

## Tam-Çift-Yönlü AF Röle Seçim Sistemlerinin Nakagami- $m$ Kanallardaki Performansı

Asil KOÇ\*<sup>1</sup>, İbrahim ALTUNBAŞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

(Alınış / Received: 05.10.2016, Kabul / Accepted: 21.08.2017,  
Online Yayınlanma / Published Online: 20.09.2017)

**Anahtar Kelimeler**  
Tam-çift-yönlü  
aktarım,  
Röle seçimi,  
İşbirlikli ağlar,  
Kuvvetlendir-ve-  
aktar,  
Kesinti olasılığı,  
Nakagami- $m$

**Özet:** Bu çalışmada tam-çift-yönlü kuvvetlendir-ve-aktar tekniğini kullanan röle seçimli işbirlikli iletişim sistemlerin, artık öz-girişimin varlığı altında, Nakagami- $m$  kanallardaki kesinti performansı incelenmiştir. Önerilen sistemde, tam-çift-yönlü aktarımın başarımını geliştirmek için beş farklı röle seçim kriteri kullanılmaktadır. Tüm röle seçim kriterleri için birikimli dağılım fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak, tam kesinti olasılığı tek katlı integral biçiminde bulunmuştur. Elde edilen analitik sonuçlar, Monte-Carlo benzetimleri ile doğrulanmıştır. Nümerik sonuçlar ile kesinti performansını en çok geliştiren röle seçim kriterinin -tüm kanal durum bilgilerine ihtiyaç duyan- en iyi röle seçim kriteri olduğu gösterilmiştir. Buna ek olarak, yine tüm röle seçim kriterleri için, kesinti olasılığının kapalı formda alt sınır ve asimptotik ifadeleri elde edilmiştir. Röle düğümünden kaynaklanan artık öz-girişimin sistemin performansını kısıtladığı ve hata sınırlarının oluştuğu gözlemlenmiş olup, hata sınırlarının elde edilen asimptotik ifadeler ile kolayca belirlenebileceği gösterilmiştir.

## Performance of Full-Duplex AF Relay Selection Systems over Nakagami- $m$ Channels

**Keywords**  
Full-duplex  
relaying,  
Relay selection,  
Cooperative  
networks,  
Amplify-and-  
forward,  
Outage  
probability,  
Nakagami- $m$ .

**Abstract:** In this paper, outage performance of full-duplex amplify-and-forward relay selection systems under residual loop-interference over Nakagami- $m$  fading channels is investigated. In order to investigate the performance of full-duplex relaying, five different relay selection policies are used in the proposed system. By using cumulative distribution function approach, the exact outage probability expressions are obtained in a single-integral form for each relay selection policies. The theoretical results are verified with Monte-Carlo simulations. The numerical results reveal that the best relay selection policy is the optimal relay selection policy which requires all channel state information. Additionally, lower-bound and asymptotic outage probability expressions are obtained in a closed-form for each relay selection policies. The residual loop-interference at relay node limits the performance of system and creates error floors which can be determined easily by using the derived asymptotic expressions.

\*Sorumlu yazar: kocasil@itu.edu.tr

## 1. Giriş

Gelecek nesil telsiz iletişim sistemlerinde daha yüksek veri hızları, bant verimliliği ve servis kalitesini sağlayacak tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaç için önerilmiş olan işbirlikli iletişim tekniği, sağladığı kapasite artışı ve kapsama alanı genişlemesinin yanı sıra telsiz iletişim ortamında oluşan şiddetli sönümlenme, gölgeleme ve yol kaybı etkilerinin üstesinden gelmeye olanak sağlamaktadır [1-4]. İşbirlikli iletişimde kaynak (verici) ve hedef (alıcı) düğümlerine ek olarak bulunan röle düğümlerinde yaygın olarak iki farklı aktarım yöntemi uygulanmaktadır: kuvvetlendir-ve-aktar (Amplify-and-Forward, AF) ve çöz-ve-aktar (Decode-and-Forward, DF) [3]. AF aktarım tekniğinde röle düğümü aldığı işareti değişken [3] veya sabit [4] bir katsayı ile çarpılarak ilgili hedef düğümüne iletir. Ancak röle düğümünde geleneksel yarı-çift-yönlü (Half-Duplex, HD) iletim kullanılırsa, toplam iletim süresi artacak ve bant verimliliği azalacaktır. Hem işbirlikli sistemlerin getirdiği avantajlardan yararlanmak, hem de bant verimliliğinin azalmasını engellemek amacıyla literatürde tam-çift-yönlü (Full-Duplex, FD) iletim tekniği önerilmiştir [5-8].

FD iletimde röle düğümü gönderim ve alım işlemlerini aynı frekans bandını kullanarak aynı anda yapmaktadır. Röle düğümü, alıcı anteninde bilgi içeren işarete ek olarak kendi işaretini de alacağı için öz-girişim (Loop-Interference, LI) oluşur [7]. FD iletimin performansı LI'dan oldukça fazla etkilenmesine karşın, anten teknolojisi ve işaret işleme alanındaki son gelişmeler FD aktarımı uygulanabilir hale getirmiştir. LI giderimi işlemi için [9]'da bahsedilen üç farklı yöntem bulunmaktadır: anten ayırma, analog giderim ve sayısal giderim. Yine de pratikte LI bileşeni tam olarak giderilemez ve geriye kalan artık LI

bileşeni FD iletimin performansını sınırlar [7]. Ayrıca literatürde yapılan pratik çalışmalar göstermektedir ki, çok yönlü sönümlenme etkisi ve güçlü doğrudan görüş hattı (Line of Sight, LoS) sebebiyle artık LI kanalını Rician ya da Nakagami-*m* sönümlenmeli olarak modellemek pratik açıdan daha uygundur [9].

### 1.1. İlgili çalışmalar

Eğer röle düğümü FD iletim tekniğini kullanır ve AF aktarım yaparsa bu sistemler bu makalede kısaca FD-AF sistemi olarak adlandırılacaktır. Literatürde FD-AF sistemleri ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Artık LI kanalın Gauss gürültüsü olarak modellendiği [10]'da, kaynak ve röle düğümleri arasındaki güç paylaşımının FD-AF sistemlerin performansını geliştirdiği gösterilmiştir. Rayleigh sönümlenmeli kanallarda kaynak ve hedef arasındaki doğrudan bağlantıyı da kullanan FD-AF sistemlerin kesinti olasılığı [11]'de incelenmiş olup, doğrudan bağlantının çeşitleme kazancı getirdiği gösterilmiştir. Kaynak ve röle arasındaki kanalın sönümlenmesiz olarak alındığı [12]'de işlem gecikmesi ve artık LI bileşeni dikkate alınarak FD-AF sistemin Rayleigh kanallarda kesinti olasılığı bulunmuştur. Tüm kanalların Nakagami-*m* sönümlenmeli olarak modellendiği FD-AF sistemler için yapılan kesinti olasılığı ve ergodik kapasite analizleri [13]'te verilmiştir. [14]'te geliştirilen karma bir teknik ile anlık olarak sisteme en iyi performansı sağlayabilecek HD ve FD iletimleri arasında fırsatçı bir seçim yöntemi önerilmiş olup, bu sistem AF ve DF teknikleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca artık LI bileşeninin sabit olarak modellendiği bu çalışmada, önerilen karma tekniğin iletim güç adaptasyonu ile birleştirilmesi ile performansın daha da artacağı gösterilmiştir. Ayrıca literatürde çok röleli FD-AF sistemlerin analizleri de bulunmaktadır [15-17].

Tüm röle düğümlerinin kaynak ve hedef arasındaki iletişime yardım ettiğinin düşünüldüğü [15]'te geliştirilen yinelemeli ardışık girişim giderimi ile hedefe gelen gecikmeli işaretlerin giderimi yapılmış olup, böylece tam çeşitleme derecesi elde edilmiştir. [16]'da ise sistemde bulunan röleler arasından bir röle, farklı seçim kriterlerine göre seçilmektedir. [16]'da röle seçimli FD-AF sistemlerinin kesinti olasılığı Rayleigh kanallarda incelenmiş olup, en iyi röle seçim kriteri için tam kesinti olasılığı tek katlı integral biçiminde ve alt sınır ifadesi kapalı formda bulunmuştur. FD-AF sistemlerde röle seçiminin, röle verici/alıcı anten seçimi ile birleştirilerek performansın daha fazla geliştirilebileceği [17]'de gösterilmiş olup, ayrıca kesinti olasılığı ve çeşitleme derecesi analizleri verilmiştir. [18]'de rölede birden fazla alıcı ve verici antenin kullanıldığı FD-AF sistemlerin, Rayleigh kanallarda ortak kanal girişimi altındaki performansı incelenmiştir. Ayrıca FD iletim yapan ve DF aktarım tekniğini kullanan röleli sistemlerin Nakagami- $m$  kanallarda ortak kanal girişim altındaki performansı [19]'da incelenmiştir.

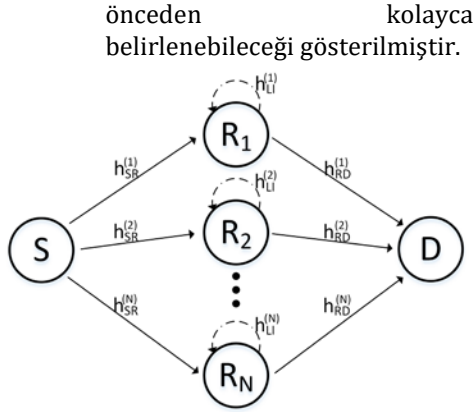
## 1.2. Başlıca katkılar

Bildiğimiz kadarıyla literatürde FD-AF röle seçimli (FD-AF Relay Selection, FD-AF-RS) sistemler için Nakagami- $m$  sönümlmeli kanallarda yapılan bir performans analizi bulunmamaktadır. Bu çalışmada, beş farklı röle seçim kriteri için değişken-kazançlı FD-AF-RS sistemlerin kesinti olasılığı incelenmektedir. Bu yönüyle bu çalışma, [16]'da önerilen bazı seçim kriterlerine ek olarak yeni seçim kriterlerini ve bunlara ilişkin analizlerin gerçek kanal koşullarına daha uygun şekilde genelleştirilmesini içermektedir. Bundan dolayı, [16] ile ortak kriterlere ait sonuçlar bu çalışmanın özel hali durumundadır. Öncelikle sistemin uçtan-uca işaretin-girişim-ve-gürültüye-oranı

(End-to-End Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio, E2E SINR) ifadesi elde edilip, ardından birikimli dağılım fonksiyonu (Cumulative Distribution Function, CDF) yaklaşımı kullanılarak tüm seçim kriterleri için tam kesinti olasılıkları tek katlı integral biçiminde bulunmuştur. Buna ek olarak yine tüm seçim kriterleri için kapalı formda birer alt sınır ve asimptotik ifade elde edilmiştir. Elde edilen teorik sonuçların doğruluğu Monte-Carlo tipi bilgisayar benzetimleri ile kanıtlanmıştır.

Bu çalışmada yapılan katkılar aşağıdaki biçimde özetlenebilir:

- Pratik açıdan daha uygun olması amacıyla, artık LI kanalı dahil olmak üzere, tüm kanallar Nakagami- $m$  sönümlmeli kanal olarak modellenmiştir.
- FD-AF sistemin performansını geliştirmek amacıyla beş farklı röle seçim kriteri incelenmiştir. Bu seçim kriterleri arasında en başarılı olanın en iyi seçim kriteri olduğu anlaşılırken, röle ve hedef arasındaki kanala göre yapılan seçimin, sistemin kesinti performansında çok kısıtlı bir iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir.
- FD-AF-RS sistemi için önerilen tüm seçim kriterlerine ait tam kesinti olasılığı ifadeleri tek katlı integral biçiminde elde edilmiştir.
- Elde edilen her bir tam kesinti olasılığı ifadesi, kapalı formda bulunan alt sınır ve asimptotik kesinti olasılığı ifadeleri ile desteklenmiştir.
- Artık LI bileşeni sebebi ile oluşan hata sınırlarının, çıkartılan asimptotik ifadeler ile



Şekil 1. Sistem modeli.

### 1.3. İçerik

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2’de FD-AF-RS sistemine ait sistem modeli verilmektedir ve sisteme ait EZE SINR ifadesi çıkartılmaktadır. Daha sonra önerilen beş farklı röle seçim kriteri Bölüm 3’te tanıtılmaktadır. Bölüm 4’te ise her bir seçim kriteri için tam kesinti olasılığı, alt sınır ve asimptotik kesinti olasılığı ifadeleri elde edilmektedir. Ardından bulunan teorik ifadelerin doğruluğu, çeşitli senaryolar için yapılan Monte-Carlo benzetimleri ile Bölüm 5’te gösterilmektedir. Son olarak çalışmada elde edilen sonuçlar Bölüm 6’da açıklanmaktadır.

## 2. Sistem Modeli ve EZE-SINR

Şekil 1’de verilen sistem modelinde görüldüğü üzere, bu çalışmada incelenen FD-AF-RS sistemi bir kaynak ( $S$ ), bir hedef ( $D$ ) ve  $N$  adet röle ( $R_c, 1 \leq c \leq N$ ) düğümünden oluşmaktadır. Tek yönlü iletişimin sağlanabilmesi için kaynak düğümünde bir adet verici anten ve hedef düğümünde bir adet alıcı anten bulunmaktayken, tüm röle düğümleri birer verici ve alıcı anten ile donatılmıştır. Kaynak ve hedef arasındaki doğrudan bağlantının kuvvetli bir biçimde sönmüldüğü varsayılarak, iletişimin sadece röle birimleri

yardımlarıyla gerçekleştirildiği düşünülmektedir. İletim süresince  $N - 1$  adet röle düğümü pasif olarak beklerken, kaynak ve hedef arasındaki iletişim gelecek bölümde açıklanacak olan kriterlerinden biri yardımıyla seçilen röle düğümü aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 1’den görüleceği üzere  $S - R_c$  ve  $R_c - D$  arasındaki karmaşık kanal katsayıları sırasıyla  $h_{SR}^{(c)}$  ve  $h_{RD}^{(c)}$  ile ifade edilmektedir. Ayrıca,  $R_c$  düğümlerinde oluşan karmaşık artık LI bileşenleri  $h_{LI}^{(c)}$  ile gösterilmektedir. Tüm kanal katsayılarına ait zarflar ( $|h_{SR}^{(c)}|, |h_{RD}^{(c)}|, |h_{LI}^{(c)}|$ ) Nakagami- $m$  dağılımlı olarak modellenmektedir. Kaynaktan birim güçlü  $x(t)$  gönderildiğinde,  $R_c$  düğümünde

$$r_c(t) = h_{SR}^{(c)} \sqrt{P_S} x(t) + h_{LI}^{(c)} s_c(t) + n_R^{(c)}(t) \quad (1)$$

işareti alınır. Burada  $P_S$  kaynağın iletim gücünü,  $s_c(t)$   $c$ . röleden iletilen işareti ve  $n_R^{(c)}(t)$  sıfır ortalamalı  $\sigma_R^2$  varyanslı karmaşık Gauss gürültüsünü gösterir. AF tekniği dikkate alındığında, röle düğümünden iletilen işaret  $s_c(t) = \beta_c r_c(t - \tau)$  biçiminde gösterilmektedir. Burada  $\beta_c$  ve  $\tau$  sırasıyla kuvvetlendirme kazancı ve FD iletim işleminde meydana gelen gecikmedir [7]. Yinelemeli şekilde (1)’den yararlanarak, gönderilen işaret

$$s_c(t) = \beta_c \sum_{l=1}^{\infty} \left( h_{LI}^{(c)} \beta_c \right)^{l-1} \times \left[ h_{SR}^{(c)} \sqrt{P_S} x(t - l\tau) + n_R^{(c)}(t - l\tau) \right] \quad (2)$$

biçiminde tekrar yazılabilir. Rölede daima sonlu iletim gücünü sağlamak,

salınımları engellemek ve ortalama iletim gücünü  $P_R$ 'ye normalize edebilmek amacıyla kuvvetlendirme kazancı

$$\beta_c = \sqrt{\frac{P_R}{P_S |h_{SR}^{(c)}|^2 + P_R |h_{LI}^{(c)}|^2 + \sigma_R^2}} \quad (3)$$

olarak seçilir [7].  $R_c$  düğümünün ortalama iletim gücünün  $E[|s_c(t)|^2] = P_R$  olduğu,  $|h_{LI}^{(c)}| \beta_c < 1$  ve [20, (0.112)]'den yararlanarak kolayca gösterilebilir. Ardından,  $D$  düğümünde alınan işaret

$$y_c = h_{RD}^{(c)} s_c(t) + n_D(t) \quad (4)$$

şeklinde yazılır. Burada  $n_D(t)$  sıfır ortalamalı  $\sigma_R^2$  varyanslı karmaşık Gauss gürültüsüdür.  $D$  düğümünde alınan işaret,  $s_c(t)$  ve (1)'i kullanarak

$$y_c(t) = \underbrace{h_{SR}^{(c)} h_{RD}^{(c)} \beta_c \sqrt{P_S} x(t-\tau)}_{\text{bilgi taşıyan işaret}} + \underbrace{h_{RD}^{(c)} h_{LI}^{(c)} \beta_c s_c(t-\tau)}_{\text{öz-girisim}} + \underbrace{h_{RD}^{(c)} \beta_c n_R^{(c)}(t-\tau) + n_D(t)}_{\text{gürültü}} \quad (5)$$

şeklinde düzenlenir. Basit birkaç aşamadan sonra, FD-AF-RS sistemi için anlık EZE-SINR şu şekilde bulunmaktadır:

$$\gamma_{EZE}^{(c)} = \frac{\frac{\gamma_{SR}^{(c)}}{\gamma_{LI}^{(c)} + 1} \gamma_{RD}^{(c)}}{\frac{\gamma_{SR}^{(c)}}{\gamma_{LI}^{(c)} + 1} + \gamma_{RD}^{(c)} + 1} \quad (6)$$

Burada  $\gamma_{SR}^{(c)} = P_S |h_{SR}^{(c)}|^2 / \sigma_R^2$ ,  $\gamma_{RD}^{(c)} = P_R |h_{RD}^{(c)}|^2 / \sigma_D^2$  ve  $\gamma_{LI}^{(c)} = P_R |h_{LI}^{(c)}|^2 / \sigma_R^2$

olarak tanımlanmaktadır. Ardından kanal katsayılarının ortalama güçleri  $\Omega_A = E[|h_A^{(c)}|^2]$ ,  $A \in \{SR, RD, LI\}$  şeklinde

ifade edildiği için,  $\bar{\gamma}_{SR}^{(c)} = P_S \Omega_{SR} / \sigma_R^2$ ,  $\bar{\gamma}_{RD}^{(c)} = P_R \Omega_{RD} / \sigma_D^2$  ve  $\bar{\gamma}_{LI}^{(c)} = P_R \Omega_{LI} / \sigma_R^2$

biçimindedir. Bu çalışmada tüm kanal katsayılarının zarfları Nakagami- $m$  dağılımlı olarak modellenmiştir. Bu nedenle,  $\gamma_A^{(c)}$  rastlantı değişkenleri Gamma dağılımına sahip olup, olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability Density Function, PDF) ve CDF ifadeleri sırasıyla  $f_{\gamma_A^{(c)}}(x) = \frac{\mu_A^m x^{m-1}}{\Gamma(m_A) e^{x\mu_A}}$  ve

$F_{\gamma_A^{(c)}}(x) = \frac{\gamma(m_A, x\mu_A)}{\Gamma(m_A)}$  şeklindedir. Burada

$\mu_A = m_A / \bar{\gamma}_A$  olup,  $\Gamma(\cdot)$  ve  $\gamma(\dots)$  sırasıyla Gamma [20, (8.310.1)] ve tamamlanmamış alt Gamma [20, (8.350.1)] fonksiyonlarıdır. Yukarıdan da anlaşılacağı üzere  $\gamma_{SR}^{(c)}$ ,  $\gamma_{RD}^{(c)}$  ve  $\gamma_{LI}^{(c)}$

kendi içlerinde, seçilen röleden bağımsız olarak, birbirlerinden bağımsız ve aynı dağılıma sahip (independent and identically distributed, i.i.d.) rastlantı değişkenleridir.

### 3. Röle Seçim Kriterleri

Bu bölümde  $N$  adet röleden oluşan FD-AF-RS sisteminde kullanılacak olan beş farklı röle seçim kriteri incelenmiştir.

Önerilen kriterler, sistemin  $\gamma_{SR}^{(c)}$ ,  $\gamma_{RD}^{(c)}$  ve  $\gamma_{LI}^{(c)}$  ifadelerinden bir ya da birden fazlasını veri gönderiminden önce belirlediği varsayılarak oluşturulmuştur.

#### 3.1. En iyi röle seçimi

İlk incelenen seçim kriteri olan en iyi röle seçimi (Optimal Relay Selection, OS), en yüksek EZE-SINR'yi sağlayan röle

düğümünü seçtiği kriterdir [16]. Bu kriter ile seçilen rölenin indisi

$$b_{OS} = \arg \max_{1 \leq c \leq N} \{ \gamma_{E2E}^{(c)} \} \quad (7)$$

biçiminde tanımlanır. Tüm kanal bilgilerine ihtiyaç duyulduğundan dolayı, incelenecek olan diğer kriterlere göre karmaşıklığı en fazla olan seçim kriteri OS'dir.

### 3.2. S-R bağlantısına ve LI bileşenlerine göre röle seçimi

Sistemde sadece  $\gamma_{SR}^{(c)}$  ve  $\gamma_{LI}^{(c)}$  değerlerine göre seçim yapılırsa, (6)'da verilen E2E SINR ifadesindeki  $\gamma_{SR}^{(c)}$  ve  $\gamma_{LI}^{(c)}$  arasındaki ilişkiyi yararlanarak, kısaca SRLI olarak adlandırılan röle seçim kriterine göre [16]

$$b_{SRLI} = \arg \max_{1 \leq c \leq N} \left\{ \frac{\gamma_{SR}^{(c)}}{\gamma_{LI}^{(c)} + 1} \right\} \quad (8)$$

indisine sahip olan röle üzerinden iletişim kurulur.

### 3.3. S-R bağlantısına göre röle seçimi

Bir diğer röle seçim kriterinde ise seçimin sadece ilk bağlantıya ait olan  $\gamma_{SR}^{(c)}$  değerlerine göre yapıldığı varsayılmaktadır. SR adı verilen bu seçim kriterinde seçilen rölenin indisi şu biçimdedir:

$$b_{SR} = \arg \max_{1 \leq c \leq N} \{ \gamma_{SR}^{(c)} \}. \quad (9)$$

### 3.4. LI bileşenlerine göre röle seçimi

Eğer seçimin sadece röle düğümlerinde oluşan artık LI'ya ait olan  $\gamma_{LI}^{(c)}$  değerlerine göre yapıldığını düşünürsek, yapılacak olan röle seçiminde minimum artık LI değerine sahip olan röle birimi seçilmelidir [16]. Çünkü artık LI bileşenin

artmasıyla sistemin performansı kötüleşmektedir. Bu sebeple, kısaca LI olarak adlandırılan bu kriterde

$$b_{LI} = \arg \min_{1 \leq c \leq N} \{ \gamma_{LI}^{(c)} \} \quad (10)$$

indisine sahip olan röle düğümü aracılığıyla kaynak ve hedef düğümleri iletişim kurarlar.

### 3.5 R-D bağlantısına göre röle seçimi

İncelenen son seçim kriterinde seçimin sadece ikinci bağlantıya ait  $\gamma_{RD}^{(c)}$  değerlerine göre yapıldığı düşünülmektedir. RD adı verilen bu kriterde seçilen rölenin indisi şu şekildedir:

$$b_{RD} = \arg \max_{1 \leq c \leq N} \{ \gamma_{RD}^{(c)} \}. \quad (11)$$

## 4. Kesinti Olasılığı

FD-AF-RS sistemi için bir önceki bölümde tanımlanan her bir röle seçim kriteri için sırasıyla tam kesinti olasılığı, kesinti olasılığı için alt sınır ve asimptotik kesinti olasılığı çıkarımları bu bölümde yapılacaktır. Kesinti olasılığının tanımından ve (6)'da verilen E2E SINR'den yararlanarak, tam kesinti olasılığı

$$P_*(\gamma_{th}) = \Pr \left( \frac{X_1^{(b_*)} \gamma_{RD}^{(b_*)}}{X_1^{(b_*)} + \gamma_{RD}^{(b_*)} + 1} < \gamma_{th} \right) \quad (12)$$

biçiminde gösterilir. Burada

$$X_1^{(b_*)} = \gamma_{SR}^{(b_*)} / (\gamma_{LI}^{(b_*)} + 1) \text{ ve } \gamma_{th} \text{ eşik SINR değeri olup, } * \in \{OS, SRLI, SR, LI, RD\}$$

uygulanan röle seçim kriterini göstermektedir. Yukarıdaki beş farklı röle seçim kriterinin hepsi için (12)'den hareketle hesaplanacak olan tam kesinti olasılığının yanında, (6)'da verilen E2E

SINR için  $X_1^{(b_s)} \gamma_{RD}^{(b_s)} / (X_1^{(b_s)} + \gamma_{RD}^{(b_s)} + 1) \leq \min\{X_1^{(b_s)}, \gamma_{RD}^{(b_s)}\}$

biçiminde tanımlanabilecek bir üst sınırdan yararlanarak kesinti olasılığı için alt sınır şu şekilde yazılabilir:

$$P_*^{ALT}(\gamma_{th}) = \Pr\left(\min\{X_1^{(b_s)}, \gamma_{RD}^{(b_s)}\} \leq \gamma_{th}\right) \\ = 1 - \Pr\left(X_1^{(b_s)} \geq \gamma_{th}\right) \Pr\left(\gamma_{RD}^{(b_s)} \geq \gamma_{th}\right) \quad (13) \\ = 1 - \bar{F}_{X_1^{(b_s)}}(\gamma_{th}) \bar{F}_{\gamma_{RD}^{(b_s)}}(\gamma_{th}).$$

Burada,  $\bar{F}_{X_1^{(b_s)}}(\cdot) = 1 - F_{X_1^{(b_s)}}(\cdot)$  ve

$\bar{F}_{\gamma_{RD}^{(b_s)}}(\cdot) = 1 - F_{\gamma_{RD}^{(b_s)}}(\cdot)$  biçimindedir. Bir

diğer önemli performans ölçüsü olan asimptotik kesinti olasılığı, yüksek işaret-gürültü-oranı (Signal-to-Noise-Ratio, SNR) için elde edilecektir. Burada sabit  $\sigma_R^2$  ve  $\sigma_D^2$  değerleri için  $\{P_S, P_R\} \rightarrow \infty$  varsayılmaktadır. Böylece asimptotik kesinti olasılığı

$$P_*^\infty(\gamma_{th}) = \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \Pr\left(\frac{X_1^{(b_s)} \gamma_{RD}^{(b_s)}}{X_1^{(b_s)} + \gamma_{RD}^{(b_s)} + 1} < \gamma_{th}\right) \\ \approx \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \Pr\left(\min\{X_1^{(b_s)}, \gamma_{RD}^{(b_s)}\} \leq \gamma_{th}\right) \quad (14) \\ = \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} P_*^{ALT}(\gamma_{th})$$

olup, alt sınır ifadesinden yararlanarak elde edilecektir.

#### 4.1 En iyi röle seçimi

İlk röle seçim kriteri olan OS kriterinde tam kesinti olasılığı (12) ve [16, (12)]'den yararlanarak

$$P_{OS}(\gamma_{th}) = \Pr\left(\frac{X_1^{(b_{OS})} \gamma_{RD}^{(b_{OS})}}{X_1^{(b_{OS})} + \gamma_{RD}^{(b_{OS})} + 1} \leq \gamma_{th}\right) \quad (15) \\ = \left[F_{\gamma_{E2E}^{(c)}}(\gamma_{th})\right]^N$$

biçiminde verilir. Burada  $F_{\gamma_{E2E}^{(c)}}(\cdot)$  E2E

SINR'ye ait CDF ifadesidir. Tam kesinti olasılığının hesaplanması için ihtiyaç duyulan  $\gamma_{E2E}^{(c)}$ 'nin CDF'si, [16, (13)]'ten yararlanarak

$$F_{\gamma_{E2E}^{(c)}}(x) = \Pr\left(\frac{X_1^{(c)} \gamma_{RD}^{(c)}}{X_1^{(c)} + \gamma_{RD}^{(c)} + 1} \leq x\right) \\ = \int_{y=0}^{\infty} f_{\gamma_{RD}^{(c)}}(y) \Pr\left(\frac{X_1^{(c)} y}{X_1^{(c)} + y + 1} \leq x\right) dy \\ = \int_{y=0}^{\infty} f_{\gamma_{RD}^{(c)}}(y) \Pr\left[X_1^{(c)}(y-x) \leq x(\gamma_{RD}^{(c)} + 1)\right] dy \quad (16) \\ = F_{\gamma_{RD}^{(c)}}(x) + \int_{y=x}^{\infty} f_{\gamma_{RD}^{(c)}}(y) F_{X_1^{(c)}}\left[\frac{x(y+1)}{y-x}\right] dy \\ = 1 - \int_{y=x}^{\infty} f_{\gamma_{RD}^{(c)}}(y) \bar{F}_{X_1^{(c)}}\left[\frac{x(y+1)}{y-x}\right] dy$$

olarak elde edilir. Ardından  $X_1^{(c)}$ 'nin CDF'si

$$F_{X_1^{(c)}}(x) = \Pr\left(\frac{\gamma_{SR}^{(c)}}{\gamma_{LI}^{(c)} + 1} \leq x\right) \\ = \int_{y=0}^{\infty} f_{\gamma_{LI}^{(c)}}(y) F_{\gamma_{SR}^{(c)}}[x(y+1)] dy \quad (17) \\ = \frac{\mu_{LI}^{m_{LI}}}{\Gamma(m_{LI}) \Gamma(m_{SR})} \int_{y=0}^{\infty} \frac{\gamma [m_{SR}, x(y+1) \mu_{SR}]}{y^{1-m_{LI}} e^{y \mu_{LI}}} dy$$

biçiminde yazılır. Bulunan ifade, [20, (8.352.6)]'da gösterildiği şekilde tam sayı  $m_{SR}$  değerleri için yeniden

$$F_{X_1^{(c)}}(x) = 1 - \frac{\mu_{LI}^{m_{LI}}}{\Gamma(m_{LI})} \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{(x \mu_{SR})^q}{q! e^{x \mu_{SR}}} \\ \times \int_{y=0}^{\infty} \frac{y^{m_{LI}-1} (y+1)^q}{e^{y(\mu_{LI} + x \mu_{SR})}} dy \quad (18)$$

biçiminde düzenlenebilir. Ardından, CDF kapalı formda

$$F_{X_1^{(c)}}(x) = 1 - \frac{\mu_{LL}^{m_{LL}}}{e^{x\mu_{SR}}} \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{(x\mu_{SR})^q}{q!} \times \Psi(m_{LL}, m_{LL} + q + 1; \mu_{LL} + x\mu_{SR}) \quad (19)$$

olarak bulunur. Burada  $\Psi(\dots)$  konfluent hipergeometrik fonksiyondur [20, (9.211.4)]. FD-AF-RS sisteminin OS kriterine göre tam hata olasılığı (15), (16) ve (19)'u birleştirerek

$$P_{OS}(\gamma_{th}) = \left[ 1 - \frac{\mu_{RD}^{m_{RD}} \mu_{LL}^{m_{LL}}}{\Gamma(m_{RD})} \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{(\gamma_{th} \mu_{SR})^q}{q!} \times \int_{y=\gamma_{th}}^{\infty} \frac{y^{m_{RD}-1} (y+1)^q (y-\gamma_{th})^{-q}}{e^{y\mu_{RD} + \gamma_{th} \mu_{SR} (y+1)(y-\gamma_{th})}} \times \Psi\left(m_{LL}, m_{LL} + q + 1; \mu_{LL} + \frac{\gamma_{th} \mu_{SR} (y+1)}{y-\gamma_{th}}\right) dy \right]^N \quad (20)$$

biçiminde tek katlı integral olarak bulunur. Bildiğimiz kadarıyla,  $P_{OS}(\cdot)$ 'nin kapalı formda bir çözümü yoktur. Fakat,  $P_{OS}(\cdot)$  nümerik olarak MATLAB, MATHEMATICA ve MAPLE gibi yaygın olarak kullanılan paket yazılımlar yardımıyla kolayca hesaplanabilir.

OS kriterine göre kesinti olasılığı için alt sınır ifadesi, (13) ve (15) kullanılarak kapalı formda kolayca şu şekilde bulunur:

$$P_{OS}^{ALT}(\gamma_{th}) = \left[ 1 - \frac{\Gamma(m_{RD}, \gamma_{th} \mu_{RD}) \mu_{LL}^{m_{LL}}}{\Gamma(m_{RD}) e^{\gamma_{th} \mu_{SR}}} \times \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{(\gamma_{th} \mu_{SR})^q}{q!} \Psi(m_{LL}, m_{LL} + q + 1; \mu_{LL} + \gamma_{th} \mu_{SR}) \right]^N \quad (21)$$

Ardından, (14) ve yukarıda bulunan alt sınırdan yararlanarak, OS kriteri için asimptotik kesinti olasılığı

$$P_{OS}^{\infty}(\gamma_{th}) = \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \left[ 1 - \frac{\Gamma(m_{RD}, \gamma_{th} \mu_{RD})}{\Gamma(m_{RD}) e^{\gamma_{th} \mu_{SR}}} \times \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{\mu_{LL}^{m_{LL}+q}}{(\eta \gamma_{th})^{-q} q!} \Psi(m_{LL}, m_{LL} + q + 1; \mu_{LL} + \gamma_{th} \mu_{SR}) \right]^N \quad (22)$$

biçiminde yazılır. Burada  $\eta = \mu_{SR} / \mu_{LL}$  olarak tanımlanmıştır. Limit koşuluna göre,  $\{P_S, P_R\} \rightarrow \infty$  ifadesi aslında  $\{\mu_{SR}, \mu_{LL}\} \rightarrow 0$  anlamına gelmektedir.

Ayrıca limit koşulu için  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Gamma(\alpha, x)}{e^x} = \Gamma(\alpha)$  olduğundan hareketle, asimptotik kesinti olasılığı

$$P_{OS}^{\infty}(\gamma_{th}) = \left[ 1 - \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{(\eta \gamma_{th})^q}{q!} \times \left( \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \frac{\Psi(m_{LL}, m_{LL} + q + 1; \mu_{LL} + \gamma_{th} \mu_{SR})}{\mu_{LL}^{-m_{LL}-q}} \right) \right]^N \quad (23)$$

olarak tekrar elde edilebilir. Limit ifadesinin çözümü için

$$\lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \frac{\Psi(\alpha, \alpha + \delta + 1; \lambda \mu_{LL} + \varepsilon \mu_{SR})}{\mu_{LL}^{-\alpha-\delta}} = \frac{\Gamma(\alpha + \delta)}{\Gamma(\alpha)(\lambda + \eta \varepsilon)^{\alpha+\delta}} \quad (24)$$

eşitliğinden yararlanılacaktır. İspat için lütfen EK'i inceleyiniz. Son olarak (24)'ü kullanarak, (23)'te verilen ifade,

$$P_{OS}^{\infty}(\gamma_{th}) = \left[ 1 - \frac{1}{\Gamma(m_{LL})} \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{(\eta \gamma_{th})^q \Gamma(m_{LL} + q)}{q! (1 + \eta \gamma_{th})^{m_{LL}+q}} \right]^N \quad (25)$$



olarak bulunur. Yukarıdaki eşitlikten anlaşıldığı üzere,  $P_{OS}^\infty(\cdot)$  ifadesi  $m_{RD}$  ve  $\mu_{RD}$ 'den bağımsızdır.

#### 4.2 S-R bağlantısına ve LI bileşenlerine göre röle seçimi

FD-AF-RS sisteminde röle seçiminin SRLI kriterine göre yapılması halinde,  $\gamma_{RD}^{(b_{SRLI})}$  seçim kriterinden bağımsız olduğu için dağılım özelliği değişmemektedir. Fakat,  $\gamma_{SR}^{(b_{SRLI})}$  ve  $\gamma_{LI}^{(b_{SRLI})}$  rastlantı değişkenleri Gamma dağılımına sahip değişimlerdir. SRLI kriteri için tam kesinti olasılığı (12) ve (16)'dan yararlanarak

$$P_{SRLI}(\gamma_{th}) = 1 - \int_{y=\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_{RD}}^{(c)}(y) \times \bar{F}_{X_1^{(b_{SRLI})}} \left[ \frac{\gamma_{th}(y+1)}{y-\gamma_{th}} \right] dy \quad (26)$$

biçiminde gösterilir. Tam kesinti olasılığını bulabilmek için  $X_1^{(b_{SRLI})}$ 'ya ait CDF elde edilmelidir. Temel olasılık bilgileri yardımıyla,  $X_1^{(b_{SRLI})}$ 'nın CDF'si kolaylıkla şu şekilde bulunur:

$$F_{X_1^{(b_{SRLI})}}(x) = \Pr \left( \max_{1 \leq c \leq N} \{X_1^{(c)}\} \leq x \right) = \left[ F_{X_1^{(c)}}(x) \right]^N \quad (27)$$

(19) ve (27)'yi (26)'da yerine koyarsak, tam kesinti olasılığı tek katlı integralli olarak

$$P_{SRLI}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{\mu_{RD}^{m_{RD}}}{\Gamma(m_{RD})} \int_{y=\gamma_{th}}^{\infty} \frac{y^{m_{RD}-1}}{e^{y\mu_{RD}}} \times \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\mu_{LI}^{m_{LI}}}{e^{\gamma_{th}\mu_{SR}(y+1)}(y-\gamma_{th})} \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{1}{q!} \left( \frac{y-\gamma_{th}}{\gamma_{th}\mu_{SR}(y+1)} \right)^q \right]^N \times \Psi \left( m_{LI}, m_{LI} + q + 1; \mu_{LI} + \frac{\gamma_{th}\mu_{SR}(y+1)}{y-\gamma_{th}} \right) \right\} dy \quad (28)$$

şeklinde bulunur. Bildiğimiz kadarıyla  $P_{SRLI}(\cdot)$  için kapalı formda bir çözüm bulunmamaktadır. Ancak SRLI kriteri için (13), (19) ve (27)'den yararlanarak, kapalı formda olan alt sınır ifadesi

$$P_{SRLI}^{ALT}(\gamma_{th}) = \frac{\gamma(m_{RD}, \gamma_{th}\mu_{RD})}{\Gamma(m_{RD})} + \frac{\Gamma(m_{RD}, \gamma_{th}\mu_{RD})}{\Gamma(m_{RD})} \left[ 1 - \frac{\mu_{LI}^{m_{LI}}}{e^{\gamma_{th}\mu_{SR}}} \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} (\gamma_{th}\mu_{SR})^q \right]^N \times \frac{\Psi(m_{LI}, m_{LI} + q + 1; \mu_{LI} + \gamma_{th}\mu_{SR})}{q!} \quad (29)$$

olarak bulunur. Alt sınır ifadesini (13)'te yerine koyup,  $\lim_{x \rightarrow 0} \gamma(\alpha, x) = 0$  ve

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Gamma(\alpha, x)}{e^x} = \Gamma(\alpha) \quad \text{eşitliklerinden yararlanırsak, SRLI kriteri için asimptotik kesinti olasılığını}$$

$$P_{SRLI}^\infty(\gamma_{th}) = \left[ 1 - \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{(\eta\gamma_{th})^q}{q!} \times \left( \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \frac{\Psi(m_{LI}, m_{LI} + q + 1; \mu_{LI} + \gamma_{th}\mu_{SR})}{\mu_{LI}^{-m_{LI}-q}} \right) \right]^N \quad (30)$$

şeklinde elde ederiz. (23) ve (30) karşılaştırıldığında kolayca fark edilecektir ki, OS ve SRLI kriterleri için asimptotik kesinti olasılıkları birbirine eşittir. Böylece SRLI kriteri için asimptotik kesinti olasılığı, (25) kullanılarak şu şekilde yazılır:

$$P_{SRLI}^\infty(\gamma_{th}) = \left[ 1 - \frac{1}{\Gamma(m_{LI})} \sum_{q=0}^{m_{SR}-1} \frac{(\eta\gamma_{th})^q \Gamma(m_{LI} + q)}{q!(1 + \eta\gamma_{th})^{m_{LI} + q}} \right]^N \quad (31)$$

**4.3 S-R Bağlantısına Göre Röle Seçimi**  
Üçüncü röle seçim kriteri olarak tanımlanan SR seçim kriterinde röle seçim işlemi sadece  $\gamma_{SR}^{(c)}$  rastlantı

değişkenlerine göre yapıldığı için, rôle seçiminden sonra  $\gamma_{RD}^{(b_{SR})}$  ve  $\gamma_{LI}^{(b_{SR})}$  rastlantı değişkenleri Gamma dağılımına sahiplerdir. Tam kesinti olasılığı kolayca

$$P_{SR}(\gamma_{th}) = 1 - \int_{y=\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_{RD}^{(c)}}(y) \times \bar{F}_{X_1^{(b_{SR})}} \left[ \frac{\gamma_{th}(y+1)}{y-\gamma_{th}} \right] dy \quad (32)$$

biçiminde verilir.  $X_1^{(b_{SR})}$ 'nin CDF ifadesini bulabilmek için, öncelikle  $\gamma_{SR}^{(b_{SR})}$ 'nin CDF'si bulunmalıdır:

$$F_{\gamma_{SR}^{(b_{SR})}}(x) = \Pr \left( \max_{1 \leq c \leq N} \{ \gamma_{SR}^{(c)} \} \leq x \right) = \left[ \frac{\gamma(m_{SR}, x\mu_{SR})}{\Gamma(m_{SR})} \right]^N \quad (33)$$

Bulunan CDF ve [20, (8.352.6)] yardımıyla,  $X_1^{(b_{SR})}$  için,

$$F_{X_1^{(b_{SR})}}(x) = \int_{y=0}^{\infty} f_{\gamma_{LI}^{(c)}}(y) F_{\gamma_{SR}^{(b_{SR})}}[x(y+1)] dy = \frac{\mu_{LI}^{m_{LI}}}{\Gamma(m_{LI})} \int_{y=0}^{\infty} \frac{y^{m_{LI}-1}}{e^{y\mu_{LI}}} \times \left[ 1 - \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \frac{[x(y+1)\mu_{SR}]^u}{e^{x(y+1)\mu_{SR}} u!} \right]^N dy \quad (34)$$

yazılabilir. İntegralin çözümü için sırasıyla binom açılımı ve [21, (7)]'de açıklanan biçimde çok-terimli katsayıları kullanırsak, CDF yeniden

$$F_{X_1^{(b_{SR})}}(x) = \frac{\mu_{LI}^{m_{LI}}}{\Gamma(m_{LI})} \sum_{k=0}^N \binom{N}{k} \frac{(-1)^k}{e^{kx\mu_{SR}}} \times \int_{y=0}^{\infty} \frac{y^{m_{LI}-1}}{e^{y(\mu_{LI}+kx\mu_{SR})}} \left[ \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \frac{[x(y+1)\mu_{SR}]^u}{u!} \right]^k dy \quad (35)$$

$$= \frac{\mu_{LI}^{m_{LI}}}{\Gamma(m_{LI})} \sum_{k=0}^N \sum_{q=0}^{\theta_1} \binom{N}{k} \frac{\Phi_1^q(x\mu_{SR})^q}{e^{kx\mu_{SR}}} \times \int_{y=0}^{\infty} \frac{y^{m_{LI}-1} (y+1)^q}{e^{y(\mu_{LI}+kx\mu_{SR})}} dy$$

olarak elde edilir. Burada  $\theta_1 = k(m_{SR}-1)$  ve  $\Phi_1^q$ ,

$$\left[ - \sum_{t=0}^{m_{SR}-1} \frac{[x(y+1)\mu_{SR}]^t}{t!} \right]^k \quad (36)$$

toplamındaki  $[x(y+1)\mu_{SR}]^q$  teriminin katsayısıdır. Son olarak [20, (9.211.4)]'ü kullanırsak,  $X_1^{(b_{SR})}$ 'nin CDF ifadesi kapalı formda şu şekilde bulunur:

$$F_{X_1^{(b_{SR})}}(x) = \mu_{LI}^{m_{LI}} \sum_{k=0}^N \sum_{q=0}^{\theta_1} \binom{N}{k} \frac{\Phi_1^q(x\mu_{SR})^q}{e^{kx\mu_{SR}}} \times \Psi(m_{LI}, m_{LI} + q + 1; \mu_{LI} + kx\mu_{SR}). \quad (37)$$

SR kriteri için tam kesinti olasılığını elde etmek için (37)'yi (32)'de yerine koyarsak, tam kesinti olasılığı tek katlı integralli formunda

$$P_{SR}(\gamma_{th}) = \frac{\Gamma(m_{RD}, \gamma_{th}, \mu_{RD})}{\Gamma(m_{RD})} + \frac{\mu_{RD}^{m_{RD}} \mu_{LI}^{m_{LI}}}{\Gamma(m_{RD})} \times \sum_{k=0}^N \sum_{q=0}^{\theta_1} \binom{N}{k} \frac{\Phi_1^q}{(\gamma_{th}\mu_{SR})^{-q}} \times \int_{y=\gamma_{th}}^{\infty} \frac{y^{m_{RD}-1} [(y+1)/(y-\gamma_{th})]^q}{e^{y\mu_{RD} + k\gamma_{th}\mu_{SR}(y+1)/(y-\gamma_{th})}} \times \Psi \left( m_{LI}, m_{LI} + q + 1; \mu_{LI} + \frac{k\gamma_{th}\mu_{SR}(y+1)}{y-\gamma_{th}} \right) dy \quad (38)$$

olarak bulunur. Bildiğimiz kadarıyla  $P_{SR}(\cdot)$  için de kapalı formda bir çözüm yoktur. Fakat, SR kriteri için kapalı

formda olan alt sınır ifadesi (13) ve (37)'yi kullanarak,

$$P_{SR}^{ALT}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{\Gamma(m_{RD}, \gamma_{th} \mu_{RD})}{\Gamma(m_{RD})} \times \left[ 1 - \mu_{LL}^{m_{LL}} \sum_{k=0}^N \sum_{q=0}^{\theta_1} \binom{N}{k} \times \frac{\Phi_1^q \Psi(m_{LL}, m_{LL} + q + 1; \mu_{LL} + k\gamma_{th} \mu_{SR})}{(\gamma_{th} \mu_{SR})^{-q} e^{k\gamma_{th} \mu_{SR}}} \right] \quad (39)$$

biçiminde elde edilir. Yukarıda bulunan ifadeyi (14)'te yerine koyup, SRLI kriteri için asimptotik kesinti olasılığında uygulanan analizler tekrarlanırsa, SR kriterine ait asimptotik kesinti olasılığı

$$P_{SR}^{\infty}(\gamma_{th}) = \sum_{k=0}^N \sum_{q=0}^{\theta_1} \binom{N}{k} \frac{\Phi_1(\eta \mu_{SR})^q}{e^{k\gamma_{th} \mu_{SR}}} \times \left[ \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \frac{\Psi(m_{LL}, m_{LL} + q + 1; \mu_{LL} + k\gamma_{th} \mu_{SR})}{\mu_{LL}^{-m_{LL} - q}} \right] \quad (40)$$

olarak yazılabilir. (24)'ü kullanarak, SR kriteri için asimptotik kesinti olasılığı

$$P_{SR}^{\infty}(\gamma_{th}) = \frac{1}{\Gamma(m_{LL})} \sum_{k=0}^N \sum_{q=0}^{\theta_1} \binom{N}{k} \times \frac{\Phi_1(\eta \gamma_{th})^q \Gamma(m_{LL} + q)}{(1 + k\eta \gamma_{th})^{m_{LL} + q}} \quad (41)$$

şeklinde bulunur. OS ve SRLI kriterlerinde olduğu gibi,  $P_{SR}^{\infty}(\cdot)$  ifadesi de  $m_{RD}$  ve  $\mu_{RD}$ 'den bağımsızdır.

#### 4.4 LI bileşenlerine göre rôle seçimi

Rôle düğümlerinde gerçekleştirilen FD iletim işlemi nedeniyle oluşan artık LI bileşenin sisteme olan etkisini azaltmak için önerilen LI seçim kriterinin kullanılması durumunda, FD-AF-RS sisteminin tam kesinti olasılığı

$$P_{LI}(\gamma_{th}) = 1 - \int_{y=\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_{RD}^{(c)}}(y) \times \bar{F}_{X_1^{(b_{LI})}} \left[ \frac{\gamma_{th}(y+1)}{y - \gamma_{th}} \right] dy \quad (42)$$

biçiminde verilir. SR kriterine benzer şekilde  $X_1^{(b_{LI})}$ 'nin CDF'sini elde etmek için ilk olarak  $\gamma_{LI}^{(b_{LI})}$ 'nin PDF'si bulunmalıdır.

$f_{\gamma_{LI}^{(b_{LI})}}(\cdot) = \frac{\partial}{\partial x} F_{\gamma_{LI}^{(b_{LI})}}(\cdot)$  eşitliği kullanarak, PDF ifadesi

$$f_{\gamma_{LI}^{(b_{LI})}}(x) = \frac{\partial}{\partial x} \Pr \left( \min_{1 \leq c \leq N} \{ \gamma_{LI}^{(c)} \} \leq x \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ 1 - \prod_{c=1}^N \bar{F}_{\gamma_{LI}^{(b_{LI})}}(x) \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\Gamma(m_{LL}, x \mu_{LL})}{\Gamma(m_{LL})} \right]^N = \frac{N \mu_{LL}^{m_{LL}} x^{m_{LL}-1} [\Gamma(m_{LL}, x \mu_{LL})]^{N-1}}{e^{x \mu_{LL}} [\Gamma(m_{LL})]^N} \quad (43)$$

olarak elde edilir. Ardından  $X_1^{(b_{LI})}$ 'nin CDF ifadesi  $m_{SR}$ 'nin tam sayı değerlerine göre [20, (8.352.6)] şu biçimde yazılır:

$$F_{X_1^{(b_{LI})}}(x) = \int_{y=0}^{\infty} f_{\gamma_{LI}^{(b_{LI})}}(y) F_{\gamma_{SR}^{(c)}}[x(y+1)] dy = 1 - \frac{N \mu_{LL}^{m_{LL}}}{[\Gamma(m_{LL})]^N} \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \frac{(x \mu_{SR})^u}{u! e^{x \mu_{SR}}} \times \int_{y=0}^{\infty} \frac{y^{m_{LL}-1} (y+1)^u [\Gamma(m_{LL}, y \mu_{LL})]^{N-1}}{e^{y(\mu_{LL} + x \mu_{SR})}} dy. \quad (44)$$

İntegralin çözümü için (44) eşitliğini  $m_{LL}$ 'nin da tam sayı değerlerine göre [20, (8.352.6)] yeniden düzenlersek, CDF

$$F_{X_1^{(b_{LI})}}(x) = 1 - \frac{N\mu_{LI}^{m_{LI}}}{\Gamma(m_{LI})} \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \frac{(x\mu_{SR})^u}{u!e^{x\mu_{SR}}} \quad (45)$$

$$\times \int_{y=0}^{\infty} \frac{y^{m_{LI}-1}(y+1)^u}{e^{y(N\mu_{LI}+x\mu_{SR})}} \left[ \sum_{k=0}^{m_{LI}-1} \frac{(y\mu_{LI})^k}{k!} \right]^{N-1} dy$$

biçiminde yazılabilir. (35)'ten yararlanarak, CDF kapalı formda şu biçimde bulunur:

$$F_{X_1^{(b_{LI})}}(x) = 1 - \frac{N}{\Gamma(m_{LI})} \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \sum_{q=0}^{\theta_2} \frac{\Phi_2^q(x\mu_{SR})^u \mu_{LI}^{m_{LI}+q}}{u!e^{x\mu_{SR}}}$$

$$\times \int_{y=0}^{\infty} \frac{y^{m_{LI}+q-1}(y+1)^u}{e^{y(N\mu_{LI}+x\mu_{SR})}} dy$$

$$= 1 - \frac{N}{\Gamma(m_{LI})} \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \sum_{q=0}^{\theta_2} \frac{\Phi_2^q(x\mu_{SR})^u \Gamma(m_{LI}+q)}{\mu_{LI}^{-m_{LI}-q} u! e^{x\mu_{SR}}}$$

$$\times \Psi(m_{LI}+q, m_{LI}+q+u+1; N\mu_{LI}+x\mu_{SR}) \quad (46)$$

Burada  $\theta_2 = (N-1)(m_{LI}-1)$  ve  $\Phi_2^q$ ,

$$\left[ \sum_{k=0}^{m_{LI}-1} \frac{(y\mu_{LI})^k}{k!} \right]^{N-1} \quad (47)$$

toplamındaki  $(y\mu_{LI})^q$  teriminin katsayısıdır. (46)'yı (42)'de yerine koyarsak, LI kriteri için tam kesinti olasılığı

$$P_{LI}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{N\mu_{RD}^{m_{RD}}}{\Gamma(m_{LI})\Gamma(m_{RD})}$$

$$\times \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \sum_{q=0}^{\theta_2} \frac{\Phi_2^q \mu_{LI}^{m_{LI}+q} \Gamma(m_{LI}+q)}{u!(\gamma_{th}\mu_{SR})^{-u}}$$

$$\times \int_{y=\gamma_{th}}^{\infty} \frac{y^{m_{RD}-1} [(y+1)/(y-\gamma_{th})]^u}{e^{y\mu_{RD}+\gamma_{th}\mu_{SR}(y+1)/(y-\gamma_{th})}} dy$$

$$\times \Psi\left(m_{LI}+q, m_{LI}+q+u+1; N\mu_{LI} + \frac{\gamma_{th}\mu_{SR}(y+1)}{y-\gamma_{th}}\right) dy \quad (48)$$

biçiminde bulunur. Yukarıdan görüleceği üzere bu kriterde de tam kesinti olasılığı tek katlı integral biçiminde bulunmuş

olup, bildiğimiz kadarıyla kapalı formda çözümü yoktur. (13) ve (46)'yı kullanarak, alt sınır ifadesi

$$P_{LI}^{ALF}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{N\Gamma(m_{RD}, \gamma_{th}\mu_{RD})}{\Gamma(m_{LI})\Gamma(m_{RD})}$$

$$\times \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \sum_{q=0}^{\theta_2} \frac{\Phi_2^q(\gamma_{th}\mu_{SR})^u \mu_{LI}^{m_{LI}+q} \Gamma(m_{LI}+q)}{u!e^{\gamma_{th}\mu_{SR}}} \quad (49)$$

$$\times \Psi(m_{LI}+q, m_{LI}+q+u+1; N\mu_{LI} + \gamma_{th}\mu_{SR})$$

olarak kapalı formda bulunur. Alt sınır ifadesi ve (14) ile LI seçim kriteri için asimptotik kesinti olasılığı elde edilebilir. Yine SRLI kriterinde bulunan asimptotik ifade için kullanılan limit özellikleri yardımıyla,

$$P_{LI}^{\infty}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{N}{\Gamma(m_{LI})} \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \sum_{q=0}^{\theta_2} \frac{\Phi_2^q(\eta\gamma_{th})^u \Gamma(m_{LI}+q)}{u!}$$

$$\times \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \frac{\Psi(m_{LI}+q, m_{LI}+q+u+1; N\mu_{LI} + \gamma_{th}\mu_{SR})}{\mu_{LI}^{-(m_{LI}+q+u)}} \quad (50)$$

elde edilir. Daha sonra (24)'ü kullanarak, LI kriterine ait asimptotik kesinti olasılığı kapalı formda şu biçimde bulunur:

$$P_{LI}^{\infty}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{N}{\Gamma(m_{LI})}$$

$$\times \sum_{u=0}^{m_{SR}-1} \sum_{q=0}^{\theta_2} \frac{\Phi_2^q(\eta\gamma_{th})^u \Gamma(m_{LI}+q+u)}{u!(N+\eta\gamma_{th})^{m_{LI}+q+u}}. \quad (51)$$

#### 4.5 R-D bağlantısına göre rôle seçimi

Eğer seçim sadece R-D bağlantısı dikkate alınarak yapılırsa,  $\gamma_{SR}^{(b_{RD})}$  ve  $\gamma_{LI}^{(b_{RD})}$  rastlantı değişkenleri Gamma dağılımına sahip olurlar. Bu neden ile tam kesinti olasılığı

$$P_{RD}(\gamma_{th}) = 1 - \int_{y=\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_{RD}}^{(b_{RD})}(y) \times \bar{F}_{x_1^{(c)}} \left[ \frac{\gamma_{th}(y+1)}{y-\gamma_{th}} \right] dy \quad (52)$$

şeklinde ifade edilir.  $\gamma_{RD}^{(b_{RD})}$ 'nin CDF'si kolaylıkla

$$F_{\gamma_{RD}}^{(b_{RD})}(x) = \Pr \left( \max_{1 \leq c \leq N} \{ \gamma_{RD}^{(c)} \} \leq x \right) = \left[ \frac{\gamma(m_{RD}, x \mu_{RD})}{\Gamma(m_{RD})} \right]^N \quad (53)$$

biçiminde elde edildikten sonra, türev alınarak

$$f_{\gamma_{RD}}^{(b_{RD})}(x) = \frac{N \mu_{RD}^{m_{RD}} x^{m_{RD}-1} [\gamma(m_{RD}, x \mu_{RD})]^{N-1}}{e^{x \mu_{RD}} [\Gamma(m_{RD})]^N} \quad (54)$$

bulunur. Ardından (54)'ü (52)'de yerine koyarak, RD seçim kriteri için tam kesinti olasılığı tek katlı integral formunda şu şekilde bulunur:

$$P_{RD}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{N \mu_{RD}^{m_{RD}} \mu_{LI}^{m_{LI}}}{[\Gamma(m_{RD})]^N} \sum_{t=0}^{m_{SR}-1} \frac{(\gamma_{th} \mu_{SR})^t}{t!} \times \int_{y=\gamma_{th}}^{\infty} \frac{y^{m_{RD}-1} (y+1)^t [\gamma(m_{RD}, y \mu_{RD})]^{N-1}}{e^{y \mu_{RD} + \gamma_{th} \mu_{SR} (y+1)} (y-\gamma_{th})^t} \times \Psi \left( m_{LI}, m_{LI} + t + 1; \mu_{LI} + \frac{\gamma_{th} \mu_{SR} (y+1)}{y-\gamma_{th}} \right) dy. \quad (55)$$

Bildiğimiz kadarıyla tam kesinti olasılığı için de kapalı formda bir çözüm bulunmamaktadır. Daha sonra alt sınır ifadesi (13), (19) ve (53) yardımıyla kapalı formda şu biçimde bulunur:

$$P_{RD}^{ALT}(\gamma_{th}) = 1 - \left\{ 1 - \left[ \frac{\gamma(m_{RD}, \gamma_{th} \mu_{RD})}{\Gamma(m_{RD})} \right]^N \right\} \frac{\mu_{LI}^{m_{LI}}}{e^{\gamma_{th} \mu_{SR}}} \times \sum_{t=0}^{m_{SR}-1} \frac{(\gamma_{th} \mu_{SR})^t}{t!} \Psi(m_{LI}, m_{LI} + t + 1; \mu_{LI} + \gamma_{th} \mu_{SR}). \quad (56)$$

Son olarak RD kriterine ait asimptotik kesinti olasılığı (13) ve (56) yardımıyla bulunabilir. Sırasıyla,  $\lim_{x \rightarrow 0} \gamma(\alpha, x) = 0$  ve  $\lim_{x \rightarrow 0} e^{-x} = 1$  limit özelliklerini uygulayıp, (24)'ü kullanırsak, asimptotik kesinti olasılığı kolaylıkla

$$P_{RD}^{\infty}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{1}{\Gamma(m_{LI})} \sum_{t=0}^{m_{SR}-1} \frac{(\eta \gamma_{th})^t \Gamma(m_{LI} + q)}{t! (1 + \eta \gamma_{th})^{m_{LI} + q}} \quad (57)$$

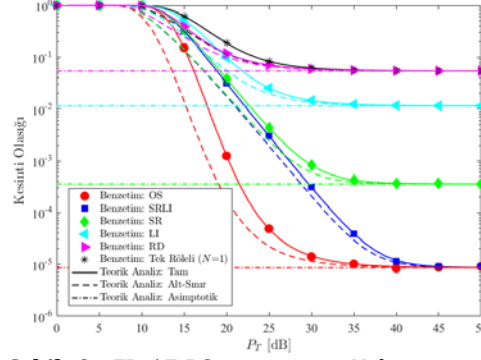
şeklinde bulunur. Bulunan ifade röle sayısı olan  $N$ 'den bağımsız olup, OS kriteri için bulunan ve (25)'te verilen asimptotik kesinti olasılığı ile tek röleli durumda ( $N=1$ ) eşdeğerdir.

## 5. Nümerik Sonuçlar

Bu bölümde Nakagami- $m$  sönümlmeli kanallardaki FD-AF-RS sisteminin kesinti olasılığı için yapılan teorik analiz ve Monte-Carlo tipi bilgisayar benzetim sonuçları karşılaştırılacaktır. Yapılan analizlerin doğruluğu çeşitli benzetim senaryoları ile gösterilecektir. FD-AF-RS sisteminde iletim süresince harcanan toplam güç  $P_T = P_S + P_R$  biçiminde tanımlanmıştır. Tüm benzetim senaryolarında  $\Omega_{SR} = \Omega_{RD} = 1$  ve  $\sigma_R^2 = \sigma_D^2 = 1$  olarak alınmıştır.

FD-AF-RS sisteminin Nakagami- $m$  kanallarda,  $N = 4$ ,  $\gamma_{th} = 5$ ,  $\Omega_{LI} = 0.05$ ,  $P_S = P_R$ ,  $m_{SR} = 3$ ,  $m_{RD} = 2$  ve  $m_{LI} = 4$  olduğu

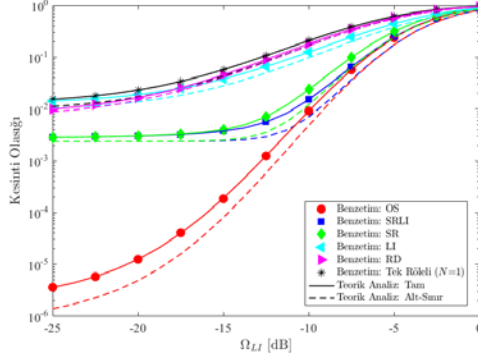
durumda, farklı  $P_T$  değerlerine göre kesinti olasılığı Şekil 2’de verilmiştir. Burada FD-AF-RS sistemi için önerilen röle seçim kriterleri hem kendi aralarında, hem de tek röleli durum ( $N=1$ ) ile karşılaştırılmıştır. OS, SRLI, SR, LI ve RD seçim kriterleri için sırasıyla (20), (28), (38), (48) ve (55)’te verilen tam kesinti olasılığı ifadeleri yardımıyla elde edilen eğriler, benzetim sonuçları ile tam olarak örtüşmektedir. Bu da yapılan analizlerin doğruluğunu ispatlamaktadır. Elde edilen sonuçlar ışığında en iyi röle seçim kriterinin OS olduğu anlaşılmaktadır. Düşük SNR bölgesinde SR ve SRLI kriterlerinin kesinti performansı birbirine çok yakın iken, SNR değeri arttıkça SRLI kriterinin performansı OS kriterine yakınsamaktadır. Ayrıca RD kriteri düşük SNR bölgesinde LI kriterine göre daha iyi bir performans sağlamasına karşın, bu senaryo için  $P_T$  değeri 18.9 dB’yi geçtiğinde LI kriterinin performansı RD kriterinin performansını geçmektedir. Bunlara ek olarak, seçim kriterleri için elde edilen (21), (29), (39), (49) ve (56) yardımıyla çizdirilen alt sınır eğrileri, tam kesinti olasılıkları için sıkı bir alt sınır oluşturmaktadır. Örneğin OS, SRLI ve SR kriterleri için kesinti olasılığı  $10^{-3}$  olduğunda, alt sınır ve tam kesinti olasılığı arasında yaklaşık olarak sırasıyla 2.4 dB, 0.9 dB ve 1.5 dB fark vardır. FD iletim nedeni ile röle düğümünde oluşan artık LI bileşenlerinin, tüm seçim kriterlerinde orta ve yüksek SNR bölgesinde bir hata sınırı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Oluşan bu hata sınırları (25), (31), (41),



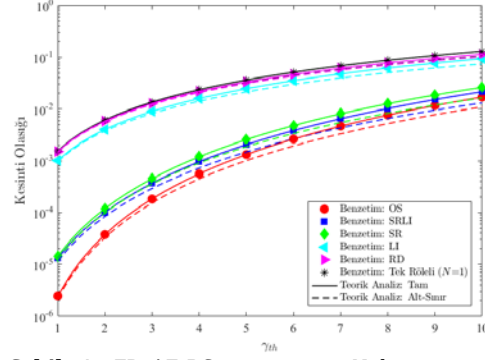
**Şekil 2.** FD-AF-RS sisteminin Nakagami- $m$  kanallarda farklı  $P_T$  değerlerine göre kesinti olasılığı:  $N = 4$ ,  $\gamma_n = 5$ ,  $\Omega_{LI} = 0.05$ ,  $P_S = P_R$ ,  $m_{SR} = 3$ ,  $m_{RD} = 2$  ve  $m_{LI} = 4$ .

(51) ve (57)’de verilen asimptotik kesinti ifadeleri yardımıyla kolaylıkla öngörülebilir. Seçim kriterlerini hata sınırları açısından karşılaştıracak olursak, hata sınırları  $8.6 \times 10^{-6}$ ’da oluşan OS ve SRLI kriterleri bu açıdan başarılı kriterler olup, bunları hata sınırları sırasıyla  $3.6 \times 10^{-4}$ ,  $1.2 \times 10^{-2}$  ve  $5.4 \times 10^{-2}$ ’de gözlenen SR, LI ve RD kriterleri takip etmektedir.

Şekil 3’te FD-AF-RS sisteminin kesinti olasılığı farklı  $\Omega_{LI}$  değerlerine göre çizdirilmiştir. Bu analizde  $N = 3$ ,  $\gamma_{th} = 3$ ,  $P_T = 20$  dB,  $P_S = P_R$ ,  $m_{SR} = 2$ ,  $m_{RD} = 2.5$  ve  $m_{LI} = 5$  olarak alınmıştır. Tek röleli durum ( $N = 1$ ) ile karşılaştırıldığında en fazla performans artışının yine OS ile sağlandığı görülmektedir. İletim gücünün sabit olduğu bu senaryoda  $\Omega_{LI}$ ’nın azalmasıyla SR ve SRLI kriterlerinin kesinti performansı birbirine yaklaşmaktadır. Ayrıca anlaşılmaktadır ki, artık LI bileşeninin gücü azaldıkça LI kriterinin sağladığı fayda azalmaktadır.



**Şekil 3.** FD-AF-RS sisteminin Nakagami- $m$  kanallarda farklı  $\Omega_{LI}$  değerlerine göre kesinti olasılığı:  $N = 3$ ,  $\gamma_{th} = 3$ ,  $P_T = 20$  dB,  $P_S = P_R$ ,  $m_{SR} = 2$ ,  $m_{RD} = 2.5$  ve  $m_{LI} = 5$ .



**Şekil 4.** FD-AF-RS sisteminin Nakagami- $m$  kanallarda farklı  $\gamma_{th}$  değerlerine göre kesinti olasılığı:  $N = 2$ ,  $\Omega_{LI} = 0.02$ ,  $P_T = 25$  dB,  $P_S = P_R$ ,  $m_{SR} = 2$ ,  $m_{RD} = 2.5$  ve  $m_{LI} = 5$ .

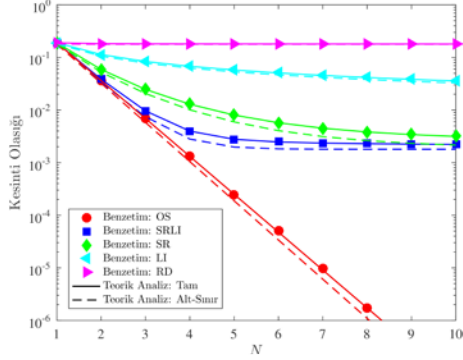
Şekil 4'te FD-AF-RS sisteminin kesinti olasılığı,  $N = 2$ ,  $\Omega_{LI} = 0.02$ ,  $P_T = 25$  dB,  $P_S = P_R$ ,  $m_{SR} = 2$ ,  $m_{RD} = 2.5$  ve  $m_{LI} = 5$  olduğu durumda, farklı  $\gamma_{th}$  değerlerine göre verilmiştir. Beklendiği üzere  $\gamma_{th}$ 'nin azalması ile sistemin kesinti performansı iyileşmektedir. Bu senaryoda da en iyi performans OS kriteri ile sağlanmasına karşın,  $\gamma_{th}$ 'nin artması ile OS kriterinin sağladığı performans SRLI ve SR kriterlerinininkine yakınsamaktadır. Ayrıca tüm seçim kriterleri için çizdirilen alt sınır eğrileri,  $\gamma_{th}$ 'nin azalması ile tam kesinti olasılığı eğrilerine daha fazla yaklaşmaktadır.

FD-AF-RS sistemin farklı  $N$  değerlerine göre kesinti olasılığı Şekil 5'te verilmiştir. Bu senaryoda  $\gamma_{th} = 6$ ,  $\Omega_{LI} = 0.06$ ,  $P_T = 30$  dB,  $P_S = P_R$ ,  $m_{SR} = 2$ ,  $m_{RD} = 1.5$  ve  $m_{LI} = 3$  alınmıştır. Sonuçlardan kolaylıkla anlaşılacaktır ki, röle sayısının artması ile OS kriterinin performansı doğrusal olarak artmaktadır. Fakat diğer dört seçim

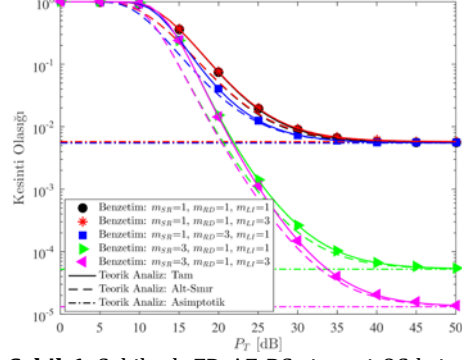
kriterinde sabit iletim gücü koşulu altında röle sayısındaki artışın belli bir röle sayısından sonra performansı etkilemediği gözlemlenmiştir. Örneğin SRLI kriteri kullanıldığında  $N \geq 5$  için kesinti olasılığı sabit iken, RD kriteri için röle sayısının artırılması performansa hiçbir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.

Şu ana kadar yapılan analizlerde en iyi kesinti performansını sağlayan OS kriteri için,  $N = 2$ ,  $\gamma_{th} = 4$ ,  $\Omega_{LI} = 0.01$  ve  $2P_S = P_R$  alındığında, farklı  $P_T$  değerlerine göre elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Bu analizde  $m_{SR}$ ,  $m_{RD}$  ve  $m_{LI}$ 'nin farklı değerlerine göre beş farklı benzetim senaryosu oluşturulmuştur. İlk olarak tüm  $m$  değerleri 1 olarak alınıp, FD-AF-RS sisteminin Rayleigh sönümlmeli kanallardaki performansı gösterilmiştir. Ardından  $m_{SR} = m_{RD} = 1$  olduğunda  $m_{LI}$ 'nin değerinin 1'den 3'e yükseltilmiş olup, bu durumda sistemin performansının artmadığı, hatta yakından incelendiğinde kesinti performansının kötüleştiği gözlemlenmiştir. Örneğin Rayleigh kanallarda hata sınırı  $5.5 \times 10^{-3}$ 'te oluşurken,  $m_{SR} = m_{RD} = 1$  ve

$m_{LI} = 3$  alındığında hata sınırı sınırına olan etkisinin  $m_{SR}$ 'nin değerine  $5.8 \times 10^{-3}$ 'te bağlı olduğunu anlaşılr.



**Şekil 5.** FD-AF-RS sisteminin Nakagami- $m$  kanallarda farklı değerlerine göre kesinti olasılığı:  $\gamma_h = 6$ ,  $\Omega_{LI} = 0.06$ ,  $P_T = 30$  dB,  $P_S = P_R$ ,  $m_{SR} = 2$ ,  $m_{RD} = 1.5$  ve  $m_{LI} = 3$ .



**Şekil 6.** Şekil adı FD-AF-RS sistemi OS kriteri ile birleştirildiğinde Nakagami- $m$  kanallarda farklı  $P_T$  değerlerine göre kesinti olasılığı:  $N = 2$ ,  $\gamma_h = 4$ ,  $\Omega_{LI} = 0.01$  ve  $2P_S = P_R$ .

oluşmaktadır. Eğer  $m_{SR} = m_{LI} = 1$  ve  $m_{RD} = 3$  olarak alınırsa, düşük SNR bölgesinde Rayleigh kanallara göre daha iyi performans sağlanmasına karşın, tam olarak aynı hata sınırına ulaşılır. Bu sonuç OS kriteri için (25)'te elde edilen asimptotik ifadenin  $m_{RD}$ 'den bağımsız olması ile açıklanabilir. Ancak  $m_{RD} = m_{LI} = 1$  ve  $m_{SR} = 3$  olarak alındığında, yani  $m_{SR}$  artırıldığında, Rayleigh kanallara göre hem kesinti olasılığı eğrisinin eğiminin arttığı, hem de bu senaryo için yaklaşık 100 kat daha düşük ve  $5.2 \times 10^{-5}$ 'te oluşan bir hata sınırına ulaştığı gözlemlenmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere  $m$  parametreleri arasında en etkin olan  $m_{SR}$ 'dir. Son olarak  $m_{SR} = 3$  ve  $m_{RD} = 1$  olduğunda  $m_{LI}$ 'nin değerinin 1'den 3'e çıkartılması, Rayleigh kanallar ile yapılan karşılaştırmanın aksine, hata sınırını düşürmektedir. Buradan  $m_{LI}$ 'nin hata

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada  $N$  adet röleli FD-AF-RS sisteminin kesinti performansı beş farklı röle seçim kriterine göre incelenmiştir. Röle düğümlerinde oluşan artık LI kanalları da dahil olmak üzere, tüm kanallar Nakagami- $m$  sönümlenmeli kanal olarak modellenmiştir. Önerilen tüm seçim kriterleri için kesinti olasılığı tek katlı integral formunda bulunmuş olup, ifadelerin doğruluğu Monte-Carlo benzetimleri ile doğrulanmıştır. Nümerik sonuçlar göstermiştir ki FD-AF-RS sisteminin kesinti performansını en fazla artıran röle seçim kriteri OS kriteri iken, kesinti performansını en az artıran ise RD kriteridir. OS seçim kriteri için baskın olan  $m$  parametresi ilk bağlantıya ait olan  $m_{SR}$ 'dir. Ayrıca yine her bir seçim kriteri için kapalı formda birer sıkı alt sınır ifadesi ve asimptotik kesinti olasılığı ifadesi elde edilmiştir. Alt sınır eğrileri SNR değerinin artması ve/veya  $\gamma_h$ 'nin azalması ile tam kesinti olasılığı eğrilerine yakınsamaktadır. Elde edilen



sonuçlardan, artık LI bileşenleri nedeni ile orta ve yüksek SNR bölgelerinde hata sınırlarının oluştuğu gözlemlenmiştir ve bu hata sınırlarının asimptotik kesinti ifadeleri yardımıyla kolaylıkla belirlenebileceği gösterilmiştir.

### EK

Asimptotik analizlerde kullanılacak olan (24)'te verilen limit ifadesinin ispatı bu bölümde gösterilecektir. [20, (9.211.4)] kullanılarak (24)'te verilen eşitliğin solundaki limit ifadesinde bulunan konfluent hipergeometrik fonksiyonu tek katlı integral biçiminde yeniden şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} & \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \frac{\Psi(\alpha, \alpha + \delta + 1; \lambda\mu_{LI} + \varepsilon\mu_{SR})}{\mu_{LI}^{-\alpha-\delta}} \\ &= \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \frac{\mu_{LI}}{\Gamma(\alpha)} \int_{x=0}^{\infty} \frac{(x\mu_{LI})^{\alpha-1} (x\mu_{LI} + \mu_{LI})^{\delta}}{e^{x(\lambda\mu_{LI} + \varepsilon\mu_{SR})}} dx. \end{aligned} \quad (58)$$

Ardından, sırasıyla integral içerisinde  $y = x\mu_{LI}$  şeklinde bir değişken dönüşümü uygulanır ve  $\lim_{x \rightarrow 0} (y+x)^{\delta} = y^{\delta}$  eşitliğinden yararlanılırsa, limit işlemi basitçe

$$\begin{aligned} & \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \frac{\Psi(\alpha, \alpha + \delta + 1; \lambda\mu_{LI} + \varepsilon\mu_{SR})}{\mu_{LI}^{-\alpha-\delta}} \\ &= \lim_{\substack{P_S \rightarrow \infty \\ P_R \rightarrow \infty}} \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{y=0}^{\infty} \frac{y^{\alpha-1} (y + \mu_{LI})^{\delta}}{e^{y(\lambda + \eta\varepsilon)}} dy \\ &= \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{y=0}^{\infty} \frac{y^{\alpha+\delta-1}}{e^{y(\lambda + \eta\varepsilon)}} dy \end{aligned} \quad (59)$$

olarak bulunur. Son olarak [20, (3.351.3)]'ten yararlanarak, yukarıdaki integral (24)'te verilen biçimde çözülür.

### Kaynakça

- [1] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [2] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, pp. 1126–1131, Nov. 2003.
- [3] H. Li and Q. Zhao, "Distributed modulation for cooperative wireless communications", *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 23, no. 5, pp. 30–36, Sept. 2006.
- [4] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 6, pp. 1963–1968, Nov. 2004.
- [5] H. Ju, E. Oh, and D. Hong, "Catching resource-devouring worms in next-generation wireless relay systems: Two-way relay and full-duplex relay", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 9, pp. 58–65, Sept. 2009.
- [6] G. Liu, F. R. Yu, H. Ji, V. C. M. Leung, and X. Li, "In-band full-duplex relaying: A survey, research issues and challenges", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 2, pp. 500–524, Secondquarter 2015.
- [7] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, "Optimized gain control for single-frequency relaying with loop interference", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 2801–2806, June 2009.
- [8] Z. Zhang, K. Long, A. V. Vasilakos and L. Hanzo, "Full-Duplex Wireless Communications: Challenges, Solutions, and Future Research Directions", *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 7, pp. 1369-1409, July 2016.
- [9] M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, "Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 12, pp. 4296–4307, Dec. 2012.

- [10] L. J. Rodriguez, N. H. Tran, and T. Le-Ngoc, "Optimal power allocation and capacity of full-duplex AF relaying under residual self-interference", *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 233–236, Apr. 2014.
- [11] D. P. M. Osorio, E. E. B. Olivo, H. Alves, J. C. S. S. Filho, and M. Latva-aho, "Exploiting the direct link in full-duplex amplify-and-forward relaying networks", *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 1766–1770, Oct. 2015.
- [12] Q. Wang, Y. Dong, X. Xu, and X. Tao, "Outage probability of full-duplex af relaying with processing delay and residual self-interference", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 5, pp. 783–786, May 2015.
- [13] Z. Shi, S. Ma, F. Hou, and K. W. Tam, "Analysis on full duplex amplify-and-forward relay networks under Nakagami fading channels", *2015 IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Dec. 2015, pp. 1–6.
- [14] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, "Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 9, pp. 3074–3085, Sept. 2011.
- [15] J. S. Han, J. S. Baek, S. Jeon, and J. S. Seo, "Cooperative networks with amplify-and-forward multiple-full-duplex relays", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 4, pp. 2137–2149, Apr. 2014.
- [16] I. Krikidis, H. A. Suraweera, P. J. Smith, and C. Yuen, "Full-duplex relay selection for amplify-and-forward cooperative networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 12, pp. 4381–4393, Dec. 2012.
- [17] K. Yang, H. Cui, L. Song, and Y. Li, "Efficient full-duplex relaying with joint antenna-relay selection and self-interference suppression", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 7, pp. 3991–4005, July 2015.
- [18] A. Almradi and K. A. Hamdi, "MIMO Full-Duplex Relaying in the Presence of Co-Channel Interference", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 6, pp. 4874–4885, June 2017.
- [19] H. Alves, R. D. Souza, D. B. da Costa and M. Latva-aho, "Full-Duplex Relaying Systems Subject to Co-Channel Interference and Noise in Nakagami- $m$  Fading", *2015 IEEE 81st Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, Glasgow, Scotland, May, 2015.
- [20] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*, 7th ed. Elsevier/Academic Press, Amsterdam, 2007.
- [21] B. Kumbhani and R. S. Kshetrimayum, "Outage probability analysis of spatial modulation systems with antenna selection," *Electronics Lett.*, vol. 50, no. 2, pp. 125–126, Jan. 2014.