



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Enerji Hasatlama Kullanılan Yüksek İrtifa Platform
İstasyonlarında Performans Analizi**

Yüksek Lisans Tezi

Melek Tuylu

Haziran 2023



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Enerji Hasatlama Kullanılan Yüksek İrtifa Platform
İstasyonlarında Performans Analizi**

Yüksek Lisans Tezi

Melek Tuylu

Danışman

Doç. Dr. Eylem Erdoğan

Haziran 2023

TEZ JÜRİSİ ONAYI

Melek Tuylu tarafından hazırlanan "Enerji Hasatlama Kullanılan Yüksek İrtifa Platform İstasyonlarında Performans Analizi" başlıklı bu Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmış ve jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Eylem ERDOĞAN

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Üyeler:

Dr. Öğr. Üyesi Doğay ALTINEL

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Doç. Dr. Sultan ALDIRMAZ ÇOLAK

Kurumu: Kocaeli Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 12.07.2023

BEYANLAR

Yazım ve Kaynak Gösterme Kılavuzu Beyanı

Danışmanlığımda yazılan bu tezin Chicago yazım ve kaynak gösterme kılavuzunda belirtilen kurallara uygun olarak yapılandırıldığı ve bu kılavuzun metin içi kaynak gösterme standartlarının bu tezde tutarlı olarak uygulandığı tarafımdan incelenerek teyit edilmiştir.

İmza

Doç.Dr. Eylem ERDOĞAN

Etik İlkeler Sadakat Beyanı

Hazırladığım bu tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

İmza

Melek TUYLU

ÖZET

Enerji Hasatlama Kullanılan Yüksek İrtifa Platform İstasyonlarında Performans Analizi

Tuylu, Melek

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Eylem ERDOĞAN

Haziran 2023

Teknoloji hızla geliyor ve ortaya konulan her yeni cihaz çalışabilmesi için enerjiye ihtiyaç duyuyor. Enerji ihtiyacı pil ve batarya gibi sürekli değiştirilmesi veya şarj edilmesi gereken aparatlar ile sağlanıyor. Ancak bu hem verimli hem de kullanışlı değildir. Bunun dışında batarya ve piller çevre için zararlı atıklardır. Ama daha da önemlisi enerji ihtiyacımızı karşılamak için kullandığımız kaynaklar sınırlı kaynaklardır. Bu nedenle alternatif enerji arayışlarına girilmiş ve bu arayışlara ortamda halihazırda bulunan kaynaklardan enerji hasatlayan sistemler cevap vermiştir.

Enerji hasatlama sistemleri güneş, rüzgar, basınç, ısı ve elektromanyetik dalgalar gibi halihazırda bulunan kaynakları kullanırlar. Bunların arasından elektromanyetik spektrumun önemli bir bölümünü oluşturan radyo frekansından (RF) enerji hasatlama, kablosuz haberleşme sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Çünkü enerji hasatlamada kaynak olarak güneş kullanıldığında hava koşullarına bağlı olarak verimlilik değişecektir. Piezoelektrik malzemeler uygulanan mekanik titreşimler ile enerji üretebildiğinden malzemede basınç olmadığında enerji üretilmemektedir. Ancak söz konusu sınırlamalar RF enerjisi için geçerli değildir.

Kablosuz haberleşmede gönderilen sinyal yol kaybı, çok yollu sönmüleme, gürültü, gölgeleme gibi olumsuz etkilerden dolayı oldukça zayıflar. Özellikle uzun mesafelere kablosuz iletimde gönderilen sinyalde daha çok kayıplar olur. Bu

Çalışmada, röle tarafından desteklenen işbirlikli bir haberleşme sistemi kullanılmıştır. Kaynak-hedef arasındaki uzaklık arttıķa haberleşme hızı azalmaktadır. Kapsama alanı korunarak hız artırımı ancak araya bir röle konularak sağlanabilmektedir.

Bu tezde yüksek irtifa platform istasyonunun (high altitude platform station, HAPS) enerji hasatlayarak hem enerji ihtiyacını karşılaması ve röle olarak kullanarak yeryüzündeki kullanıcıyla daha uzak mesafelerden haberleşebilmesi amaçlanmıştır. Enerji hasatlama teknolojisi kullanılan HAPS destekli haberleşme sisteminin çeşitli durumlar için kesinti olasılığı ve ergodik kapasite performansı gözlemlenerek literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek irtifa platform istasyonu, enerji hasatlama, radyo frekans, kablosuz ağlar, gölgeleme modelleri.

ABSTRACT

Performance Analysis of High Altitude Platform Stations Using Energy Harvesting

Tuylu, Melek

Master Thesis, Electrical and Electronics Engineering Department, Electrical and
Electronics Engineering Program

Supervisor: Assoc. Prof. Eylem ERDOĞAN

June 2023

Technology is developing rapidly and every new device introduced needs energy to work. The energy need is provided by the apparatus such as batteries and batteries that need to be constantly changed or charged. However, this is neither efficient nor useful. Apart from that, batteries and batteries are harmful wastes for the environment. But more importantly, the resources we use to meet our energy needs are limited resources. For this reason, alternative energy searches have been started and systems that harvest energy from the sources already in the environment have responded to these searches.

Energy harvesting systems use already available resources such as sun, wind, pressure, heat and electromagnetic waves. Among these, energy harvesting from radio frequency (RF), which constitutes an important part of the electromagnetic spectrum, is frequently preferred in wireless communication systems. Because when the sun is used as a source in energy harvesting, the efficiency will change depending on the weather conditions. Since piezoelectric materials can produce energy with applied mechanical vibrations, energy cannot be produced when

there is no pressure in the material. However, these limitations do not apply to RF energy.

In wireless communication, the transmitted signal becomes very weak due to negative effects such as path loss, multipath fading, noise, and shadowing. Especially in long distance wireless transmission, there are more losses in the signal sent. In this study, a cooperative communication system supported by a relay is used. As the distance between the source and the destination increases, the communication speed decreases. The speed increase by protecting the coverage area can only be achieved by putting a relay in between.

In this thesis, it is aimed that the high altitude platform station (HAPS) can both meet the energy needs by harvesting energy and communicate with the user on the ground from longer distances by using it as a relay. It is aimed to contribute to the literature by observing the interruption probability and ergodic capacity performance for various situations of the HAPS supported communication system using energy harvesting technology.

Keywords: High altitude platform station, energy harvesting, radio frequency, wireless networks, shadowing models.

TEŞEKKÜR

Kendisiyle çalışabildiğim için büyük mutluluk duyduğum, bu zamana kadar desteklerini sakınmayıp daima yanımda olan değerli hocam Doç. Dr. Eylem ERDOĞAN'a teşekkür ediyorum. Ayrıca bu süreçte yanımda olan sevgili aileme de teşekkür ediyorum.

Haziran 2023,

Melek TUYLU

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
SEMBOL LİSTESİ.....	xii
KISALTMALAR.....	xvi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti.....	1
1.2. Tezin Amacı	5
1.3. Hipotez ve İzlenen Yol	5
2. KABLOSUZ HABERLEŞMEYE DAİR GENEL BİLGİLER.....	7
2.1. Sönümleme.....	7
2.1.1. Küçük ölçekli sönümleme (Small-scale fading).....	7
2.1.2. Geniş ölçekli sönümleme (Large-scale fading).....	9
2.2. Sönümlemeli Kanal Modelleri.....	11
2.2.1. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal (AWGN) Modeli	12
2.2.2. Nakagami- m Sönümleme Kanalı	13
2.2.3. Rayleigh Sönümleme Kanalı	14
2.2.4. Rician Sönümlemeli Kanal.....	16
2.2.5. Shadowed-Rician Kanal Modeli	17
3. İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME SİSTEMİ.....	19
3.1. Kuvvetlendir ve Aktar Metodu.....	20
3.2. Çöz ve Aktar Metodu	21
4. ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİ.....	23
4.1. Güneş Enerjisini Kullanan Enerji Hasatlama Sistemleri.....	23
4.2. Rüzgar Enerjisini Kullanan Enerji Hasatlama Sistemleri	23
4.3. Piezoelektrik Malzemelerle Enerji Hasatlama Sistemleri.....	24
4.4. RF Enerji Hasatlama Sistemleri	24

5. DİKEY HETEROJEN AĞLAR ve BİLEŞENLERİ.....	27
5.1. Uydu Ağı ve Bileşenleri.....	27
5.1.1. LEO	27
5.1.2. MEO	28
5.1.3. HEO.....	28
5.1.4. GEO.....	28
5.2. Hava Ağı ve Bileşenleri	29
5.2.1. HAPS ve Kullanım Alanları.....	29
5.3. GU.....	31
5.3.2. İHA ve Kullanım Alanları	30
6. ENERJİ HASATLAMA KULLANILAN HAPS DESTEKLİ RF HABERLEŞME SİSTEMİ	32
6.1. HAPS Destekli RF Haberleşme Sistemi	32
6.2. HAPS Destekli Haberleşme Sistemi Modeli.....	33
6.2.1. Kesinti Olasılığı	37
6.2.2. Ergodik Kapasite	39
6.3. Nümerik Sonuçlar ve Bulgular.....	40
7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	46
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	52

SEMBOL LİSTESİ

σ_n	Gauss rastgele değişkeninin standart sapması
σ_n^2	Gauss rastgele değişkeninin varyansı
σ	Standart sapma
σ^2	Varyans
Ω	Kanalın ortalama gücü
K	Rician parametresi
μ_n	Gauss rastgele değişkeninin ortalama değeri
π	Pi sayısı
$f(.)$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F(.)$	Birikimli dağılım fonksiyonu
$I_0(.)$	Sıfırıncı dereceden ve birinci türden Bessel fonksiyonunu
$K_{m-i}(\cdot)$	$m - i$ 'ninci dereceden değiştirilmiş 2.tür Bessel fonksiyonu
$\exp(\cdot)$	Üstel fonksiyon
$\Gamma(m)$	Gamma fonksiyonu
$\Pr(\cdot)$	Olasılık fonksiyonu
$E[.]$	Beklenen değer
P_{out}	Kesinti olasılığı
m	Nakagami $-m$ dağılımının parametresi
η	Enerji dönüşüm katsayısı
T	Enerji hasatlama süresi

$ \cdot $	Mutlak değer operatörü
N_0	Gürültünün güç spektral yoğunluğu
$N_0(dB)$	dB cinsinden gürültünün güç spektral yoğunluğu
K_{dB}	dB cinsinden Boltzmann sabiti
K	Kelvin
BW	dBHz cinsinden alıcıdaki gürültünün bant genişliği
T_N	dBK cinsinden Sistemdeki gürültünün sıcaklığı
$\sigma_{g_1}^2$	g_1 rastgele değişkeninin varyansı
E_H	Hasatlanan enerji
dB	Desibel
SNR (dB)	dB cinsinden SNR ifadesi
g_1	İki HAPS arasındaki kanal katsayısı
g_2	HAPS ile GU arasındaki kanal katsayısı
${}_1F_1(\cdot; \cdot; \cdot)$	0.dereceden Confluent Hipergeometrik fonksiyonu
$(\cdot)_k$	Pochhammer sembolü
H_1	Enerji verici HAPS
H_2	İletim yapan HAPS
P_{H_1}	Enerji verici HAPS'ın iletim gücü
L_{si}	Yol kaybı
$L_{H_1H_2}$	HAPS'lar arasındaki yol kaybı
$L_{PL}[dB]$	dB cinsinden RF yol kaybı
L_F	Serbest uzay yol kaybı

L_R	dB/km cinsinden yağmurdan kaynaklı zayıflama
L_O	dB cinsinden antenden kaynaklı bozulmalar
f_r	GHz cinsinden RF dalgasının frekansı
λ_r	RF dalgasının boyu
$d_{H_2, GU}$	H_2 ile GU arasındaki mesafe
y_{GU}	GU'da alınan sinyal
$L_{H_2 GU}$	H_2 ile GU arasındaki yol kaybı
s	H_2 'den GU'ya gönderilen sinyal
n_{GU}	GU'daki AWGN gürültüsü
L_A	Gaz atmosfer kaybı
P_t	Verici antenin gücü
P_r	Alıcı antenin gücü
G_t	Verici anten kazancı
G_r	Alıcı anten kazancı
d	Alıcı-verici anten arasındaki mesafe
λ	Sinyalin dalga boyu
c	Işık hızı
$z(t)$	Alıcıda alınan sinyal
$s(t)$	Gönderilen modüleli sinyal
$n(t)$	Toplamsal Gauss gürültüsü
$f(n)$	Gauss rastgele değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Ω	Nakagami-m kanalının ortalama gücü
S	Kaynak
R	Röle
D	Hedef
h_{sr}	Kaynak ile röle arasındaki kanal katsayısı
h_{rd}	Röle ile hedef arasındaki kanal katsayısı
h_{sd}	Kaynak ile hedef arasındaki kanal katsayısı
γ_{th}	Eşik değeri
R_b	Kanal kullanımı başına düşen iletilen bit sayısı
C_e	Ergodik kapasite
C_e^{up}	Ergodik kapasite için üst sınır
Ω_y	LOS bileşenin ortalama gücü
$2b_y$	Çoklu yol bileşeninin ortalama gücü
γ_0	Anlık SNR
$\overline{\gamma_0}$	Ortalama SNR

KISALTMALAR

AC	Alternatif akım (alternative current)
AF	Kuvvetlendir ve aktar (amplify and forward)
AM	Genlik modülasyonu (amplitude modulation)
AR	Hava rölesi (aerial relay)
AS	Anten seçimi (antenna selection)
AWGN	Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (additive white Gaussian noise)
BEP	Bit hata olasılığı (bit error probability)
BER	Bit hata oranı (bit error rate)
CDF	Birikimli dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function)
CR	Bilişsel radyo (cognitive radio)
D2D	Cihazdan cihaza (device-to-device)
DC	Doğru akım (direct current)
DF	Çöz ve aktar (decode and forward)
DH	İki atlamalı (dual hop)
e2e	Uçtan uca (end-to-end)
EH	Enerji hasatlama (energy harvesting)
EW	Üstel Weibull (Exponentiated Weibull)
FSO	Serbest uzay optik (free-space optical)
GEO	Jeostatik yörünge (geostationary orbit)
GHz	Gigahertz

GPS	Global konum belirleme sistemi (global positioning system)
GSM	Mobil iletişim için küresel sistem (global system for mobile communications)
GU	Yer kullanıcısı (ground user)
HAPS	Yüksek irtifa platform istasyonu (high altitude platform station)
HEO	Yüksek Dünya yörüngesi (high earth orbit)
HTA	Havadan ağır (heavier-than-air)
Hz	Hertz
İHA	İnsansız hava aracı
IP	Bilgi işleme (information processing)
km	Kilometre
kW	Kilowatt
LEO	Alçak Dünya yörüngesi (low earth orbit)
LOS	Görüş hattı (line of sight)
LTA	Havadan hafif (lighter-than-air)
m	Metre
MC	Monte Carlo
MEO	Orta Dünya yörüngesi (medium earth orbit)
MIMO	Çok-girişli çok-çıkışlı (multiple-input multiple-output)
NLOS	Görüş hattı olmayan (non line of sight)
OP	Kesinti olasılığı (outage probability)
PDF	Olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function)

PSD	Güç spektral yoğunluğu (power spectral density)
PSR	Güç bölme tabanlı röle (power splitting – based relay)
QoS	Ağ iletişimi hizmet kalitesi (quality of service)
RF	Radyo frekansı (radio frequency)
SAGIN	Uzay-hava-yer istasyonu entegre ağ (space-air-ground station integrated network)
SatCom	Uydu haberleşmesi (satellite communication)
SNR	Sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio)
TSR	Zaman anahtarlama tabanlı röle (time switching – based relay)
TV	Televizyon
UHF	Ultra yüksek frekans (ultrahigh frequency)
VHetNet	Dikey heterojen ağlar (vertical heterogeneous network)
W	Watt
Wi-Fi	Kablosuz bağlantı alanı (wireless fidelity)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Nakagami-m dağılımının farklı m değerleri için PDF'si	14
Şekil 2.2 Rayleigh dağılımının farklı σ değerleri için PDF'si	15
Şekil 2.3 Rician dağılımının farklı K değerleri için PDF'si.....	17
Şekil 3.1 İşbirlikli Sistem Modeli.....	20
Şekil 3.2 Kuvvetlendir ve Aktar Modeli.	21
Şekil 3.3 Çöz ve Aktar Modeli.....	22
Şekil 6.1 HAPS Destekli Haberleşme Sistem Modeli.....	34
Şekil 6.2 $R_b = 3$ ve $\eta = 0.8$ için SNR'a karşı kesinti olasılığı	41
Şekil 6.3 Farklı η değerleri için ve enerji hasatlamasız durum için SNR'a karşı kesinti olasılığı	42
Şekil 6.4 Şiddetli gölgeleme durumunda $\eta = 0.8$ iken farklı R_b değerleri için SNR'a karşı OP performansı	43
Şekil 6.5 SNR 20 dB iken farklı R_b değerleri için η' ya karşı OP performansı	44
Şekil 6.6 Farklı gölgeleme seviyeleri için $\eta = 0.2$ ve $R_b = 3$ iken SNR'a karşı ergodik kapasite performansı	45

1. GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Yeni nesil enerji kaynağı olarak enerji hasatlama sistemleri giderek daha popüler hale gelmektedir. Yeni bir enerji kaynağı olarak nitelenebilecek olan enerji hasatlama sistemleri, enerji kullanan her cihazın çevrede bulunan mevcut enerji kaynaklarını kullanarak, enerji bakımından kendi kendine yetmesi olarak açıklanabilir. Mevcut enerji kaynaklarından bazıları güneş, ısı, rüzgar ve elektromanyetik dalgalardır. Bunların içinde radyo frekansında (RF) elektromanyetik dalgalardan enerji hasatlamak haberleşmede düşük güç harcayan cihazların yaygınlaşmasıyla birlikte oldukça önemli hale gelmiştir. RF enerji hasatlama, İnsansız Hava Araçları (İHA) kullanılan haberleşme sistemlerinde kullanılan bir teknolojidir. Literatürde İHA'lar röle olarak kullanılır ve mobil kullanıcılara bilgi iletimi sağlar. (Babaei ve Aygolu 2017)'de enerji hasatlayan röle aracılığıyla iki atlamalı sistemin uçtan uca bit hata olasılığı (bit error probability, BEP) hesaplanmıştır. Enerji hasatlama faktörü arttıkça performansın iyileştiği gözlemlenmiştir. (Nasir vd. 2014)'de Çöz ve Aktar (decode and forward, DF) yöntemi kullanılarak hem zaman anahtarlama tabanlı röle (time switching-based relay, TSR) hem de güç bölme tabanlı röle (power splitting-based relay, PSR) protokolleri için sistemin ergodik kapasite verimi incelenmiştir. (Mheich ve Savin 2017)'te kuvvetlendir-ve-aktar (amplify and forward, AF) tekniği kullanılarak işbirlikli enerji hasatlama sisteminin kesinti olasılığı (outage probability, OP) incelenmiştir. Ayrıca, tüm sistemin güç kısıtlaması altında PSR protokolüne kıyasla verimi artırmak için TSR protokolünde zaman tahsisi parametresi için optimum değer hesaplanmıştır. (Nasir vd. 2013)'te hem PSR hem de TSR protokolleri için kaynak ile hedef arasında direkt görüş hattı (line of sight, LOS) olmadığı durumda AF tekniği kullanılarak OP ve ergodik kapasite performansı üzerine çalışılmıştır. İki ve üç

iletim fazlı TSR protokolü için iki yöllü fiziksel katman ağ kodlama AF geçiş ağının bit hata oranı (bit error rate, BER) performansı (Huang, Sadeghi, ve Nasir 2016)'te türetilmiştir. Öte yandan, TSR protokolünde belirli bir spektral verimlilik seviyesini korumak için bir modülasyon karışımı yöntemi (Huang, Sadeghi, ve Nasir 2016)'te tanıtılmakta ve sistem BER performansı, sabit spektral verimlilik değerleri altında analitik olarak değerlendirilmektedir. (Tao, Salem, ve Hamdi 2016)'da hibrit enerji hasatlama aktarma protokolü için bir alıcının tanıtıldığı AF aktarma stratejisi için gecikme sınırlı ve gecikmeye toleranslı iletim modları için veri kapasitesi incelenir. Nakagami- m sönmüleme kanalı üzerinden çok girişli çok çıkışlı (multiple-input multiple-output, MIMO) iki atlamalı (dual hop, DH) sisteminin verimi (Le Ngoc, Vo, ve Hoang 2017)'de analiz edilmiştir. (Zhou vd. 2015)'de, ortak anten seçimi (antenna selection, AS) tekniği kullanılarak rölenin enerji hasatlama süreci ve alınan sinyalden gelen bilgileri işlemek için PSR protokolünün uygulandığı AF tekniği kullanılan DH sistemi incelenmektedir. Optimum PSR ve AS kombinasyonu için elde edilebilecek maksimum bit hızı hesaplanır. Tüm bu çalışmalarda genel prensip enerji hasatlama yapan bir rölenin hasatlattığı enerji ile hedefe bilgi aktarmasıdır. Böylece hem enerjiden tasarruf edilmiş olur hem de röle sayesinde sistemin performansı iyileştirilmiş olur. Röle bilgi aktarma işlemini AF ve DF kullanarak yapabilmektedir. Enerji hasatlama işlemi ise PSR ve TSR protokolleri kullanarak yapılabilmektedir.

Literatürde enerji hasatlamayı İHA ile yapan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda İHA bir nevi röle görevi görmektedir. (Zhang vd. 2020) çalışmasında doğrusal olmayan bir enerji hasatlama modeliyle yer kullanıcıları (ground user, GU) için toplam hasatlanan enerji miktarını en üst düzeye çıkarmak için İHA destekli güç aktarım ağları incelenmiştir. (Ozden, Tuylu, ve Erdogan 2020a) çalışmasında RF enerji hasatlama kullanılan İHA tarafından desteklenen işbirlikli bir yapı önerilmektedir. Önerilen modele ait RF enerji

hasatlama devresi tasarımı sunulmuş ve OP performansı elde edilmiştir. (Aprilya vd. 2022)'de RF sinyallerini ileterek kaynakta ve çoklu rölelerde enerji hasatlama sürecini desteklemek için AF tekniği kullanılan İHA destekli cihazdan cihaza haberleşme (device-to-device, D2D) sistemi incelenmiştir. Bu çalışmada enerji hasatlama sürecinde TSR protokolü kullanılmıştır. (Bhowmick, Roy, ve Kundu 2020)'de İHA'nın bilişsel radyo (cognitive radio, CR) kaynağından RF enerjisi hasatladığı bir İHA destekli CR ağının veri kapasitesi performansı incelenmektedir. (Z. Yang, Xu, ve Shikh-Bahaei 2020) çalışması İHA'nın kullanıcılara yarı çift yönlü veya tam çift yönlü olarak enerji aktardığı ve kullanıcıların İHA'ya veri iletimi için enerji hasatladığı İHA destekli enerji hasatlama kullanan bir kablosuz haberleşme sistemini incelemiştir. (L. Yang vd. 2018)'de enerji hasatlayan İHA destekli sistemin kentsel ortamdaki performansı incelenmiştir. İHA, AF yöntemi ile hedefe bilgi aktarmaktadır. İHA ile yeryüzündeki hedef arasındaki haberleşme kanalı direkt LOS olan ve direkt görüş hattı olmayan (non line of sight, NLOS) durumlarda da yayılma parametrelerini gösterebilmek için shadowed-Rician ile modellenmiştir.

Bu tezde RF enerjisi ve güneş enerjisi hasatlayan yüksek irtifa platformları HAPS kullanılarak GU'ya bilgi aktaran bir haberleşme sistemi önerilmiştir. Literatürde enerji hasatlamanın HAPS ile birlikte kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Özellikle belirli yükseklikteki hava araçları arasında LOS olacağı için serbest uzay optik (free-space optical, FSO) haberleşmesi bilgi

aktarımında kullanılabilir. HAPS ile GU arasında LOS bileşen olmadığı durumlar için RF haberleşmesi kullanılabilir. Literatürde uydu haberleşmesi üzerinden karasal haberleşme yapılan çalışmalarda RF/FSO hibrit kanal modeli tercih edildiği görülmektedir. (Zhi Chen, Teng Joon Lim, ve Motani 2014) çalışmasında aşağı yönlü (downlink) iletimde HAPS'ın röle olarak kullanıldığı alçak dünya görüngesi (low earth orbit, LEO) uydu haberleşme sistemi incelenmiştir. Hem uydunun hem de HAPS'ın kendi bilgi iletişimleri ve diğer gereksinimlerini sağlamak için güneş enerjisini hasatladıkları bir sistem tasarlanmıştır. Bu çalışmanın amacı uydudan belirli miktarda bilgi iletirken bir yörüngede enerji kullanımını en aza indirmektir.

Literatürde HAPS'ın enerji hasatlama teknolojisi ile tasarlandığı sistem az sayıda çalışılmıştır. Enerji hasatlamamanın yapılmadığı fakat hibrit haberleşme türlerinin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. (Yahia vd. 2022)'da hibrit RF/FSO iletişimine sahip yeni bir HAPS destekli uydu-yer bağı uydu haberleşmesi (satellite communication, SatCom) modeli önerilmiştir. (Yahia, Erdogan, ve Kurt 2023)'de çoklu gönderim (multicast) uygulamaları için HAPS destekli hibrit RF/FSO/RF ve uydu destekli hibrit RF/FSO/FSO/RF şemaları olmak üzere iki farklı kullanım durumu önerilmiştir. Her iki kullanım durumu için de OP, bit hata olasılığı, ergodik kapasite ve enerji verimliliği gibi performans ölçümleri yapılmıştır. HAPS'lar arasında LOS olması sebebiyle FSO haberleşmesi tercih edilmiştir. HAPS ile GU arasındaki linklerde LOS bileşen olmayışı sebebiyle haberleşme türü olarak RF haberleşmesi tercih

edilmiştir. RF haberleşmesinin yapıldığı kanallar shadowed-Rician sönmülemeli kanal ile modellenmiştir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin amacı; enerji hasatlama teknolojisini HAPS destekli haberleşme sistemlerinde kullanarak literatüre yenilik kazandırmaktır. Enerji hasatlama teknolojisi genellikle düşük irtifadaki İHA'larda kullanılmıştır. Bu çalışmada yüksek irtifada bulunan HAPS'larda enerji hasatlama kullanılarak hem enerjiden tasarruf edilmiş oluyor hem de yol kaybını azaltarak OP performansı, ergodik kapasite gibi performans ölçütlerinde iyileştirme sağlanmış olmaktadır.

1.3. Hipotez ve İzlenen Yol

Bu tez çalışmasında; RF enerji hasatlama teknolojisinden ve içerdiği güneş panelleri sayesinde güneş enerjisinden yararlanan HAPS destekli bir haberleşme sistemi önerilmiştir. Bu haberleşme sisteminde en yüksekte bulunan güç desteği sağlayan HAPS bünyesinde nükleer reaktör ve güneş panelleri bulundurulur. Ayrıca RF dalgalarını hasatlayarak ek bir enerji desteği sağlar. Havada kalma ve hareket etme gibi işlemlerine yetecek kadar gücü buradan karşılamaktadır. Bu HAPS'ın aşağısında bulunan ikinci HAPS enerji ihtiyacını, enerji hasatlayan birinci HAPS'dan karşılar. İkinci HAPS yeryüzünde bulunan GU'ya bilgi aktarır. Yani önerdiğimiz sistemde HAPS'lar arasında sadece güç aktarılırken, ikinci HAPS'dan GU'ya bilgi aktarılmış olur. HAPS ile GU arasında binalar, insanlar, ağaçlar vb. gibi gölgeleme unsurundan dolayı kanal shadowed-Rician ile modellenmiştir. HAPS'lar arasında LOS olduğu için HAPS'lar arasındaki kanal Nakagami-m dağılımı ile modellenmiştir. Tüm sistemin uçtan uca (end-to-end, e2e) sinyal

gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) ifadesi verilen kanal modellerine ve hasatlanan enerji miktarına göre çıkarılmıştır ve bu anlık SNR ifadesinden yararlanarak sistemin OP ve ergodik kapasite performansı analizleri yapılmış ve Monte Carlo (MC) simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda teorik ve simülasyon sonuçlarının uyduğu tespit edilmiştir. Farklı sistem parametreleri için gerekli karşılaştırmalar tez kapsamında sunulmuştur. En iyi performansı veren parametreler tespit edilmiştir ve gelecekte kullanılabilecek haberleşme sistemi hakkında bilgi verilmiştir.

Bu tez çalışmasının sonraki bölümleri şu şekilde devam etmektedir: Bölüm 2’de kablosuz haberleşmeye ve kullanılan sönümlmeli kanal modellerine dair temel bilgiler verilmiştir. Bölüm 3’te işbirlikli haberleşme sistemi tanıtılmış ve röleli sistemlerde kullanılan bilgi aktarma metodlarına değinilmiştir. Bölüm 4’te enerji hasatlama teknolojisine ve yöntemlerine değinilmiştir. Literatürde yaygın olması sebebiyle özellikle RF enerji hasatlama hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Bölüm 5’te dikey heterojen ağlar (vertical heterogeneous network, vHetNet) kısaca tanıtılıp İHA ve HAPS’lar hakkında bilgi verilip kullanım alanlarına değinilmiştir. Bölüm 6’da ise önerilen enerji hasatlama kullanılan HAPS destekli RF haberleşme sistemi ayrıntılı biçimde tanıtılmıştır. Son olarak Bölüm 7’de çalışmanın sonuçları ve gelecekte kullanılması planlanan öneriler yer almaktadır.

2. KABLOSUZ HABERLEŞMEYE DAİR GENEL BİLGİLER

Kablosuz haberleşmede gönderilen sinyal yol kaybı, çok yollu sönümleme, gürültü, gölgeleme gibi olumsuz etkilerden dolayı oldukça zayıflar. Özellikle uzun mesafelere kablosuz iletimde gönderilen sinyalde daha çok kayıplar olur. Bu problemleri çözmek için işbirlikli bir haberleşme sistemleri literatürde bolca kullanılmıştır. Bu bölümde, kablosuz haberleşme hakkında genel bilgiler verilecektir. Sonraki bölümde ise bu problemlerin çözümlerinden biri olan işbirlikli haberleşme sistemlerinden bahsedilmiştir.

2.1. Sönümleme

Kablosuz iletişimde sönümleme, bir radyo sinyalinin gücünün ve kalitesinin zaman ve mesafeye göre dalgalandığı bir olgudur. Sönümlemeye; çok yollu yayılma, atmosferik koşullar ve iletim yolundaki nesnelerin hareketi dahil olmak üzere çeşitli faktörler neden olur. Zayıflama, özellikle yüksek frekans bantlarında çalışan kablosuz iletişim sistemlerinin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir (anonim, t.y.).

2.1.1. Küçük ölçekli sönümleme (Small-scale fading)

Küçük ölçekli sönümleme, kablosuz haberleşmede yaygın bir sorundur. Vericiden alıcıya sinyal iletilirken ortamdaki nesnelere çarpılarak yansıma (reflection), kırılma (scattering) ve saçılmaya (scattering) maruz kalması sonucu çoklu sinyal yolu (multiple signal paths) oluşur. Bu sinyal yolları, sinyalde girişime ve bozulmaya neden olarak, alıcıdaki sinyal gücünde dalgalanmalara neden olabilir. Varyasyonlar birkaç santimetreden birkaç metreye kadar kısa mesafelerde geldiği için küçük ölçekli denmektedir. Küçük ölçekli sönümleme çok hızlı, bazen mikrosaniye veya daha kısa sürede gerçekleşebilir. Genel olarak; küçük ölçekli sönümleme, kablosuz haberleşmede alınan sinyalin kalitesini etkileyen yaygın bir sorundur. Bununla

birlikte, uygun hafifletme teknikleri ile, küçük ölçekli sönümleme varlığında bile güvenilir haberleşmeyi sürdürmek mümkündür.

2.1.1.1. Çok yollu sönümleme (Multipath fading)

Özellikle kentsel alanlardaki hücresel sistemlerin çoğunda LOS bulunmaz ve direk görüşü engelleyen yüksek binalar sebebiyle önemli ölçüde kırılma kayıpları oluşmaktadır. Çeşitli engellerden yansıyarak ve farklı uzunlukta yollar kat ederek alıcıya ulaşan dalgalar çok yollu yayılıma (multipath propagation) neden olmaktadır. Bu dalgaların gücü verici ile alıcı arasındaki mesafeye bağlı olarak azalmaktadır.

Çok yollu sönümleme, çok yollu yayılımın olduğu ve yolların herhangi bir nedenle değiştiği herhangi bir ortamda meydana gelir. Gönderilen sinyalin yayılma, saçılma, kırılma vb. etkilerden dolayı çok sayıda bileşeni alıcıya ulaşacaktır ve bu durumda yol uzunlukları değişeceğinden, yalnızca oluşan bileşenlerin göreceli güçlerini değil fazlarını da değiştirmektedir.

2.1.1.2. Doppler yayılımı (Doppler spread)

Bağıl hareket, iletilen sinyalin frekansında Doppler kayması olarak bilinen bir kaymaya neden olur. Doppler kayması, sinyalin farklı frekans bileşenlerinin alıcıya farklı fazlar ve genliklerle ulaşmasına neden olur. Bu durum sinyalin genliği ve fazında hızlı değişimlere neden olmasıyla sonuçlanmasıyla beraber sönümleme ve alınan sinyalde hatalara yol açmaktadır. Doppler yayılımı, Doppler kaymasının değişim hızının bir ölçüsüdür ve kanalın zamanla değişen özelliklerini belirler. Daha yüksek bir Doppler yayılımı, kanalda daha hızlı bir zaman değişimini gösterirken, daha düşük bir Doppler yayılımı daha yavaş bir zaman değişimini gösterir. Doppler yayılımı; eşitleme (equalization),

çeşitleme (diversity) ve uyarlamalı modülasyon (adaptive modulation) gibi teknikler kullanılarak azaltılabilir. Doppler yayılımı; kablosuz iletişim sistemlerinin tasarımında, özellikle verici ve alıcı arasında genellikle önemli nispi hareketin olduğu mobil uygulamalar için önemli bir husustur.

2.1.2. Geniş ölçekli sönümleme (Large-scale fading)

Geniş ölçekli sönümleme, kablosuz haberleşmede sinyal gücü uzun mesafelerde azaldığında meydana gelmektedir. Varyasyonlar uzun mesafelerde, tipik olarak birkaç kilometrede meydana geldiği için geniş ölçekli denmektedir. Küçük ölçekli sönümleme bireysel sembollerini veya bitleri etkilerken büyük ölçekli sönümleme sinyalin tümünü etkiler. Geniş ölçekli sönümleme, yavaş değişir, yani saniyeler ve dakikalar arasındaki zaman ölçeklerinde değişir. Büyük ölçekli sönümleme için hafifletme teknikleri arasında güç kontrolü, anten yerleşimi, tekrarlayıcılar ve site çeşitliliği yer alır. Genel olarak, geniş ölçekli sönümleme, alınan sinyalin kalitesini önemli ölçüde etkileyebileceğinden, kablosuz haberleşme sistemi tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür.

2.1.2.1. Yol kaybı (Path loss)

Bir elektromanyetik dalga boşlukta yayılırken kırılma, yansıma, saçılma ve kırınım gibi birtakım etkiler ile zayıflar. Yol kaybı ilerlediği ortamdan (kırsal, kentsel vs.), havanın nemli ya da kuru olması, alıcı ve verici arasındaki uzaklık, alıcı ve vericinin ayrı ayrı yerden yükseklikleri gibi birçok şeyden etkilenir. Kısaca yol kaybı, birim alana düşen gücün azalması olarak ifade edilebilir. Yol kaybının daha anlaşılır olabilmesi için genellikle desibel (dB) olarak ifade edilir. Desibel sayesinde çok büyük sayılar ile uğraşılmaz.

En basit ifade ile yol kaybı, denklem (2.1)'de görülebileceği gibi verici gücü ile alıcı gücünün oranlanmasıyla elde edilebilir.

$$L_{si} = \frac{P_t}{P_r} \quad (2.1)$$

Burada L_{si} yol kaybını, P_t verici antenin gücünü ve P_r ise alıcı antenin gücünü ifade eder. Yol kaybı desibel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$L_{si}[dB] = 10 \log_{10}(L_{si}) \quad (2.2)$$

LOS, alıcı ve verici arasında herhangi bir engel bulunmaması yani alıcı ve vericinin birbirini doğrudan görebilmesi durumunu ifade eder. Alıcı ve verici arasında direkt görüş hattının sağlanması, yol kaybını azaltarak maksimum verimle iletim yapılmasını sağlar.

Serbest uzay yol kaybı modeli, alıcı ve verici arasında direkt görüş hattının sağlandığı durumda alınan sinyal üzerinden kayıpların ölçülebilmesi için kullanılır.

Serbest uzay yol kaybı modeli verici ile alıcı arasında haberleşmeyi engelleyecek bir durumun olmadığı yani LOS'un olduğu durumda kullanılır. Bu modele göre alınan sinyal, anten kazançları da hesaba katıldığında şu şekilde yazılabilir:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.3)$$

Burada G_t verici anten kazancını, G_r alıcı anten kazancını, d ; alıcı ve verici antenler arasındaki mesafeyi, λ sinyalin dalga boyunu göstermektedir.

Sinyalin dalga boyu ışık hızı denkleminden yararlanarak bulunabilir:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.4)$$

Burada c ışık hızını, f ise sinyalin frekansını göstermektedir.

Ancak pratikte alıcı ve vericinin birbirini doğrudan görebileceği engelsiz bir ortam her zaman sağlanamayacağı için bu kayıpların hangi oranda olduğu tespit edilip belli ödünleşimler ile kaybın azaltılması noktasında yardımcı olabilecek farklı yol kaybı modelleri oluşturulmuştur. Keenan-Motley Modeli, Logaritmik-Uzaklık Modeli ve Hata-Okumura Modeli gibi yol kaybı modelleri örnek olarak gösterilebilir.

2.1.2.2. Gölgeleme (Shadowing)

Gölgeleme, sinyal yolundaki engellerin veya engellerin varlığı nedeniyle oluşan büyük ölçekli bir sönümleme türüdür. Gölgeleme, alıcı ortamda hareket ettikçe sinyal gücünün değişmesine neden olur. Gölgeleme genellikle, ortamın özelliklerine bağlı olan bir ortalama ve standart sapma ile bir log-normal dağılım olarak modellenir. Gölgeleme, yavaş değişir ve genel olarak alınan sinyal gücünü etkiler. Alıcı ve vericide çok sayıda anten kullanılarak çoklu sinyal yollarının birleştirildiği çeşitleme (diversity) tekniği veya sinyal işleme teknikleri kullanılarak gölgeleme etkilerini tahmin edip bu etkiler hafifletilebilir.

2.2. Sönümlemeli Kanal Modelleri

Kablosuz haberleşmede sinyal vericiden alıcıya iletilirken saçılma, kırılma, yansıma gibi etkilere maruz kalır ve bunun sonucunda çok yollu yayılım meydana gelir. Oluşan çok sayıda sinyal yolları birbirine yapıcı ya da yıkıcı

etki oluşturur ve alıcıda alınan sinyalin gücünde ve fazında değişim meydana getirir. Yani çok yollu sönümleme olayı meydana gelir. Kablosuz haberleşmede çok yollu sönümlemeyi de dikkate alan kanal modelleri önerilmiştir. Rayleigh, Rician ve Nakagami- m gibi kanallar küçük ölçekli sönümlemeleri modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tezde HAPS'lar arasında Nakagami- m kanal modeli kullanılmıştır. HAPS ile GU arasında ise haberleşmeyi olumsuz engelleyecek bina, insan, ağaç vb. yapılar bulunabileceği için shadowed-Rician kanal modeli kullanılmıştır. Shadowed-Rician kanal modeli ilk olarak Loo tarafından kara-mobil uydu bağlantılarını tanımlamak için önerildi ve o zamandan beri ultra yüksek frekans (ultrahigh frequency, UHF) bandı, L bandı, S bandı ve Ka bandı gibi çeşitli frekans bantları üzerinde doğrulanmıştır. Bu model, doğrudan LOS bileşeninin bina, ağaçlar, tepeler ve diğer nesneler tarafından tamamen veya kısmen engellendiği ve bu nedenle rastgele gölgelemeye tabi olduğu bir Rician (Nakagami- n) kanalından oluşur ('Simon ve 'Alouini 2005).

2.2.1. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal (AWGN) Modeli

Modüle edilmiş sinyaller gürültü sinyallerine maruz kalır. Sinyal alıcıları, modüle edilmiş sinyalin aksine gürültü içeren bir sinyal alırlar. Demodülasyon bölümünü inceleyebilmemiz için iletilecek sinyale eklenecek AWGN'i incelememiz gerekmektedir. Modülasyon şemalarının analizi için bir kanal modeli olan AWGN modelinde kanal sadece sinyale beyaz gauss gürültüsü ekler. Kanalın faz frekans tepkisi lineer olmakla birlikte genlik frekans tepkisi düzdür (limitsiz veya bant genişliği sonsuz) (Özden 2015).

Alıcıda alınan sinyal $z(t)$, gönderilen modüleli sinyal $s(t)$ ve toplamsal Gauss gürültüsü $n(t)$ ile gösterildiğinde alınan sinyali $z(t) = s(t) + n(t)$ şeklinde ifade edebiliriz.

AWGN kanalda gürültü rastgele değişir ve bu gürültü Gauss dağılımlıdır. Bu Gauss dağılımlı rastgele değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) şu şekilde ifade edilmektedir:

$$f(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left(-\frac{(n-\mu_n)^2}{2\sigma_n^2}\right), \quad -\infty < n < \infty \quad (2.5)$$

burada n , μ_n ortalamalı ve σ_n^2 varyanslı Gauss rastgele değişkenidir.

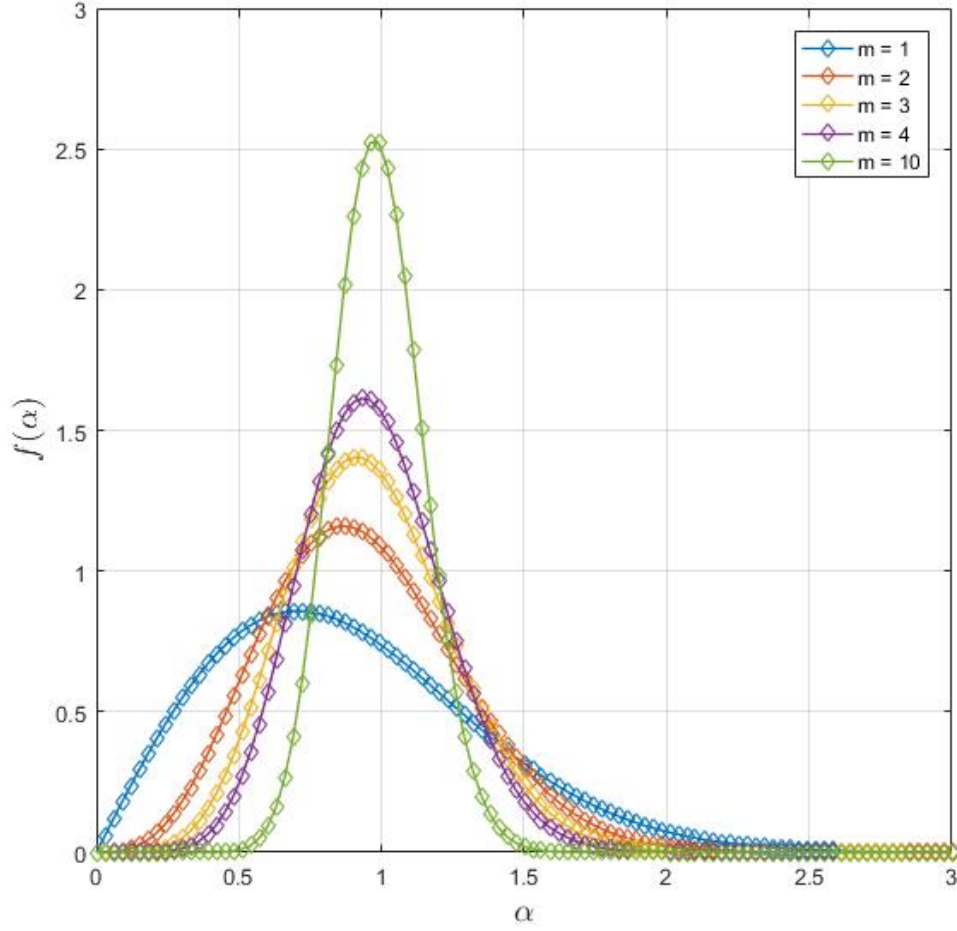
2.2.2. Nakagami- m Sönümleme Kanalı

Nakagami- m dağılımı, uzun mesafeli ve yüksek frekanslı kanallardaki hızlı solmayı niteler. Nakagami- m dağılımının bazı durumlarda Rayleigh, Ricean veya logaritmik normal dağılımdan daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Nakagami- m kanalı Rayleigh kanalına göre daha düşük veya daha yüksek şiddetteki sönümleme durumlarında kullanılabilir. $m=1$ olduğu durumda Nakagami- m kanalı Rayleigh kanalına dönüşmektedir. Bu bilgilerin ışığında Nakagami- m kanalının çok daha kapsamlı olduğu görülmektedir.

Nakagami- m kanalının PDF'si şu şekildedir:

$$f(\alpha) = \frac{2m^m \alpha^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\alpha^2}{\Omega}\right), \quad \alpha \geq 0 \quad (2.6)$$

burada α rastgele değişkeni, m sönümleme parametresini, $\Omega = E[\alpha^2]$ ortalama gücü temsil etmektedir. $\Gamma(\cdot)$ Gamma fonksiyonunu gösterir ve $\Gamma(m) = \int_0^\infty x^{m-1} \exp(-x) dx$ şeklindedir. Şekil 2.1'de Nakagami- m dağılımının $m = 1, 2, 3, 4$ ve 10 için PDF'si verilmiştir. m değeri arttıkça aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi PDF eğrisinin sivrileştiği gözlemlenmektedir. Ayrıca $m \rightarrow \infty$ durumunda Nakagami- m kanalının sönümleme etkisi ortadan kalkar ve AWGN kanalına yakınsar.



Şekil 2.1 Nakagami- m dağılımının farklı m değerleri için PDF'si

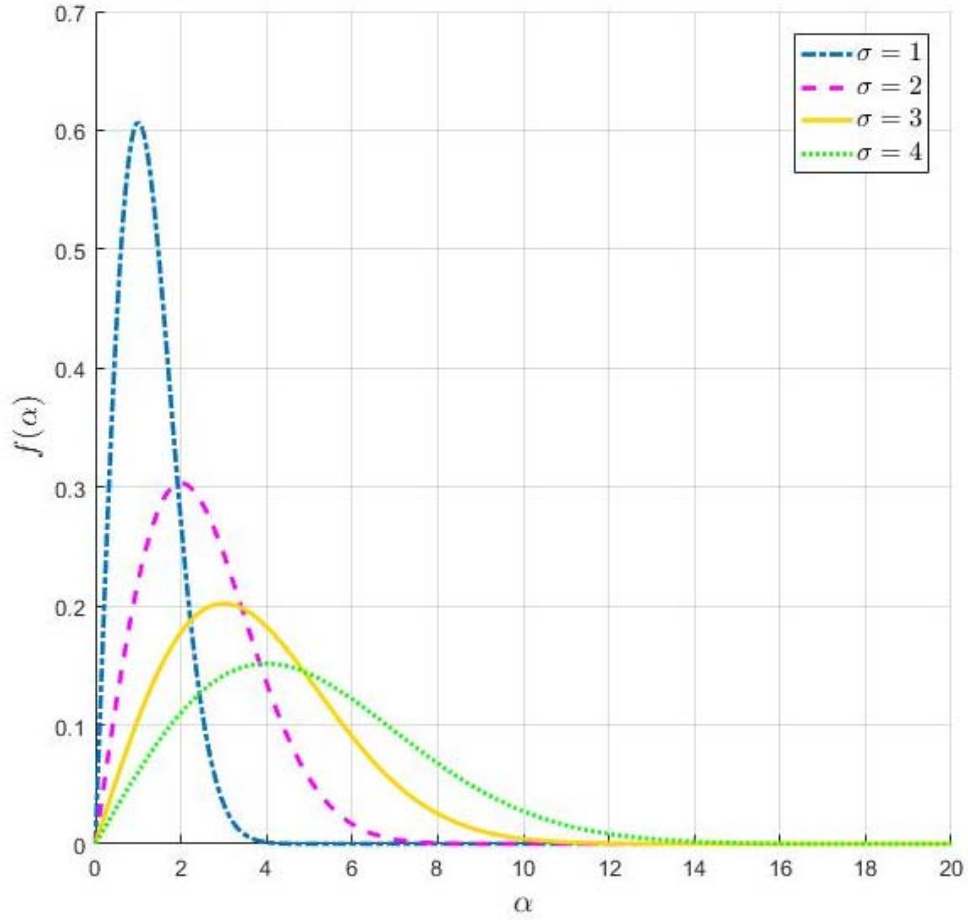
2.2.3. Rayleigh Sönümleme Kanalı

Verici ile alıcı arasında LOS yoksa yani verici ile alıcının birbirini direkt göremediği durumda Rayleigh sönümleme kanalı kullanılmaktadır. Yani bu durumda Rayleigh kanalının PDF'si şu şekildedir:

$$f(\alpha) = \frac{2\alpha}{\Omega} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{\Omega}\right), \quad \alpha \geq 0 \quad (2.7)$$

Burada, kanal sönümleme katsayısının ortalama gücünü $\Omega = E[\alpha^2] = 2\sigma^2$ eşitliğiyle ifade edebiliriz. Burada σ^2 , α rastgele değişkeninin varyansını

göstermektedir. Denklem (2.7), denklem (2.6)'daki m yerine 1 yazılmasıyla elde edilmektedir. Şekil 2.2'de Rayleigh dağılımına ait PDF eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.2 Rayleigh dağılımının farklı σ değerleri için PDF'si

(2.7) denklemi kullanılarak Rayleigh dağılımının birikimli dağılım fonksiyonunu (cumulative distribution function - CDF) bulabiliriz:

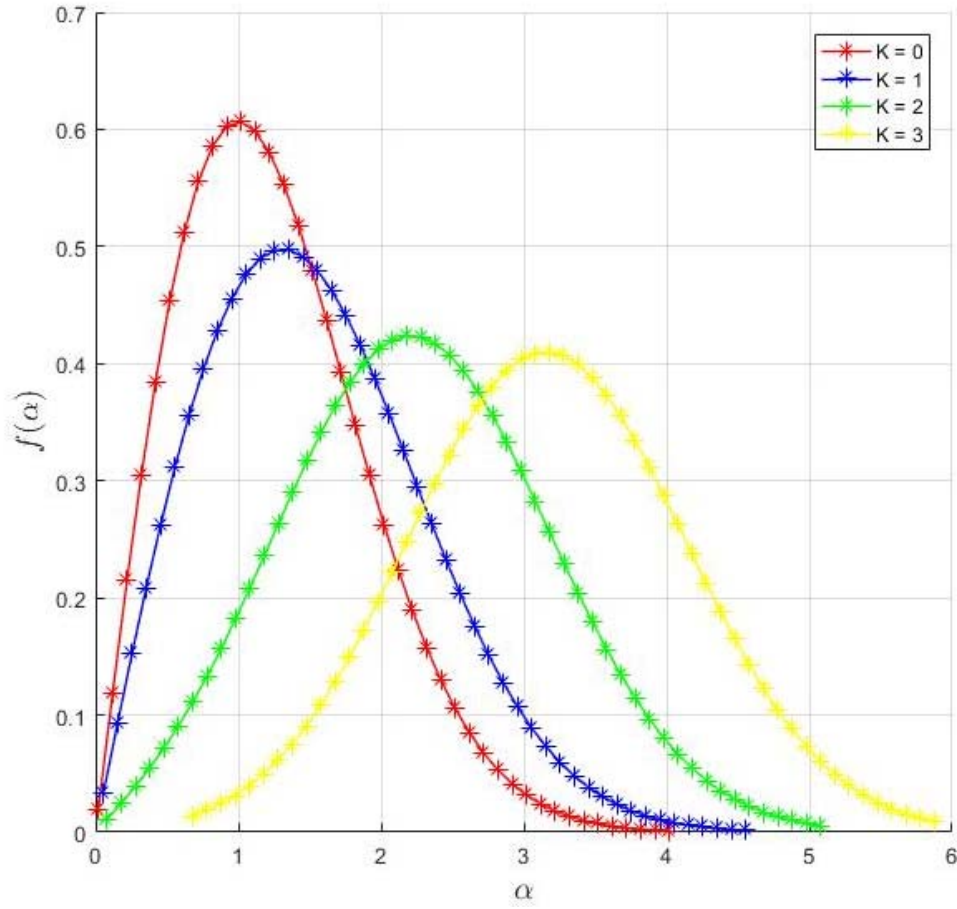
$$F(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{2x}{\Omega} \exp\left(-\frac{x^2}{\Omega}\right) dx = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha^2}{\Omega}\right), \quad \alpha \geq 0. \quad (2.8)$$

2.2.4. Rician Sönümlemeli Kanal

Rician sönümlemeli kanal, Rayleigh kanalından farklı olarak LOS'un olduğu ortamlarda kullanılabilir. Bu kanal modelinde, doğrudan görüş hattından gelen baskın sinyal, farklı yollardan ve farklı açılardan yansıyan rastgele çok yollu bileşenlerden oluşur. Rician sönümlemeli kanal, en az bir doğrudan görüş hattının bulunduğu ve doğrudan görüş hattından alıcıya gelen sinyalin diğer yansıyarak ve saçılarak alıcıya gelen sinyallere göre daha baskın olduğu bir durumdur. Rician kanal modelindeki LOS bileşen olmadığında Rayleigh kanal modeli elde edilir. Rician kanalının PDF'si şu şekildedir:

$$f(\alpha) = \frac{2\alpha(K+1)}{\Omega} \exp\left(-K - \frac{(K+1)\alpha^2}{\Omega}\right) I_0\left(2\alpha\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}}\right), \quad \alpha \geq 0 \quad (2.9)$$

Burada K , LOS bileşenin gücünün saçılma ve yansıma sonucu oluşan diğer bileşenlerin gücüne oranını ifade eder. $\Omega = 2\sigma^2(K+1)$ Rician kanalın ortalama gücünü gösterir ve $I_0(\cdot)$ birinci türden ve sıfırıncı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonunu ifade eder. Şekil 2.3'te farklı K değerleri için Rician dağılımının PDF'si verilmiştir ve $\sigma=1$ olarak alınmıştır. $K=0$ değerinde dağılım, aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi Şekil 2.2'deki Rayleigh dağılımına dönüşmektedir.



Şekil 2.3 Rician dağılımının farklı K değerleri için PDF'si

2.2.5. Shadowed-Rician Kanal Modeli

Shadowed-Rician kanal modeli genel olarak, doğrudan LOS bileşeninin ağaç, insan, bina vb. yapılar nedeniyle engellendiği durumlarda kullanılmaktadır. y rastgele değişken olmak üzere, shadowed-Rician kanalının PDF'si aşağıdaki gibidir ('Simon ve 'Alouini 2005):

$$f(y) = \alpha_y 2y \exp(-\beta_y y^2) {}_1F_1(m_y; 1; \delta_y y^2) \quad (2.10)$$

burada, $\alpha_y = \frac{1}{2b_y} \left(\frac{2b_y m_y}{2b_y m_y + \Omega_y} \right)^{m_y}$, $\beta_y = \frac{1}{2b_y}$, $\delta_y = \frac{\Omega_y}{2b_y(2b_y m_y + \Omega_y)}$ olarak

alınmıştır. Ω_y LOS bileşenin ortalama gücü, $2b_y$ ise çoklu yol bileşenlerinin ortalama gücüdür. ${}_1F_1(;;\cdot)$ 0.dereceden Confluent Hipergeometrik fonksiyonunu gösterir ve

$${}_1F_1(m_y; 1; \delta_y y^2) = \exp(\delta_y y^2) \sum_{k=0}^{m_y} \frac{(1-m_y)_k (-\delta_y y^2)^k}{(k!)^2} \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilir (Ai vd. 2019). Buradaki $(\cdot)_k$ Pochhammer sembolüdür (Yahia, Erdogan, ve Kurt 2023).

3. İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME SİSTEMİ

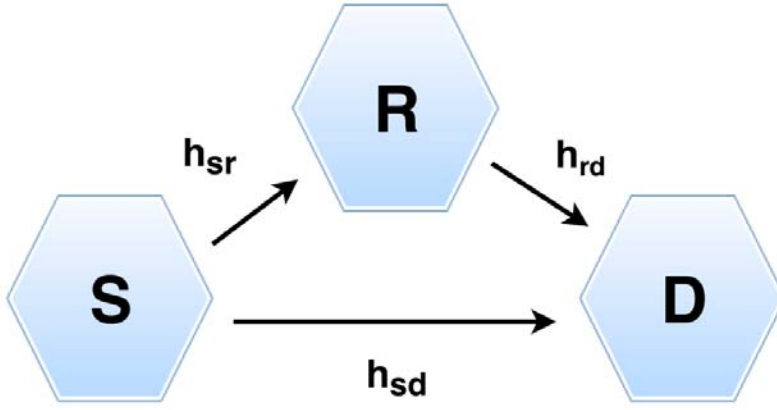
Kablosuz haberleşmede sönümlleme etkisinden dolayı oldukça zayıflayan sinyalde özellikle uzun mesafelerde çözüm olarak röle kullanılmaktadır. Bu sebeple literatürde işbirlikli haberleşme sistemleri üzerinde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır.

Kaynak-hedef arasındaki uzaklık arttıkça haberleşme hızı azalmaktadır. Haberleşme hızını arttırmak ancak kaynak-hedef arasındaki mesafenin azaltılmasıyla sağlanmaktadır. Bu yaklaşım kapsama alanını küçülttüğünden büyük ağlarda kullanışlı bir yöntem olmamaktadır.

Kapsama alanı korunarak hız artırımı ancak araya bir röle konularak sağlanabilmektedir. Röle sayesinde kaynak-röle ve röle -hedef arası mesafe azaldığından kaynak-röle-hedef yolu üzerindeki toplam veri aktarım hızı artmaktadır (Ozden, Tuylu, ve Erdogan 2020b).

Röle destekli haberleşme sistemlerinde bilgi aktarma işlemi genelde iki temel şekilde yapılır:

1. Kuvvetlendir ve Aktar Metodu
2. Çöz ve Aktar Metodu

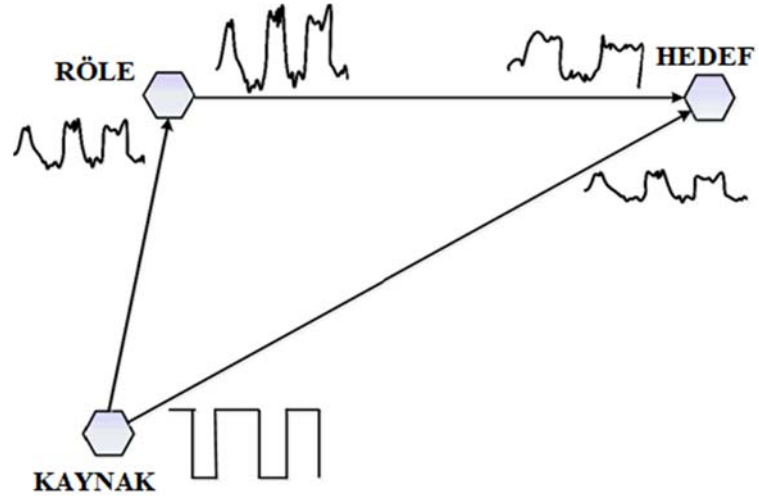


Şekil 3.1 İşbirlikli Sistem Modeli.

Şekil 3.1’de S kaynağı, R röleyi, D ise hedefi temsil etmektedir. h_{sr} kaynak ile röle arasındaki kanal iletim katsayısını, h_{rd} röle ile hedef arasındaki kanal iletim katsayısını, h_{sd} ise kaynak ile hedef arasındaki kanal iletim katsayısını göstermektedir.

3.1. Kuvvetlendir ve Aktar Metodu

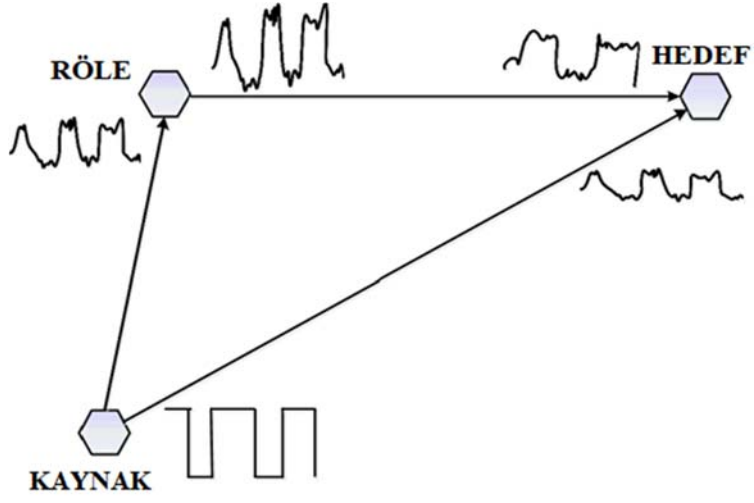
İşbirlikli haberleşme sistemlerinde röle kaynaktan gürültü eklenmiş bir sinyal alır ve aldığı bilgide kestirim yapmadan yalnızca sinyali kuvvetlendirerek hedefe yollar. Alıcı, bilgiyi doğru bir şekilde elde edebilmesi için kaynak ile röle arasındaki kanal bilgisine sahip olmalıdır. Şekil 3.2’de kuvvetlendir ve aktar modeli gösterilmektedir (Başgümüş 2016):



Şekil 3.2 Kuvvetlendir ve Aktar Modeli.

3.2. Çöz ve Aktar Metodu

Çöz ve aktar metodunda röle; kaynaktan aldığı bilgiyi çözer, yeniden kodlar ve hedefe gönderir ('Ostafte 2017). Rölenin kestirimi hatalı yaptığında kaynak ile alıcı arasındaki RF haberleşmesinin olumsuz etkilenmesi çöz ve aktar metodunun dezavantajıdır. Kuvvetlendir ve aktar metodunda olduğu gibi burada da alıcı, bilgiyi doğru bir şekilde elde edebilmesi için kaynak ile röle arasındaki kanal bilgisine sahip olmalıdır. Şekil 3.3'te çöz ve aktar modeli gösterilmektedir ('Başgümüş 2016):



Şekil 3.3 Çöz ve Aktar Modeli.

4. ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİ

Enerji hasatlama, bir takım elektronik devreler ve aparatlar kullanılarak doğada var olan kaynakların elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Birçok enerji hasatlama sistemi vardır. Bu sistemler en genel haliyle büyük ve düşük miktarda enerji elde etmesi yönüyle sınıflandırılabilir. Bizim bu çalışmadaki odağımız düşük miktarda enerji kategorisine giren RF enerji hasatlama olduğu için diğer sistemler ile ilgili sadece yüzeysel bilgi ile yetinilecektir.

4.1. Güneş Enerjisini Kullanan Enerji Hasatlama Sistemleri

Güneş enerjisini hasatlamak için güneş pilleri kullanılır. Güneş pilleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır ('Altaş 1998). Güneş enerjisi kullanılarak oldukça büyük boyutlarda elektrik enerjisi elde edilebilir. Ancak bu sistem doğrudan hava koşullarına bağlı olduğu için her zaman yüksek verimlilikte çalışmayacaktır. Sistem yüksek verimlilikte çalışmak için doğrudan güneş ışınlarını almaya ihtiyaç duyacaktır. Aynı zamanda daha çok enerji elde edebilmesi için panellerin yüzeylerinin geniş ve büyük olması gerektiği düşünüldüğünde bu sistemi küçük boyutlu cihazlara adapte etmek oldukça zor olacaktır.

4.2. Rüzgar Enerjisini Kullanan Enerji Hasatlama Sistemleri

Rüzgar enerjisini hasatlamak için rüzgar türbinleri kullanılır. Rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir ('Elibüyük ve 'Üçgül 2014). Güneş enerjisinde olduğu gibi rüzgar enerjisinden de büyük boyutlarda enerji hasatlanabilir. Ancak aynı sorun burada da geçerlidir. Bu

sistem de doğrudan hava koşullarına bağlıdır ve rüzgar türbinlerinin de boyutları oldukça büyüktür. Bu yüzden bu sistem de her zaman yüksek verimle çalışamayacak ve cihazlara doğrudan adapte edilemeyecektir.

4.3. Piezoelektrik Malzemelerle Enerji Hasatlama Sistemleri

Mekanik titreşimlerden elektrik enerjisi elde etmek için piezoelektrik malzemeler kullanılır. Piezoelektrik malzemeye uygulanan kuvvetlerin malzeme içindeki kristal yapının her iki tarafında bulunan + ve - yüklerin ortaya çıkması sonucu meydana gelmektedir ('Ordueri ve 'Gelen 2018). Ancak bu sistem de diğer enerji hasatlama sistemlerinde olduğu gibi ortam koşullarına bağlıdır. Yani piezoelektrik malzemedeki basınç olmadığında enerji üretilmemektedir.

4.4. RF Enerji Hasatlama Sistemleri

Baz istasyonları, kablosuz bağlantı alanı (wireless fidelity, Wi-Fi) vericileri ve Mobil İletişim için Küresel Sistem (global system for mobile communications, GSM) kullanıcıları gibi kaynaklardan havaya RF dalgaları yayılır. Bu havada halihazırda bulunan RF dalgalarının anten tarafından toplanıp, elde edilen alternatif akım (alternative current, AC) enerjisinin doğrultucu devre yardımıyla doğru akım (direct current, DC) enerjisine dönüştürülmesine RF enerji hasatlama denilmektedir. Diğer enerji hasatlama sistemlerine bakıldığında RF enerji hasatlamasının bazı temel avantajlara sahip olduğu görülüyor.

- RF enerjisi üreten cihazların günümüzde ciddi oranda yaygınlaştığı göz önüne alındığında ortamda her koşulda halihazırda bulunup hava

koşullarına ya da dışarıdan bir kuvvete ihtiyaç duyulmaması RF enerji hasatlama sisteminin en önemli avantajıdır.

- Diğer enerji hasatlama sistemleri çok uzakta, erişilmesi çok güç yerlerde ve zorlu ortamlardaki sensörlere adapte edilememektedir. Ancak RF enerji hasatlama devresinin boyutunun küçük olması ve diğerlerine kıyasla daha bağımsız oluşu birçok cihazla kullanımını kolaylaştırmaktadır.
- Aynı zamanda RF enerji hasatlama kitleri, temel elektronik elemanlar ve antenle yapılabilmektedir. Bu durum diğer sistemlere kıyasla maliyetinin de daha düşük olduğunu gösteriyor.

Enerji hasatlama sistemleri geçmişten bugüne hayatımızda yer edinmiştir. Eskiden bu enerji hasatlama işlemi yel değirmeni ve su değirmeni gibi ilkel araçlar ile yapılıyordu. Ancak teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerji hasatlama sistemleri de gelişmiş ve yeni formlarda karşımıza çıkmaya başlamıştır. Bunların içinde RF enerji hasatlama sistemi sağladığı kolaylıklar ve sunduğu avantajlar ile dikkat çekmektedir.

2000'li yıllara doğru düşük güç tüketen haberleşme cihazlarının yaygınlaşmasıyla birlikte RF enerji hasatlama çalışmalarının sayısı oldukça artmaya başlamıştır. Birçok çalışma ve araştırma yapılmasına rağmen burada yalnızca başlıca çalışmalardan söz edilecektir:

- 2005 yılında Powercast firması, radyo istasyonundan (5kW genlik modülasyonu (amplitude modulation, AM)) yaklaşık 2,4km uzaklıktan RF enerjisinin hasatlanabildiğini gösterdi ('Ostaffe 2017).
- 2004 yılında Hagerty ve Helmbrecht 2-18 GHz frekans aralığında RF dalgalarını toplamak için geniş bantlı bir anten dizisi sunmuştur (Hagerty vd. 2004).

- 2009 yılında Intel Research Seattle, 960kW'lık bir televizyon (TV) yayın istasyonu kullanarak 4,1 km uzaklıktan ortam RF enerjisi hasatlamayı başardı (Volakis, Olgun, ve Chen 2012).

Yapılan bu çalışmalarda ölçümler alıcı ve verici arası tamamen açıkken ve birbirlerini doğrudan görecek şekilde ideal ortamlarda gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda devrelerin boyutları nispeten büyük ve yüksek kazançlı antenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak gerçek hayatta bu durumları sağlamak ve bu cihazları kullanmak zor olacaktır. Bu sebeple boyutlarının küçültülmesinden kaynaklı düşecek olan kazancını telafi edebilecek çok daha yüksek kazançlı antenler tasarlamak, yüksek verimle çalışan doğrultucu devreler tasarlamak ve sistemi alıcı-verici açık bir alanda olmayıp birbirini doğrudan görmese de RF enerji hasatının kesilmeyeceği şekilde optimize etmek gibi birtakım amaçlar güdülmektedir.

5. DİKEY HETEROJEN AĞLAR ve BİLEŞENLERİ

Dikey heterojen ağlar uydu (uzay) ağı, hava ağı ve karasal ağdan oluşmaktadır. Bu tezde hava ağında HAPS; karasal ağda ise GU kullanılmaktadır. Dikey heterojen ağlar (vertical heterogeneous network, V-HetNet) sabit Dünya yörüngesi ve alçak Dünya yörüngesi uyduları (örneğin, CubeSats) ve karasal iletişim bağlantılarıyla birlikte ağa bağlı uçan platformlar dahil olmak üzere farklı iletişim topluluklarının bir birleşimidir (Tekbiyik vd. 2020). VHetNet'ler, 6G ve ötesinde mobil iletişim için önemli faydalar sağlama potansiyeline sahip, gelecek vaat eden mimarilerdir. Bu bölümde uydu ağı ve bileşenlerinden, hava ağı ve bileşenlerinden ve karasal ağda bulunan GU hakkında kısaca bilgi verilip kullanım alanlarına değinilmiştir.

5.1. Uydu Ağı ve Bileşenleri

Uydu yörüngeleri Dünya'ya olan uzaklıklarına ve kullanım amaçlarına göre sınıflandırılmaktadır (Sariyer 2022). Bu bölümde alçak Dünya yörüngesi LEO, orta Dünya yörüngesi (medium earth orbit, MEO), yüksek Dünya yörüngesi (high earth orbit, HEO) ve jeostatik yörünge (geostationary orbit, GEO) hakkında genel bilgi verilecektir.

5.1.1. LEO

LEO, Dünya yüzeyinin (ekvator) üzerinde 160 km'den 2.000 km'ye kadar bir yüksekliğe sahip Dünya etrafında bir yörüngedir. İyi servis ve düşük maliyet nedeniyle iletişim ve uyduların çoğu bu yörüngede gönderilir.

5.1.2. MEO

MEO, Dünya yüzeyinden 2000 km'den 35000 km'ye kadar bir yüksekliğe sahiptir. MEO, genellikle global konum belirleme sistemi (global positioning system, GPS) uydularının ve belirli yerleri gözlemleyebilmek için oluşturulan yer gözlem uydularının kullanıldığı yörünge türüdür (Sariyer 2022).

5.1.3. HEO

HEO'nun Dünya yüzeyine uzaklığı 35000 km'den daha fazladır. Yer senkron (geosynchronous) yörünge en yaygın yörünge tipidir. Ekvator düzlemi üzerinde yerden 35780 km irtifada bulunan uydu, Dünya ile aynı hızda dairesel bir yörüngede döndüğünden, Dünya üzerindeki istenilen bir noktaya göre konumu değişmemektedir. Bu yörüngede genellikle meteoroloji ve haberleşme uyduları kullanılmaktadır (Sariyer 2022).

5.1.4. GEO

GEO yere göre sabit bir yörüngeye sahiptir ve Dünya yüzeyinden yaklaşık 35786 km yükseklikte konumlanmaktadır. Doppler kaymasının az olması GEO'nun avantajlarından birisidir. GEO uydu çeşidinin en temel avantajı yer istasyonlarının hangi konumda olursa olsun GEO ile haberleşebilmesidir. Fakat GEO kurulumunun maliyeti yüksektir.

5.2. Hava Ağı ve Bileşenleri

Hava ağı kısmında kullanılan hava rölesi (aerial relay, AR) İHA ve HAPS olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunlar işbirlikli haberleşme sistemindeki röle gibi düşünülebilir. Bu bölümde HAPS ve İHA'lar tanıtılıp kullanım alanlarından bahsedilmiştir.

5.2.1. HAPS ve Kullanım Alanları

VHetNets düğümlerinden biri olan HAPS, sürekli artan dinamik kapasite ihtiyacını karşılamak ve geleceğe hazır kablosuz ağlar oluşturmak için karasal ağlar için tamamlayıcı bir platform olarak görülebilir (Shamsabadi vd. 2022). Stratosferde yaklaşık 20 km yükseklikte bir HAPS ağı çalışır ve iletişim hizmetleri sağlamak için kullanılır ('Karabulut Kurt vd. 2020). HAPS iletişim sistemleri, kompozit malzemeler, bilgisayarlar ve navigasyon sistemleri, düşük hız, yüksek irtifa aerodinamiği ve içten yanmalı ve güneş enerjisi dahil olmak üzere tahrik sistemlerindeki gelişmeler sayesinde son zamanlarda daha uygulanabilir hale gelmiştir. HAPS tabanlı iletişim sistemlerinin, boş alana benzer bir rota kaybı özelliği olması, onlar için önemlidir. Bu özellik sayesinde GU ve HAPS arasındaki yol kaybı karşılaştırılabilir (Widiawan ve Tafazolli 2007).

İletişimin kurulacağı ortam koşullarına göre uygun HAPS tipi seçilmelidir. HAPS iletişim sisteminin etkinliği, platformun mimarisi ve kullandığı istasyon tutma mekanizması ile doğrudan ilişkilidir. Hem insan hem de insansız sabit kanatlı uçaklar ve havadan hafif (lighter-than-air, LTA) hava gemileri, potansiyel HAPS platformları olarak önerilmiştir (Widiawan ve Tafazolli 2007).

5.2.2. İHA ve Kullanım Alanları

İHA, insansız sabit kanatlı hava araçlarının en tipik örneklerinden biridir. Genellikle drone olarak bilinen İHA'lar, 5G'nin ötesinde ağ iletişimi hizmet kalitesi (quality of service, QoS), kapasite ve güvenilir bağlantı iyileştirmesi için ek bileşenlerdir. Sınırsız hareket kabiliyeti ve güvenilir görüş hattı iletişiminin bir sonucu olarak İHA'lar, bant kapasitesini geliştirerek ve karasal baz istasyonları arasındaki boşlukları doldurarak karasal baz istasyonları arasındaki boşlukları kapatmak için yararlı bir araçtır. İHA'ların artan kullanımı, ağ topolojisini ve şekillerinde değişikliklere neden olan dikey yükseklik dalgalanmalarını değiştirebilir. VHetNet'i oluşturan uydu, hava ve kara katmanları ile birlikte İHA'ların enerji verimliliği, 3D konumlandırılması ve güvenliği, v-HetNet'in çeşitli uygulamalarında engel teşkil ettiği kanıtlanmıştır (Ali vd. 2022). Tahrik ve direksiyon sistemlerine sahip bir LTA uçağı, zeplin olarak bilinir. Hava gemileri, sabit kanatlı uçaklar ve helikopterler gibi tipik havadan ağır (heavier-than-air, HTA) araçların aksine, havada süzölmek için hafif bir kaldırma gazı kullanarak kaldırma kuvveti oluşturur. Bu eşsiz kalite, uzun süre uçmalarına, boyutlarına göre ağır bir yük taşımalarına ve az yakıt kullanmalarına izin verebilir (Li, Nahon, ve Sharf 2011). Hava araçları, tek bir yakıt deposunda uzun süre havada sabit kalabilmeleri nedeniyle geleneksel uçaklardan daha uygun maliyetlidir ('Ryan ve "Jr." 1992) . Ayrıca uçağı biniş için uzun pistlere gerek yoktur. Bu nedenle, büyük yükleri çok uzak yerlere gönderebilirler. Hava araçları bir ulaşım metodu olarak kullanmanın çevre üzerinde minimum etkisi vardır. Konvansiyonel uçak ve helikopterlerin yapamadığı zor işleri yapabilme kabiliyetine sahiptir. Gözetim ve devriye için mükemmel bir platform, düşük gürültü ve titreşim seviyelerine ve düşük araç ivmelerine sahip platformdur (Liao ve Pasternak 2009).

5.3. GU

Yer kullanıcısı, İHA veya HAPS'tan aldığı bilgiyi çözer ve aynı zamanda enerji hasatlayabilme yeteneğine sahiptir. GU, işbirlikli haberleşme sistemindeki hedef olarak düşünülürse AF ve DF protokolleri kullanılarak GU'nun gönderilen bilgiyi çözüp varsa diğer GU'lara da aktarabilmesi sağlanabilmektedir.

6. ENERJİ HASATLAMA KULLANILAN HAPS DESTEKLİ RF HABERLEŞME SİSTEMİ

Bu bölümde ilk olarak HAPS destekli RF ve FSO haberleşmesi alanında yapılan çalışmalar ve tezin katkısından bahsedilecektir. Sonrasında tezde tasarlanan enerji hasatlama kullanılan HAPS destekli haberleşme sistemi tanıtılıp performans analizleri verilecektir.

6.1. HAPS Destekli RF Haberleşme Sistemi

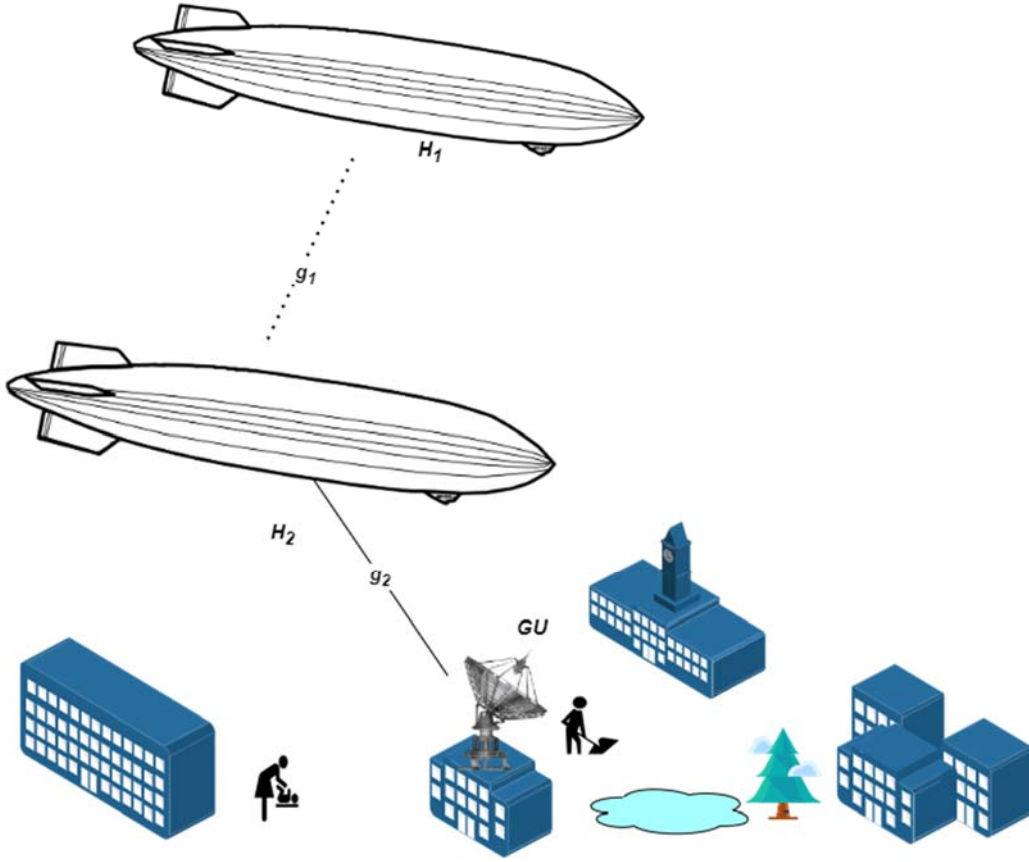
HAPS belli bir mesafede kalmak için enerji tükettiği için iletim için gerekli olan enerji bir kriter haline gelir. Bu kriterin üstesinden gelmek için kullanılacak teknolojilerden biri de enerji hasadı olacaktır. EH, operasyonel ihtiyaçları karşılamak için ısı, ses ve RF sinyalleri gibi normalde kullanılamayan kaynaklardan elektrik üretme uygulamasıdır (Ponnimbaduge Perera vd. 2018). Bunlardan elektromanyetik spektrumun önemli bir bölümünü oluşturan RF'den enerji hasadı, kablosuz haberleşme sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. EH'de, alınan RF sinyalleri, kullanılabilir enerjiyi çıkarmak ve toplamak için bir güç kısıtlaması alıcısı tarafından işlenir. Bu, alıcının herhangi bir güç kaynağından bağımsız olarak çalışabileceği anlamına gelir. EH yaklaşımları üzerine yapılan araştırma, bunları üç geniş kategoriye ayırır: PSR, TSR ve ideal mod. PSR'deki bir güç kısıtlama rölesi, gelen bir sinyalin enerjisini iki şekilde kullanır: birincisi, verileri işlemek için ve ikincisi, rölede ısı yaymak için. TSR'de röle, gelen RF sinyalinin gücünü kullanarak kendisini şarj etmek için mevcut iletim zaman aralığının bir kısmını kullanırken kalan süre bilgi işleme (information processing, IP) için kullanılır. Bir röle sisteminin optimal çalışması, gelen sinyalin tüm gücünü kullanarak eş zamanlı olarak enerji toplama ve bilgiyi işleme yeteneğidir (Babaei ve Aygolu 2017).

Hem FSO hem de RF haberleşmesinin birlikte kullanıldığı HAPS destekli çalışmaların performans analizi literatürde sıkça rastlanmaktadır. (R vd. 2021)'de hibrit FSO/RF bağlantıları üzerinden yer-uydu bağı uydu iletişimi için önerilen tek atlamalı ve uzay-hava-yer istasyonu entegre ağ (space-air-ground station integrated network, SAGIN) tabanlı DH sistem modellerini değerlendirmek için analitik ve simüle edilmiş bulgular kullanılmıştır. HAPS düğümü ile GU arasında, (Yahia vd. 2022)'da hibrit bir FSO/RF iletim sistemi kullanılmıştır. Atmosferik türbülansı, stratosferik zayıflamayı ve saçılma, yol kaybı ve hüzmleme hatalarından kaynaklanan zayıflamayı hesaba katarak, (Yahia vd. 2022)'da önerilen sistemin performansını değerlendirmek için üstel Weibull (exponentiated Weibull, EW) ve shadowed-Rician sönümleme modelleri için kesinti olasılık formülleri oluşturulmuştur.

Bahsedilen çalışmaların hiçbiri, EH kullanan HAPS sistemleri için RF iletişiminin performans analizi olarak değerlendirilmemiştir. Bu tezde EH kullanan HAPS destekli haberleşme sisteminde performans analizi yapılarak literatüre katkı sağlanması umulmaktadır.

6.2. HAPS Destekli Haberleşme Sistemi Modeli

Bu tez çalışmasında, biri enerji sağlayıcı olarak kullanılan ve diğeri enerji toplayan HAPS modelini ele alıyoruz. Bu modelde HAPS yüksekte bulunan HAPS tan enerji hasatlayıp, hasatlanan enerji ile veriyi GU'ya göndermektedir. Şekil 6.1'de bu tezde önerilen HAPS destekli haberleşme sistemi modeli gösterilmiştir. Bunlardan biri 24 km'de enerji sağlayıcı olarak (H_1), diğeri ise 20 km'de (H_2) güç kısıtlamalı HAP vericisi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 6.1 HAPS Destekli Haberleşme Sistem Modeli.

Enerji sağlayıcı olarak kullanılan H_1 , üzerinde nükleer reaktör bulunmasından dolayı sonsuz enerjiye sahiptir. Ayrıca üzerinde bulunan güneş panelleri sayesinde güneş enerjisi hasatlamaktadır. Bunun yanısıra RF dalgalarından enerji hasatlayarak da havada durması için ve uçabilmesi için enerji ihtiyacını yeterince karşılayabilmektedir. Bu sistemde ilk atlamada H_2 , H_1 'den enerji transfer eder. H_2 , H_1 'den hasatladığı enerjinin tamamını kullanarak GU'ya bilgi aktarır. Birinci zaman diliminde H_1 ile H_2 arasında LOS olduğu için aralarındaki kanal (g_1) Nakagami-m dağılımı ile modellenmiştir. İkinci zaman diliminde H_2 ile GU arasında gölgeleme oluşturacak ve LOS'u bozacak

unsurlardan dolayı aralarındaki kanal (g_2) shadowed-Rician ile modellenmiştir. Bu kanal modellerine göre sistemin uçtan uca kesinti olasılığı performansı gözlemlenmiştir. Ayrıca ergodik kapasite hesabı da yapılmıştır.

İlk atlamada, yani H_2 'de hasatlanan enerji miktarı (E_H) şu şekildedir:

$$E_H = \eta P_{H_1} L_{H_1 H_2} |g_1|^2 T \quad (6.1)$$

burada; η enerji dönüşüm katsayısıdır ve 0 ile 1 arasında değer alır. P_{H_1} H_1 'in gücü, $L_{H_1 H_2}$ H_1 ile H_2 arasındaki yol kaybını gösterir. T ise enerji hasatlama süresini gösterir ve 1 olarak alınmıştır.

RF yol kaybı ($L_{PL}[dB]$) şu şekilde modellenmiştir:

$$L_{PL}[dB] = -G_T - G_R + L_F + L_R + L_A + L_O \quad (6.2)$$

burada G_T verici anten kazancını, G_R alıcı anten kazancını, L_F serbest uzay yol kaybını göstermektedir. H_1 ile H_2 arasında $L_F = 20 \log \left(\frac{4\pi d_{H_1, H_2}}{\lambda_r} \right)$ ve H_2 ile GU arasında $L_F = 92.45 + 20 \log(f_r) + 20 \log(d_{H_2, GU})$ olarak alınmıştır. d_{H_1, H_2} H_1 ile H_2 arasındaki mesafeyi, $d_{H_2, GU}$ H_2 ile GU arasındaki gösterir. λ_r RF dalgasının boyunu, f_r dalga'nın frekansını GHz cinsinden gösterir. L_R yağmurdan kaynaklı zayıflamayı dB/km cinsinden gösterir. L_A gaz atmosfer kaybını ve L_O yanlış anten dizilimi, polarizasyon uyumsuzluğu, anten bozulması gibi kayıpları dB cinsinden göstermektedir (R vd. 2021).

İkinci atlamada yani GU'da alınan sinyal şu şekilde ifade edilebilir:

$$y_{GU} = \sqrt{E_H L_{H_2 GU}} g_2 s + n_{GU} \quad (6.3)$$

burada, s_{H_2} 'den GU'ya gönderilen sinyali, n_{GU} ise GU'daki 0 ortalamalı beyaz Gauss gürültüsünü göstermektedir.

Böylece sistemin e2e SNR(γ_0) ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$\gamma_0 = \eta L_{H_1, H_2} L_{H_2, GU} \frac{P_{H_1}}{N_0} |g_1|^2 |g_2|^2 \quad (6.4)$$

burada, N_0 gürültünün güç spektral yoğunluğunu (power spectral density - PSD) göstermektedir ve $N_0(dB) = K_{dB} + T_N + BW$ şeklinde dB cinsinden yazılabilir. $K_{dB} = 228.6 \text{ dBW} / K / Hz$ Boltzmann sabitidir (R vd. 2021). BW alıcıdaki gürültünün bant genişliğini gösterir ve birimi dBHz'dir. T_N ise sistemdeki gürültünün sıcaklığını gösterir ve birimi dBK'dır. Ortalama SNR'ı $\overline{\gamma_0} = \eta L_{H_1, H_2} L_{H_2, GU} \frac{P_{H_1}}{N_0}$ olarak ifade edersek, anlık SNR $\gamma_0 = \overline{\gamma_0} |g_1|^2 |g_2|^2$ olarak yazılabilir.

H_1 ile H_2 arasındaki Nakagami-m dağılımlı kanalı (g_1) PDF'sinden yararlanılarak

$$f_{|g_1|^2}(x) = \frac{x^{m-1} \exp(\frac{-x}{2\sigma_{g_1}^2})}{\Gamma(m)(2\sigma_1^2)^m} \quad (6.5)$$

yazılabilir. Burada $\sigma_{g_1}^2 = \frac{\Omega}{2m}$ olarak alınır ve Ω kanalın ortalama gücüdür, 1 olarak alınmıştır.

H_2 ile GU arasındaki denklem (2.10)'daki shadowed-Rician kanalı (g_2) PDF'sinden yararlanarak

$$f_{|g_2|^2}(y) = \alpha_y \exp(-\beta_y y) {}_1F_1(m_y; 1; \delta_y y) \quad (6.6)$$

yazılabilir.

Sistemin e2e OP'sini bulabilmemiz için $Z = |g_1|^2 |g_2|^2$, $X = |g_1|^2$, $Y = |g_2|^2$ olarak alarak iki rastgele değişkenin çarpımının CDF'sini bulabiliriz. Z rastgele değişkeninin CDF'si şu şekilde bulunabilir:

$$F_Z(z) = \int_0^\infty f_X(x) \int_{-\infty}^{\frac{z}{x}} f_Y(y) dy dx + \int_{-\infty}^0 f_X(x) \int_{\frac{z}{x}}^\infty f_Y(y) dy dx . \quad (6.7)$$

Denklem (6.5), denklem (6.6) ve denklem (2.11)'u denklem (6.7)'de yerine koyarsak $F_Z(z)$ şu şekilde bulunur:

$$F_Z(z) = \frac{\alpha_y}{\Gamma(m)(2\sigma_{g_1}^2)^m} \sum_{k=0}^{m_y} \frac{(1-m_y)_k (-\delta_y)^k}{(k!)^2} \int_0^\infty \int_0^{\frac{z}{x}} x^{m-1} y^k \exp\left(\frac{-x}{2\sigma_{g_1}^2} - y(\beta_y - \delta_y)\right) dy dx . \quad (6.8)$$

6.2.1. Kesinti Olasılığı

Kesinti olasılığı vericiden alıcıya sinyal gönderilirken sinyali temsil eden bitlerin belirli bir SNR değerine kadar alıcıya hiç ulaşmaması olasılığıdır. Bu SNR değeri eşik değeri (γ_{th}) olarak adlandırılır. Eşik değerinden yüksek SNR'larda bilgi iletimi olduğu görülür. OP bulunurken CDF'den yararlanılır:

$$F(x) = \Pr(X \leq x) . \quad (6.9)$$

OP'yi anlık SNR cinsinden şu şekilde yazabiliriz:

$$P_{out} = \Pr[\gamma_0 \leq \gamma_{th}] = F_{\gamma_0}(\gamma_{th}) \quad (6.10)$$

burada, $F_{\gamma_0}(\gamma_{th})$ GU'daki e2e SNR'ın CDF'sidir. Eşik değeri $\gamma_{th} = 2^{2R_b} - 1$ olarak belirlenmiştir ve R_b kanal kullanımı başına düşen iletilen bit sayısını gösterir (Bjornson, Matthaiou, ve Debbah 2013).

Denklem (6.4), denklem (6.10)'de yerine koyulursa $F_{\gamma_0}(\gamma_{th})$ şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_0}(\gamma_{th}) &= \Pr(\overline{\gamma_0} Z \leq \gamma_{th}) \\ &= F_Z\left(\frac{\gamma_{th}}{\overline{\gamma_0}}\right) \end{aligned} \quad (6.11)$$

Denklem (6.11), denklem (6.8)'da yerine konulursa

$$\begin{aligned} F_{\gamma_0}(\gamma_{th}) &= \frac{\alpha_y}{\Gamma(m)(2\sigma_{g_1}^2)^m} \sum_{k=0}^{m_y} \frac{(1-m_y)_k (-\delta_y)^k}{(k!)^2} \\ &\times \int_0^{\frac{\gamma_{th}}{\overline{\gamma_0}}} \int_0^x x^{m-1} \exp\left(\frac{-x}{2\sigma_{g_1}^2} - y(\beta_y - \delta_y)\right) y^k dy dx \end{aligned} \quad (6.12)$$

olarak elde edilir.

[42, Denk.(3.351.1)] ve [42, Denk.(3.351.3)], denklem (6.12)'de kullanılıp birtakım sadeleştirme işlemleri yapıldıktan sonra OP ifadesi elde edilir:

$$\begin{aligned} P_{out} &= \alpha_y \sum_{k=0}^{m_y} \frac{(1-m_y)_k (-\delta_y)^k}{k! (\beta_y - \delta_y)^{k+1}} - \frac{2\alpha_y}{\Gamma(m)(2\sigma_{g_1}^2)^m} \sum_{k=0}^{m_y} \sum_{i=0}^k \frac{(1-m_y)_k (-\delta_y)^k}{i! k!} \\ &\times \left(\frac{\gamma_{th}}{\overline{\gamma_0}}\right)^{\frac{m+i}{2}} (\beta_y - \delta_y)^{\frac{m+i-2k-2}{2}} (2\sigma_{g_1}^2)^{\frac{m-i}{2}} K_{m-i}\left(2\sqrt{\frac{\gamma_{th}(\beta_y - \delta_y)}{\overline{\gamma_0} 2\sigma_{g_1}^2}}\right) \end{aligned} \quad (6.13)$$

Burada $K_{m-i}(\cdot)$, $m-i$ 'ninci dereceden değiştirilmiş 2.tür Bessel fonksiyonudur (Chen vd. 2018).

6.2.2. Ergodik Kapasite

Ergodik kapasite (C_e), bir kablosuz kanal üzerinden en yüksek bilgi aktarım oranını gösterir ve birimi bit/kanal olarak (Yahia, Erdogan, ve Kurt 2023)'deki gibi kullanılır:

$$C_e = E[\log_2(1 + \gamma_0)] \quad (6.14)$$

burada, $E[\cdot]$ operatörü beklenen değeri ifade eder. Kapalı formda denklem (6.14)'deki ergodik kapasite ifadesi elde edilemez fakat Jensen eşitsizliği kullanılarak tam olarak ergodik kapasite için üst sınır (C_e^{up}) bulunabilir:

$$C_e^{up} = \log_2(1 + E[\gamma_0]). \quad (6.15)$$

Anlık SNR'ın beklenen değeri:

$$E[\gamma_0] = \int_0^{\infty} \gamma_0 f_{\gamma_0}(\gamma_0) d\gamma_0 \quad (6.16)$$

olarak bulunur. Burada anlık SNR'ın PDF'si $f_{\gamma_0}(\gamma_0)$ şu şekilde yazılabilir:

$$f_{\gamma_0}(\gamma_0) = \frac{m^m \alpha_x}{\gamma_0 \Gamma(m) \Omega^m} \sum_{k=0}^{m_x} \frac{(1 - m_x)_k (-\gamma_0 \delta_x)^k}{(k!)^2 (\gamma_0)^k} \int_0^{\infty} x^{m-k-2} \exp\left(\frac{-xm}{\Omega} - \frac{\beta_x \gamma_0}{\gamma_0 x}\right) dx \quad (6.17)$$

Denklem (6.17)'i denklem (6.16)'de yerine yazarsak $E[\gamma_0]$ şu şekilde bulunur:

$$E[\gamma_0] = \frac{m^m \alpha_x}{\gamma_0 \Gamma(m) \Omega^m} \sum_{k=0}^{m_x} \frac{(1 - m_x)_k (-\delta_x)^k}{(k!)^2 (\gamma_0)^k} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} x^{m-k-2} \gamma_0^{k+1} \exp\left(\frac{-xm}{\Omega} - \frac{\gamma_0 (\beta_x - \delta_x)}{\gamma_0 x}\right) dx d\gamma_0. \quad (6.18)$$

[42, Denk.(3.351.3)] kullanılması ve bazı sadeleştirme işlemleri yapılması sonucu $E[\gamma_0]$ şu şekilde bulunur:

$$E[\gamma_0] = \frac{\overline{\gamma_0} \alpha_x \Omega}{(\beta_x - \delta_x)^2} \sum_{k=0}^{m_x} \frac{(1 - m_x)_k (k+1)}{k!} \left(\frac{\delta_x}{\delta_x - \beta_x} \right)^k \quad (6.19)$$

Denklem (6.19)'yi denklem (6.15)'da yerine koyulursa ergodik kapasite için üst sınır ifadesini şu şekilde elde edilir:

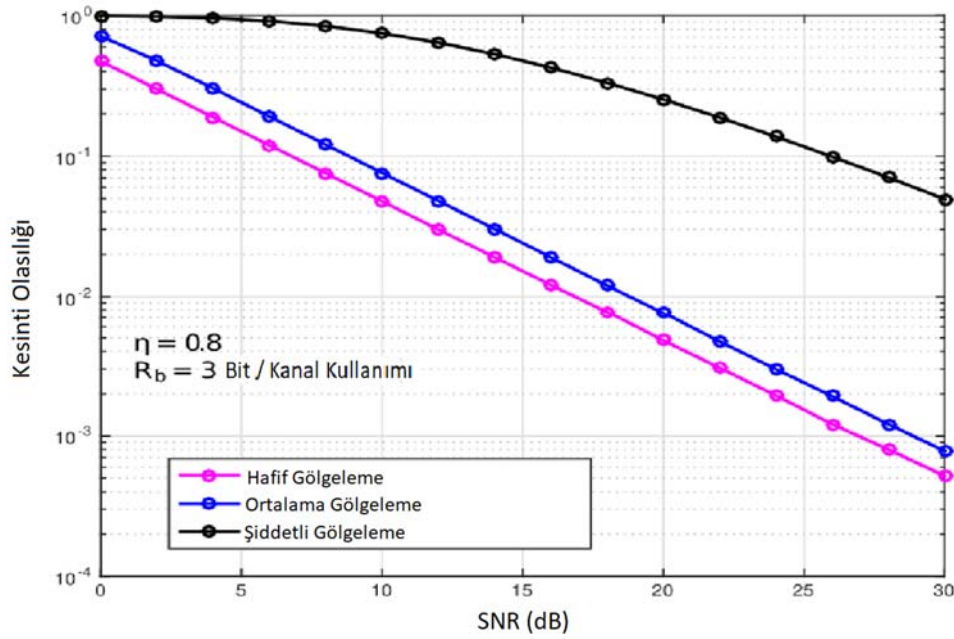
$$C_e^{up} = \log_2 \left(1 + \frac{\overline{\gamma_0} \alpha_x \Omega}{(\beta_x - \delta_x)^2} \sum_{k=0}^{m_x} \frac{(1 - m_x)_k (k+1)}{k!} \left(\frac{\delta_x}{\delta_x - \beta_x} \right)^k \right) . \quad (6.20)$$

Böylece ergodik kapasite için üst sınır ifadesi kapalı formda bulunmuş olur.

6.3. Nümerik Sonuçlar ve Bulgular

Bu bölümde OP ve ergodik kapasite performansları farklı parametreler için incelenmiştir. Teorik ve benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Tüm sonuçların tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

İlk olarak Şekil 6.2'de $\eta = 0.8$ ve $R_b = 3$ bit/kanal kullanımı için üç farklı gölgeleme seviyesinde SNR'a göre OP gözlemlenmiştir. En iyi performansın hafif gölgeleme ($m=19$, $b=0.158$, $\Omega=1.29$) durumunda olduğu görülmektedir. Orta seviyedeki gölgeleme ($m=10$, $b=0.126$, $\Omega=0.835$) durumu hafif gölgelemeye göre daha kötü fakat şiddetli gölgelemeye ($m=1$, $b=0.063$, $\Omega=8.94 \times 10^{-4}$) göre daha iyi performans göstermiştir.

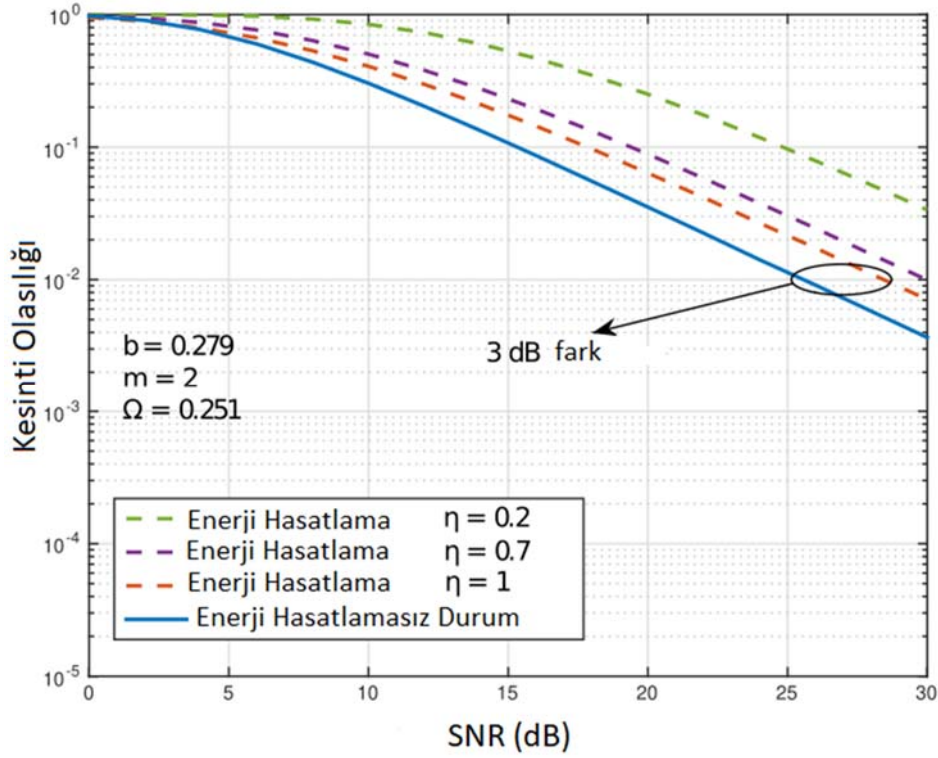


Şekil 6.2 $R_b = 3$ bit/kanal kullanımı ve $\eta = 0.8$ için SNR'a karşı OP performansı

Şekil 6.3'te $m=2$, $b=0.279$, $\Omega=0.251$ değerleri için farklı seviyede enerji hasatlama durumları ve hiç enerji hasatlamamanın olmadığı durumlar için OP karşılaştırılmıştır. En iyi performansın enerji hasatlamasız durumda olduğu görülmektedir. Bunun sebebi enerji hasatlama olmadığında, bir diğer şekilde HAPS'lar arasındaki g_1 Nakagami-m dağılımlı kanalın olmayışından kaynaklı olarak e2e SNR'ın iyileşmesidir. Böylece OP daha azalmaktadır.

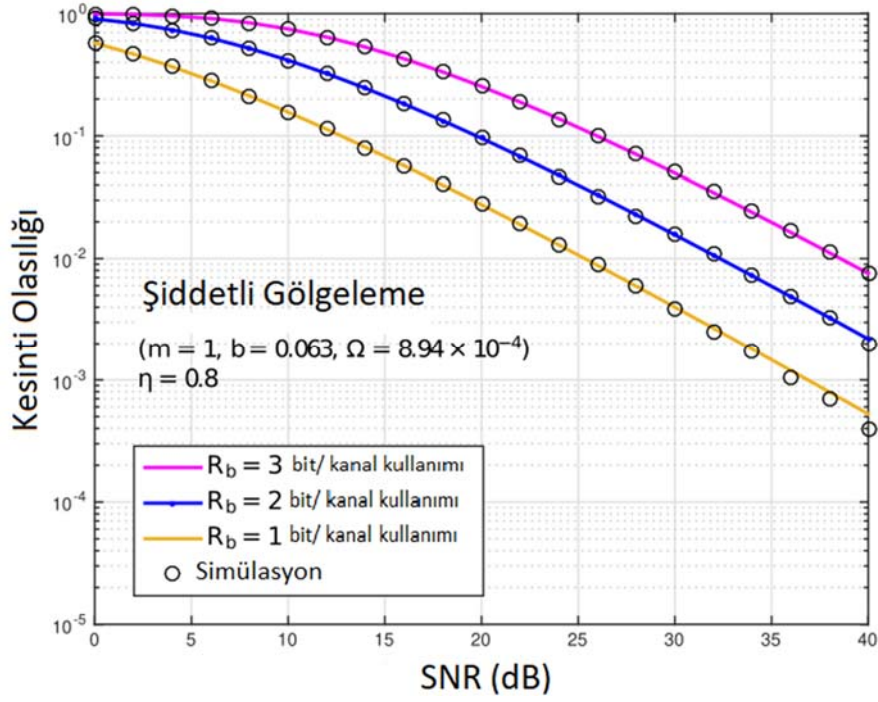
Enerji hasatlamamanın olduğu diğer durumlarda en iyi performans enerji hasatlamamanın %100 olduğu ($\eta = 1$) durumunda olduğu görülmektedir. Ayrıca enerji hasatlama olmadığı durumun $\eta = 1$ durumuna göre 3 dB'lik kazanca sahip olduğu tespit edilmiştir.

$\eta = 0.7$ durumunun $\eta = 1$ durumuna göre daha kötü OP performansı, $\eta = 0.2$ durumuna göre daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.3 Farklı η değerleri için ve enerji hasatlamasız durum için SNR'a karşı OP performansı

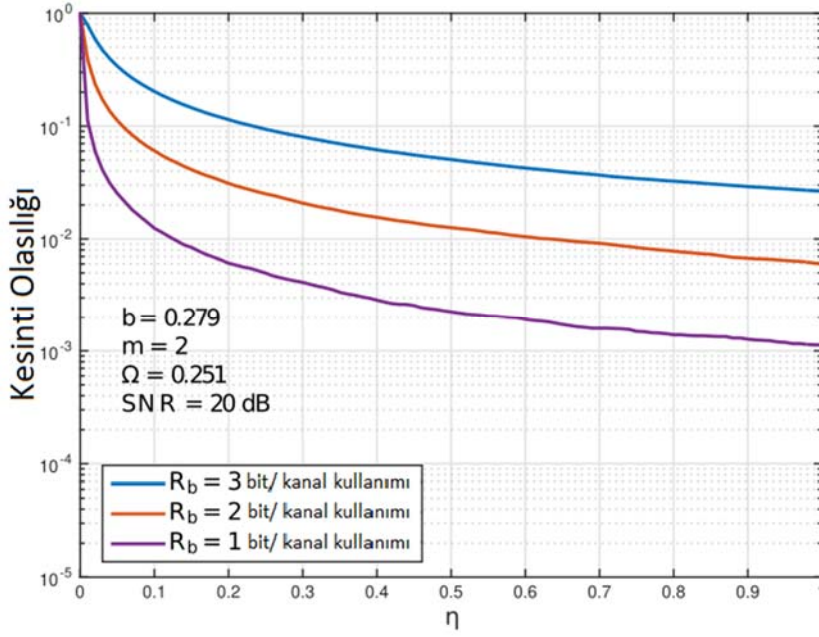
Şekil 6.4'te şiddetli gölgeleme durumunda $\eta = 0.8$ iken farklı R_b değerleri için SNR'a karşı OP performansının hem teorik hem simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. En iyi performansın $R_b = 1$ bit/kanal kullanımı durumunda olduğu görülmektedir. $R_b = 2$ bit/kanal kullanımı durumu, $R_b = 1$ bit/kanal kullanımı durumunda göre daha kötü; $R_b = 3$ bit/kanal kullanımı durumuna göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Simülasyon ve teorik sonuçların birbiriyle uyduğu görülmektedir.



Şekil 6.4 Şiddetli gölgeleme durumunda $\eta = 0.8$ iken farklı R_b değerleri için SNR'a karşı OP performansı

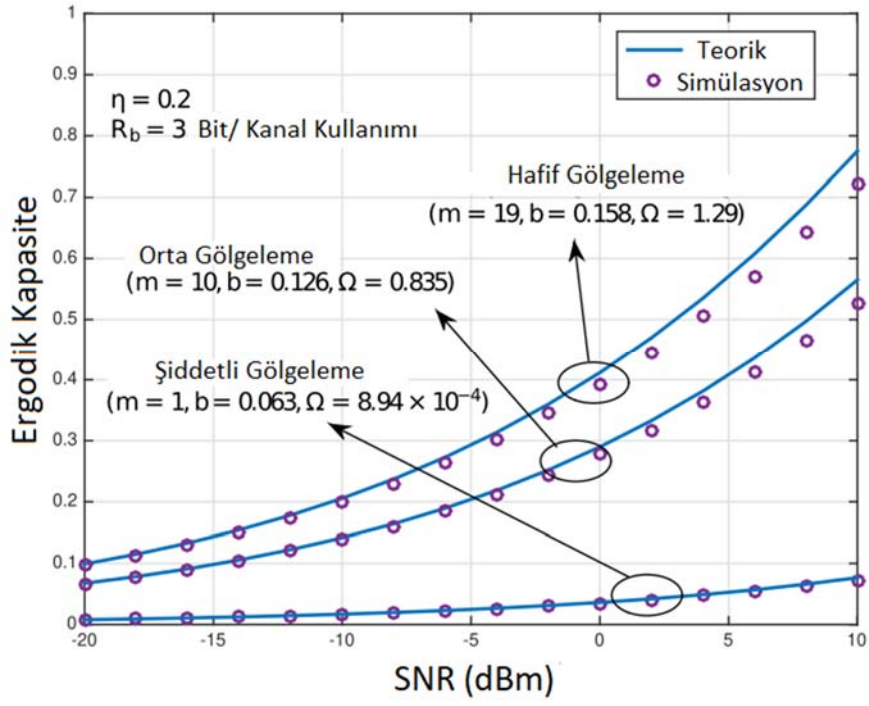
Şekil 6.5'te $m=2$, $b=0.279$, $\Omega=0.251$ değerleri için SNR=20 dB iken farklı R_b değerleri için η 'ya karşı OP performansı görülmektedir. En iyi performansın $R_b = 1$ bit/kanal kullanımı durumunda olduğu görülmektedir. $R_b = 2$ bit/kanal kullanımı durumu, $R_b = 1$ bit/kanal kullanımı durumuna göre daha kötü; $R_b = 3$ bit/kanal kullanımı durumuna göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

$\gamma_{th} = 2^{2R_b} - 1$ eşitliğine göre R_b değeri azaldıkça γ_{th} değeri azalır ve bunun sonucunda eşik değeri düştüğü için OP performansı iyileşecektir. Bu sebeple en iyi OP performansı $R_b = 1$ bit/kanal kullanımı durumunda elde edilmiştir.



Şekil 6.5 SNR 20 dB iken farklı R_b değerleri için η 'ya karşı OP performansı

Şekil 6.6'da farklı gölgeleme seviyeleri için, $\eta = 0.2$ ve $R_b = 3 \text{ bit/kanal kullanımı}$ iken SNR'a karşı ergodik kapasite performansının hem teorik hem simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. En iyi ergodik kapasite performansı düşük gölgeleme durumunda görülmektedir. Orta seviyedeki gölgelemedeki ergodik kapasite performansı düşük gölgeleme durumundakine göre daha kötü; şiddetli gölgeleme durumundakine göre daha iyidir.



Şekil 6.6 Farklı gölgeleme seviyeleri için $\eta = 0.2$ ve $R_b = 3$ bit/kanal kullanımı iken SNR'a karşı ergodik kapasite performansı

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu tezde, enerji hasatlama kullanan HAPS destekli RF haberleşme sistemi önerilmiştir. Önerilen model için kesinti olasılığı ve ergodik kapasite ifadeleri elde edilmiştir. Analitik sonuçlarımız MC simülasyonları aracılığıyla doğrulandı. Ayrıca, farklı gölgeleme modelleri için ergodik kapasite gözlemledik ve farklı enerji dönüşüm katsayıları ve R_b değerleri için kesinti olasılığı gözlemlenmiştir.

Gelecekteki çalışma yönleri şu şekilde özetlenebilir:

Nükleer reaktörlü uçaklar, enerji hasatlama teknolojisi kullanılarak yerleşim yeri olarak kullanılabilir ve uçaklar birbirleriyle haberleşebilir. Özellikle HAPS'ta kullanılacak enerji hasatlama teknolojisi sayesinde, iletişim sisteminin performansının yanı sıra enerji verimliliğinin de önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ai, Yun, Aashish Mathur, Michael Cheffena, Manav R. Bhatnagar, ve Hongjiang Lei. 2019. "Physical Layer Security of Hybrid Satellite-FSO Cooperative Systems". *IEEE Photonics Journal* 11 (1): 1-14.
<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2892618>.
- Ali, Shujat, Asma Abu-Samah, Nor Fadzilah Abdullah, ve Nadhiya Liyana Mohd Kamal. 2022. "A Review of 6G Enabler: Vertical Heterogeneous Network (v-HetNet)". İçinde *2022 IEEE 20th Student Conference on Research and Development (SCORED)*, 180-83. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/SCORED57082.2022.9974155>.
- 'Altaş, İsmail H.'. 1998. "Fotovoltaik Güneş Pilleri : Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri". *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e* 47 (Nisan): 66-71.
- anonim. t.y. "Fading in Wireless Communication".
<https://www.geeksforgeeks.org/fading-in-wireless-communication/#article-meta-div>.
- Aprilya, Annysa, Meyra Chusna Mayarakaca, Arifin, Hendy Briantoro, ve Yoedy Moegiharto. 2022. "Energy Efficiency in D2D Cooperative Communication System UAV-Assisted for Energy Harvesting Process at Source and Relay". İçinde *2022 International Electronics Symposium (IES)*, 199-203. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IES55876.2022.9888427>.
- Babaei, Mohammadreza, ve Umit Aygolu. 2017. "BER analysis of dual-hop relaying system with energy harvesting in nakagami-m fading channel". İçinde *2017 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, 96-101. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/RTUWO.2017.8228513>.
- 'Başgümüş, Arif'. 2016. "Başgümüş, A. (2016). Fresnel Yansıma Tabanlı Fiber Optik Sensör Sistemi Tasarımı ve Röle Destekli Serbest Uzay Optik Haberleşme Sistemi İle İletim Optimizasyonu ". Bursa: Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bhowmick, Abhijit, Sanjay Dhar Roy, ve Sumit Kundu. 2020. "Throughput of an Energy-Harvesting UAV Assisted Cognitive Radio Network". İçinde *2020 National Conference on Communications (NCC)*, 1-6. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/NCC48643.2020.9056090>.
- Bjornson, Emil, Michail Matthaiou, ve Merouane Debbah. 2013. "A New Look at Dual-Hop Relaying: Performance Limits with Hardware Impairments". *IEEE Transactions on Communications* 61 (11): 4512-25.
<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.100913.130282>.
- Chen, Yunfei, Nan Zhao, Zhiguo Ding, ve Mohamed-Slim Alouini. 2018. "Multiple UAVs as Relays: Multi-Hop Single Link Versus Multiple Dual-Hop Links".

- IEEE Transactions on Wireless Communications* 17 (9): 6348-59.
<https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2859394>.
- 'Elibüyük, Ufuk', ve İbrahim' 'Üçgöl. 2014. "Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri" 2 (3).
- Hagerty, J.A., F.B. Helmbrecht, W.H. McCalpin, R. Zane, ve Z.B. Popovic. 2004. "Recycling Ambient Microwave Energy With Broad-Band Rectenna Arrays". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 52 (3): 1014-24.
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.823585>.
- Huang, Chuling, Parastoo Sadeghi, ve Ali A. Nasir. 2016. "BER performance analysis and optimization for energy harvesting two-way relay networks". İçinde *2016 Australian Communications Theory Workshop (AusCTW)*, 65-70. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/AusCTW.2016.7433611>.
- 'Karabulut Kurt, Güneş', mohammad ghadir khoshkholgh' "dashtaki", Safwan' 'Alfattani, Ahmed' 'Ibrahim, Tasneem' 'Darwish, Md Sahabul' 'Alam, Halim' 'Yanıkömeroğlu, ve Abbas' 'Yongaçoğlu. 2020. "A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future". *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Temmuz.
- Li, Yuwen, Meyer Nahon, ve Inna Sharf. 2011. "Airship dynamics modeling: A literature review". *Progress in Aerospace Sciences* 47 (3): 217-39.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.10.001>.
- Liao, Lin, ve Igor Pasternak. 2009. "A review of airship structural research and development". *Progress in Aerospace Sciences* 45 (4-5): 83-96.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2009.03.001>.
- Mheich, Zeina, ve Valentin Savin. 2017. "Cooperative communication protocols with energy harvesting relays". İçinde *2017 Wireless Days*, 60-65. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/WD.2017.7918116>.
- Nasir, Ali A., Xiangyun Zhou, Salman Durrani, ve Rodney A. Kennedy. 2013. "Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing". *IEEE Transactions on Wireless Communications* 12 (7): 3622-36.
<https://doi.org/10.1109/TWC.2013.062413.122042>.
- . 2014. "Throughput and ergodic capacity of wireless energy harvesting based DF relaying network". İçinde *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 4066-71. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICC.2014.6883957>.
- Ngoc, Phuc Le, Nguyen-Son Vo, ve Minh-Tiep Hoang. 2017. "Throughput analysis of energy harvesting MIMO relay systems over Nakagami-m fading channels". İçinde *2017 International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)*, 164-69. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/SIGTELCOM.2017.7849816>.

- 'Ordueri, Elif', ve Ayetül' Gelen. 2018. "Piezoelektrik Nanogeneratör ile Enerji Üretimi ve Depolanmasının Deneysel Olarak İncelenmesi". İçinde *IV. INES International Academic Research Congress*. Antalya.
- 'Ostafte, Harry'. 2017. "Ostafte, Harry. "RF-based wireless charging and energy harvesting enables new applications and improves product design".
- Ozden, Burak Ahmet, Melek Tuylu, ve Eylem Erdogan. 2020a. "Performance Analysis of UAV Relaying Using Energy Harvesting". İçinde *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302433>.
- . 2020b. "Performance Analysis of UAV Relaying Using Energy Harvesting". İçinde *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302433>.
- Özden, Mustafa. 2015. "Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Örnek Proje Raporu". Sayısal Modülasyon Teknikleri ve Simülasyonu. 2015. https://panel.kku.edu.tr/Content/eem/documents/eem_ornek_proje_raporu.pdf.
- Ponnimbaduge Perera, Tharindu D, Dushantha Nalin K Jayakody, Shree Krishna Sharma, Symeon Chatzinotas, ve Jun Li. 2018. "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges". *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20 (1): 264-302. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783901>.
- R, Swaminathan, Shubha Sharma, Narendra Vishwakarma, ve A S Madhukumar. 2021. "HAPS-Based Relaying for Integrated Space–Air–Ground Networks With Hybrid FSO/RF Communication: A Performance Analysis". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 57 (3): 1581-99. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3050663>.
- 'Ryan, Donald E.', ve "Jr." 1992. "The airship's potential for intertheater and intratheater airlift." Master's Thesis, Alabama: AIR UNIV MAXWELL AFB AL SCHOOL OF ADVANCED AIRPOWER STUDIES.
- Sariyer, Ömer. 2022. "UYDU HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE GİRİŞİM KAYNAĞI YER BELİRLEME YÖNTEMLERİ - METHODS OF INTERFERENCE GEOLOCATION IN SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS".
- Shamsabadi, Afsoon Alidadi, Animesh Yadav, Omid Abbasi, ve Halim Yanikomeroglu. 2022. "Handling Interference in Integrated HAPS-Terrestrial Networks through Radio Resource Management", Ağustos.
- 'Simon, Marvin K.', ve Mohamed-Slim' Alouini. 2005. *Digital Communication over Fading Channels*. Editör John & Sons Wiley. 2. bs. New Jersey: Wiley-Interscience.

- Tao, Ran, Abdelhamid Salem, ve Khairi Ashour Hamdi. 2016. "Adaptive Relaying Protocol for Wireless Power Transfer and Information Processing". *IEEE Communications Letters* 20 (10): 2027-30.
<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2593877>.
- Tekbiyik, Kursat, Ali Riza Ekti, Gunes Karabulut Kurt, Ali Gorcin, ve Halim Yanikomeroglu. 2020. "A Holistic Investigation of Terahertz Propagation and Channel Modeling toward Vertical Heterogeneous Networks". *IEEE Communications Magazine* 58 (11): 14-20.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000302>.
- Volakis, J.L., U. Olgun, ve C.-C. Chen. 2012. "Design of an efficient ambient WiFi energy harvesting system". *IET Microwaves, Antennas & Propagation* 6 (11): 1200-1206. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2012.0129>.
- Widiawan, Anggoro K., ve Rahim Tafazolli. 2007. "High Altitude Platform Station (HAPS): A Review of New Infrastructure Development for Future Wireless Communications". *Wireless Personal Communications* 42 (3): 387-404.
<https://doi.org/10.1007/s11277-006-9184-9>.
- Yahia, Olfa Ben, Eylem Erdogan, ve Gunes Karabulut Kurt. 2023. "HAPS-Assisted Hybrid RF-FSO Multicast Communications: Error and Outage Analysis". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 59 (1): 140-52.
<https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3186296>.
- Yahia, Olfa Ben, Eylem Erdogan, Gunes Karabulut Kurt, Ibrahim Altunbas, ve Halim Yanikomeroglu. 2022. "HAPS Selection for Hybrid RF/FSO Satellite Networks". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 58 (4): 2855-67. <https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3142116>.
- Yang, Liang, Jianchao Chen, Mazen O. Hasna, ve Hong-Chuan Yang. 2018. "Outage Performance of UAV-Assisted Relaying Systems With RF Energy Harvesting". *IEEE Communications Letters* 22 (12): 2471-74.
<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2876869>.
- Yang, Zhaohui, Wei Xu, ve Mohammad Shikh-Bahaei. 2020. "Energy Efficient UAV Communication With Energy Harvesting". *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69 (2): 1913-27. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2961993>.
- Zhang, Qian yuan, Zhengqiang Wang, Pengtao Zhang, Hao Zhang, Xiaoyu Wan, ve Zifu Fan. 2020. "Sum energy maximization for UAV-enabled wireless power transfer networks with nonlinear energy harvesting model". İçinde *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 1417-20. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9085191>.
- Zhi Chen, Teng Joon Lim, ve Mehul Motani. 2014. "HAP-assisted LEO satellite downlink transmission: An energy harvesting perspective". İçinde *2014 IEEE 15th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless*

Communications (SPAWC), 194-98. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/SPAWC.2014.6941426>.

Zhou, Zheng, Mugen Peng, Zhongyuan Zhao, ve Yong Li. 2015. "Joint Power Splitting and Antenna Selection in Energy Harvesting Relay Channels". *IEEE Signal Processing Letters* 22 (7): 823-27.
<https://doi.org/10.1109/LSP.2014.2369748>.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Melek TUYLU

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	İstanbul Medeniyet Üniversitesi	2020

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2021-2022	Gebze Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2022-...	İstanbul Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLAR

Bildiri

1. Ozden, B. A., Tuylu, M., & Erdogan, E. (2020, October). Performance Analysis of UAV Relaying Using Energy Harvesting. In 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.