

# Cihazdan Cihaza Haberleşmede Ardışık Girişim Engellemenin Kullanımı

## Successive Interference Cancellation in Device-to-Device Communications

Gökhan KILIÇ, Tolga GİRİCİ  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Söğütözü Caddesi No:43(Ankara, Türkiye)  
{gklic,tgirci}@etu.edu.tr

**Özetçe**—Hücresele sistemlerde cihazdan cihaza(CC) haberleşmenin frekans bantlarının verimli kullanılabilmesi için önem kazanması beklenmektedir. CC haberleşme hücresele bandı yeniden kullandığında girişim önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu makalede girişimi kontrol edebilmek için CC kullanıcılara kanal eşleştirme problemi üzerine çalışılmıştır. Benzer araştırmalardan farklı olarak baz istasyonun ardışık girişim engelleme yöntemi kullanabildiği kabul edilmiştir. Benzetim sonuçları doğrultusunda ardışık girişim engellemenin sistemdeki veri hızına olan olumlu etkisi gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—Cihazdan Cihaza Haberleşme, Ardışık Girişim Engelleme, Güç Kontrolü, Tam Sayılı Programlama, Eşleme.

**Abstract**—Device-to-Device (D2D) communications is expected to gain importance in future cellular networks for spectrum efficiency. However, dealing with the interference in simultaneous D2D and cellular transmissions is a significant challenge. In this paper, the problem of optimal pairing of D2D and CU transmissions is addressed in order to control interference from CU to D2D receiver and D2D transmitter to Base Station (BS). Different from the literature, the BS is able to perform Successive Interference Cancellation (SIC) in addition to Single User Detection (SUD). The performance of solutions based on mixed integer linear programming, Hungarian algorithm and simple matching algorithms are compared. Through the simulation results, the effectiveness of SIC is demonstrated in terms of the overall network throughput.

**Keywords**—Device-to-Device (D2D) communication, Successive Interference Cancellation, Power Control, Integer Programming, Matching Theory.

### I. GİRİŞ

Hücresele sistemlerde veri hızı talebi her geçen gün daha da artmaktadır. CC haberleşme 5G sistemlerinde önemli teknolojiler arasında görülmektedir [1] [2]. Hücresele sistemlerde veriler baz istasyonu gibi merkezi sistemler üzerinden geçmektedir. Fakat kullanıcıların birbirlerine yakın olduğu durumlarda direkt iletişim ile daha az güç kullanımı ve daha yüksek veri hızlarına ulaşılabilir. CC haberleşmede çiftler birbirlerine ye-

teri kadar yakınsa hücresele ağda frekanslarının tekrar kullanımı ile birbirleri ile direkt haberleşme yapabilirler.

Frekans bantları hücresele ve CC çiftlerine paylaştırılır. Bant verimliliği bu frekansların tekrar kullanımı ile artırılabilir. Ancak frekans tekrar kullanımı cihazlar arasında girişime neden olur. Bu durumda girişim gürültü olarak kabul edilebilir; bu yöntem tek kullanıcı tespiti(Single User Decoding - TKT) olarak adlandırılabilir. Daha yüksek verimlilik için, öncelikle girişimin çözülüp, gelen sinyalden çıkartılmasıyla elde edilen gürültüsüz sinyalin elde edilebildiği ardışık girişim engelleme (Successive Interference cancellation - AGE) gibi girişim yönetim teknikleri kullanılabilir.

CC haberleşmede, kaynak tahsisi ve girişim yönetimi pek çok açıdan incelenebilir. Güç tahsisi [3], kanal tahsisi [4], durum seçimi [5] ve eşleme [6] teknikleri performansı artırmak için kullanılmaktadır. Eşleme girişime direkt etkisi olan önemli bir problemdir. Eşleme bir CC çifti ile bir hücresele cihazın aynı frekansı kullanmasıdır. Eşleme problemi [6] numaralı yayında incelenmiştir. Bu çalışmada, sistemdeki toplam veri hızını artırmak için CC çiftleri ve Hücresele Kullanıcılar (HK) arasında eşleme problemi ele alınmıştır.

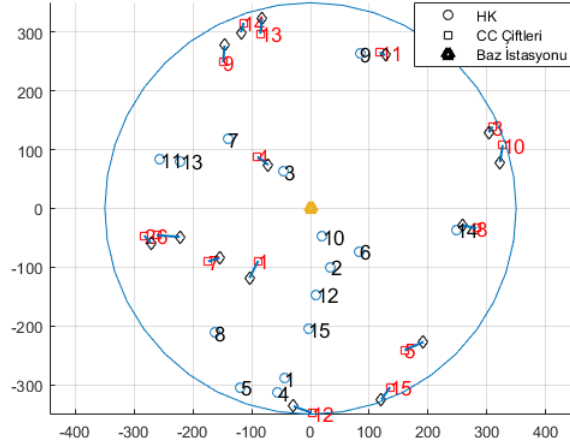
### II. SİSTEM MODELİ

Bu modelde  $N$  adet HK'nın bulunduğu her bir kullanıcının kendine tahsis edilmiş frekans bandında baz istasyonuna iletim yaptığı düşünülmüştür. Aynı zamanda  $L$  adet CC çifti vardır. CC çiftleri TKT yöntemi kullanırken baz istasyonu AGE yöntemi de kullanılabilirler. Sistem parametreleri Tablo I'de gösterilmiştir. Baz istasyonunun merkezde olduğu ve kullanıcıların rasgele dağıtıldığı örnek bir hücresele ağ modeli Şekil 1 'de gösterilmiştir.

#### A. Tek Kullanıcı Tespiti (Single User Decoding)

Düşümler ve baz istasyonu girişimi gürültü olarak modellenmiştir. Haberleşmede bir kısıt olarak sinyal girişim-gürültü oranının belirli bir değerden büyük olması gerekmektedir. Veri hızını en büyükleme yöntemi şu şekilde tanımlanır [6]:

$$\max_{P_i^c, P_j^d, \rho_{i,j}} \sum_{c_i \in C} \sum_{d_j \in D} W_i \rho_{i,j} [R_i^c(P_i^c, P_j^d) + R_j^d(P_i^c, P_j^d)] \quad (1)$$



Şekil 1: Örnek Senaryo

TABLO I: Sistem Parametreleri

Semboller	Tanımlar
$N$	HK sayısı
$L$	CC çifti sayısı
$c_i, d_j$	HK $i$ , CC çifti $j$
$S_i^c$	HK $c_i$ tarafından kabul edilen CC çiftleri
$S_j^d$	CC çifti $d_j$ tarafından kabul edilen HK'lar
$\Gamma_i^c, \Gamma_j^d$	Sinyal gürültü oranları (SINR) $c_i, d_j$
$\Gamma_{i,min}^c, \Gamma_{j,min}^d$	Minimum SINR kısıtları $c_i, d_j$
$P_i^c, P_j^d$	İletim güçleri $c_i, d_j$
$P_{max}^c, P_{max}^d$	maksimum iletim güçleri $c_i, d_j$
$g_{i,B}$	HK $c_i$ ve baz ist. arası kanal
$g_j$	CC çifti $d_j$ arasındaki kanal
$h_{j,B}$	CC $d_j$ 'den Bİ'ye girişim kanalı
$h_{i,j}$	HK $c_i$ 'den CC çifti $d_j$ 'e kanal kazancı
$\sigma^2$	Gürültü gücü
$\rho_{i,j}$	$c_i$ ve $d_j$ eşlenirse 1 yoksa 0 değeri alır

Burada  $R_i^c(P_i^c, P_j^d) = \log(1 + \Gamma_i^c(P_i^c, P_j^d))$  ve  $R_j^d(P_i^c, P_j^d) = \log(1 + \Gamma_j^d(P_i^c, P_j^d))$  değerleri eğer  $c_i$  ve  $d_j$  eşlendi ise güç parametrelili veri hızları olarak tanımlanmaktadır. **Kısıtlar:**

$$\Gamma_i^c(P_i^c, P_j^d) = \frac{P_i^c g_{i,B}}{\sigma^2 + P_j^d h_{j,B}} \geq \Gamma_{i,min}^c, \forall c_i \in \mathcal{C} \quad (2)$$

$$\Gamma_j^d(P_i^c, P_j^d) = \frac{P_j^d g_j}{\sigma^2 + P_i^c h_{i,j}} \geq \Gamma_{j,min}^d, \forall d_j \in \mathcal{D} \quad (3)$$

$$\sum_{d_j \in \mathcal{S}} \rho_{i,j} \leq 1, \rho_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall c_i \in \mathcal{C}, \quad (4)$$

$$\sum_{c_i \in \mathcal{S}} \rho_{i,j} \leq 1, \rho_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall d_j \in \mathcal{D}, \quad (5)$$

$$P_i^c \leq P_{max}^c, \forall c_i \in \mathcal{C}, \quad (6)$$

$$P_j^d \leq P_{max}^d, \forall d_j \in \mathcal{D} \quad (7)$$

,  $\rho(i, j)$  ikili değişkendir.  $\rho(i, j) = 1$  ise HK  $c_i$  ile CC çifti  $d_j$  frekans bandını paylaşmaktadır.

HK'lar sistemin öncelikli elemanları olduğundan eğer kısıtları sağlayan bir CC çifti yoksa kanalı tek başına kullanır. Bu karışık tam sayılı doğrusal programa probleminin çözümü zor olduğundan, problem katılım kontrolü, güç tahsisi ve eşleme olarak üç alt problem halinde çözülebilir.

1) **Katılım Kontrolü:** Katılım kontrolü (admission control), aynı frekansı kullanması mümkün olan cihazların uygunluğunu kontrol eder. HK  $c_i$  ile CC çifti  $d_j$ 'nin eşleşme uygunluğu şu şekilde ifade edilir.

$$j \in S_i^c \text{ if } \begin{cases} \Gamma_i^c(P_i^c, P_j^d) = \frac{P_i^c g_{i,B}}{\sigma^2 + P_j^d h_{j,B}} \geq \Gamma_{i,min}^c, \\ \Gamma_j^d(P_i^c, P_j^d) = \frac{P_j^d g_j}{\sigma^2 + P_i^c h_{i,j}} \geq \Gamma_{j,min}^d, \\ P_i^c \leq P_{max}^c, \\ P_j^d \leq P_{max}^d \end{cases} \quad (8)$$

Uygun C2C çifti olmadığı durumlarda hücrel kullanıcı frekansı sadece kendisi kullanır bu durumda sinyal gürültü-girişim oranı şu şekilde formüle edilir.

$$\Gamma_i^c = \frac{P_{max}^c g_{i,B}}{\sigma^2} \geq \Gamma_{i,min}^c. \quad (9)$$

2) **Güç Tahsisi:** Bir eşleme için, güç en iyilemesi için üç farklı durum vardır. Hücrel kullanıcı maksimum güçte iletim yapar, C2C çifti vericisi maksimum güçte iletim yapar ve ikisi birden maksimum güçte iletim yapar. Veri hızı fonksiyonunun logaritmik olması, monotoan artan fonksiyon olduğu denklem 1 görülmektedir sınırlardaki uç değerler incelenir [7]. İki logaritmik değerlerin toplamını en büyükmek aşağıdaki denklemi en büyükleterek gerçekleştirilir.

$$Q(P_i^c, P_j^d) = \left(1 + \frac{P_i^c g_{i,B}}{\sigma^2 + P_j^d h_{j,B}}\right) \left(1 + \frac{P_j^d g_j}{\sigma^2 + P_i^c h_{i,j}}\right) \quad (10)$$

$P_i^c$ 'ye göre  $Q(P_i^c, P_{max}^d)$  türevi alınırsa

$$\frac{\partial Q}{\partial P_i^c} = \frac{C(P_i^c)^2 + 2DP_i^c + E}{F} \quad (11)$$

burada:

$$C = g_{i,B} h_{i,j}^2 \quad (12a)$$

$$D = g_{i,B} h_{i,j} \sigma^2 \quad (12b)$$

$$E = -P_{max}^d h_{i,j} g_j (\sigma^2 + P_{max}^d h_{j,B}) \quad (12c)$$

$$+ g_{i,B} \sigma^2 (\sigma^2 + P_{max}^d g_j) \quad (12d)$$

$$F = (\sigma^2 + P_{max}^d h_{j,B}) (\sigma^2 + P_i^c h_{i,j})^2 \quad (12e)$$

$$P_i^c = \min \left( \frac{1}{C} (-D \pm \sqrt{D^2 - CE}), P_{max}^c \right) \quad (13)$$

$P_i^c$ 'nin sadece pozitif ve gerçek değerleri incelenmiştir. Benzer şekilde  $P_i^c = P_{max}^c, P_j^d$  hesaplanabilir.

## B. Ardışık Girişim Engelleme

Bu durumda Baz istasyonunun ardışık girişim engelleme yöntemi kullandığı kabul edilmiştir. Baz istasyonu öncelikle girişim sinyalini çözer ve aldığı sinyalden ayrıştırarak HK'nın gönderdiği girişimsiz sinyali elde eder. Bu en iyileme problemi şu iki alt başlıkta tanımlanır.

1) *Problem Formülasyonu*: Amaç fonksiyonu bir önceki tanım (1) ile aynıdır.

**Kısıtlar:**

$$\Gamma_i^c(P_i^c, P_j^d) = \frac{P_i^c g_{i,B}}{\sigma^2} \geq \Gamma_{i,min}^c, \forall c_i \in \mathcal{C}, \quad (14)$$

$$\Gamma_j^d(P_i^c, P_j^d) = \frac{P_j^d g_j}{\sigma^2 + P_i^c h_{i,j}} \geq \Gamma_{j,min}^d, \forall d_i \in \mathcal{D} \quad (15)$$

$$\frac{P_j^d g_j}{\sigma^2 + P_i^c g_{i,B}} \geq \Gamma_j^d, \rho_{i,j} = 1 \text{ ise} \quad (16)$$

$$\sum_{d_j \in \mathcal{S}} \rho_{i,j} \leq 1, \forall c_i \in \mathcal{C}, \quad (17)$$

$$\sum_{c_i \in \mathcal{S}} \rho_{i,j} \leq 1, \forall d_j \in \mathcal{D}, \quad (18)$$

$$P_i^c \leq P_{max}^c, \forall c_i \in \mathcal{C}, \quad (19)$$

$$P_j^d \leq P_{max}^d, \forall d_j \in \mathcal{D} \quad (20)$$

$$\rho_{i,j} \in \{0, 1\} \quad (21)$$

(15) ve (16) numaralı kısıtlar baz istasyonunun SINR kısıtını sağlamak için AGE yöntemi kullanılabilirliğini ifade eder. Eğer baz istasyonu AGE yöntemi uyguladıysa, eşitsizlik (14)'ten de görüleceği gibi HK girişimsiz iletim yapabilir. Böylece sistem veri hızını artırmak için  $P_j^d$  olabilecek en yüksek değerde olur.

2) *Güç Tahsisi*:  $P_j^d$  maksimum değerde olduğundan TKT yönteminde olduğu gibi  $P_i^c$  değeri uç noktalarda bulunabilir.

$$Q(P_i^c, P_j^d) = \left(1 + \frac{P_i^c g_{i,B}}{\sigma^2}\right) \left(1 + \frac{P_j^d g_j}{\sigma^2 + P_i^c h_{i,j}}\right) \quad (22)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P_i^c} = \frac{C(P_i^c)^2 + 2DP_i^c + E}{F} \quad (23)$$

burada:

$$C = g_{i,B} h_{i,j}^2 \quad (24a)$$

$$D = g_{i,B} h_{i,j} \sigma^2 \quad (24b)$$

$$E = \sigma^2 (-g_j h_{i,j} P_{max} + g_{i,B} (g_j P_{max} + \sigma^2)) \quad (24c)$$

$$F = \sigma^2 (h_{i,j} P_i^c + \sigma^2)^2 \quad (24d)$$

$$P_i^c = \min\left(\frac{1}{C}(-D \pm \sqrt{D^2 - CE}), P_{max}\right) \quad (25)$$

### C. Eşleme

Daha önce belirtildiği gibi optimal çözüm için karışık tamsayı programlama problemi çözülmesi gerekmektedir. Değerlendirme için GAMS çözümü referans olarak kullanılmıştır. Optimize yakın çözüm için Hungarian algoritması kullanılmıştır [9].

1) *Gale-Shapley Eşleme*: Basit bir algoritma olan Gale-Shapley Eşleme algoritması kullanılabilir [8]. Kararlı eşleme tanımı toplam bir eşleme için kullanılır. Her bir erkek tercih listesine göre kadınlara teklif yapar. Kadınlar ise teklif aldığı anda bu teklifi değerlendirmeye alır veya elinde daha iyi bir teklif varsa gelen teklifi reddeder. Bu çalışmada CC çiftleri erkek, HK'lar ise kadın olarak ifade edilmiştir.

### Algorithm 1 GS Eşleme Algoritması

---

```

1: Girdi: CC çiftlerinin tercih listesi  $\mathcal{P}\mathcal{L}^d$  ve HK'ların tercih listesi  $\mathcal{P}\mathcal{L}^c$ 
2: Çıktı: HK'ların optimum kararlı eşleşmesi  $\mathcal{M}$ .
3: Küme:  $\forall c_i \in \mathcal{C}$  ve  $\forall d_j \in \mathcal{D}$ 
4: Küme: Henüz eşleşmeyen CC çiftleri  $\mathcal{UM} = \{d_j, \forall d_j \in \mathcal{S}\}$ 
5: while  $\mathcal{UM} \neq \emptyset$  do
6:    $d_j$  kendisi listesinde ilk sırada tutan HK'ya teklif eder,  $\forall d_j \in \mathcal{UM}$ 
7:   if  $c_i d_j$ 'den teklif alırsa ve  $d_j$ ' halihazırda elde tutulan  $d_j$ 'den daha tercih edilir ise then
8:      $c_i d_j$ 'yi tutar ve  $d_j$ 'yi reddeder ( $\forall d_j \in \mathcal{S}$ )
9:      $\mathcal{UM} = \mathcal{UM} - \{d_j\}$  ve  $\mathcal{UM} = \mathcal{UM} \cup \{d_j\}$ 
10:  elseHK  $d_j$ 'yi reddeder ve  $d_j$ 'yi tutmaya devam eder.
11:  end if
12: end while

```

---

2) *Açgözlü Algoritma*: Bu kısımda bir eşleştirme algoritması önerilmiştir. Her bir HK kendisine en uygun olan CC çiftiyle eşleşir.

### Algorithm 2 Açgözlü Algoritma

---

```

1: Girdi:  $S_i^c$ : HK  $c_i$  tarafından kabul edilen CC çiftleri
2: Çıktı: Açgözlü eşleşme  $\mathcal{GM}, \mathcal{N}$ 
3: for  $i = 1 : N$  do
4:   Bul: İlk müsait CC çifti ( $j^*$ )
5:   if Müsait  $j^*$  mevcut then
6:      $S_i^c = S_i^c \cap j^*$ 
7:      $\mathcal{N} = \mathcal{N} \cap i$ 
8:     HK  $i$  ile ilk müsait CC çiftini eşleştir ve  $\mathcal{GM}$  kümesini güncelle.
9:   else
10:    Eşleşme yok
11:  end if
12: end for

```

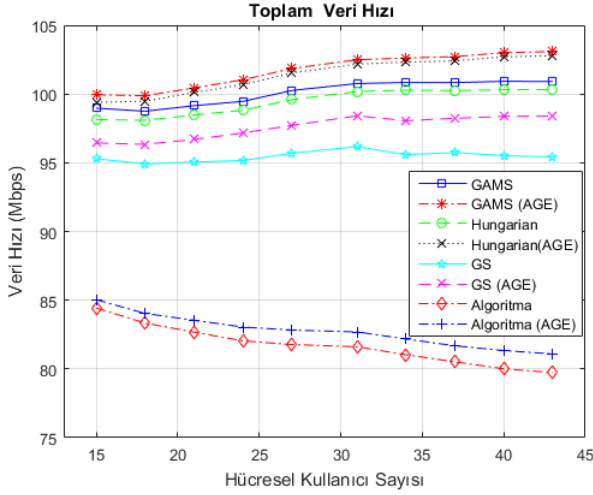
---

### III. BENZETİM SONUÇLARI

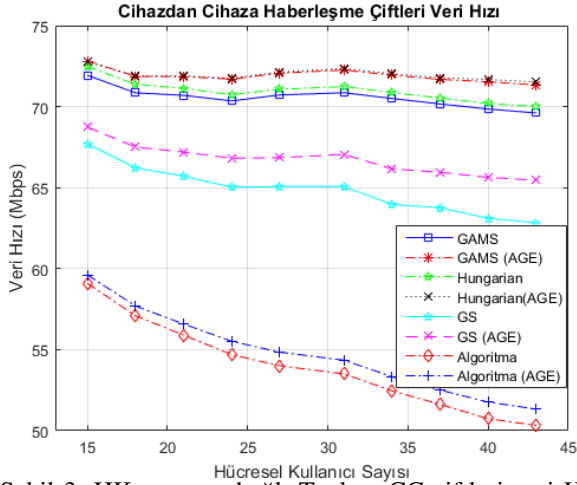
Baz istasyonunun merkezde olduğu bir ağ için cihaz sayıları  $N = L$  olarak düşünülmüştür. Hücrenin yarıçapı 350 metredir. CC çiftleri için uzaklık 20 – 40 metre aralığındadır. Yukarı gönderim bant genişliği 5 MHz ve HK'lara eşit olarak paylaştırılmıştır. Birim frekans bantındaki gauss gürültüsü -174 dBm/Hz. En yüksek güç ise düğümler için 24dBm'dir. Sinyal Gürültü oranı kaliteli haberleşme için 20dB'den büyük olmalıdır. Kanal kaybı ise  $K \times d^{-\alpha}$ , olarak ifade edilir  $\alpha = 4$  ve  $K = 10^{-2}$ . Gölgeleme log normal dağılımlıdır.

CC çiftleri HK'lara zarar vermeden frekansı verimli kullanmayı amaçlamaktadır. Algoritma testleri 1000 farklı senaryo için denenmiştir. Şekil 2 sistemin toplam veri hızını HK sayısına bağlı olarak göstermektedir. Sonuçlar AGE yönteminin 3 Mbps bir kazanç sağladığını göstermektedir. Beklenildiği gibi GAMS yardımı ile elde edilen karışık tam sayılı doğrusal programlama problem çözümü en iyi sonuçları vermiştir. Hungarian algoritmasıyla optimal çözüme yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Gale Shapley eşleme algoritması optimize yakın sonuç vermekle birlikte açgözlü algoritmadan çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. 3 ve 4 numaralı şekiller sırasıyla CC haberleşme çiftleri ve HK'ların veri hızlarını

göstermektedir. Sistemdeki HK sayısının artması, veri hızında da artışa neden olur. HK'ların veri hızlarındaki artış bu kullanıcıların öncelikli olmasından dolayıdır. GS algoritmasının HK'larda en yüksek verimli çalışması erkek- optimal seçimi yapmasından dolayıdır.



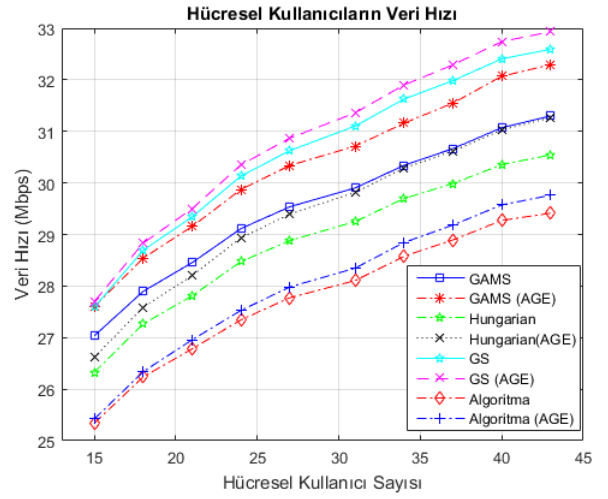
Şekil 2: HK sayısına bağlı Toplam sistem veri Hızı



Şekil 3: HK sayısına bağlı Toplam CC çiftleri veri Hızı

#### IV. SONUÇ

Bu makalede paylaşımlı kanallarda ardışık girişim engelleme çerçevesinde eşlemenin veri hızına olan etkisi incelenmiştir. CC çiftlerinin en az girişimle birer Hücreli Kullanıcı (HK) ile frekans paylaşımı yapılarak sistemdeki toplam veri hızının en büyüklenmesi hedeflenmiştir. Bu amaç ile karışık tamsayı programlama problemi tanımlanmış, bu problemin çözümünün zorluğundan dolayı, güç tahsisi, katılım kontrolü ve eşleme alt problemlerine ayrılarak bu alt problemler tanımlanmış ve çözülmüştür. Benzetim sonuçları frekans tekrar kullanımı ile sistemdeki veri hızındaki artışı göstermiştir. Sonuçlar ayrıca ardışık girişim engellemesinin ek olarak kullanıldığında, tek kullanıcı tespitine göre daha yüksek veri hızı sağladığı görülmüştür. Bu çalışmada önerilen algoritmalarda ve yöntemlerde



Şekil 4: HK sayısına bağlı Toplam HK veri Hızı

girişim kanalları dahil bütün kanallar hakkında bilgi sahibi olduğu varsayılmıştır. İleriki çalışmalarda kanal durumunun kesin olarak bilinmediği ve sistemdeki CC çiftlerinin arttığı daha karmaşık senaryolar incelenecektir.

#### BİLGİLENDİRME

Bu Çalışma TÜBİTAK tarafından 215E123 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Klaus Doppler, Mika Rinne, Carl Wijting, Cássio B Ribeiro, and Klaus Hugn. Device-to-device communication as an underlay to lte-advanced networks. *IEEE Communications Magazine*, 47(12), 2009.
- [2] Mohsen Nader Tehrani, Murat Uysal, and Halim Yanikomeroglu. Device-to-device communication in 5g cellular networks: challenges, solutions, and future directions. *IEEE Communications Magazine*, 52(5):86–92, 2014.
- [3] C-H Yu, Olav Tirkkonen, Klaus Doppler, and Cássio Ribeiro. Power optimization of device-to-device communication underlying cellular communication. In *2009 IEEE International Conference on Communications*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- [4] Min-Hong Han, Byung-Gook Kim, and Jang-Won Lee. Subchannel and transmission mode scheduling for d2d communication in ofdma networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*, pages 1–5. IEEE, 2012.
- [5] Klaus Doppler, Chia-Hao Yu, Cassio B Ribeiro, and Pekka Janis. Mode selection for device-to-device communication underlying an lte-advanced network. In *2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [6] Yunan Gu, Yanru Zhang, Miao Pan, and Zhu Han. Matching and cheating in device to device communications underlying cellular networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 33(10):2156–2166, 2015.
- [7] Anders Gjedemsjø, David Gesbert, Geir E Øien, and Saad G Kiani. Optimal power allocation and scheduling for two-cell capacity maximization. In *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 2006 4th International Symposium on*, pages 1–6. IEEE, 2006.
- [8] David Gale and Lloyd S Shapley. College admissions and the stability of marriage. *The American Mathematical Monthly*, 69(1):9–15, 1962.
- [9] Harold W Kuhn. The hungarian method for the assignment problem. *Naval research logistics quarterly*, 2(1-2):83–97, 1955.