

# Birleşik Çöz/Sıkıştır ve İlet Tabanlı İşbirlikçi Çoklu Erişim Joint Decode/Compress and Forward based Cooperative Multiple Access

Mehmet Güneş

Elkotec İletişim A.Ş.  
İstanbul

mehmet.gunes@elkotec.com.tr

Onur Kaya

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Böl.  
Işık Üniversitesi

onurkaya@isikun.edu.tr

## ÖZETÇE

*Bu bildiride, iki kullanıcı bir işbirlikçi çoklu erişim kanalı için çöz-ilet ve sıkıştır-ilet tekniklerinin eşzamanlı kullanılmasına dayalı kodlama ve kodçözme teknikleri geliştiriyor, ve karşılık gelen erişilebilir veri hızı ifadelerini türetiyoruz. Sonuçlarımızı bilinen bazı çift yönlü işbirliği stratejilerinin veri hızları ile kıyaslayarak, iki tekniğin bir arada kullanılmasının erişilebilir veri hızı bölgesini genişletebildiğini benzetimler yolu ile gösteriyoruz.*

## ABSTRACT

*In this paper, we develop encoding and decoding strategies for a two user cooperative multiple access channel, based on the joint use of decode-forward and compress-forward techniques. We derive the resulting achievable rate expressions. We compare our results with some known rate regions for bidirectional cooperation, and demonstrate through simulations that the joint use of these two techniques may improve the achievable rate region.*

## 1. GİRİŞ

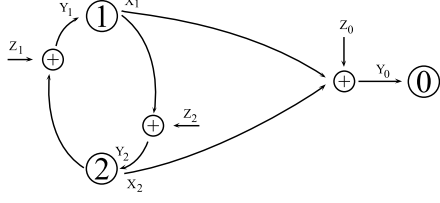
Aktarıcı bir düğüm yardımı ile haberleşmeye imkan veren aktarım kanalı, ilk olarak [1]'de ele alınmıştır. Bu kanal modeli için, daha sonraları literatürde çöz-ilet (DF) ve sıkıştır-ilet (CF) olarak adlandırılacak olan iki temel kodlama tekniği [2]'de geliştirilmiş, hatta bu iki tekniğin bir kombinasyonu [2, Theorem 7]'de sunulmuştur. Bahsi geçen (DF) ve (CF) protokolleri, [3]'te birden fazla aktarıcı olan durum için genellenmiştir. DF ve CF dışında çok yaygın olarak bilinen bir diğer protokol de yükselt-ilettir (AF), ancak bu teknik gürültü gücünü de yükseltmesi nedeniyle çoğunlukla CF ve DF'den kötü sonuç vermektedir. Bu yönde bir benzetim, ve çok sayıda referans yine [3]'te sunulmuştur. Yine temel üç düğümlü aktarım kanalında dik olmayan yükselt-ilet (NAF), sıkıştır-ilet (CF), daha basit bir versiyonu olan kestir-ilet (EF) ve karma aktarım stratejileri [4]'te ele alınmıştır. Karma aktarım, gecikme kısıtlı kapasite temel alınarak uzun-dönem-ortalama güç kısıtı altında en iyi sonucu vermiştir. Literatürde tek kaynaklı CF, DF ve AF protokollerini, ve bunların karma kullanımlarını irdeleyen daha pek çok

yayın bulunmakla birlikte, ele alacağımız çift yönlü işbirlikçi modeli kapsamında doğrudan kullanılacak sonuçlar haricinde, aktarım kanalları hakkındaki çok sayıda değerli referansa burada yer veremiyoruz. Bu bildirinin ana amacı, *çift yönlü işbirlikçi tekniklerinde çeşitliliğe imkan tanıyarak daha yüksek veri hızlarına ulaşabilecek; aynı zamanda da ele alacağımız modelin özel durumu olarak görülebilecek işbirlikçi bilişsel radyo ağları gibi sistemlerde, ikincil kullanıcıların birincil kullanıcı sinyallerini tam olarak çözmeye gerek duymadan işbirlikçi yapmalarını sağlayabilecek sıkıştırma tabanlı yöntemler geliştirmektir.*

CF ve DF protokollerini iki yönlü aktarıma uygulayan çalışmalardan biri [5]'tir, ancak [5]'te kullanıcılar birbirlerinin sinyallerini doğrudan almamakta, iki yönlü aktarım adanmış bir ek aktarıcı tarafından yapılmaktadır. Karşılıklı işbirliğine izin veren bir çoklu erişim kanalı (ÇEK) modeli için, Gauss gürültülü kanallarda DF protokolü ile erişilebilir veri hızları [6]'da elde edilmiştir. Karşılıklı CF kullanan sistemlerle ilgili çalışmalar ise daha sınırlıdır: ele alacağımız modele en yakın model, bilgi kuramsal güvenlik çerçevesinde, gizlilik kriterlerini de hesaba katarak [7]'de çalışılmıştır. Bu modelden gizlilik kısıtları çıkarılarak veri hızı bölgeleri yeniden tanımlandığında, salt CF uygulayan bir işbirlikçi kanal modeli elde edilebilir. ÇEK'lerde, eşzamanlı olarak karşılıklı CF ve DF'in beraber kullanımına dayalı olarak bildiğimiz tek kodlama tekniği, kısaca [8] bildirisinde sunulmuş, bu tekniğe ait erişilebilir hız bölgesi hesaplanmış, ve Gauss gürültülü kanala uygulanmıştır. Sonuçlar oldukça ümit verici görünse de, kodlama stratejisinin detayları verilmemiştir; ve erişilebilir veri hızı hesaplarında bazı kısıtların dikkate alınmadığı, bu nedenle fazla iyimser sonuçlar elde edildiği tarafımızca düşünülmektedir. Son olarak, tek yönlü aktarım kanalı için, [2, Theorem 7]'ye alternatif olabilecek, birleşik CF ve DF'ye dayalı kodlama ve çözümleme stratejilerinin yakın dönemde [9]'da incelendiğini, ve ardışık geriye doğru çözümleme (SeqBack) ve eşzamanlı geriye doğru çözümleme (SimBack) adı verilen iki yeni yöntem geliştirildiğini vurgulamak gereklidir. Bu yöntemlerin sonuçlarının [2, Theorem 7]'den daha iyi sonuç verebildiği görülmektedir. Bu nedenle, bu bildiride, [9]'da sunulan teknikler, çift yönlü işbirliğine genellenecektir.

Bu bildiride, CF ve DF tekniklerinin eşzamanlı olarak ve göndericiler arasında çift-yönlü işbirliğine izin verecek

Bu çalışma Tübitak tarafından 111E108 numaralı proje kapsamında desteklenmektedir.



Şekil 1: İki kullanıcılı işbirliği kanalı.

şekilde kullanıldığı bir ÇEK'in erişilebilir veri hızlarını elde ediyoruz. Veri hızı bölgelerini, hem önerdiğimiz kodlama tekniklerinin özel bir durumu olarak elde edilen çift yönlü CF stratejisi ile, hem de literatürde bilinen bir takım çift yönlü işbirliği stratejileri ile kıyaslayarak, bu iki tekniğin birarada kullanılmasının erişilebilir veri hızı bölgesini genişlettiğini benzetimlerle gösteriyoruz.

## 2. SİSTEM MODELİ

Bu bildiride, Şekil 1'de gösterilen, işbirlikçi çoklu erişim kanal modeli ele alınmaktadır. Alıcı 0, göndericiler ise 1 ve 2 numaralı düğümler olarak tanımlandığında,  $j \in \{0, 1, 2\}$  numaralı düğümde alınan  $Y_j$  sinyali, aynı alıcıdaki sıfır ortalama ve  $\sigma_j^2$  varyanslı Gauss dağılımlı gürültü  $N_j$  ve ortalama güçleri  $P_1$  ve  $P_2$  ile sınırlı olan gönderilen sinyaller  $X_1$  ve  $X_2$  cinsinden şöyle ifade edilir:

$$Y_0 = X_1 + X_2 + Z_0 \quad (1)$$

$$Y_1 = (X_1 + X_2 + Z_1) - X_1 = X_2 + Z_1 \quad (2)$$

$$Y_2 = (X_1 + X_2 + Z_2) - X_2 = X_1 + Z_2 \quad (3)$$

Bu modelde, göndericilerin kendi sinyallerini bildikleri için aldıkları sinyalden çıkarabildiği varsayılmıştır. Bildiri boyunca, vektörler koyu renkli semboller  $\mathbf{a}$  ile, herhangi bir  $a$  değişkenin kestirilmiş hali  $\hat{a}$  ile, önceki blokta ki değeri ise  $a'$  ile, Gauss kapasite fonksiyonu ise kısaca  $C(a) = \frac{1}{2} \log_2(1 + a)$  ile gösterilecektir.

## 3. KODLAMA, KODÇÖZME VE VERİ HIZLARI

### 3.1. Kod kitabı oluşturulması

Kullanılacak teknikler bir tür blok Markov bindirmeli kodlama, ve geriye doğru kodçözmedir. Gönderici 1'in ( $G_1$ ),  $\mathcal{W}_1 \triangleq \{1, \dots, 2^{nR_1}\}$  kümesinde değer alan mesajı  $w_1$ ;  $w_{1d}$ ,  $w_{10}$ ,  $w_{1c}$  olmak üzere üç bağımsız parçaya bölünür, ve bu alt mesajlar sırasıyla  $\mathcal{W}_{1d} \triangleq \{1, \dots, 2^{nR_{1d}}\}$ ,  $\mathcal{W}_{10} \triangleq \{1, \dots, 2^{nR_{10}}\}$ ,  $\mathcal{W}_{1c} \triangleq \{1, \dots, 2^{nR_{1c}}\}$  kümelerinden değer alır. Ayrıca, işbirlikçi ortakta sıkıştırmanın gerçekleştirilmesi için rastgele seleleme kullanılacağından,  $\mathcal{W}_1$ 'in bir alt kümesi olan  $\mathcal{Z}_{12} \triangleq \{1, \dots, 2^{nR_{12}}\}$  kümesinden değer alan  $z_{12}$  alt mesajı da tanımlanır. Gönderici 2'nin ( $G_2$ ) alt mesajları ve bunların değer kümeleri de simetrik olarak tanımlanır. Bu durumda,  $R_1 = R_{1d} + R_{10} + R_{1c}$  ve  $R_2 = R_{2d} + R_{20} + R_{2c}$ 'dir. Kod kitabı oluşturulma prosedürü aşağıda özetlenmiştir.

- $2^{n(R_{1d} + R_{2d})}$  adet  $\mathbf{u}$  dizisi oluşturulur, ve  $\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})$  şeklinde her  $w'_{1d} \in \mathcal{W}_{1d}$ ,  $w'_{2d} \in \mathcal{W}_{2d}$  çiftine atanır.
- Her  $\mathbf{u}$  için,  $2^{nR_{1d}}$  adet  $\mathbf{x}_{1d}$  dizisi oluşturulur, ve her  $w_{1d} \in \mathcal{W}_{1d}$  için  $\mathbf{x}_{1d} \{w_{1d}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$  şeklinde atanır.

- Her  $\mathbf{u}$  için,  $2^{nR_{2d}}$   $\mathbf{x}_{2d}$  dizisi oluşturulur, ve her  $w_{2d} \in \mathcal{W}_{2d}$  için  $\mathbf{x}_{2d} \{w_{2d}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$  şeklinde atanır.
- Her  $\mathbf{u}$  için,  $2^{nR_{10}}$   $\mathbf{x}_{10}$  dizisi oluşturulur, ve her  $w_{10} \in \mathcal{W}_{10}$  için  $\mathbf{x}_{10} \{w_{10}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$  şeklinde atanır.
- Her  $\mathbf{u}$  için,  $2^{nR_{20}}$   $\mathbf{x}_{20}$  dizisi oluşturulur, ve her  $w_{20} \in \mathcal{W}_{20}$  için  $\mathbf{x}_{20} \{w_{20}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$  şeklinde atanır.
- Her  $\mathbf{u}$  için,  $2^{nR_{12}}$   $\mathbf{x}_{12}$  dizisi oluşturulur, ve her  $z'_{12} \in \mathcal{Z}_{12}$  için  $\mathbf{x}_{12} \{z'_{12}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$  şeklinde atanır.
- Her  $\mathbf{u}$  için,  $2^{nR_{21}}$   $\mathbf{x}_{21}$  dizisi oluşturulur, ve her  $z'_{21} \in \mathcal{Z}_{21}$  için  $\mathbf{x}_{21} \{z'_{21}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$  şeklinde atanır.
- Her  $\mathbf{u}$  ve  $\mathbf{x}_{12}$  için,  $2^{nR_{1c}}$   $\mathbf{x}_{1c}$  dizisi oluşturulur, ve her  $w_{1c} \in \mathcal{W}_{1c}$  için  $\mathbf{x}_{1c} \{w_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}\}$  şeklinde atanır.
- Her  $\mathbf{u}$  ve  $\mathbf{x}_{21}$  için,  $2^{nR_{2c}}$   $\mathbf{x}_{2c}$  dizisi oluşturulur, ve her  $w_{2c} \in \mathcal{W}_{2c}$  için  $\mathbf{x}_{2c} \{w_{2c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}\}$  şeklinde atanır.
- Her  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{x}_{1d}$ ,  $\mathbf{x}_{2d}$ ,  $\mathbf{x}_{21}$ ,  $\mathbf{x}_{2c}$ ,  $\mathbf{x}_{20}$  için,  $2^{nR_{21}}$   $\hat{\mathbf{y}}_2$  dizisi oluşturulur, ve her  $z_{21} \in \mathcal{Z}_{21}$  için  $\hat{\mathbf{y}}_2(z_{21}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{21}(z'_{21}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{20}(w_{20}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2c}(w_{2c}, \mathbf{x}_{21}, \mathbf{u}))$  şeklinde atanır.
- Her  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{x}_{1d}$ ,  $\mathbf{x}_{2d}$ ,  $\mathbf{x}_{12}$ ,  $\mathbf{x}_{1c}$ ,  $\mathbf{x}_{10}$  için  $2^{nR_{12}}$   $\hat{\mathbf{y}}_1^n$  dizisi oluşturulur, ve her  $z_{12} \in \mathcal{Z}_{12}$  için  $\hat{\mathbf{y}}_1^n(z_{12}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{12}(z'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{10}(w_{10}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1c}(w_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}))$  şeklinde atanır.

Bu prosedür, kolaylıkla ayrıık hafızasız işbirlikçi çoklu erişim kanallarına da genellenebilecek şekilde ve detayda sunulmuştur. Ancak buradan itibaren Gauss gürültülü kanal modellerine yoğunlaşılacaktır. Buna göre,  $G_1$ , yukarıda oluşturulan  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{x}_{1d}$ ,  $\mathbf{x}_{10}$ ,  $\mathbf{x}_{12}$  ve  $\mathbf{x}_{1c}$  alt-kodsözcüklerinin rastgele elemanları olan  $U$ ,  $X_{1d}$ ,  $X_{10}$ ,  $X_{12}$  ve  $X_{1c}$ 'yi, sırasıyla 1,  $P_{1d}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{12}$  ve  $P_{1c}$  varyanslarına sahip bağımsız Gauss dağılımlarından seçer,  $U_1 = U\sqrt{P_{u1}}$  olarak günceller ve hepsini üstüste bindirerek gönderir.  $G_2$ 'nin toplam kod sözcüğü de  $U_2 = U\sqrt{P_{u2}}$  alınarak benzer şekilde oluşturulur:

$$X_1 = X_{1c} + X_{12} + X_{1d} + X_{10} + U_1 \quad (4)$$

$$X_2 = X_{2c} + X_{21} + X_{2d} + X_{20} + U_2 \quad (5)$$

Güç değerleri,  $P_1 = P_{1c} + P_{12} + P_{1d} + P_{10} + P_{u1}$  ve  $P_2 = P_{2c} + P_{21} + P_{2d} + P_{20} + P_{u2}$  kısıtlarını sağlamak zordur. Bu noktada, kodsözcüklerinin parçalarını oluşturan yukarıdaki değişkenlerin, işbirliği protokolümüzdeki rollerinin neler olduğunu kısaca özetlemek faydalı olacaktır. Anlatımın özlüğü için yalnızca  $G_1$ 'e yoğunlaşalım:  $X_{1d}$   $G_2$ 'de çözülmek üzere gönderilen mesajı,  $X_{1c}$   $G_2$  tarafından sıkıştırılmak üzere gönderilen mesajı,  $X_{10}$  doğrudan alıcıda çözülecek mesajı,  $X_{12}$   $G_2$ 'nin bir önceki blokta sıkıştırılmak üzere gönderdiği sinyalin sıkıştırılmış halini,  $U$  ise her iki göndericinin bir önceki blokta  $X_{1d}$  ve  $X_{2d}$  aracılığıyla paylaştıkları ortak mesajları taşıyan kodsözcükleridir. Yukarıdaki kodsözcüğü oluşturma prosedüründe adı geçmesine karşın  $X_1$  ifadesinde doğrudan yer almayan  $\hat{Y}_1$  ara değişkeni, alınan sinyali rastgele seleleyerek, sıkıştırılmak üzere gönderilen sinyal hakkında alıcıya yardımcı olacak daha kaba bir bilgi oluşturmak amacıyla kullanılacaktır. Buna göre, sıkıştırma gürültüsü adı vereceğimiz,  $\sigma_{w_1}^2$  ve  $\sigma_{w_2}^2$  varyanslı  $N_{w_1}$  ve  $N_{w_2}$  Gauss

dağılımlı değişkenleri, göndericilerde alınan sinyallere eklenerek,  $\hat{Y}_1 = Y_1 + N_{w_1}$ ,  $\hat{Y}_2 = Y_2 + N_{w_2}$  ara değişkenleri elde edilir. Bir sonraki bölümde, kodlama ve kodçözme stratejileri detaylandırılacak, ve karşılık gelen veri hızı kısıtları türetilecektir.

### 3.2. Göndericilerde Kodlama ve Kodçözümü

$G_1$ 'in  $z'_{12}$ ,  $w'_{2d}$  mesajlarını bir önceki bloktan bildiğini varsayalım.  $G_1$ ,  $w_{2d}$  mesajını çözmek için,  $(\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{2d}(\hat{w}_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1)$  sinyallerini birlikte tipik yapan  $\hat{w}_{2d}$ 'yi bulur. Hata olasılığının sıfıra gitmesi için, bu mesaja ait hız aşağıdaki kısıtı sağlamalıdır:

$$R_{2d} < I(X_{2d}; Y_1 | U, X_1) \quad (6)$$

Daha sonra  $G_1$ ,  $(\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{12}(z'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1c}(w_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_1(\hat{z}_{12}, \mathbf{x}_{12}(z'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{10}(w_{10}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1c}(w_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})), \mathbf{y}_1)$  sinyallerini birlikte tipik yapan  $\hat{z}_{12}$ 'yi kestirir. Bunun için,

$$R_{12} > I(Y_1; \hat{Y}_1 | U, X_1, X_{2d}) \quad (7)$$

olması gereklidir. Benzer şekilde,  $G_2$  için sağlanması gereken kısıtlar, aşağıdaki gibi bulunur:

$$R_{1d} < I(X_{1d}; Y_2 | U, X_2), \quad (8)$$

$$R_{21} > I(Y_2; \hat{Y}_2 | U, X_2, X_{1d}). \quad (9)$$

### 3.3. Alıcıda Kodçözümü

Alıcı kodçözmeye son blokta aldığı sinyalden başlar ve geriye doğru ardışık kodçözme [9] tekniğinin ÇEK için genellediğimiz bir türünü uygular. Herhangi  $i$ . blok için, kodçözme işlemi şöyle gerçekleşir:  $w_{1d}, z_{21}, w_{2d}, z_{12}$  mesajlarının  $i + 1$  numaralı blokta doğru olarak çözüldüğü varsayalım. Alıcı,  $(\mathbf{u}(\hat{w}'_{1d}, \hat{w}'_{2d}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}(\hat{w}'_{1d}, \hat{w}'_{2d})), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}(\hat{w}'_{1d}, \hat{w}'_{2d})), \mathbf{y}_0)$  kodsözcüklerini birlikte tipik yapacak tek bir çift  $\hat{w}'_{1d}$  ve  $\hat{w}'_{2d}$  belirlemeye çalışır. Dilenildiği kadar yüksek olasılıkla  $\hat{w}'_{1d} = w'_{1d}$ ,  $\hat{w}'_{2d} = w'_{2d}$  elde edilmesi için şu kısıt sağlanmalıdır:

$$R_{1d} + R_{2d} < I(Y_0; U, X_{1d}, X_{2d}) \quad (10)$$

Daha sonra alıcı,  $(\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{10}(\hat{w}_{10}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{20}(\hat{w}_{20}, \mathbf{u}), \mathbf{y}_0)$  sinyallerini birlikte tipik yapan bağımsız  $\hat{w}_{10}$  ve  $\hat{w}_{20}$  çiftini çözer. Çoklu erişim kanalları için bilinen sonuçlara dayanarak, yüksek olasılıkla  $\hat{w}_{10} = w_{10}$  ve  $\hat{w}_{20} = w_{20}$  olması için gerekli kısıtlar

$$R_{10} < I(X_{10}; Y_0 | U, X_{20}, X_{1d}, X_{2d}) \quad (11)$$

$$R_{20} < I(X_{20}; Y_0 | U, X_{10}, X_{1d}, X_{2d}) \quad (12)$$

$$R_{10} + R_{20} < I(X_{10}, X_{20}; Y_0 | U, X_{1d}, X_{2d}) \quad (13)$$

şeklinde kolayca elde edilir. Bu noktadan sonra alıcı, sıkıştırılmış bilgileri çözer. Bunun için, önce  $\hat{z}'_{12}$  ve  $\hat{z}'_{21}$  indislerini belirlemek üzere, birlikte tipiklik koşulunu sağlayan  $(\mathbf{u}(\hat{w}'_{1d}, \hat{w}'_{2d}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{10}(w_{10}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{20}(w_{20}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_1(z_{12}, \mathbf{x}_{12}(\hat{z}'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}, \mathbf{x}_{2d}, \mathbf{x}_{10}, \mathbf{x}_{1c}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_2(z_{21}, \mathbf{x}_{21}(\hat{z}'_{21}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}, \mathbf{x}_{2d}, \mathbf{x}_{20}, \mathbf{x}_{2c}, \mathbf{u}), \mathbf{y}_0)$  sinyalleri aranır. Yüksek olasılıkla  $\hat{z}'_{12} = z'_{12}$  ve  $\hat{z}'_{21} = z'_{21}$  elde edilmesi için gerekli kısıtlar, [7]'de yalnızca sıkıştır ilet

için ve [9]'de yalnızca tek taraflı aktarım için elde edilen kısıtlara benzer şekilde şöyle bulunur:

$$R_{12} < I(X_{12}, \hat{Y}_1; Y_0 | U, X_{1d}, X_{2d}, X_{21}) \quad (14)$$

$$R_{21} < I(X_{21}, \hat{Y}_2; Y_0 | U, X_{1d}, X_{2d}, X_{12}) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} R_{12} + R_{21} &< I(X_{12}, X_{21}; Y_0 | U, X_{1d}, X_{2d}) \\ &+ I(\hat{Y}_2; Y_0 | U, X_{1d}, X_{2d}, X_{12}, X_{21}) \\ &+ I(\hat{Y}_1; Y_0 | U, X_{1d}, X_{2d}, X_{12}, X_{21}) \end{aligned} \quad (16)$$

Son olarak, alıcı  $(\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{12}(z'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{21}(z'_{21}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1c}(\hat{w}_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2c}(\hat{w}_{2c}, \mathbf{x}_{21}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_1(z_{12}, \mathbf{x}_{12}(\hat{z}'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}, \mathbf{x}_{2d}, \mathbf{x}_{10}, \mathbf{x}_{1c}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_2(z_{21}, \mathbf{x}_{21}(\hat{z}'_{21}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}, \mathbf{x}_{2d}, \mathbf{x}_{20}, \mathbf{x}_{2c}, \mathbf{u}), \mathbf{y}_0)$  sinyallerinin birlikte tipiklik kontrolü yoluyla  $\hat{w}_{1c}$  ve  $\hat{w}_{2c}$  mesajlarını çözer. Yüksek olasılıkla  $\hat{w}_{1c} = w_{1c}$  ve  $\hat{w}_{2c} = w_{2c}$  olması için

$$R_{1c} < I(X_{1c}; \hat{Y}_2, Y_0 | U, X_{10}, X_{1d}, X_{12}, X_2) \quad (17)$$

$$R_{2c} < I(X_{2c}; \hat{Y}_1, Y_0 | U, X_{20}, X_{2d}, X_{21}, X_1) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} R_{1c} + R_{2c} &< I(X_{1c}, X_{2c}; \hat{Y}_1, \hat{Y}_2, Y_0 | U, X_{10}, X_{20}, \dots \\ &\dots X_{1d}, X_{2d}, X_{12}, X_{21}) \end{aligned} \quad (19)$$

sağlanması gereklidir. Böylelikle, aşağıdaki ana sonuç elde edilmiş olmaktadır.

**Teorem 1** İki kullanıcılu işbirlikçi ÇEK için

$$R_1 < \min\{(8) + (17) + (11), (10) + (17) + (11)\}$$

$$R_2 < \min\{(6) + (18) + (12), (10) + (18) + (12)\}$$

$$R_1 + R_2 < \min\{(8) + (6) + (19) + (13), (10) + (19) + (13)\}$$

ile verilen veri hızları, ortalama güç kısıtlarını ve

$$(14) > (7), \quad (15) > (9), \quad (16) > (7) + (9) \quad (20)$$

kısıtlarını sağlamak koşuluyla erişilebilirdir.

Kısıtlar (6), (8), (10), (11)-(13), (17)-(19), Gauss dağılımlı kodsözcükleri için hesaplandığında,

$$R_{1d} < C \left( \frac{P_{1d}}{P_{1c} + P_{12} + P_{10} + \sigma_2^2} \right)$$

$$R_{2d} < C \left( \frac{P_{2d}}{P_{2c} + P_{21} + P_{20} + \sigma_1^2} \right)$$

$$R_{1d} + R_{2d} < C \left( \frac{P_{1d} + P_{u1} + P_{u2} + P_{2d} + 2\sqrt{P_{u1}P_{u2}}}{P_{10} + P_{1c} + P_{12} + P_{20} + P_{2c} + P_{21} + \sigma_0^2} \right)$$

$$R_{10} < C \left( \frac{P_{10}}{P_{1c} + P_{12} + P_{2c} + P_{21} + \sigma_0^2} \right)$$

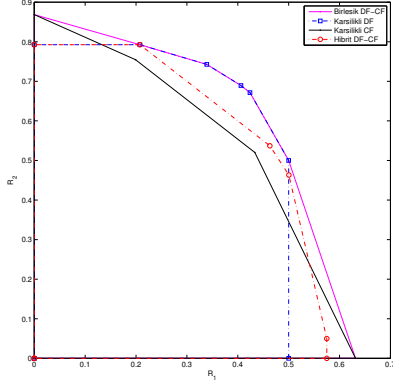
$$R_{20} < C \left( \frac{P_{20}}{P_{1c} + P_{12} + P_{2c} + P_{21} + \sigma_0^2} \right)$$

$$R_{10} + R_{20} < C \left( \frac{P_{10} + P_{20}}{P_{1c} + P_{12} + P_{2c} + P_{21} + \sigma_0^2} \right)$$

$$R_{1c} < C \left( \frac{P_{1c}(\sigma_2^2 + \sigma_{w_2}^2 + \sigma_0^2)}{(\sigma_2^2 + \sigma_{w_2}^2)\sigma_0^2} \right)$$

$$R_{2c} < C \left( \frac{P_{2c}(\sigma_1^2 + \sigma_{w_1}^2 + \sigma_0^2)}{(\sigma_1^2 + \sigma_{w_1}^2)\sigma_0^2} \right)$$

$$\begin{aligned} R_{1c} + R_{2c} &< C \left( \frac{P_{1c} + P_{2c}}{\sigma_0^2} + \frac{P_{1c}}{\sigma_2^2 + \sigma_{w_2}^2} + \frac{P_{2c}}{\sigma_1^2 + \sigma_{w_1}^2} \right. \\ &\left. + \frac{P_{1c}P_{2c}(\sigma_1^2 + \sigma_{w_1}^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{w_2}^2 + \sigma_0^2)}{\sigma_0^2(\sigma_1^2 + \sigma_{w_1}^2)(\sigma_2^2 + \sigma_{w_2}^2)} \right) \end{aligned}$$

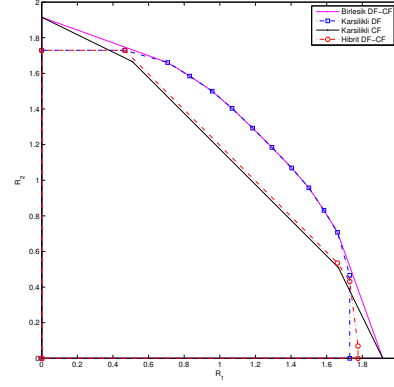


Şekil 2:  $P_1 = 5$ ,  $P_2 = 10$ ,  $\sigma_0^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 5$  için veri hızları.

ifadelerini elde ederiz. Sıkıştırma gürültülerinin sağlaması gereken (20) numaralı kısıtlar da benzer şekilde hesaplanmış, ancak yerden kazanmak için burada sıralanmamıştır. Bir sonraki bölümde, elde ettiğimiz veri hızlarımızın bilinen bazı tekniklerle kıyaslayacağız.

#### 4. BENZETİMLER VE SONUÇLAR

Bu bölümde, işbirlikçi ÇEK için birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği ile erişilebilen veri hızlarımızı, yine önerdiğimiz tekniğin özel bir durumu olan çift taraflı sıkıştır-ilet, [6]'da verilen çift taraflı çöz-ilet, ve [10]'da ele alınan, ve  $G_1$ 'in  $G_2$ 'nin mesajını çözdüğü,  $G_2$ 'nin ise  $G_1$ 'in mesajını sıkıştırdığı hibrit teknikle erişilebilen veri hızları ile kıyaslıyoruz. Örnek olarak iki senaryo ele alınmıştır. Şekil 2'de verilen ilk senaryoda,  $G_1$ -alıcı ve  $G_1$ - $G_2$  linkleri aynı kalitede, yine  $G_2$ -alıcı ve  $G_2$ - $G_1$  linkeri de kendi içlerinde aynı kalitededir; ancak  $G_2$  daha fazla güce sahiptir. Bu durumda, yardımlaşma sonucunda  $G_2$ 'nin  $G_1$ 'e olan katkısının daha fazla olması beklenmektedir. Ancak, çöz ilet stratejisi önce ortak bilgi oluşturmak durumunda olduğundan, bu da  $G_1$ 'in gönderi gücüyle sınırlandığından,  $G_1$ 'in yalnızca çöz-ilet'e dayalı bir işbirliğinden fazla fayda görmesi beklenmemelidir. Öte yandan,  $G_2$ 'nin yüksek gücü sayesinde  $G_1$ 'in mesajını kestirmek zorunda kalmadan yalnızca sıkıştırarak göndermesinin, kullanıcı 1 açısından daha faydalı olması beklenmektedir. Bu sonuçlar, Şekil 2'de gözlemlenmektedir. Önerdiğimiz birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği, diğer tekniklere göre kayda değer bir gelişme sağlamaktadır. Dikkate değer bir nokta, toplam veri hızının eniyelenmesi için halen çöz-ilet stratejisinin daha avantajlı olduğu, sıkıştır-ilet stratejisinin ise daha ziyade asimetrik durumlarda, kullanıcılardan birine yardım için daha uygun olduğudur. Şekil 3'te, bu kez tüm linklerin eşit kalitede olduğu bir durum ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, yine önekilere paraleldir, ve beklendiği üzere simetriktrir. Sonuç olarak, gerek burada sunulan figürlerde, gerekse diğer pek çok benzetim çalışmasında, düğümler arasındaki kanalların göreceli kalitelerine ve düğümlerin güçlerine göre, çöz-ilet ve sıkıştır ilet stratejilerinden farklı seviyede kazançlar elde edilebileceği gözlenmekle birlikte, önerdiğimiz birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği hem tek başına gönderi hızlarımızı, hem de toplam veri hızlarımızı enbüyüklemeye imkan verdiğinden, bi-



Şekil 3:  $P_1 = P_2 = 10$ ,  $\sigma_0^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 1$  için veri hızları.

linen tekniklere göre daha iyi sonuçlara ulaşabildiği açıktır. Ancak burada önemli bir gözlem, birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği ile erişilen veri hızı bölgelerinin, bu bildiriye özel bir durum olarak geliştirdiğimiz çift taraflı sıkıştır-ilet tekniği ile, tek başına çöz ilet tekniğinin eriştikleri veri hızlarımızın dışbükey zarfı olduğu, yani bu iki tekniğin zaman bölmeli olarak kullanılması ile de elde edilebileceğidir. Bunun, uyguladığımız ardışık geriye doğru kodçözmenin bir sonucu olduğu düşünülmekte, birlikte geriye doğru kodçözme [9] ile daha da iyi veri hızlarımızın elde edilebileceği öngörülmektedir.

#### 5. KAYNAKÇA

- [1] E. C. van der Meulen, "Three-terminal communication channels," *Adv. App. Prob.*, vol. 3, p. 121, 1971.
- [2] T. Cover and A. E. Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Trans. Inf. The.*, vol. 25, no. 5, pp. 572 – 584, Sep 1979.
- [3] G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta, "Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks," *IEEE Trans. Inf. The.*, vol. 51, no. 9, pp. 3037 – 3063, Sept. 2005.
- [4] J. Yang, D. Gunduz, D. Brown, and E. Erkip, "Resource allocation for cooperative relaying," in *CISS 2008*, Mar. 2008, pp. 848 –853.
- [5] D. Gunduz, E. Tuncel, and J. Nayak, "Rate regions for the separated two-way relay channel," in *46th Allerton Conference*, Sept. 2008, pp. 1333 –1340.
- [6] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity-part i: System description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927 –1938, Nov. 2003.
- [7] E. Ekrem and S. Ulukus, "Effects of cooperation on the secrecy of multiple access channels with generalized feedback," in *CISS 2008*, Mar. 2008, pp. 791 –796.
- [8] M. Khojastepour, A. Sabharwal, and B. Aazhang, "Improved achievable rates for user cooperation and relay channels," in *ISIT 2004*, Jun. 2004, p. 4.
- [9] H.-F. Chong and M. Motani, "On achievable rates for the general relay channel," *IEEE Trans Inf. The.*, vol. 57, no. 3, pp. 1249 –1266, Mar. 2011.
- [10] Q. Li, K. Li, and K. Teh, "An achievable rate region of cooperative multiple-access channels with hybrid CF and DF cooperation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 8, pp. 591 –593, Aug. 2009.