

# FİZİKSEL KATMAN AĞ KODLAMASI KULLANARAK YOL ATAMA ROUTING USING PHYSICAL LAYER NETWORK CODING

Tolga Girici

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara  
tgirici@etu.edu.tr

## Özetçe

Bu çalışmada bir kablosuz ağda çok adımlı iletim işleminde fiziksel katman ağ kodlamasının kullanımını ele aldık. Normal ağ kodlamasının aksine fiziksel katman ağ kodlamasında paket bitleri değil, kiplenmiş analog sinyaller toplanır. Bunun için senkronizasyon gereklidir. Literatürde bir takım coğrafi yol atama algoritmaları alınarak, yardımcı düğümlerin kullanımı ve fiziksel katman ağ kodlaması ile modifiye edilmişlerdir. Biz bu çalışmada yol atama problemini Bellman-Ford algoritması ile çözdük, ve bu amaçla link maliyetleri tanımladık. Literatürdeki algoritmalar ile karşılaştırdığımızda önerdiğimiz yöntemin, özellikle yol kaybının fazla olduğu durumda literatürdeki yöntemlere göre büyük avantaj sağladığını gördük. Buna ek olarak, önerdiğimiz algoritma kanal kazancının sadece uzaklığa bağlı olmadığı durumlarda da çalışabilmektedir.<sup>1</sup>

## Abstract

*In this work we focused on routing using physical layer network coding. Contrary to regular network coding, in physical layer network coding modulated analog waveforms are added at the receivers. Although synchronization is needed for this purpose, adding waveforms helps save energy. In the previous literature some geographical routing algorithms are modified with physical layer network coding, using helper nodes. In this work we solve the optimal routing problem using the Bellman-Ford routing algorithm. For this purpose we defined a link cost metric. Numerical comparisons with the algorithms in the literature reveal that especially in the case of high path loss exponent the proposed algorithm significantly decreases the energy expenditure. Moreover, the proposed algorithm is able to work in cases, where the channel gain does not only depend on distance.*

## 1. GİRİŞ

Kablosuz ortam kablolu ortama göre çok daha zorlayıcı faktörler içermektedir. Bunların başında yol kaybı gelmektedir. Özellikle şehir içi ortamlarda yol kaybı iletim uzaklığının dördüncü kuvveti ile orantılı olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle kablosuz iletimde uzun mesafelere tek adımda iletim yerine çok adımlı iletim tercih edilmektedir [1]. Böylece düğümlerin iletim mesafeleri kısaltılmakta ve enerji sarfiyatı önemli derecede düşmektedir. Son 15 senedir bu konuda yoğun çalışmalar yapılmıştır.

Kablosuz ortamın diğer bir özelliği yapılan bir iletim çevredeki başka düğümler tarafından da duyulabilmesidir. Girişime neden olması nedeniyle bu özellik dezavantaj yaratabilmektedir. Ancak, bu özellik avantaja da çevrilebilmektedir. Bu özelliği kullanan işbirlikli yol atama algoritmaları literatürde önerilmiştir. [2], [3], [4]. Bu çalışmalarda düğümler sadece kendilerinden bir önceki düğümün değil, ondan önceki düğümlerin de iletimlerini dinlerler ve istifade ederler. Örneğin [2] çalışmasında düğümler sadece bir önceki değil iki önceki iletimi de dinlemekte ve hangisi başarılı olursa onu almaktadır. Böylece bir tür zamansal ve uzamsal çeşitleme elde edilmektedir. [3] çalışmasında ise birden fazla düğüm aynı anda senkronize bir şekilde aynı bilgiyi iletilmekte, ve alıcıda sinyaller toplanmaktadır. Diğer taraftan, [4] çalışmasında çoğa gönderim ele alınmıştır ve düğümlerin kendilerinden önceki bütün iletimleri dinledikleri durum incelenmiştir. Burada düğümler tekil iletimleri çözemeler bile en büyük oransal birleştirme yöntemiyle birleştirdikleri kip çözülmüş sinyallerin toplamını anlayabilmektedir. Bu şekilde önemli enerji tasarrufu elde edilebilmektedir. [5] gibi daha yeni çalışmalarda oransız (rateless) kodlar kullanılmakta, ve üstteki çalışmalardan farklı olarak düğümler önceki iletimlerin sinyallerini veya güçlerini değil veri hızlarını (mutual information) biriktirebilmekte ve daha büyük zaman ve enerji tasarrufları olabilmektedir.

İşbirlikli iletimde kullanılabilecek diğer bir teknik ise fiziksel katman ağ kodlamasıdır [6]. Bu teknikte yine birden fazla düğüm aynı anda iletim yapmakta, ancak bu iletimler farklı bilgiler içerebilmektedir. Bu iletimlerin biri daha önceden biliniyorsa çıkarılarak (XOR) diğer bilgi elde edilebilmektedir. Literatürdeki çok yeni bir çalışmada [7], bu tekniğin kullanıldığı bir yol atama algoritması öne sürülmüştür. Bu algoritmaya göre önce herhangi bir algoritmaya göre işbiriksiz bir iletim yolu belirlenmektedir. Daha sonra bir düğüm iletim yaptığında o iletimi çözebilen ve alıcı düğüme en yakın olan düğüm yardımcı (işbirlikçi) düğüm olarak belirlenmektedir. Kaynak düğüm ilk biti iletir. İşbirlik düğümü bunu çözdüğünde ikisi senkronize olurlar. Kaynak düğüm bilginin diğer bitlerini iletmeye devam ederken işbirlik düğümü ilk biti sürekli tekrar eder. Bunların güçleri alıcıda birleşir. Belli bir kurala göre alıcı kip çözümü yapar. Daha sonra elde edilen bitlerle işbirlik düğümünü ilettiği bit arasından XNOR işlemi uygulanarak asıl bilgi elde edilir. Burada iki düğüm aynı anda iletim yaptıkları için normalin yarısı kadar enerji ile aynı hata ihtimaline ulaşılabilir.

Biz ise bu çalışmada fiziksel katman ağ kodlaması ile yol

<sup>1</sup>978-1-4673-5563-6/13/\$31.00 ©2013 IEEE

atama algoritmasını beraber ele alarak optimal iletim yolunu elde ettik. Bu amaçla bir link maliyeti (enerji sarfiyatı için) önerdik ve kalsik Bellman-Ford algoritmasını çalıştırdık. Bir sonraki kısımda sistem modeli anlatılmaktadır.

## 2. SİSTEM MODELİ

Çalışmada bir alana rasgele yayılmış  $N$  adet kullanıcı var-sayıyoruz. Karşılaştırma amacıyla [7] bildirisindeki sistem modelini birebir almaya çalıştık. Her düğüm eş yönlü bir anten bulundurmaktadır, ve bir Sinyal Gürültü Oranı (SGO) eşliğine ulaşmak ve kapsama alanını kontrol edebilmek amacıyla iletim gücü istendiği gibi ayarlanabilmektedir. Ele aldığımız fiziksel katman ağ kodlamasını gerçekleyebilmek için düğümlerin alıcılarda senkronizasyon yetenekleri olduğunu ve bu iş için ekstra enerji gerekmediğini varsayıyoruz. Zaman alanında senkronizasyonu sağlamak zor olmakla beraber, eğer OFDM kullanılırsa sembol süreleri uzamakta ve senkronizasyon kolaylaşmaktadır [8]. Ancak biz bu çalışmada OFDM varsayımı yapmıyoruz ve senkronizasyon konusunu çalışmanın kapsamı dışında tutuyoruz. Bu çalışmada bir toplanır Gauss gürültülü kanal varsayıyoruz. Benzetim çalışmasında ise kanal kazancını tamamen uzaklığa bağlı olarak kabul ediyoruz. Ancak literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bizim önerdiğimiz algoritma kanal kazancının sadece uzaklığa bağlı olmadığı durumda da çalışabilir. Herhangi  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki kanal kazancı

$$h_{i,j} = \sqrt{1/L_{i,j}} \quad (1)$$

olarak modellenmektedir ve burada,

$$L_{i,j} = (4\pi/\lambda)^2 d_0^{2-\alpha} d_{i,j}^\alpha \quad (2)$$

yol kaybıdır. Bu denklemde  $\alpha$  yol kaybı üssü, ve  $d_0$  da referans uzaklıktır. Dış ortamda  $d_0 = 100$  almak makul bir tercihtir.  $d_{i,j}$ , düğümler arasındaki uzaklıktır.

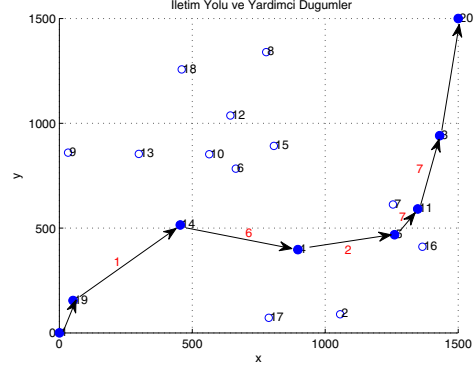
Toplanır Gauss gürültüsünün gücü  $P_r$  olarak tanımlanmıştır. Gönderilen sembolün başarılı bir şekilde çözülebilmesi için SGO'nun belli bir  $\gamma_r$  eşliğinin üzerinde olması gerekmektedir. Bu durumda noktadan noktaya iletimde harcanan toplam enerji

$$E_{i,j} = \frac{1}{\mu} \frac{\gamma_r P_n}{|h_{i,j}|^2} T_s + 2E \quad (3)$$

olarak modellenmiştir. Burada  $\mu$  iletili verimliliğidir, ve  $E$  de iletili ve alıcıda sinyal işleme işlemleri için gereken sabit bir enerji miktarıdır.

## 3. İŞBİRLİKLİ FİZİKSEL KATMAN AĞ KODLAMASI

Çalışmanın tam olarak anlaşılabilmesi için [7] bildirisindeki açıklamaların bir kısmını burada da tekrarladık. İletici  $i$ , alıcı  $j$  ve röle düğümlerini düşünelim. Basit olması açısından BPSK kiplemesini varsayalım, böylece her sembolde bir bit gönderilmektedir. İlk sembolü (yani biti), sadece  $i$  düğümü iletmektedir, ve bu sembolü  $k$  ve  $j$  düğümleri almak ve çözmek zorundadır. Bu ilk aşamadan sonra  $k$  ve  $i$  senkronize olur.  $i$  düğümü diğer sembollerini iletirken,  $k$  düğümü devamlı olarak ilk sembolü iletir. Senkronize oldukları için  $i$  ve  $k$ 'nin ilettiği semboller  $j$ 'de



Şekil 1: Örnek bir topolojide optimal iletim yolu ve yardımcı düğümler. Oklar ana yol üzerindeki linkleri, okların üzerindeki sayılar ise o linkler üzerindeki yardımcı düğümleri göstermektedir.

toplanır. Eğer o anda aynı değeri iletiyorlarsa daha büyük bir değer, ters değerleri iletiyorlarsa sıfır olarak toplanır. Alıcıda elde edilen değer bir eşik değerinden yüksekse 1, değilse 0 oluşur. Daha sonra ilk gönderilen sembolle bu değer XOR'u alınır, ve çıkan sonucun tersi alınır. Çıkan değer  $i$  düğümü tarafından iletilen bittir. Tablo 1 bu süreci göstermektedir.

Bu işlemin faydası şudur:  $i$  düğümünün tek başına iletilmesi yerine  $i$  ve  $k$  beraber yarı-büyükte sembolle iletirler. Semboller yarı-büyükte olduğundan güçler dörtte birine iner. Dolayısıyla toplam iletim gücü yarıya düşer. Bu yöntemin getirdiği ekstra masraf  $k$  düğümünün harcadığı ekstra sabit işlem gücüdür. Gerçekte doğal olarak gürültü olasılıksal bir süreçtir ve kimi zaman anlık gürültüye bağlı olarak sembol hatası oluşabilmektedir. Ancak ortalama SGO belli bir değer üzerinde olduğunda (mesela 10dB) bu sembol hatalarının başarıma etkisi ihmal edilebilir boyutta olmaktadır. Biz yol atama algoritmalarının başarımını karşılaştırdığımız için benzetim çalışmalarında  $\gamma_r = 10dB$  olarak almaktayız.

Toplam enerji sarfiyatı fiziksel katman ağ kodlaması için aşağıdaki gibi olur,

$$E_{i,j,k}^{PLNC} = \frac{1}{\mu} \frac{\gamma_r P_n}{\min(|h_{i,j}|^2, |h_{i,k}|^2)} T_s + \frac{l-1}{\mu} \left( \frac{\gamma_r P_n}{4|h_{i,j}|^2} + \frac{\gamma_r P_n}{4|h_{k,j}|^2} \right) T_s + 3lE \quad (4)$$

Burada  $l$  parametresi gönderilen sembol (bit) sayısıdır.

Eğer röle (işbirliği) düğümü kullanılmıyorsa toplam enerji sarfiyatı

$$E_{i,j}^{PTP} = \frac{1}{\mu} \frac{\gamma_r P_n}{|h_{i,j}|^2} T_s + 2lE \quad (5)$$

olurdu.  $i$  ve  $j$  kullanıcıları kanal kazançları ve  $E$  değerine bağlı olarak fiziksel katman ağ kodlaması kullanıp kullanmayacaklarına, kullanacaklarsa hangi düğümü röle olarak kullanacaklarına karar verirler.

n	$m_n$	i düğümü	k düğümü	Alıcı	$m'_n$	$m'_n \oplus m_1$	Toplam İletim Gücü	Toplam İşlem Gücü
1	1	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{\min( h_{i,j} ,  h_{i,k} )}$	-	$\sqrt{\gamma_r P_n}$	1	1	$\frac{\gamma_r P_n}{\min( h_{i,j} ^2,  h_{i,k} ^2)}$	3E
2	0	$-\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{i,j} }$	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{k,j} }$	0	0	0	$\frac{\gamma_r P_n}{4 h_{i,j} ^2} + \frac{\gamma_r P_n}{4 h_{k,j} ^2}$	3E
3	0	$-\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{i,j} }$	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{k,j} }$	0	0	0	$\frac{\gamma_r P_n}{4 h_{i,j} ^2} + \frac{\gamma_r P_n}{4 h_{k,j} ^2}$	3E
4	1	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{i,j} }$	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{k,j} }$	$\sqrt{\gamma_r P_n}$	1	1	$\frac{\gamma_r P_n}{4 h_{i,j} ^2} + \frac{\gamma_r P_n}{4 h_{k,j} ^2}$	3E
5	1	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{i,j} }$	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{k,j} }$	$\sqrt{\gamma_r P_n}$	1	1	$\frac{\gamma_r P_n}{4 h_{i,j} ^2} + \frac{\gamma_r P_n}{4 h_{k,j} ^2}$	3E
6	0	$-\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{i,j} }$	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{k,j} }$	0	0	0	$\frac{\gamma_r P_n}{4 h_{i,j} ^2} + \frac{\gamma_r P_n}{4 h_{k,j} ^2}$	3E
7	0	$-\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{i,j} }$	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{k,j} }$	0	0	0	$\frac{\gamma_r P_n}{4 h_{i,j} ^2} + \frac{\gamma_r P_n}{4 h_{k,j} ^2}$	3E
8	0	$-\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{i,j} }$	$\frac{\sqrt{\gamma_r P_n}}{2 h_{k,j} }$	0	0	0	$\frac{\gamma_r P_n}{4 h_{i,j} ^2} + \frac{\gamma_r P_n}{4 h_{k,j} ^2}$	3E

Tablo 1: Fiziksel katman ağ kodlaması işlemleri.  $i$  düğümü  $j$  düğümüne BPSK kipleme ile 8 sembol göndermektedir. İkinci sembolden itibaren  $k$  düğümü birinci sembolü ( $m_1$ ) tekrar tekrar göndererek  $i$ 'ye yardımcı olmaktadır.

## 4. İŞBİRLİKLİ YOL ATAMA ALGORİTMASI

Çalışmamızda dağıtık olarak uygulanabilecek bir yol atama algoritması öneriyoruz. Bu algoritma link maliyetlerine (link cost) dayanmaktadır. Bu link maliyeti aşağıdaki gibi formüle edilmektedir.

$$C_{i,j} = \min \left\{ E_{i,j}^{PTP}, \min_{k \neq i,j} \{ E_{i,j,k}^{PLNC} \} \right\} \quad (6)$$

Burada  $i$  ve  $j$  düğümü toplam enerji sarfiyatını en küçükleyecek işbirlik düğümünü bulmaktadır. Buna karşılık gelen enerji sarfiyatı yukarıda görülen ikinci terimdir. Eğer birinci terim daha küçük ise işbirliği kullanmamak daha az enerji ile sonuçlanmaktadır.

Formüle edilen bu link maliyeti dağıtık Bellman Ford algoritması ile kullanılabilir.  $N$  düğümünün sonuç (destination) düğümü olduğunu varsayalım. Burada her düğüm bir adım link maliyetlerini bilmektedir. Bunlara dayalı olarak sonuç düğümüne olan minimum toplam maliyetlerini ( $C_{i,N}^{toplama}$ ) aşağıdaki formüle göre hesaplayarak bir sonraki iletilen düğümü bulurlar ve bu toplam maliyetleri de komşuları ( $\mathcal{K}_i$  kümesi) ile paylaşırlar. Döngülü olarak ilerleyen algoritma sonunda en iyi yol atamaya doğru yakınsar. Bu algoritmaya BF-PLNC adını verdik.

$$C_{i,N}^{toplama} = \min_{i \in \mathcal{K}_i} \left\{ C_{i,j} + C_{j,N}^{toplama} \right\} \quad (7)$$

### 4.1. Denektaş Algoritmalar

Sabit enerji sarfiyatını dikkate almaları sebebiyle [7] bildirsinde Power Saving Routing (PSR) [9] ve Progressive Power Aware Routing (PPAR) [10] algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar literatürde Coğrafi Yol Atama algoritmaları olarak geçer ve düğümlerin fiziksel konum bilgileri kullanılarak dağıtık bir şekilde yol atanır. Kullanıcılar komşularının ve sonuç düğümünün koordinatlarını bilirler.

PSR algoritmasında bir sonraki düğümün optimal konumu, şu anki düğüm ile sonuç düğümü arasındaki düz çizgi üzerinde, şu anki düğümden  $d_{opt} = \left( \frac{2E}{BT_s(\alpha-1)} \right)^{1/\alpha}$  uzaklıkta bulunur. Bu optimal konuma en yakın (ve sonuç düğümüne

şu anki düğümden daha yakın) olan düğüm bir sonraki düğüm olarak belirlenir. Paket sonuç düğümüne ulaştığında yol atama sonuçlanır. Burada  $B = \frac{\gamma_r P_n (4\pi/\lambda)^2 d_0^{2-\alpha}}{\mu}$  şeklinde tanımlanmıştır. Yazarlar [7] bildirisinde bu algoritmayı fiziksel katman ağ kodlaması için modifiye etmişlerdir (MPSR). Buna göre, bir sonraki düğüm seçildikten sonra bu düğümüne en yakın olan (ve şu anki düğümün iletimini çözebilmiş olan) düğüm (eğer böyle bir düğüm varsa) işbirliği düğümü olarak seçilir.

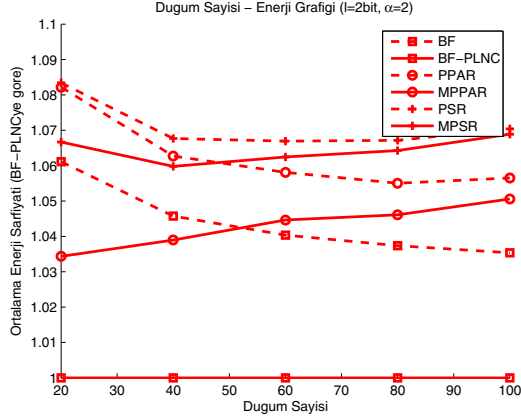
PPAR algoritmasında ise  $\frac{Bg^\alpha T_s + 2E}{d-f}$  değerini en küçükleyen düğüm bir sonraki düğüm olarak belirlenir. Burada  $g$ : şu anki düğüm ve bir sonraki düğüm,  $d$ : şu anki düğüm ve sonuç düğümü,  $f$  ise bir sonraki düğüm ve sonuç düğümü arasındaki uzaklıklardır. Bir sonraki düğüm sonuç düğümü olduğunda algoritma sonlanır. Bu algoritma da fiziksel katman ağ kodlaması için modifiye edilmiştir (MPPAR). Buna göre, bir sonraki düğüm seçildikten sonra bu düğümüne en yakın olan (ve şu anki düğümün iletimini çözebilmiş olan) düğüm (eğer böyle bir düğüm varsa) işbirliği düğümü olarak seçilir.

Bizim önerdiğimiz algoritma bu iki algoritmaya göre avantajlıdır, çünkü baştan sona kadar enerji sarfiyatını optimize etmektedir. Ayrıca algoritmamız kanal kazançları sadece mesafelere bağlı olmadığı zaman da çalışabilmektedir. Düğümlerde GPS gibi konumlandırma sistemleri bulunmasına gerek yoktur.

## 5. BENZETİM SONUÇLARI

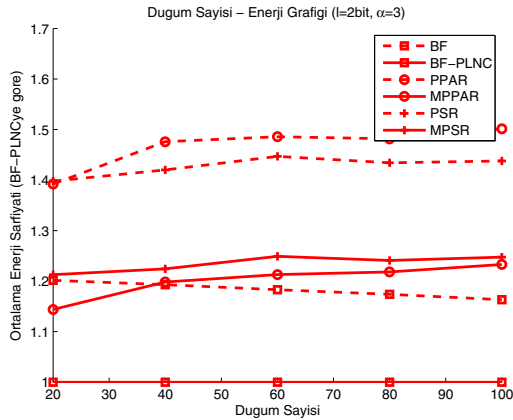
Benzetim çalışmalarında düğümler  $1500 \times 1500m^2$ 'lik bir kare alanda rasgele konumlandırılmaktadır. Bunlara istisna olarak kaynak düğümü sol alt köşede, sonuç düğümü ise sağ üst köşede bulunmaktadır. İletimin 2.4GHz kanalında yapıldığı varsayılmıştır. Veri hızı 100kbps'tir ve BPSK kullanılmıştır. Dolayısıyla sembol süresi  $10^{-5}$  sn'dir. Alıcıda sağlanması gereken ortalama SGO eşiği 10dB'dir. Yol kaybındaki referans uzaklık 100 metredir. Benzetimlerde 2bit iletimini ele aldık. Bilindiği gibi [7] fiziksel katman ağ kodlaması gönderilen bit sayısı arttıkça daha verimli olmaktadır. Bu bakımdan  $l = 2$  bit en kötümser durum anlamına gelmektedir.

Şekil 2, 3 ve 4  $l=2$  bitin iletildiği ve sırasıyla yol kaybı üssü  $\alpha = 2, 3$  ve 4 olan durumlarda algoritmalara karşılık gelen ortalama enerji sarfiyatlarını göstermektedir. Bütün sonuçlar BF-PLNC algoritmasının enerji sarfiyatı ile nor-



Şekil 2: Yol kaybı üssü  $\alpha = 2$  iken ve  $l=2$  bit iletirken algoritmaların ortalama enerji sarfiyatları. BF-PLNC algoritmasının enerji sarfiyatı ile normalize edilmiştir.

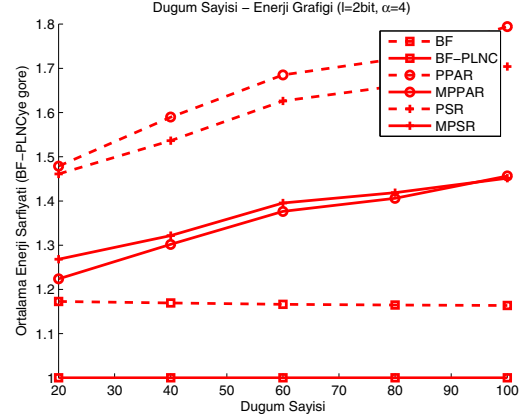
malize edilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere BF-PLNC her zaman en iyidir, ve özellikle  $\alpha = 4$  durumunda ve yüksek sayıda kullanıcı içeren ağlarda diğer algoritmalarla arası daha çok açılmaktadır. Ayrıca BF-PLNC ve PLNC arasında özellikle  $\alpha = 4$  durumunda kullanıcı sayısından bağımsız olarak belli bir oransal ilişki vardır. Gelecek çalışmalarda bir takım teorik analizler ile bu oransal ilişkinin sebepleri araştırılacaktır. Bunun yanında BPSK ve QPSK dışındaki kipleme türleri ile (ör. 8PSK, 8QAM, 16QAM) ağ kodlamasının nasıl gerçekleştirilebileceği üzerinde çalışılacaktır.



Şekil 3: Yol kaybı üssü  $\alpha = 3$  iken ve  $l=2$  bit iletirken algoritmaların ortalama enerji sarfiyatları. BF-PLNC algoritmasının enerji sarfiyatı ile normalize edilmiştir.

## 6. Kaynakça

[1] Girici, T.; Ephremides, A.; , "Joint routing and scheduling metrics for ad hoc wireless networks," Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol.2, no., pp.1155-1159 vol.2, 3-6 Nov. 2002



Şekil 4: Yol kaybı üssü  $\alpha = 4$  iken ve  $l=2$  bit iletirken algoritmaların ortalama enerji sarfiyatları. BF-PLNC algoritmasının enerji sarfiyatı ile normalize edilmiştir.

[2] Ibrahim, A.; Zhu Han; Liu, K.J.R.; , "Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol.7, no.10, pp.3930-3941, Oct. 2008

[3] Khandani, A.E.; Abounadi, J.; Modiano, E.; Lizhong Zheng; , "Cooperative Routing in Static Wireless Networks," Communications, IEEE Transactions on, vol.55, no.11, pp.2185-2192, Nov. 2007

[4] Maric, I.; Yates, R.D.; , "Cooperative multihop broadcast for wireless networks," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol.22, no.6, pp. 1080- 1088, Aug. 2004

[5] Uргаonkar, R.; Neely, M.J.; , "Optimal Routing with Mutual Information Accumulation in Wireless Networks," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol.30, no.9, pp.1730-1737, Oct. 2012

[6] S. Zhang, S. Liew, and P. Lam, "Hot topic: physical-layer network coding," in Proc. of ACM Mobicom, vol. 1, Sept. 2006, pp. 358-365.

[7] JA. M. Akhtar, M. R. Nakhai and A. H. Aghvami, "On Energy Efficient Routing Using Cooperative Physical Layer Network Coding", IEEE Globecom 2012, Anaheim CA, USA.

[8] L. E. Li, R. Alimi, D. Shen, H. Viswanathan, and Y. R. Yang, "A general algorithm for interference alignment and cancellation in wireless networks," in 2010 Proceedings IEEE INFOCOM, Mar. 2010, pp. 1-9

[9] I. Stojmenovic and X. Lin, "Power-aware localized routing in wireless networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 12, no. 11, pp. 1122-1133, Nov. 2001

[10] J. Kuruvila, A. Nayak, and I. Stojmenovic, "Progress and Location Based Localized Power Aware Routing for Ad Hoc and Sensor Wireless Networks," Int. Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2, no. 2, pp. 147-159, 2006.