

# Tam Çift-yönlü Bilişsel DF Röle Ağları için Bir Spektrum Paylaşım Protokolü

## A Spectrum Sharing Protocol for Full-Duplex Cognitive DF Relay Networks

Hüseyin Onur BAKTIROĞLU, Ümit AYGÖLÜ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE  
baktiroglu16@itu.edu.tr, aygol@itu.edu.tr

**Özetçe**—Bilişsel tam çift-yönlü röle sistemleri, spektral verimliliği artırmasının yanında, bu sistemlerde röle kullandığı için kapsama alanında genişleme sağlar. Bu bildiride iki yönlü iletim için iki evreli yeni bir tam çift-yönlü çöz ve aktar (DF) röleli spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. Sistemdeki birincil ve ikincil kullanıcıların servis kesilme olasılığı ifadeleri kuramsal olarak elde edilmiş ve sonuçlar bilgisayar benzetimleriyle doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, iki evreli bilişsel tam çift-yönlü kuvvetlendir ve aktar (AF) ve üç evreli bilişsel yarı çift-yönlü çöz ve aktar sistemlerinin başarımları ile karşılaştırılmıştır. Sistemdeki artık döngü girişiminin yeterince düşük olduğu durumlarda, birincil kullanıcının servis kesilme başarımının arttığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** — bilişsel radyo, spektrum paylaşımı, iki yönlü tam çift-yönlü aktarım

**Abstract**—Cognitive full-duplex relaying systems offer the advantage not only of increasing spectral efficiency by spectrum sharing but also of extending the coverage through the use of relays. In this paper, a novel two-phase spectrum sharing protocol for two-way full-duplex decode-and-forward (DF) relaying, is proposed. Analytical expressions for the outage probabilities of primary and secondary users are derived and the theoretical results are approved via computer simulations. Obtained results are compared with the outage performances of two-phase full-duplex amplify-and-forward (AF) relaying and three-phase half-duplex DF relaying schemes. It is observed that the outage performance of primary user increases when the system residual loop interference is small enough.

**Keywords** — cognitive radio, spectrum sharing, two-way full-duplex relaying

### I. GİRİŞ

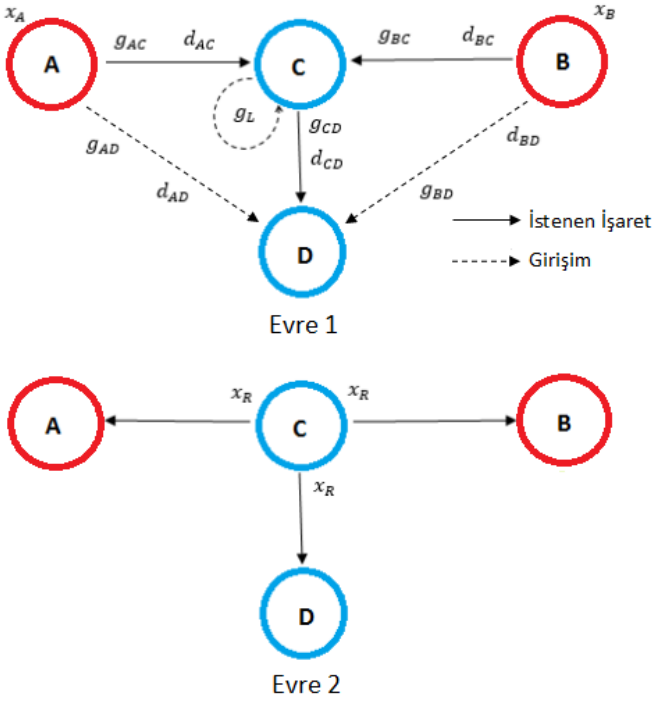
Telsiz hizmetlere olan isteğin artmasıyla, kullanılabilir radyo spektrum kaynakları günden güne azalmaktadır. Bilişsel radyo sistemleri, lisanssız ikincil kullanıcıların lisanslı birincil kullanıcıların kullandığı spektrumunu belli koşullar altında kullanmalarına olanak sağlamaktadır. Bu teknik spektrum paylaşımı olarak adlandırılmaktadır. Kuramsal olarak, spektrum paylaşımı, var olan yasal iletişim sistemlerinin yani birincil kullanıcıların başarımını etkilemeden herhangi bir yöntem kullanılarak spektral verimliliği arttırmayı hedeflemektedir [1].

Spektral verimliliği ve link hizmet kalitesini daha da arttırmak amacıyla bilişsel radyo işbirlikli iletişim teknikleri ile

birleştirilmiş ve bilişsel röle kavramı ortaya çıkmıştır [2], [3]. Bilişsel röle, ikincil kullanıcının bir ögesi olup ikincil verici veya ayrı bir edilgen röle olabilir. Bilişsel röle spektrumunu etkin bir şekilde tarayarak birincil kullanıcıların iletimine yardım etmekte ve aynı zamanda kendi ileteceği işareti ikincil alıcıya göndermektedir [4]. Röle genel olarak tek-yönlü veya çift-yönlü olarak çalışabilir. Yarı çift-yönlü (half-duplex) aktarım işleminde, iletimin ilk evresinde verici röleye bilgi işaretini göndermekte ikinci evrede ise röle kuvvetlendir ve aktar (AF) veya çöz ve aktar (DF) tekniğiyle işareti alıcıya göndermektedir. Tam çift-yönlü aktarım işleminde, röle aynı zaman diliminde ve aynı frekansta, hem verici uçtan gelen işareti almakta hem de alıcı uca işaret göndermektedir [5]. Tam çift-yönlü aktarım spektral verimliliği artırmaktadır ancak rölenin aynı zaman diliminde hem işaret göndermesi hem de almasından dolayı döngü girişimi oluşmakta ve sistemin başarımı düşmektedir. Literatürde spektrum paylaşımı ile ilgili birçok çalışma vardır. [3]'de yazarlar tam çift-yönlü bilişsel AF röle ağlarda spektrum paylaşımını ele almışlar, sistemin artık döngü girişimine bağlı olarak servis kesilme başarımını incelemişlerdir. Önerdikleri sistemde röle kendi alıcısına sadece ilk evrede iletmektedir. [6]'da üç evreli bilişsel iki yönlü DF röle ağlarda spektrum paylaşımı incelenmiştir.

Bu bildiride, sırasıyla, iki yönlü ve tek yönlü iletişim kurabilen bir birincil ve bir ikincil kullanıcı çiftinden oluşan bilişsel ağ ele alınmakta, ikincil vericinin, birincil kullanıcı ile işbirliği yapmak amacıyla tam çift-yönlü DF etkin röle görevi gördüğü varsayılmaktadır. Ele alınan ağ yapısı için yeni bir protokol önerilmekte, sistemde spektral verimliliği artırmak üzere tam çift-yönlü DF röle kullanılmasının yanı sıra ikincil kullanıcının başarımını artırmak amacıyla ikincil verici (etkin röle) iki iletim evresinde de ikincil alıcıya kendi bilgisini göndermektedir. Birincil ve ikincil kullanıcıların servis kesilme olasılıkları analitik yöntemlerle elde edilmekte, başarımları bilgisayar benzetimleriyle desteklenmektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar literatürde verilen eşdeğer spektrum paylaşım yöntemlerinin başarımları ile karşılaştırılmaktadır.

Bildirinin 2. Bölümünde sistem modeli ve önerilen protokol tanıtılmakta, birincil ve ikincil kullanıcıların servis kesilme olasılıkları için kuramsal ifadeler 3. Bölümde türetilmektedir. 4. Bölüm başarımlar değerlendirilmelerine ayrılmış olup 5. Bölüm varılan sonuçları özetlemektedir.



Şekil 1. Ele alınan tam çift-yönlü DF röleli bilişsel ağ yapısı

## II. SİSTEM MODELİ VE PROTOKOL TANIMI

### A. Sistem Modeli

Çalışmada ele alınan sistem modeli Şekil 1’de gösterilmiştir. Bilişsel ağ iki birincil kullanıcı düğümü A ve B, iki ikincil kullanıcı düğümü C ve D den oluşmaktadır. İkincil verici C birinci kullanıcıyla işbirliği yaparak aynı zamanda röle işlevi görmektedir ve tam çift-yönlü çalışmaktadır. Aralarındaki kanal zayıf olduğundan A ve B arasında doğrudan iletim olanaklı değildir ve iki yönlü iletim ikincil verici C üzerinden sağlanmaktadır. Bu modelde C’nin verici ve alıcı antenlerinin birbirlerinden yalıtıldıkları fakat pratik kısıtlamalardan dolayı döngü girişiminin bütünüyle ortadan kaldırılamadığı varsayılmaktadır. Herhangi iki düğüm arasındaki uzaklık  $d_{ij}$  ile gösterilmiştir. Burada,  $i \in \{A, B, C\}$ ,  $j \in \{C, D\}$  dir. Tüm kanallar düz Rayleigh sönümlmeli, duruğumsu (quasistatic) ve tersinir (resiprok) varsayılmıştır. İki farklı düğüm arasındaki kanal sönümleme katsayısı  $g_{ij}$  ile gösterilmiştir. Burada,  $g_{ij} = d_{ij}^{-\frac{v}{2}} h_{ij}$  ve  $v > 0$  yol kaybı üstelidir. Bu eşitlikteki  $d_{ij}^{-\frac{v}{2}}$  terimi yol kaybını,  $h_{ij}$  terimi ise  $i$ ’den  $j$ ’ye olan kanalin birim uzaklığa normalleştirilmiş sönümleme katsayısıdır.  $h_{ij}$  karmaşık Gauss dağılımlıdır:  $h_{ij} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ . Dolayısıyla  $g_{ij} \sim \mathcal{CN}(0, d_{ij}^{-v})$  olur. C düğümünde döngü girişim etkisi  $g_L$  ile gösterilmiş olup  $g_L$  sıfır ortalamalı,  $\sigma_L^2$  varyanslı, bağımsız, karmaşık Gauss dağılımlıdır. A, B, C ve D düğümlerindeki toplamsal beyaz Gauss gürültü bileşenleri (AWGN) sıfır ortalamalı,  $\sigma^2$  varyanslı, istatistiksel bağımsız, aynı dağılımlı olarak modellenmiş, sırasıyla,  $n_A, n_B, n_C, n_D$  ile gösterilmiştir. İletilen tüm işaretler için  $E[|x_k|^2] = 1$ ,  $k \in \{A, B, C\}$  varsayılmıştır. Son olarak, birincil ve ikincil kullanıcıların iletim güçleri sırasıyla  $P_p$  ve  $P_s$  olarak gösterilmiştir.

### B. Tam çift-yönlü bilişsel DF röle ağı için spektrum paylaşım protokolü

Şekil 1’de görüldüğü gibi iletim süreci iki iletim evresinden oluşmaktadır. C rölesi tam çift-yönlü çalışırken diğer kullanıcılar yarı çift-yönlü çalışmaktadır. 1. evrede hem birincil kullanıcı A,  $x_A$  işaretini, hem de birincil kullanıcı B,  $x_B$  işaretini C rölesine iletmektedir. Eş zamanlı olarak C rölesi,  $x_C$  ikincil işaretini D’ye iletmektedir. C rölesi alınan  $x_A$  ve  $x_B$  işaretlerini çözmeye çalışmaktadır. C rölesinin ikincil kullanıcı D’ye birincil kullanıcılar A ve B’den daha yakın olduğu kabul edilmiştir. Bundan dolayı D kullanıcısı kendisine daha uzak olanları yani A ve B düğümlerinden gelen işaretleri gürültü olarak varsayıp ikincil işaret  $x_C$ ’yi çözmektedir. Ardından çözülen  $\tilde{x}_C$  işareti D’de alınan birleşik işaretten çıkarılır ve daha sonra kalan işaretten ikinci evrede oluşacak girişimi yok etmek için  $\{x_A, x_B\}$  birincil işaretleri çözülür. Eğer birinci evrede birincil işaretler  $x_A$  ve  $x_B$  rölede doğru çözülmüş ise, ikinci evrede fiziksel katman ağ kodlanmış (PLNC) birincil işaret  $x_A \oplus x_B$ , C rölesi tarafından kendi yeni ikincil işareti ile birlikte güç paylaşımına çarpanı kullanılarak bütün kullanıcılara gönderilir. C rölesi, iletim gücü  $P_s$ ’nin  $\alpha$  ile orantılı olan kısmını birleşik birincil işaretin aktarılması için kullanırken,  $1 - \alpha$  ile orantılı olan kısmını ikincil işaret  $x_C$ ’yi iletmek için kullanmaktadır.  $\alpha$  katsayısının uygun bir şekilde seçilmesi ile birincil sistemdeki servis kesilme başarımı, spektrum paylaşımı olmayan duruma göre artarken, aynı zamanda ikincil sistemin sürekli spektrum paylaşımı sağlanmaktadır.

- *Evre 1:* A ve B kendi işaretlerini C rölesine eş zamanlı olarak iletmektedir. Aynı zamanda C rölesi de kendi ikincil işaretini D kullanıcısına göndermektedir. Evre 1’de D de alınan işaret,

$$y_{D,1} = \sqrt{P_s} g_{CD} x_C + \sqrt{P_p} g_{AD} x_A + \sqrt{P_p} g_{BD} x_B + n_D \quad (1)$$

şeklinde yazılabilmektedir. İkinci evrede, C rölesinden D kullanıcısına iletilen işarete birincil işaretlerin bulunmasından dolayı daha iyi ikincil sistem başarımı elde edebilmek için ilk evrede D kullanıcısında birincil işaretler ardışık girişim giderme (successive interference cancellation) yöntemi kullanılarak çözülmekte ve bu işaretler Evre 2’de kullanılarak girişim yok edilmektedir. İlk olarak en büyük olabirlikli (ML) karar kuralı ile kuvvetli olan  $\tilde{x}_C = \arg \min_{x_C} |y_{D,1} - \sqrt{P_s} g_{CD} x_C|^2$  işareti çözülmektedir. Daha sonra kestirilen  $\tilde{x}_C$  işareti, alınan  $y_{D,1}$  işaretinden çıkartılarak  $\tilde{y}_{D,1} = y_{D,1} - \sqrt{P_s} g_{CD} \tilde{x}_C$  işareti elde edilmektedir. D kullanıcısı bu işareten birleşik ML karar kuralı kullanarak birincil

$$(\tilde{x}_A, \tilde{x}_B) = \arg \min_{x_A, x_B} |y_{D,1} - \sqrt{P_p} g_{AD} x_A - \sqrt{P_p} g_{BD} x_B|^2 \quad (2)$$

işaretlerini çözmektedir. Kestirilen birincil  $\tilde{x}_A$  ve  $\tilde{x}_B$  işaretleri Evre 2’de kullanılarak D kullanıcısında C’den iletilen birincil işaretlerin oluşturduğu girişim yok edilmektedir.

Evre 1’de C rölesinin tam çift-yönlü çalışmasından dolayı, alınan birincil işaretlerin yanında röleden kaynaklanan döngü girişim işareti de alınır. Evre 1’de C de alınan işaret,

$$y_{C,1} = \sqrt{P_S}g_L x_C + \sqrt{P_P}g_{AC}x_A + \sqrt{P_P}g_{BC}x_B + n_C \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir.

• *Evre 2:* C rölesinde hem  $x_A$  hem de  $x_B$  işaretinin başarı ile çözülmesi ile Evre 2'de C rölesinden PLNC  $x_A \oplus x_B$  işareti ile ikinci  $x_C$  işaretinin birleştirilmesi ile oluşturulan birleşik  $x_R = \sqrt{P_S\alpha}(x_A \oplus x_B) + \sqrt{P_S(1-\alpha)}x_C$  işareti tüm kullanıcılara iletilir.  $j \in \{A,B,D\}$  olmak üzere diğer kullanıcılarda alınan  $y_{j,2}$  işaretleri,

$$y_{j,2} = \sqrt{P_S\alpha}g_{Cj}(x_A \oplus x_B) + \sqrt{P_S(1-\alpha)}g_{Cj}x_C + n_j \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir.

Evre 1'de kestirilen  $\tilde{x}_A$  ve  $\tilde{x}_B$  birincil işaretleri kullanılarak, Evre 2'de C rölesinin D kullanıcıya gönderdiği girişim yok edilir. Girişim işaretinin giderilmesi sonucunda D kullanıcılarında  $y'_{D,2} = \sqrt{P_S(1-\alpha)}g_{CD}x_C + n_D$  işareti elde edilmektedir.

### III. SERVİS KESİLME ANALİZİ

Birincil kullanıcının hedeflenen hızı  $R_{pt}$  ve ikincil kullanıcının hedeflenen hızı  $R_{st}$  olmak üzere,  $R_k < R_{pt}$  ve  $R_k < R_{st}$  için kullanıcılar servis kesilme durumunda olacaktırlar. Burada  $R_k$  belli bir linkte ulaşılabilir anlık hızı göstermektedir. Bu bölümde, önerilen protokol için birincil ve ikincil kullanıcılara ait servis kesilme olasılıkları hesaplanacaktır.

#### A. Birincil Sistemin Servis Kesilme Başarımı

Evre 1'de, birincil kullanıcı A, C rölesine  $x_A$  işaretini göndermektedir. A  $\rightarrow$  C linki için ulaşılabilir anlık hız,  $R_{AC} = \frac{1}{2} \log \left( 1 + \frac{\eta_P |g_{AC}|^2}{\eta_P |g_L|^2 + 1} \right)$  olarak verilir. Burada 1/2 katsayısı sistemin iletiminin iki evreden oluşmasından kaynaklanmaktadır.  $\eta_P = P_P/\sigma^2$  ve  $\eta_S = P_S/\sigma^2$  ortalama iletim işaret gürültü oranlarıdır (SNR).  $y_{C,1}$  işareti rölede alındığında  $x_A$  ve  $x_B$  işaretleri birlikte çözülmemektedir ve ağ kodlanmış  $x_A \oplus x_B$  işareti, ikincil işaret  $x_C$  ile bir araya getirilerek birleşik işaret  $x_R$  elde edilmektedir.

Evre 2'de birleşik işaret  $x_R$  röle tarafından diğer kullanıcılara aynı anda gönderilmektedir.  $x_A$  ve  $x_B$  işaretlerinin başarılı bir şekilde C rölesinde çözülmesi koşulu ile, C  $\rightarrow$  B linki için ulaşılabilir anlık hız,  $R_{CB} = \frac{1}{2} \log \left( 1 + \frac{\eta_S |g_{BC}|^2 \alpha}{\eta_S |g_{BC}|^2 (1-\alpha) + 1} \right)$  olmaktadır. Birincil kullanıcının hedeflenen hızı  $R_{pt}$  olmak üzere,  $x_A$  işaretinin iletimi için birincil kullanıcının servis kesilme olasılığı ifadesi,

$$P(A_{out}^{FD}) = 1 - (1 - \Pr(R_{pt} > R_{AC})) (1 - \Pr(R_{pt} > R_{CB})) \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Bazı hesaplamalardan sonra,

$$P(A_{out}^{FD}) = 1 - \left[ \frac{\sigma_L^2}{\eta_S} \frac{e^{-\left(\frac{d_{AC}^v}{\eta_P}\right)R_P}}{\left(\frac{d_{AC}^v}{\eta_P}\right)R_P + \frac{\sigma_L^2}{\eta_S}} \right] \left[ e^{-d_{AC}^v \frac{R_P}{[\alpha(1+R_P) - R_P]\eta_S}} \right] \quad (6)$$

elde edilir. Burada  $R_P = 2^{2R_{pt}} - 1$  ve  $\frac{R_P}{R_P+1} < \alpha < 1$ 'dir.

$x_A \oplus x_B$  işareti B kullanıcılarında başarılı bir şekilde çözüldüğü sürece,  $x_A$  işareti başarılı bir şekilde elde edilebilir çünkü B kullanıcısı  $x_B$  işaretini bilmektedir. Diğer durumlar birincil sistemde servis kesilmeye neden olmaktadır. Simetri nedeniyle aynı servis kesilme olasılığı A'da  $x_B$  işaretinin çözülmesi için de geçerlidir.

#### B. İkincil Sistemin Servis Kesilme Başarımı

Evre 1'de C rölesi kendi işaretini D kullanıcıya göndermektedir. C  $\rightarrow$  D linki için ulaşılabilir anlık hız,

$$R_{CD,1} = \log \left( 1 + \frac{\eta_S |g_{CD}|^2}{\eta_P (|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2) + 1} \right) \quad (7)$$

şeklinde verilir. Bu eşitlikte 1/2 katsayısı bulunmamaktadır çünkü C rölesi D alıcısına iki evrede farklı paketler göndermektedir. A  $\rightarrow$  D ve B  $\rightarrow$  D linkleri için ulaşılabilir anlık hız ifadeleri,  $R_{AB,D} = \frac{1}{2} \log(1 + \eta_P |g_{AD}|^2 + \eta_P |g_{BD}|^2)$  şeklinde olup Evre 1'de D kullanıcılarında  $x_A$  ve  $x_B$  işaretleri başarılı bir şekilde çözülmüş ise, Evre 2'de C  $\rightarrow$  D linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi,  $R_{CD,2,1} = \log(1 + \eta_S |g_{CD}|^2 (1-\alpha))$  şeklindedir. Evre 1'de eğer D kullanıcılarında  $x_A$  ve  $x_B$  işaretleri başarılı bir şekilde çözülememiş ise, Evre 2'de C  $\rightarrow$  D linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi,  $R_{CD,2,2} = \log \left( 1 + \frac{\eta_S |g_{CD}|^2 (1-\alpha)}{\eta_S |g_{CD}|^{2\alpha+1}} \right)$  şeklindedir.

İkincil kullanıcının hedeflenen hızı  $R_{st}$  olmak üzere, ikincil sistemin genel servis kesilme olasılığı ifadesi,

$$P(S_{out}^{FD}) = 1 - \frac{1}{2} \left[ (1 - \Pr(R_{st} > R_{CD,1})) + \left( (1 - \Pr(R_{pt} > R_{AB,D})) (1 - \Pr(R_{st} > R_{CD,2,1})) + \Pr(R_{pt} > R_{AB,D}) (1 - \Pr(R_{st} > R_{CD,2,2})) \right) \right] \quad (7)$$

şeklinde bulunur. Bazı hesaplamalardan sonra

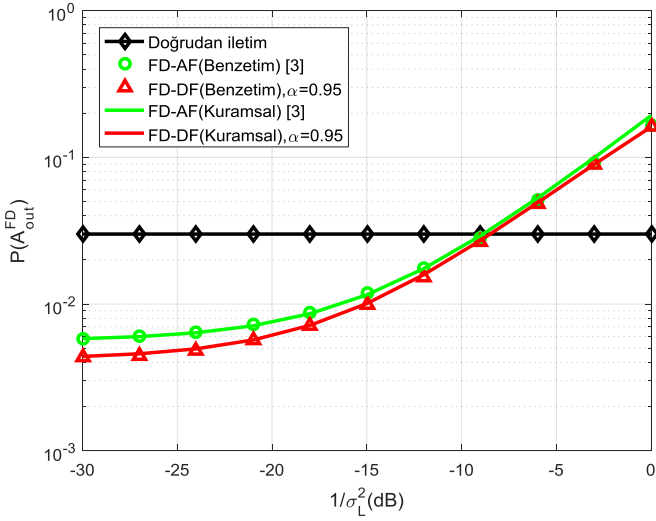
$$P(S_{out}^{FD}) = 1 - \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\eta_S^2 d_{AD}^v d_{BD}^v}{(\eta_P d_{CD}^v R_S + \eta_S d_{AD}^v) + (\eta_P d_{CD}^v R_S + \eta_S d_{BD}^v)} \right) + \left( \left( e^{-d_{AD}^v \frac{R_P}{\eta_P}} + e^{-d_{BD}^v \frac{R_P}{\eta_P}} \right) \left( e^{-d_{CD}^v \frac{R_S}{(1-\alpha)\eta_S}} \right) + \left( e^{-d_{AD}^v \frac{R_P}{\eta_P}} + e^{-d_{BD}^v \frac{R_P}{\eta_P}} \right) \left( e^{-d_{CD}^v \frac{R_S}{\eta_S - \alpha \eta_S - R_S \alpha \eta_S}} \right) \right) \right] \quad (8)$$

elde edilir. Burada,  $R_P = 2^{2R_{pt}} - 1$ ,  $R_S = 2^{R_{st}} - 1$  olup  $\frac{R_P}{R_P+1} < \alpha < 1$ 'dir.

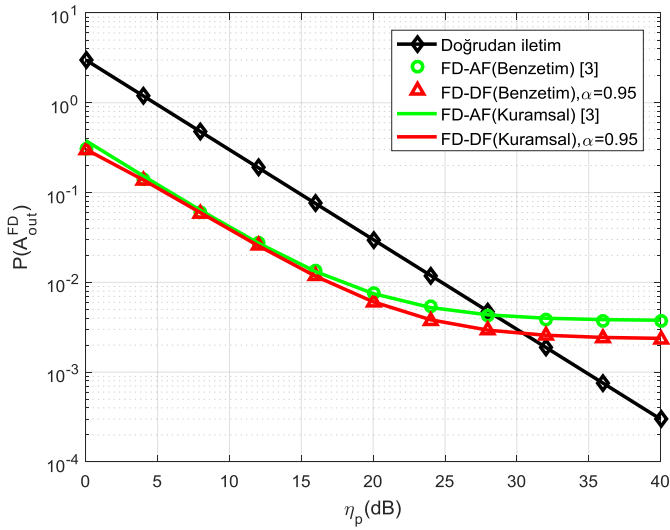
### IV. BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ

Kuramsal ve bilgisayar benzetimlerine dayalı başarımların değerlendirilmesinde, iki birincil kullanıcı arasındaki uzaklık 1'e normalize edilmiştir. Röle iki birincil kullanıcının ortasına ( $d_{AC} = d_{BC} = 0.5$ ) yerleştirilmiştir. İkincil kullanıcılar arasındaki mesafe  $d_{CD} = 0.05$ , yol kaybı üsteli  $v = 4$ , ve güç paylaşım çarpanı  $\alpha = 0.95$  seçilmiştir.

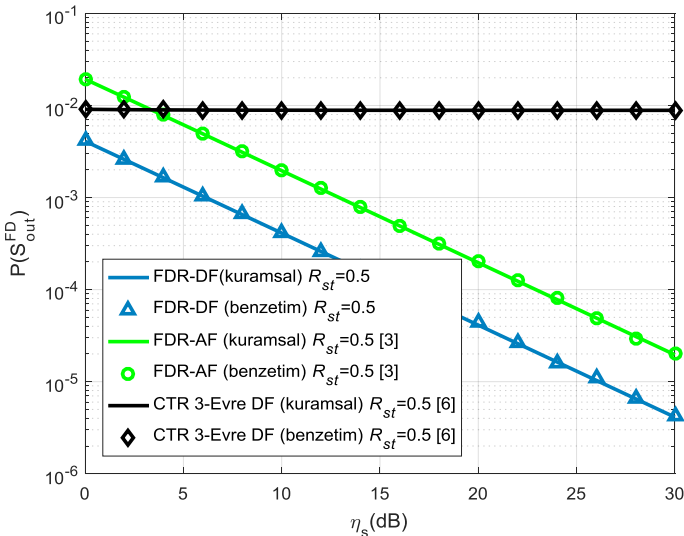
Şekil 2'de  $\eta_P = 20$  dB ve birincil düğümlerde  $R_{pt}^A = R_{pt}^B = 1$  alınarak birincil kullanıcının servis kesilme olasılığı artık döngü girişimine bağlı olarak verilmektedir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere, artık döngü girişim gücünün arttığı durumlarda



Şekil 2. Birincil kullanıcının  $1/\sigma_L^2$  e bağlı servis kesilme olasılığı



Şekil 3. Birincil kullanıcının  $\eta_p$  (dB) ye bağlı servis kesilme olasılığı



Şekil 4. İkincil kullanıcının  $\eta_s$ (dB) ye bağlı servis kesilme olasılığı

birincil alıcılarda işaret-(girişim+gürültü) oranı (SINR) azalmakta ve birincil sistemin servis kesilme başarımı kötüleşmektedir. Bunun nedeni  $1/\sigma_L^2$  parametresinin büyümesi ile birincil düğümlerde alınan işaretlerin içerdiği girişimin gücünün artmasıdır. Ayrıca, artık döngü girişiminin -9 dB'den küçük olduğu durumlarda önerilen spektrum paylaşım protokolünün servis kesilme başarımı doğrudan iletim ve [3]'teki tam çift-yönlü AF (FD-AF) sisteme göre daha iyi olmaktadır.

Şekil 3'de birincil sistemin başarımı iletim işaret-gürültü oranı  $\eta_p$  ye göre incelenmiştir. Sonuçlardan,  $\eta_p$ 'nin 30 dB'den küçük olduğu durumlarda önerilen tam çift-yönlü DF (FD-DF) sistemin doğrudan iletime göre başarımının daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca, yeni önerilen sistemin başarımı tam çift-yönlü AF sisteme göre de daha iyi elde edilmektedir. Şekil 3'te servis kesilme olasılığının belli bir  $\eta_p$  değerinden sonra sabit kalmasının nedeni (5)'teki  $P(A_{out}^{FD})$  eşitliğinde  $A \rightarrow C$  linki ile bağlantılı terimin  $\eta_p$  arttıkça sabit bir değere ulaşmasıdır.

Şekil 4'te artık döngü girişimi ortalaması  $1/\sigma_L^2 = 20$  dB, birincil kullanıcıların hedeflenen hızları  $R_{pt}^A = R_{pt}^B = 1$ , ikincil kullanıcının hedeflenen hızı  $R_{st} = 0.5$  seçilerek ikincil sistemin servis kesilme olasılığı ortalama iletim işaret-gürültü oranı  $\eta_s$  e göre incelenmiştir. Önerilen protokolün [6]'daki iki yönlü üç evreli bilişsel DF röle ağı (CTR 3-Evre DF) ve [3]'teki tam-çift yönlü AF sisteme göre daha iyi başarımlar verdiği görülmektedir.

## V. SONUÇ

Bu bildiriye, bilişsel radyo için iki evreli yeni bir tam çift-yönlü DF röleli spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. Evre 1'de iletilen birincil işaretlerin rölede çözülmesi ve Evre 2'de bu çözülen birincil işaretlerin, girişiminin yok edilmesi ile daha iyi ikincil servis kesilme başarımı elde edilmiştir. Rölenin her iki evrede D kullanıcısına farklı paketler göndermesiyle ikincil kullanıcının spektral verimliliği artırılmış, servis kesilme olasılığının en fazla tam çift-yönlü AF röleli ikincil kullanıcının servis kesilme olasılığına eşit olduğu görülmüştür. Artık döngü girişiminin belli bir düzeyin altında olduğu durumda birincil sistemin servis kesilme başarımı en az doğrudan iletimdeki servis kesilme başarımı kadardır.

## KAYNAKLAR

- [1] S. H. Kim, S. Lim, H. Wang, and D. Hong, "Power allocation and outage probability analysis for secondary users in cognitive full duplex relay systems", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 10, pp. 3754-3765, Oct. 2012.
- [2] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [3] Na Li, Yong Li, T. Wang, M. Peng, W. Wang, "Full-Duplex Based Spectrum Sharing in Cognitive Two-Way Relay Networks", 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC).
- [4] H. Yue, M. Pan, Y. Fang, and S. Glisic, "Spectrum and energy efficient relay station placement in cognitive radio networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 5, pp. 883-893, May 2013.
- [5] <https://www.mitacs.ca/en/projects/performance-and-implementation-limits-full-duplex-relaying>
- [6] Q. Li, S. H. Ting, A. Pandharipande, Y. Han, "Cognitive spectrum sharing with two-way relaying systems", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 3, pp. 1233-1240, Mar. 2011.