

**GELECEK NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME AĞLARI İÇİN
ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİ**

DOKTORA TEZİ

Doğay ALTINEL

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

OCAK 2019

**GELECEK NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME AĞLARI İÇİN
ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİ**

DOKTORA TEZİ

**Doğay ALTINEL
(504142303)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Güneş KARABULUT KURT

OCAK 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504142303 numaralı Doktora Öğrencisi Doğay ALTINEL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GELECEK NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME AĞLARI İÇİN ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Güneş KARABULUT KURT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet Ertuğrul ÇELEBİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Serhat ERKÜÇÜK
Kadir Has Üniversitesi

Doç. Dr. Ender Mete EKŞİOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Eylem ERDOĞAN
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Teslim Tarihi : **26 Kasım 2018**
Savunma Tarihi : **04 Ocak 2019**





Anneme, babama, eşime ve oğluma,



ÖNSÖZ

Lisans mezuniyetim sonrasında devam eden özel sektör çalışmalarım sonunda, tam yirmi yıl sonra başladığım lisansüstü eğitim dönemimde doktora tezimi tamamlamış bulunuyorum. İkinci kariyerim dediğim akademik hayatımda, aradan geçen uzun yılların etkisini üzerimde hissederek öğrenim gördüğüm bu köklü üniversitenin bana çok şey kattığına inanıyorum. Öncelikle yüksek lisans çalışmalarımda olduğu gibi, doktora sürecinde de beraber çalışma şansı bulduğum değerli hocam Doç. Dr. Güneş Karabulut Kurt'a çalışmalarımda bana yol gösterdiği, tezime önemli katkılar sunduğu ve beni devamlı olarak destekleyip teşvik ettiği için en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesinde bulunarak beni onurlandıran değerli hocalarım Prof. Dr. M. Ertuğrul Çelebi ve Doç. Dr. Serhat Erküçük'e ayrıca çok teşekkür ederim. Bu uzun soluklu süreçte ders aldığım ve bu üniversiteyi değerli kılan bütün hocalarıma teşekkürü borç bilirim. Ayrıca, hem İstanbul Teknik Üniversitesi hem de İstanbul Medeniyet Üniversitesi'nde doktora süresince benden desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Son olarak her zaman yanımda olan anneme, babama, eşime, oğluma ve ailemdeki herkese şükranlarımı ve sevgilerimi sunarım.

Bu tez, İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 39937).

Ocak 2019

Doğay ALTINEL



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Kapsamı	1
1.2 Tezin Konuya Katkıları.....	4
1.3 Tez Kapsamında Yapılan Diğer Çalışmalar.....	8
1.4 Enerji Hasatlama	10
2. RF ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİNİN SONLU DURUMLU MARKOV KANALI TABANLI MODELLENMESİ.....	15
2.1 Amaç.....	15
2.2 Sistem Modelleri ve Sonlu Durumlu Markov Kanalı Modeli	15
2.2.1 RFEH sistem modelleri	15
2.2.2 Sonlu durumlu Markov kanalı modeli.....	17
2.3 RFEH için FSMC Tabanlı Markov Modeli	19
2.4 Genişletilmiş Modeller	23
2.4.1 RF varışına dayalı RFEH modeli.....	24
2.4.2 Etkinlik varışına dayalı RFEH modeli.....	25
2.4.3 Genelleştirilmiş RFEH modeli	27
2.5 Tartışmalar	28
2.5.1 Çoklu RF kaynak düğümlerinin olması durumu	29
2.5.2 RF kaynak düğümünün diğer enerji kaynakları ile beraber olması durumu.....	30
2.6 RFEH Modellerinin Analizi	31
2.6.1 Temel RFEH ve RF varışına dayalı RFEH modelleri	31
2.6.2 Etkinlik varışına dayalı RFEH ve genelleştirilmiş RFEH modelleri.....	32
2.7 Sayısal Sonuçlar	33
2.8 Çıkarımlar	41
3. HİBRİT ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİ İÇİN ÇOKLU ENERJİ KAYNAKLARININ MODELLENMESİ	43
3.1 Amaç.....	43
3.2 Sistem Modeli ve Karışım Modeli	44

3.3 Olasılıksal Hibrit Enerji Hasatlama Modeli	47
3.3.1 Tek enerji kaynağı kümesi	48
3.3.2 Çoklu enerji kaynağı kümeleri	50
3.3.2.1 Bağımsız kümeler	50
3.3.2.2 Korelasyonlu kümeler	51
3.4 Birleştirilen ve Depolanan Enerji	52
3.5 Sayısal Sonuçlar	54
3.6 Çıkarımlar	61
4. HİBRİT ENERJİ HASATLAMA HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ	63
4.1 Amaç	63
4.2 Sistem Modeli, Gauss Karışım Modeli ve FSMC Modeli	63
4.2.1 Sistem modeli	63
4.2.2 Gauss karışım modeli	65
4.2.3 FSMC modeli	66
4.3 HEH Haberleşme Sistemleri için Enerji Modeli	67
4.3.1 Enerji hasatlama profili	67
4.3.1.1 Enerji varış olasılığı	67
4.3.1.2 Alınan enerjinin dağılımı	68
4.3.1.3 Hasatlanan enerjinin FSMC modeli	70
4.3.2 Enerji harcama profili	71
4.3.2.1 Enerji harcama olasılığı	71
4.3.2.2 Harcanan enerjinin dağılımı	73
4.3.2.3 Harcanan enerjinin FSMC modeli	73
4.3.3 Markov enerji modeli	74
4.4 Enerji Kesintisi, Enerji Kısıtlılığı ve Servis Kaybı Olasılıkları	79
4.5 Sayısal Sonuçlar	82
4.6 Çıkarımlar	88
5. SONUÇLAR	89
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	102

KISALTMALAR

5G	: Beşinci Nesil (Fifth Generation)
CDF	: Birikimli Dağılım Fonksiyonu (Cumulative Distribution Function)
D2D	: Cihazdan Cihaza (Device to Device)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
EGC	: Eşit Kazanç Birleştirme (Equal Gain Combining)
EHM	: Enerji Hasatlama Modülü (Emergy Harvesting Module)
EM	: Beklenti-Maksimizasyon (Expectation-Maximization)
ESC	: Enerji Kaynağı Kümesi (Energy Source Cluster)
FSMC	: Sonlu Durumlu Markov Kanalı (Finite-State Markov Channel)
GM	: Gauss Karışım (Gaussian Mixture)
IoT	: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
M2M	: Makineden Makineye (Machine to Machine)
ML	: Maksimum Olabilirlik (Maximum Likelihood)
MRC	: Maksimum Oran Birleştirme (Maximal Ratio Combining)
PDF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function)
PMF	: Olasılık Kütle Fonksiyonu (Probability Mass Function)
QoS	: Servis Kalitesi (Quality of Service)
RF	: Radyo Frekansı (Radio Frequency)
RFEH	: Radyo Frekansı Enerji Hasatlama (Radio Frequency Energy Harvesting)
RFID	: Radyo Frekansı ile Tanımlama (Radio Frequency Identification)
SC	: Seçim Birleştirme (Selection Combining)
SNR	: İşaret Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
SWIPT	: Eşzamanlı Kablosuz Bilgi ve Güç Aktarımı (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer)



SEMBOLLER

$a_{b,n}$	: b . kombinasyon için hasatlanan enerjinin n . aralık eşiği
$a_{\ell,m}$	: ℓ . uygulama servisi için harcanan enerjinin m . aralık eşiği
a_n	: Hasatlanan enerjinin n . aralık eşiği
A	: Pil kapasitesi
b	: Enerji varış kombinasyonları indisi
B	: Enerji varış kombinasyonları sayısı
c	: Bileşen yoğunluğu indisi
c_b	: b . kombinasyon için bileşen ortak yoğunluğu indisi
c_s	: s . enerji kaynağı için bileşen yoğunluğu indisi
C	: Bileşen yoğunlukları sayısı
C_b	: b . kombinasyon için bileşen ortak yoğunlukları sayısı
C_n	: n . kümedeki enerji kaynağı sayısı
C_s	: s . enerji kaynağı için bileşen yoğunlukları sayısı
d	: RF kaynak düğümü ile hasatlayıcı arasındaki mesafe
D	: Hedef düğümü sayısı
e	: Enerji harcama olasılığı
e'	: Enerji harcama olmaması olasılığı
e_ℓ	: ℓ . uygulama servisi için enerji harcama olasılığı
$\hat{e}_\ell$	: ℓ . uygulama servisi için gerçekleşme olasılığı
E	: Pil enerji seviyesi
E_C	: Birleştirilen enerji
$E_{C,max}$	: Maksimum birleştirilen enerji
E_k	: k . durumun pil enerji seviyesi
E_S	: Depolanan enerji
$f_{B,ind,j}(\cdot)$	: Bağımsız hasatlanan enerjilerin j . bileşen ortak yoğunluğu
$f_{B,cor,j}(\cdot)$	: Korelasyonlu hasatlanan enerjilerin j . bileşen ortak yoğunluğu
$f_{C,j}(\cdot)$	: Birleştirilen enerjinin j . bileşen yoğunluğu
$f_{E_C}(\cdot)$	: Birleştirilen enerjinin PDF'i
$f_{E_S}(\cdot)$	: Depolanan enerjinin PDF'i
$f_{\mathbf{H}}(\cdot)$	: Hasatlanan enerjilerin ortak PDF'i
$f_H(\cdot)$	: Hasatlanan enerjinin PDF'i
$f_{H_b}(\cdot)$	: b . kombinasyon için hasatlanan enerjinin PDF'i
$f_{H_n}(\cdot)$	: n . hasatlanan enerjinin PDF'i
$f_{H_n,k_n}(\cdot)$	: n . hasatlanan enerjinin k_n . bileşen yoğunluğu
$f_{H_s}(\cdot)$	: s . hasatlanan enerjinin PDF'i
$f_R(\cdot)$	: Alınan enerjinin PDF'i
$f_{\mathbf{R}_b}(\cdot)$	: b . kombinasyon için alınan enerjilerin ortak PDF'i
$f_{R_s}(\cdot)$	: s . alınan enerjinin PDF'i
$f_{W_\ell}(\cdot)$	: ℓ . harcanan enerjinin PDF'i
$f_{W,T}(\cdot)$	: Harcanan enerji ile iletim hızının ortak PDF'i

$f_{T_r}(\cdot)$	: Pil şarj etme süresi PDF'i
$F_{H_b}(\cdot)$	: b . kombinasyon için hasatlanan enerjinin CDF'i
$g(\cdot)$	: Enerji dönüşüm fonksiyonu
$g_b(\cdot)$	: b . kombinasyon için enerji dönüşüm fonksiyonu
$g_c(\cdot)$	: Enerji birleştiricinin enerji dönüşüm fonksiyonu
$g_{h,n}(\cdot)$	: n . enerji hasatlama modülünün enerji dönüşüm fonksiyonu
$g_s(\cdot)$	: s . enerji kaynak düğümü için enerji dönüşüm fonksiyonu
$\mathbf{G}_b$	: b . kombinasyonda bulunan enerji kaynak düğümlerinin kümesi
$\mathbf{G}'_b$	: b . kombinasyonda bulunmayan enerji kaynak düğümlerinin kümesi
$\mathcal{G}_b$	: $\mathbf{G}_b$ kümesinin kardinalitesi
h_{SH}	: Kablosuz kanal bağlantısı
H	: Hasatlanan enerji
$\mathbf{H}$	: Hasatlanan enerjilerin vektörü
$\mathcal{H}(\cdot)$	: Hilbert uzayı
H_b	: b . kombinasyon için hasatlanan enerji
H_n	: n . enerji hasatlama modülünden hasatlanan enerji
H_s	: s . enerji kaynak düğümünden hasatlanan enerji
i	: Durum geçiş adımı
I	: Çözüm sayısı
j	: Bileşen ortak yoğunlukları indisi
J	: Bileşen ortak yoğunlukları sayısı
$\mathbf{I}_K$	: $K \times K$ birim matrisi
k	: Pil enerji seviyesi durum indisi
k_n	: n . hasatlanan enerjinin bileşen yoğunluğu indisi
K	: Pil enerji seviyesi durum indisinin maksimum değeri
K_n	: n . hasatlanan enerjinin bileşen yoğunluğu sayısı
l	: Yol kaybı katsayısı
ℓ	: Uygulama servisleri indisi
ℓ_{low}	: ℓ . uygulama servisi için iletişim hızının alt sınırı
ℓ_{up}	: ℓ . uygulama servisi için iletişim hızının üst sınırı
L	: Uygulama servisleri sayısı ($L - 1$)
L_p	: Etkinlik kaybı olasılığı
m	: Harcanan enerjinin aralık indisi
$\mathbf{m}_{c_b}$	: c_b . bileşen ortak yoğunluğu ortalamalarının vektörü
$\mathbf{m}_j$	: j . bileşen ortak yoğunluğu ortalamalarının vektörü
M	: Harcanan enerji aralık indisinin maksimum değeri
n	: Hasatlanan enerji indisi
N	: Hasatlanan enerji indisi maksimum değeri
$\mathcal{N}(\cdot)$	: Gauss bileşen yoğunluğu
$\mathcal{N}(x_n \cdot)$	: n . hasatlanan enerjinin k_n . Gauss bileşen yoğunluğu
$p_{b,n}$	: b . kombinasyon için n . aralığının kararlı durum olasılığı
p_n	: Hasatlanan enerjinin n . aralığının kararlı durum olasılığı
$\mathbf{P}$	: Hasatlanan enerjinin olasılık matrisi
P_{loss}	: Servis kaybı olasılığı
$P_{loss,k}$	: Durum k için servis kaybı olasılığı
P_{outage}	: Enerji kesintisi olasılığı
P_r	: Alınan güç

$P_{shortage}$	: Enerji kıtlığı olasılığı
P_t	: İletim gücü
q	: Kuantalama adımı
Q	: Ortalama karesel hata
Q_{H_b}	: b . kombinasyon için ortalama karesel hata
Q_{th}	: Ortalama karesel hata eşik değeri
Q_{tot}	: Toplam ortalama karesel hata
$Q_{tot,th}$	: Toplam ortalama karesel hata eşik değeri
Q_{W_ℓ}	: ℓ . uygulama servisi için ortalama karesel hata
r	: RF varış olasılığı
r'	: RF varışı olmaması olasılığı
r_b	: b . kombinasyon için enerji varış olasılığı
r_s	: s . enerji kaynak düğümünden enerji varış olasılığı
$r_{s'}$	: s' . enerji kaynak düğümünden enerji varış olasılığı
$r_s(\cdot)$	: s . enerji varış olasılığı için Poisson dağılımı
R	: Alınan enerji
R_E	: Şarj etme verimliliği değişkeni
R_p	: Pilin dahili direnci
$\mathbf{R}_b$	: b . kombinasyon için alınan enerjilerin vektörü
R_s	: s . enerji kaynak düğümünden alınan enerji
s	: Enerji kaynak düğümü indisi
s'	: $\mathbf{G}'_b$ kümesindeki enerji kaynak düğümü indisi
$\mathbf{s}_j^2$	: j . bileşen ortak yoğunluğu için varyans vektörü
S	: Enerji kaynak düğümü sayısı
t	: İletişim hızının fonksiyon değişkeni
t_n	: n . hasatlanan enerjinin gözlem veri indisi
T	: İletişim hızı
T_n	: n . hasatlanan enerjinin gözlem veri sayısı
T_r	: Pil şarj etme süresi
u_c	: c . bileşen yoğunluğunun karıştırma ağırlığı
$\mathbf{u}_{c_b}$	: c_b . bileşen ortak yoğunluğu karıştırma ağırlıkları vektörü
$\mathbf{u}_j$	: j . bileşen ortak yoğunluğu için karıştırma ağırlıkları vektörü
u_{n,k_n}	: k_n . bileşen yoğunluğunun karıştırma ağırlığı
u_{n,k_n}^{new}	: EM algoritması yeni karıştırma ağırlığı değeri
u_{s,c_s}	: c_s . bileşen yoğunluğunun karıştırma ağırlığı
$u_{y,j}$	: Birleştirilen enerjinin j . bileşen yoğunluğunun karıştırma ağırlığı
$v_{\ell,m}$	: ℓ . harcanan enerjinin m . aralığının kararlı durum olasılığı
$\mathbf{V}$	: Harcanan enerjinin olasılık matrisi
V_o	: Pilin açık devre gerilimi
W	: Harcanan enerji
W_ℓ	: ℓ . uygulama servisi için harcanan enerji
$\mathbf{x}$	: Hasatlanan enerjilerin fonksiyon değişkenlerinin vektörü
$\mathbf{x}_b$	: b . kombinasyon için alınan enerjilerin fonk. değ. vektörü
$\mathbf{x}_n$	: n . hasatlanan enerjinin gözlem veri vektörü
$\mathbf{X}$	: Özvektör matrisi
$\mathbf{Y}$	: Özdeğer matrisi
z	: RF kaynak düğümünden iletilen sinyal

$z_{k,j}$	: Temel matrisin elemanları
$\mathbf{Z}$	: Temel matris
α	: Sönümleme parametresi
β	: Enerji varışının gerçekleşme sayısı
$\Gamma_{b,n}$	: b . kombinasyon için n . aralığının kuantalama seviyesi
$\Gamma_{\ell,m}$	: ℓ . uygulama servisi için m . aralığının kuantalama seviyesi
Γ_n	: Hasatlanan enerjinin n . aralığının kuantalama enerji seviyesi
$\delta_{k,j}$	: Durum k 'dan durum j 'ye durum geçiş olasılığı
Δ	: Durum geçiş olasılık matrisi
$\eta(\cdot)$	: Şarj etme verimliliği
θ	: Gauss karışım modeli parametreleri kümesi
θ_n	: n . hasatlanan enerjinin Gauss karışım parametreleri kümesi
θ_s	: s . alınan enerjinin Gauss karışım parametreleri kümesi
Θ	: Gauss karışım parametreleri kümelerinin birleşim kümesi
λ	: RF kaynak düğümünden ortalama enerji varış sayısı
λ_s	: s . enerji kaynak düğümünden ortalama enerji varış sayısı
λ_ℓ	: ℓ . uygulama servisinin ortalama gerçekleşme sayısı
μ_c	: c . bileşen yoğunluğunun ortalaması
μ_{e_ℓ}	: ℓ . uygulama servisinin ortalama gerçekleşme oranı
μ_{n,k_n}	: k_n . bileşen yoğunluğunun ortalaması
μ_{n,k_n}^{new}	: EM algoritması yeni ortalama değeri
μ_r	: RF kaynak düğümünden ortalama enerji varış oranı
μ_{r_s}	: s . enerji kaynak düğümünden ortalama enerji varış oranı
μ_{s,c_s}	: c_s . bileşen yoğunluğunun ortalaması
μ_t	: İletim hızının ortalaması
μ_w	: Harcanan enerjinin ortalaması
$\mu_{y,j}$	: Birleştirilen enerjinin j . bileşen yoğunluğunun ortalaması
ξ_c	: c . Gauss bileşen yoğunluğu parametrelerinin kümesi
π	: π_k kararlı durum olasılıklarının satır vektörü
π_k	: Pil enerji seviyesi için durum k 'nın kararlı durum olasılığı
ρ	: Alınan gücün ortalaması
ρ_{k_1,k_2}	: k_1 ve k_2 bileşen yoğunluklarının korelasyon katsayısı
$\rho_{w,t}$	: Harcanan enerji ile iletim hızı arasındaki korelasyon katsayısı
σ_c^2	: c . bileşen yoğunluğunun varyansı
σ_{n,k_n}^2	: k_n . bileşen yoğunluğunun varyansı
$\sigma_{n,k_n}^{2\text{new}}$	: EM algoritması yeni varyans değeri
σ_{s,c_s}^2	: c_s . bileşen yoğunluğunun varyansı
σ_t^2	: İletim hızının varyansı
σ_w^2	: Harcanan enerjinin varyansı
$\sigma_{y,j}^2$	: Birleştirilen enerjinin j . bileşen yoğunluğunun varyansı
Σ	: Ana kovaryans matrisi
Σ_{c_b}	: c_b . bileşen ortak yoğunluğu kovaryans matrisi
Σ_j	: j . bileşen ortak yoğunluğu için kovaryans matrisi
τ	: Zaman dilimi
ϕ_{n,k_n,t_n}	: EM algoritması üyelik katsayısı
Φ_n	: n . enerji seviyesinde toplam enerji varış olasılığı
Ω_m	: m . enerji seviyesinde toplam enerji harcama olasılığı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: Ortalama güç tüketimi.....	10
Çizelge 1.2: Hasatlanan güç yoğunluğu	11
Çizelge 3.1: Benzetim parametreleri	55





ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Hibrit enerji hasatlama sistem modeli.	7
Şekil 2.1 : Birinci pil şarj etme modeli ($\mathcal{M}_{R_1}$).....	17
Şekil 2.2 : İkinci pil şarj etme modeli ($\mathcal{M}_{R_2}$).....	17
Şekil 2.3 : Birinci haberleşme modeli ($\mathcal{M}_{C_1}$)	17
Şekil 2.4 : İkinci haberleşme modeli ($\mathcal{M}_{C_2}$)	17
Şekil 2.5 : Rastgele bir dağılım için H 'nin örnek bir bölümlenmesi.	19
Şekil 2.6 : Temel RFEH modelinde durum k 'nin durum geçişleri, $k = 0, 1, \dots, K - N$	23
Şekil 2.7 : RF varışına dayalı RFEH modelinde durum k 'nin durum geçişleri, $k = 0, 1, \dots, K - N$	25
Şekil 2.8 : Etkinlik varışına dayalı RFEH modelinde durum k 'nin durum geçişleri, $k = m, m + 1, \dots, K - N$	27
Şekil 2.9 : Genelleştirilmiş RFEH modelinde durum k 'nin durum geçişleri, $k = m, m + 1, \dots, K - N$	29
Şekil 2.10 : RF varış olasılığına göre pil şarj etme zamanının değişimi, $K = 1000, 3000, 5000$	36
Şekil 2.11 : Durum indisinin maksimum değerine göre pil şarj etme zamanının değişimi, $r = 0.2, 0.3, 1$	36
Şekil 2.12 : RF varış olasılığına göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi, $e = 0.2, 0.6, 1, m = 3, K = 1000$	37
Şekil 2.13 : Etkinlik varış olasılığına göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi, $r = 0.3, 0.5, 1, m = 10, K = 1000$	37
Şekil 2.14 : RF varış olasılığı ve etkinlik varış olasılığına göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi.....	38
Şekil 2.15 : Enerji harcama parametresine göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi, $r = 0.2, 0.4, 1, e = 0.1, K = 1000$	39
Şekil 2.16 : Durum indisinin maksimum değerine göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi, $r = 0.8, 0.9, 1, e = 0.5, m = 12$	39
Şekil 2.17 : Sönümlenme parametresinin farklı değerleri için pil şarj etme zamanının PDF'leri, $\alpha = 2, 3, 5, 8$	41
Şekil 3.1 : Çevrede bulunan ve enerji hasatlama için kullanılabilir enerji kaynakları.....	43
Şekil 3.2 : Çoklu enerji kaynakları tabanlı hibrit enerji hasatlama sistem modeli, $n = 1, 2, \dots, N$	44
Şekil 3.3 : $\beta_1 = 2$ ve $\beta_2 = 5$ şekil parametrelerine sahip Beta dağılımı için örnek GM modelleri, $K_n = 2, 5, 50$	47
Şekil 3.4 : Tek bir Gauss ve iki bileşen yoğunluklu bir GM modeli için hasatlanan enerji H_1 'in PDF'leri ve benzetimleri.	56

Şekil 3.5	: Tek bir Gauss ve iki bileşen yoğunluklu bir GM modeli için hasatlanan enerji H_2 'nin PDF'leri ve benzetimleri.	56
Şekil 3.6	: Bileşen ortak yoğunlukları tabanlı hasatlanan enerjiler H_1 ve H_2 'nin ortak PDF'leri.	58
Şekil 3.7	: Bağımsız ve korelasyonlu hasatlanan enerjiler için birleştirilen enerjinin PDF'leri ve bileşen yoğunlukları.	58
Şekil 3.8	: Farklı R değerleri için şarj etme verimliliği ve depolanan enerjinin PDF'leri.	60
Şekil 3.9	: Tek bir Gauss ve iki bileşen yoğunluklu bir GM modeli için birleştirilen ve depolanan enerjilerin PDF'leri, $R_p = 50$ Ohm.	60
Şekil 4.1	: Çoklu tip enerji kaynakları tabanlı HEH haberleşme sistemi.	64
Şekil 4.2	: Markov enerji modelinin durum geçişleri.	77
Şekil 4.3	: İki bileşenli alınan enerji R_1 'in PDF'si, $s = 1$, $C_1 = 2$	83
Şekil 4.4	: Üç bileşenli alınan enerji R_2 'nin PDF'si, $s = 2$, $C_2 = 3$	83
Şekil 4.5	: Altı bileşenli alınan enerji R_3 'ün PDF'si, $s = 3$, $C_3 = 6$	84
Şekil 4.6	: b . kombinasyon için hasatlanan enerji H_b 'nin bileşen yoğunlukları, $C_b = 36$	85
Şekil 4.7	: b . kombinasyon için hasatlanan enerji H_b	85
Şekil 4.8	: Üç farklı parametre kümesi için enerji kaynaklarının sayısına göre servis kaybı olasılığının değişimi.	87
Şekil 4.9	: Pil kapasitesine göre enerji kesintisi, enerji kıtlığı ve servis kaybı olasılıklarının değişimi.	87

GELECEK NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME AĞLARI İÇİN ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİ

ÖZET

Çeşitli uygulama alanlarına sahip olan mevcut kablosuz haberleşme ağları, erişim düğümleriyle beraber pille çalışan çok sayıda kablosuz düğümden oluşur. Gelecek nesil haberleşme ağlarında birbirleriyle haberleşen kablosuz düğümlerin sayısının büyük oranda artacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, bir kablosuz düğümün enerjisi kendi pilinin kapasitesi ile sınırlıdır, bu da bilgi iletmek ve almak için diğer düğümlerle iletişim kurma kabiliyetini sınırlar. Kablosuz düğümlerin tasarımında, boyutlarıyla orantılı olan pil kapasitelerinin artması, kullanıcı form faktörü gereklilikleri nedeniyle mümkün olmayabilir. Bir çözüm olarak, ortamdaki enerji kaynaklarını kullanan şarj edilebilir piller ve süperkapasitörler kullanılabilir. Bu bağlamda, *enerji hasatlama* düşük güç harcayan cihazlar için alternatif bir enerji elde etme teknolojisi olarak düşünülebilir. Enerji hasatlama devreleriyle donatılmış elektrikli cihazlar, ortam enerjisini radyo dalgalarından, güneş ışığından, titreşimden, vücut hareketlerinden, ısı değişimlerinden veya başka formdaki hasatlanabilir enerji kaynaklarından toplarlar. Bu kaynaklar arasında bulunan ve haberleşme sistemlerinde halihazırda kullanılan radyo frekansı (RF) işareti örneği ile kablosuz haberleşme düğümlerinde enerji hasatlama açıklanabilir. Bir RF enerji hasatlama (RFEH) sisteminde, televizyon/radyo yayın kulelerinden, hücre baz istasyonlarından ve wi-fi noktalarından yayılan RF işaretleri bir anten tarafından yakalanır ve daha sonra bir doğrultucu devre vasıtasıyla doğru akım (DC) işaretine dönüştürülür. Ardından, kablosuz düğümlerin pilini yeniden şarj etmek için, DC işaretin gerilimi gerekli gerilim seviyesine yükseltilir. RFEH hasatlama dışında, çevredeki bahsedilen diğer enerji kaynaklarından da faydalanılarak enerji hasatlama sistemleri tasarlanabilir. Bu enerji kaynakları tek başına kullanılabildiği gibi, hasatlanan enerji miktarını artırmak için hibrit enerji hasatlama (HEH) sistemleri olarak adlandırılan enerji hasatlama sistemlerinde, çoklu türde enerji kaynakları olarak birlikte de kullanılabilirler.

Bu tez çalışmasında, gelecek nesil kablosuz haberleşme ağlarında enerji hasatlama uygulamalarının yapılabilirliğini arttırmaya yönelik yeni bir enerji hasatlama sistem modelinin önerilmesi ve analizinin yapılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, bu tezin hedefine ulaşmak amacıyla, üç temel çalışma yapılmıştır. Öncelikle, haberleşme sistemlerinde bilgi iletmek amacıyla kullanılan RF işaretine dayanan, RFEH'ye odaklanılarak, farklı sistem modellerine göre bir çalışma yapılmış, daha sonra HEH düşünülerek enerji kaynaklarının rastgeleliğini modellemek için bir çalışma yapılmış, son olarak ise HEH için kapsamlı bir sistem modeli düşünülerek yeni bir model oluşturulmuştur. Bu çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

İlk çalışmada, sonlu kapasiteli şarj edilebilir bir pil ile çalışan bir RFEH kablosuz düğümünün, tek bir enerji kaynağı kullanılan sistem modeline göre sonlu durumlu Markov kanalı (FSMC) tabanlı Markov modelinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu model ile, RFEH düğümüne gelen RF işaretinden hasatlanan enerji ve RFEH

düğümünün haberleşme trafiği sebebiyle harcanan enerji modelleri tek bir Markov modelinde birleştirilmiştir. RFEH düğümünde hasatlanan enerjinin değer aralığı, önerilen eşit pil adımı yöntemi ile bölümlendirilmiştir. Hasatlanan enerjinin FSMC modelinde birer durum olarak ifade edilen bu bölümlerin kararlı durum olasılıkları, RFEH düğümünün kablosuz kanalın etkisini içeren bir enerji modelinin elde edilmesini sağlayacak şekilde Markov zincirine uygulanmış ve temel RFEH modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu temel RFEH modeli, RF varışı ve enerji harcanmasına sebep olan etkinlik varışı süreçlerinin olasılıksal yapıları dikkate alınarak farklı senaryolara göre yeni enerji hasatlama modellerine genişletilmiştir. Sayısal çalışmalar yapılarak, parametrelerin RFEH sistemlerinin performansı üzerindeki etkileri gösterilmiş ve geliştirilen modeller doğrulanmıştır.

İkinci çalışmada, HEH sistemleri için çoklu enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin karışım modelleri ile tek bir formda modellenmesi ve HEH'nin her aşamasındaki enerji karakteristiğinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Çoklu enerji kaynakları, enerji türüne göre enerji kaynak kümelerine ayrılmıştır. Enerji hasatlama modülleri çıkışındaki hasatlanan enerjiler, beklenti-maksimizasyon algoritması kullanılarak karışım parametreleri bulunan, Gauss karışım (GM) modelleri ile modellenmiştir. Önce, enerji kümelerinin birbirlerinden bağımsız oldukları düşünülerek, GM modelleri elde edilen hasatlanan enerjilerin ortak dağılımları elde edilmiştir. Ortak dağılımlar, enerji kümelerindeki bileşen yoğunlukların olası kombinasyonlarının meydana getirdiği ortak yoğunlukların toplamı olarak ifade edilmiştir. Sonra, enerji kümelerinin birbirleriyle korelasyonlu olma durumu dikkate alınarak ve korelasyon katsayıları kullanılarak, ortak dağılımlar aynı formda elde edilmiştir. Daha sonra ise, hem bağımsız hem de korelasyonlu enerji kümelerini kapsayan genel formda bir ifade sunulmuştur. Bu model kullanılarak, enerji birleştiricinin çıkışının yanı sıra enerji depolayıcıdaki enerjilerin dağılımları elde edilmiştir.

Son çalışmada, hem çoklu enerji kaynakları hem de çoklu hedef düğümleri içeren HEH haberleşme sistemlerinin, olasılıksal enerji profillerine dayalı olarak modellenmesi amaçlanmıştır. Yaklaşımımıza göre, enerji varışlarının olası kombinasyonları için bir HEH haberleşme sisteminin alınan enerji seviyeleri, hasatlanan enerji seviyelerini belirlemek için kullanılacak olan, GM modelleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Bu modeller kullanılarak elde edilen hasatlanan enerjinin değer aralığı bölümlenmiş ve bölümlenme sonucu elde edilen aralıkların kararlı durum olasılıkları bir enerji kanalı olarak FSMC modeli oluşturmak için kullanılmıştır. Enerji varışına benzer şekilde başka bir FSMC modeli, çoklu uygulama servislerine bağlı olarak HEH haberleşme sisteminde harcanan enerji için oluşturulmuştur. Bu modeller kullanılarak, HEH haberleşme sistemleri için enerji hasatlama ve enerji harcama profillerini içerecek şekilde entegre bir Markov enerji modeli geliştirilmiştir. HEH haberleşme sistemlerinin performansını değerlendirmek için, enerji kesintisi, enerji kıtlığı ve servis kaybı olasılıklarının ifadeleri analitik olarak türetilmiştir. Sayısal çalışmalarda, türetilmiş ifadeler benzetim sonuçlarının eşleştirilmesiyle doğrulanmış ve HEH haberleşme sistemlerinin performansının enerji kaynağı çeşitliliği ile önemli ölçüde arttığı gösterilmiştir.

Yapılan çalışmalar ve önerilen metodoloji ile sistem modellerine uygun enerji hasatlama haberleşme sistemlerinin gerçekçi bir şekilde modellenmesi ve analiz edilebilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım ile sürdürülebilir ve pratik olarak uygulanabilir şekilde enerji hasatlayan kablosuz ağların geliştirilmesine katkıda bulunulmuştur.

ENERGY HARVESTING SYSTEMS FOR NEXT GENERATION WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS

SUMMARY

Current wireless communication networks have a wide variety of application areas, and consist of a large amount of battery powered wireless nodes. It is envisioned that the number of wireless nodes communicating with each other in the next generation communication networks will significantly increase. However, energy of a wireless node is limited by the capacity of its battery, which limits its ability to communicate with other nodes to transmit and receive information. In the design of wireless nodes, the increase of battery capacities, which are proportional to their size, may not be possible due to user form-factor requirements. As a solution, rechargeable batteries and supercapacitors that are charged by ambient energy sources can be used. In this context, energy harvesting, also known as energy scavenging or power harvesting, can be considered as an alternative energy source for low-power devices. Electrical devices equipped with energy harvesting circuits gather ambient energy from radio waves, sunlight, vibration, body motion, thermal gradients, or other forms of harvestable energy. Energy harvesting for wireless communication nodes can be explained by radio frequency (RF) signal as an example, which is already used in communication systems. In an RF energy harvesting (RFEH) system, RF signals emitted from TV/radio broadcast towers, cellular base stations, and wi-fi points are captured by an antenna, and then converted to direct current (DC) signal by means of a rectifier circuit. Next, the voltage of DC signal is boosted to the required voltage level to charge the rechargeable battery of wireless nodes.

In this thesis, the main objective is to propose and analyze a new energy harvesting system model in order to increase the feasibility of energy harvesting applications within the next generation wireless communication networks. For this purpose, three foundational studies have been conducted in order to reach the target of this thesis. First, a study is carried out for different system models based on RFEH, based on the RF signal used to transmit information in communication systems, and then a study to model the randomness of energy resources is conducted by considering hybrid energy harvesting (HEH), and finally, a new model is created for a comprehensive system model of HEH. These studies are briefly summarized below.

In the first study, it is aimed to obtain the Markov model based on the finite-state Markov channel (FSMC) of a RFEH wireless node operating with a finite capacity rechargeable battery, according to the system model using a single energy source. With this model, the energy harvested from the RF signal to the RFEH node and the energy consumption due to the communication traffic of the RFEH node are combined in a single Markov model. The value range of the harvested energy in the RFEH node is partitioned by the recommended equal battery step method. The steady-state probabilities of these intervals, expressed as a state in the FSMC model of harvested energy, are applied to the Markov chain to provide an energy model containing the

effect of the wireless channel of the RFEH node and the fundamental RFEH model is created. This fundamental RFEH model is extended to new energy harvesting models according to different scenarios, taking into account the probabilistic nature of RF arrival and event arrival processes that lead to energy consumption. By performing numerical studies, the effects of the parameters on the performance of RFEH systems are shown and the developed models are confirmed.

In practical applications, the energy obtained from the surroundings by a single energy harvester may not provide enough energy to the wireless sensors. In such scenarios, different energy transducers or energy harvester arrays that obtain energy from the same source can be used to increase the amount of harvested energy. Different configurations of antenna and rectifier arrays can be used in order to increase the amount of harvested energy in RFEH. Similarly, it is possible to enhance the amount of energy obtained by light, thermal, and piezoelectric harvesters with different combinations of photovoltaic cells, thermoelectric couples, and cantilever beams, respectively. However, each energy source has its associated disadvantages as well the advantages, depending on the energy harvesting system and the ambient conditions. In order to jointly overcome such disadvantages and to increase the amount of harvested energy, it is proposed to utilize more than one kind of energy source in an energy harvesting system, referred to as HEH. Energy harvesters designed for a single energy source can be combined to form a hybrid energy harvester. Instead of using different energy harvesters separately, an energy harvester with a compact energy transducer can also be used. In any case, suitable circuit designs can be made to combine different energy sources. Regardless of the energy sources in the environment that are used for energy harvesting, the total amount of energy transferred from the energy sources to the energy harvester is not deterministic but random. For example, considering RFEH, the probabilistic structure of RF signals mainly depends on the nature of the propagation path between the source and the receiver. This path is characterized by many probabilistic wireless channel models such as Rayleigh and Ricean fading models. Similar to RF, the solar irradiance changes according to the weather conditions, which is generally modeled by the Beta distribution. In the light of the aforementioned evaluations, HEH needs to be studied, especially based on the uncertainty of energy in the surroundings.

In the second study, it is aimed to model the energy obtained from multiple energy sources for HEH systems in a single form with the mixture models and to obtain the energy characteristic at every stage of the HEH. Multiple energy sources are divided into energy resource clusters by energy type. The harvested energies at the output of the energy harvesting modules are modeled with Gaussian mixture (GM) models, which contain the mixture parameters using the expectation-maximization algorithm. First, the distribution of the harvested energies obtained from the GM models is obtained, considering that the energy clusters are independent of each other. Common distributions are expressed here as the sum of the common densities produced by possible combinations of component densities in the energy clusters, referred to herein as the component common density. Then, by using the correlation coefficients of the energy clusters and the correlation coefficients, the common distributions are obtained in the same form. Then, an expression in the general form, which includes both independent and correlated energy clusters, is presented. Thus, taking into account the randomness of ambient energy, a probabilistic model is provided in a single form for clusters containing multiple energy sources. Using this model, the distribution of

the energies in the energy storage as well as the output of the energy combiner are obtained.

By means of HEH systems, a stable energy supply can be obtained as well as more harvested energy. On one hand, one of the most important challenges in energy harvesting is the randomness of harvested energy. The energy sources usually emit energy in different amounts intermittently. For designing an energy harvesting system, the active/passive state of energy source and the amount of emitted energy during active period also need to be answered. All these items form the energy dissipation behavior of an energy source, which can be characterized by probabilistic models. As an answer to the amount of emitted energy during active period, solar irradiance and electromagnetic power can be modeled by Beta and Gamma distributions in the presence of solar and RF energy sources, respectively. From the perspective of HEH systems, which includes multiple type energy sources with different energy dissipation behaviors, the harvested energy directly depends on these sources and their behaviors. All these behaviors constitute the energy harvesting profile of wireless device. On the other hand, another important challenge is the randomness of consumed energy. The aforementioned information required for energy sources apply to the wireless device in terms of operational functions or application service. Considering a communication system with multiple nodes, in which an energy harvesting wireless device intermittently communicates with various devices according to different application services, the energy consumption of a wireless device can be determined according to the application services based on corresponding transmission rates. The combination of energy consumption behaviors for different application services also form the energy consumption profile of wireless device.

In our final study, we propose to use HEH systems, utilizing different types of energy sources, in communication networks and to model the HEH communication systems, including both multiple energy sources and multiple destination nodes, based on probabilistic energy profiles. According to our approach, the received energy levels of an HEH communication system for possible combinations of energy arrivals are characterized using Gaussian mixture models to be used to determine the harvested energy levels. The value range of the harvested energy obtained using these models is partitioned and the steady-state possibilities of the intervals obtained as a result of the partitioning are used to create an FSMC model as an energy channel. Similar to energy arrival process, another FSMC model is created for the energy consumption on the HEH communication system, depending on the multiple application services. Using these models, an integrated Markov energy model has been developed to include energy harvesting and energy consumption profiles for HEH communication systems. In order to evaluate the performance of the HEH communication systems, the expressions of energy outage, energy shortage and service loss probabilities are derived analytically. In numerical studies, the derived expressions are confirmed by matching the simulation results, and the performance of the HEH communication systems is shown to be significantly increased by the diversity of energy sources.

With the studies and proposed methodology, it is provided that the energy harvesting communication systems that are suitable for the system models can be modeled and analyzed in a realistic way. This approach contributed to the development of sustainable and practically applicable wireless networks.



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Kapsamı

Son yıllarda kablosuz haberleşme teknolojilerinin çok hızlı bir şekilde gelişmesi ve içerik olarak zenginleşmesi, bu teknolojilerin büyük kitleler tarafından yoğun olarak kullanılmasına yol açmıştır. Cep telefonları ile insanların günlük yaşantılarının ayrılmaz bir parçası haline gelen, sesli ve görüntülü haberleşme, mesajlaşma, sosyal medya ve internete erişim gibi hizmetler sunan hücresel haberleşme ağları yanında wi-fi ve bluetooth gibi teknolojiler artık yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir adım öteye bakıldığında, cihazdan cihaza (device to device, D2D), makineden makineye (machine to machine, M2M) ve araçtan araca (vehicle to vehicle, V2V) haberleşmenin, nesnelerin interneti (internet of things, IoT) uygulamalarının ve büyük ölçekte kablosuz sensör ağların (wireless sensor network, WSN) yaygınlaşacağı görülmektedir. Beşinci nesil (fifth generation, 5G) ve sonrasında gelecek haberleşme teknolojileri ile oluşturulacak olan haberleşme altyapısının bir sonucu olarak milyarlarca cihaz birbirine bağlanarak haberleşecektir [1]. Teknolojinin bu gelişiminde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri kablosuz haberleşme cihazlarına güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı bulmaktır. Günümüzde, gerek son kullanıcıların haberleşme arayüzü olarak kullandığı kablosuz ve mobil cihazlar gerekse de haberleşme sistemlerinin bir parçası olarak kullanılan, algılama, işleme, yönlendirme, iletme işlevi gören kablosuz ağ cihazları, kapasitesi sınırlı olan piller ile çalışmaktadır. Maliyet, fiziki şartlar, yüksek cihaz sayısı gibi sebeplerle şarj edilme imkanı olmayan cihazların, özellikle kablosuz ağ cihazlarının, işlevleri pil ömrü ile sınırlı olmaktadır. Sınırlı kapasitedeki piller ile çalışan ağ cihazları, hem kendilerinin hem de kablosuz haberleşme ağının ömrünün sınırlı olmasına neden olmakta ve sürdürülebilir olmayan bir haberleşme sistemi problemini ortaya çıkarmaktadır.

Bir kablosuz haberleşme ağının güvenilir ve sürdürülebilir olarak tasarımı, ağdaki kablosuz cihazların pilsiz veya şarj edilebilen pillerle çalıştırılması ile mümkün

olabilir. Böyle bir tasarım için, pil yerine geçecek veya pili şarj edecek olan enerjinin bulunulan ortamdan temin edilmesi, yani yenilenebilir bir enerji olması, hem maliyet hem de çevresel anlamda en uygun yöntem olacaktır. Bu noktada *enerji hasatlama* (energy harvesting) teknolojisi bir çözüm olarak sunulmaktadır [2]. Enerji hasatlamada radyo frekansı (RF) işareti, güneş ışığı, ısı ve titreşim gibi çeşitli enerji kaynakları kullanılabilir. Bu kaynaklar, enerji hasatlama sistemlerinde tek bir enerji kaynağı olarak kullanılabilirdiği gibi, farklı türde enerji kaynaklarıyla beraber *hibrit enerji hasatlama* (hybrid energy harvesting, HEH) sistemlerinde kullanılabilirler. Bu tezde, gelecek nesil kablosuz haberleşme ağlarında enerji hasatlamamanın kullanımının araştırılması, sürdürülebilir bir enerji hasatlama sistem modelinin önerilmesi ve analizinin yapılması amaçlanmıştır.

Enerji hasatlama için kullanılan enerji kaynakları hangileri olursa olsun, enerji kaynaklarından enerji hasatlayıcıya aktarılan enerji miktarının deterministik değil rastgele olduğu görülmektedir. Örneğin, RF işaretlerinden enerji hasatlama göz önüne alındığında, enerji kaynağı ile enerji hasatlayıcı arasındaki yol, enerji hasatlayıcıya gelen RF işaretlerini olasılıksal olarak değiştirmektedir. Bu sebeple oluşan dağılım, yol kaybı, gölgeleme, Rayleigh ve Ricean sönümleme modelleri gibi birçok olasılıksal kablosuz kanal modeli ile karakterize edilebilir [3]. Rastlantısallığın RF enerji hasatlama (RFEH) üzerindeki etkisi [4] numaralı referansta gösterilmiş ve [5] numaralı referansta kablosuz sönümleme kanallarındaki çoklu RF kaynakları için olasılıksal ifadeler türetilmiştir. RF işaretine benzer şekilde, diğer enerji kaynaklarından gelen enerjinin dağılımının modellenmesi enerji hasatlama için büyük önem arz etmektedir. Güneş ışınlamı, mevsim koşullarına göre değişim göstermekle birlikte, [6] numaralı referansta olduğu gibi, genellikle Beta dağılımı ile modellenmektedir. [7] numaralı referansta, karayolu taşıtlarının yol açtığı titreşimlerin olasılıksal yapısının, Weibull dağılımı ile modellenmesi için bir çalışma yapılmıştır. Rüzgar hızının Weibull dağılımı ile modellendiği güneş-rüzgar enerjisi sistemlerinin olasılıksal davranışları üzerine yapılan çalışmalar da bulunmaktadır [8, 9]. Bununla beraber, enerji kaynaklarının dağılımında veya enerji hasatlamamanın çeşitli aşamalarında karışım modelleri kullanılabilir. Karışım modelleri, örüntü tanıma ve makine öğrenimi gibi verinin olasılıksal modelinin elde edilmesinde çoğunlukla kullanılmakta ve yakın bir yaklaşım sağlamaktadır [10]. [11] numaralı referansta, kümülanlar kullanılarak

çoklu fotovoltaiik üretim için bir olasılık modeli geliştirilmiş ve [12] numaralı referansta, bu model bir Gauss karışım (GM) modeli yaklaşımıyla genişletilmiştir. Bu çalışmalar, çevredeki enerji kaynaklarının muhtemel davranışları hakkında önemli bir fikir vermektedir.

Enerji hasatlama sistemlerinin tasarımında Markov zincirlerinden faydalanılabilmektedir. Öncelikle, RFEH perspektifinden, kablosuz haberleşme kanalının Markov zinciri ile nasıl modellendiği ele alınabilir. Haberleşme kanallarını tanımlamak için Markov zincirlerinin kullanılması literatürde köklü bir araştırma konusu olmuştur. Kablolu kanalın bilgi kapasitesini belirlemek için, Gilbert tarafından iki durumlu Markov zinciri ile bir patlama-gürültü ikili kanalı modellenmiştir [13]. Gilbert'in çalışmasına dayanarak, hata düzeltme ve hata tespit kodlarının hata performansları Elliott tarafından açıklanmıştır [14]. Bu çalışmalarda ikili simetrik kanalın ilgili durumla ilişkisi, sonlu durumlu Markov kanalı (FSMC) modellerinin temelini oluşturan Gilbert-Elliott kanalı olarak bilinmektedir. [15] numaralı referansta Gilbert-Elliott kanalı, iki durumlu Markov modelinden, k adet hatasız durum ve $N - k$ adet hata durumundan oluşan, toplam N durumlu Markov modeline genelleştirilmiştir. Bu model, yüksek taşıyıcı frekanslı sabit bir radyo kanalını tanımlamak için kullanılmıştır. Haberleşme sistemlerinde Gilbert-Elliott modelinin geliştirilmesi ve yeni uygulamaları, yer mobil uydu kanalının temsil edilmesi, zamanla değişen radyo kanallarında uyarlanabilir kodlamanın modellenmesi ve yavaş sönmölen kanallar için yumuşak karar istatistik dağılımlarının belirlenmesi gibi çeşitli uygulamalarla devam etmiştir [16–18]. [18] numaralı referansta, örtüşmeyen düzenli aralıklarla alınan işaret genliği bölümlenerek (burada eşit adım yöntemi olarak adlandırılmaktadır) bir FSMC modeli oluşturulmuştur. Bir başka FSMC modeli, Rayleigh sönmöleme kanalı için, alınan işaret gürültü oranının (SNR) sonlu sayıda örtüşmeyen ve düzenli olmayan aralıklara bölünmesiyle geliştirilmiştir [19]. Bu model, eşit kararlı durum olasılıkları elde etmeyi sağlamaktadır (eşit olasılık yöntemi olarak adlandırılmaktadır). Durum geçiş olasılıkları, [18] numaralı referansta benzetim sonuçlarına dayanarak belirlenirken, [19] numaralı referansta analitik olarak hesaplanmıştır. FSMC modeli ile ilgili yapılan araştırmalar, aynı zamanda, farklı senaryolarda Rician sönmöleme [20] ve Nakagami-m sönmöleme kanallarını modellemek için genişletilmiştir [21–25].

Kablosuz sönümleme kanallarının FSMC modellerinin ayrıntılı bir araştırması [26] numaralı referansta bulunabilmektedir.

Enerji hasatlama sistemlerinde Markov modelinin kullanımı ile ilgili literatür oldukça seyrek. [27] numaralı referansta, enerji hasatlayan kablosuz sensör düğümleri için enerji modelini ve trafik modelini birleştiren Markov tabanlı birleşik bir model sunulmuştur. [28] numaralı referansta, bu model, hasatlanan enerji miktarına ilişkin varsayımı ortadan kaldırmak için genelleştirilmiş ve bir etkinlik sırası kapasitesi tanımlayarak etkinliklerin sıralanmasını da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. [29] numaralı referansta, çoklu enerji hasatlama devrelerine sahip sensörler için bir Markov modeli geliştirilmiştir. [30] numaralı referansta, FSMC modeli, enerji hasatlayan kablosuz bağlantıların servis kalitesi (quality of servis, QoS) performansını karakterize eden bir analizde kullanılmaktadır. Tüm bu çalışmalar, sınırlı kapasiteli bir pil ile donatılmış enerji hasatlama düğümlerini modellemektedir. Bununla birlikte, enerji hasatlama için enerji kaynağı tam olarak belirtilmemiş ve önerilen modeller belirli bir enerji kaynağı türüne ve istatistiksel davranışına dayandırılmamıştır. Dahası, bu çalışmalar, belirli bir zaman aralığında sabit bir enerji miktarının hasatlandığı, varsayımından faydalanmaktadır ki bu genellikle gerçek hayatta mümkün değildir.

Enerji hasatlama alanındaki genel olarak bahsedilen değerlendirmeler ışığında, her yerde bulunabilmesi ve isteğe bağlı olarak aktif edilebilmesi gibi avantajları nedeni ile RF işaretinden enerji hasatlama, kablosuz haberleşme cihazları ve ağları bakımından, üzerinde özellikle çalışılması gereken bir konu olarak görülmektedir. Çalışmalarımızda RFEH'nin, gelecek nesil kablosuz haberleşme ağ tasarımlarında, enerji anlamında kendi kendine yetebilen, kendi işlevini sürdürebilen ağların geliştirilebilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca, RF işaretinden enerji hasatlama yanında kaynak çeşitliliğinin sağlanması ile birden fazla enerji kaynağına dayanan HEH kullanılarak genel ve kapsamlı bir enerji hasatlama modeli önerilmesi amaçlanmıştır. Bu anlamda, enerji hasatlamada kapsamlı bir modelin olmaması çalışmalarımızın temel motivasyon kaynağını oluşturmuştur.

1.2 Tezin Konuya Katkıları

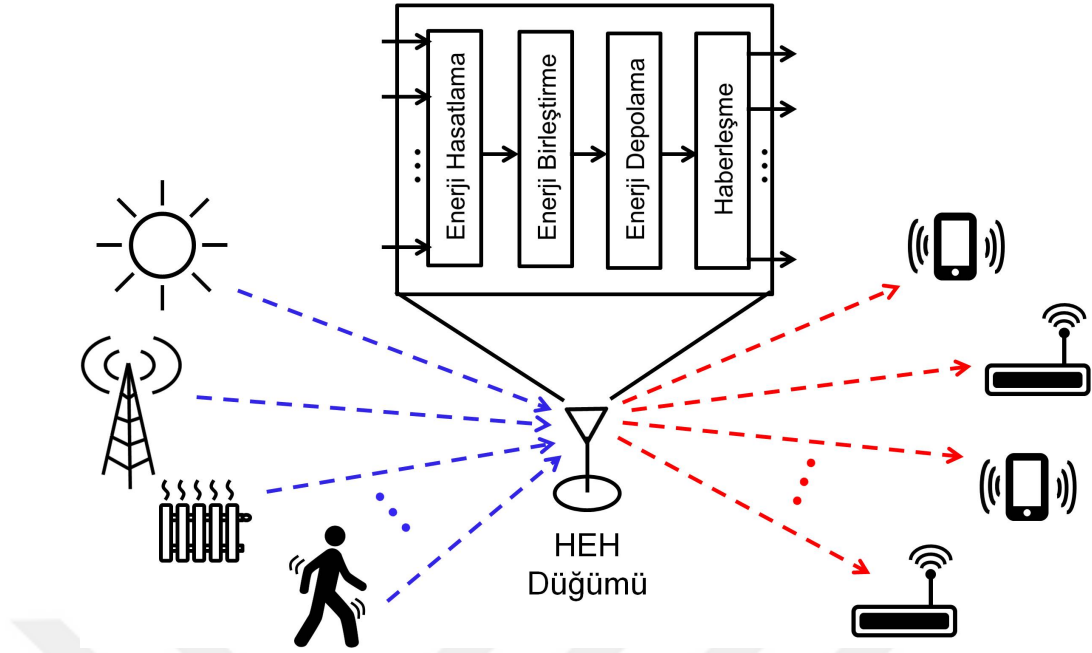
Bu tez çalışmasında, öncelikle RFEH üzerine odaklanılmış ve bir RFEH sisteminin nasıl modellenebileceği düşünülmüştür. FSMC modeli, daha önce haberleşme

sistemlerinde bilgi için kullanımının aksine, RFEH sistemlerinde enerji için kullanılmıştır. RFEH sistemleri göz önüne alınarak, herhangi bir kanal dağılımına göre, kablosuz kanalın etkisini içerecek şekilde, hasatlanan enerjinin FSMC modelini oluşturmak için yeni bir bölümlendirme yöntemi önerilmiş ve bu yöntem, eşit pil adımı yöntemi olarak adlandırılmıştır. Bu model, bir RFEH düğümündeki pilin enerji durumunu modellemek için oluşturulan Markov zincirinde kullanılmıştır. Her ne kadar oluşturulan FSMC tabanlı temel Markov modeli RF enerji kaynağı için geliştirilmiş olsa da, bilinen dağılımlara sahip diğer enerji hasatlama kaynaklarının varlığında da kullanılabilir. RFEH sistemlerinin olası farklı uygulama senaryoları dikkate alınarak, temel Markov modeline ek olarak, üç farklı RFEH modeli daha geliştirilmiştir. Böylece, RFEH'nin gerçek yaşamda gerçekleştirilebilecek uygulamaları için uygun Markov modelleri sunulmuştur. Burada çalışılan tek kaynak tabanlı sisteme ek olarak, önerilen FSMC tabanlı modelin çoklu kaynak tabanlı sisteme uygulanabilirliğini de incelenmiştir. Ayrıca, tanıtılan RFEH modelleri için, Markov zincir özelliklerine dayanan analiz sonuçları sunulmuştur. Bir haberleşme sisteminin parçası olan bir RFEH düğümünün performansını değerlendirmek için, pil şarj etme süresi ve etkinlik kaybı olasılığı parametrelerinin kullanımı önerilmiş ve incelenmiştir. Bu iki parametre için, sırasıyla temel matris ve özdeğer ayrışma araçları kullanılarak analitik ifadeler türetilmiştir. Sayısal çalışmalarla, sistem parametrelerinin çeşitli kombinasyonları için, sistem parametrelerinin pil şarj etme süresi ve etkinlik kaybı olasılığı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Analitik ve ayrık zamanlı benzetim sonuçlarının, geliştirilen modellere göre tutarlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, daha yaygın sönümlendirme senaryoları için Rayleigh sönümlendirme kanalı yanında Nakagami sönümlendirme kanalları da ele alınmıştır. Böylece, RFEH sistemlerinin tasarımının, gerçeğe uygun bir şekilde izlenebilir analitik ifadeler ile yapılabilmesine katkı sağlanmıştır [5].

RFEH sistemlerinden sonra, kablosuz düğümler için yeterli miktarda enerjinin elde edilmesine katkı sağlamak hem de enerjinin elde edilmesini daha kararlı hale getirmek için farklı enerji kaynaklarından enerji hasatlama üzerinde düşünülmüştür. Hasatlanan enerji, bir HEH sisteminin tasarımı ve performansının değerlendirilmesinde önemli bir etkeni oluşturmaktadır. Bu bağlamda, çevrede bulunan enerji kaynakları, yaydıkları enerji türü dikkate alınarak enerji kaynağı kümelerinde (energy source cluster,

ESC) sınıflandırılmıştır. Oluşturulan sistem modeline göre, ESC'lerden yayılan enerji, enerji türüne uygun olarak enerji hasatlama modülleri (energy harvesting module, EHM) tarafından hasatlanmaktadır. Farklı türdeki enerji kaynaklarının farklı dağılımlara sahip olabileceği gerçeğinden yola çıkılarak, hasatlanan enerjinin karakterize edilmesi gerekmektedir. HEH sistemlerinin olasılık modellerinin doğru olarak elde edilmesi için her bir EHM'nin çıkışı (sadece bir ESC'ye bağlı) Gauss karışım (Gaussian mixture, GM) modeli kullanılarak modellenmiştir. Hasatlanan enerjilerin ortak dağılımları, bileşen yoğunlukların ortak dağılımları kullanılarak ifade edilmiştir. Bu ifadeler, her bir enerji kaynağının sadece bir bileşen yoğunluğuna ait parametreleri içerir, bu da dağılımların hesaplanmasını bütün parametrelerin tek bir ifadede kullanımından daha kolay hale getirmiştir. Bu çalışma yapılırken, enerji kaynaklarının hem bağımsız olma hem de korelasyonlu olma durumları gözönüne alınmıştır. Böylece, ortam enerjisinin rastgeleliği hesaba katılarak, çoklu enerji kaynaklarını içeren kümelenmeler için tek bir formda olasılıksal bir model sağlanmıştır. Daha sonra, enerji birleştiricisinin çıkışındaki birleştirilen enerjinin dağılımı sistem modeline bağlı olarak elde edilmiştir. Ayrıca, gerçek bir pil için oluşturulan eşdeğer devre modeli temel alınarak, enerji depolayıcı olan pilde depolanan enerjinin dağılımı elde edilmiştir. GM modelleri için türetilmiş ifadeler benzetimler aracılığıyla doğrulanmıştır. Bu çıktıların öngörülebilirliği, pratik olarak uygulanabilir kablolu ağların tasarımının yolunu açmaktadır.

Son olarak, hem yukarıda bahsedilen her iki çalışmayı içerecek hem de bu çalışmaların kapsamlarını genişletecek şekilde bir HEH sisteminin nasıl modellenebileceği düşünülmüştür. Bu anlamda, Şekil 1.1'de gösterilen kapsamlı bir HEH sistem modeli önerilerek üzerinde çalışılmıştır. Enerji hasatlamadaki en önemli zorluklardan biri, bir yandan hasatlanan enerjinin rastgele olması iken diğer yandan harcanan enerjinin de rastgele olmasıdır. Enerji kaynakları genellikle aralıklı olarak farklı miktarlarda enerji yayarlar. Bir enerji hasatlama sisteminin tasarlanması için, enerji kaynağının aktif/pasif olma durumu ve aktif dönemdeki yayılan enerjinin miktarının ne olduğu bilinmelidir. Bu öğeler, olasılıksal modellerle karakterize edilebilecek bir enerji kaynağının enerji yayılım davranışını belirlemektedir. Farklı enerji yayılım davranışlarına sahip çoklu türde enerji kaynakları içeren HEH sistemlerinde, hasatlanan enerji doğrudan bu enerji kaynaklarına ve bunların davranışlarına



Şekil 1.1 : Hibrit enerji hasatlama sistem modeli.

bağlıdır. Tüm bu davranışlar, HEH kablosuz düğümünün enerji hasatlama profilini oluşturmaktadır. Enerji hasatlama bağlamında enerji kaynakları için yukarıda bahsedilen bilgilerin gerekliliği, enerji harcama bağlamında kablosuz düğümünün uygulama servisleri açısından da geçerlidir. Bir HEH kablosuz düğümünün farklı uygulama servislerine göre çeşitli cihazlarla aralıklı olarak iletişim kurduğu çoklu düğümlere sahip bir haberleşme sistemi düşünüldüğünde, ilgili iletim hızlarına dayanan uygulama servislerine göre kablosuz düğümün harcadığı enerji belirlenebilir. Farklı uygulama servisleri için enerji harcama davranışlarının kombinasyonu, HEH kablosuz düğümünün enerji harcama profilini oluşturmaktadır. Bu tezde, bir HEH haberleşme sistemi için, enerji hasatlama profili enerji varış olasılıkları, alınan enerjinin GM modeline dayanan dağılımı ve hasatlanan enerjinin FSMC modeli; enerji harcama profili ise enerji harcama olasılıkları, harcanan enerjinin dağılımı ve harcanan enerjinin FSMC modeli temelinde tanımlanmışlardır. Bu enerji hasatlama ve enerji harcama profilleri, HEH sistemlerini modellemek amacıyla, Markov enerji modeli olarak isimlendirilen model ile birleştirilmiştir. Önerilen Markov enerji modeli, HEH ve haberleşme ortamının tüm ilgili parametrelerini kapsamlı olarak hesaba katmamıza izin vermektedir. Ayrıca, sistem performansı üzerinde enerjinin etkisinin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Markov enerji modeli ile, kablosuz ağlarda kullanılan bir HEH düğümünün farklı pratik uygulamalar için doğru bir şekilde tasarlanması mümkün olmaktadır.

1.3 Tez Kapsamında Yapılan Diğer Çalışmalar

Tez ile ilgili araştırmalar esnasında yukarıda belirtilen çalışmaların yanında başka çalışmalar da yapılmıştır. Tez çalışmalarında alınan yol hakkında bir fikir vermesi açısından, bu çalışmalarla ilgili burada kısaca bilgi verilmiştir.

İlk olarak, RF işaretinden enerji hasatlamayı da içeren eşzamanlı kablosuz bilgi ve güç aktarımı (SWIPT) sistemleri araştırılmıştır. Bu sistemlerde, kaynak tahsisi ve optimizasyonu probleminin çözümü üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, çok taşıyıcılı haberleşme sistemlerinde SWIPT kullanımı için yeni bir frekans anahtarlama alıcı yapısı önerilmiştir. Optimum alttaşıyıcı (subcarrier) tahsisi sağlamak amacıyla, alt taşıyıcılar için bir bitlik geri bildirim kullanılarak, her bir alt taşıyıcı enerji hasatlayıcı veya kod çözücüye anahtarlanacak şekilde alıcı yapısı tasarlanmıştır. Sistemde optimum çözüm, tanımlanan iki ayrı optimizasyon problemi için dinamik programlama yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir. Alt taşıyıcı tahsisinin yanında, güç tahsisi de yapılarak sistem performansı artırılmıştır. Yapılan sayısal çalışmalarda, parametrelerin geniş bir aralığında, önerilen frekans anahtarlama tabanlı modellerle elde edilen sonuçların mevcut modellerle elde edilen sonuçlardan daha iyi olduğu gösterilmiştir [31].

İkinci olarak, enerji anlamında kendi kendine yeten kablosuz haberleşme düğümlerinin elde edilmesi için RF işaretinden enerji hasatlama ile yeterli miktarda enerji temini konusu araştırılmıştır. RFEH sistemlerinde, çeşitlilik kazancı üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, RF işaretlerinden çeşitlilik birleştirme kullanımı ile hasatlanan enerji miktarını artıran bir RFEH düğümü yapısı önerilmiştir. Çeşitlilik birleştirme sürecinde harcanan güç de çeşitlilik birleştirmenin net faydasını analiz etmek için dikkate alınmıştır. RFEH sistemlerinin performansları, seçim birleştirme (SC), eşit kazanç birleştirme (EGC) ve maksimum oran birleştirme (MRC) teknikleri için incelenmiştir. SC, EGC ve MRC'nin sayısal sonuçları benzetimler yapılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarla, çeşitlilik birleştirme tekniklerinin enerji hasatlama performansını artırabildiği ve güç harcama parametrelerinin uygun tekniği belirlerken kritik öneme sahip olduğu gösterilmiştir [32].

Üçüncü olarak, çoklu enerji kaynaklarından enerji hasatlamanın pratikte uygulanabilirliği konusu araştırılmıştır. Bu amaçla, "Enerji Hasatlama Tekniklerinde Çeşitleme Kazancının İncelenmesi" isimli bir proje hazırlanmıştır. İTÜ BAP Koordinasyon Birimine sunulan bu proje kabul edilerek tez kapsamında desteklenmiştir (Proje Numarası: 39937). Proje ile ilgili olarak cihaz ve malzeme alımı yapılmış, RF işaretleri, ışık ve ısı kullanılarak enerji elde edilmesini amaçlayan bir test ortamı kurulmuştur. Öncelikle, oluşturulan RF enerji hasatlayıcı, ışık enerji hasatlayıcı ve ısı enerji hasatlayıcılar ayrı ayrı çalıştırılarak, bu hasatlayıcıların bir kapasitörü şarj etme süreleri ölçülmüştür. Daha sonra, bu enerji hasatlayıcılar paralel olarak birbirlerine bağlanıp bir hibrit enerji hasatlayıcı elde edilmiştir. Bütün enerji kaynakları aktif durumdayken, hibrit enerji hasatlayıcının kapasitörü şarj etme süresi tekrar ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlarla, kablosuz haberleşme düğümleri için enerji anlamında kaynak çeşitliliği sağlanarak daha fazla enerji elde edilebildiğini veya daha kısa sürede istenilen enerji seviyesine ulaşılabildiği gösterilmiştir [33].

Dördüncü olarak, kablosuz haberleşme düğümleri için enerji hasatlama sistemlerinde mevcut enerji kaynaklarından en yüksek verimi elde etme konusu araştırılmıştır. Özellikle RF işaretinden enerji hasatlama üzerine yoğunlaşarak, RFEH sistemlerinde verimlilik üzerine bir çalışma yapılmıştır. RFEH sistemlerinin yapısını oluşturan ana bloklar olarak, kablosuz iletim ortamı, anten ve empedans uyumlandırma devresi, doğrultma devresi, gerilim yükseltme devresi, enerji depolama birimi veya enerji hasatlayıcıya bağlanan yük birimi detaylı olarak incelenmiştir. Her blok için, sistemin genel verimliliğini belirleyen, giriş ve çıkış güçlerinin oranı olarak tanımlanan dönüşüm verimliliği ve empedans eşleştirme verimliliğine odaklanılmıştır. Sistem performansını doğrudan etkileyen blokların özellikleri ve parametrik değişkenleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Sonuçta, RFEH sistemlerinin tasarımı hakkında gerekli bilgiler sağlanmış, maksimum verimin ve buna uygun olarak maksimum çıkış gücünün elde edilmesini mümkün kılan RFEH enerji hasatlayıcı özellikleri belirlenerek bir derleme makalesi oluşturulmuştur.

Beşinci olarak, enerji hasatlamaya dayalı olarak haberleşme cihazlarının kendi enerji ihtiyacını kendisinin karşılamasını sağlayan bir enerji hasatlama ve yönetim sistem modeli tasarlanmıştır. Daha özel olarak, enerji kontrol arabirimi, enerji birleştirici, enerji depolayıcı ve aktarıcı, hafıza, enerji yönetim birimi, haberleşme yönetim birimi

arasındaki konfigürasyon ile çevreden enerji elde edilmesini ve yönetimini sağlayan bir sistem önerilmiştir. Bu bağlamda, İTÜ bünyesindeki İTUNOVA TTO kanalıyla “Birleşik Çok Kaynaklı Enerji Hasatlama ve Haberleşme Yönetim Sistemi” isimli bir patent başvurusu yapılmıştır (Başvuru Numarası: 2017/09581).

1.4 Enerji Hasatlama

Bu bölümde, tezin ana konusu olan enerji hasatlama anlatılmış ve enerji hasatlama çeşitleri hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Enerji hasatlama, tüm kablosuz elektrikli cihazlar için, önemli bir yenilenebilir enerji çözümü olarak ortaya çıkmaktadır. Enerji hasatlama, düşük güç (düşük miliWatt veya mikroWatt seviyesinde) harcayan cihazların enerjisi için kullanılan bir tanım olarak ifade edilebilir. Enerji hasatlama özelliğine sahip bir sistemde, cihazlar kendi enerjilerini bulundukları ortamdan kendileri temin edip işlevlerini sürdürerek, sistemin de işlevlerini devam ettirmesini sağlarlar. Günümüzde teknolojinin gelişimi ile düşük güç harcayan cihazların yaygınlaşması, enerji hasatlamasının potansiyel uygulama alanlarını artırmıştır. Enerji hasatlama, kablosuz sensörlerden tüketici elektroniğine, kablosuz haberleşme ağlarından RF ile tanımlama (RFID) teknolojilerine kadar bir çok alanda kullanılabilir. Düşük güç harcayan bazı cihazların, marka ve modellerine göre değişebilmekle birlikte, güç tüketim miktarları Çizelge 1.1’de sunulmuştur. Çizelgedeki değerler, $1\mu\text{W}$ ile 1 mW arasında güç sağlanması durumunda birçok kablosuz cihazın çalıştırılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 1.1 : Ortalama güç tüketimi.

Cihaz Tipi	Güç Tüketimi
Akıllı Telefon	1 W
MP3 Çalar	50 mW
Bluetooth	10 mW
İşitme Cihazı	1 mW
Kablosuz Sensör	100 μW
Kalp Pili	50 μW
Akıllı Kart	10 μW
Kuvars Saat	5 μW
Hesap Makinesi	1 μW

Genel anlamda bu ve benzeri birçok kablosuz cihazın enerji ihtiyacını karşılamak için piller kullanılır. Bu pillerin ömrü bittiğinde değiştirilmesi veya bir pil şarj etme istasyonuna bağlanarak şarj edilmesi gerekir. Enerji hasatlamada ise pilsiz çalışabilen veya pili kablosuz olarak şarj edilebilen bir sistem amaçlanmaktadır. Bir enerji hasatlama sistemini tanımlayan en önemli kısım enerji kaynağının ne olduğudur. Enerji hasatlama için güneş ışığı, ısı, basınç, titreşim, hareket ve elektromanyetik dalgalar gibi birçok enerji kaynağı kullanılabilir [34]. Çevredeki bazı kaynaklara bağlı olarak, ortam şartlarına ve sistem özelliklerine göre değişmekle birlikte, enerji hasatlayıcı tarafından hasatlanan güç yoğunluğu Çizelge 1.2’de sunulmuştur [35]. Çizelgedeki değerler, enerji hasatlayıcıdaki enerji dönüştürücünün her cm^2 ’si için $0.1\mu\text{W}$ ile 10 mW arasında güç elde edilebildiğini ve bu aralıkta güç harcayan cihazlar için enerji hasatlamamanın kullanılabileceğini göstermektedir. $100\mu\text{W}$ güç harcayan bir kablosuz sensör cihazı için enerji depolama birimlerini karşılaştıracak olursak, şarj edilmeyen basit bir pilin ömrü birkaç ay ile sınırlı kalırken, şarj edilebilir pille kullanılan bir enerji hasatlayıcı bütün ömürboyu cihazın güç ihtiyacını karşılayabilir.

Çizelge 1.2 : Hasatlanan güç yoğunluğu

Kaynak	Hasatlanan Güç Yoğunluğu
Işık - İç ortam	$10\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Işık - Dış ortam	$10\text{ mW}/\text{cm}^2$
Titreşim - İnsan	$4\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Titreşim - Endüstri	$100\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Isı- İnsan	$30\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Isı- Endüstri	$1\text{-}10\text{ mW}/\text{cm}^2$
RF - Baz istasyonu	$0.1\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Her enerji kaynağının, bulunulan ortamın koşullarına ve kurulmak istenilen sistemin özelliklerine göre avantaj veya dezavantajları vardır. Örnek olarak güneş ışığı, güç yoğunluğu fazla ve yüksek miktarda enerji elde edilebilecek enerji kaynaklarından biri olmakla beraber, zamana ve hava koşullarına göre önemli değişimler göstermektedir. Sistemde kullanılacak olan enerji kaynağının hangi enerji kaynağı olacağının yanında, bu kaynaktan nasıl enerji elde edilebileceği, elde edilen enerjinin kullanılabilecek forma nasıl dönüştürüleceği, enerjinin nerede depolanacağı, elde edilen enerjinin nasıl kullanılacağı tasarım anlamında çok önemli olan diğer konulardır. Bu

anlamda, enerji kaynağı, enerji hasatlama devresi, enerji depolama birimi ve güç yönetim birimi enerji hasatlama sistemlerinin ana kısımlarını oluşturmaktadır. Enerji hasatlama sistemlerinde donanım kısmını oluşturan, kaynaktan gelen enerjiyi doğru akım (DC) işaret enerjisine çeviren enerji hasatlayıcı devrelerinin tasarımları, hasatlanan enerjiyi depolamak için yüksek kapasiteli süperkapasitörlerin veya şarj edilebilir pillerin kullanımı konusundaki çalışmalarla beraber elde edilen enerjinin kullanımı ve yönetimi üzerine yapılan çalışmaların her biri başlı başına bir araştırma konusudur [36, 37]. Bununla beraber, kablosuz haberleşme ağları için bir enerji çözümü olarak sunulan enerji hasatlama konusunda birçok açık araştırma alanları bulunmaktadır. Bunlar kısaca, küçük ve genel bir enerji hasatlayıcı oluşturabilmek, kablosuz haberleşme ağlarında enerji hasatlama için protokoller ve verimli güç tahmin algoritmaları geliştirebilmek, enerji hasatlamaya uygun benzetim ortamı kurabilmek gibi konular olarak sıralanabilir [38]. Enerji hasatlama için yapılan veya yapılacak olan bu konulara yönelik tüm çalışmaların amacı, enerji hasatlama sistemlerinin verimliliğini artırarak yeterli miktarda enerji elde etmek ve elde edilen bu enerjinin uygun kullanımı ile kablosuz cihazların performansını iyileştirerek güvenilir, sürdürülebilir ve uygulanabilir kablosuz sistemler sağlamaktır.

Literatürde çevredeki enerji kaynaklarından faydalanılarak kablosuz cihazlar için enerji üretilebildiğini gösteren bir çok çalışma yapılmıştır. Burada bazı enerji kaynakları için yapılan çalışmalara örnekler verebiliriz. [39] numaralı referansta, RF işaretlerine dayalı bir kablosuz enerji şarj etme sistemi sunulmuş ve ticari olarak temin edilebilen bir pil şarj edilmiştir. [40] numaralı referansta, kablosuz gömülü sistemlere yeterli enerjiyi sağlayabilen iki tür güneş enerji hasatlayıcı uygulanmıştır. [41] numaralı referansta, kablosuz bir sensörü çalıştırabilen küçük bir termoelektrik jeneratörü, ticari markalı bir cihaz olarak üretilmiştir. [42] numaralı referansta ise, kablosuz sensörler için, bir köprünün titreşimleri kullanılarak bir elektromanyetik jeneratörün çıkış gücünün mW seviyelerinde elde edilebileceği gösterilmiştir. Ancak pratik uygulamalarda, tek bir enerji hasatlayıcı tarafından çevreden elde edilen enerji miktarı, kablosuz cihazlar için çoğu zaman yeterli olmayabilir. Bu durumda, hasatlanan enerji miktarını artırmak için, aynı kaynaktan enerji elde eden farklı enerji dönüştürücüleri veya enerji hasatlayıcı dizileri kullanılabilir. [43] numaralı referansta, RF işaretinden enerji hasatlamada, hasatlanan enerji miktarını artırmak için anten ve

doğrultucu dizilerinin iki farklı konfigürasyonu araştırılmıştır. Benzer şekilde, güneş hücrelerinin, termoelektrik çiftlerin ve piezo malzemelerin farklı kombinasyonları ile sırasıyla ışık, ısı ve piezoelektrik hasatlayıcılar tarafından elde edilen enerji miktarının artırılması mümkündür [44, 45]. Bahsedilen bu çalışmalarda, enerji hasatlayıcılarda çoklayıcı bazı değişiklikler yapılmakla birlikte, enerji hasatlama için sadece tek bir enerji kaynağı kullanılmıştır.

Bununla beraber, sadece belli bir tip enerji kaynağı kullanmanın dezavantajlarının üstesinden gelmek ve hasatlanan enerji miktarını artırmak amacıyla, bir enerji hasatlama sisteminde birden fazla tipte enerji kaynağı kullanılabilir. Bu da daha önce de bahsedildiği gibi HEH olarak adlandırılmaktadır. Bir hibrit enerji hasatlayıcı oluşturmak için, tek bir enerji kaynağı için tasarlanan enerji hasatlayıcıların birleştirilmesi mümkündür. [46] numaralı referansta, RF, güneş ve titreşim kaynaklarının kullanılabilirdiği üç modülden oluşan bir enerji hasatlayıcı gösterilmiştir. Ayrıca, [47] numaralı referansta gösterildiği gibi, farklı enerji hasatlayıcıları ayrı ayrı kullanmak yerine kompakt bir enerji dönüştürücüye sahip bir hibrit enerji hasatlayıcı da oluşturulabilir. [48] numaralı referansta, bir güneş hücresinin bir genişband monopol anten üzerine yerleştirildiği, RF ve güneş enerjilerini kullanan bir enerji hasatlayıcı tasarlanıp uygulanmıştır. [49] numaralı referansta, yama anten, güneş hücresi ve termoelektrik jeneratör tabakalarından oluşan kompakt bir enerji hasatlayıcı prototipi, düşük güçlü kablosuz sensörleri çalıştırabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bunların dışında, farklı enerji kaynaklarına hizmet eden bir enerji hasatlama platformu da geliştirilebilir. [50] numaralı referansta, verimliliği artırmak için güneş, ısı ve titreşim kaynaklarını bir araya getiren çok girişli bir enerji hasatlama platformu sunulmuştur.

Enerji hasatlama alanındaki genel olarak bahsedilen değerlendirmeler ışığında, enerji hasatlamanın haberleşme teknolojilerinin gelişimi ile beraber daha çok önem kazanacağı açıktır. Haberleşme ile ilgili olarak kablosuz hücreli ağlarda, kablosuz sensör ağlarda, nesnelerin internetinde ve mobil cihazlarda kullanılabilir. Bunun yanında sanayide (depo yönetimi, üretim izleme, uzaktan kontrol sistemleri), tarımda (sulama, gübreleme, sera sistemleri), çevre konularında (yangın, su kalitesi, hava kirliliği, toprak kayması denetimi) ve enerjide (akıllı enerji şebekeleri, güç ölçüm birimleri) pek çok uygulama alanı bulunabilir. Bu anlamda, enerji hasatlama, üzerinde özellikle çalışılması gereken bir konu olarak görülmektedir.



2. RF ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİNİN SONLU DURUMLU MARKOV KANALI TABANLI MODELLENMESİ

2.1 Amaç

Bu bölümde, sonlu kapasiteli şarj edilebilir bir pil ile çalışan bir RFEH kablosuz düğümünün FSMC tabanlı Markov modelinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2.2’de, RFEH sistem modelleri ve FSMC modeli açıklanmıştır. Bölüm 2.3’te, RFEH için FSMC tabanlı Markov modeli olarak oluşturulan temel RFEH modeli tanıtılmıştır. Bölüm 2.4’te, Bölüm 2.3’te oluşturulan modele dayanarak, farklı uygulamalar için genişletilmiş modeller önerilmiştir. Bölüm 2.5’te, çoklu enerji kaynaklarına sahip enerji hasatlama sistemleri için modeller tartışılmıştır. Bölüm 2.6’da, elde edilen RFEH modelleri analiz edilmiş, pil şarj etme süresi ve etkinlik kaybı olasılığı analitik olarak ifade edilmiştir. Bölüm 2.7’de, modellerde kullanılan parametrelerin etkisinin gösterildiği benzetimler ve sayısal sonuçlar verilmiştir. Bölüm 2.8’de, yapılan çalışmanın sonucu sunulmuştur.

2.2 Sistem Modelleri ve Sonlu Durumlu Markov Kanalı Modeli

Bu bölümde RF işaretinden enerji hasatlamak için önerilen RFEH sistem modelleri ve sonlu durumlu Markov kanal modeli tanıtılmıştır.

2.2.1 RFEH sistem modelleri

Bu çalışmada, iki adet pil şarj etme modeli ve iki adet haberleşme modelinden oluşan RFEH sistem modelleri ele alınmıştır. Sistem modelleri, hem farklı uygulamalara uygun olacak hem de genelleştirilmiş modelimize adım adım ulaşmayı sağlayacak şekilde farklılaştırılmıştır. Pil şarj etme modellerinde, enerji vericisi olarak bir RF kaynak düğümü ve enerji alıcısı olarak bir RFEH düğümü olmak üzere iki düğüm vardır ve bu modeller Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Haberleşme modellerinde

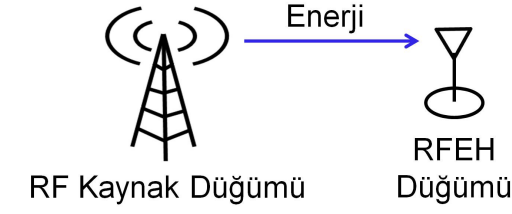
ise, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de gösterildiği gibi, pil şarj etme sistem modellerindeki düğümlere ilaveten bilgi alıcısı olarak bir hedef düğümü bulunmaktadır. RF kaynak düğümü RF işaretleri iletirken, RFEH düğümü gelen RF enerjisini toplamaktadır. RFEH düğümünde hasatlanan enerji rastgeledir ve dolayısıyla hasatlanan enerji miktarı RFEH düğümünü doğrudan çalıştırmak için her zaman yeterli olmayabilir. Bu sebeple, RFEH düğümünde, sonlu kapasiteli şarj edilebilir bir pil kullanılmış ve bu pilde sızıntı olmadığı varsayılmıştır. RFEH düğümü, RF enerjisini hasatlayarak kendi pilini yeniden şarj eder ve böylece yaşam süresini uzatır. Sistem modelini gösteren şekillerdeki düz ve kesik çizgiler, sırasıyla sürekli ve kesintili RF işaret iletimlerini temsil etmektedir.

RF kaynak düğümü, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi birinci pil şarj etme modelinde ($\mathcal{M}_{R_1}$) sürekli olarak enerji gönderirken, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi ikinci pil şarj etme modelinde ($\mathcal{M}_{R_2}$) aralıklı olarak enerji göndermektedir. Aynı durum, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’te sırasıyla gösterildiği gibi birinci ve ikinci haberleşme modelleri ($\mathcal{M}_{C_1}$ ve $\mathcal{M}_{C_2}$) için de geçerlidir. Haberleşme modellerinde, RFEH düğümünde hasatlanan enerji pilde depolanır ve gerektiğinde bilgi göndermek için kullanılır. Tüm modellerde, RF kaynak düğümü ve RFEH düğümü arasındaki kablosuz kanal bağlantısı (h_{SH}), aynı zamanda haberleşme sisteminin enerji hasatlama perspektifinden performansını da karakterize etmektedir. Kablosuz kanal bağlantısı h_{SH} ve ilgili yol kaybı, alınan güç miktarını ve RFEH düğümündeki pilin enerji seviyesini belirler. İletim gücü (P_t), RF kaynak düğümü ile RFEH düğümü arasındaki mesafe (d) ve yol kaybı katsayısı (l) parametrelerinin kullanılması durumunda, RFEH düğümündeki anlık alınan güç (P_r)

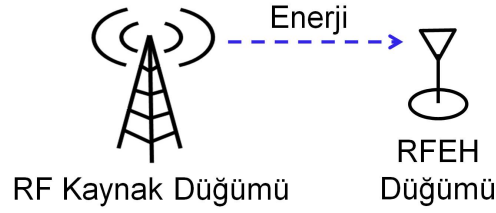
$$P_r = \frac{P_t}{d^l} |h_{SH}|^2 |z|^2 \quad (2.1)$$

olarak modellenir. Burada z , RF kaynak düğümünden iletilen işareti gösterir. Genellik kaybı olmadan, $E[|z|^2] = 1$ olduğu varsayılabilir ki burada $E[\cdot]$ beklenti operatörüdür. Sistem modeli tek bir RF kaynağına dayandırılrsa da, bu çalışmada önerilen yaklaşım daha sonra detaylandırıldığı gibi birden fazla kaynak içerecek şekilde genişletilebilir.

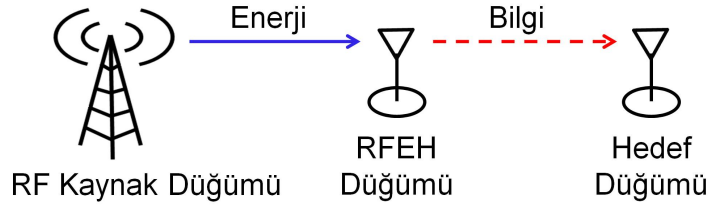
Belirtilmelidir ki , pil şarj etme modelleri, RFEH düğümünde enerjinin depolanmasını modellemek için kullanılmıştır. Birinci pil şarj etme modelinin bir uygulama örneği olarak, bir RFEH düğümü, RFEH için özel olarak yerleştirilmiş bir RF kaynak düğümünden enerji hasatlayabilir. Diğer yandan, ikinci pil şarj etme modeline uygun olarak, bir RFEH düğümü bağımsız bir hücresel baz istasyonunun yanına



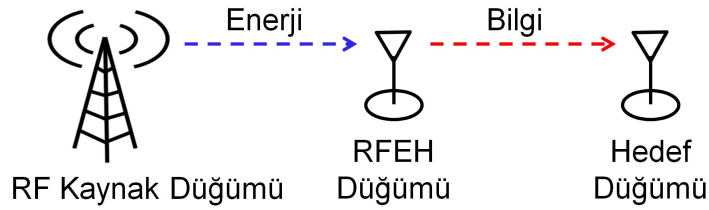
Şekil 2.1 : Birinci pil şarj etme modeli ($\mathcal{M}_{R_1}$)



Şekil 2.2 : İkinci pil şarj etme modeli ($\mathcal{M}_{R_2}$)



Şekil 2.3 : Birinci haberleşme modeli ($\mathcal{M}_{C_1}$)



Şekil 2.4 : İkinci haberleşme modeli ($\mathcal{M}_{C_2}$)

yerleştirilebilir. Ayrıca, birinci ve ikinci haberleşme sistem modelleri için, sırasıyla birinci ve ikinci pil şarj etme modellerine dayanan ve hasatlanan enerjinin harcandığı birçok olası uygulama  rneği verilebilir. Her iki model için bir örnek olarak, bir RFEH sensör düğümü, bir erişim noktasından gelen bilgi talebine göre ortam durumunu gösteren ölçüm bilgilerini erişim noktasına gönderebilir.

2.2.2 Sonlu durumlu Markov kanalı modeli

Sistem modelini analiz etmek için, kablosuz kanalın sönümleme karakteristiğine dayalı FSMC modeli kullanılmıştır. Bu model, kullanılan ilgili parametrenin değer aralığının

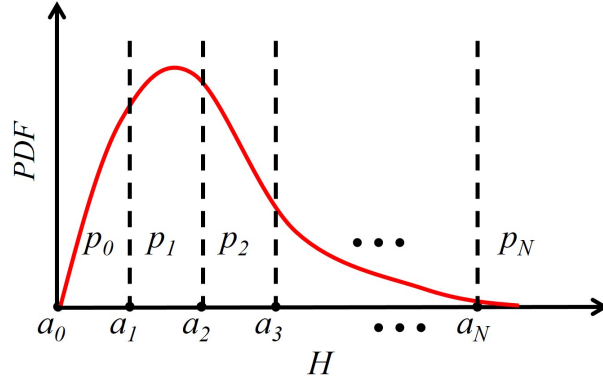
birbiriyle örtüşmeyen aralıklara bölünmesi suretiyle oluşturulur ve bu işlem *bölümleme* olarak adlandırılır. Bir kablosuz kanalın ilgili parametresi, [19] ve [51] numaralı referanslarda gösterildiği gibi, sırasıyla, alınan SNR veya alınan işaret genliği olabilir. Alınan SNR'nin veya alınan işaret genliğinin her bir aralığı, FSMC modelinde bir durum tarafından temsil edilir. Bölümleme için ilgili parametrenin eşik değerlerini belirlemek gerekir. Durumların sayısının ve buna bağlı olarak eşik değerlerinin sayısının seçimi isteğe bağlı olabilir [19] ya da her bir durumun ortalama süresine bağlı olabilir [51]. Ayrıca, eşik değerleri düzenli ve düzenli olmayan aralıklara veya eşit ve eşit olmayan olasılıklara göre belirlenebilir [18, 19]. Bunun yanında, son eşik değeri $+\infty$ veya sonlu bir değer olarak seçilebilir [19, 51]. Her durumda, bir kablosuz kanalın Markov modeli için kullanılan ilgili parametrenin bölümlenmesi, hedef uygulamanın gerekliliklerine göre gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmadaki amacımıza uygun olarak, alınan SNR veya alınan işaretin genliği yerine, hasatlanan enerjiyi (H) ilgili parametre olarak seçmek daha uygun olacaktır. Bir kablosuz kanal üzerinden hasatlanan enerjinin FSMC modelini oluşturmak için, H değer aralığı, belirlenen aralık eşikleri (a_n) ile $N + 1$ örtüşmeyen aralığa bölünür. Burada N , pozitif bir tamsayıdır, $n = 0, 1, \dots, N + 1$. Böylece, hasatlanan enerjinin her bir aralığı, FSMC modelindeki bir durum tarafından temsil edilir. FSMC modelinin kararlı durum olasılıkları (p_n), hasatlanan enerjinin olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) ile hesaplanır. Burada H , bir sonraki bölümde detaylandırıldığı gibi P_r 'nin bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon, RFEH düğümünün özelliklerine bağlı olarak değişir ve doğrusal bir fonksiyon olmayabilir. H ile P_r arasındaki ilişkiye dayanarak, ilişkinin monoton olmadığı zaman bile, H 'nin PDF'si ($f_H(y)$), P_r 'nin PDF'sinin ($f_{P_r}(P_r)$) dönüştürülmesiyle elde edilebilir [52]. H 'nin PDF'si şu şekilde ifade edilir:

$$f_H(y) = \sum_t \frac{f_{P_r}(P_r)}{|dH/dP_r|} \Big|_{P_r=P_{r,t}}. \quad (2.2)$$

Burada $P_{r,t}$, $H(P_r)$ denklemi için P_r 'nin t . çözümünü ifade eder. Analitik hesaplama ile dönüşümün zor olduğu durumlarda, dağılım sayısal olarak elde edilebilir. Elde edilen dağılıma bağlı olarak, her bir FSMC durumunun kararlı durum olasılığı

$$p_n = \int_{a_n}^{a_{n+1}} f_H(y) dy, \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (2.3)$$



Şekil 2.5 : Rastgele bir dağılım için H 'nin örnek bir bölümlenmesi.

ile hesaplanır. H değeri sıfırdan büyük veya sıfıra eşit olduğundan, H 'nin değer aralığı $[0, +\infty)$ olarak tanımlanabilir. Bu durumda, kararlı durum olasılıklarının toplam değeri

$$\sum_{n=0}^N p_n = 1, \quad a_0 = 0, a_{N+1} \rightarrow +\infty \quad (2.4)$$

olur. a_n ve a_{n+1} arasındaki herhangi bir H değeri, FSMC modelindeki her bir durumu temsil eden değer olarak, bir kuantalama enerji seviyesine (Γ_n) atanır, $n = 0, 1, \dots, N$. Kuantalamanın detayları bir sonraki bölümde ele alınmıştır.

$f_H(y)$ 'nin $f_{P_r}(P_r)$ 'ye bağlı olarak rastgele bir dağılım olabileceğini belirtmek gerekir. H 'nin herhangi bir dağılımı için bir FSMC modeli oluşturmak mümkündür. Rastgele bir dağılım için, H 'nin $N + 1$ örtüşmeyen aralığa bölünmesi örnek olarak Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

2.3 RFEH için FSMC Tabanlı Markov Modeli

Sonlu durumlu Markov modeli, gerçek yaşamdaki sürekli zamanlı uygulamaların oluşturduğu duruma, ayırık zaman yaklaşımıyla bir yakınsama sağlar. Önceki bölümde verilen sistem açıklamalarına ve kanal modeline bağlı olarak, bu bölümde RFEH düğümleri için analitik bir model elde etmek amacıyla FSMC tabanlı Markov modeli oluşturulacaktır. İlk adım olarak, modelin durum uzayı, RFEH düğümünün pilindeki enerji seviyesi olarak tanımlanır. Pilin kapasitesi A olarak belirtilir ve $K + 1$ adet enerji seviyesine eşit aralıklarla (sıfır durumu dahil) kuantalanır. K , maksimum durum indisini (pozitif bir tamsayı) ifade eder. Böylece, her bir durumdaki enerji seviyesi (E_k), aşağıdaki gibi gösterilen bir değere atanır:

$$E_k = k \frac{A}{K}, \quad k = 0, 1, \dots, K. \quad (2.5)$$

Burada, E_0 boş pil seviyesini, E_K ise tam dolu pil seviyesini temsil eder.

E_k , pildeki enerji seviyesini temsil ettiğinden, sonlu durumlu Markov modelinde hasatlanan enerjinin birikimli halini ifade etmektedir. Hasatlanan enerjinin toplam miktarı, hasatlanan güç (P_h) ve enerji hasatlama için geçen süreye bağlıdır. [53] numaralı referansta çalışıldığı gibi, hasatlanan güç P_h , alınan güç P_r 'nin bir fonksiyonudur, $P_h = P_h(P_r)$. RF enerjisini hasatlamak için geçen süre, tek bir kanal tutarlılık süresine atanabilen bir zaman dilimi (τ) olarak ayrıklaştırılabilir [54]. P_r değeri, bir τ zaman dilimi süresince sabit kalır ve bir sonraki zaman diliminde bağımsız olarak değişir. Bu nedenle hasatlanan enerji, $P_h(P_r) \tau$ ifadesine eşit olur ve aynı zamanda sabit bir τ için $H = H(P_r)$ olarak ifade edilebilir.

Bu sistemde, FSMC tabanlı Markov modeli için durum k 'dan durum j 'ye durum geçiş olasılığı ($\delta_{k,j}$) bulunabilir. Burada, her $\delta_{k,j}$, durum geçiş olasılık matrisinin (Δ) bir elemanıdır. Enerji kaynağı RF işareti olduğundan, durum geçiş olasılıkları, P_r 'nin ve dolayısıyla P_r 'nin bir fonksiyonu olan H 'nin dağılımlarına bağlıdır. Her bir zaman diliminde P_r 'nin bağımsız olarak varışından dolayı, H 'nin FSMC modelindeki kararlı durum olasılıkları, RFEH için sonlu durumlu Markov modelinin durum geçiş olasılıklarına atanmak için kullanılabilir. Uygun atama için, H değerinin, durum enerji seviyelerine göre bölümlendirilmesi gerekir veya karşılıklı olarak tam tersi de yapılabilir.

Enerji hasatlama için en genel durumda, H 'nin değer aralığı, ilk aralık eşik değeri $a_0 = 0$ ve son aralık eşik değeri $a_{N+1} = +\infty$ alınarak $N + 1$ aralığa ayrılır. FSMC tabanlı Markov modeline uygun olarak, diğer aralık eşik değerleri $a_1, a_2, \dots, a_N$ ve buna karşılık gelen öyle Γ_n değerleri belirlenir ki, ardışık Γ_n değerleri arasındaki enerji seviyesi farkı aşağıdaki koşulu sağlar:

$$\begin{aligned} \Gamma_n - \Gamma_{n-1} &= E_k - E_{k-1} = \frac{A}{K}, \\ k &= 1, 2, \dots, K, \quad n = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Böyle bir bölümlenme, RFEH'nin FSMC tabanlı Markov modelinde bir durumdan uygun olan diğer durumlara geçişlere izin verir. $a_1, a_2, \dots, a_N$ aralık eşik değerleri farklı kuantalama yöntemleri ile de belirlenebilir. Bu noktada, kuantalama işleminin optimum olarak yapılması kritik hale gelir. H 'nin bölümlenmesi ve buna uygun olarak kuantalanması, H değerleri ile bu değerlerin kuantalama enerji seviyeleri Γ_n arasındaki

farklara bağılı olarak, belli bir hataya sebep olur. Kuantalama hatası, ortalama karesel hata (Q) yardımıyla şöyle tanımlanabilir:

$$Q = \sum_{n=0}^N \int_{a_n}^{a_{n+1}} (y - \Gamma_n)^2 f_H(y) dy. \quad (2.7)$$

(2.6) numaralı denklemdeki koşulu sağlamak için, H 'nin değer aralığını ölü bölgesi düzenli kuantalayıcı ile kuantalamayı önermekteyiz [55]. Bu kuantalayıcı, H 'nin değer aralığını bir ölü bölge aralığına, $N - 1$ eşit aralığa ve yarı sonsuz bir aralığa ayırır. a_1 ve a_N arasındaki değer aralığı, $N - 1$ adet örtüşmeyen eşit aralığa bölünür. Böylece, durum k 'dan k ve $k + N$ arasındaki tüm durumlara düzenli olarak geçişler sağlanabilir. Burada bu bölümleme, eşit pil adımı yöntemi olarak adlandırılmıştır. Aralık eşik değerleri

$$a_n = \begin{cases} 0, & n = 0 \\ (n - 0.5)q, & n = 1, 2, \dots, N \\ +\infty & n = N + 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

olarak ifade edilebilir. Burada q , kuantalama adımı büyüklüğünü gösterir, $q = \Gamma_n - \Gamma_{n-1} = A/K$. Her bir aralığın kuantalama enerji seviyesi, a_1 ve a_N arasındaki değerler için aralığın orta noktasına atanır. Genel olarak, kuantalama enerji seviyeleri (2.9) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilir. Bu denklemdeki kuantalama enerji seviyelerini (2.7) numaralı denklemde yerine koyarak, (2.10) numaralı ortalama karesel hata denklemini elde ederiz. Optimum düzenli kuantalamayı elde etmek için, kuantalama adım büyüklüğü q değiştirilerek kuantalama hatası en aza indirgenebilir [56]. Leibniz integral kuralını kullanarak, Q ifadesinin q 'ya göre türevini alırız ve (2.11) numaralı denklemi elde ederiz. Q 'nun q 'ya göre ikinci türevi de, $\frac{\partial Q}{\partial q}$ ifadesinin q 'ya göre türevi alınarak elde edilebilir. $\frac{\partial Q}{\partial q} = 0$ ve $\frac{\partial^2 Q}{\partial q^2} > 0$ ifadeleri, kuantalama hatasının minimum olması için bize sırasıyla gerekli ve yeterli koşulları verir. Bu problemin çözümü, doğrusal olmayan denklemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan Newton-Raphson yöntemi kullanılarak elde edilebilir [57]. Böylece, kuantalama adımı büyüklüğü q , verilen bir N değeri için hesaplanır. Q 'nun belirli bir eşik değeri (Q_{th}) için N değerinin belirlenmesi mümkündür. Gerekli Q değerine ulaşmak için, yinelemeli olarak N değerinin artırılması ile, optimum q ve N değerlerini hesaplama prosedürü Algoritma 1'de özetlenmiştir.

Bu durumda, Şekil 2.1'de gösterilen birinci pil şarj etme modeline göre, eşit pil adımı yöntemine dayalı olarak FSMC tabanlı bir RFEH Markov modelinin oluşturulması

$$\Gamma_n = \begin{cases} 0, & H < (n+0.5)q, \quad n = 0 \\ nq, & (n-0.5)q \leq H < (n+0.5)q, \quad n = 1, 2, \dots, N-1 \\ Nq, & H \geq (n-0.5)q, \quad n = N \end{cases} \quad (2.9)$$

$$Q = \int_0^{0.5q} y^2 f_H(y) dy + \sum_{n=1}^{N-1} \int_{(n-0.5)q}^{(n+0.5)q} (y-nq)^2 f_H(y) dy + \int_{(N-0.5)q}^{+\infty} (y-Nq)^2 f_H(y) dy \quad (2.10)$$

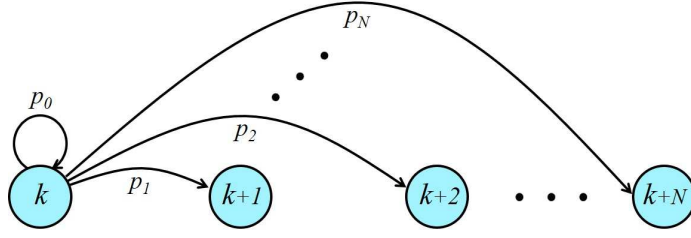
$$\frac{\partial Q}{\partial q} = - \sum_{n=1}^{N-1} 2n \int_{(n-0.5)q}^{(n+0.5)q} (y-nq) f_H(y) dy - 2N \int_{(N-0.5)q}^{+\infty} (y-Nq) f_H(y) dy \quad (2.11)$$

Algoritma 1 q ve N değerlerini hesaplayan algoritma

- 1: **başla** $N = 1$
 - 2: **tekrarla**
 - 3: N değerini ayarla, $N = N + 1$
 - 4: $\frac{\partial Q}{\partial q} = 0$ 'a göre (2.11) numaralı denklemi çözerek q değerini hesapla
 - 5: (2.10) numaralı denkleme göre Q değerini hesapla
 - 6: **kadar** $Q \leq Q_{th}$
 - 7: **geri dön** q ve N
-

mümkündür. Bu model, bundan sonra temel RFEH modeli olarak adlandırılacaktır. Temel RFEH modelinin durum geçişleri, durum k için Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Diğer durumların durum geçişleri, görsel karmaşıklığı azaltmak için gösterilmemiştir. H 'nin FSMC modelinde belirlenen a_n değerlerine göre kararlı durum olasılıkları $(p_0, p_1, \dots, p_N)$, (2.3) numaralı denklem kullanılarak hesaplanır. Hesaplanan p_n değerleri, temel RFEH modelinin durum geçiş olasılıklarını elde etmek için kullanılır.

FSMC modelindeki bu olasılıklar, bulunulan durumun k değerine göre değişebileceğinden, k değeri dikkate alınarak ifade edilmelidir. K değeri, N 'den daha küçük veya daha büyük olabilir. $K \leq N$ olması durumunda, durum geçiş olasılıklarının ifadeleri, $K > N$ olması durumundan daha basit olarak ifade edilebilir. Bu sebeple, $K > N$ olması durumu genelleştirilmiş form olarak burada kullanılacaktır. Sonuç olarak, temel RFEH



Şekil 2.6 : Temel RFEH modelinde durum k 'nın durum geçişleri, $k = 0, 1, \dots, K - N$.

modelinin durum geçiş olasılıkları $k = 0, 1, \dots, K - N$ için

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} p_i, & i = 0, 1, \dots, N \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.12)$$

olarak ifade edilir. Burada i, j değerini tanımlamak için kullanılan durum geçiş adımı parametresidir, $j = k + i$. Diğer yandan, $k = K - N + 1, K - N + 2, \dots, K - 1$ için durum geçiş olasılıkları

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} p_i, & i = 0, 1, \dots, K - k - 1 \\ \sum_{n=i}^N p_n, & i = K - k \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.13)$$

ile ifade edilebilir. Burada, son duruma gelen durum geçiş olasılıkları $K - k < N$ nedeniyle yeniden hesaplanmaktadır. $k = j = K$ için ise durum geçiş olasılığı aşağıdaki gibi olur:

$$\delta_{K,K} = 1. \quad (2.14)$$

Çeşitli kablosuz kanal modellerine bağlı olarak H 'nin bölümlendirilmesinin farklı eşik değerleri ile yapılabileceğini belirtmek gerekir. Böylece, RFEH için FSMC tabanlı Markov modeli, bölümlemeye uygun olarak tasarlanmış olur.

2.4 Genişletilmiş Modeller

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, kablosuz sönümlemeli kanallarda RFEH için, FSMC tabanlı Markov modelinin ana yapısı tasarlanmıştır. Bu modeli, RFEH sistemlerinin farklı pratik uygulamaları için, Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterildiği gibi genişletmek mümkündür. Gerçek hayattaki haberleşme sistemlerinde, hem RF işaretinin RFEH düğümüne varışı hem de RFEH düğümünün enerji harcamasına sebep olan etkinliğin varışı olasılıksal olabilir. Bu nedenle, her iki varışın da olasılıksal dağılımları dikkate alınmalıdır. Sonraki bölümlerde, RFEH düğümünün

enerji hasatlaması ve enerji harcaması ayrı ayrı ele alınacak ve daha sonra tek bir modelde birleştirilecektir.

2.4.1 RF varışına dayalı RFEH modeli

Temel RFEH modeli, bir RF kaynak düğümünden sürekli işaret iletimi durumunda (Şekil 2.1) kullanılan bir modeldir. Şekil 2.2’de gösterilen ikinci pil şarj etme modeline uygun olarak, RF işaretinin RFEH düğümüne varışı zamanda aralıklı olarak gerçekleştiğinde, RF işaretinin varış süreci de FSMC tabanlı Markov modeline dahil edilmelidir. Markov modelinde, enerji hasatlama süresi küçük zaman dilimlerine bölünerek ayrıklaştırıldığından, bir zaman dilimi için RF işaretinin varışı ayrık olarak tanımlanabilir. Telefon santrali çağrılarının varışını karakterize etmek için kullanılan Poisson süreci, RF işaretinin varış sürecini tanımlamak için de iyi bir adaydır. Poisson dağılımının olasılık kütle fonksiyonu (PMF) aşağıdaki gibi verilir [52]:

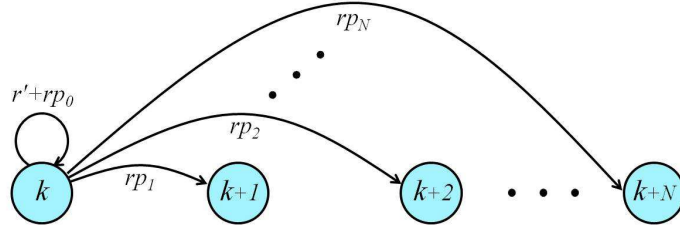
$$Pr(X = \beta) = \frac{\lambda^\beta}{\beta!} \exp(-\lambda), \quad \beta = 0, 1, \dots \quad (2.15)$$

Poisson dağılımında, β , bir tamsayı olarak oluş sayısını, λ ise, bir reel sayı olarak PMF’nin ortalama değerini gösterir, $\lambda > 0$. Bizim konumuzda, β , RF işaretinin varış sayısını gösterir ve sonsuz küçük bir zaman diliminde RF işaretinin varışı sadece bir kez gerçekleşir, yani $\beta = 1$ [28] olur. Ortalama RF varış oranı olarak μ_r tanımlandığında, bir zaman dilimi için λ parametresi, $\lambda = \mu_r \tau$ olarak tanımlanabilir. Böylece, Poisson dağılımına göre bir RF işaretinin varış olasılığı, yani RF varış olasılığı (r), $r = \mu_r \tau \exp(-\mu_r \tau)$ olarak ifade edilir.

r parametresinin etkisinin temel RFEH modeline dahil edilmesiyle, $k = 0, 1, \dots, K - N$ değerleri için durum k ’dan durum j ’ye durum geçiş olasılıkları

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} r' + rp_0, & i = 0 \\ rp_i, & i = 1, 2, \dots, N \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.16)$$

olarak ifade edilir. Burada r' değeri, $r' = 1 - r$ eşitliğine göre hesaplanır. RF varışına dayalı RFEH modelinin $k = 0, 1, \dots, K - N$ için durum geçişleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Buradaki durum geçişleri, durum k ’dan durum $k + N$ ’ye kadar olan durumlar için gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.7 : RF varışına dayalı RFEH modelinde durum k 'nın durum geçişleri, $k = 0, 1, \dots, K - N$.

$k = K - N + 1, K - N + 2, \dots, K - 1$ değerleri için, durum geçiş olasılıkları

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} r' + rp_0, & i = 0 \\ rp_i, & i = 1, 2, \dots, K - k - 1 \\ r \sum_{x=i}^N p_x, & i = K - k \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.17)$$

ile elde edilir. $k = j = K$ değeri için ise, pilin tam dolu olması sebebiyle (2.14) numaralı denklemdeki gibi durum geçiş olasılığı bire eşit olmaktadır, $\delta_{K,K} = 1$.

2.4.2 Etkinlik varışına dayalı RFEH modeli

Önceki iki modelde, bir kablosuz düğümün RF işaretinden enerji hasatlaması, RFEH düğümünün enerji harcamasını dikkate almadan modellenmiştir. Bu bölümde, Şekil 2.3'te gösterilen birinci haberleşme sistemi modeline uygun olarak, sürekli RF işaret iletimi ve aralıklı etkinlik varışını ele alacağız. Veri iletimi, veri alışı, algılama, işaret işleme ve aktarma gibi etkinlikler, kablosuz düğümde enerji harcama süreçlerini temsil ederler. Her bir etkinlik türü, harcanan enerji miktarı açısından ayrı ayrı veya ortak olarak dikkate alınabilir. Örnek olarak, veri alışı, işaret işleme ve veri iletimi tek bir etkinlik olarak gruplandırılabilir. Bir etkinlik için gerekli olan harcanan enerji (W) miktarı, burada harcanan enerji indisine (m) bağlı olarak temsil edilecektir. Böylece, RFEH'nin FSMC tabanlı Markov modelinde her bir etkinlik türü veya bunların ortalaması için enerji harcama miktarı tanımlanabilir. Enerji harcama miktarı

$$W = mq = m \frac{A}{K} \quad (2.18)$$

ile ifade edilir. Burada m , pozitif bir tamsayıdır, $m = 1, 2, \dots$. Artan m değeriyle birlikte W 'nin değeri de artar. Gerçek hayattaki uygulamalar için, m değeri N 'den daha az veya daha fazla olabilir. $m \leq N$ olduğunda, durum geçiş olasılıklarının ifadeleri $m > N$ durumundakilerden daha karmaşık olur. Bu durumda, genelleştirilmiş form olarak, $m \leq N$ durumu ele alınacaktır.

RF işaretinin varışının modellenmesi için kullanılan Poisson dağılımı, enerji harcama etkinliğinin varışını modellemek için de kullanılabilir. Bir enerji harcama etkinliği haberleşme trafiği olarak düşünüldüğünde, Poisson dağılımının etkinlik varışı için kullanılabilirliği, haberleşme trafiğinde sıklıkla kullanıldığı gibi, gerçekçi bir varsayım olur [58]. RF varışına benzer şekilde, etkinlik varışı, yeterince küçük bir zaman aralığı içinde yalnızca bir kez gerçekleşir. Bu nedenle, ortalama etkinlik varış oranı μ_e için bir zaman dilimindeki etkinlik varışı olasılığı $e = \mu_e \tau \exp(-\mu_e \tau)$ olarak tanımlanır. Burada Markov modeli, RF kaynak düğümünden sürekli işaret iletimi olduğu durum için yapılandırılmıştır. Bir zaman diliminde, öncelikle enerji hasatlama daha sonra ise etkinlik gerçekleştirilir. RFEH düğümünün pilinde yeterli miktarda enerji varsa, etkinliğin hemen gerçekleştirildiği varsayılır. Etkinlik süreci enerji hasatlamadan çok daha kısa zaman aldığından bu varsayımın mantıklı olduğu görülmektedir [28]. Ayrıca, böyle bir protokol, enerji eksikliğinden dolayı gerçekleşecek olan etkinlik kaybını da azaltacaktır.

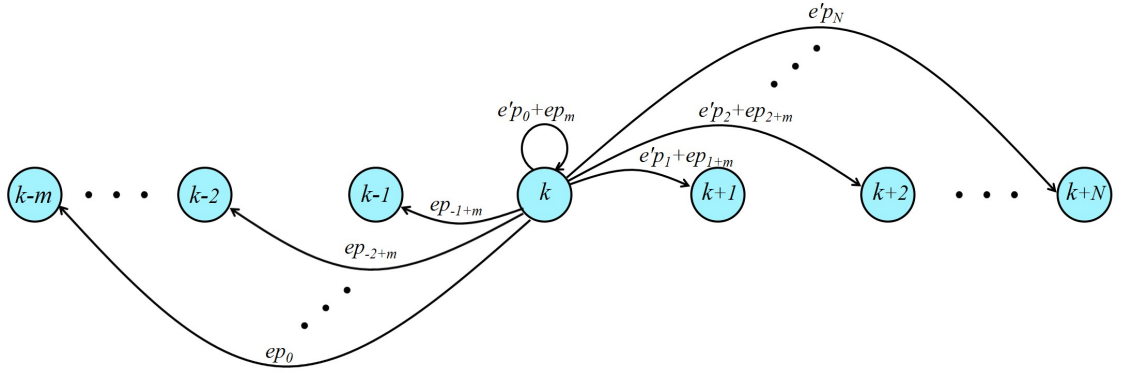
e parametresinin etkisinin RF varışına dayalı RFEH modeline dahil edilmesiyle, $k = 0, 1, \dots, m-1$ değerleri için durum geçiş olasılıkları

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} p_i + ep_{i+m}, & i = 0, 1, \dots, m-k-1 \\ e'p_i + ep_{i+m}, & i = m-k, \dots, N-m \\ e'p_i, & i = N-m+1, \dots, N \\ ep_{i+m}, & i = -1, -2, \dots, -k \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.19)$$

olarak ifade edilir. Burada e' , $e' = 1 - e$ olarak tanımlanır. Ayrıca, RFEH düğümünde yeterli enerjinin olmaması durumunda, enerji harcama etkinliğinin gerçekleştirilemeyeceğine ve dolayısıyla bu etkinlik için enerji harcanmayacağına dikkat edilerek durum geçiş olasılıkları ifade edilmiştir.

Durum geçiş olasılıkları, $k = m, m+1, \dots, K-N$ değerleri için

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} e'p_i + ep_{i+m}, & i = 0, 1, \dots, N-m \\ e'p_i, & i = N-m+1, \dots, N \\ ep_{i+m}, & i = -1, -2, \dots, -m \\ 0, & \text{diğer durumlar,} \end{cases} \quad (2.20)$$



Şekil 2.8 : Etkinlik varışına dayalı RFEH modelinde durum k 'nın durum geçişleri,
 $k = m, m + 1, \dots, K - N$.

$k = K - N + 1, K - N + 2, \dots, K - 1$ değerleri için

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} e' p_i + e p_{i+m}, & i = 0, \dots, K - k - 1 \\ e' \sum_{x=i}^N p_x + e \sum_{x=i+m}^N p_x, & i = K - k \\ e p_{i+m}, & i = -1, \dots, -m \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.21)$$

ve $k = K$ değeri için ise

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} e' + e \sum_{x=m}^N p_x, & i = 0 \\ e p_{i+m}, & i = -1, -2, \dots, -m \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.22)$$

olarak ifade edilir.

Etkinlik varışına dayalı RFEH modelinin $k = m, m + 1, \dots, K - N$ değerleri için durum geçişleri, Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Bu modelde, durum k 'dan ileriye doğru $k + N$ durumuna, geriye doğru ise $k - m$ durumuna kadar durum geçişleri gerçekleştirilir.

2.4.3 Genelleştirilmiş RFEH modeli

RF işaretinin ve enerji harcama etkinliğinin varış modelleri, burada genelleştirilmiş RFEH modeli olarak adlandırılan, enerji hasatlama için oluşturulacak bir FSMC tabanlı Markov modelinde birleştirilebilir. Genelleştirilmiş RFEH modelinde, enerji harcama etkinliği ve RF kaynağından RF işaretlerinin iletimi aralıklı olarak meydana gelir ve her ikisi de Poisson dağılımına göre rastgele üretilir. Bu model, Şekil 2.4'te gösterilen ikinci haberleşme sistem modeli için uygun bir modeldir. p_n , r ve e

parametreleri kullanılarak, durum geçiş olasılıkları $k = 0, 1, \dots, m - 1$ değerleri için

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} r' + r(p_0 + ep_m), & i = 0 \\ r(p_i + ep_{i+m}), & i = 1, 2, \dots, m - k - 1 \\ r(e'p_i + ep_{i+m}), & i = m - k, \dots, N - m \\ re'p_i, & i = N - m + 1, \dots, N \\ rep_{i+m}, & i = -1, -2, \dots, -k \\ 0, & \text{diğer durumlar,} \end{cases} \quad (2.23)$$

$k = m, m + 1, \dots, K - N$ değerleri için

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} e'(r' + rp_0) + rep_m, & i = 0 \\ r(e'p_i + ep_{i+m}), & i = 1, 2, \dots, N - m \\ re'p_i, & i = N - m + 1, \dots, N \\ rep_{i+m}, & i = -1, \dots, -m + 1 \\ e(r' + rp_0), & i = -m \\ 0, & \text{diğer durumlar,} \end{cases} \quad (2.24)$$

$k = K - N + 1, K - N + 2, \dots, K - 1$ değerleri iin

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} e'(r' + rp_0) + rep_m, & i = 0 \\ r(e'p_i + ep_{i+m}), & i = 1, \dots, K - k - 1 \\ r\left(\sum_{x=i}^N e'p_x + \sum_{x=i+m}^N ep_x\right), & i = K - k \\ rep_{i+m}, & i = -1, \dots, -m + 1 \\ e(r' + rp_0), & i = -m \\ 0, & \text{diğer durumlar,} \end{cases} \quad (2.25)$$

ve $k = K$ değeri için

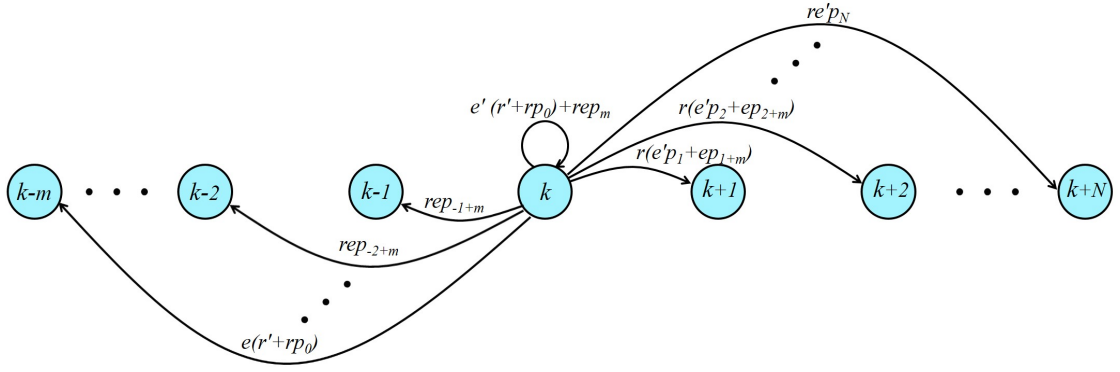
$$\delta_{k,j} = \begin{cases} e' + re \sum_{x=m}^N p_x, & i = 0 \\ rep_{i+m}, & i = -1, -2, \dots, -m + 1 \\ e(r' + rp_0), & i = -m \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.26)$$

olarak ifade edilir.

Genelleştirilmiş RFEH modelinin $k = m, m + 1, \dots, K - N$ değerleri için durum geçişleri şekil 2.9'da gösterilmiştir. Modelde, hem RF varış hem de etkinlik varış modelleri yer almaktadır.

2.5 Tartışmalar

Bu bölümde, çoklu enerji kaynaklarına sahip enerji hasatlama sistemlerinin modellenmesi tartışılacaktır.



Şekil 2.9 : Genelleştirilmiş RFEH modelinde durum k 'nın durum geçişleri,
 $k = m, m + 1, \dots, K - N$.

2.5.1 Çoklu RF kaynak düğümlerinin olması durumu

Şimdiye kadar, ana yaklaşımı açık bir şekilde açıklamak için sistemi tek bir RF kaynak düğüme göre modelledik. Bununla birlikte, gerçek hayatta, ortamda birden fazla sayıda RF kaynak düğümleri olabilir. Önerilen metodolojinin çoklu RF kaynaklarına da uygulanabileceğini göstermek için sistem modelini buna göre genişletmek mümkündür. Bu durumda, durum geçiş olasılıkları, r ve p_n değerlerinin değiştirilmiş formlarına göre elde edilir. Burada e değeri, RF kaynak düğümlerinin sayısından bağımsızdır. S adet RF kaynak düğümleri olması durumunu daha karmaşık bir senaryo olarak düşünersek, 2^S olası durum için RF işaret varışlarının olasılıkları, r ve r' değerleri yerine, $r_0, r_1, \dots, r_{2^S-1}$ olarak belirlenir. Bütün RF kaynaklarını içeren $(N + 1) \times 2^S$ olası durum için, bölümlene aralıklarının olasılıkları belirlenebilir ve matris formunda, p_n değerleri yerine, aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & \cdots & p_{0,2^S-1} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & \cdots & p_{1,2^S-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N,0} & p_{N,1} & \cdots & p_{N,2^S-1} \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

Burada $\mathbf{P}$, olasılık matrisi olarak adlandırılmıştır. $\mathbf{P}$ 'nin elemanları, tek bir kaynaktan alınan işaretlere ve alınan işaretlerin çeşitli kombinasyonlarına göre, hasatlanan enerjinin sırasıyla marjinal ve ortak PDF'lerine bağlıdır. Ortak dağılımlar, [5] numaralı referansta çoklu kaynaklarla RFEH için çalışıldığı gibi, marjinal dağılımlara dayalı olarak elde edilebilir. Sistem tasarımında, sadece birkaç en olası kaynağın ele alınmasının modeli basitleştireceği bir not olarak belirtilebilir. RFEH sisteminde 2 adet RF kaynak düğümleri bulunması durumuna özel bir örnek olarak, iki kaynak düğümlerinden de enerji varışı olmaması, sadece birinci kaynak düğümlerinden enerji

varış olması, sadece ikinci kaynak düğümünden enerji varış olması ve her iki kaynaktan da enerji varış olması durumlarını ifade eden sırasıyla r_0, r_1, r_2 , ve r_3 RF varış olasılıkları değerlerinin modelde olması gerekir. Bu durumda, $\mathbf{P}$ matrisi

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & p_{0,3} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N,0} & p_{N,1} & p_{N,2} & p_{N,3} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

olarak ifade edilir. Burada matrisin ilk sütununun elemanları $p_{0,0} = 1$ ve $p_{1,0} = p_{2,0} = \dots = p_{N,0} = 0$ olarak tanımlanır. $k = m, m+1, \dots, K-N$ değerleri için, genelleştirilmiş RFEH modeline karşılık gelen durum geçiş olasılıkları

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} e'(r_0 + r_1 p_{0,1} + r_2 p_{0,2} + r_3 p_{0,3}) + e(r_1 p_{m,1} + r_2 p_{m,2} + r_3 p_{m,3}), & i = 0 \\ e'(r_1 p_{1,1} + r_2 p_{1,2} + r_3 p_{1,3}) + e(r_1 p_{1+m,1} + r_2 p_{1+m,2} + r_3 p_{1+m,3}), & i = 1 \\ e(r_1 p_{-1+m,1} + r_2 p_{-1+m,2} + r_3 p_{-1+m,3}), & i = -1 \end{cases} \quad (2.29)$$

şeklinde ifade edilir. $i \neq -1, 0, 1$ değerleri için ise, burada verilmeyen durum geçiş olasılıkları, aynı yaklaşımla elde edilebilir. Böylece, tüm durum geçiş olasılıkları elde edilmiş ve çoklu RF kaynak düğümlerini içeren RFEH sistemleri için FSMC tabanlı Markov modeli oluşturulmuş olur.

2.5.2 RF kaynak düğümünün diğer enerji kaynakları ile beraber olması durumu

Önerilen modelin farklı türde enerji kaynaklarına da uygulanabileceği açıktır. Bunun için gerekli olan tek şey ise bu enerji kaynaklarının dağılımını bilmek ya da belirlemektir. RF enerji durumuna benzer şekilde, aynı metodoloji ile diğer enerji kaynağının dağılımına dayanılarak enerji hasatlama modeli oluşturulur. Diğer yandan, hasatlanan enerjinin miktarını artırmak için, güneş ışığı, titreşim ve ısı gibi farklı enerji kaynakları RF enerjisi ile birlikte kullanılabilir. Bu durumda, S farklı enerji kaynağı dikkate alındığında, 2^S olası durum için enerji varış olasılıkları $r_0, r_1, \dots, r_{2^S-1}$ olarak belirlenir. $(N+1) \times 2^S$ olası durum için bölümlene aralıklarının olasılıkları (2.27) numaralı denklemdeki matrise benzer şekilde belirlenebilir. RF ve güneş ışığı gibi iki farklı enerji kaynağı için olasılık matrisi

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{0,na} & p_{0,rf} & p_{0,sl} & p_{0,rs} \\ p_{1,na} & p_{1,rf} & p_{1,sl} & p_{1,rs} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N,na} & p_{N,rf} & p_{N,sl} & p_{N,rs} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

olarak ifade edilebilir. Burada na , rf , sl ve rs olasılık indisleri, sırasıyla hiç enerji varış olmaması, sadece RF varış, sadece güneş ışığı varış ve hem RF hem de

güneş ışığı varışı durumlarını göstermektedir. Aynı metodoloji kullanılarak, farklı enerji kaynakları ile beraber RFEH sistemleri için FSMC tabanlı Markov modeli oluşturabilir.

2.6 RFEH Modellerinin Analizi

RFEH modelleri Markov zincirleri kullanılarak oluşturulduğundan, Markov zincirlerinin özellikleri aynı zamanda RFEH modellerinin özelliklerini de belirlemektedir. Bu modellerden biriyle modellenen sistemlerin performansını değerlendirmek için, önerilen RFEH modellerini uygun parametrelere dayanarak analiz etmek gerekir. Bu çalışmada, pil şarj etme süresi (T_r) ve etkinlik kaybı olasılığı (L_p) anahtar performans parametreleri olarak ele alınacaktır. Pil şarj etme süresi, temel RFEH modeli ve RF varışına dayalı RFEH modeli için, kullanılan RFEH düğümünün pilini tam olarak şarj etmek için gereken süre olarak tanımlanır. Etkinlik kaybı olasılığı ise, RFEH düğümünde yeterli miktarda enerji olmaması sebebiyle, bir enerji harcama etkinliğinin gerçekleştirilememesinin ortalama olasılığını vermektedir. Etkinlik kaybı olasılığı, hem etkinlik varışına dayalı RFEH modeli hem de genelleştirilmiş RFEH modeli için kullanılabilir. Analizler, aşağıdaki bölümlerde sunulmaktadır.

2.6.1 Temel RFEH ve RF varışına dayalı RFEH modelleri

Bu modeller için, Markov zincirinin emici özelliği ile ilgileneceğiz. Bir Markov zinciri, kendinden kendine geçiş olasılığı bire eşit olacak şekilde en az bir durum varsa, emici Markov zinciri olarak adlandırılır. Temel RFEH modelinde ve RF varışına dayalı RFEH modelinde, durum K , emici özelliğini gösteren bir durumdur, $\delta_{K,K} = 1$, ve diğer durumlar geçici durumlardır. Bu nedenle, durum geçiş olasılık matrisi aşağıdaki gibi kanonik formda yazılabilir:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\kappa} & \boldsymbol{\Upsilon} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_1 \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

Burada, $\mathbf{I}_1 = 1$ olarak ifade edilir. $\mathbf{0}$ ve $\boldsymbol{\Upsilon}$, sırasıyla sıfır vektörünü ve tümü sıfır olmayan bir vektörü gösterir. $\boldsymbol{\kappa}$ ise, geçici durumlar arasındaki durum geçiş olasılıklarını tanımlayan bir $K \times K$ matrisidir. Emici özellikteki Markov zincirleri için, temel matris diye isimlendirilen matris, bazı hesaplamalarda bir araç olarak kullanılır.

Bizim çalışmamızda, temel matris şöyle tanımlanır:

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{I}_K - \boldsymbol{\kappa})^{-1}. \quad (2.32)$$

Burada $\mathbf{I}_K$, $K \times K$ birim matrisini gösterir. Temel matrisin her bir elemanı $(z_{k,j})$, durum k 'dan başlayarak emilmeden önce durum j 'ye ulaşmak için beklenen adım sayısını verir. Aynı zamanda, k . satırdaki tüm elemanların toplamı, durum k 'dan başlayarak zincirin emildiği zamana kadar beklenen adım sayısını verir. Bu nedenle, pilin herhangi bir başlangıç seviyesinde, pili tam olarak doldurmak için gereken beklenen adım sayısı, temel matris aracılığıyla hesaplanabilir. Pil boş olduğunda k değerinin sıfır, $k = 0$, olarak alınması gerekir. Bu durumda, pil şarj etme süresini elde etmek için, temel matrisin ilk sırası toplanarak beklenen adım sayısı elde edilir ve τ ile ölçeklendirilir. Pil şarj etme süresi (T_r)

$$T_r = \sum_{j=0}^{K-1} z_{0,j} \tau \quad (2.33)$$

olarak ifade edilir. Bu ifade ile, pil şarj etme süresi değerleri önceki bölümlerde ifade edilen durum geçiş olasılıklarına dayanılarak analitik olarak hesaplanabilir.

2.6.2 Etkinlik varışına dayalı RFEH ve genelleştirilmiş RFEH modelleri

Etkinlik varışına dayalı RFEH modelinde ve genelleştirilmiş RFEH modelinde, Markov zincirlerinin özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Markov zincirindeki durumların sayısı, $K + 1$ sayısı ile yani sonlu bir tamsayı ile sınırlıdır (sonlu durumlu). Zincir, aynı duruma geri dönmek için birden daha büyük belirli bir periyoda sahip değildir (periyodik olmayan). Zincirdeki tüm durumlara bir diğerinden erişilebilir (indirgenemeyen). Bir durumun kendisine geri dönmemesi mümkün değildir (tekrar eden). Bir sonlu durumlu Markov zincirinde hiç tekrarlamayan durum olmadığından, bir durum için geri dönüş süreleri sonludur (pozitif tekrar eden) [58]. Zincirdeki tüm durumlar pozitif tekrar edendir (kararlı). Sonuç olarak, bu RFEH modellerinin Markov zincirleri sonlu durumlu, periyodik olmayan, indirgenemeyen, pozitif tekrar eden ve kararlıdır. Böyle bir Markov zinciri,

$$\boldsymbol{\pi} \Delta = \boldsymbol{\pi} \quad (2.34)$$

eşitliğini sağlar. Burada $\boldsymbol{\pi}$, kararlı durum olasılık vektörünü gösterir, $\boldsymbol{\pi} = [\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_K]$ [58]. Özdeğerin tanımından, $\boldsymbol{\pi}$, karşılık gelen özdeğeri bire eşit olan

Δ 'nın sol özvektörüdür. Bu nedenle, bu RFEH modellerinin kararlı durum dağılımları, Δ 'nın özdeş ayrışması kullanılarak elde edilebilir.

Bir haberleşme sisteminin performansını değerlendirmek için, etkinlik kaybı parametresinin olasılığını kullanabiliriz. Etkinlik kaybı, RFEH düğümünde yeterli enerji olmaması durumunda enerji harcama etkinliğinin gerçekleştirilemeyeceği anlamına gelir. Etkinlik varışına dayalı RFEH modeli ve genelleştirilmiş RFEH modeline göre, etkinlik kaybı, Markov zincirindeki m 'den daha küçük olan durumlar için mümkündür, yani $k = 0, 1, \dots, m-1$. Ancak, Markov zincirinde bu durumlarda bulunulması etkinlik kaybının kesinlikle gerçekleşeceği anlamına gelmez. Bölüm 2.4.2'te açıklanan etkinlik süreci protokolüne dayanarak, etkinlik varışı ile beraber RF işareti gelmediğinde veya RF işareti geldiğinde ancak etkinliği gerçekleştirmek için yeterli miktarda enerjiye ulaşamadığında etkinlik kaybı gerçekleşir. Bu nedenle, etkinlik kaybı olasılığı (L_p) ifadesi

$$L_p = \sum_{k=0}^{m-1} \pi_k(r' + r \sum_{n=0}^{m-k-1} p_n) \quad (2.35)$$

olarak türetilir. Burada π_k , ilgili RFEH modellerinde durum k için kararlı durum olasılığını gösterir. Farklı k değerleri için π_k değerleri özdeş ayrıştırma ile hesaplanabildiğinden, verilen r , e , m ve p_n değerleri için L_p değeri analitik olarak elde edilebilir.

2.7 Sayısal Sonuçlar

Sayısal çalışmalar, bir kablosuz sönümlenme kanalı varlığında, r , e , m ve K parametrelerinin etkisini göstermek için gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, elde edilen sayısal sonuçları doğrulamak için ayrık zamanlı benzetimler de yapılmıştır. Enerji hasatlama süresi, önerilen yöntemde sabit zaman dilimlerine bölündüğünden, ayrık zamanlı benzetim modeli çalışılan modellere tam olarak uygundur. Burada, Şekil 2.1, Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilen sistem modellerine karşılık gelen tüm FSMC tabanlı Markov modelleri ele alınacaktır. Genellik kaybı olmadan, kablosuz kanalın Rayleigh dağılıma sahip olduğu, $\tau = 1$ ve $Q_{th} = 10^{-7}$ olduğu varsayılmaktadır. H 'nin karakteristiği için, aşağıda, konumuz ile ilgili olan pratik bir enerji hasatlamasına göre yapılan bir çalışma ele alınarak çalışılacaktır.

[53] numaralı referansta, hasatlanan güç P_h , alınan güç P_r 'nin değiştirilmiş bir sigmoid fonksiyonu ile modellenmiştir. Buna göre P_h

$$P_h = \frac{\Phi - L\Omega}{1 - \Omega} \quad (2.36)$$

olarak, içerdiği fonksiyonlar ise

$$\Omega = \frac{1}{1 + \exp(cb)} \text{ ve } \Phi = \frac{L}{1 + \exp(-c(P_r - b))} \quad (2.37)$$

olarak ifade edilmektedir. Φ fonksiyonu, L , c ve b parametrelerine sahip bir sigmoid fonksiyondur. Burada, L sigmoid fonksiyonunun maksimum değeri, c eğrinin dikliği ve b ise Φ 'nin orta noktasına karşılık gelen P_r değeridir.

Rayleigh sönümleme kanalının varlığında, P_r üstel dağılımlıdır ve

$$f_{P_r}(P_r) = \frac{1}{\rho} \exp\left(-\frac{P_r}{\rho}\right), \quad \rho > 0, P_r \geq 0 \quad (2.38)$$

olarak ifade edilir. Burada ρ , P_r 'nin ortalamasını gösterir. (2.36), (2.37), ve (2.38) numaralı denklemler (2.2) numaralı denklemde yerine konularak aşağıdaki denklem elde edilir

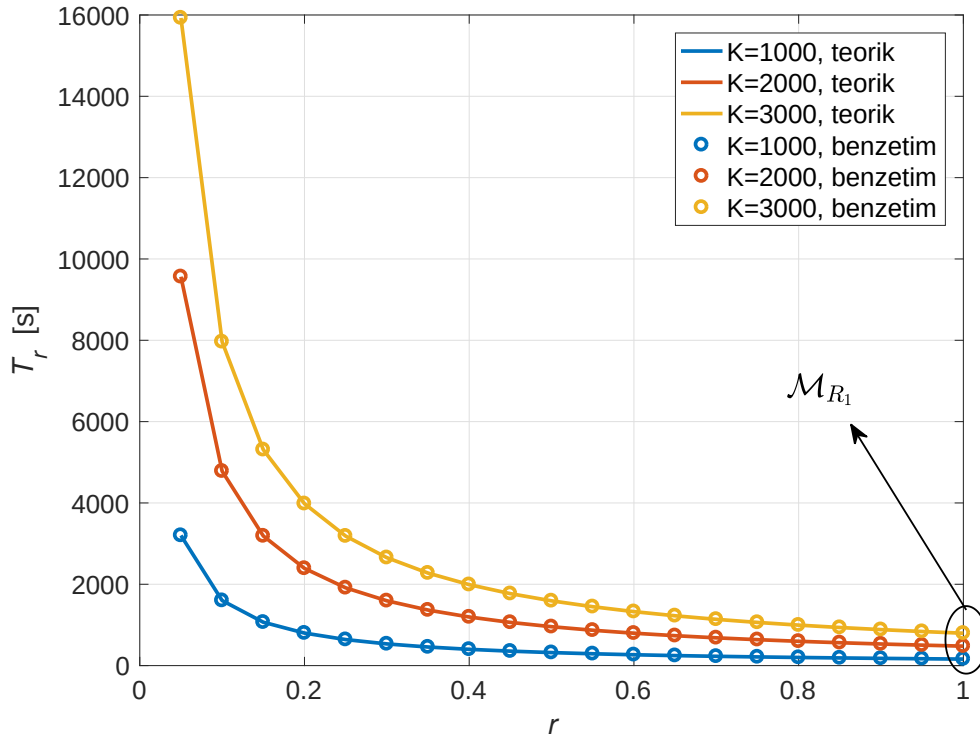
$$f_H(y) = \frac{L \exp\left(-\frac{b}{\rho}\right) (1 - \Omega)^{\frac{1}{\rho c}} (L - y)^{\frac{1}{\rho c} - 1}}{\rho c ((1 - \Omega)y + L\Omega)^{\frac{1}{\rho c} + 1}}, y \geq 0. \quad (2.39)$$

Enerji hasatlama için [53] numaralı referansta önerilen model, [59] numaralı referansta verilen deneysel çalışmaya uygulanmış ve L , c ve b parametreleri, standart bir eğri uydurma algoritması kullanılarak, $L = 24 \times 10^{-3}$, $c = 150$ ve $b = 14 \times 10^{-3}$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler bizim sayısal çalışmamızda da kullanılabilir. Eşit pil adımı yöntemine göre, H değer aralığı, $N + 1$ aralığa bölünmüştür. Q_{th} değerine dayanarak ve Algoritma 1 kullanılarak, q ve N 'nin optimum değerleri, $q = 10.66 \times 10^{-4}$ ve $N = 22$ olarak elde edilir. Γ_n değerleri, (2.9) numaralı denkleme göre $n = 0, 1, 2, \dots, 22$ için $\Gamma_n = 0, 10.66 \times 10^{-4}, 21.32 \times 10^{-4}, \dots, 234.52 \times 10^{-4}$ olarak hesaplanır. (2.8) numaralı denklemde tanımlanan aralık eşik değerleri ise $n = 0, 1, 2, \dots, 22, 23$ için $a_n = 0, 5.33 \times 10^{-4}, 15.99 \times 10^{-4}, \dots, 229.19 \times 10^{-4}, +\infty$ olarak belirlenir. (2.3) numaralı denklem kullanılarak, aralık eşiklerine göre p_n değerleri hesaplanır. Sonuçta, (2.12 - 2.14), (2.16 - 2.17), (2.19 - 2.22), ve (2.23 - 2.26) numaralı denklemlerde ifade edilen karşılık gelen durum geçiş olasılıkları, ilgili FSMC tabanlı Markov modeline atama için elde edilmiş olur.

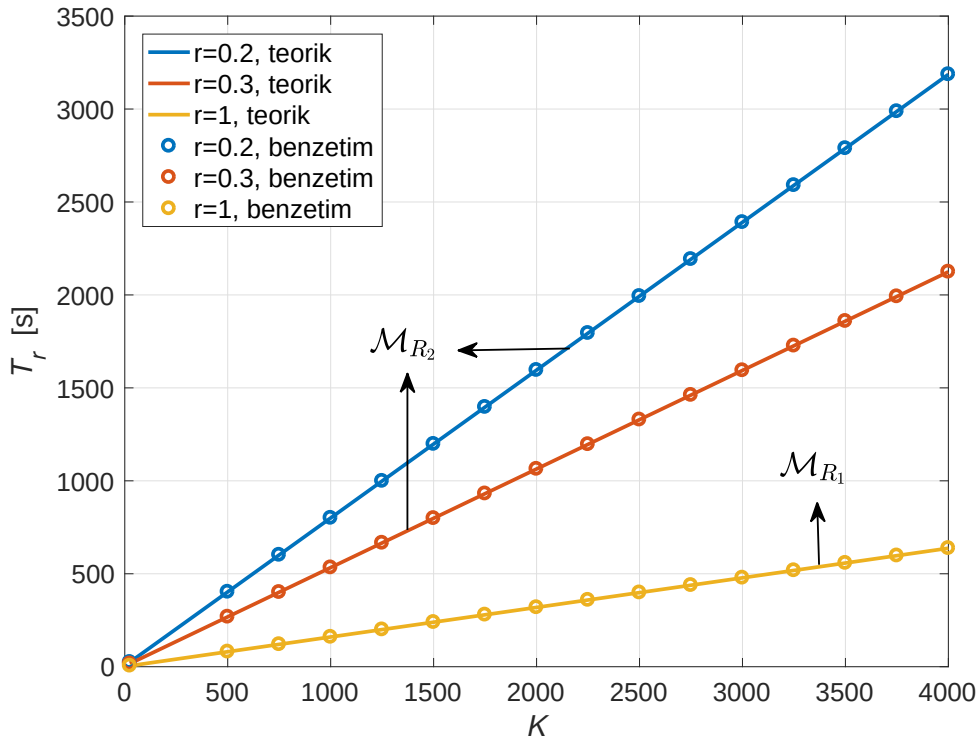
Maksimum depolama kapasitesini tanımlayan pil kapasitesinin değeri, K değerinin seçilmesiyle belirlenir. Her durumun k 'ya göre enerji seviyesi, (2.5) numaralı denklem kullanılarak elde edilir. birinci ve ikinci pil şarj etme modellerine göre, sırasıyla temel ve RF varışına dayalı RFEH modellerinin benzetimini yapmak için, durum geçişleri ve RF varış gerçekleştirmeleri (sadece ikinci pil şarj etme modeli için kullanılır) iki rastgele değişkene atanır. Bu değişkenlerin her yinelemedeki değerlerine bağlı olarak, ileri yöndeki bir duruma, durum geçişi gerçekleştirilir. Bu durum, pilin mevcut enerji seviyesini temsil eder. Şekil 2.10 ve 2.11'de, (2.36) numaralı denklemde ifade edilen değiştirilmiş sigmoid fonksiyonuna dayanarak oluşturulan, FSMC bazlı Markov modellerine göre elde edilen sayısal sonuçlar sunulmuştur. Düz çizgiler, (2.33) numaralı denklem kullanılarak hesaplanan, pil şarj etme süresinin teorik sonuçlarını gösterir. Daire şeklindeki işaretler ise, doğrudan durum geçişlerinin sayılmasıyla ölçülen, pil şarj etme süresinin benzetim sonuçlarını temsil eder. Şekil 2.10'da, pil şarj etme süresinin, farklı K değerleri için artan r değeri ile üstel olarak azaldığı gözlenmektedir, $K = 1000, 3000, 5000$. Şekil 2.11'de, $r = 0.2, 0.3, 1$ için artan K değeri ile pil şarj etme süresinin doğrusal artışı gösterilmektedir. Her iki şekilde, $r = 1$ değeri, minimum pil şarj etme süresinin elde edilmesini sağlayan, birinci pil şarj etme modeline karşılık gelir.

Birinci ve ikinci haberleşme modellerine göre, sırasıyla RF varışına dayalı ve genelleştirilmiş RFEH modellerinin benzetimini yapmak için, etkinlik varış gerçekleştirmeleri de rastgele bir değişkene atanır. Her yinelemede, net enerji hasatlama veya enerji harcamayı temsil eden, sırasıyla ileri veya geri yönde durum geçişleri gerçekleştirilir. Şekil 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 ve 2.16'da, birinci ve ikinci haberleşme modelleri için değiştirilmiş sigmoid fonksiyona göre elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Şekil 2.12, 2.13, 2.15 ve 2.16'da, düz çizgiler, özdeş ayırmayla elde edilen π_k değerlerine göre, (2.35) numaralı denklemle teorik olarak hesaplanan etkinlik kaybı olasılığını gösterir. Daire şeklindeki işaretler ise, ayrık zaman benzetimlerindeki etkinlik kayıpların sayılmasıyla elde edilen etkinlik kaybı olasılığını gösterir. Tüm benzetimler için 10^7 yinelemenin ortalaması alınmıştır.

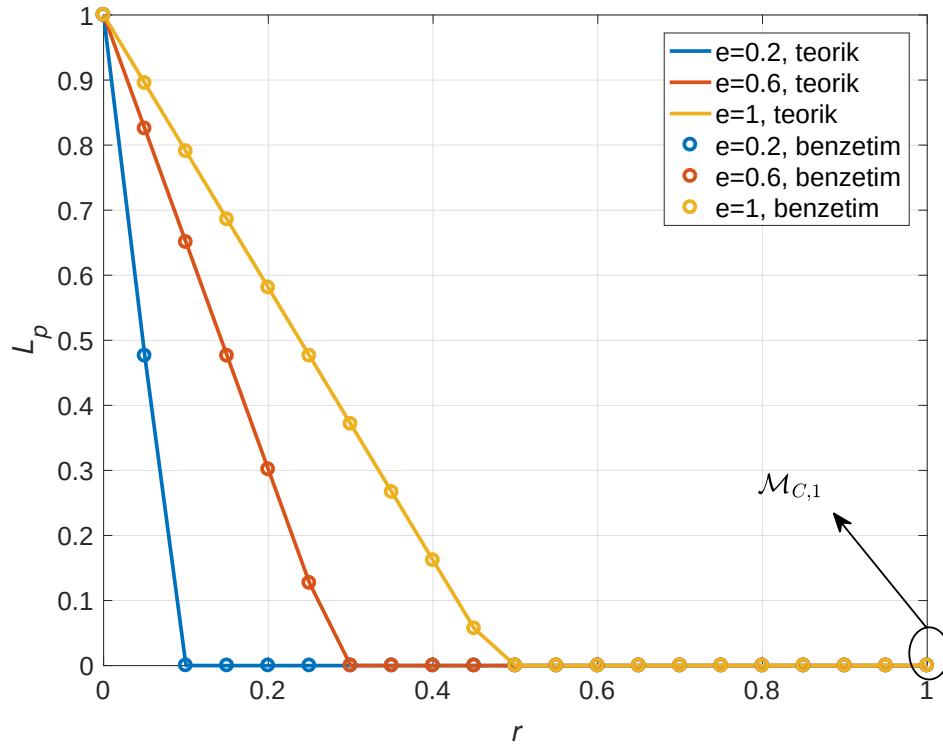
Şekil 2.12'de, RF varış olasılığına karşı etkinlik kaybı olasılığı gösterilmiştir. Benzetimler ve sayısal hesaplamalar $e = 0.2, 0.6, 1$ ve $m = 3$ değerleri için yapılmıştır. Bir etkinlik meydana geldiğinde, RFEH düğümü $3 \times E_1$ tutarında bir enerji miktarına



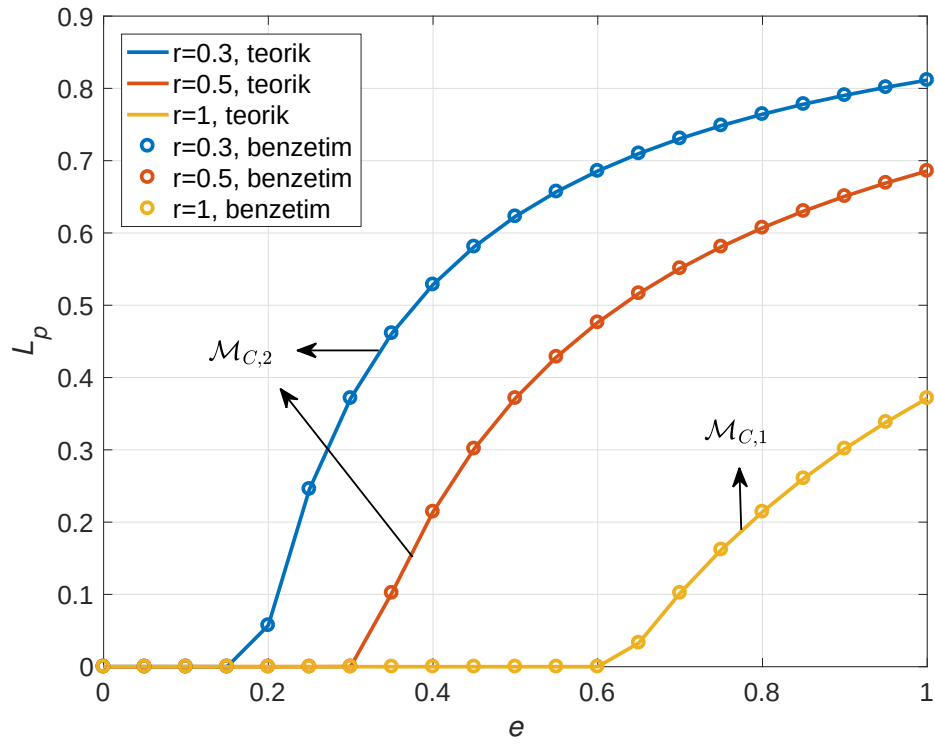
Şekil 2.10 : RF varış olasılığına göre pil şarj etme zamanının değişimi, $K = 1000, 3000, 5000$.



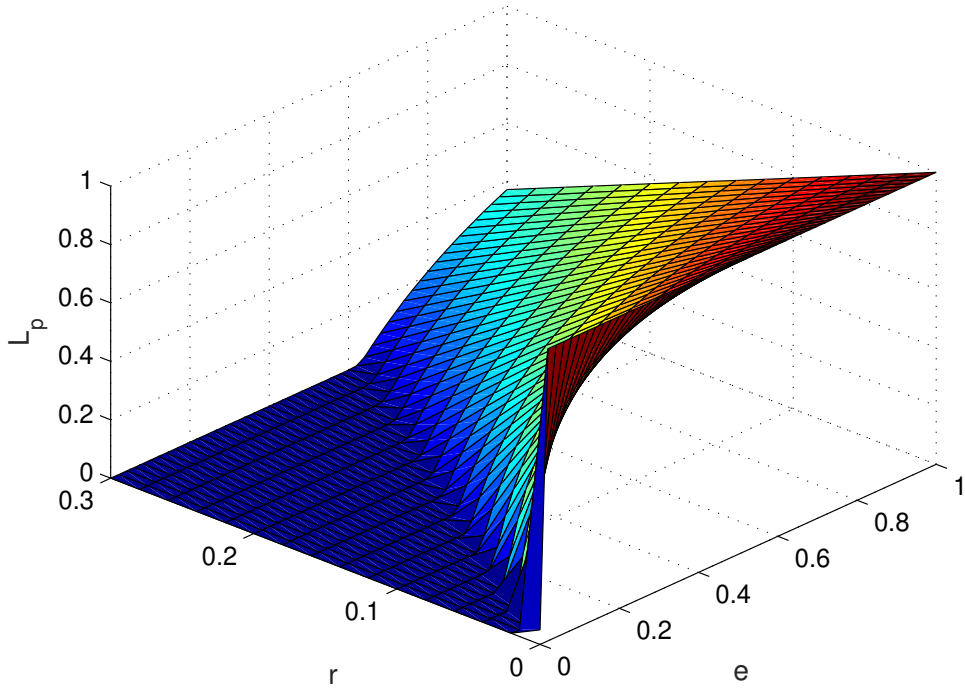
Şekil 2.11 : Durum indisinin maksimum değerine göre pil şarj etme zamanının değişimi, $r = 0.2, 0.3, 1$.



Şekil 2.12 : RF varış olasılığına göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi, $e = 0.2, 0.6, 1, m = 3, K = 1000$.

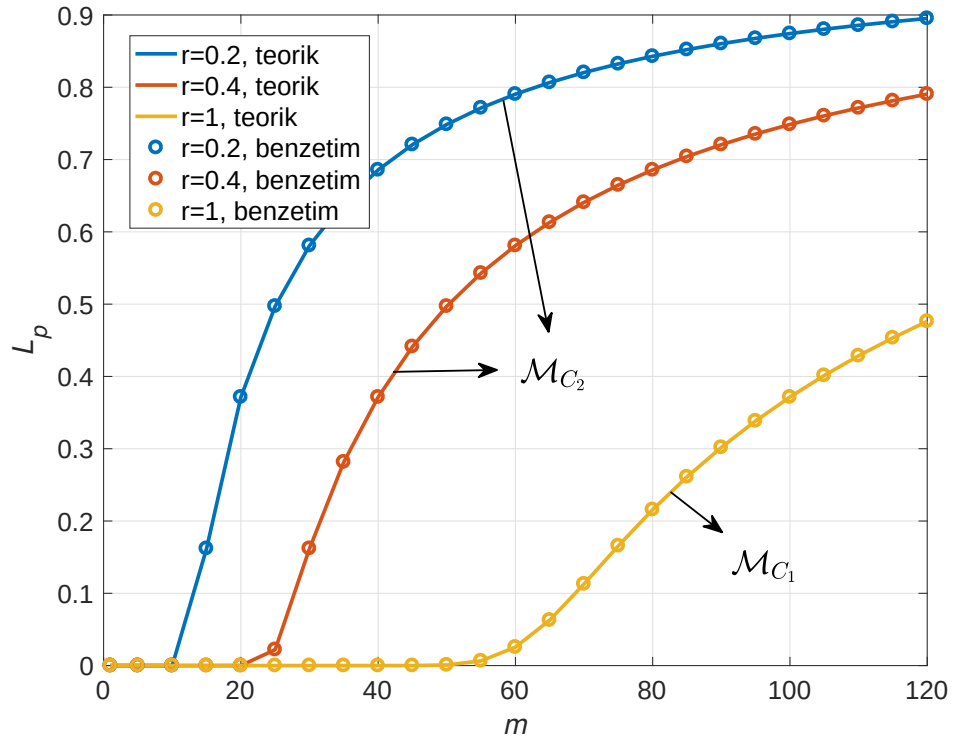


Şekil 2.13 : Etkinlik varış olasılığına göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi, $r = 0.3, 0.5, 1, m = 10, K = 1000$.

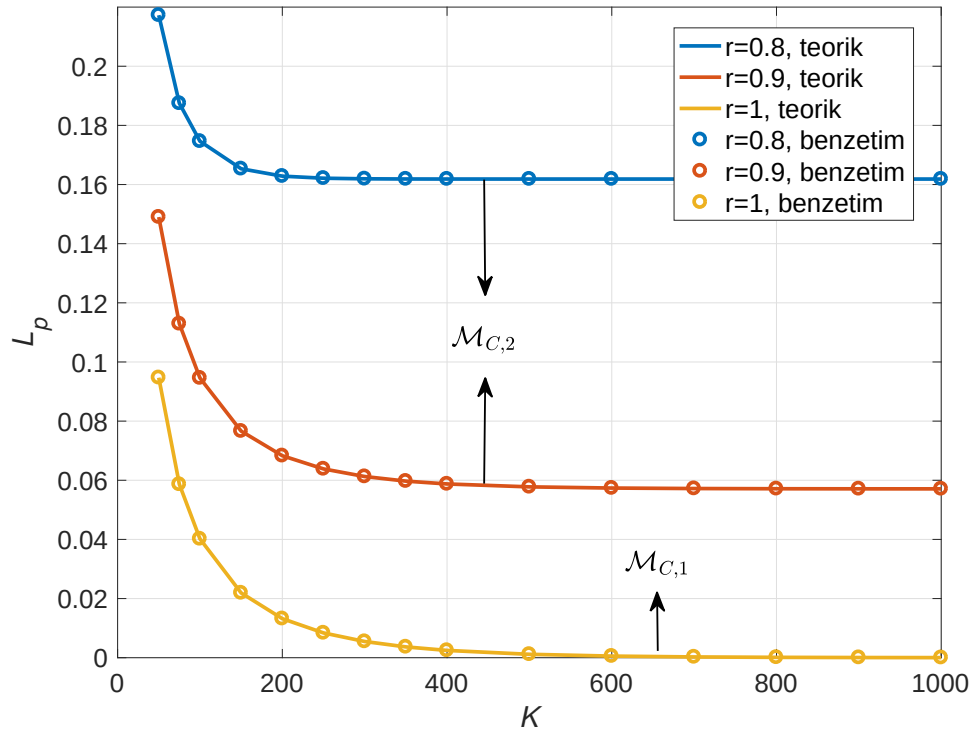


Şekil 2.14 : RF varış olasılığı ve etkinlik varış olasılığına göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi.

ihtiyaç duymaktadır. Modelde toplam 1001 durum vardır, yani $K = 1000$ olarak alınmıştır. RF işaretlerinin daha sık gelişine işaret eden r değerindeki artış, tüm durumlarda etkinlik kaybı olasılığını doğrusal olarak azaltır. Belirli bir r değerinden sonra etkinlik kaybı olasılığı sıfır olur, yani herhangi bir etkinlik kaybı gözlenmez. Şekil 2.13'te, $r = 0, 3, 0, 5, 1$ için etkinlik varış olasılığına karşı etkinlik kaybı olasılığı gösterilmiştir. Burada $m = 10$ olarak, K değeri ise Şekil 2.12'deki gibi kullanılmıştır. Etkinlik kaybı olasılığı, belirli bir e değerine kadar sıfırdır, ancak bu değer ötesinde logaritmik olarak artmaktadır. Şekil 2.14'te, RF varış olasılığına ve etkinlik varış olasılığına karşı etkinlik kaybı olasılığının üç boyutlu çizimi yapılmıştır. Böylece, bu parametrelerin etkinlik kaybı olasılığı üzerindeki etkileri birleşik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.15'te, $r = 0.2, 0.4, 1$, $e = 0.5$ ve $K = 1000$ değerleri için enerji harcama parametresine karşı etkinlik kaybı olasılığı çizilmiştir. Etkinlik kaybı olasılığı belirli bir m değerine kadar sıfırdır, sonrasında ise azalan bir eğimle logaritmik olarak artmaktadır. Şekil 2.16'da, durum indisinin maksimum değerine karşı etkinlik kaybı olasılığı çizilmiştir. Parametreler, $r = 0, 8, 0, 9, 1$, $e = 0, 1$ ve $m = 12$ olarak belirlenmiştir. Burada etkinlik kaybı olasılığı, artan K değeri ile üstel olarak azalmakta ve belli bir K değerinden sonra sabit kalmaktadır. Bu şekillerde, $r = 1$ değeri, birinci



Şekil 2.15 : Enerji harcama parametresine göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi, $r = 0.2, 0.4, 1, e = 0.1, K = 1000$.



Şekil 2.16 : Durum indisinin maksimum değerine göre etkinlik kaybı olasılığının değişimi, $r = 0.8, 0.9, 1, e = 0.5, m = 12$.

haberleşme modeline karşılık gelir ve burada etkinlik kaybı olasılığının minimum değeri elde edilir.

Tüm şekillerde gösterildiği gibi, sistem performansı r , e , m ve K parametreleriyle önemli ölçüde değişmektedir. Bu parametrelerin her biri, uygulama gereksinimlerine göre tasarlanabilir ve önerilen FSMC tabanlı Markov modeli kullanılarak sistem performansı belirlenebilir. Benzetim sonuçlarının da (2.33) ve (2.35) numaralı denklemler kullanılarak elde edilen teorik sonuçları doğruladığı belirtilmelidir.

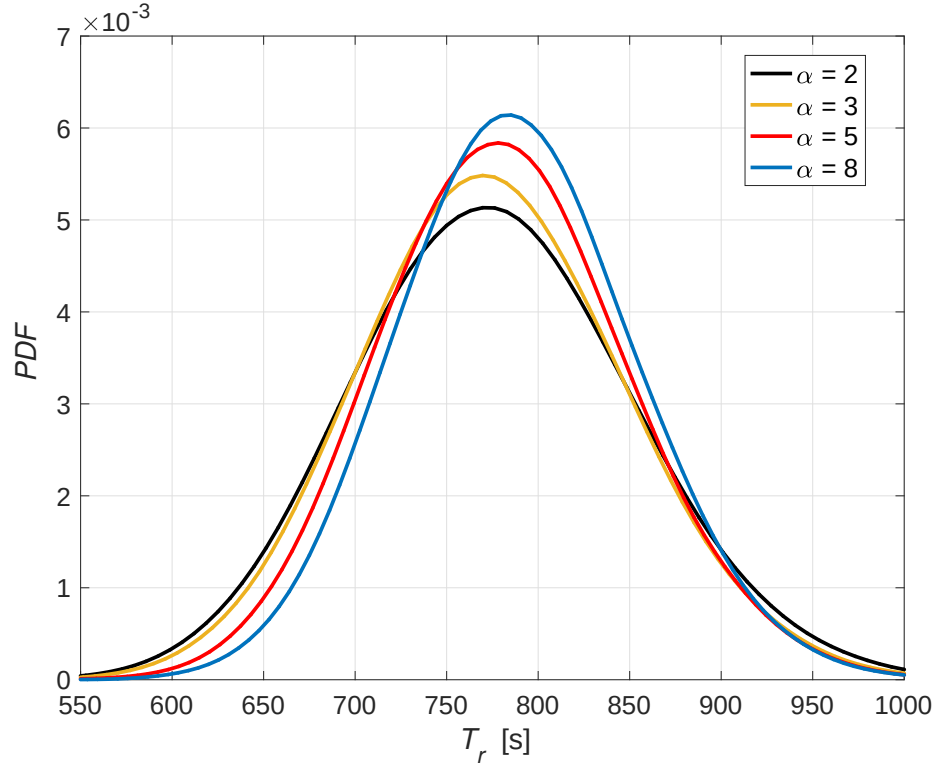
Rayleigh sönümlenme kanalına ek olarak, Nakagami sönümlenme kanalları gibi daha yaygın sönümlenme senaryoları için yeni modeller türetilebilir. Nakagami sönümlenme kanalının varlığında, P_r parametresi aşağıdaki gibi Gamma dağılımlı olur:

$$f_{P_r}(P_r) = \frac{\alpha^\alpha P_r^{\alpha-1}}{\rho^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{\alpha P_r}{\rho}\right), \quad \alpha \geq \frac{1}{2}, P_r \geq 0. \quad (2.40)$$

Burada $\Gamma(\cdot)$, Gama fonksiyonunu, ρ , P_r 'nin ortalamasını, α ise, sönümlenme etkisini gösteren sönümlenme parametresini ifade eder. (2.36), (2.37) ve (2.40) numaralı denklemler (2.2) numaralı denklemde yerine konularak

$$f_H(y) = \frac{L\alpha^\alpha \exp\left(-\frac{\alpha b}{\rho}\right) (1-\Omega)^{\frac{\alpha}{\rho c}} (L-y)^{\frac{\alpha}{\rho c}-1}}{\rho^\alpha c \Gamma(\alpha) ((1-\Omega)y + L\Omega)^{\frac{\alpha}{\rho c}+1}} \times \left(-\frac{1}{a} \log\left(\frac{(1-\Omega)(L-y)}{(1-\Omega)y + L\Omega}\right) + b\right)^{\alpha-1}, y \geq 0 \quad (2.41)$$

ifadesi elde edilir. Rayleigh sönümlenme kanalına benzer şekilde, önerilen metodolojiyi uygulayarak ilgili FSMC tabanlı Markov modeli elde edilir. Kanal modelinin pil şarj etme süresi üzerindeki etkisini göstermek için benzetim çalışmaları yapılabilir. Şekil 2.17'de, α parametresinin farklı değerleri için pil şarj etme sürelerinin PDF'leri ($f_{T_r}(T_r)$) sunulmuştur. α değerindeki değişim, pil şarj etme süresinin dağılımını değiştirmektedir. Bu nedenle, sistem performansı kablosuz kanalın özelliklerinden doğrudan etkilenmektedir.



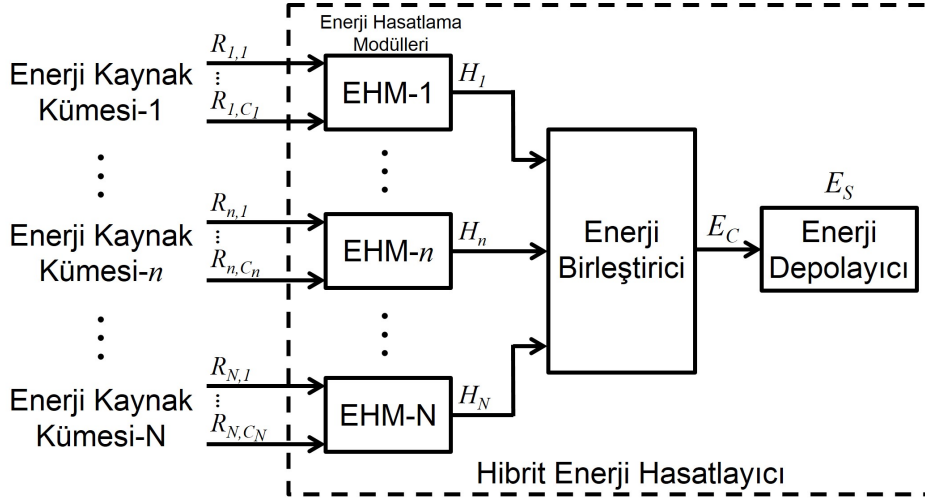
Şekil 2.17 : Sönümleme parametresinin farklı değerleri için pil şarj etme zamanının PDF'leri, $\alpha = 2, 3, 5, 8$.

2.8 Çıkarımlar

Kablosuz haberleşme cihazları, sürdürülebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyar. RFEH, düşük güçlü kablosuz düğümler için alternatif bir enerji çözümüdür. Bu bağlamda, RFEH sistemleri ile donatılmış kablosuz iletişim düğümlerinin tasarımı önemli bir konudur. RF işaretleri kablosuz kanallar üzerinden iletildiğinden, RFEH sistemlerinin tasarımında kablosuz kanalların dağılımlarının dikkate alınması gerekir. Burada, önce, sınırlı kapasitedeki şarj edilebilir pile sahip bir RFEH düğümü dikkate alınarak, hasatlanan enerjinin değer aralığı çok sayıda küçük aralıklara bölünmüştür. Her bölüm, belirli bir kablosuz kanalın FSMC modelinde bir durum tarafından temsil edilmektedir. Daha sonra, RFEH düğümünün pili için, her bir durumun bir pil enerji seviyesini ifade ettiği bir sonlu durumlu Markov modeli oluşturulmuştur. FSMC modelinin durum dağılımları, RFEH düğümünün Markov modelindeki durum geçiş olasılıklarını tanımlamak için kullanılmıştır. Sonunda, temel RFEH modeli olarak adlandırılan bir RFEH düğümünün FSMC tabanlı Markov modeli oluşturulmuştur. Temel RFEH modeli, Poisson süreçleriyle tanımlanan, RFEH düğümüne RF varışını ve

etkinlik varışını ifade eden parametreler kullanılarak genişletilmiştir. Önerilen RFEH modelleri, temel performans parametreleri olarak kullanılan pil şarj etme süresini ve etkinlik kaybı olasılığını elde etmek için analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistem parametrelerinin çeşitli kümeleri için RF varış olasılığının, etkinlik varış olasılığının, enerji harcama miktarının ve pil kapasitesinin etkileri dikkate alınarak, benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır. Önerilen metodoloji ve türetilmiş analitik ifadeler ile istenilen performansa sahip RFEH haberleşme sistemlerini tasarlamamanın mümkün olduğu gösterilmiştir.





Şekil 3.2 : Çoklu enerji kaynakları tabanlı hibrit enerji hasatlama sistem modeli, $n = 1, 2, \dots, N$.

varlığında, pratik uygulamalara uygun olarak hem bağımsız ve hem de korelasyonlu kaynaklar dikkate alınmıştır. Bölüm 3.4'te, Bölüm 3.3'teki türetilmiş ifadelerle dayanarak birleştirilen enerji ve depolanan enerjinin dağılımları ifade edilmiştir. Bölüm 3.5'te, türetilen denklemlerin doğrulandığı sayısal çalışmalar ve sonuçları verilmiştir. Bölüm 3.6'da, çalışmanın sonucu sunulmuştur.

3.2 Sistem Modeli ve Karışım Modeli

Çoklu enerji kaynakları ve enerji hasatlama modülleri (EHM), bir enerji birleştirici ve bir enerji depolayıcı içeren bir HEH sistemi düşünülmüştür. Sistem modeli, kavramsal bir blok diyagram olarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu modelde, RF, ışık, ısı ve titreşim gibi farklı türlerdeki enerji, enerji kaynakları tarafından hibrit enerji hasatlayıcıya aktarılmaktadır. Hibrit enerji hasatlayıcıdaki her bir EHM, ilgili türdeki enerjiyi alır ve onu karşılık gelen enerji biçimine dönüştürür. EHM'lerden gelen tüm enerji girdileri, enerji birleştiricisinde birleştirilir. Enerji birleştiricinin çıkışında elde edilen enerji, sınırlı kapasiteye sahip bir enerji depolayıcıyı yeniden şarj etmek için kullanılır.

Çevrede bulunan enerji kaynakları, yaydığı enerjinin türüne göre, farklı enerji kaynağı kümelerine (ESC) ayrılarak sınıflandırılabilir. Örneğin, radyo vericileri, hücre baz istasyonları, mobil cihazlar ve wi-fi erişim noktaları, RFEH için aynı kümede göz önünde bulundurulur. Diğer yandan, güneş, iç ve dış mekan lambaları ve ışık yayan diyotlar, ışık enerjisi hasatlama için olası enerji kaynakları olarak başka

bir kümede sınıflandırılır. Bu örnekler, farklı enerji kaynakları için farklı kümeler ile genişletilebilir. Sistem modelinde, her biri C_n enerji kaynağından oluşan N adet ESC vardır, $n = 1, 2, \dots, N$. EHM- n enerji hasatlama modülü, RF enerjisi veya ışık enerjisi gibi, bir ESC- n enerji kaynakları kümesinden yayılan enerjiyi hasatlama yeteneğine sahiptir. EHM- n tarafından hasatlanan enerji (H_n), EHM- n 'nin alınan enerjileri ($R_{n,1}, R_{n,2}, \dots, R_{n,C_n}$) ile değişir. Alınan enerji ile hasatlanan enerji seviyeleri arasındaki ilişki, EHM- n 'nin özelliklerine bağlıdır ve bu da genellikle alınan enerjilerin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. EHM- n tarafından hasatlanan enerji, $H_n = g_{h,n}(R_{n,1}, R_{n,2}, \dots, R_{n,C_n})$ olarak ifade edilebilir. Burada $g_{h,n}(\cdot)$, alınan enerjiler ile hasatlanan enerji arasındaki ilişkiyi temsil eden, aynı zamanda EHM- n 'nin verimliliğini de ifade eden, EHM- n 'nin dönüşüm fonksiyonudur. Farklı ESC'lere dayanan hasatlanan enerjinin karakteristik özellikleri, enerji birleştiricisinin çıkışındaki birleştirilen enerjinin (E_C) değerini belirler. Birleştirilen enerji aşağıdaki şekilde ifade edilebilir

$$E_C = g_c(H_1, H_2, \dots, H_N), \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (3.1)$$

Burada $g_c(\cdot)$, enerji birleştiricisinin dönüşüm fonksiyonudur. Bu fonksiyon, seçilen enerji birleştiricisine göre değişir. Enerji depolayıcının şarj etme özellikleri dikkate alındığında, enerji depolayıcıda depolanan enerji, birleştirilen enerji ile belirlenir. Enerji birleştiricinin dönüşüm fonksiyonuna benzer şekilde, hibrit enerji hasatlayıcının her birimindeki enerjinin dönüşüm fonksiyonu devre tasarımına bağlıdır. Enerji birleştirici ve enerji depolayıcı için örnek dönüşüm fonksiyonları ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

Bu çalışmada, hasatlanan enerjiler karışım modelleri kullanılarak modelleneyecektir. Karışım modelleri, birbirinden ayrı olasılıksal yoğunlukların bir birleşimi olarak tanımlanmaktadır [60]. Bir rastgele değişkenin dağılımı, uygun şekilde seçilen bileşen yoğunlukları kullanılarak, bir karışım modeli ile ifade edilebilir. EHM- n 'nin hasatlanan enerjisinin, H_n rastgele değişkeni olarak ve onun fonksiyon değişkeninin ise x_n olarak tanımlanması durumunda, H_n 'nin dağılımının karışım modeli ($f_{H_n}(x_n)$)

$$f_{H_n}(x_n) = \sum_{k_n=1}^{K_n} u_{n,k_n} f_{H_n,k_n}(x_n) \quad (3.2)$$

olarak sınırlı sayıda bileşen yoğunluğu ile yazılabilir. Burada k_n , bileşen yoğunluğu indisini, ($k_n = 1, 2, \dots, K_n$), ve K_n ise bileşen yoğunluklarının sayısını gösterir.

$f_{H_n, k_n}(x_n)$ fonksiyonu ve u_{n, k_n} parametresi, $f_{H_n}(x_n)$ karışım modelinin sırasıyla k_n . bileşenin yoğunluğu ve onun karıştırma ağırlığıdır. u_{n, k_n} parametresinin değerleri pozitifdir, $0 < u_{n, k_n} \leq 1$, ve bu değerlerin toplamı her n değeri için bire eşittir, $\sum_{k_n=1}^{K_n} u_{n, k_n} = 1, \forall n$.

Gauss karışım (GM) modeli, dizi işleme, makine öğrenmesi ve kablosuz kanal modellemesi gibi birçok uygulama alanında kullanılması tercih edilen bir karışım modelidir [61, 62]. GM modeli, Gauss bileşen yoğunluklarının ağırlıklı bir toplamıdır. Rastgele bir değişkenin herhangi bir dağılımı, sınırlı sayıda Gauss bileşen yoğunlukları ile ifade edilebilir. K_n bileşen yoğunluğu için, H_n 'nin PDF'sinin GM modeli ($f_{H_n}(x_n|\theta_n)$) aşağıdaki şekilde belirtilebilir

$$f_{H_n}(x_n|\theta_n) = \sum_{k_n=1}^{K_n} u_{n, k_n} \mathcal{N}(x_n|\mu_{n, k_n}, \sigma_{n, k_n}^2). \quad (3.3)$$

Burada θ_n , H_n için GM modeli parametrelerinin kümesini temsil eder, $\theta_n = \{u_{n, k_n}, \mu_{n, k_n}, \sigma_{n, k_n}^2\}, \forall k_n$. Ayrıca, $\mathcal{N}(x_n|\mu_{n, k_n}, \sigma_{n, k_n}^2)$ ise, μ_{n, k_n} ortalama ve σ_{n, k_n}^2 varyans değerleri ile karışım modelinin k_n . Gauss bileşen yoğunluğunu gösterir ve

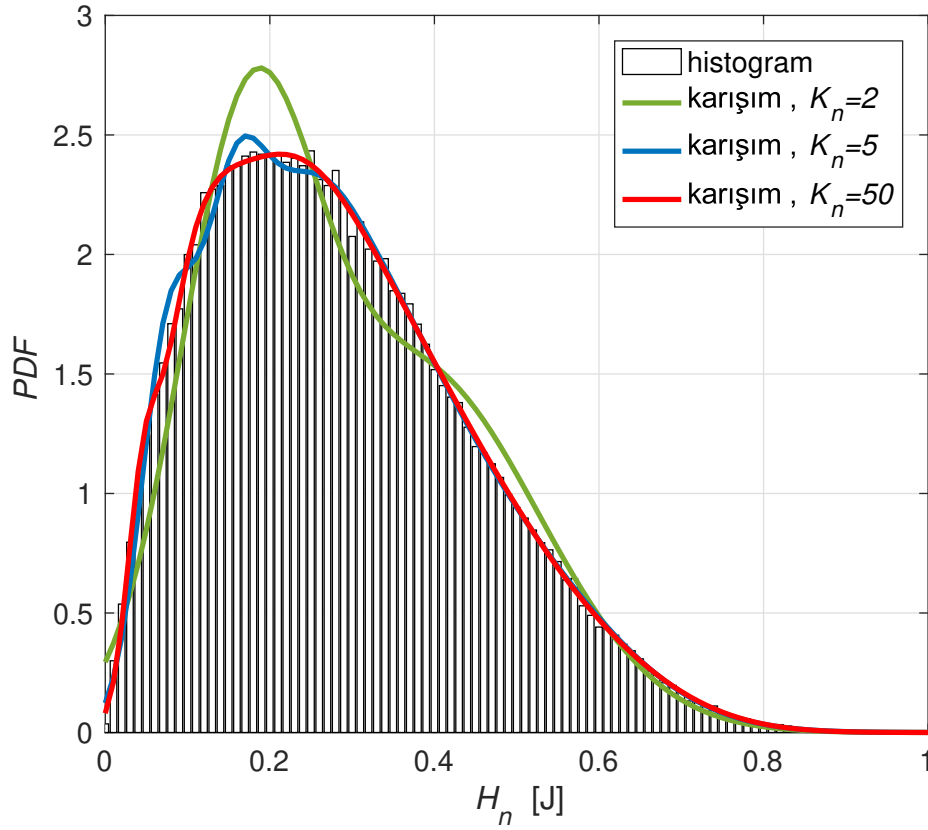
$$\mathcal{N}(x_n|\xi_{n, k_n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{n, k_n}^2}} \exp\left(-\frac{(x_n - \mu_{n, k_n})^2}{2\sigma_{n, k_n}^2}\right) \quad (3.4)$$

olarak ifade edilir. Burada ξ_{n, k_n} , k_n . Gauss bileşen yoğunluğu parametrelerinin kümesidir, $\xi_{n, k_n} = \{\mu_{n, k_n}, \sigma_{n, k_n}^2\}$. Not olarak şunu ifade edebiliriz ki; her bir enerji kaynağı Gauss olmayan bir rastlantısal dağılıma sahip olmasına rağmen, hasatlanan enerji Gauss dağılımlarının bir karışımı olarak modellenenebilir.

Bir GM modeli ile elde edilen dağılım, gerçek dağılıma belli bir sınırlandırılmış hata aralığında yakınsar. Sistem modeli göz önünde bulundurulduğunda, rastgele dağılıma sahip bir hasatlanan enerji için GM modelinin yakınsamasını göstermek mümkündür. T_n gözlem veri örneklerinin varlığında, gerçek PDF ($f_{H_n, \text{act}}$) ve GM modeli ile modellenmiş PDF ($f_{H_n, \text{mix}}$) arasındaki yaklaşık hata sınırı

$$\|f_{H_n, \text{act}} - f_{H_n, \text{mix}}\|_\infty \leq \alpha T_n^{-K_n} \|f_{H_n, \text{act}}\|_{\mathcal{H}(\mathcal{N}, X)} \quad (3.5)$$

olarak yazılabilir [63]. Burada α , $\|\cdot\|$ ve $\mathcal{H}(\cdot)$, sırasıyla bir sabiti, iç çarpımı ve Hilbert uzayını gösterir. Bu eşitsizlik, GM modelinin yüksek oranda yakınsamasını ve $K_n = \infty$ olması durumunda yaklaşık hata sınırının sıfıra yakınsadığını ifade eder.



Şekil 3.3 : $\beta_1 = 2$ ve $\beta_2 = 5$ şekil parametrelerine sahip Beta dağılımı için örnek GM modelleri, $K_n = 2, 5, 50$.

Açıklayıcı bir örnek olarak, hasatlanan enerjiyi $\beta_1 = 2$ ve $\beta_2 = 5$ şekil parametreleri ile birlikte Beta dağılımı ($\text{Beta}(\beta_1, \beta_2)$) olarak düşünelim. $K_n = 2$, $K_n = 5$ ve $K_n = 50$ 'ye karşılık gelen GM modeli yaklaşımları, gerçek histogram ile birlikte Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Açıkça görülebilir ki; (3.5) numaralı eşitsizlik tarafından desteklendiği gibi, K_n arttıkça gerçek dağılıma yeterince yakın yaklaşımlar elde edilebilir. Bir sonraki bölümde, önerilen HEH sistemi analiz edilecektir.

3.3 Olasılıksal Hibrit Enerji Hasatlama Modeli

Çoklu enerji kaynaklarından yayılan enerjinin seviyelerinin rastgele olması nedeniyle, sürdürülebilir bir HEH sistemi tasarlamak pek kolay olmayabilir. Bunun yanında, alınan enerjilerin olasılıksal dağılımlarının, çevre koşullarına sebebiyle, kapalı formda ifadeleri olmayan rastgele dağılımlar olması da muhtemeldir. Alınan enerjilere bağlı olarak, hasatlanan enerjiler de rastgele dağılımlara sahip olurlar ve bunları tek değişkenli modellerle kapalı formda ifade etmek çoğu zaman mümkün değildir. Bu nedenle, bu çalışmada, HEH sistemlerinin olasılıksal modellerinin, rastgele dağılımları

modellemek için esnek bir araç olan karışım modelleri kullanılarak, elde edilmesi önerilmektedir. İlk olarak, enerji birleştiricisinin girdileri olan hasatlanan enerjilerin dağılımları, [12] numaralı referansta güneş panellerinden elde edilen güce uygulandığı gibi, karışım modelleri ile modellenebilir. Daha sonra, birleştirilen enerji ile hasatlanan enerjiler arasındaki ilişki kullanılarak, birleştirilen enerjinin dağılımını elde etmek için hasatlanan enerjilerin dağılımları dönüştürülebilir.

Aşağıda, öncelikle tek bir ESC durumu için GM modeline dayalı olasılıksal modeller araştırılacaktır. Ardından, ESC'lerin bağımsız veya korelasyonlu olabileceği çoklu ESC durumları için araştırma genişletilecektir.

3.3.1 Tek enerji kaynağı kümesi

Bu durumda, enerji kaynaklarının çevresel koşullar sebebiyle sadece RF işaret enerjisi veya sadece ışık enerjisi gibi aynı türde enerji yaydığı bir HEH sisteminde, sadece tek bir küme aktiftir. Tek bir ESC için, (3.3) numaralı denklemdeki GM modeline dayanarak hasatlanan enerjinin PDF'si

$$f_{H_1}(x_1|\theta_1) = \sum_{k_1=1}^{K_1} u_{1,k_1} \mathcal{N}(x_1|\xi_{1,k_1}) \quad (3.6)$$

olarak yazılabilir. Burada GM modeli parametrelerinin indisindeki $n = N = 1$ notasyonu, aktif olan EHM'yi gösterir ve θ_1 parametresi, $\theta_1 = \{u_{1,k_1}, \mu_{1,k_1}, \sigma_{1,k_1}^2\}$ olarak tanımlanır. Şimdi, verilen bir gözlem veri seti için, θ_1 'de bulunan parametreleri tahmin etmek gerekir.

Herhangi bir dağılım için GM modeli parametreleri, maksimum olabilirlik (ML) tahmin yöntemleri ile belirlenebilir. ML tahmininde, gözlem veri örneklerine göre oluşturulan olabilirlik fonksiyonunu maksimize eden parametreler belirlenir. Çözümün karmaşıklığı, doğrudan olabilirlik fonksiyonuna bağlıdır. Birçok uygulamada, analitik bir çözüm bulmak kolay değildir. Bu bağlamda, beklenti-maksimizasyon (EM) algoritması, ML tahmini problemlerinde parametrelerin bulunması için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır [64]. EM algoritması, olabilirlik fonksiyonunu bir maksimizasyon adımını takip eden bir beklenti adımı ile tekrarlamalı olarak maksimize eder. Bizim çalışmamızda, EHM- n 'nin hasatlanan enerjisi için olabilirlik fonksiyonu ($f_{H_n,lf}(\mathbf{x}_n|\theta_n)$), T_n gözlem veri örneği için $f_{H_n,lf}(\mathbf{x}_n|\theta_n) = \prod_{t_n=1}^{T_n} \sum_{k_n=1}^{K_n} u_{n,k_n} \mathcal{N}(x_{n,t_n}|\xi_{n,k_n})$ olarak ifade edilebilir. Burada, $\mathbf{x}_n$ tüm

örnekleri içerir, $\mathbf{x}_n = [x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,T_n}]$. Bu olabilirlik fonksiyonu için, üyelik katsayıları (ϕ_{n,k_n,t_n}) , beklenti adımımda

$$\phi_{n,k_n,t_n} = \frac{u_{n,k_n} \mathcal{N}(x_{n,t_n} | \xi_{n,k_n})}{\sum_{k_n=1}^{K_n} u_{n,k_n} \mathcal{N}(x_{n,t_n} | \xi_{n,k_n})} \quad (3.7)$$

olarak hesaplanır [65]. Üyelik katsayıları, her t_n değeri için $\sum_{k_n=1}^{K_n} \phi_{n,k_n,t_n} = 1$, $\forall t_n$, koşulunu sağlar. Hesaplanan üyelik katsayılarına dayanarak, GM modeli parametrelerinin yeni değerleri $(u_{n,k_n}^{\text{new}}, \mu_{n,k_n}^{\text{new}}, \sigma_{n,k_n}^{2\text{new}})$, maksimizasyon adımımda

$$u_{n,k_n}^{\text{new}} = \frac{T_{n,k_n}}{T_n}, \quad \mu_{n,k_n}^{\text{new}} = \frac{1}{T_{n,k_n}} \sum_{t_n=1}^{T_n} \phi_{n,k_n,t_n} x_{n,t_n}, \quad (3.8)$$

$$\sigma_{n,k_n}^{2\text{new}} = \frac{1}{T_{n,k_n}} \sum_{t_n=1}^{T_n} \phi_{n,k_n,t_n} (x_{n,t_n} - \mu_{n,k_n}^{\text{new}})^2 \quad (3.9)$$

denklemleriyle hesaplanır. Burada, T_{n,k_n} parametresi, $T_{n,k_n} = \sum_{t_n=1}^{T_n} \phi_{n,k_n,t_n}$, $\forall k_n$ olarak ifade edilir. Beklenti ve maksimizasyon adımlarının tekrarlanması ile devam eden EM algoritması, gerekli yakınsamanın sağlanması ile sonlanır.

$n = 1$ için GM modeli parametrelerinin tahmininden sonra, birleştirilen enerjinin PDF'si $(f_{E_C}(y))$

$$f_{E_C}(y) = \sum_{i=1}^I \frac{f_{H_1}(x_{1,i} | \theta_1)}{|dy/dx_1|} \Big|_{x_1=x_{1,i}} \quad (3.10)$$

ile hesaplanabilir. Burada $x_{1,i}$, $g_c(\cdot)$ fonksiyonunun tersine göre y cinsinden x_1 'in i . çözümünü gösterir. Örnek olarak, (3.1) denkleminde dayanan birleştirilen enerji, hasatlanan enerjinin bir oranı olarak verilebilir, $E_C = c_1 H_1$. Burada c_1 , aktif EHM'nin hasatlanan enerjisi için birleştirme ağırlığını gösterir, $0 \leq c_1 \leq 1$. Bazı matematiksel işlemlerden sonra birleştirilen enerji için

$$f_{E_C}(y) = \sum_{k_1=1}^{K_1} \frac{u_{1,k_1}}{c_1 \sqrt{2\pi\sigma_{1,k_1}^2}} \exp\left(-\frac{(y/c_1 - \mu_{1,k_1})^2}{2\sigma_{1,k_1}^2}\right) \quad (3.11)$$

ifadesi elde edilir. Birleştirilen enerjinin hasatlanan enerjiye yaklaşık olarak eşit olması veya $E_C = H_1$ olmasının, ideal bir hibrit enerji hasatlayıcı tasarımını gösterdiğini belirtmek gerekir.

3.3.2 Çoklu enerji kaynağı kümeleri

Bu durumda, bir hibrit enerji hasatlayıcı, enerji hasatlamak için çevresindeki farklı enerji kümelerinin enerji kaynaklarını kullanır. N adet ESC için, GM modeline dayanan hasatlanan enerjilerin ortak PDF'si ($f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta)$)

$$f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta) = f_{H_1, \dots, H_N}(x_1, \dots, x_N | \theta_1, \dots, \theta_N) \quad (3.12)$$

olarak ifade edilir. Burada $\mathbf{H}$ ve $\mathbf{x}$, sırasıyla $\mathbf{H} = (H_1, \dots, H_N)$ ve $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$ olarak tanımlanır. Θ ise, θ_n kümelerinin birleşimini gösterir, $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_N\}$.

3.3.2.1 Bağımsız kümeler

Hasatlanan enerjilerin ortak PDF'sini elde etmek için, önce bağımsız hasatlanan enerjiler durumu, sonra korelasyonlu hasatlanan enerjiler durumu ele alınacak ve daha sonra ise her iki durumu da içerecek şekilde genelleştirilecektir. Bağımsız hasatlanan enerjiler durumu, bir kümedeki her bir enerji kaynağının diğer kümelerdeki tüm enerji kaynaklarından bağımsız olduğu anlamına gelir. (3.3) numaralı denklemdeki GM modeline dayanarak bağımsız hasatlanan enerjilerin ortak PDF'si, hasatlanan enerjilerin marjinal PDF'lerinin çarpımı olarak elde edilir, $f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta) = f_{H_1}(x_1|\theta_1) \times \dots \times f_{H_N}(x_N|\theta_N)$. Burada, N adet EHM vardır, $n = 1, 2, \dots, N$, ve bu modüllerin çıkışındaki her bir hasatlanan enerji farklı parametre değerlerine sahip olabilir. Tüm n değerleri için GM modeli parametrelerinin tahmini, (3.8) ve (3.9) numaralı denklemleri içeren EM algoritması aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bu parametreleri kullanarak, $f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta)$ dağılımı

$$f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta) = \prod_{n=1}^N \sum_{k_n=1}^{K_n} \frac{u_{n,k_n}}{\sqrt{2\pi\sigma_{n,k_n}^2}} \exp\left(-\frac{(x_n - \mu_{n,k_n})^2}{2\sigma_{n,k_n}^2}\right) \quad (3.13)$$

olarak ifade edilebilir. Bu ifadedeki çarpma gerçekleştirildiğinde, $f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta)$ dağılımını, ortak Gauss dağılımlarının ağırlıklı toplamı olarak ifade etmek mümkün olacaktır. İki bağımsız ESC durumu göz önünde bulundurulduğunda, herhangi iki ağırlıklı bileşen yoğunluğunun ortak PDF'si

$$f_{B,\text{ind}}(x_1, x_2 | u_{1,k_1}, u_{2,k_2}, \mu_{1,k_1}, \mu_{2,k_2}, \sigma_{1,k_1}^2, \sigma_{2,k_2}^2) = \frac{u_{1,k_1} u_{2,k_2}}{2\pi\sigma_{1,k_1}\sigma_{2,k_2}} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_{1,k_1})^2}{2\sigma_{1,k_1}^2} - \frac{(x_2 - \mu_{2,k_2})^2}{2\sigma_{2,k_2}^2}\right) \quad (3.14)$$

olarak yazılabilir. Burada $f_{B,\text{ind}}(\cdot)$, H_1 ve H_2 bağımsız hasatlanan enerjilerinin, sırasıyla k_1 ve k_2 bileşen yoğunluklarına bağlıdır. u_{1,k_1} , u_{2,k_2} , μ_{1,k_1} , μ_{2,k_2} , σ_{1,k_1}^2 ve

σ_{2,k_2}^2 ise, iki EHM'nin ilgili parametreleridir. Bu durum için, bileşen yoğunluklarının $K_1 K_2$ ikili kombinasyonları vardır. Sistem modelinde, N adet EHM ve her bir hasatlanan enerjinin K_n adet bileşen yoğunluğu bulunduğundan, EHM'lerin bileşen yoğunluklarının tüm kombinasyonları için ortak yoğunluklar elde edilebilir. Bu ortak yoğunluklar, burada bileşen ortak yoğunluğu olarak isimlendirilmiştir. Hasatlanan enerjileri tanımlayan olası bileşen ortak yoğunluklarının toplam sayısı $J = \prod_{n=1}^N K_n$ olarak hesaplanabilir. Burada K_n değerleri, N adet hasatlanan enerji için bileşen yoğunluklarının sayılarını temsil ederler. (3.14) numaralı eşitlikte olduğu gibi ağırlıklı bileşen yoğunluklarının her bir bileşen ortak yoğunluğu, bir indis parametresi (j) ile indislenirse, $j = 1, 2, \dots, J$, bağımsız hasatlanan enerjilerin $f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta)$ dağılımı

$$f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta) = \sum_{j=1}^J f_{B,\text{ind},j}(\mathbf{x}|\Theta_j) \quad (3.15)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $f_{B,\text{ind},j}(\mathbf{x}|\Theta_j)$, bağımsız hasatlanan enerjiler durumu için j . bileşen ortak yoğunluğudur, $f_{B,\text{ind},j}(\mathbf{x}|\Theta_j) = \prod_{n=1}^N \frac{u_{n,k_n}}{\sqrt{2\pi\sigma_{n,k_n}^2}} \exp\left(-\frac{(x_n - \mu_{n,k_n})^2}{2\sigma_{n,k_n}^2}\right)$. Indis parametresi j , bileşen yoğunlukların sayısı kadar parametreyi içeren bir kümeyi temsil eder, $j \sim \{k_1, k_2, \dots, k_N\}$, $\forall k_n \in \{1, 2, \dots, K_N\}$. GM modelinin j . parametre kümesi, karıştırma ağırlığı, ortalama ve varyansların vektörleri olan sırasıyla $\mathbf{u}_j$, $\mathbf{m}_j$ ve $\mathbf{s}_j^2$ parametrelerini içerir, $\Theta_j = \{\mathbf{u}_j, \mathbf{m}_j, \mathbf{s}_j^2\}$. Her bir vektörün N elemanı vardır, $\mathbf{u}_j$, $\mathbf{m}_j$, $\mathbf{s}_j^2 \in \mathbb{R}^2$. Burada $\mathbf{x}$ ise, tüm hasatlanan enerjilerin fonksiyon değişkenlerini içeren bir vektördür. Bu modelde, bu parametreler aşağıdaki şekilde tanımlanır

$$\mathbf{u}_j = (u_{1,k_1}, \dots, u_{N,k_N}), \mathbf{m}_j = (\mu_{1,k_1}, \dots, \mu_{N,k_N}), \quad (3.16)$$

$$\mathbf{s}_j^2 = (\sigma_{1,k_1}^2, \dots, \sigma_{N,k_N}^2), \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N). \quad (3.17)$$

3.3.2.2 Korelasyonlu kümeler

Önceki bölümde, bağımsız hasatlanan enerjilerin ortak PDF'si üzerine odaklanılmıştır. Bununla birlikte, hasatlanan bir enerji, pratik uygulamalarda karşılaşılabilecek olan, ESC'ler arasındaki korelasyon nedeniyle diğer bir hasatlanan enerjiyle korelasyonlu olabilir.

Örneğin, sıcaklık ile güneş ışığının şiddeti arasında pozitif bir korelasyon vardır, bu da güneş ve termal enerji üretimleri arasında bir korelasyona neden olur [66]. Çıkışları korelasyonlu olan iki EHM göz önünde bulundurulduğunda, k_1 ve k_2 bileşen yoğunluklarının korelasyon katsayısı, $\rho_{k_1,k_2} = \frac{\text{cov}(k_1,k_2)}{\sigma_{1,k_1}\sigma_{2,k_2}}$ olarak ifade edilebilir. Burada

$\text{cov}(k_1, k_2)$, k_1 ve k_2 bileşen yoğunluklarına göre rastgele değişkenlerin kovaryansdır. Korelasyonun etkisi eklendiğinde, ağırlıklı bileşen yoğunluklarının bileşen ortak yoğunluğu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir

$$f_{B,\text{cor}}(x_1, x_2 | w_{1,k_1}, w_{2,k_2}, \mu_{1,k_1}, \mu_{2,k_2}, \sigma_{1,k_1}^2, \sigma_{2,k_2}^2) = \frac{u_{1,k_1} u_{2,k_2}}{2\pi \sigma_{1,k_1} \sigma_{2,k_2} \sqrt{1 - \rho_{k_1,k_2}^2}} \exp \left(\frac{-1}{1 - \rho_{k_1,k_2}^2} \left(\frac{(x_1 - \mu_{1,k_1})^2}{2\sigma_{1,k_1}^2} - \frac{\rho_{k_1,k_2}(x_1 - \mu_{1,k_1})(x_2 - \mu_{2,k_2})}{\sigma_{1,k_1} \sigma_{2,k_2}} + \frac{(x_2 - \mu_{2,k_2})^2}{2\sigma_{2,k_2}^2} \right) \right) \quad (3.18)$$

Bağımsız duruma benzer şekilde, korelasyonlu durumun her bir kombinasyonunu bir indis numarasına atayarak, korelasyonlu hasatlanan enerjilerin ortak PDF'si

$$f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x} | \Theta) = \sum_{j=1}^J f_{B,\text{cor},j}(\mathbf{x} | \Theta_j) \quad (3.19)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $f_{B,\text{cor},j}(\mathbf{x} | \Theta_j)$, j . korelasyonlu durum için bileşen ortak yoğunluğunu gösterir. Diğer yandan, hem bağımsız hem de korelasyonlu durumları içeren genel formda, GM modeline dayanan hasatlanan enerjilerin ortak PDF'si

$$f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x} | \Theta) = \sum_{j=1}^J \frac{\mathbf{u}_j}{(2\pi)^{N/2} |\Sigma_j|^{1/2}} \exp \left(-\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{m}_j)^T \Sigma_j^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m}_j)}{2} \right) \quad (3.20)$$

olarak yazılabilir. Burada Σ_j , j . bileşen ortak yoğunluğu için kovaryans matrisini gösterir, $\Sigma_j \in \mathbb{R}^{N \times N}$. $|\Sigma_j|$ parametresi, Σ_j matrisinin determinantıdır. $(\cdot)^T$ ise, ilgili vektörün transpozunu ifade eder.

3.4 Birleştirilen ve Depolanan Enerji

Birleştirilen enerji, (3.1) numaralı denklemde belirtildiği gibi, hasatlanan enerjilerin bir fonksiyonu olduğundan, birleştirilen enerjinin birikimli dağılım fonksiyonu ($F_{EC}(y)$), $\mathcal{S}$ kümesi üzerinden integral alınarak, $F_{EC}(y) = \int \dots \int_{\mathbf{x} \in \mathcal{S}} f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x} | \Theta) d\mathbf{x}$, elde edilir. Burada $\mathcal{S}$ kümesi, $E_C = g_c(\mathbf{H}) \leq y$ koşulunu sağlayan $\mathbf{x}$ değerlerinden oluşur. Bu denklemin türevi alınarak, birleşik enerjinin PDF'si ($f_{EC}(y)$) aşağıdaki gibi yazılabilir

$$f_{EC}(y) = \int \dots \int_0^\infty \sum_{i=1}^I \frac{f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x} | \Theta)}{|dy/dx_1|} \Big|_{x_1=x_{1,i}} d\bar{\mathbf{x}}. \quad (3.21)$$

Burada $\bar{\mathbf{x}}$ vektörü, $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x} \setminus x_1$ olarak tanımlanır, yani x_1 değişkeni $\bar{\mathbf{x}}$ vektörünün bir elemanı değildir. $x_{1,i}$ 'lerin her biri, y , x_2 , $\dots$, x_{N-1} ve x_N değişkenlerinin bir fonksiyonudur. İntegrallerin limitleri, hasatlanan enerjilerin değerleri negatif

olmadığından, 0 ve ∞ olarak alınır, yani $H_n \geq 0, \forall n$. Enerji birleştirici, hasatlanan enerjileri farklı oranlarda birleştirebilir. Bu durumda, birleştirilen enerji, ağırlıklı hasatlanan enerjilerin toplamı haline gelir, $E_C = c_1 H_1 + c_2 H_2 + \dots + c_N H_N$. Burada c_n , hasatlanan enerji H_n 'nin birleştirme ağırlığını belirtir ve $0 \leq c_n \leq 1$ koşulunu sağlar, $n = 1, 2, \dots, N$. İdeal şartlarda hasatlanan enerjilerin doğrusal kombinasyonuna bağlı olarak, maksimum birleştirilen enerji ($E_{C,max}$), $E_{C,max} = \sum_{n=1}^N H_n$ olarak ifade edilebilir. Genellik kaybı olmadan, birleştirilen enerji maksimum birleştirilen enerjiye eşit olarak alınabilir, $E_C = E_{C,max}$. Bağımsız/korelasyonlu hasatlanan enerjiler H_1 ve H_2 'nin ağırlıklı bileşen yoğunlukları k_1 ve k_2 için, $y = x_1 + x_2$ 'yi kullanarak ve (3.18)'deki ifadeyi (3.21) denkleminde yerine koyarak, birleştirilen enerjinin bileşen yoğunluğu ($f_C(y)$)

$$f_C(y) = \frac{u_{1,k_1} u_{2,k_2}}{\sqrt{2\pi(\sigma_{1,k_1}^2 + 2\rho_{k_1,k_2} \sigma_{1,k_1} \sigma_{2,k_2} + \sigma_{2,k_2}^2)}} \times \exp\left(-\frac{(y - (\mu_{1,k_1} + \mu_{2,k_2}))^2}{2(\sigma_{1,k_1}^2 + 2\rho_{k_1,k_2} \sigma_{1,k_1} \sigma_{2,k_2} + \sigma_{2,k_2}^2)}\right) \quad (3.22)$$

olarak elde edilir. Bu ifadenin karıştırma ağırlığı, ortalama ve varyans parametreleri, sırasıyla $u_y = u_{1,k_1} u_{2,k_2}$, $\mu_y = \mu_{1,k_1} + \mu_{2,k_2}$, ve $\sigma_y^2 = \sigma_{1,k_1}^2 + 2\rho_{k_1,k_2} \sigma_{1,k_1} \sigma_{2,k_2} + \sigma_{2,k_2}^2$ olarak tanımlanabilir. (3.15) ve (3.19) numaralı denklemler için uygulanan prosedürün aynısı kullanılarak, N adet EHM için birleştirilen enerjinin PDF'si

$$f_{E_C}(y) = \sum_{j=1}^J f_{C,j}(y|u_{y,j}, \mu_{y,j}, \sigma_{y,j}^2) \quad (3.23)$$

olarak elde edilir. Burada $f_{C,j}(y|u_{y,j}, \mu_{y,j}, \sigma_{y,j}^2)$, $f_{E_C}(y)$ 'nin j . bileşen yoğunluğunu ifade eder. $u_{y,j}$, $\mu_{y,j}$ ve $\sigma_{y,j}^2$ parametreleri, N hasatlanan enerji için sırasıyla u_y , μ_y ve σ_y^2 'nin ilgili değerlerini temsil ederler. Her bir parametreyi oluşturan elemanlar, (3.16) ve (3.17) numaralı denklemlerdeki gibi tanımlanabilirler. Burada, (3.23) numaralı denklemin de Gauss dağılımlarının bir toplamı olduğu görülmektedir.

Sistem modeline göre, birleştirilen enerji, şarj edilebilir pil gibi bir enerji depolayıcıya depolanır. Enerjinin olasılıksal yapısından dolayı, enerji hasatlama sistemindeki pil, geleneksel sistemlerdeki pillerin sabit bir güç ile şarj edilmesinin tersine, değişken bir güç ile şarj edilir. Bu durum, şarj etme gücünün seviyesine bağlı olarak, şarj etme işlemi sırasında enerji kaybına neden olur. Bu nedenle, şarj etme işlemi sırasındaki verimlilik, şarj etme gücündeki değişimle azalır. Bu bağlamda, enerji depolayıcıda

depolanan enerji (E_S), $E_S = \eta(E_C)E_C = g_s(E_C)$ olarak ifade edilir. Burada $\eta(E_C)$, şarj etme verimliliğini gösterir, $g_s(\cdot)$ ise enerji depolayıcının dönüşüm fonksiyonudur. Enerji depolayıcı olarak kullanılan şarj edilebilir bir pilin enerji kaybı, pilin eşdeğer devre modelinde kullanılan dahili seri direnç ile hesaba katılır [67]. Bu modele dayanarak, depolanan enerji şu şekilde yazılabilir:

$$E_S = \frac{3}{2}E_C - \frac{1}{2}E_C \sqrt{1 + \frac{4R_p E_C}{V_o^2}}. \quad (3.24)$$

Burada, V_o açık devre gerilimi, R_p ise dahili direnç olarak tanımlanır. Birleştirilen enerji, $[0, 2V_o^2/R_p]$ aralığında değişir. Depolanan enerjinin PDF'si ($f_{E_S}(z)$), $f_{E_S}(z) = \sum_t \left. \frac{f_{E_C}(y)}{|dz/dy|} \right|_{y=y_t}$ ifadesi ile hesaplanabilir. Burada y_t , $g_s(\cdot)$ fonksiyonunun tersine göre z cinsinden y 'nin t . çözümünü gösterir, $y_t = g_s^{-1}(z)$. (3.24) numaralı denklemde y ve z değişkenleri ile yapılan bazı cebirsel işlemlerden sonra, $\frac{R_p}{V_o^2}y^3 - 2y^2 + 3zy - z^2 = 0$ kübik denklemi elde edilir. Bu denkleme bir çözüm bulmak için, denklem R_p/V_o^2 ile normalleştirilir ve $y = y_t - b/3$ eşitliği kullanarak kare terimi ortadan kaldırılır. $y^3 + by^2 + cy + d = 0$ kübik denklemin kökleri, Cardano'nun formülü ile [68]

$$y_t = -\frac{b}{3} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}}, \quad t = 1, 2, 3, \quad (3.25)$$

olarak verilir. Burada p ve q , sırasıyla $p = -b^2/3 + c$ ve $q = 2b^3/27 - bc/3 + d$ olarak tanımlanır. Bu parametreler ile elde edilen kökler ve z 'nin türevi $dz/dy = 3/2 - \sqrt{1 + 4R_p y/V_o^2}/2 - R_p/V_o^2 \sqrt{1 + 4R_p y/V_o^2}$ yerine konulur ve daha sonra depolanan enerjinin PDF'si hesaplanır.

3.5 Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde, hem tek ESC durumu hem de çoklu ESC'ler durumunu örneklendirmek için sayısal sonuçlar sunulmuştur. Tek bir Gauss yoğunluğu ve çoklu Gauss bileşen yoğunlukları olan modeller de incelenmiştir. Ayrıca, enerji kaynakları arasındaki korelasyonun ve tasarım parametrelerinin PDF'ler üzerindeki etkileri verilmiştir.

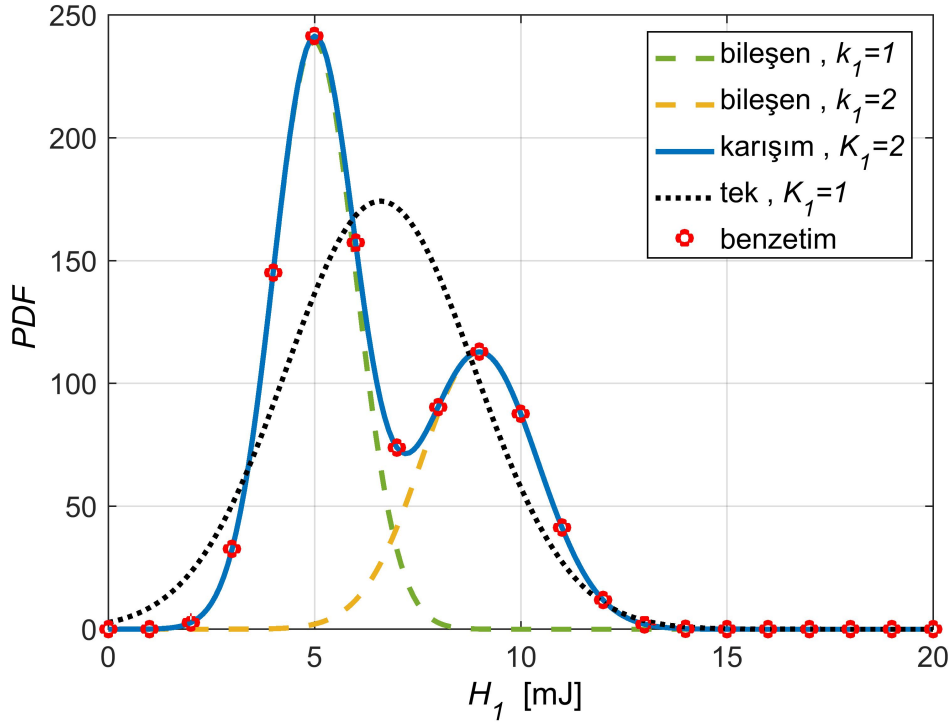
Sayısal çalışmalar için, iki enerji kümesinin kullanıldığı iki EHM'ye sahip bir hibrit enerji hasatlayıcı ele alınmıştır. Burada, kümelerdeki her bir enerji kaynağı, zorunlu olarak Gauss olmayan, rastgele bir dağılıma sahip olabilir. Her enerji

Çizelge 3.1 : Benzetim parametreleri

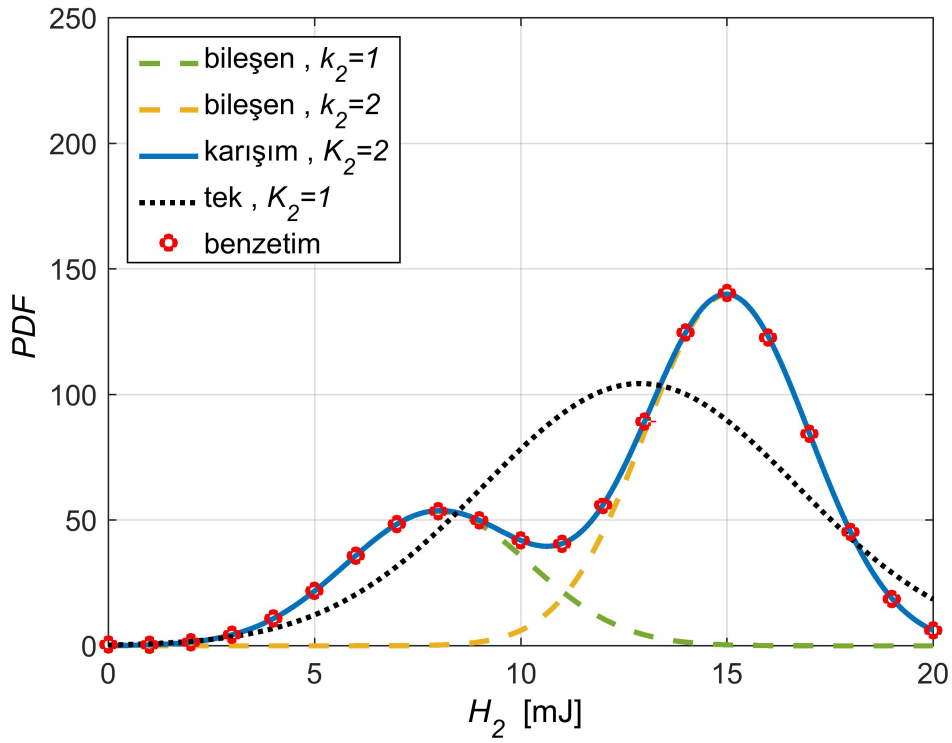
	$u_{n,1}$	$u_{n,2}$	$\mu_{n,1}$	$\mu_{n,2}$	$\sigma_{n,1}$	$\sigma_{n,2}$
H_1	0.6	0.4	5	9	1	1.414
H_2	0.3	0.7	8	15	2.236	2

kümesinin GM modelinin iki bileşen yoğunluğuna sahip olduğu varsayılmıştır, $K_1 = 2$, $K_2 = 2$, $\theta_1 = \{w_{1,1}, w_{1,2}, \mu_{1,1}, \mu_{1,2}, \sigma_{1,1}^2, \sigma_{1,2}^2\}$ ve $\theta_2 = \{w_{2,1}, w_{2,2}, \mu_{2,1}, \mu_{2,2}, \sigma_{2,1}^2, \sigma_{2,2}^2\}$. Sayısal çalışmalarda ve benzetimlerde kullanılan GM modeli parametreleri, EHM-1'in hasatlanan enerjisi H_1 ve EHM-2'nin hasatlanan enerjisi H_2 için, Çizelge 3.1'de verilmiştir. Burada ortalama ve standart sapma parametrelerinin birimleri mJ cinsinden ifade edilmektedir. Sayısal çalışmalarda, açık devre gerilimi ve dahili direnç için [69] numaralı referansta kullanılanlara benzer değerlerin kullanılması benimsenmiştir. Çizelge 3.1'deki parametre değerleri, depolanan enerjiyi göstermek için kullanılan açık devre gerilimi ve dahili direnç gibi değerlere bağlı olarak, enerji depolayıcının dinamik değer aralığına göre belirlenmiştir. Sayısal çalışmalarda kullanılan bileşen yoğunluklarının sayısı ve GM modeli parametrelerinin değerleri, önerilen modelleme yaklaşımının etkisini vurgulama amacına uygun olarak seçilmiştir. EM algoritması tarafından belirlenen başka parametre değerleri de aynı sistem modeli ve metodolojisi ile kullanılabilir.

H_1 ve H_2 hasatlanan enerjilerinin PDF'leri ve ağırlıklı bileşen yoğunlukları, sırasıyla Şekil 3.4 ve 3.5'te gösterilmiştir. Bu şekillerin her biri, GM modeli ile tek bir ESC'nin modellenmesi için bir örnektir. Şekillerde gösterilen hasatlanan enerjiler, çoklu ESC'ler durumunda enerji birleştiricisinin girişleri olarak da kullanılabilirler. Sayısal parametrelere karşılık gelen rastgele değişkenler üretilerek elde edilen benzetim sonuçlarıyla, analitik ifadelerin sayısal sonuçları, şekillerde gösterildiği gibi doğrulanmıştır. Tek bir Gauss yoğunluğu ($K_n = 1$) ve iki ağırlıklı bileşen yoğunlukları ($K_n = 2$) için, H_1 ve H_2 hasatlanan enerjilerinin PDF'leri arasındaki farklar da bu şekillerde gösterilmiştir. Tek bir Gauss yoğunluğu için, (μ_n, σ_n^2) ortalama ve varyans değerleri, sırasıyla $\mu_n = u_{n,1}\mu_{n,1} + u_{n,2}\mu_{n,2}$ ve $\sigma_n^2 = u_{n,1}(\sigma_{n,1}^2 + \mu_{n,1}^2) + u_{n,2}(\sigma_{n,2}^2 + \mu_{n,2}^2) - \mu_n^2$, $\forall n, n = 1, 2$, ifadeleri kullanılarak hesaplanabilir. Ortalama ve varyans değerleri aynı olmasına rağmen, hasatlanan enerjinin dağılımı, şekillerde görüldüğü gibi bileşen yoğunluklarının sayısına bağlıdır.



Şekil 3.4 : Tek bir Gauss ve iki bileşen yoğunluklu bir GM modeli için hasatlanan enerji H_1 'in PDF'leri ve benzetimleri.



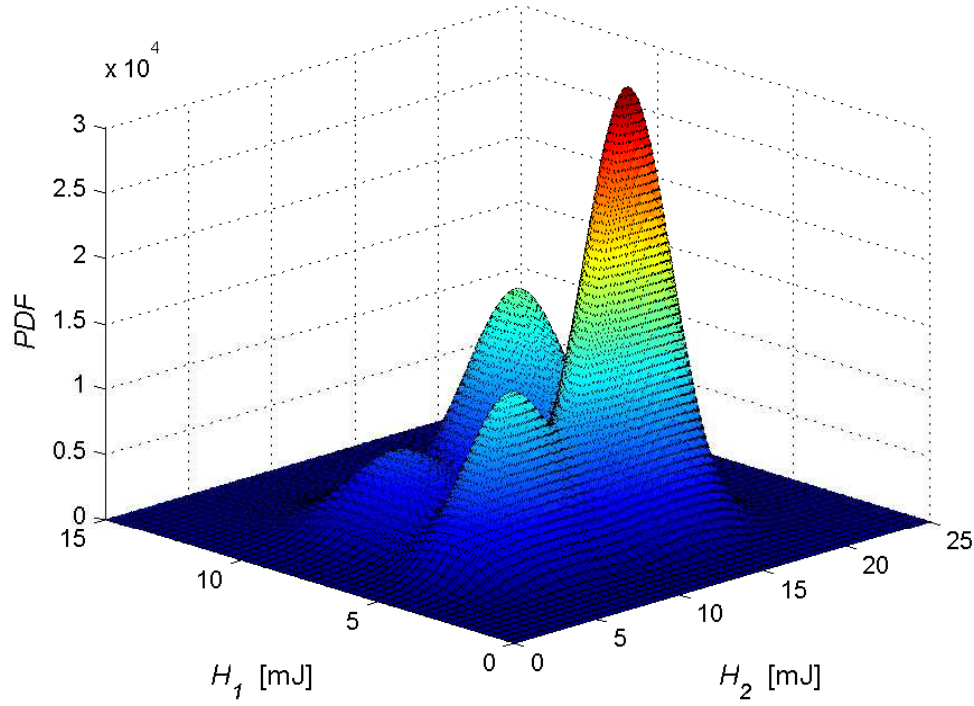
Şekil 3.5 : Tek bir Gauss ve iki bileşen yoğunluklu bir GM modeli için hasatlanan enerji H_2 'nin PDF'leri ve benzetimleri.

GM modeline dayalı hasatlanan enerjilerin ortak PDF'si, $\mathbf{H} = (H_1, H_2)$, $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ ve $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$ için $f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta)$ olarak ifade edilir. $\mathbf{u}_j$, $\mathbf{m}_j$ ve $\mathbf{s}_j^2$ vektörlerinin her biri, iki elemana ve dört farklı kombinasyona sahiptir, $J = 4$. Örneğin, $\mathbf{m}_j$ vektörleri, $\mathbf{m}_1 = (\mu_{1,1}, \mu_{2,1})$, $\mathbf{m}_2 = (\mu_{1,1}, \mu_{2,2})$, $\mathbf{m}_3 = (\mu_{1,2}, \mu_{2,1})$ ve $\mathbf{m}_4 = (\mu_{1,2}, \mu_{2,2})$ olarak düzenlenebilir. Bu durumda, H_1 ve H_2 bağımsız hasatlanan enerjilerinin $k_1 = 1$ ve $k_2 = 1$ ağırlıklı bileşen yoğunluklarına göre indis parametresi j , $j = 1$ için $j = 1 \sim \{k_1 = 1, k_2 = 1\}$ olarak tanımlanabilir. Diğer indis parametresi değerleri, $j = 2, 3, 4$, için de aynı işlem uygulanabilir ve bu değerler hasatlanan enerjilerin bileşen ortak yoğunluklarını temsil ederler, $f_{B,ind,j}(\mathbf{x}|\Theta_j)$. Hasatlanan enerjilerin ortak PDF'si $f_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}|\Theta)$, Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu şekil, H_1 ve H_2 hasatlanan enerjilerinin değer aralıklarına göre iki boyutlu Gauss PDF'lerini göstermektedir.

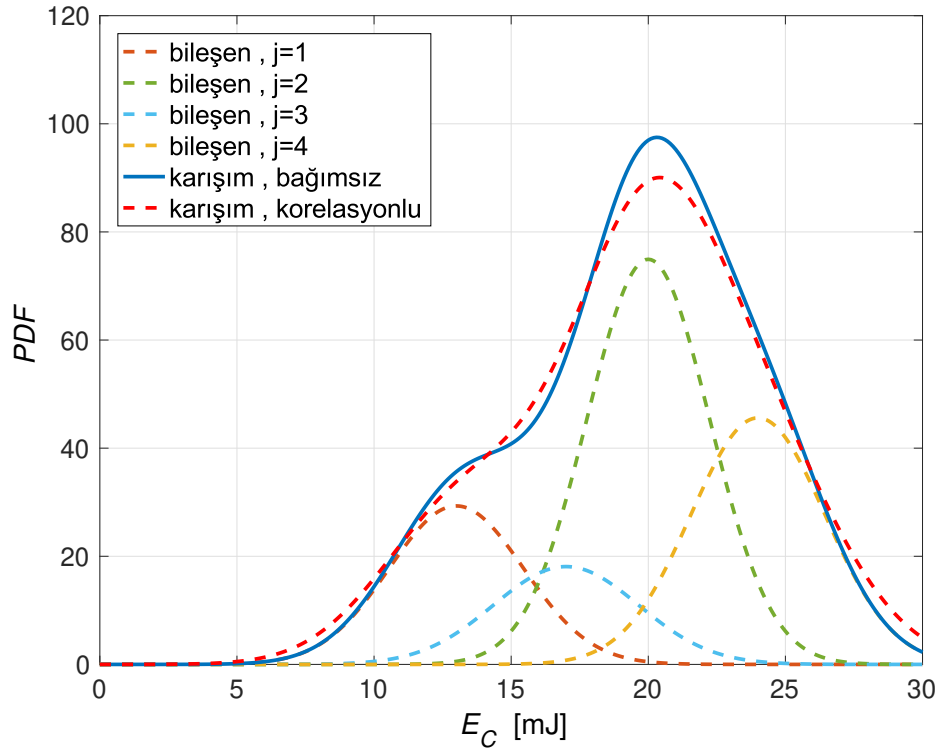
Birleştirilen enerji, hasatlanan enerjilerin toplamı olarak ifade edilebilir, $E_C = g_c(H_1, H_2) = H_1 + H_2$. Hasatlanan enerjilerin PDF'leri iki bileşen yoğunluğu ile ifade edildiği için, (3.23) numaralı denkleme uygun olarak, birleştirilen enerjinin PDF'si bileşen yoğunluklarının dört olası kombinasyonuna göre elde edilir. Bağımsız hasatlanan enerjiler durumunda, indeks parametresinin tüm değerleri, $j = 1, 2, 3, 4$, için yukarıda verilen benzetim parametreleri kullanılarak, $u_{y,j}$, $\mu_{y,j}$ ve $\sigma_{y,j}^2$ değerleri elde edilir. Bir örnek olarak, $j = 1$ indis parametresi için, bu değerler $u_{y,1} = u_{1,1}u_{2,1} = 0.18$, $\mu_{y,1} = \mu_{1,1} + \mu_{2,1} = 13$ mJ ve $\sigma_{y,1} = \sqrt{\sigma_{1,1}^2 + \sigma_{2,1}^2} = 2.45$ mJ olarak hesaplanır. Birleştirilmiş enerjinin ve bileşen yoğunluklarının PDF'si Şekil 3.7'de çizilmiştir. Görülebileceği gibi, dört bileşen yoğunluğunun toplamı, birleştirilmiş enerjinin PDF'sini oluşturur. Diğer yandan, korelasyonlu hasatlanan enerjiler durumu için, korelasyon katsayılarının hesaba katılması gerekir. Korelasyon katsayısı değeri $\rho_{1,1} = 0.5$ önceki örneğe uygulandığında, birleştirilmiş enerjinin standart sapması $\sigma_{y,1} = \sqrt{\sigma_{1,1}^2 + 2\rho_{1,1}\sigma_{1,1}\sigma_{2,1} + \sigma_{2,1}^2} = 2.87$ mJ olarak hesaplanır. Korelasyon katsayısı değerleri olarak $\rho_{k_1,k_2} = 0.5, \forall k_1, k_2$, göz önüne alındığında, ana kovaryans matrisi (Σ)

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.118 & 1 \\ 0 & 2 & 1.581 & 1.414 \\ 1.118 & 1.581 & 5 & 0 \\ 1 & 1.414 & 0 & 4 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

olarak elde edilir. Burada, ilk iki satır (sütun) EHM-1 için, son iki satır (sütun) ise EHM-2 için bileşen yoğunluklarını temsil etmektedir. Ana kovaryans matrisi, Σ_j matrislerindeki tüm kovaryans değerlerini içerir. Bu değerlere uygun olarak,



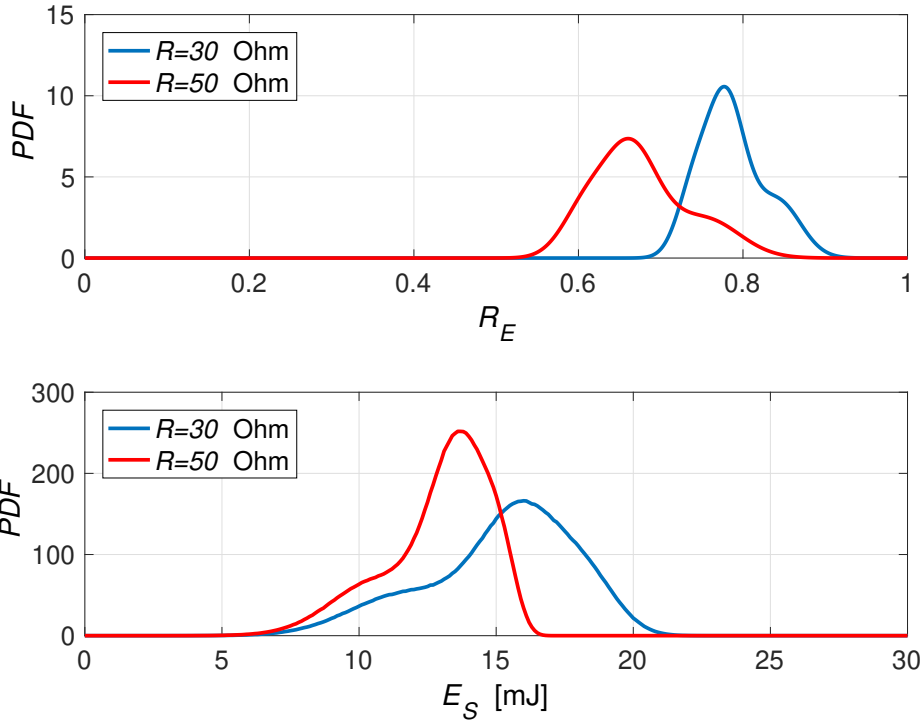
Şekil 3.6 : Bileşen ortak yoğunlukları tabanlı hasatlanan enerjiler H_1 ve H_2 'nin ortak PDF'leri.



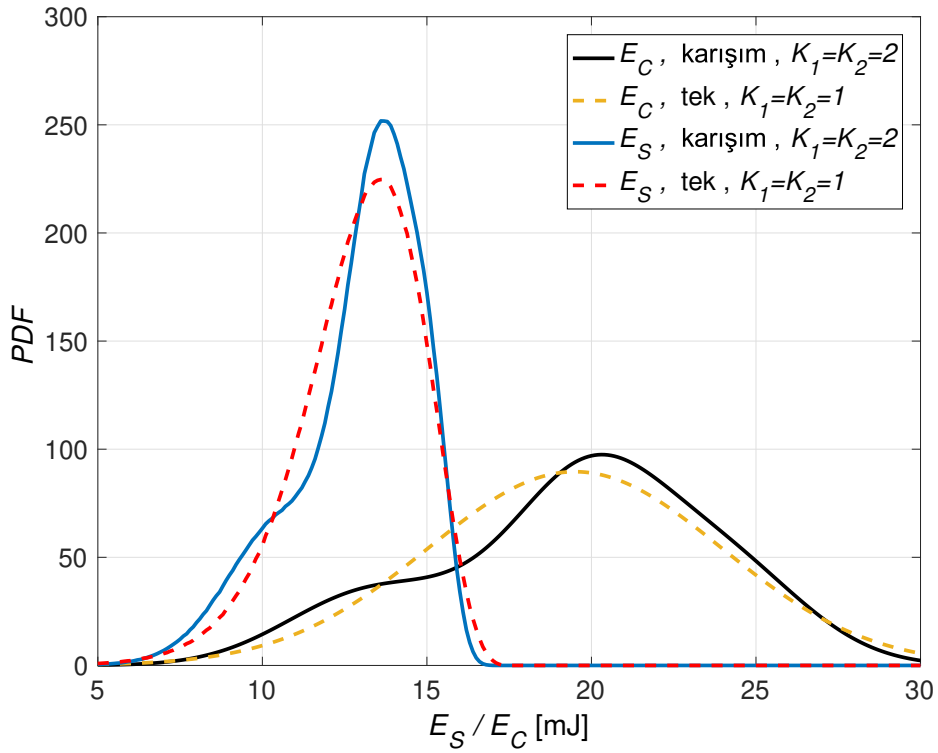
Şekil 3.7 : Bağımsız ve korelasyonlu hasatlanan enerjiler için birleştirilen enerjinin PDF'leri ve bileşen yoğunlukları.

birleştirilmiş enerjinin PDF'si, korelasyonlu hasatlanan enerjiler için Şekil 3.7 üzerinde gösterilmiştir. Hasatlanan enerjiler arasındaki korelasyon, şekilde gösterildiği gibi, bağımsız duruma kıyasla birleştirilmiş enerjinin varyansını artırır.

Birleştirilen enerji, enerji depolayıcıda depolandığında, depolanan enerji, açık devre gerilimi, dahili direnç ve birleştirilen enerji değerlerine göre değişir. Açık devre geriliminin $V_o = 1.5$ V ve dahili direnç değerlerinin $R_p = 30$ Ohm ve $R_p = 50$ Ohm olduğu durumlarda, şarj etme verimliliğinin ve depolanan enerjinin PDF'leri Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Burada, E_C dağılımına bağlı olarak şarj etme verimliliğinin değişimini göstermek için, şarj etme verimliliği rastgele değişken olarak tanımlanmıştır, $R_E = E_S/E_C$. Dahili direncin daha yüksek değerleri, enerji depolayıcıya daha küçük değerlerdeki akımın akmasına yol açar. Şarj etme verimliliğinin $R_p = 50$ Ohm için $R_p = 30$ Ohm olması durumundan daha düşük olduğu ve buna bağlı olarak enerji depolayıcıya aktarılan enerji miktarının da daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, tek bir Gauss yoğunluğu ve iki ağırlıklı bileşen yoğunluklu GM modeli için, birleştirilen enerjinin ve depolanmış enerjinin PDF'leri Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Şarj etme verimliliği nedeniyle, E_S miktarının ve aynı zamanda varyansının E_C ile karşılaştırıldığında daha az olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi, bileşen yoğunluklarının sayısına bağlı olarak, E_C ve E_S dağılımlarının farklılık gösterdiği de görülmektedir.



Şekil 3.8 : Farklı R değerleri için şarj etme verimliliği ve depolanan enerjinin PDF'leri.



Şekil 3.9 : Tek bir Gauss ve iki bileşen yoğunluklu bir GM modeli için birleştirilen ve depolanan enerjilerin PDF'leri, $R_p = 50$ Ohm.

3.6 Çıkarımlar

Çoklu enerji kaynakları, kendi kendine yetebilen kablosuz cihazlar elde etmek amacıyla, HEH sistemlerinde kullanılabilir. Bu çalışmada, enerji kaynaklarından yayılan enerjinin türüne göre, enerji kaynaklarının kümelere ayrılması ve bu ESC'lerden hasatlanan enerjileri modellemek için GM modellerinin kullanımı önerilmiştir. Böylece, HEH sistemleri için kullanılan farklı türdeki enerjilerin tek bir formda modellenmesi sağlanmıştır. Farklı ESC'lerden hasatlanan enerjilerin ortak PDF'leri, hem bağımsız hem de korelasyonlu durumlar için bileşen ortak yoğunluklarının bir toplamı olarak ifade edilmiştir. Enerji birleştirici ve enerji depolayıcı birimlerinin çıkışlarındaki enerji seviyelerinin PDF'leri, hasatlanan enerjilere bağlı olarak ifade edilmiştir. Ayrıca, önerilen sistem modelinin her bir birimindeki tüm dağılımların elde edilebilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu yaklaşım, kablosuz ağlar için HEH sistemlerinin tasarımını, boyutlandırılmasını ve performans değerlendirmesini kolaylaştıran, enerji hasatlamanın ilgili parametrelerinin (hasatlanan enerji, birleştirilen enerji, depolanan enerji, şarj verimliliği gibi) tahmin edilebilir olmasını sağlamıştır.



4. HİBRİT ENERJİ HASATLAMA HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ

4.1 Amaç

Bu bölümde, farklı türlerdeki enerji kaynaklarından faydalanan HEH sistemlerinin haberleşme ağlarında kullanımı önerilmiş ve HEH haberleşme sistemlerinin olasılıksal enerji profillerine dayalı olarak modellenmesi amaçlanmıştır.

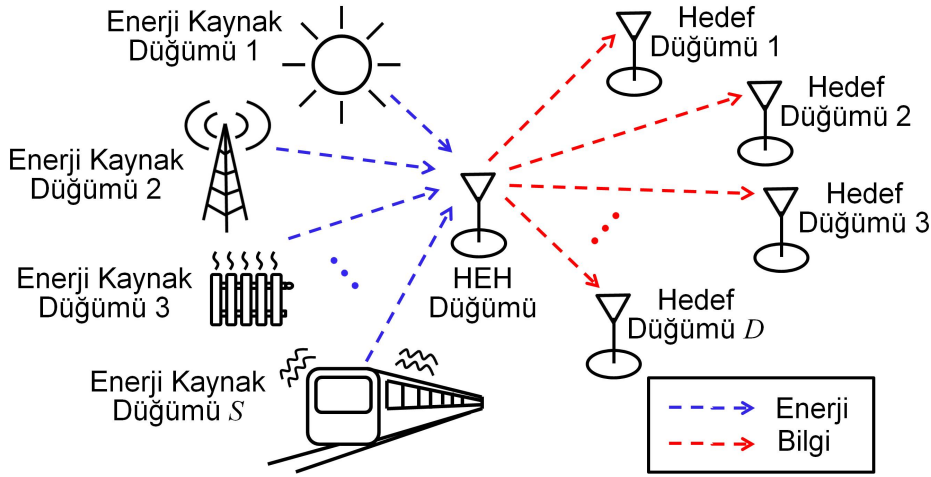
Bu çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 4.2’de, bir HEH haberleşme sistem modeli ile GM ve FSMC modelleri tanımlanmıştır. Bölüm 4.3’te, enerji hasatlama ve enerji harcama profilleri ayrıntılı olarak verilmiş ve bu profiller çoklu enerji kaynakları ile çoklu uygulama servisleri için bir HEH haberleşme düğümünün enerji modelini geliştirmek için kullanılmıştır. Bölüm 4.4’te, bir HEH haberleşme düğümünün performansını değerlendirmek için, enerji kesintisi, enerji kıtlığı ve servis kaybı olasılıkları tanıtılmış ve ifadeleri türetilmiştir. Bölüm 4.5’te, elde edilen analitik ifadeler ve bunların benzetimleri için sayısal sonuçlar verilmiştir. Bölüm 4.6’da, çalışmanın sonucu sunulmuştur.

4.2 Sistem Modeli, Gauss Karışım Modeli ve FSMC Modeli

Bu bölümde, HEH haberleşme sistemleri için bir sistem modeli tanıtılmış, GM modeli ve FSMC modeli hakkında kısa bilgi verilmiştir. Ayrıca, sonraki bölümlerde kullanılacak olan değişkenler için GM ve FSMC modellerinin ana ifadeleri sunulmuştur.

4.2.1 Sistem modeli

Bu çalışmada, farklı türlerde çok sayıda enerji kaynak düğümü, bir HEH düğümü ve çok sayıda hedef düğümünden oluşan bir HEH haberleşme sistemi düşünülmüştür. Sistem modeli 4.1’de gösterilmektedir. Modelde, S adet enerji kaynağı aralıklı ve rastgele olarak farklı miktarlarda enerji yaymaktadır. HEH düğümü, kendi enerji



Şekil 4.1 : Çoklu tip enerji kaynakları tabanlı HEH haberleşme sistemi.

gereksinimini sağlamak için farklı tiplerdeki enerji kaynaklarından yayılan enerjiyi hasatlamaktadır. Hasatlanan enerji, D adet hedef düğümü ile iletişim kurmak için kullanılmaktadır. Hasatlanan enerjinin miktarı, HEH düğümünde herhangi bir enerji depolama biriminin bulunmaması durumunda, HEH düğümünü çalıştırmak için her zaman yeterli olmayabilir. Bu nedenle, HEH düğümü hasatlanan enerjiyi gerektiğinde kullanmak üzere sonlu kapasitede yeniden şarj edilebilir bir pile depolamaktadır. HEH düğümü ve hedef düğümler arasındaki aralıklı haberleşme, farklı uygulama servislerine ve farklı miktarlarda enerji harcamasına neden olan ilgili iletim hızlarına göre gerçekleşmektedir. HEH düğümü, ancak pilde yeterli miktarda enerji olması durumunda hedef düğümlerle iletişim kurabilmekte, aksi halde, enerji kıtlığı nedeniyle iletişim kuramamaktadır.

En genel durum için HEH düğümünün enerji hasatlaması göz önüne alındığında, hasatlanan enerji (H)

$$H = g(R) \quad (4.1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $g(\cdot)$, HEH düğümünün enerji dönüşüm fonksiyonunu gösterir. R ise, enerji kaynaklarından HEH düğümüne gelen alınan enerjiyi göstermektedir. Alınan enerjinin rastgeleliğinden dolayı, hasatlanan enerji de alınan enerjinin dağılımlarına göre rastgele değişmektedir.

4.2.2 Gauss karışım modeli

Karışım modelleri kısaca, ağırlıklı matematiksel çekirdek fonksiyonların bir toplamı olarak ifade edilebilir. Genel olarak, bir karışım modeli, farklı parametrelere sahip çok sayıdaki bileşen yoğunluğunun (çekirdek fonksiyonların) birleşimini kullanarak bir değişkenin PDF'sini tanımlamak için kullanılır. Karışım modeli, belirlenen karışım modeli parametrelerine bağlı olarak değişkenin gerçek dağılımına oldukça yakın yaklaşım sağlar. Bileşen yoğunlukları, her bileşen yoğunluğunun farklı ortalama ve varyans değerlerine sahip olduğu Gauss dağılımları olarak seçilebilir. Bu durumda, elde edilen karışım modeli, literatürdeki birçok uygulamada kullanıldığı gibi, GM modeli olarak adlandırılır [70, 71].

Enerji hasatlamada, enerji kaynağı yayınımlarının ve ortam koşullarının belirsizliği gibi bazı nedenlerden dolayı, iyi bilinen dağılım modelleri ile alınan enerjinin modellenmesi mümkün olmayabilir. Böyle bir durumda, rastgele dağılımlar için alınan enerjiyi modellemek amacıyla karışım modelleri kullanılabilir. HEH sisteminin herhangi bir enerji kaynağı için, alınan enerjinin PDF'si ($f_R(x|\theta)$) GM modeli ile

$$f_R(x|\theta) = \sum_{c=1}^C u_c \mathcal{N}(x|\mu_c, \sigma_c^2) \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. x , alınan enerjinin fonksiyon değişkenidir. Karışım modelinde, C adet bileşen yoğunluğu vardır ve bileşen yoğunluğu indisi c ile ($c = 1, 2, \dots, C$) gösterilir. θ , alınan enerji için GM modeli parametrelerinin kümesidir, $\theta = \{u_c, \mu_c, \sigma_c^2\}, \forall c$. Burada, u_c , μ_c ve σ_c^2 parametreleri, c . bileşen yoğunluğunun karıştırma ağırlığı, ortalaması ve varyansını sırasıyla ifade etmektedir. Karıştırma ağırlıkları

$$\sum_{c=1}^C u_c = 1 \quad (4.3)$$

eşitliğini sağlayacak şekilde (0,1) aralığında değerler alır. (4.2) numaralı denklemdeki $\mathcal{N}(x|\mu_c, \sigma_c^2)$, c . Gauss bileşen yoğunluğunu temsil eder ve

$$\mathcal{N}(x|\xi_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_c^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_c)^2}{2\sigma_c^2}\right) \quad (4.4)$$

olarak yazılabilir. ξ_c , c . Gauss bileşen yoğunluğu parametrelerinin kümesidir, $\xi_c = \{\mu_c, \sigma_c^2\}$. GM modeli parametreleri, EM algoritması gibi bir maksimum olabilirlik tahmincisi kullanılarak tahmin edilebilir.

4.2.3 FSMC modeli

Markov zincirleri, sürekli değerli sistemlerin ayrık değerli yaklaşımlarıdır. FSMC modelleri, haberleşme sistemlerinde genellikle haberleşme kanallarını tanımlamak için kullanılan Markov zincirlerinin özel bir durumu olarak tanımlanabilir. Bu amaçla, FSMC modelinde, alınan SNR veya alınan işaretin genliği gibi bir parametre kullanılır. Seçilen parametrenin alabileceği değerleri sınırlayan en geniş değer aralığı, bölümlenme olarak adlandırılan işlem ile sonlu sayıda örtüşmeyen küçük aralıklara bölünür. Bu aralıklar, bölümlenme esnasında belirlenen eşik değerleri ile birbirinden ayrılır. Eşik sayısı ve aralığın değeri, her bir durumun ilişkili aralığı temsil ettiği FSMC modelinin yapısını karakterize eder.

Çalışmamızda, haberleşme kanalları yerine enerji kanallarını tanımlamak için FSMC modelleri kullanılmaktadır. HEH düğümünün enerji hasatlama profili için bir FSMC modeli oluşturmak amacıyla, hasatlanan enerji aralığı, aralık eşikleri (a_n) olmak üzere $N + 1$ adet aralığa bölünür, $n = 0, 1, \dots, N + 1$. Bu aralıklar hasatlanan enerjinin PDF'sine ($f_H(y)$) uygulandığında, aralıkları temsil eden her bir FSMC durumunun kararlı durum olasılığı (p_n)

$$p_n = \int_{a_n}^{a_{n+1}} f_H(y) dy, \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (4.5)$$

olarak ifade edilir. Burada y , hasatlanan enerjinin fonksiyon değişkenidir. En genel durum göz önüne alındığında, yani hasatlanan enerji aralığı $[0, +\infty)$ olarak alındığında, ilk ve son aralık eşik değerleri sırasıyla $a_0 = 0$ ve $a_{N+1} = +\infty$ olarak belirlenebilir. Kararlı durum olasılıkları

$$\sum_{n=0}^N p_n = 1, \quad a_0 = 0, a_{N+1} \rightarrow +\infty \quad (4.6)$$

eşitliğini sağlamalıdır. Hasatlanan enerjinin herhangi bir $[a_n, a_{n+1})$ aralığında aldığı bir değer, kuantalama enerji seviyesi (Γ_n) ile temsil edilir, $n = 0, 1, \dots, N$. Rastgele bir dağılıma sahip olan hasatlanan enerji, iyi bilinen bir dağılıma sahip olan hasatlanan enerji gibi bir FSMC modeli oluşturmak için bölümlendirilebilir.

4.3 HEH Haberleşme Sistemleri için Enerji Modeli

Bu bölümde, bir önceki bölümde tanıtılan HEH haberleşme sistemi modeline göre, çoklu enerji kaynağı ve çoklu hedef düğümleri için, öncelikle HEH düğümünün enerji hasatlama ve enerji harcama profilleri incelenmiştir. Sonrasında ise, her iki profilin olasılıksal enerji giriş ve enerji çıkışı olarak etkilerini içeren, HEH haberleşme sisteminin bir enerji modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, Markov zinciri ayrık zaman yaklaşımına göre bir olasılık süreci olarak kullanılmıştır.

4.3.1 Enerji hasatlama profili

Sistem modelindeki enerji kaynakları tarafından HEH düğümüne enerji sağlanır. Enerji kaynaklarından HEH düğümüne enerji varışının olması/olmaması ve HEH düğümü tarafından alınan enerjinin miktarı, hasatlanan enerji üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda, enerji varış olasılıkları ve alınan enerjilerin dağılımları HEH düğümünün enerji hasatlama profilini oluşturmaktadır.

4.3.1.1 Enerji varış olasılığı

Ayrık zaman yaklaşımına dayanarak, enerji hasatlamak ve/veya harcamak için geçen süre bir zaman dilimi ile sınırlı hale getirilir. Tek bir zaman diliminde birden fazla enerji kaynağından gelen enerji birçok farklı kombinasyonda gerçekleşebilir. En basit senaryoda, HEH düğümünün bir zaman diliminde enerjiyi sadece tek bir enerji kaynağından aldığı varsayılabilir. Bunun yanında HEH düğümünün, tüm enerji kaynaklarının sürekli olarak enerji yaydığı durumda, tüm enerji kaynaklarından aynı anda enerji aldığı da varsayılabilir. Bu senaryolar haricinde, her bir enerji kaynağından olasılıksal olarak enerji varışının olması durumu en karmaşık senaryo olarak düşünülebilir. HEH sisteminde S adet enerji kaynağı olması durumunda, 2^S olası enerji varış kombinasyonu olacaktır.

Tek bir enerji kaynağından enerji varış olasılığı Poisson süreci ile modellenebilir. Bu durumda, s . enerji kaynağından enerji varış olasılığı $(r_s(\beta))$ [52]

$$r_s(\beta) = \frac{\lambda_s^\beta}{\beta!} \exp(-\lambda_s), \quad \beta = 0, 1, \dots \quad (4.7)$$

ile hesaplanabilir. Burada β , enerji varışının gerçekleşme sayısını, λ_s ise, ortalama enerji varış değerini belirtir, $\lambda_s > 0$. λ_s , ortalama enerji varış oranı (μ_{r_s}) ile zaman

diliminin (τ) çarpımı olarak hesaplanabilir, $\lambda_s = \mu_{r_s} \tau$. Bir enerji kaynağından gelen enerji varışı, yeterince küçük bir zaman dilimi içinde en fazla bir kez gerçekleşir [28]. Bu durumda, Poisson dağılımında enerji varışı gerçekleşme sayısı 1 seçilerek ($\beta = 1$), s . enerji kaynağından enerji varış olasılığı

$$r_s = \mu_{r_s} \tau \exp(-\mu_{r_s} \tau), \quad s = 1, 2, \dots, S \quad (4.8)$$

ile ifade edilir. Tüm olası kombinasyonlar için enerji varış olasılıkları, (4.8) denklemi kullanılarak elde edilen olasılıklarla hesaplanabilir. Enerji varış kombinasyonlarının sayısı $B = 2^S$ şeklinde tanımlanarak, b . kombinasyon için enerji varış olasılığı (r_b) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir

$$r_b = \prod_{s \in \mathbf{G}_b} r_s \prod_{s' \in \mathbf{G}'_b} r'_{s'}, \quad b = 0, 1, \dots, B-1. \quad (4.9)$$

Burada $\mathbf{G}_b$, HEH düğümüne enerji varışının gerçekleştiği b . kombinasyondaki enerji kaynaklarının (s) kümesidir. $\mathbf{G}'_b$ ise, $\mathbf{G}_b$ 'de yer almayan sistem modelindeki diğer tüm enerji kaynaklarını (s') içeren, $\mathbf{G}_b$ 'nin tümleyen kümesidir, $r'_{s'} = 1 - r_{s'}$.

4.3.1.2 Alınan enerjinin dağılımı

Sistem modelindeki enerji kaynakları, HEH düğümünde hasatlanan enerji miktarındaki artışa katkıda bulunur. Her bir enerji kaynağından alınan enerjinin dağılımı, tek bir bileşen yoğunluğuyla tanımlanamayabilir. s . enerji kaynağından alınan enerjiyi R_s olarak tanımlayalım, $s = 1, 2, \dots, S$. Önceki bölümde de belirtildiği gibi, s . enerji kaynağından alınan enerjinin dağılımı ($f_{R_s}(x_s|\theta_s)$), (4.2) numaralı denkleme göre GM modeli kullanılarak

$$f_{R_s}(x_s|\theta_s) = \sum_{c_s=1}^{C_s} u_{s,c_s} \mathcal{N}(x_s|\mu_{s,c_s}, \sigma_{s,c_s}^2) \quad (4.10)$$

ile ifade edilebilir. Burada $x_s, \theta_s, c_s, C_s, u_{s,c_s}, \mu_{s,c_s}$ ve σ_{s,c_s}^2 parametreleri, s . enerji kaynağı için sırasıyla $x, \theta, c, C, u_c, \mu_c$ ve σ_c^2 'nin ilişkili parametrelerini temsil ederler. Tek bir enerji kaynağından enerji varışının gerçekleşmesi durumunda, s . enerji kaynağından hasatlanan enerji (H_s), s . enerji kaynağından alınan enerjiye ve s . enerji kaynağı için gerçekleşen HEH düğümünün enerji dönüşüm fonksiyonuna ($g_s(\cdot)$) bağlıdır, $H_s = g_s(R_s)$. Bu fonksiyonu, fonksiyon değişkenleri cinsinden $y_s = g_s(x_s)$ olarak ifade etmek mümkündür, burada y_s , hasatlanan enerji H_s 'nin fonksiyon

değişkenidir. s . enerji kaynağından hasatlanan enerjinin PDF'si ($f_{H_s}(y_s)$)

$$f_{H_s}(y_s) = \sum_{l=1}^I \frac{f_{R_s}(x_s|\theta_s)}{|dy_s/dx_s|} \Big|_{x_s=y_{s,l}} \quad (4.11)$$

kullanılarak elde edilebilir. Burada $x_{s,l}$, $g_s(\cdot)$ dönüşüm fonksiyonuna göre y_s 'ye bağlı olarak elde edilen x_s 'nin l . çözümünü gösterir. Ayrıca, çevrede birden fazla enerji kaynağı olabilir. Bu durumda, hasatlanan enerjiyi hesaplamak için, alınan enerjilerin ortak PDF'sini elde etmek gerekir. Birden fazla bağımsız enerji kaynağı olması durumunda, b . kombinasyona uygun olarak alınan enerjilerin ortak PDF'si ($f_{\mathbf{R}_b}(\mathbf{x}_b|\Theta_b)$)

$$f_{\mathbf{R}_b}(\mathbf{x}_b|\Theta_b) = \prod_{s \in \mathbf{G}_b} f_{R_s}(x_s|\theta_s), \quad (4.12)$$

şeklinde GM modeline göre ifade edilir. Burada $\mathbf{R}_b$ ve $\mathbf{x}_b$, sırasıyla R_s ve x_s 'nin vektörleridir, $\forall s \in \mathbf{G}_b$. $\mathbf{G}_b$ kümesindeki tüm s değerleri için oluşturulan θ_s parametrelerinin kümesi de Θ_b ile gösterilir. (4.2) - (4.4) numaralı denklemlere göre, $f_{\mathbf{R}_b}(\mathbf{x}_b|\Theta_b)$ aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$f_{\mathbf{R}_b}(\mathbf{x}_b|\Theta_b) = \prod_{s \in \mathbf{G}_b} \sum_{c_s=1}^{C_s} \frac{u_{s,c_s}}{\sqrt{2\pi\sigma_{s,c_s}^2}} \times \exp\left(-\frac{(x_s - \mu_{s,c_s})^2}{2\sigma_{s,c_s}^2}\right). \quad (4.13)$$

Diğer yandan, farklı enerji kaynakları arasında korelasyon olabilir. b . kombinasyon için korelasyonlu çoklu enerji kaynaklarının kullanılması durumunda, alınan enerjilerin ortak PDF'si aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$f_{\mathbf{R}_b}(\mathbf{x}_b|\Theta_b) = \sum_{c_b=1}^{C_b} \frac{\mathbf{u}_{c_b}}{(2\pi)^{N/2} |\Sigma_{c_b}|^{1/2}} \times \exp\left(-\frac{(\mathbf{x}_b - \mathbf{m}_{c_b})^T \Sigma_{c_b}^{-1} (\mathbf{x}_b - \mathbf{m}_{c_b})}{2}\right). \quad (4.14)$$

Bu toplamın her bir bloğu, Gauss bileşen yoğunluklarının ortak yoğunluğunu temsil etmekte ve burada bileşen ortak yoğunluğu olarak adlandırılmaktadır. $\mathbf{x}_b$, $\mathbf{u}_{c_b}$ ve $\mathbf{m}_{c_b}$, sırasıyla fonsiyon değişkenlerinin, karıştırma ağırlıklarının ve ortalama değerlerin $\mathcal{G}_b$ elemanlı vektörlerini gösterirler. $\mathcal{G}_b$ parametresi, $\mathbf{G}_b$ kümesinin kardinalitesidir, kümedeki enerji kaynaklarının sayısını ifade eder. Σ_{c_b} ise, $\mathcal{G}_b \times \mathcal{G}_b$ elemanlı ($\mathcal{R}^{\mathcal{G}_b \times \mathcal{G}_b}$) kovaryans matrisini gösterir. $\mathbf{G}_b$ kümesindeki enerji kaynakları 1'den başlayarak $\mathcal{G}_b$ 'ye kadar yeniden numaralandırılırsa, bileşen ortak yoğunluklarının parametreleri şu şekilde tanımlanır:

$$\mathbf{x}_b = (x_1, \dots, x_{\mathcal{G}_b}), \quad (4.15)$$

$$\mathbf{u}_{c_b} = (u_{1,c_1}, \dots, u_{\mathcal{G}_b,c_{\mathcal{G}_b}}), \quad (4.16)$$

$$\mathbf{m}_{c_b} = (\mu_{1,c_1}, \dots, \mu_{\mathcal{G}_b,c_{\mathcal{G}_b}}), \quad (4.17)$$

ve

$$\Sigma_{c_b} = \begin{bmatrix} \sigma_{1,c_1}^2 & \text{cov}(c_1, c_2) & \dots & \text{cov}(c_1, c_{g_b}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{cov}(c_{g_b}, c_1) & \text{cov}(c_{g_b}, c_2) & \dots & \sigma_{g_b, g_b}^2 \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

Burada $\text{cov}(c_{s_1}, c_{s_2})$, $\mathbf{G}_b$ kümesindeki s_1 . ve s_2 . enerji kaynakları arasındaki kovaryansı ifade eder. c_b parametresi, $c_b \sim \{c_{s_1}, c_{s_2}, \dots, c_{s_{g_b}}\}$, $\forall c_s \in \{1, 2, \dots, C_s\}$ şeklinde bileşen yoğunluklarının bir kümesini temsil eden bileşen ortak yoğunluklarının indisi olarak tanımlanabilir. $\mathbf{G}_b$ kümesindeki alınan enerjilerin bileşen yoğunluklarının sayısına bağlı olarak, b . kombinasyon için bileşen ortak yoğunluklarının sayısı (C_b)

$$C_b = \prod_{s \in \mathbf{G}_b} C_s \quad (4.19)$$

olarak yazılabilir. Böylece, alınan enerjilerin bileşen ortak yoğunlukları ile PDF ifadeleri detaylı olarak açıklanmış olur.

4.3.1.3 Hasatlanan enerjinin FSMC modeli

Alınan enerjilerin B adet olası kombinasyonu için ortak PDF'leri, hasatlanan enerjilerin B adet farklı dağılımına yol açar. Enerji kaynaklarının b . kombinasyonunda, hasatlanan enerjiyi H_b , fonksiyon değişkenini y_b ve enerji dönüşüm fonksiyonunu $g_b(\mathbf{R}_b)$ olarak tanımlayalım. Enerji kaynaklarının b . kombinasyonu için, hasatlanan enerjinin PDF'si ($f_{H_b}(y_b)$), ilk olarak, hasatlanan enerjinin birikimli dağılım fonksiyonunun (CDF) ($F_{H_b}(y_b)$)

$$F_{H_b}(y_b) = \int \dots \int_{\mathbf{x}_b \in \mathbf{L}_b} f_{\mathbf{R}_b}(\mathbf{x}_b | \Theta_b) d\mathbf{x}_b \quad (4.20)$$

ile hesaplanmasıyla, burada $\mathbf{L}_b$ kümesi $H_b = g_b(\mathbf{R}_b) \leq y_b$ koşulunu sağlar, daha sonra ise

$$f_{H_b}(y_b) = \frac{d}{dy_b} F_{H_b}(y_b) \quad (4.21)$$

ile CDF'nin türevinin alınmasıyla elde edilir.

Bu işlem, çoklu enerji kaynakları içeren sistem modelindeki enerji kaynaklarının herhangi bir kombinasyonuna uygulanabilir. Diğer durumda, hasatlanan enerjinin PDF'si, (4.11) numaralı denklemdeki gibi tek bir enerji kaynağına göre de elde edilebilir. Böylece, enerji kaynaklarının tüm kombinasyonları için HEH düğümünde hasatlanan enerjilerin PDF'leri elde edilir.

Mümkün olan her bir kombinasyondaki hasatlanan enerjinin PDF'si $f_{H_b}(y_b)$, FSMC modeli oluşturmak için (4.5) ve (4.6) numaralı denklemlere göre $N + 1$ adet aralığa bölünebilir, $b = 1, 2, \dots, B - 1$. Bu model, enerji kaynaklarının her bir kombinasyonu için hasatlanan enerjinin marjinal dağılımını temsil eder. Burada $b = 0$ değerinin, hiç bir kaynaktan enerji gelmemesi durumunu temsil ettiğini belirtmek gerekir. b . kombinasyonun hasatlanan enerjisi için, FSMC modelinin kararlı durum olasılıkları $(p_{b,n})$

$$p_{b,n} = \int_{a_{b,n}}^{a_{b,n+1}} f_{H_b}(y_b) dy_b, \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (4.22)$$

ile hesaplanır. Burada $p_{b,n}$ değerlerinin toplam değeri 1'e eşittir, $\forall b, \sum_{n=0}^N p_{b,n} = 1$, $a_{b,0} = 0, a_{b,N+1} \rightarrow +\infty$. Her kombinasyonda $N + 1$ adet bölümlene aralığı olduğu düşünüldüğünde, tüm olası kombinasyonlar için $B \times (N + 1)$ kararlı durum olasılığı ortaya çıkar. Matris formunda, bu olasılıklar şu şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & \dots & p_{0,N} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & \dots & p_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{B-1,0} & p_{B-1,1} & \dots & p_{B-1,N} \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

Burada $\mathbf{P}$, hasatlanan enerjinin olasılık matrisidir ($\mathcal{R}^{B \times (N+1)}$). Önerilen metodoloji ile enerji hasatlama profiline göre enerji kaynaklarının tüm olası kombinasyonları için hasatlanan enerjinin FSMC modelleri elde edilmiş olur.

4.3.2 Enerji harcama profili

Hasatlanan enerji, sistem modeline göre, HEH düğümü tarafından hedef düğümlerle haberleşmek amacıyla kullanılır. HEH düğümünde enerji harcama talebi olması/olmaması ve enerji harcama talebinin türü, HEH düğümü tarafından harcanan enerjiyi doğrudan etkiler. Bu bağlamda, enerji harcama olasılıkları ve harcanan enerjilerin dağılımları enerji harcama profilini oluşturmaktadır.

4.3.2.1 Enerji harcama olasılığı

Bir HEH düğümünün enerji tüketimi, HEH düğümünün sistem modelindeki rolüne bağlıdır. En basit senaryoda, HEH düğümünün, bir zaman diliminde algılama, alma ve iletme gibi etkinliklerden sadece bir etkinliği gerçekleştirdiği varsayılabilir. Bir başka senaryoda, HEH düğümünün, bir zaman diliminde ardışık şekilde bir grup etkinliği

(sırasıyla algılama, alma ve iletme etkinliklerinin hepsini gibi) gerçekleştirdiği de varsayılabilir. Bu senaryolarda, her bir etkinlik için HEH düğümündeki harcanan enerji miktarı sabit olarak alınır veya fonksiyonlarının sayısına göre birkaç değere sabitlenir [72]. Diğer yandan, bir HEH düğümünün enerji harcama profili uygulama servisinin türüne bağlı olarak da değişir. HEH düğümü, ses, video ve veri iletimleri gibi farklı uygulama servisleri için farklı iletim hızlarında hedef düğümlerle haberleşebilir. Bu senaryoda, harcanan enerji miktarı uygulama sayısına göre birkaç değere sabitlenir. En karmaşık senaryo olarak, bu çalışmada incelendiği gibi, hem enerji harcaması hem de harcanan enerji miktarı uygulama servis türüne göre olasılıksal olabilir.

HEH düğümü ve hedef düğümler arasındaki haberleşme trafiği, farklı uygulama servisleri temelinde gerçekleşebilir. Bu durumda, HEH düğümü ile bir hedef düğümü arasındaki haberleşme, uygulama servisleri kümesinin bir elemanı olarak düşünülebilir. Sistem modelinde D adet hedef düğümü olsa da, enerji harcama olasılıklarının sayısı uygulama servislerinin sayısı ile sınırlandırılabilir. Bu bağlamda, uygulama servisinin gerçekleşme olasılığı, haberleşme trafiği için yaygın olarak kullanılan Poisson dağılımı ile modellenenebilir [58].

Enerji varışı için varsayıldığı gibi, bir uygulama servisi yeterince küçük bir zaman diliminde sadece bir kez gerçekleşir, $\beta = 1$. Uygulama servisi gerçekleşme oranının (μ_{e_ℓ}) olarak tanımlanması durumunda, ℓ . uygulama servisi için uygulama servisinin ortalama gerçekleşme değeri $\lambda_\ell = \mu_{e_\ell} \tau$ olur. Böylece, ℓ . uygulama servisi için uygulama servisi gerçekleşme olasılığı ($\hat{e}_\ell$)

$$\hat{e}_\ell = \mu_{e_\ell} \tau \exp(-\mu_{e_\ell} \tau), \quad \ell = 0, 1, \dots, L-1 \quad (4.24)$$

olarak ifade edilir. Burada ℓ ve $L-1$, uygulama servislerinin sırasıyla indisini ve sayısını gösterir. $\hat{e}_0$ hiç bir uygulama servisinin gerçekleşmediği durumu temsil eder. Bir uygulama servisinin gerçekleşmesi, HEH düğümünün enerji harcamasına sebep olur. En karmaşık senaryoya göre, uygulama servisinin gerçekleşme olasılığı, karşılık gelen enerji harcama olasılığına atanabilir. Ancak, Markov enerji modelinde kullanmak için, (4.24) numaralı denklem kullanılarak elde edilen bu olasılıkların normalleştirilmesi gerekir. Bu nedenle, ℓ . uygulama servisi için enerji harcama

olasılığı

$$e_\ell = \frac{\hat{e}_\ell}{\sum_{\ell=0}^{L-1} \hat{e}_\ell}, \quad \ell = 0, 1, \dots, L-1 \quad (4.25)$$

olur. Burada enerji harcama olasılıklarının toplamı, $\sum_{\ell=0}^{L-1} e_\ell = 1$ eşitliğini sağlar.

4.3.2.2 Harcanan enerjinin dağılımı

Harcanan enerjinin miktarı, HEH düğümünün olasılıksal enerji harcama özelliklerine göre belirlenebilir. Bir uygulama servisi için harcanan enerjinin dağılımını, ilgili iletim hızını dikkate alarak modellemek mümkündür. Harcanan enerji (W) ile iletim hızının (T) ortak PDF'si ($f_{W,T}(w,t)$), aralarındaki korelasyon dikkate alınarak, [73] numaralı referansta çalışıldığı gibi iki değişkenli Gauss dağılımı ile ifade edilebilir. Korelasyon katsayısı ($\rho_{w,t}$) kullanılarak, harcanan enerji ile iletim hızının ortak PDF'si

$$f_{W,T}(w,t) = \frac{1}{2\pi\sigma_w\sigma_t\sqrt{1-\rho_{w,t}^2}} \exp\left(-\frac{1}{1-\rho_{w,t}^2}\left(\frac{(w-\mu_w)^2}{2\sigma_w^2} - \frac{\rho_{w,t}(w-\mu_w)(t-\mu_t)}{\sigma_w\sigma_t} + \frac{(t-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right)\right) \quad (4.26)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, w , t , μ_w , μ_t , σ_w^2 ve σ_t^2 , sırasıyla ilişkili fonksiyon değişkenleri, ortalama ve varyans değerleridir.

Uygulama servisleri ve karşılık gelen iletim hızları için harcanan enerjinin PDF'si, (4.26) numaralı denklemdeki ortak PDF kullanılarak elde edilebilir. $L-1$ adet uygulama servisi olduğu düşünüldüğünde, ℓ . uygulama servisi için harcanan enerjinin PDF'si ($f_{W_\ell}(w_\ell)$)

$$f_{W_\ell}(w_\ell) = \int_{\ell_{low}}^{\ell_{up}} f_{W,T}(w_\ell,t)dt, \quad \ell = 1, 2, \dots, L-1 \quad (4.27)$$

kullanılarak ifade edilir. Burada ℓ_{low} ve ℓ_{up} , ℓ . karşılık gelen iletim hızı aralığının sırasıyla alt ve üst sınırlarını belirtir. $\ell = 0$, servis dışı durumu temsil ettiğinden $f_{W_0}(w_0)$ dağılımı gerekli değildir. Böylece, harcanan enerji, sağlanan uygulama servisi türüne göre, herhangi bir ortak dağılım için karakterize edilir.

4.3.2.3 Harcanan enerjinin FSMC modeli

Harcanan enerjinin PDF'leri, bir önceki bölümde açıklandığı gibi tüm uygulama servisleri için elde edilir. Her bir uygulama servisine göre harcanan enerjinin

FSMC modeli, harcanan enerjinin değer aralığının $M + 1$ adet m indisi ile belirtilen örtüşmeyen bölümlene aralıklarına ayrılmasıyla oluşturulabilir, $m = 0, 1, \dots, M$. Bu durumda, ℓ . uygulama servisi için harcanan enerjinin FSMC modelinin kararlı durum olasılıkları ($v_{\ell,m}$)

$$v_{\ell,m} = \int_{a_{\ell,m}}^{a_{\ell,m+1}} f_{w_{\ell}}(w_{\ell}) dw_{\ell}, \quad m = 0, 1, \dots, M \quad (4.28)$$

ile hesaplanır. Bu olasılıklar, her ℓ değeri için toplamalarının 1'e eğit olması koğulunu sağlar, $\sum_{m=0}^M v_{\ell,m} = 1, \forall \ell, a_{\ell,0} = 0, a_{\ell,M+1} \rightarrow +\infty$. Modeldeki $M + 1$ bölümlene aralığı düşünöldüğünde, olası tüm uygulama servisleri için $L \times (M + 1)$ adet kararlı durum olasılığı ortaya çıkar. Matris formunda, kararlı durum olasılıkları şu şekilde yazılabilir:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{0,0} & v_{0,1} & \dots & v_{0,M} \\ v_{1,0} & v_{1,1} & \dots & v_{1,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{L-1,0} & v_{L-1,1} & \dots & v_{L-1,M} \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

Burada $\mathbf{V}$, harcanan enerjinin olasılık matrisini gösterir ($\mathcal{R}^{L \times (M+1)}$). Bu bölümde önerilen metodoloji ile enerji harcama profiline göre tüm olası uygulama servisleri için FSMC modelleri elde edilmiş olur.

4.3.3 Markov enerji modeli

Sistem modelindeki HEH düğümü, enerji kaynaklarından enerji hasatlar ve hedef düğümlerle haberleşir. Böyle bir sistemi kapsamlı bir şekilde tanımlamak amacıyla, sistemin uygun bir parametresinin durumu yaygın olarak Markov zincirleri kullanılarak modellenir. Enerji harcama perspektifinden bakıldığında, HEH düğümünün çalışmasını esas olarak etkileyen ilgili parametre, HEH düğümünün sonlu kapasiteli şarj edilebilir pilinde depolanan enerji seviyesi olduğu görülür. Bu nedenle, Markov modelinin durum uzayı pil enerji seviyesi (E) olarak seçilmiştir. Pil kapasitesi (A) sonlu olduğundan, farklı değerlerdeki pil enerji seviyesi, $[0, A]$ aralığındaki enerji seviyesi durumlarıyla temsil edilebilir. Pil kapasitesi, ilk ve son durumları sırasıyla boş ve tamamen dolu enerji seviyelerini temsil edecek şekilde sonlu sayıda duruma bölünür. k . durumun pil enerji seviyesi (E_k) şu şekilde ifade edilebilir

$$E_k = k \frac{A}{K}, \quad k = 0, 1, \dots, K. \quad (4.30)$$

Bu modelde, k indisi ile gösterilen $K + 1$ adet durum vardır. Böylece, sonlu durumlu Markov modelindeki durumlar bir enerji modeli oluşturmak için belirlenir.

Markov modelinde durum geçişi (durum değişikliği), HEH düğümündeki pil enerji seviyesinin değişimini ifade eder. Markov modelindeki bu değişimi gerçekleştirmek için enerji hasatlama ve harcama profillerini Markov modeline uyarlamak gerekir. Bu nedenle, Markov modeli, zaman dilimleri ile zamanın ayrıklaştırıldığı, ayrık zaman yaklaşımına dayanarak çalışır. Bir zaman diliminde enerji hasatlandığında ve/veya harcandığında bir durum geçişi meydana gelir. Yeni durum, bir sonraki zaman diliminde bağımsız olarak değişen, hasatlanan ve/veya harcanan enerji miktarına göre belirlenir. Enerji değişiminin miktarı doğrudan enerji hasatlama ve harcama profillerine bağlıdır. Bu profiller HEH düğümünün olasılıksal davranışını ifade ettiğinden, eski durumdan yeni bir duruma geçiş deterministik değil, olasılıksaldır.

Durum k 'dan durum j 'ye durum geçiş olasılığı ($\delta_{k,j}$), FSMC modellerinin kararlı durum olasılıkları kullanılarak elde edilir. Tüm kararlı durum olasılıkları, durum geçiş olasılık matrisini (Δ) oluşturur. Kararlı durum olasılıkları, hasatlanan ve harcanan enerjilerin değer aralıklarının sırasıyla $N + 1$ ve $M + 1$ adet örtüşmeyen aralıklarla ayrıldığı, önceki bölümlerdeki enerji hasatlama ve harcama profilleri kullanılarak hesaplanır. Markov enerji modelini doğru bir şekilde oluşturmak için, bölümlene aralıkları pil enerji seviyeleri ile uyumlu olarak belirlenmelidir. Bu da aralık eşiklerinin ve kuantalama enerji seviyelerinin, hasatlanan ve harcanan enerji için $N = M$ durumunda $a_{b,n} = a_{\ell,m}$ ve $\Gamma_{b,n} = \Gamma_{\ell,m}$ gibi uygun şekilde seçilmesini gerektirir. Uygulamada, harcanan enerjinin maksimum miktarı, muhtemelen hasatlanan enerji maksimum miktarından daha fazladır. Bu durumda, N değeri M değerlerinden daha büyük olur, $M > N$. Her durumda,

$$q = \Gamma_{b,n} - \Gamma_{b,n-1} = \Gamma_{\ell,m} - \Gamma_{\ell,m-1} = E_k - E_{k-1}, \quad (4.31)$$

$$k = 1, 2, \dots, K, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

koşulunun sağlanmış olması gerekir. Burada q , FSMC modelleri için kuantalama adımı büyüklüğünü gösterir. Bu koşulu sağlamak için, aralık eşik değerleri ve kuantalama enerji seviyeleri $M > N$ için sırasıyla

$$a_{\ell,m} = \begin{cases} a_{b,n} = 0, & m = n = 0 \\ a_{b,n} = (n - 0.5)q, & m = n = 1, 2, \dots, N \\ (m - 0.5)q, & m = N + 1, 2, \dots, M \\ a_{b,n} = +\infty & n = N + 1, m = M + 1, \end{cases} \quad (4.32)$$

$$\Gamma_{b,n} = \begin{cases} 0, & H_b < (n+0.5)q, & n = 0 \\ nq, & (n-0.5)q \leq H_b < (n+0.5)q, & n = 1, 2, \dots, N-1 \\ Nq, & H_b \geq (n-0.5)q, & n = N \end{cases} \quad (4.33)$$

ve

$$\Gamma_{\ell,m} = \begin{cases} 0, & W_\ell < (m+0.5)q, & m = 0 \\ mq, & (m-0.5)q \leq W_\ell < (m+0.5)q, & m = 1, 2, \dots, M-1 \\ Mq, & W_\ell \geq (m-0.5)q, & m = M \end{cases} \quad (4.34)$$

olarak ifade edilir. Burada, hasatlanan ve harcanan enerjilerin değer aralıkları, ardışık kuantalama enerji seviyeleri arasındaki farkın kuantalama adımı büyüklüğüne eşit olduğu bölümlere ayrılır. Bu bölümlere, Markov enerji modelinde durum geçişlerinin düzgün bir şekilde yapılmasına izin verir ve bu bölümlere, burada, eşit pil adımı yöntemi olarak adlandırılır.

Hem hasatlanan enerji hem de harcanan enerji için gerçekleştirilen kuantalama işlemi, sistem modelinde belli bir hataya sebep olur. Kuantalama hatası, gerçek enerji değeri ve kuantalama enerji seviyesi arasındaki farktan kaynaklanır. Bu hata, aşağıdaki gibi yazılan ortalama karesel hata (Q_γ)

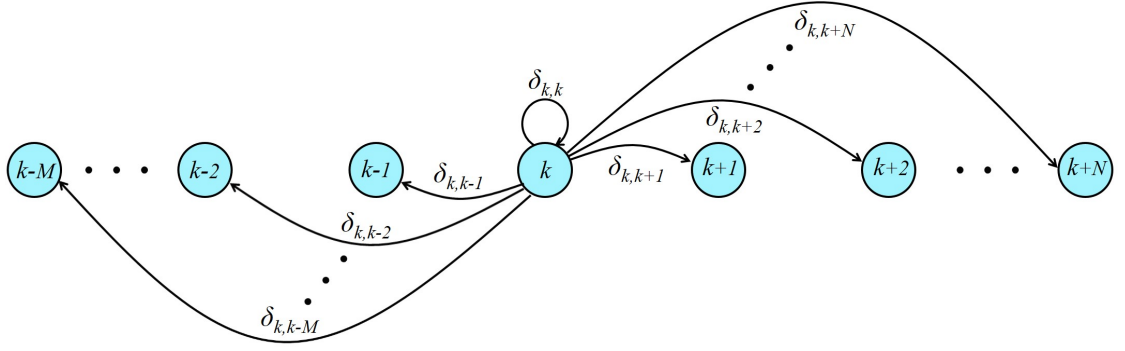
$$Q_\gamma = \sum_{n=0}^N \int_{a_{\gamma,n}}^{a_{\gamma,n+1}} (\gamma - \Gamma_n)^2 f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (4.35)$$

ile analitik olarak ifade edilebilir. Burada γ , hasatlanan enerji veya harcanan enerji için ortak bir fonksiyon değişkenini belirtir ve $f_\gamma(\gamma)$, ilgili enerjinin PDF'sidir. Tüm durumlar dikkate alınarak, toplam ortalama karesel hata (Q_{tot})

$$Q_{tot} = \sum_{b=0}^{B-1} Q_{H_b} + \sum_{\ell=0}^{L-1} Q_{W_\ell} \quad (4.36)$$

olarak belirtilir. Burada Q_{H_b} ve Q_{W_ℓ} , sırasıyla b . olası kombinasyondaki hasatlanan enerji ve ℓ . olası uygulama servisindeki harcanan enerji için ortalama karesel hata denklemlerini temsil eder.

Kuantalama adımı büyüklüğü q 'nın değeri ve buna uygun olarak N ve M değerleri doğrudan toplam karesel hatanın değerini etkiler. Bu değerler, verilen bir toplam ortalama karesel hata eşik değeri ($Q_{tot,th}$) için belirlenebilir. q , N ve M değerlerini hesaplamak için, [74] numaralı referansta verilen algorithmaya benzer bir algorithmadan



Şekil 4.2 : Markov enerji modelinin durum geçişleri.

faaydalanılabılır. Böylece, Markov enerji modeli, $Q_{tot,th}$ eşik değeriine göre istenilen doğruluk seviyesinde kullanılabılır.

Şekil 4.1’de gösterilen HEH haberleşme sistem modeli dikkate alınarak, enerji hasatlama profili ve enerji harcama profili Markov enerji modeli ile birleştirilir. Markov enerji modelinin durum geçişleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Enerji hasatlama ve enerji harcama profillerine göre r_b , $p_{b,n}$, e_ℓ ve $v_{\ell,m}$ parametrelerinden yararlanılarak durum geçiş olasılıkları elde edilebilir. Enerji varış olasılıkları r_b ve hasatlanan enerjinin FSMC modelinin kararlı durum olasılıkları $p_{b,n}$, durum geçiş olasılıklarını ileriye doğru artırırken, enerji harcama olasılıkları e_ℓ ve harcanan enerjinin FSMC modelinin kararlı durum olasılıkları $v_{\ell,m}$, durum geçiş olasılıklarını geriye doğru artırır. Sonuçta, tüm bu parametrelerin birleşimi, Markov enerji modelinin durumları arasındaki durum geçiş olasılıklarını belirler. Durum geçiş olasılıkları, K , N ve M değerlerine göre de değişir. Bir HEH sisteminin uygun bir şekilde tasarımı için, pil kapasitesi, hem hasatlanan maksimum enerji miktarından hem de harcanan maksimum enerji miktarından daha fazla olmalıdır. Bu nedenle, K değeri N ve M değerlerinden daha büyük olur. Bu bölümde, daha önce, $M > N$ kabul edildiğinden, uygun bir sistem tasarımı için $K > M > N$ olarak kabul edilebilir. Aksi halde, pil kapasitesi düşük olduğundan, hasatlanan enerji pile yeterince depolanamaz. Enerji hasatlama ve harcama süreçleri, bir zaman diliminde enerjinin hasatlanmasına ve harcanmasına izin veren bir protokole göre gerçekleştirilir. Bir not olarak, pratik uygulamalarda harcama süresinin hasatlama süresinden daha az olduğu belirtilmelidir [28]. Bu nedenle, bu protokol enerji kısıtlığı nedeniyle oluşabilecek servis kayıplarını azaltır.

Durum geçiş olasılık ifadelerini tanımlamak için, enerji varış ve harcama olasılıklarını sistem modeline göre sınıflandırmak mümkündür. Tüm enerji varış kombinasyonları

hesaba katılarak, farklı enerji seviyeleri için enerji varış olasılıkları hesaplanabilir. n . enerji seviyesinin toplam enerji varış olasılığı (Φ_n)

$$\Phi_n = \begin{cases} \sum_{b=0}^{B-1} r_b p_{b,n}, & n = 0, \dots, N \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.37)$$

ile ifade edilebilir. Ayrıca, çeşitli uygulama servisleri dikkate alınarak, enerji harcama olasılıkları farklı enerji seviyelerine göre hesaplanabilir. m . enerji seviyesinin toplam enerji harcama olasılığı (Ω_m)

$$\Omega_m = \begin{cases} \sum_{\ell=0}^{L-1} e_{\ell} v_{\ell,m}, & m = 0, \dots, M \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.38)$$

ile belirtilebilir. Bu ifadeler kullanılarak, durum k 'dan durum j 'ye Markov enerji modelinin durum geçiş olasılıkları $k = 0, 1, \dots, M-1$ için

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} \sum_{m=0}^{N-i} \Omega_m \Phi_{m+i} + \sum_{m=i+k+1}^M \Omega_m \Phi_i, & i = 0, \dots, M-k-1 \\ \sum_{m=0}^{N-i} \Omega_m \Phi_{m+i}, & i = M-k, \dots, N \\ \sum_{m=-i}^M \Omega_m \Phi_{m+i}, & i = -1, \dots, -k \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.39)$$

olarak ifade edilir. Burada j değeri, $j = k + i$ olarak tanımlanır. HEH düğümünde bir uygulama servisi için yeterli miktarda enerji olmadığında enerji tüketilmektedir. Bu nedenle, (4.39) numaralı denkleminin ilk satırı ikinci bir toplama terimini içerir. Bir not olarak, n 'nin N 'den daha büyük değerleri için Φ_n 'nin değerlerinin (4.37) numaralı denkleme göre sıfır olduğu belirtilmelidir, $\Phi_n = 0, \forall n > N$.

Durum geçiş olasılıkları, $k = M, M+1, \dots, K-N$ için

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} \sum_{m=0}^{N-i} \Omega_m \Phi_{m+i}, & i = 0, \dots, N \\ \sum_{m=-i}^M \Omega_m \Phi_{m+i}, & i = -1, \dots, -M \\ 0, & \text{diğer durumlar,} \end{cases} \quad (4.40)$$

$k = K-N+1, \dots, K-1$ için

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} \sum_{m=0}^{N-i} \Omega_m \Phi_{m+i}, & i = 0, \dots, K-k-1 \\ \sum_{m=0}^{N-i} \Omega_m \Phi_{m+i} + \Omega_0 \Phi_N, & i = K-k \\ \sum_{m=-i}^{N-i} \Omega_m \Phi_{m+i}, & i = -1, \dots, -M \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.41)$$

olarak belirtilir. Burada m 'nin M 'den daha büyük değerleri için Ω_m 'nin değerleri (4.38) numaralı denklemde belirtildiği gibi sıfır olur, $\Omega_m = 0, \forall m > M$. Son olarak $k = K$ için ise durum geçiş olasılıkları

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} \sum_{m=0}^N \Omega_m \left(\sum_{n=m}^N \Phi_n \right), & i = 0 \\ \sum_{m=-i}^{N-i} \Omega_m \Phi_{m+i}, & i = -1, \dots, -M \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.42)$$

olarak yazılır. $k = M, M+1, \dots, K-N$ için Şekil 4.2'de gösterilen Markov enerji modeline göre durum k 'nın geçişleri, durum $k+N$ 'ye doğru ileri yönde ve durum $k-M$ 'ye doğru ise geri yönde gerçekleşerek HEH düğümünün pilindeki enerji seviyesinin net değişimini ifade etmektedir.

4.4 Enerji Kesintisi, Enerji Kıtlığı ve Servis Kaybı Olasılıkları

Bir HEH haberleşme sisteminin performansı, önceki bölümde sunulan Markov enerji modeline göre değerlendirilebilir. Enerji kesintisi olasılığı (P_{outage}), enerji kıtlığı olasılığı ($P_{shortage}$) ve servis kaybı olasılığı (P_{loss}) parametreleri, sistem performansını detaylı olarak karakterize etmek için kullanılabilir. Enerji kesintisi olasılığı, HEH düğümünün pilinde enerji bulunmama olasılığını temsil eder. Enerji kıtlığı olasılığı, pildeki enerji miktarının, uygulama servisleri temelinde olası enerji harcama ihtiyaçlarının tümünü karşılamak için yetersiz olabildiği enerji seviyesinde olma olasılığını verir. Servis kaybı olasılığı ise, enerji kesintisi durumu veya enerji kıtlığı durumundan dolayı bir uygulama servisinin gerçekleştirilememe olasılığı olarak tanımlanır.

Markov zincirinin yapısı, HEH haberleşme sisteminin bu parametrelerini analitik olarak elde etmemizde bize yardımcı olur. Markov enerji modeli için durum geçiş olasılıkları, (4.39), (4.40), (4.41) ve (4.42) numaralı denklemlerde ifade edilmektedir. Durum geçiş olasılıkları verildiğinden, tüm enerji seviyeleri için kararlı durum olasılıkları elde edilebilir. Markov enerji modelindeki $k = M, M+1, \dots, K-N$ durumları için denge denklemleri

$$(\delta_{k,k-M} + \dots + \delta_{k,k-1} + \delta_{k,k+1} + \dots + \delta_{k,k+N})\pi_k = \delta_{k-N,k}\pi_{k-N} + \dots + \delta_{k-1,k}\pi_{k-1} + \delta_{k+1,k}\pi_{k+1} + \dots + \delta_{k+M,k}\pi_{k+M} \quad (4.43)$$

olarak ifade edilir. Burada π_k , pil enerji seviyesi durumu k 'nın kararlı durum olasılığıdır. Tüm durumları içeren kararlı durum olasılıklarının toplamı sıfırdır, $\sum_{k=0}^K \pi_k = 0$. Markov enerji modelindeki $K + 1$ durum dikkate alındığında, kararlı durum olasılıkları genelleştirilmiş formda

$$\pi_k = \sum_{j=k-N}^{k+M} \delta_{j,k} \pi_j = \sum_{j=0}^K \delta_{j,k} \pi_j \quad (4.44)$$

olarak yazılabilir. Burada, $k - N$ ve $k + M$ sırasıyla 0 ve K ile sınırlıdır. Ayrıca, durum geçiş olasılıklarının değerleri, durumlar arasında geçiş yoksa sıfır ($\delta_{j,k} = 0$) olarak tanımlanır. Kararlı durum olasılıklarının satır vektörü $\boldsymbol{\pi}$ olarak ve durum geçiş olasılıklarının matrisi $\boldsymbol{\Delta}$ olarak tanımlandığında, bunlar arasındaki ilişki $\boldsymbol{\pi}\boldsymbol{\Delta} = \boldsymbol{\pi}$ olarak ifade edilebilir. Bu ifadenin

$$\boldsymbol{\pi}\boldsymbol{\Delta} = \Lambda\boldsymbol{\pi} \quad (4.45)$$

eşitliğini karşıladığı görülmektedir. Burada Λ , sayısal bir parametredir. (4.45) numaralı denklemdeki $\boldsymbol{\pi}$ ve Λ , sırasıyla $\boldsymbol{\Delta}$ 'nın özvektörü ve $\boldsymbol{\Delta}$ 'nın özdeğeri olarak tanımlanır.

Markov enerji modeline göre, özdeğeri 1 olarak belirtilir, $\Lambda = 1$, ve $\boldsymbol{\Delta}$ 'nın özvektörleri, özdeğer ayrıştırması yapılarak hesaplanır. Durum geçiş olasılıklarının matrisi şu şekilde ayrıştırılır:

$$\boldsymbol{\Delta} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \mathbf{X}. \quad (4.46)$$

Burada $\mathbf{X}^T$, $\mathbf{X}$ matrisinin transpozunu gösterir. $\mathbf{X}$ ve $\mathbf{Y}$ matrisleri, sırasıyla özvektörleri ve özdeğerleri verir. Kararlı durum olasılıkları, özdeğerin ilişkili değeri ($\Lambda = 1$) için $\mathbf{X}$ matrisinin sütunu kullanılarak elde edilir. Diğer taraftan, (4.45) numaralı denklemde matris işlemleri kullanılarak, kararlı durum olasılıkları vektörü

$$\boldsymbol{\pi} = \mathbf{O}(\boldsymbol{\Delta} + \mathbf{U})^{-1} \quad (4.47)$$

ile de elde edilebilir. Burada $\mathbf{O}$, bütün elemanları 1 olan bir vektördür. $\mathbf{U}$ ise, köşegen elemanları 0, diğer bütün elemanları 1 olan bir matristir.

Şimdi, pil enerji seviyelerinin kararlı durum olasılıkları $\boldsymbol{\pi} = [\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_K]$ vektörü ile bilindiğinden, enerji kesintisi olasılığı, enerji ktlığı olasılığı ve servis kesintisi olasılığının hepsi birden elde edilebilir. HEH düğümünün pili boş olduğunda, pil enerji

seviyesinin durumu sıfırdır, $k = 0$. Bu durumda, enerji kesintisi, pil enerji seviyesinin E_0 ve pil enerji seviyesi durumunun kararlı durum olasılığının π_0 olması anlamına gelir. Böylece, enerji kesintisi olasılığı

$$P_{outage} = \pi_0 \quad (4.48)$$

olarak ifade edilebilir. Bir uygulama servisi gerçekleştirmek için, HEH haberleşme düğümünün pili, uygulama servisinin ilgili enerji harcamasını karşılayacak, yeterli miktarda enerjiye sahip olmalıdır. Markov enerji modeli için, $m = M$ olması durumunda maksimum miktarda enerji harcanır. Bu nedenle, pil enerji seviyesi E_M 'den fazla olduğunda, yani pil enerji seviyesi durumlarının $\{M, M+1, \dots, K\}$ kümesinin elemanları olduğu durumlarda, tüm olası enerji harcama talepleri için yeterli miktarda enerji vardır. Aksi takdirde, pil enerji seviyesi, pilin az miktarda enerjiye sahip olduğu ancak E_M enerji seviyesine ulaşmak veya bu değeri geçmek için yeniden şarj edilmesi gerektiği, enerji kıtlığı durumunu gösterir. Enerji kıtlığı olasılığı, aşağıdaki gibi ifade edilebilecek pil enerji seviyesi durumlarının $\{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{M-1}\}$ kümesindeki kararlı durum olasılıklarını içerir

$$P_{shortage} = \sum_{k=1}^{M-1} \pi_k. \quad (4.49)$$

Sonuçta, HEH haberleşme düğümünün pil enerji seviyesinin 0 ile $M-1$ arasındaki durumları, yeterli miktarda enerji olmadığından servis kaybına neden olabilir. Bununla birlikte, servis kaybının olması için başka bazı şartların da oluşması gerekir. Her şeyden önce, pil enerji seviyesinin belirtilen durumlarında servis kaybı meydana gelmesi için, bir uygulama servisi sağlamak amacıyla bir enerji harcama talebinin olması gerekir. Aksi halde, bir servis kaybından söz etmek mümkün değildir. Ayrıca, bir uygulama servisinin gerçekleşmesi için gereken enerji harcama miktarı da önemlidir. Servis kaybı, pil enerji seviyesi, ilgili uygulama servisini gerçekleştirmek için gereken enerji harcama miktarından daha az olduğunda ortaya çıkar. Pil enerji seviyesinin, önceki bölümde açıklanan protokole göre belirlendiğini burada belirtmek gerekir. Bu koşullar altında, durum k için servis kaybı olasılığı ($P_{loss,k}$)

$$P_{loss,k} = [(\Phi_0\Omega_{k+1} + \Phi_0\Omega_{k+2} + \dots + \Phi_0\Omega_M) + (\Phi_1\Omega_{k+2} + \Phi_1\Omega_{k+3} + \dots + \Phi_1\Omega_M) + \dots + (\Phi_N\Omega_{k+N+1} + \Phi_N\Omega_{k+N+2} + \dots + \Phi_N\Omega_M)] / (e_1 + e_2 + \dots + e_{L-1}) \quad (4.50)$$

olarak yazılır. Burada k değeri, $k = 0, 1, \dots, M-1$ olarak tanımlanır. Bu nedenle, tüm olasılıkların toplamı bir HEH haberleşme düğümünün servis kaybı olasılığını verir,

$P_{loss} = \sum_{k=0}^{M-1} P_{loss,k}$. Durum k 'nin ilgili değerlerine göre (4.50) numaralı denklemde gerekli düzenlemeler yapılarak, servis kaybı olasılığı

$$P_{loss} = \frac{1}{1 - e_0} \sum_{k=0}^{M-1} \pi_k \left[\sum_{n=0}^N \Phi_n \left(\sum_{m=k+n+1}^M \Omega_m \right) \right] \quad (4.51)$$

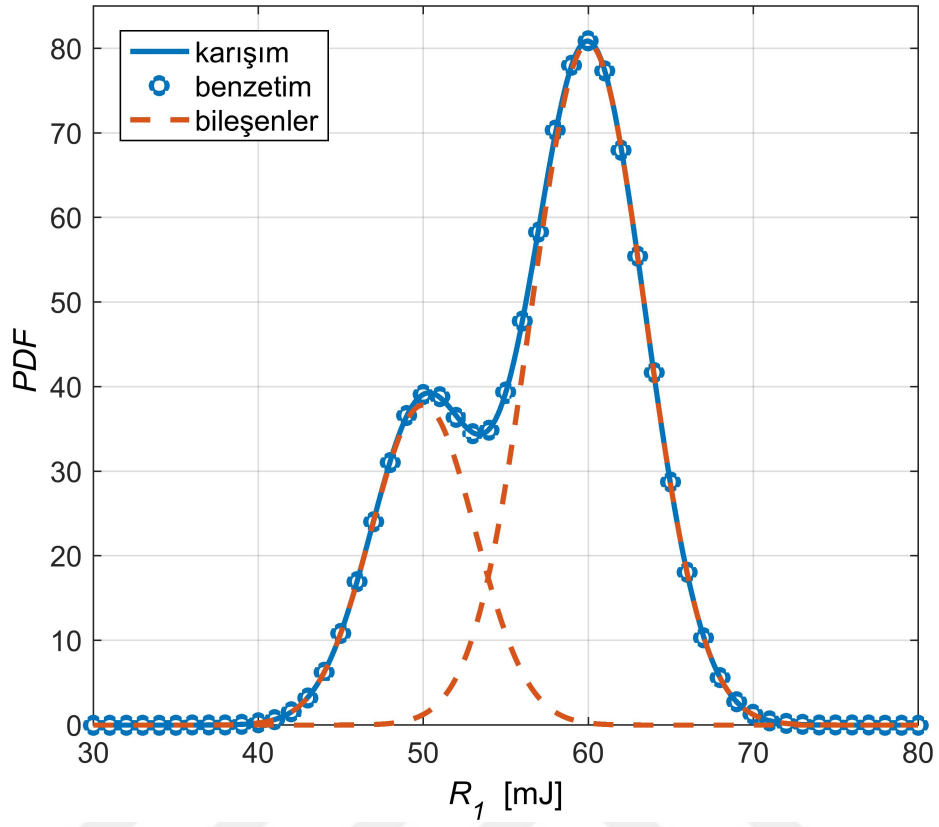
olarak türetilir. Burada e_0 , hiçbir enerji harcamasının olmadığı durumun olasılığını, $1 - e_0$ ise ℓ 'nin 1'den $L - 1$ 'e kadar olan değerleri için toplam enerji harcama olasılığını ifade eder, $\sum_{\ell=1}^{L-1} e_\ell$. Böylece, enerji kesintisi, enerji kıtlığı ve servis kaybı olasılıkları, kararlı durum olasılıklarına bağlı olarak (4.48), (4.49) ve (4.51) numaralı denklemlerle analitik olarak hesaplanır.

4.5 Sayısal Sonuçlar

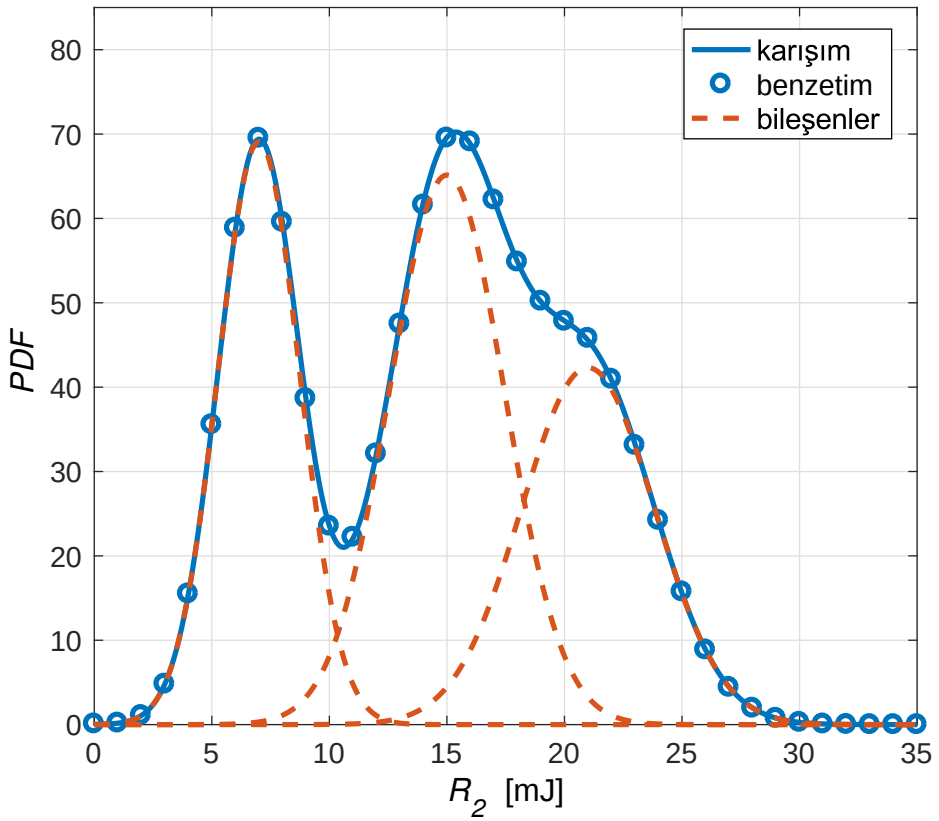
Bu bölümde, sistem modeline göre, önerilen Markov enerji modelinin metodolojisinin sayısal çalışmalarla gösterilmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda, bir HEH haberleşme sisteminin, enerji kesintisi olasılığı, enerji kıtlığı olasılığı ve servis kaybı olasılığı ile sayısal olarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bir HEH haberleşme sisteminin tasarımı için çok önemli olan sistem parametrelerinin etkileri üzerine sayısal sonuçlar sunulmuştur.

Sayısal çalışmalarda, önerilen Markov enerji modeli hakkında yeterince bilgi verebilmek amacıyla, HEH haberleşme sisteminde üç enerji kaynağı olduğu varsayılmıştır, $S = 3$. Bu enerji kaynaklarından alınan enerjiler, EM algoritması kullanılarak GM modelleri ile modellenen, rastgele dağılımlara sahiptir. Sayısal çalışmalarda kullanılan GM modeli parametrelerinin değerleri: 1. enerji kaynağı için $u_1 = [0.3, 0.7]$, $\mu_1 = [50, 60]$ mJ, $\sigma_1^2 = [10, 12]$ (mJ)², 2. enerji kaynağı için $u_2 = [0.3, 0.4, 0.3]$, $\mu_2 = [7, 15, 21]$ mJ, $\sigma_2^2 = [3, 6, 8]$ (mJ)² ve 3. enerji kaynağı için ise $u_3 = [0.2, 0.15, 0.2, 0.15, 0.1, 0.2]$, $\mu_3 = [13, 19, 23, 25, 30, 46]$ mJ, $\sigma_3^2 = [5, 4, 7, 5, 8, 10]$ (mJ)² vektörleriyle, sırasıyla u_{s,c_s} , μ_{s,c_s} ve σ_{s,c_s}^2 parametrelerinin vektörleri olarak, verilmiştir. Bu parametrelere göre, $s = 1$, $s = 2$ ve $s = 3$ için alınan enerjilerin PDF'leri, sırasıyla Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5'de gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, $C_1 = 2$, $C_2 = 3$, ve $C_3 = 6$ olarak farklı bileşen yoğunlukları ile modellenen alınan enerjilere, farklı enerji değer aralıklarına ve bunlara karşılık gelen olasılıklara sahiptirler.

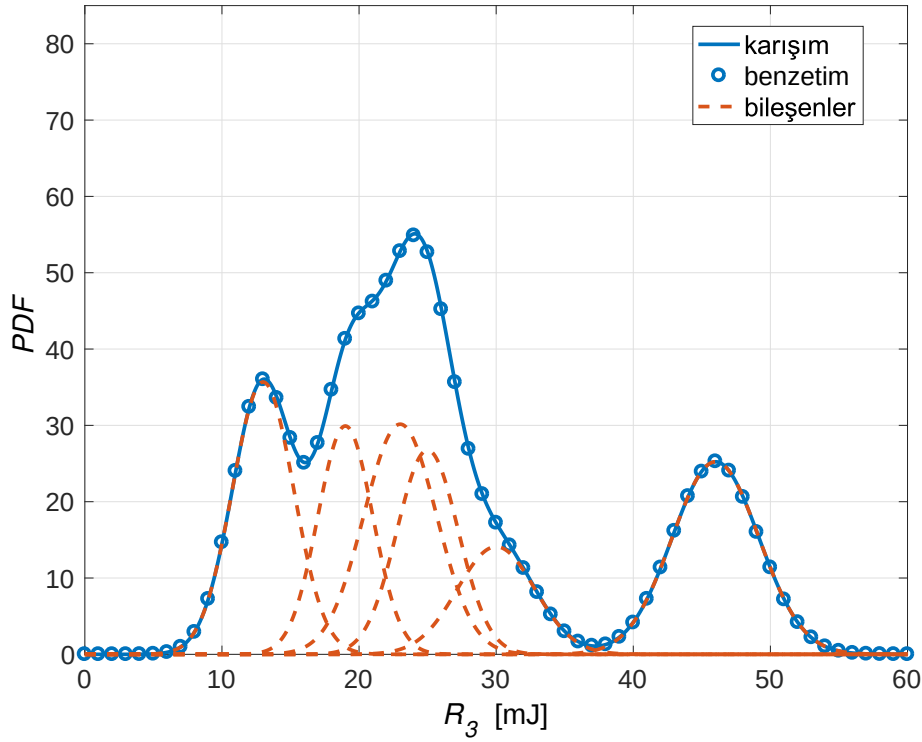
Hasatlanan enerji, bu alınan enerjilerin bir fonksiyonudur, yani $H_b = g_b(R_1, R_2, R_3)$. Genellik kaybı olmadan, b . kombinasyon için $H_b = R_1 + R_2 + R_3$ olduğu varsayılabilir.



Şekil 4.3 : İki bileşenli alınan enerji R_1 'in PDF'si, $s=1$, $C_1=2$.



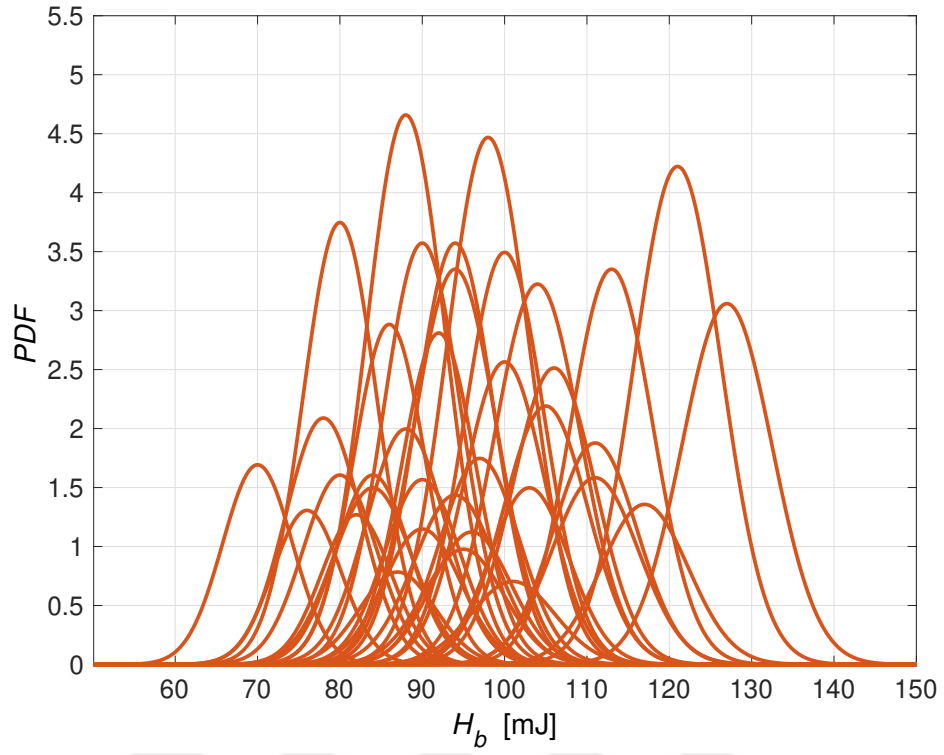
Şekil 4.4 : Üç bileşenli alınan enerji R_2 'nin PDF'si, $s=2$, $C_2=3$.



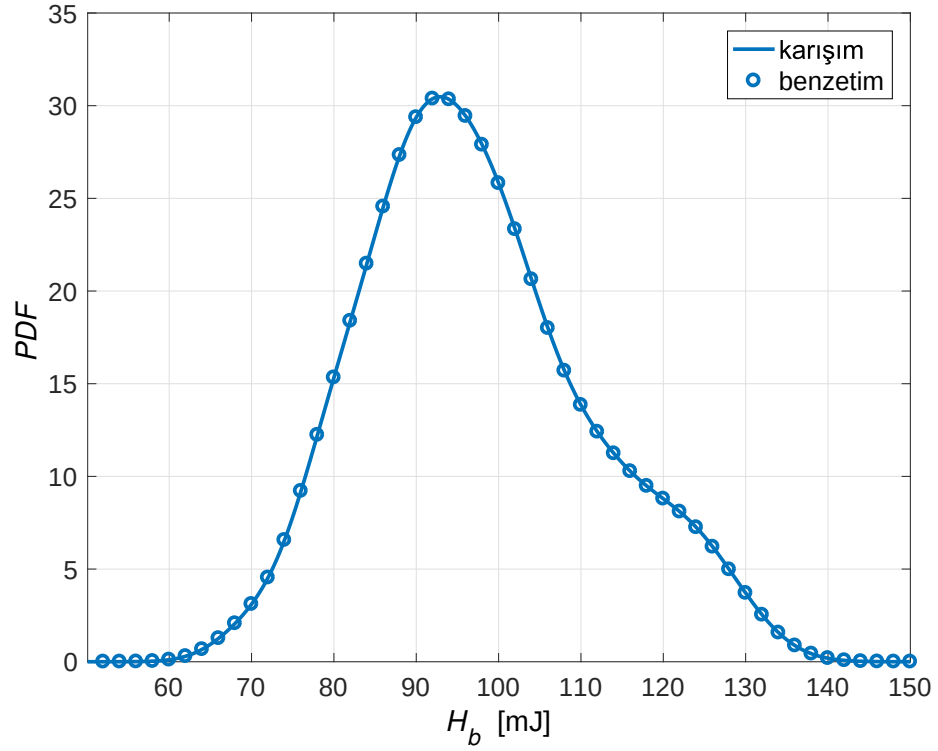
Şekil 4.5 : Altı bileşenli alınan enerji R_3 'ün PDF'si, $s=3$, $C_3=6$.

b. kombinasyon için bileşen ortak yoğunlukların sayısı $C_b = C_1 C_2 C_3 = 36$ olarak hesaplanır. Her biri alınan enerjilerin birer bileşen yoğunluğunu içeren hasatlanan enerjinin bileşen yoğunlukları, Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bileşen yoğunlukları farklı ortalama ve varyans değerlerine sahiptirler. Bu bileşen yoğunlukları, ağırlıklı yoğunlukların toplamıyla, hasatlanan enerjiyi oluştururlar. Alınan enerjilerin enerji değer aralıklarına uygun olarak, hasatlanan enerji H_b 'nin enerjisinin 60 ile 140 mJ arasında değiştiği Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Alınan enerjilerin PDF'lerinin yanı sıra hasatlanan enerjinin PDF'sinin de benzetim sonuçlarıyla doğrulandığı görülmüştür.

Sistemdeki üç enerji kaynağından elde edilen hasatlanan enerjilere dayanarak, kararlı durum olasılıkları (4.22) numaralı denkleme göre hesaplanır. Bu üç kaynak için, örnek



Şekil 4.6 : b . kombinasyon için hasatlanan enerji H_b 'nin bileşen yoğunlukları, $C_b = 36$.



Şekil 4.7 : b . kombinasyon için hasatlanan enerji H_b .

olarak, hasatlanan enerjinin olasılık matrisi $\mathbf{P} (\mathcal{R}^{8 \times (N+1)})$

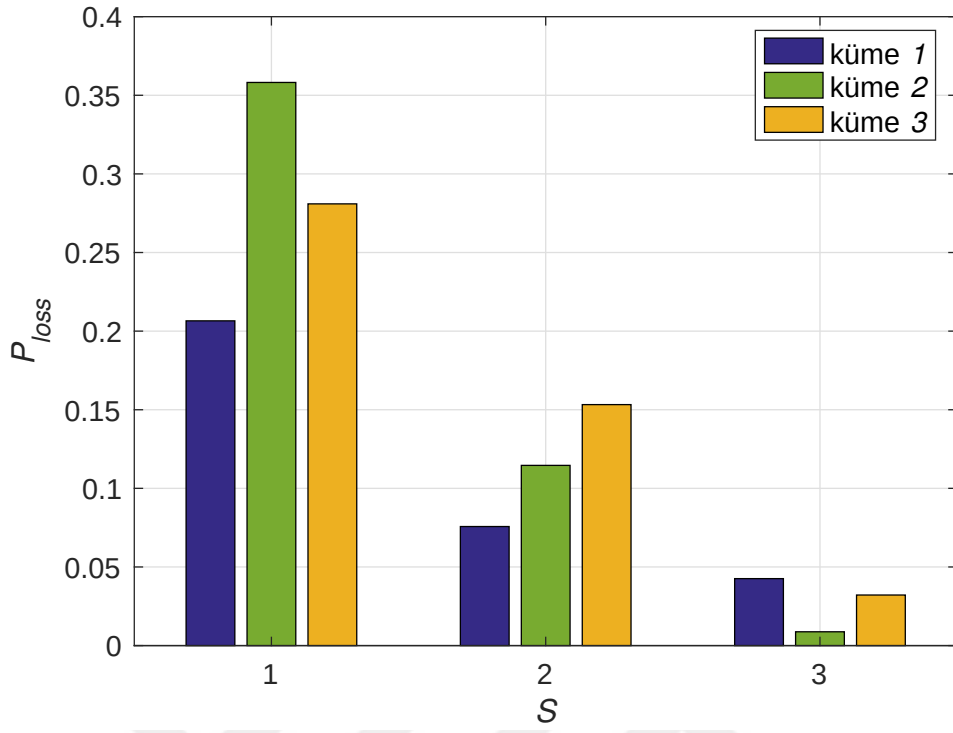
$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{na,0} & p_{na,1} & \dots & p_{na,N} \\ p_{rf,0} & p_{rf,1} & \dots & p_{rf,N} \\ p_{vb,0} & p_{vb,1} & \dots & p_{vb,N} \\ p_{sl,0} & p_{sl,1} & \dots & p_{sl,N} \\ p_{rv,0} & p_{rv,1} & \dots & p_{rv,N} \\ p_{rs,0} & p_{rs,1} & \dots & p_{rs,N} \\ p_{vs,0} & p_{vs,1} & \dots & p_{vs,N} \\ p_{rvs,0} & p_{rvs,1} & \dots & p_{rvs,N} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

olarak yazılabilir. Burada olasılık indisi na , enerji hasatlanmayan durumları temsil eder. rf , vb ve sl , sırasıyla RF, titreşim ve güneş ışığı enerjisi için tek bir enerji türündeki enerji varış durumlarını temsil eder. rv , rs ve vs , enerji varışlarının ortaklaşa iki kaynaktan meydana geldiği hibrid enerji varış durumlarını gösterir. rvs ise tüm enerji kaynaklarından gerçekleşen hibrit enerji varış durumlarını temsil eder.

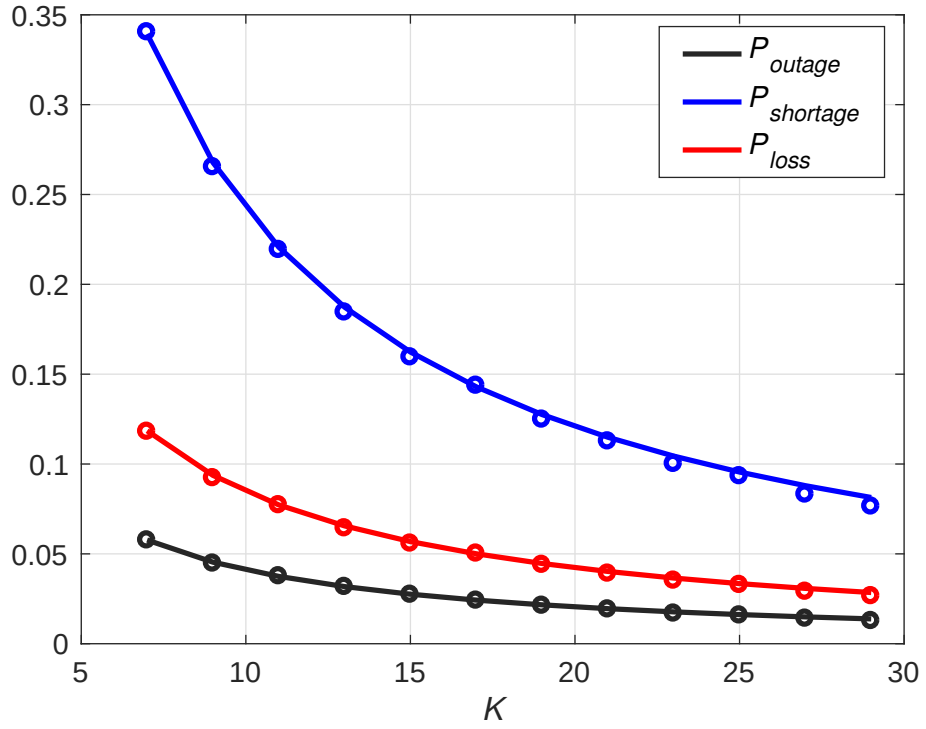
Diğer yandan, aynı işlem enerji harcama profiline de uygulanabilir. Örnek olarak, ses (voi), görüntü (vid), data hızı-1 ($dr1$) ve data hızı-2 ($dr2$) gibi dört farklı uygulama servisi için, harcanan enerjinin olasılık matrisi $\mathbf{V} (\mathcal{R}^{5 \times (M+1)})$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{nss,0} & v_{nss,1} & \dots & v_{nss,M} \\ v_{voi,0} & v_{voi,1} & \dots & v_{voi,M} \\ v_{vid,0} & v_{vid,1} & \dots & v_{vid,M} \\ v_{dr1,0} & v_{dr1,1} & \dots & v_{dr1,M} \\ v_{dr2,0} & v_{dr2,1} & \dots & v_{dr2,M} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

olarak ifade edilebilir. Burada olasılık indisi nss , servis dışı olunan durumları belirtir. Not olarak, bu örneklerin daha fazla sayıda çoklu enerji kaynakları ve daha fazla sayıda uygulama servisleri ile kolayca genişletilebileceği görülebilmektedir. Farklı üç parametre kümesine sahip üç enerji kaynağına göre elde edilen servis kaybı olasılığı değerleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Ayrıca, aynı parametre kümesi için, enerji kesintisi olasılığı, enerji kıtlığı olasılığı ve servis kaybı olasılığı değerlerinin pil kapasitesine göre değişimi Şekil 4.9’da gösterilmiştir. HEH haberleşme düğümünün performansı, r_s , r_b , $p_{b,n}$, e_ℓ , $v_{\ell,m}$, S ve K gibi sistem parametrelerine göre değişmektedir.



Şekil 4.8 : Üç farklı parametre kümesi için enerji kaynaklarının sayısına göre servis kaybı olasılığının değişimi.



Şekil 4.9 : Pil kapasitesine göre enerji kesintisi, enerji kıtlığı ve servis kaybı olasılıklarının değişimi.

4.6 Çıkarımlar

Bu çalışmada, çoklu hedef düğümleri ve bu düğümlerle haberleşen bir HEH düğümünün oluşturduğu HEH iletişim sistemlerini modellemek için kapsamlı bir metodoloji sunulmuştur. Böyle bir sistemde, HEH düğümünün enerji gereksinimini karşılamak üzere çoklu türde enerji kaynaklarından faydalanılmıştır. HEH düğümünün enerji varış ve enerji harcama profillerini tanımlamak için GMM ve FSMC modelleri kullanılmıştır. Enerji hasatlama profili ve enerji harcama profili dikkate alınarak, HEH düğümü için Markov enerji modeli oluşturulmuştur. Önerilen Markov enerji modeli, HEH haberleşme sisteminin performansının değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu amaçla, enerji kesintisi, enerji kıtlığı ve servis kaybı olasılıkları için analitik ifadeler çıkarılmıştır. Sayısal sonuçlarda, alınan ve hasatlanan enerjilerin PDF'leri için GMM'ler sunulmuş ve bunların doğru olarak modellendiği gösterilmiştir. Ayrıca, hem enerji kaynaklarının sayısının hem de pil kapasitesinin artışının servis kaybı olasılığını azalttığı ve farklı parametre kümelerinin HEH haberleşme sisteminin performansını önemli ölçüde değiştirdiği gösterilmiştir. Sonuçta, tüm parametrelerin etkileri, HEH sistem tasarımı açısından, önerilen Markov enerji modeli ile değerlendirilebilmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, kablosuz haberleşme ağlarının önümüzdeki yıllarda çok büyüyeceği ve buna bağlı olarak bu ağları oluşturan kablosuz haberleşme cihazlarının enerji ihtiyacının da önemli oranda artacağı düşünüülerek, enerji hasatlama üzerine detaylı bir araştırma yapılmıştır. Enerji hasatlama konusunda birçok açık araştırma alanı bulunmakla birlikte, literatürde enerji hasatlama sistem modellerini araştıran yeterli ve kapsamlı bir çalışma bulunmadığı görülmüştür. Enerji anlamında kendi kendine yetebilen ve kendi işlevini sürdürebilen ağların geliştirilebilmesine katkı sağlamak amacıyla, enerji hasatlama konusu, sistem perspektifinden ele alınarak çalışmalar yapılmıştır. Kablosuz haberleşme cihazlarının bazı durumlarda herhangi bir enerji depolama birimi olmadan da çalıştırılabilmesi mümkün olsa da çoğu durumda enerji depolama birimi kullanımından kaçınmak mümkün olmamaktadır. Bu sebeple çalışmalarda, RF işaretinden enerji hasatlayan kablosuz haberleşme düğümünün sonlu kapasiteli şarj edilebilir bir pile sahip olması uygun görülmüştür.

Öncelikle, RF işaretinin haberleşme sistemlerinin temel bir unsuru olması sebebiyle, RF işaretinden enerji hasatlama üzerine yoğunlaşmıştır. RFEH için temel sistem modelleri olarak, gerçek hayatta enerji alışı ve haberleşmenin aralıklı olarak gerçekleşebileceği durumu dikkate alınarak, iki adet pil şarj etme amaçlı ve iki adet haberleşme amaçlı olmak üzere toplam dört farklı enerji hasatlama sistem modeli önerilmiştir. Bu modellerde, RF enerji kaynağından çıkan RF işaretinin RFEH düğümüne gelinceye kadar uğradığı değişimin, bilgi iletimi açısından olduğu gibi enerji iletimi açısından da önemli olduğu düşünülmüştür. Bu sebeple, herhangi bir kablosuz kanal dağılımı için RFEH düğümünde hasatlanan enerji, literatürde ilk kez enerji hasatlamada kullanılan FSMC modeli ile modellenmiş ve bir enerji kanalı elde edilmiştir. Aynı zamanda burada, literatürden farklı olarak, gerçeğe uygun şekilde belli bir zaman diliminde farklı miktarlarda enerji elde edilebilme durumu modellenmiştir. İlk pil şarj etme modelinde, kablosuz haberleşme cihazının pil enerji seviyesi, elde edilen FSMC modeli kullanılarak, bir Markov zinciri ile modellenmiş ve

temel RFEH modeli oluşturulmuştur. Önerilen diğer sistem modellerinde pil enerji seviyesinin modellenmesi, temel RFEH modelinin üzerine inşa edilmiştir. Önce, enerji kaynağından RF işaretinin alınma durumunu tanımlayan RF varış olasılığı Poisson dağılımı ile belirlenerek temel RFEH modeline eklenmiştir. Daha sonra, RFEH düğümünün enerji harcamasına sebep olan haberleşme durumunu tanımlayan etkinlik varışı olasılığı belirlenerek hem temel RFEH modeli hem de pil şarj etme amaçlı diğer RFEH modeli genişletilmiştir. Böylece, dört adet RFEH sistem modelinin herbiri için FSMC tabanlı Markov modelleri elde edilmiş ve hepsini kapsayan model genelleştirilmiş RFEH modeli olarak isimlendirilmiştir. Bu modeller ile, RFEH düğümüne gelen RF işaretinden hasatlanan enerji ve RFEH düğümünün haberleşmesi sebebiyle harcanan enerji modelleri tek bir Markov modelinde birleştirilmiştir. Önerilen modellerle oluşturulan bir RFEH sistemini analiz etmek amacıyla, pil şarj etme modelleri için pil şarj etme süresinin, haberleşme modelleri için ise etkinlik kaybı olasılığının kapalı formda ifadeleri türetilmiştir. Sayısal çalışmalarda, literatürde pratik olarak gerçekleştirilen RFEH devre çalışmalarına dayanan, hasatlanan gücün değiştirilmiş sigmoid fonksiyonu modeli ve Rayleigh sönümleme kanalı kullanılmıştır. Pil şarj etme modeli için elde edilen sayısal sonuçlarda, pil şarj etme süresinin artan RF varış olasılığının artışı ile üssel olarak azaldığı farklı pil kapasite değerleri için gösterilmiştir. Yine pil şarj etme süresinin pil kapasitesinin artışı ile doğrusal olarak arttığı farklı RF varış olasılığı değerleri için gösterilmiştir. Böylece, pil şarj etme modellerinde, RF varış olasılığı ve pil kapasitesinin etkileri açıkça görülmüştür. Haberleşme modeli, yani genelleştirilmiş RFEH modeli, için elde edilen sayısal sonuçlarda ise etkinlik kaybı olasılığının artan RF varış olasılığı ile doğrusal olarak ve artan pil kapasitesi ile üssel olarak azaldığı, artan etkinlik varış olasılığı ve artan harcanan enerji miktarı ile logaritmik olarak arttığı farklı sistem parametre değerleri için gösterilmektedir. Böylece, haberleşme modellerinde, RF varış olasılığı, etkinlik varış olasılığı, harcanan enerji miktarı ve pil kapasitesinin etkileri açıkça görülmüştür. Ayrıca, farklı kanal modellerinin etkilerini görmek amacıyla, daha kasamlı bir model olan Nakagami sönümleme kanalının farklı sönümleme parametreleri için sayısal çalışmalar yapılmış ve sönümleme parametresine göre pil şarj süresinin dağılımının değiştiği gösterilmiştir. Kısaca, RF işaretinden enerji hasatlayabilen

haberleşme sistemlerinin parametrik olarak tasarlanabildiği ve performanslarının analiz edilebildiği RFEH modelleri sunulmuştur.

Çalışmaların devamında, RF işareti yanında diğer enerji kaynaklarının kullanılmasının enerji hasatlamının haberleşme sistemlerinde kullanılabilirliğini artıracak düşüncesi ile HEH üzerinde yoğunlaşmıştır. Bununla beraber, enerji kaynak sayısının artması ve bu kaynakların rastgele dağılımlara sahip olabilme durumunun enerji hasatlama anlamında zorluklar oluşturduğu görülmüştür. Bu zorlukları aşmak amacıyla öncelikle, EHM'ler, enerji birleştirici ve enerji depolayıcıdan oluşan, bir hibrit enerji hasatlayıcı yapısı ve HEH sistem modeli önerilmiştir. Bu modele dayanarak, enerji kaynakları enerji tiplerine göre ESC'lere ayrılmış ve her bir EHM belli bir enerji tipini hasatlanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Enerji hasatlama modülleri tarafından hasatlanan enerjilerin dağılımlarının, ESC'lerden alınan enerjilere bağlı olarak rastgele dağılımlı olacağı öngörülmüştür. Farklı tiplerde enerjilerin farklı dağılım modelleri ile çalışmak yerine, hasatlanan enerjilerin tümü GM modelleri ile modellenmiştir. Her enerji tipi için farklı parametrelere sahip olan bu dağılımların GM parametreleri, bir ML problemi tanımlanarak EM algoritması yardımıyla belirlenmiştir. Böylece, çoklu enerji kaynaklarına sahip HEH sistemleri tarafından hasatlanan enerjilerin dağılımları karışım modeli olarak tek bir formda modellenmiştir. Bu enerjilerin, yine ESC'lerden alınan enerjilere bağlı olarak, birbirinden bağımsız veya birbirleriyle korelasyonlu olabilecekleri gerçeğinden hareketle, her iki durum için ortak dağılım ifadeleri elde edilmiştir. Bu ifadeler, hasatlanan enerjilerin GM modellerinin bileşen yoğunluklarının oluşturduğu ortak dağılımların, yani bileşen ortak yoğunlukların, toplamı olarak düzenlenmiştir. Gauss dağılımların özelliklerinden faydalanılarak yapılan bu düzenleme ile bu dağılımlara bağlı olarak yapılan işlemleri kolaylaştırmıştır. Bu noktadan sonra, enerji birleştiricide birleştirilen enerjinin, enerji depolayıcıda ise depolanan enerjinin dağılımlarının elde edilmesi için gerekli çalışmalar yapılmıştır. Depolanan enerji için, literatürde yer alan pilin eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Bu anlamda, çoklu yapıya uygun olarak önerilen GM modeli tabanlı yaklaşım ile HEH sistemlerinde istenilen dağılımlar elde edilmiştir. Sayısal çalışmalarda, ikişer bileşen yoğunluğuna sahip hasatlanan enerjilerin, bileşen yoğunlukları, marjinal PDF'leri ve ortak PDF'leri gösterilmiş ve tek bir Gauss dağılımı ile karşılaştırılmıştır. Hasatlanan enerjilerin birbirinden

ayrık ikişer bileşenleri olması sebebiyle, ortak PDF'teki olasılıkların dört bölgede yoğunlaştığı üç boyutlu şekilde görülmüştür. Enerji birleştiricide birleştirilen enerji için elde edilen dağılım, hasatlanan enerjilerin hem bağımsız hem de korelasyonlu durumları dikkate alınarak bileşen yoğunluklarıyla beraber gösterilmiştir. Korelasyon sebebiyle birleştirilen enerjinin varyansının, bağımsız duruma göre arttığı görülmüştür. Yine pilin eşdeğer devre modeli ve modeldeki gerçeğe uygun parametrelere göre elde edilen, şarj etme verimliliğinin ve depolanan enerjinin PDF'leri gösterilmiştir. Pil dahili direncinin artışının hem şarj etme verimliliğini ve hem de depolanan enerjiyi azalttığı görülmüş, pil dahili direncinin aynı değeri için birleştirilen ve hasatlanan enerjilerin PDF'leri gösterilmiştir. Bu sonuçlarla, GM modeli ile HEH sistemlerinde uygun modelleme yapılabildiği ve aynı zamanda fiziksel devre parametrelerine göre sistem performansının belirlenebileceği gösterilmiştir.

HEH üzerine yapılan bu çalışmalardan sonra, HEH'nin haberleşme sistemlerinde kullanımı konusunda araştırma yapılmıştır. Çoklu enerji kaynaklarından ihtiyacı olan enerjiyi hasatlayan ve bu enerjiyi hedef düğümlerle haberleşmek için kullanan bir HEH düğümü temelinde bir HEH haberleşme sistem modeli önerilmiştir. Böyle bir sistemi modellemek için öncelikle sistemin enerji hasatlama ve enerji harcama profilleri, daha önce çalışılan FSMC ve GM modellerinden de faydalanılarak detaylarıyla tanımlanmıştır. Enerji profili için, HEH düğümü tarafından alınan enerji, farklı enerji kaynaklarından gelen enerjilerin bir kombinasyonu olarak düşünülmüş ve her bir kombinasyon için enerji varış olasılığı Poisson dağılımı ile, alınan enerjinin dağılımı GM modeli ile, hasatlanan enerji ise FSMC modeli ile modellenmiştir. Enerji harcama profili için, HEH düğümü tarafından harcanan enerji, hedef düğümleriyle farklı uygulama servisleriyle haberleşmek için harcanan enerji olarak düşünülmüş ve her bir uygulama servisi için enerji harcama olasılığı Poisson dağılımı ile, harcanan enerjinin dağılımı iletim hızı ile ortak dağılımdan elde edilerek, harcanan enerji ise FSMC modeli ile modellenmiştir. Enerji hasatlama ve enerji harcama profilleri Markov zinciri kullanılarak HEH haberleşme sistemleri için tek bir model haline getirilmiş ve Markov enerji modeli olarak isimlendirilmiştir. Böylece, bir enerji hasatlama haberleşme sistemi, enerji perspektifinden, önerilen sistem modeline göre en karmaşık durum için modellenmiştir. HEH haberleşme sistemlerinde kullanılmak üzere, enerjinin hiç olmadığı durumu tanımlayan enerji kesintisi olasılığı parametresi,

enerjinin bazı enerji harcama taleplerini karşılamaya yetmeyecek kadar az olduğu durumu tanımlayan enerji kıtlığı olasılığı parametresi ve uygulama servisinin yeterli enerji olmadığı için gerçekleştirilemediği durumu tanımlayan servis kaybı olasılığı parametresi belirlenerek kapalı formda ifadeleri türetilmiştir. Sayısal çalışmalarda, GM modeli ile ifade edilen dağılımları farklı bileşen yoğunluklarına sahip üç farklı enerji kaynağı kullanılarak bileşen yoğunlukları ve PDF'leri gösterilmiştir. Bu üç kaynağın birleşimiyle el edilen hasatlanan enerjinin çok sayıdaki bileşen yoğunlukları ve bunların oluşturduğu hasatlanan enerjinin PDF'i gösterilmiştir. Bu üç enerji kaynağının, RF, titreşim ve güneş ışığı olduğu durum için hasatlanan enerjinin olasılık matrisi oluşturulmuştur. Diğer yandan, HEH düğümünün ses, video, data hızı-1 ve data hızı-2 olmak üzere dört farklı uygulama servisi ile haberleştiği durum için harcanan enerji olasılık matrisi oluşturulmuştur. Bu matristeki değerler kullanılarak sistemde bir, iki ve üç enerji kaynağı olduğu durumlar ve farklı parametre setleri için servis kaybı olasılığı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Enerji kaynağı sayısının artmasıyla birlikte, farklı parametre setlerine göre servis kaybı olasılığının önemli derecede değiştiği görülmektedir. Ayrıca, aynı parametre seti için, enerji kesintisi, enerji kıtlığı ve servis kaybı olasılıklarının pil kapasitesinin artışı ile üssel olarak azaldığı gösterilmiştir. Böylece, önerilen Markov enerji modeli ile çoklu enerji kaynağı ve çoklu haberleşme düğümlerine sahip HEH haberleşme sistemlerinin kapsamlı olarak modellenebildiği gösterilmiştir.

Gelecek çalışma konuları olarak, kablosuz haberleşme ağları için bir enerji çözümü olarak sunulan enerji hasatlama alanında birçok açık araştırma alanları bulunmaktadır. Bunlar kısaca, enerji hasatlamada verimliliği ve hasatlanan enerji miktarını artırmaya yönelik malzemeler geliştirilmesi, hasatlama devre tasarımları yapılması, enerji birleştiriciler tasarlanması, şarj edilebilir piller geliştirilmesi, hasatlama/haberleşme protokolleri oluşturulması, güç tahmin algoritmaları geliştirilmesi, benzetim ortamı kurulması, deney ortamı kurulması gibi konular olarak sıralanabilir. Bu çalışmanın devamı olarak, çok disiplinli bir çalışma ile çoklu enerji kaynaklarından faydalanan küçük ve genel bir enerji hasatlayıcı oluşturmak amacıyla araştırmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **GSMA, Mobile IoT in the 5G future**, (2018), [Online]. Available: <http://www.gsma.com>.
- [2] **Paradiso, J.A. ve Starner, T.** (2005). Energy scavenging for mobile and wireless electronics, *IEEE Pervasive computing*, 4(1), 18–27.
- [3] **Rappaport, T.S.** (1996). *Wireless communications: principles and practice*, cilt 2, Prentice Hall PTR New Jersey.
- [4] **Altinel, D. ve Kurt, G.K.** (2014). Statistical models for battery recharging time in RF energy harvesting systems, *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, s.636–641.
- [5] **Altinel, D. ve Kurt, G.K.** (2016). Energy Harvesting From Multiple RF Sources in Wireless Fading Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(11), 8854–8864.
- [6] **Atwa, Y., El-Saadany, E., Salama, M. ve Seethapathy, R.** (2010). Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), 360–370.
- [7] **Garcia-Romeu-Martinez, M.A., Rouillard, V. ve Cloquell-Ballester, V.A.** A Model for the Statistical Distribution of Road Vehicle Vibrations., *World Congress on Eng.*, cilt 2007, s.1225–1230.
- [8] **Tina, G., Gagliano, S. ve Raiti, S.** (2006). Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment, *Solar Energy*, 80(5), 578–588.
- [9] **Aien, M., Fotuhi-Firuzabad, M. ve Rashidinejad, M.** (2014). Probabilistic optimal power flow in correlated hybrid wind–photovoltaic power systems, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(1), 130–138.
- [10] **Figueiredo, M.A.T. ve Jain, A.K.** (2002). Unsupervised learning of finite mixture models, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(3), 381–396.
- [11] **Fan, M., Vittal, V., Heydt, G.T. ve Ayyanar, R.** (2012). Probabilistic power flow studies for transmission systems with photovoltaic generation using cumulants, *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 2251–2261.
- [12] **Prusty, B.R. ve Jena, D.** (2016). Combined cumulant and Gaussian mixture approximation for correlated probabilistic load flow studies: a new approach, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2(2), 71–78.

- [13] **Gilbert, E.** (1960). Capacity of a burst-noise channel, *The Bell System Technical Journal*, 39(5), 1253–1265.
- [14] **Elliott, E.** (1963). Estimates of error rates for codes on burst-noise channels, *The Bell System Technical Journal*, 42(5), 1977–1997.
- [15] **Fritchman, B.** (1967). A binary channel characterization using partitioned Markov chains, *IEEE Transactions on Information Theory*, 13(2), 221–227.
- [16] **Lutz, E., Cygan, D., Dippold, M., Dolainsky, F. ve Papke, W.** (1991). The land mobile satellite communication channel-recording, statistics, and channel model, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40(2), 375–386.
- [17] **Vucetic, B.** (1991). An adaptive coding scheme for time-varying channels, *IEEE Transactions on Communications*, 39(5), 653–663.
- [18] **Swarts, F. ve Ferreira, H.** (1993). Markov characterization of channels with soft decision outputs, *IEEE Transactions on Communications*, 41(5), 678–682.
- [19] **Wang, H.S. ve Moayeri, N.** (1995). Finite-state Markov channel-a useful model for radio communication channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 44(1), 163–171.
- [20] **Babich, F. ve Lombardi, G.** (2000). A Markov model for the mobile propagation channel, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 49(1), 63–73.
- [21] **Guan, Y. ve Turner, L.** (1999). Generalised FSMC model for radio channels with correlated fading, *IEE Proceedings-Communications*, 146(2), 133–137.
- [22] **Ramesh, A., Chockalingam, A. ve Milstein, L.** (2002). A first-order Markov model for correlated Nakagami-m fading channels, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, cilt 5, s.3413–3417.
- [23] **Iskander, C.D. ve Mathiopoulos, P.** (2003). Fast simulation of diversity Nakagami fading channels using finite-state Markov models, *IEEE Transactions on Broadcasting*, 49(3), 269–277.
- [24] **Juang, M. ve Pursley, M.** (2011). New results on finite-state Markov models for Nakagami fading channels, *Military Communications Conference (MILCOM)*, s.453–458.
- [25] **Lin, S., Kong, L., He, L., Guan, K., Ai, B., Zhong, Z. ve Briso-Rodriguez, C.** (2015). Finite-State Markov Modeling for High-Speed Railway Fading Channels, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 954–957.
- [26] **Sadeghi, P., Kennedy, R., Rapajic, P. ve Shams, R.** (2008). Finite-state Markov modeling of fading channels - a survey of principles and applications, *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(5), 57–80.
- [27] **Seyedi, A. ve Sikdar, B.** (2008). Modeling and analysis of energy harvesting nodes in wireless sensor networks, *46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, s.67–71.

- [28] **Zhang, S., Seyedi, A. ve Sikdar, B.** (2013). An Analytical Approach to the Design of Energy Harvesting Wireless Sensor Nodes, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(8), 4010–4024.
- [29] **Ventura, J. ve Chowdhury, K.** (2011). Markov modeling of energy harvesting Body Sensor Networks, *IEEE 22nd International Symposium on PIMRC*, s.2168–2172.
- [30] **Gong, J., Zhang, S., Wang, X., Zhou, S. ve Niu, Z.** (2014). Supporting quality of service in energy harvesting wireless links: The effective capacity analysis, *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, s.901–906.
- [31] **Altinel, D. ve Kurt, G.K.** (2016). Frequency Switching for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, s.1–5.
- [32] **Altinel, D. ve Kurt, G.K.** (2017). Diversity Combining for RF Energy Harvesting, *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, s.1–5.
- [33] **Davut, E., Kazanci, O., Caglar, A., Altinel, D., Yelten, M.B. ve Kurt, G.K.** (2017). A test-bed based guideline for multi-source energy harvesting, *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, s.1267–1271.
- [34] **Ferdous, R.M., Reza, A.W. ve Siddiqui, M.F.** (2016). Renewable energy harvesting for wireless sensors using passive RFID tag technology: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1114–1128.
- [35] **Vullers, R.J.M., v. Schaijk, R., Visser, H.J., Penders, J. ve Hoof, C.V.** (2010). Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks, *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 2(2), 29–38.
- [36] **Nintanavongsa, P., Muncuk, U., Lewis, D.R. ve Chowdhury, K.R.** (2012). Design optimization and implementation for RF energy harvesting circuits, *IEEE Journal on emerging and selected topics in circuits and systems*, 2(1), 24–33.
- [37] **Sharma, V., Mukherji, U., Joseph, V. ve Gupta, S.** (2010). Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(4).
- [38] **Shaikh, F.K. ve Zeadally, S.** (2016). Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1041–1054.
- [39] **La Rosa, R., Zoppi, G., Finocchiaro, A., Papotto, G., Di Donato, L., Sorbello, G., Bellomo, F., Di Carlo, C. ve Livreri, P.** (2017). An over-the-distance wireless battery charger based on RF energy harvesting, *Int. Conf. on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design*, IEEE, s.1–4.

- [40] **Dondi, D., Bertacchini, A., Larcher, L., Pavan, P., Brunelli, D. ve Benini, L.** (2008). A solar energy harvesting circuit for low power applications, *Int. Conf. on Sustainable Energy Tech.*, IEEE, s.945–949.
- [41] **Stark, I.** (2006). Invited talk: Thermal energy harvesting with thermo life, *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, IEEE, s.19–22.
- [42] **Sazonov, E., Li, H., Curry, D. ve Pillay, P.** (2009). Self-Powered Sensors for Monitoring of Highway Bridges, *IEEE Sensors Journal*, 9(11), 1422–1429.
- [43] **Olgun, U., Chen, C.C. ve Volakis, J.L.** (2011). Investigation of rectenna array configurations for enhanced RF power harvesting, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10, 262–265.
- [44] **El-Dein, M.Z.S., Kazerani, M. ve Salama, M.M.A.** (2013). Optimal Photovoltaic Array Reconfiguration to Reduce Partial Shading Losses, *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, 4(1), 145–153.
- [45] **Kulah, H. ve Najafi, K.** (2008). Energy Scavenging From Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications, *IEEE Sensors Journal*, 8(3), 261–268.
- [46] **Ambrosio, R., TorreAlba, R., Guerrero-C, J., González, V., Limon, A. ve Moreno, M.** (2015). Energy harvesting combining three different sources for low power applications, *IEEE Int. Conf. on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control*, s.1–6.
- [47] **Sriramdas, R. ve Pratap, R.** (2018). An Experimentally Validated Lumped Circuit Model for Piezoelectric and Electrodynamic Hybrid Harvesters, *IEEE Sensors Journal*, 18(6), 2377–2384.
- [48] **Collado, A. ve Georgiadis, A.** (2013). Conformal hybrid solar and electromagnetic (EM) energy harvesting rectenna, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60(8), 2225–2234.
- [49] **Virili, M., Georgiadis, A., Mira, F., Collado, A., Alimenti, F., Mezzanotte, P. ve Roselli, L.** (2016). EH performance of an hybrid energy harvester for autonomous nodes, *IEEE Topical Conf. on WiSNet*, s.71–74.
- [50] **Bandyopadhyay, S. ve Chandrakasan, A.P.** (2012). Platform architecture for solar, thermal, and vibration energy combining with MPPT and single inductor, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 47(9), 2199–2215.
- [51] **Tan, C. ve Beaulieu, N.** (2000). On first-order Markov modeling for the Rayleigh fading channel, *IEEE Transactions on Communications*, 48(12), 2032–2040.
- [52] **Leon-Garcia, A.** (1994). *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, Addison-Wesley.

- [53] **Boshkovska, E., Ng, D.W.K., Zlatanov, N. ve Schober, R.** (2015). Practical Non-Linear Energy Harvesting Model and Resource Allocation for SWIPT Systems, *IEEE Communications Letters*, 19(12), 2082–2085.
- [54] **Wu, T. ve Yang, H.C.** (2015). On the Performance of Overlaid Wireless Sensor Transmission with RF Energy Harvesting, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, PP(99), 1–1.
- [55] **Molisch, A.F.** (2012). *Wireless communications*, cilt 34, John Wiley & Sons.
- [56] **Pearlman, W. ve Senge, G.** (1979). Optimal Quantization of the Rayleigh Probability Distribution, *IEEE Transactions on Communications*, 27(1), 101–112.
- [57] **Ypma, T.J.** (1995). Historical development of the Newton-Raphson method, *SIAM review*, 37(4), 531–551.
- [58] **Zukerman, M.** (2017). *Introduction to queueing theory and stochastic teletraffic models*, arXiv preprint arXiv:1307.2968.
- [59] **Guo, J. ve Zhu, X.** (2012). An improved analytical model for RF-DC conversion efficiency in microwave rectifiers, *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, s.1–3.
- [60] **McLachlan, G. ve Peel, D.** (2004). *Finite mixture models*, J.Wiley&Sons.
- [61] **Kozick, R.J. ve Sadler, B.M.** (2000). Maximum-likelihood array processing in non-Gaussian noise with Gaussian mixtures, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 48(12), 3520–3535.
- [62] **Selim, B., Alhussein, O., Muhaidat, S., Karagiannidis, G.K. ve Liang, J.** (2016). Modeling and Analysis of Wireless Channels via the Mixture of Gaussian Distribution, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(10), 8309–8321.
- [63] **Büyükçorak, S., Vural, M. ve Kurt, G.K.** (2015). Lognormal Mixture Shadowing, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(10), 4386–4398.
- [64] **Dempster, A.P., Laird, N.M. ve Rubin, D.B.** (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (methodological)*, 1–38.
- [65] **Bilmes, J.A.** (1998). A gentle tutorial of the EM algorithm and its application to parameter estimation for Gaussian mixture and hidden Markov models, *Int. Comp. Science Inst.*, 4(510), 126.
- [66] **Sharma, N., Sharma, P., Irwin, D. ve Shenoy, P.** (2011). Predicting solar generation from weather forecasts using machine learning, *IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications*, s.528–533.
- [67] **Krieger, E.M. ve Arnold, C.B.** (2012). Effects of undercharge and internal loss on the rate dependence of battery charge storage efficiency, *Journal of Power Sources*, 210, 286–291.

- [68] **Cardano, G.** (1968). *Ars magna or The rules of algebra*, Dover Pub.
- [69] **Bhat, R.V., Motani, M. ve Lim, T.J.** (2017). Energy harvesting communication using finite-capacity batteries with internal resistance, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(5), 2822–2834.
- [70] **Rasmussen, C.E.** (2000). The infinite Gaussian mixture model, *Advances in neural information processing systems*, s.554–560.
- [71] **Zivkovic, Z.** (2004). Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004.*, cilt 2, s.28–31.
- [72] **Mini, R.A., Nath, B. ve Loureiro, A.A.** (2002). A probabilistic approach to predict the energy consumption in wireless sensor networks, *IV Workshop de Comunicacao sem Fio e Computao Mvel*, s.23–25.
- [73] **Demir, M.Ö., Kurt, G.K. ve Karaca, M.** (2014). An energy consumption model for 802.11 ac access points, *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2014 22nd International Conference on*, IEEE, s.67–71.
- [74] **Altinel, D. ve Kurt, G.K.** (2018). Finite-State Markov Channel Based Modeling of RF Energy Harvesting Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(2), 1713–1725.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Doğay Altinel

Doğum Tarihi ve Yeri: 1971, Diyarbakır

E-Posta: dogay.altinel@medeniyet.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 1992, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Y. Lisans:** 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Telekomünikasyon Mühendisliği Programı.

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2018 yılından beri İstanbul Medeniyet Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya devam ediyor.
- 2012-2018 yılları arasında İstanbul Medeniyet Üniversitesi'nde Uzman olarak çalıştı.
- 2010-2012 yılları arasında Alben şirketinde Yönetici olarak çalıştı.
- 2007-2009 yılları arasında Turkkule şirketinde Bölge Operasyonlar Sorumlusu olarak çalıştı.
- 1999-2007 yılları arasında Turkcell şirketinde Şebeke Planlama ve RF Optimizasyon Uzmanı olarak çalıştı.
- 1995-1999 yılları arasında Toshiba (İncekaralar+TMST) şirketinde Servis ve Bakım Mühendisi olarak çalıştı.
- 1992-1993 yılları arasında Seka şirketinde Elektronik Mühendisi olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Altinel, D.**, Karabulut Kurt, G., 2018. Finite-State Markov Channel Based Modeling of RF Energy Harvesting Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(2), 1713-1725.
- Davut, E., Kazanci, O., Caglar, A., **Altinel, D.**, Yelten, M. B., Karabulut Kurt, G., 2017. A Test-Bed based Guideline for Multi-Source Energy Harvesting. *10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 30 Nov.-2 Dec., 2017 Bursa, Turkey.

- **Altinel, D.**, Karabulut Kurt, G., 2017. Diversity Combining for RF Energy Harvesting. *IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, June 4-7, 2017 Sydney, Australia.
- **Altinel, D.**, Karabulut Kurt, G., 2016. Frequency Switching for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. *IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, September 18-21, 2016 Montreal, Canada.
- Cansiz, M., **Altinel, D.**, Karabulut Kurt, G., 2018. Efficiency in RF Energy Harvesting Systems: A Comprehensive Review, *ELSEVIER Energy*, (**hakem değerlendirmesinde**).
- **Altinel, D.**, Karabulut Kurt, G., 2018. Modeling of Hybrid Energy Harvesting Communication Systems, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, (**hakem değerlendirmesinde**).
- **Altinel, D.**, Karabulut Kurt, G., 2018. Mixture Models of Multiple Energy Sources for Hybrid Energy Harvesting, *IEEE Internet of Things Journal*, (**hazırlık aşamasında**).
- **Altinel, D.**, Karabulut Kurt, G., 2017. Birleşik Çok Kaynaklı Enerji Hasatlama ve Haberleşme Yönetim Sistemi, Patent Başvuru Numarası: 2017/09581.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Altinel, D.**, Karabulut Kurt, G., 2016. Energy Harvesting From Multiple RF Sources in Wireless Fading Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(11), 18854-8864.
- **Altinel, D.**, Karabulut Kurt, G., 2014. Statistical Models for Battery Recharging Time in RF Energy Harvesting Systems. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, April 6-9, 2014 Istanbul, Turkey.