSERI	0.0180	0.0051	0.0020	0.0208	0.0035	0.0086	0.0014	0.0229	0.0079	0.0239
KILIS	0.2539	0.0059	0.0017	0.0069	0.0094	0.0071	0.0014	0.0828	0.0025	0.0205
KIRIKKALE	0.0085	0.0002	0.0066	0.0093	0.0007	0.0153	0.0040	0.0123	0.0159	0.0159
KIRKLARELI	0.0002	0.0002	0.0179	0.0001	0.0000	0.0036	0.0111	0.0004	0.0028	0.0015
KIRSEHIR	0.0154	0.0041	0.0067	0.0112	0.0014	0.0154	0.0042	0.0209	0.0133	0.0240
KOCAELI	0.0025	0.0018	0.0892	0.0001	0.0000	0.0123	0.0156	0.0040	0.0116	0.0072
KONYA	0.0117	0.0030	0.0070	0.0043	0.0004	0.0273	0.0071	0.0149	0.0073	0.0537
KUTAHYA	0.0042	0.0006	0.0246	0.0012	0.0001	0.0285	0.0241	0.0066	0.0123	0.0154
MALATYA	0.0343	0.0081	0.0009	0.0269	0.0165	0.0040	0.0005	0.0361	0.0036	0.0142
MANISA	0.0017	0.0002	0.0216	0.0001	0.0000	0.0212	0.3014	0.0025	0.0024	0.0083
MARDIN	0.0320	0.0050	0.0002	0.0090	0.0343	0.0011	0.0001	0.0291	0.0007	0.0048
MERSIN	0.0354	0.0042	0.0051	0.0020	0.0020	0.0179	0.0058	0.0395	0.0033	0.0378
MUGLA	0.0032	0.0002	0.0149	0.0001	0.0000	0.0300	0.0463	0.0044	0.0017	0.0126
MUS	0.0210	0.0082	0.0002	0.0221	0.0406	0.0007	0.0001	0.0198	0.0008	0.0034
NEVSEHIR	0.0214	0.0039	0.0044	0.0153	0.0027	0.0147	0.0034	0.0269	0.0091	0.0300
NIGDE	0.0234	0.0048	0.0036	0.0128	0.0024	0.0146	0.0032	0.0285	0.0081	0.0369
ORDU	0.0091	0.1997	0.0020	0.0171	0.0024	0.0015	0.0004	0.0112	0.0036	0.0039
OSMANIYE	0.0572	0.0059	0.0020	0.0090	0.0053	0.0078	0.0016	0.0803	0.0032	0.0186
RIZE	0.0037	0.0383	0.0004	0.0015	0.0003	0.0000	0.0000	0.0036	0.0003	0.0002
SAMSUN	0.0064	0.0274	0.0042	0.0130	0.0013	0.0029	0.0007	0.0101	0.0080	0.0057
SANLIURFA	0.0600	0.0054	0.0008	0.0095	0.0184	0.0038	0.0005	0.0470	0.0014	0.0120
SIIRT	0.0208	0.0043	0.0001	0.0149	0.0492	0.0005	0.0000	0.0192	0.0005	0.0027
SINOP	0.0045	0.0204	0.0089	0.0008	0.0004	0.0024	0.0013	0.0062	0.0121	0.0023
SIVAS	0.0186	0.0105	0.0018	0.0333	0.0067	0.0052	0.0008	0.0247	0.0095	0.0150
TEKIRDAG	0.0006	0.0006	0.0344	0.0001	0.0000	0.0072	0.0202	0.0010	0.0038	0.0034
TOKAT	0.0115	0.0146	0.0017	0.0299	0.0035	0.0047	0.0008	0.0165	0.0119	0.0100
TRABZON	0.0061	0.0469	0.0006	0.0468	0.0042	0.0004	0.0001	0.0068	0.0020	0.0018
TUNCELI	0.0343	0.0140	0.0010	0.0297	0.0234	0.0026	0.0003	0.0360	0.0030	0.0088
USAK	0.0047	0.0005	0.0225	0.0007	0.0001	0.0374	0.0327	0.0068	0.0081	0.0167
VAN	0.0065	0.0057	0.0000	0.0147	0.0528	0.0001	0.0000	0.0061	0.0001	0.0009
YOZGAT	0.0199	0.0064	0.0087	0.0141	0.0022	0.0150	0.0041	0.0272	0.0141	0.0210
ZONGULDA	0.0028	0.0069	0.0236	0.0010	0.0000	0.0031	0.0066	0.0041	0.0366	0.0036

Ek-4'ün devamı

	KARS	KASTAMON	KAYSERI	KILIS	KIRIKKALE	KIRKLARELI	KIRSEHIR	KOCAELI	KONYA	KUTAHYA
ADANA										
ADIYAMAN										
AFYONKARAHISAR										
AKSARAY										
AMASYA										
ANKARA										
ANTAKYA										
ANTALYA										
ARDAHAN										
ARTVIN										
AYDIN										
BALIKESIR										
BARTIN										
BATMAN										
BAYBURT										
BILECIK										
BINGOL										
BOLU										
BURDUR										
BURSA										
CANAKKALE										
CANKIRI										
CORUM										
DENIZLI										
DIYARBAKIR										
EDIRNE										
ELAZIG										
ERZINCAN										
ERZURUM										
ESKISEHIR ANADO										
GAZIANTEP										
GIRESUN										
GOZTEPE/ISTANBUL										
GUMUSHANE										
HAKKARI										
ISPARTA										
IZMIR										
KAHRAMANMARAS										
KARABUK										
KARAMAN										
KARS										
KASTAMON	0.0020									
KAYSERI	0.0018	0.0105								
KILIS	0.0034	0.0013	0.0175							
KIRIKKALE	0.0004	0.0208	0.0228	0.0079						
KIRKLARELI	0.0000	0.0010	0.0007	0.0002	0.0025					
KIRSEHIR	0.0000	0.0124	0.0369	0.0146	0.0609	0.0022				
KOCAELI	0.0001	0.0012	0.0032	0.0024	0.0076	0.0086	0.0077			
KONYA	0.0000	0.0056	0.0195	0.0109	0.0227	0.0026	0.0276	0.0080		
KUTAHYA	0.0001	0.0059	0.0075	0.0042	0.0194	0.0095	0.0166	0.0271	0.0211	
MALATYA	0.0010	0.0025	0.0288	0.0295	0.0113	0.0002	0.0180	0.0011	0.0098	0.0025
MANISA	0.0000	0.0024	0.0020	0.0017	0.0054	0.0109	0.0057	0.0175	0.0085	0.0291
MARDIN	0.0097	0.0010	0.0089	0.0287	0.0028	0.0000	0.0056	0.0004	0.0026	0.0006
MERSIN	0.0013	0.0027	0.0117	0.0355	0.0117	0.0011	0.0199	0.0065	0.0218	0.0110
MUGLA	0.0000	0.0019	0.0020	0.0035	0.0049	0.0063	0.0062	0.0121	0.0115	0.0259
MUS	0.0040	0.0002	0.0112	0.0177	0.0028	0.0000	0.0056	0.0002	0.0020	0.0004
NEVSEHIR	0.0005	0.0095	0.1171	0.0203	0.0308	0.0014	0.0880	0.0055	0.0278	0.0126
NIGDE	0.0004	0.0072	0.0562	0.0231	0.0218	0.0011	0.0376	0.0055	0.0275	0.0107
ORDU	0.0044	-0.0024	0.0084	0.0080	0.0041	0.0004	0.0096	0.0029	0.0043	0.0014
OSMANIYE	0.0019	0.0003	0.0213	0.0657	0.0104	0.0004	0.0186	0.0025	0.0147	0.0048
RIZE	0.0125	0.0041	0.0011	0.0035	0.0021	0.0000	0.0003	0.0007	0.0001	0.0000
SAMSUN	0.0013	0.0080	0.0111	0.0062	0.0113	0.0009	0.0132	0.0045	0.0059	0.0039
SANLIURFA	0.0067	0.0018	0.0140	0.0496	0.0050	0.0001	0.0103	0.0012	0.0059	0.0021
SIIRT	0.0077	0.0003	0.0080	0.0177	0.0021	0.0000	0.0042	0.0002	0.0015	0.0003
SINOP	0.0026	0.0031	0.0011	0.0041	0.0057	0.0015	0.0090	0.0112	0.0035	0.0044
SIVAS	0.0025	0.0115	0.0392	0.0159	0.0214	0.0006	0.0264	0.0021	0.0138	0.0056
TEKIRDAG	0.0000	0.0024	0.0011	0.0005	0.0029	0.0519	0.0043	0.0190	0.0055	0.0158
TOKAT	0.0030	0.0153	0.0328	0.0096	0.0216	0.0007	0.0259	0.0023	0.0114	0.0053
TRABZON	0.0051	0.0024	0.0044	0.0054	0.0009	0.0001	0.0025	0.0010	0.0016	0.0003
TUNCELI	-0.0093	0.0002	0.0187	0.0298	0.0083	0.0001	0.0136	0.0014	0.0058	0.0020
USAK	0.0001	0.0003	0.0061	0.0048	0.0143	0.0098	0.0145	0.0225	0.0188	0.0760
VAN	0.0004	0.0002	0.0041	0.0054	0.0009	0.0000	0.0017	0.0000	0.0006	0.0001
YOZGAT	0.0009	0.0131	0.0383	0.0181	0.0514	0.0021	0.0741	0.0104	0.0212	0.0170
ZONGULDA	0.0006	0.0034	0.0007	0.0026	0.0029	0.0047	0.0057	0.0330	0.0049	0.0129

Ek-4'ün devamı

	MALATYA	MANISA	MARDIN	MERSIN	MUGLA	MUS	NEVSEHIR	NIGDE	ORDU	OSMANIYE
ADANA										
ADIYAMAN										
AFYONKARAHISAR										
AKSARAY										
AMASYA										
ANKARA										
ANTAKYA										
ANTALYA										
ARDAHAN										
ARTVIN										
AYDIN										
BALIKESIR										
BARTIN										
BATMAN										
BAYBURT										
BILECIK										
BINGOL										
BOLU										
BURDUR										
BURSA										
CANAKKALE										
CANKIRI										
CORUM										
DENIZLI										
DIYARBAKIR										
EDIRNE										
ELAZIG										
ERZINCAN										
ERZURUM										
ESKISEHIR ANADO										
GAZIANTEP										
GIRESUN										
GOZTEPE/ISTANBUL										
GUMUSHANE										
HAKKARI										
ISPARTA										
IZMIR										
KAHRAMANMARAS										
KARABUK										
KARAMAN										
KARS										
KASTAMONU										
KAYSERI										
KILIS										
KIRIKKALE										
KIRKLARELI										
KIRSEHIR										
KOCAELI										
KONYA										
KUTAHYA										
MALATYA										
MANISA	0.0007									
MARDIN	0.0277	0.0001								
MERSIN	0.0142	0.0066	0.0112							
MUGLA	0.0010	0.0466	0.0003	0.0125						
MUS	0.0324	0.0001	0.0434	0.0056	0.0001					
NEVSEHIR	0.0263	0.0044	0.0092	0.0211	0.0052	0.0091				
NIGDE	0.0236	0.0040	0.0087	0.0306	0.0054	0.0080	0.1045			
ORDU	0.0116	0.0005	0.0061	0.0063	0.0005	0.0096	0.0088	0.0078		
OSMANIYE	0.0245	0.0020	0.0159	0.0264	0.0033	0.0116	0.0217	0.0277	0.0083	
RIZE	0.0007	0.0001	0.0033	0.0019	0.0001	0.0038	0.0007	0.0004	0.0290	0.0019
SAMSUN	0.0098	0.0009	0.0033	0.0065	0.0009	0.0052	0.0125	0.0100	0.0375	0.0073
SANLIURFA	0.0371	0.0007	0.0439	0.0244	0.0014	0.0294	0.0159	0.0163	0.0072	0.0264
SIIRT	0.0272	0.0001	0.0546	0.0052	0.0001	0.1036	0.0069	0.0062	0.0055	0.0114
SINOP	0.0031	0.0016	0.0015	0.0050	0.0013	0.0020	0.0045	0.0032	0.0219	0.0046
SIVAS	0.0362	0.0011	0.0133	0.0102	0.0011	0.0193	0.0336	0.0280	0.0162	0.0197
TEKIRDAG	0.0004	0.0222	0.0001	0.0023	0.0127	0.0000	0.0025	0.0020	0.0008	0.0009
TOKAT	0.0245	0.0011	0.0072	0.0066	0.0009	0.0123	0.0290	0.0238	0.0260	0.0165
TRABZON	0.0091	0.0001	0.0067	0.0030	0.0001	0.0124	0.0033	0.0029	0.0339	0.0031
TUNCELI	0.0476	0.0004	0.0377	0.0144	0.0007	0.0438	0.0185	0.0164	0.0170	0.0212
USAK	0.0026	0.0388	0.0006	0.0124	0.0379	0.0003	0.0113	0.0103	0.0012	0.0058
VAN	0.0151	0.0000	0.0194	0.0011	0.0000	0.0341	0.0028	0.0026	0.0053	0.0043
YOZGAT	0.0215	0.0054	0.0084	0.0209	0.0060	0.0085	0.0468	0.0325	0.0128	0.0211
ZONGULDA	0.0008	0.0069	0.0004	0.0060	0.0048	0.0003	0.0013	0.0018	0.0078	0.0025

Ek-4'ün devamı

	RIZE	SAMSUN	SANLIURFA	SIIRT	SINOP	SIVAS	TEKIRDAG	TOKAT	TRABZON	TUNCELI	USAK	VAN	YOZGAT
ADANA													
ADIYAMAN													
AFYONKARAHISAR													
AKSARAY													
AMASYA													
ANKARA													
ANTAKYA													
ANTALYA													
ARDAHAN													
ARTVIN													
AYDIN													
BALIKESIR													
BARTIN													
BATMAN													
BAYBURT													
BILECIK													
BINGOL													
BOLU													
BURDUR													
BURSA													
CANAKKALE													
CANKIRI													
CORUM													
DENIZLI													
DIYARBAKIR													
EDIRNE													
ELAZIG													
ERZINCAN													
ERZURUM													
ESKISEHIR ANADO													
GAZIANTEP													
GIRESUN													
GOZTEPE/ISTANBUL													
GUMUSHANE													
HAKKARI													
ISPARTA													
IZMIR													
KAHRAMANMARAS													
KARABUK													
KARAMAN													
KARS													
KASTAMONU													
KAYSERI													
KILIS													
KIRIKKALE													
KIRKLARELI													
KIRSEHIR													
KOCAELI													
KONYA													
KUTAHYA													
MALATYA													
MANISA													
MARDIN													
MERSIN													
MUGLA													
MUS													
NEVSEHIR													
NIGDE													
ORDU													
OSMANIYE													
RIZE													
SAMSUN	0.0130												
SANLIURFA	0.0033	0.0049											
SIIRT	0.0011	0.0031	0.0300										
SINOP	0.0133	0.0323	0.0027	0.0010									
SIVAS	-0.0019	0.0179	0.0165	0.0139	0.0060								
TEKIRDAG	0.0001	0.0014	0.0002	0.0000	0.0029	0.0010							
TOKAT	0.0006	0.0320	0.0097	0.0082	0.0094	0.0902	0.0013						
TRABZON	0.0869	0.0127	0.0063	0.0072	0.0107	0.0102	0.0002	0.0098					
TUNCELI	0.0065	0.0128	0.0386	0.0371	0.0065	0.0312	0.0003	0.0210	0.0149				
USAK	0.0000	0.0028	0.0021	0.0003	0.0030	0.0039	0.0172	0.0038	0.0002	0.0017			
VAN	0.0040	0.0025	0.0110	0.0420	0.0008	0.0078	0.0000	0.0053	0.0084	0.0191	0.0001		
YOZGAT	0.0003	0.0195	0.0137	0.0063	0.0119	0.0350	0.0036	0.0358	0.0038	0.0201	0.0139	0.0023	
ZONGULDA	0.0036	0.0108	0.0013	0.0002	0.0252	0.0016	0.0124	0.0028	0.0032	0.0020	0.0093	0.0001	0.0079

Ek 5. GEO-Yer arası RF bağlantı bütçesi örneği-1

Ek Tablo 4. GEO-Yer arası RF bağlantı bütçesi örneği-1

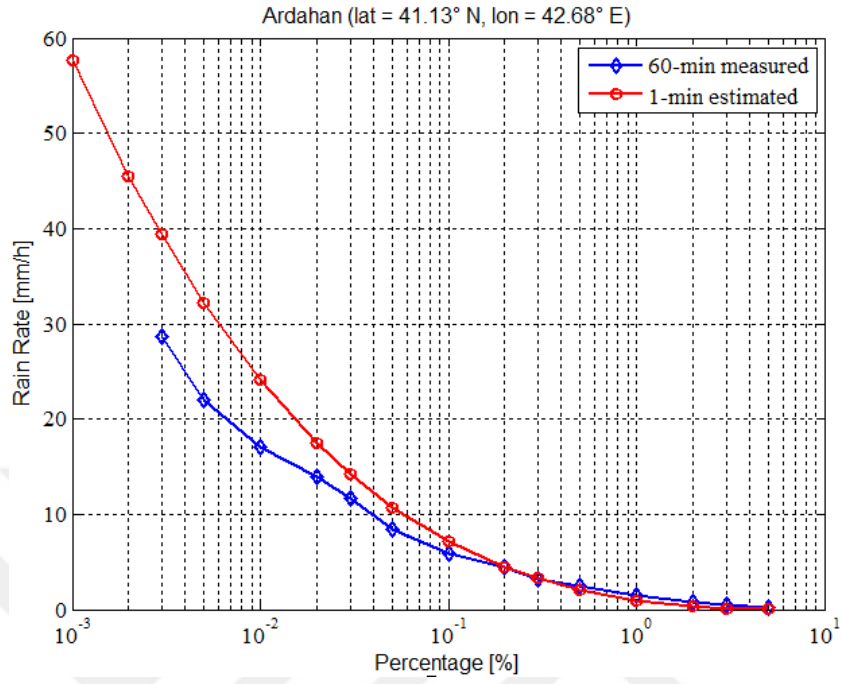
Parametre	Değer	Değer	Değer	Değer	Birim
Şehir	Ardahan		Tunceli		
Boylam	42.68		39.57		derece
Enlem	41.13		39.12		derece
Yağmur Hızı (ITU)	34.96		28.31		mm/h
GEO uyduya olan mesafe	37639.6		37525.6		km
Azimet	168.95		163.74		derece
Elevasyon	41.8703		43.4223		derece
Kutuplama	0.0		0.0		derece
Bağlantı Kesintisizliği	99.9500		99.9500		%
Yağmur Zayıflatması		16.5234		13.9873	dB
İstasyon-Çeşitliliği Kazancı		5.5254		4.6390	dB
Alıcı Anten (Rx) Çapı	5.0		5.0		m
Rx verimliliği	0.65		0.65		-
Gaz emilim kaybı		1.00		1.00	dB
Kutuplama ve Odaklama kaybı		1.00		1.00	dB
Serbest Uzay Kaybı		216.0041		215.9778	dB
Toplam kayıplar		229.0021		227.3261	dB
Rx Anten Kazancı		64.5563		64.5563	dB
Alınan Güç		-93.0231		-91.3471	dBW
Alıcıdaki güç yoğunluğu	-45.33		-45.32		dBW/m ²
Ortam Sıcaklığı		290.0		290.0	K
Besleyici Kazancı		30.0		30.0	-
Sistem sıcaklığı		371.3333		371.3333	K
Alıcıdaki Sıcaklık gürültüsü		-77.8500		-83.8706	dBm
G/T		38.8587		38.8587	dB/K
C/N		20.8484		22.5244	dB
C/No		109.8793		111.5553	dBHz
Eb/No		17.8381		21.5553	dB

Ek 6. GEO-Yer arası RF bağlantı bütçesi örneği-2

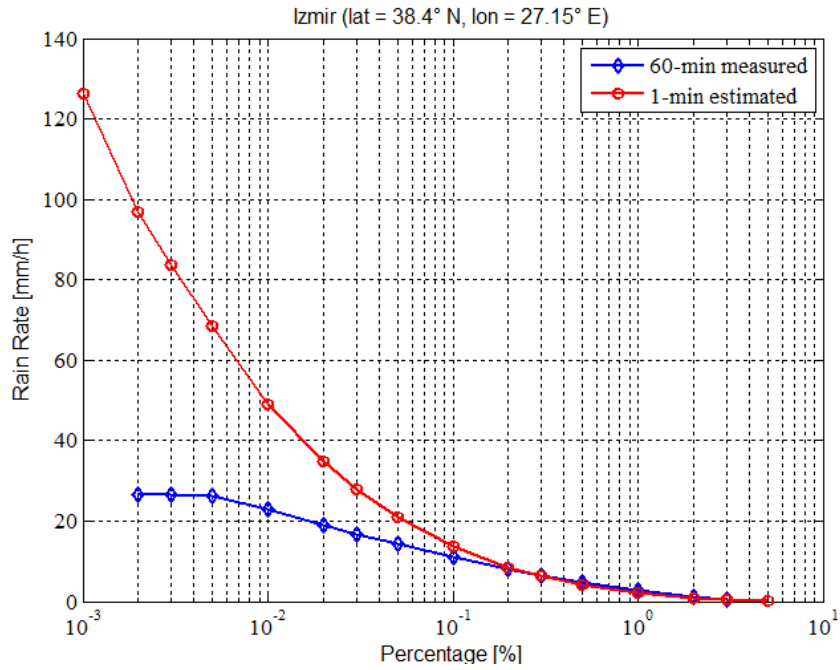
Ek Tablo 5. GEO-Yer arası RF bağlantı bütçesi örneği-2

Parametre	Değer	Değer	Değer	Değer	Birim
Şehir	Ardahan		Bingöl		
Boylam	42.68		40.48		derece
Enlem	41.13		38.9		derece
Yağmur Hızı(ITU)	34.96		28.78		mm/h
GEO uyduya olan mesafe	37639.6		37493.2		km
Azimet	168.95		165.048		derece
Elevasyon	41.87		43.872		derece
Kutuplama	0.0		0.0		derece
Bağlantı Kesintisizliği	99.9750		99.9750		%
Yağmur Zayıflatması		22.278		17.98	dB
İstasyon-Çeşitliliği Kazancı		7.835		6.262	dB
Alıcı Anten(Rx) Çapı	4.0		4.0		m
Rx verimliliği	0.65		0.65		-
Gaz emilim kaybı		1.0		1.0	dB
Kutuplama ve Odaklama kaybı		1.0		1.0	dB
Serbest Uzay Kaybı		216.004		216	dB
Toplam Kayıplar		232.448		229.7	dB
Rx Anten Kazancı		62.618		62.62	dB
Alınan Güç		-99.43		-96.7	dBW
Alıcıdaki güç yoğunluğu	-46.357		-46.34		dBW/m ²
Ortam Sıcaklığı		290.0		290.0	K
Besleyici Kazancı		30.0		30.0	-
Sistem sıcaklığı		371.33		371.3	K
Alıcıdaki Sıcaklık gürültüsü		-76.881		-82.9	dBm
G/T		36.92		36.92	dB/K
C/N		13.47		16.23	dB
C/No		103.47		106.2	dBHz
Eb/No		10.46		13.22	dB

Ek 7. Türkiye illeri için yağmur hızı dönüşüm örnekleri

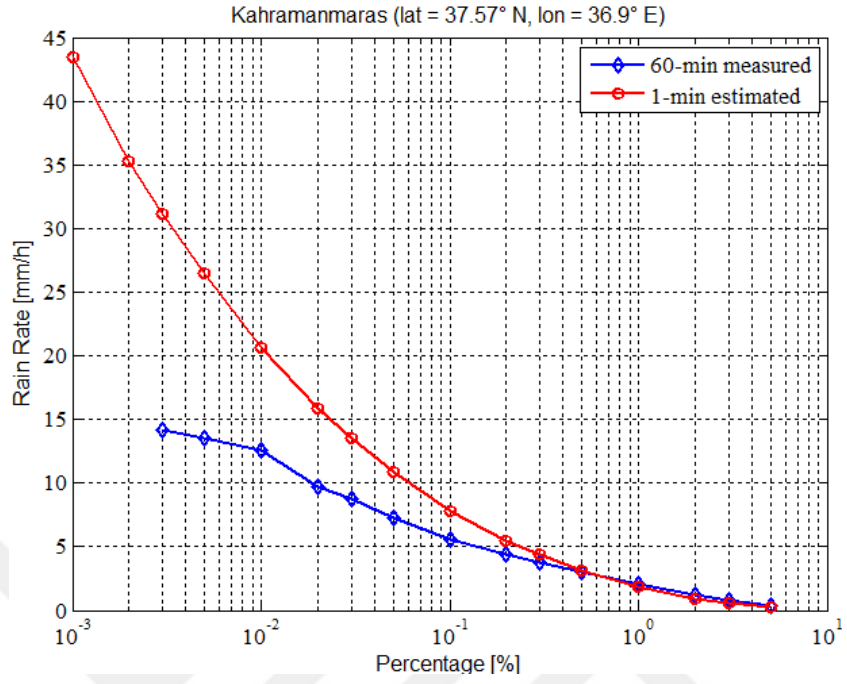


Ek Şekil 1. Ardahan ili yağmur hızı dönüşümü

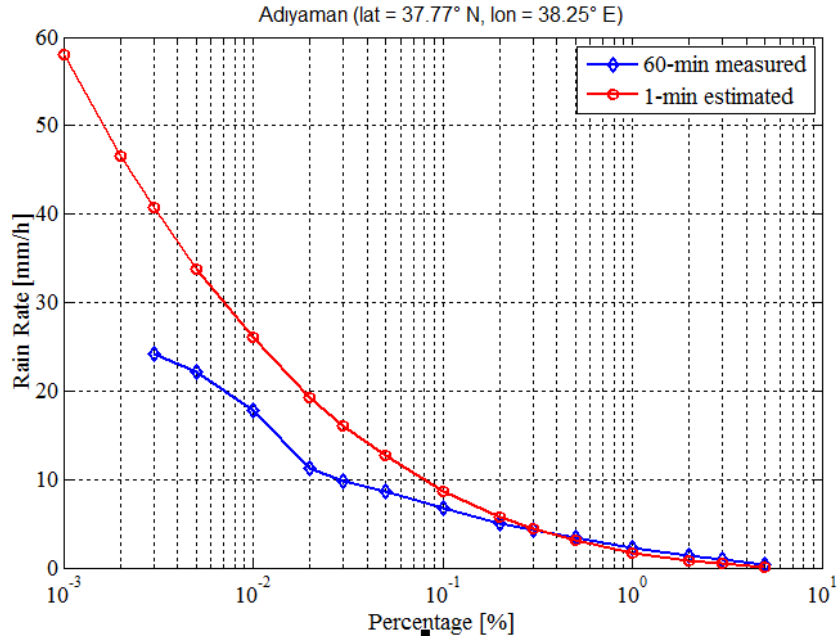


Ek Şekil 2. İzmir ili yağmur hızı dönüşümü

Ek-7'nin devamı



Ek Şekil 3. Kahramanmaraş ili yağmur hızı dönüşümü



Ek Şekil 4. Adıyaman ili yağmur hızı dönüşümü

ÖZGEÇMİŞ

1979 Trabzon doğumludur. 1997’de Trabzon Fatih Süper Lisesinden mezun olduktan sonra, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümüne lisans öğretimine başlamış ve 2002 yılında ‘Elektrik ve Elektronik Mühendisi’ unvanı ile mezun olmuştur. 2002 ile 2003 yılları arasında, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır. Eylül 2003’te, Ankara Gölbaşı’ndaki Türk Telekom Uydu Haberleşme Dairesi Başkanlığı, TÜRKSAT Uydu Kontrol Merkezine ‘Telekom Uzman Yardımcısı’ olarak atanmıştır. 2004 yılında Türk Telekom bünyesinden ayrılan ve TÜRKSAT AŞ ile aynı hizmetleri vermeye devam şirkette, 2003-2006 yılları arasında Uydu Kontrol Mühendisi olarak çalışmıştır. 2006 yılından bu yana yine Uydu Kontrol Direktörlüğü’nde, Uydu Sistemleri ve Yörünge Kontrol Uzmanı olarak görevine devam etmektedir. 2011-2014 yılları arasında Japonya’da görevlendirilmiş ve TÜRKSAT-4A ve TÜRKSAT-4B uydularının tüm ekipman ve sistem seviyesi üretim ve test aşamalarını takip etmiştir. Ayrıca, TÜRKSAT-4A uydusunun Kazakistan-Baykonur Tesislerinde Proton Roketine birleştirilme işlemlerini, fırlatma hazırlıklarını ve fırlatılmasını takip ve kontrol etmiştir. Bunlara ilaveten, TÜRKSAT-4B uydusunun GEO yörüngeye yerleştirme operasyonlarını Japonya’da Mitsubishi Elektrik tesislerinden takip etmiştir. Ayrıca, ömürlerini tamamlayan TÜRKSAT-1B ve TÜRKSAT-1C uydularının yörünge dışına atılması operasyonlarına aktif olarak katılım sağlamıştır. Halen Türkiye’nin sahip olduğu yere göre durağan yörüngedeki tüm TÜRKSAT uydularının yörünge ve alt sistemlerinin her türlü kontrolü ve operasyonları ile görevli olan Yılmaz, evli ve bir çocuk babasıdır.

2005 yılında “Yere Göre Durağan Uydularda Yörünge Eğikliği Açısı ve İletişim Sistemine Etkisi” başlıklı Yüksek lisans tezi ile Elektronik Yüksek Mühendisi olan ve bu tarih itibariyle doktora çalışmalarına devam eden Yılmaz’ın 2 adet yurtiçi konferans, 2 adet yurtdışı konferans ve 2 adet indeksli dergi yayınları bulunmaktadır. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler (SCI/SCI-E)

1. Yılmaz, Ü. C. ve Çavdar, İ. H., Simplified Solution for Osculating Keplerian Parameter Corrections of GEO Satellite for Intersatellite Optical Link, Advances in Space Research, 55,7 (2015) 1878-1884.
2. Yılmaz, Ü. C. ve Çavdar, İ. H., Determination of the Ground Station Locations for both Dual-Site Ranging and Site-Diversity at Q/V-band Satellite Communication for an Intersatellite System Scenario, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 16,3 (2015) 445-450.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

1. Yılmaz, Ü. C., Çavdar, İ. H. ve Şakacı, C., Determining the Accuracy of the On Board Propagation Software for Optical Intersatellite Link, SPACOMM, The Fourth International Conference on Advances in Satellite and Space Communication, Nisan 2012, Chamonix/Mont Blanc, 36-40.
2. Yılmaz, Ü. C. ve Çavdar, İ. H., The Effects of Orbital Parameters Accuracy on Doppler Frequency Shift for Intersatellite Optical Communication, AICT2013, The 7th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, Ekim 2013, Baku, Azerbaijan, 1-3.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan bildiri kitabında basılan bildiriler

1. Yılmaz, Ü. C., Çavdar, İ. H. ve Şakacı, C., Yerdurağan Uydularda Yörünge Eğikliği Açısının Hesabına Farklı Bir Bakış ve Bu Açının Kapsama Alanına Etkisi, Çankaya Üniversitesi, 4. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, 2011, Ankara, 369-374.
2. Yılmaz, Ü. C. ve Çavdar, İ. H., Türkiye Kapsaması İçin En Uygun Yakın Yörünge Uydu Eğikliği Açısının Hesabı ve Potansiyel bir TÜRKSAT Uydu ile Optik İletişimde Doppler Frekans Kaymasına Etkisi, Çankaya Üniversitesi, 4. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Nisan 2011, Ankara, 312-317.