



Güneş Enerjisi Kullanan Bir Baz İstasyonunun Kalman Filtresi Kestirimi ile Zamanda Optimal Orantısal Adil Kaynak Paylaşımını

Online Proportional Fair Resource Allocation for Wireless Sensor Networks

Neyre Tekbiyık Ersoy, Elif Uysal-Bıyıkoğlu, Kemal Leblebicioğlu
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: ntekbıyık,elif,lebleb@eee.metu.edu.tr

Tolga Girici
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: tgirici@etu.edu.tr

Özetçe —Bu makalede, güneş paneli ile beslenen bir algılayıcı ağı baz istasyonundan (Bİ) yapılacak iletimin optimizasyonu ele alınmaktadır. Bİ'nun dağıtık bir ağı ortogonal kanallar üzerinde çalışan düğümlerine veya geçit düğümlerine hizmet ettiği düşünülmüştür. Güneş enerjisinin günlük periyodikliği, kısa-zamanlı değişimleri ve Bİ'nden geçit düğümlerine olan kanal kazanım farkları göz önünde bulundurularak, Bİ'nden **kablosuz algılayıcı ağların** geçit düğümlerine gönderilecek olan onarım mesajlarının etkin iletimini sağlayan bir çizelgeleme yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem, PTF-On, bir önceden-bilgisiz kaynak paylaşım algoritmasıdır. PTF-On Bİ'nun enerji harman profilini tahmin ederek, bu profile göre veri akışını orantısal-adil bir şekilde enbüyücek en iyi gönderi gücü ve zaman paylaşımını belirlemektedir.

Anahtar Kelimeler—*Energy harvesting; proportional fair; wireless sensor networks; solar energy; Kalman filter; prediction.*

Abstract—This paper considers optimising transmissions of a wireless sensor network base station (BS) equipped with a solar panel. The BS is assumed to serve a distributed network of nodes or gateways on orthogonal channels. Considering the daily periodicity as well as short term variations of solar energy, and the differences in channel gain from the BS to the gateways, a scheduling method for efficient delivery of maintenance messages from the base-station to the gateway **nodes of WSNs** is investigated. The proposed solution is an online resource allocation algorithm, called PTF-On, that can predict the base station's energy arrival profile, and then, act upon this profile to determine the best power and time allocation that will maximize the throughput in a proportionally fair way.

Keywords—*Enerji hasatı; orantısal adil; kablosuz algılayıcı ağlar; güneş enerjisi; Kalman filtresi; öngörü.*

I. GİRİŞ

Son yıllarda ortaya çıkan enerji hasatı ("energy harvesting") teknikleri, haberleşme ağlarındaki düğümlerin ortamda bulunan enerjiyi depolayarak ve kullanarak şebeke veya batarya enerjisine bağımlılığını azaltmak bakımından önem taşımaktadır. Günümüzde enerji hasatının en yaygın ve uygun kaynağı, diğer kaynaklara oranla daha yüksek güç yoğunluğu sağlama ve kolay bulunur olması sebebiyle, Güneş enerjisidir [5].

Enerji hasatının en önemli uygulama alanlarından biri kablosuz algılayıcı ağlarıdır (KAA). Pek çok KAA uygulamasında (yapı (bina, köprü, vs. gibi yapıların) sağlığı [2], tarım [6], hayvan davranışları ve yaşam alanı görüntüleme [9]) büyük alanlar aynı veya farklı amaçlar için kullanılabilen düğümler hatta farklı KAA'lar ile donatılmakta, ve toplanan bilgiler belli geçit düğümleri (küme başları) tarafından, elde edilen bilginin değerlendirileceği, kritik kararların alındığı uzak bir merkezi ofisteki baz istasyonuna (Bİ) gönderilmektedir.

Bu makalede **alınan** senaryoda, güneş panellerince beslenen bir Bİ'nin, birden çok KAA'ya (KAA'ların geçit düğümlerine (GD)) gün içinde onarım mesajları (protokol bilgisi, topoloji güncellemesi, vs.) göndereceği düşünülmüştür. Güneş panellerinden elde edilen güç sürekli olamayabileceğinden¹, asıl amaç, en az seviye enerji kullanarak bazı işlemleri gerçekleştirmek değil, Bİ'nin enerji harmanlama profilinin enerji harcama profili ile örtüşmesini sağlamak olmalıdır. [4]'de de anlatıldığı üzere, tutucu enerji kullanımını, dolu batarya seviyesi nedeniyle kaçırılacak enerji harmanlama fırsatlarına sebep olabilir. Agresif bir enerji harcama profili ise, Bİ'nin uzunca bir süre enerjisiz kalmasına ve dolayısıyla, acil veya zaman kısıtı olan bilgilerin ulaştırılamaması sonucu uygulama ile ilgili büyük sorunların oluşmasına yol açabilir.

Yukarıda sözedilen noktalar doğrultusunda, etkin güneş

Bu çalışma 110E252 numaralı TÜBİTAK projesince desteklenmektedir.

¹Panelden elde edilen enerji herhangi bir gölgelenme ile azalabilmektedir. Ayrıca, güneş battıktan tekrar doğana kadar geçen süre boyunca güneş enerjisi olmayacaktır.

enerjisi kullanımını enbüyütmek amacıyla olan bir Bİ'nun KAA'ların GD'lerine gönderilecek olan mesajları nasıl çizeleemesi gerekmektedir? Ayrıca, bu tür uygulamalarca kullanılan KAA'ların ve dolayısıyla ilgili GD'lerinin geniş alanlara yayıldığı ve yol kayıplarının birbirinden çok farklı olabileceği göz önünde bulundurulduğunda, çizeleme periyodu boyunca Bİ hangi GD'ne ne kadar güç ve zaman atmalıdır? Yalnızca Bİ'ye yakın olan değil, yüksek yol kayıplarına sahip GD'lerin de gönderilen bilgileri etkin bir şekilde alabilmesi için, bu makaledeki problem bir kısıtlı eniyileştirme problemi olarak tasarlanmış ve bu problemce enbüyütmek üzere, orantılı adalet ("proportional fairness") sağladığı bilinen bir amaç fonksiyonu seçilmiştir. İlk olarak [8]'de önerilen ve iki yüzü dışbükey (biconvex) bir optimizasyon problemi olduğu kanıtlanan bu problemin birçok yerel optimum'a sahip olduğu bilinmektedir. Bu problem için geliştirilen optimum önceden-bilgili (offline) çizeleme yöntemi (Bir çizeleme periyodu boyunca harmanlanacak enerji harman miktarlarının ve harman zamanlarının periyot başında bilindiğini kabul eden yöntem), BCD [8], Blok Koordinat Alçalma bazlı bir algoritma olup, kablosuz tümegönderimde, harmanlanan enerjinin orantısal-adil bir şekilde kullanılmasını sağlayan bir optimum çizeleyeye yakınsamaktadır. BCD'nin başarımına çok yakın başarım gösteren bir buluşsal algoritma olan PTF de yine [8]'de önerilmiştir. Bu bildiriye ise, PTF'in önceden-bilgisiz (online) versiyonu olan PTF-On algoritması geliştirilmiştir. PTF-On, yine burada geliştirilecek bir Kalman-filtre bazlı enerji öngörü algoritması ile bir güne ait enerji harman profilini tahmin edebilmekte ve bu profil üzerinde PTF algoritmasının geliştirilmiş versiyonunu çalıştırarak, GD'lerine gönderilen bilgi miktarını orantısal adil bir şekilde enbüyütecek en iyi güç ve zaman çizelesini belirleyebilmektedir.

Bildirinin devamında ilk olarak, sistem modeli ve önerilen problemin özellikleri sunulmaktadır. Kalman filtre bazlı enerji öngörü algoritması Bölüm III'de anlatılmaktadır. Bölüm IV'te çevrimiçi bir kaynak paylaşırma algoritması olan PTF-On tasarlanmıştır. Önerilen algoritmalara yönelik sayısal değerlendirmeler ve simulasyon sonuçları Bölüm V sunulmuştur. Son olarak Bölüm VI, yapılan çalışmaları özetlemekte ve gelecekte yapılacak olan çalışmalara ışık tutmaktadır.

II. SİSTEM MODELİ VE PROBLEM TANIMI

Çizeleme periyodu, olarak dlandırılan bir enerji harmanlama süreci boyunca, güneş panelince şarj edilen bir batarya ile gelen bir Bİ'den N farklı GD'ne gönderilecek gönderilerin W Hz sabit bant genişliği üzerinde zaman-paylaşımlı bir biçimde düzenlendiği bir çizeleme problemi tasarlanmıştır. Problemde, tüm GD'ler için sabit gürültü izgel güç yoğunluğu, N_o , varsayılmaktadır. Bİ ile n inci GD arasındaki kanal kazanımı, g_n uzun zaman ortalamalı bir kazanım olarak düşünülmüş ve dolayısıyla, g_n , $n \in 1, \dots, N$ 'in bir çizeleme periyodu boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir. Makalede, bu çizeleme periyodu'nun zaman dilimi (ZD) adı verilen, T uzunluğundaki, K tane zaman pencere bölündüğü ve her ZD başında harmanlanan enerjinin Bİ'ye verildiği düşünülmüştür. Aşağıdaki problem, bu ZD 'leri boyunca atanacak, ve veri akışını orantısal-adil bir şekilde enbüyütecek optimal ZD 'leri ve gönderi güçlerini bulmak amacıyla formüle edilmiş iki yüzü dışbükey bir problemdir [8]. Orantısal-adaleti sağlayan, G.D.'lerin toplam

erişilebilir veri aktarım hızlarının² (total achievable rate) logaritmalarının toplamı olan amaç fonksiyonudur [3]. Problem 1'de, $t = 1, \dots, K$ ve $n = 1, \dots, N$ 'dir.

Problem 1:

$$\text{Enbüyüt: } U(\bar{\tau}, \bar{p}) = \sum_{n=1}^N \log_2 \left(\sum_{t=1}^K \tau_{nt} W \log_2 \left(1 + \frac{g_n p_t}{N_o W} \right) \right)$$

$$\text{Kısıtlar: } \tau_{nt} \geq 0, p_t \geq 0 \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^N \tau_{nt} = T_t, \sum_{t=1}^K \tau_{nt} \geq \epsilon \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^t p_i T_i \leq \sum_{i=1}^t E_i \quad (3)$$

(1) numaralı denklem setindeki kısıtlar, problemin doğası gereği, atanan ve ZD 'lerin negatif olamayacağını belirtmektedir. (2)'de herhangi bir zaman aralığında, gönderi yapılacak olan kullanıcılara ayrılan toplam sürenin o zaman aralığını geçmeyeceğini ve herhangi bir kullanıcıya çizeleme periyodu boyunca hiç zaman ayrılmaması durumunun mümkün olmayacağını belirten teknik kısıtlar yer almaktadır. Son olarak (3) numaralı denklem setindeki kısıtlar enerji harmanlama miktarlarına bağlı olup, önceden harmanlanmamış bir enerjinin harcanamayacağını göstermektedir. Problem 1'i, herhangi bir çizeleme periyodu uzunluğu ve eşit ZD uzunlukları ($T_t = T$, $t = 1, \dots, K$) için çözüp, optimale yakınsayan BCD algoritmasının başarımına çok yakın performans gösteren önceden-bilgili buluşsal algoritma, PTF, [8]'da sunulmuştur. Bu makalede, çizeleme periyodu'nun bir gün (24 saat) olduğu ve harmanlanacak enerjilerin yarım saatlik aralar ile ($T = 30$ dk) baz istasyonuna verildiği düşünülerek, PTF geliştirilmiş ve uyum içinde çalışabileceği bir enerji öngörü algoritması, K-SEP, tasarlanarak bir önceden-bilgisiz kaynak paylaşırma algoritması olan PTF-On türetilmiştir. K-SEP ve PTF-On sırasıyla, Bölüm III ve Bölüm IV'de anlatılmaktadır.

III. KALMAN FİLTRE-TABANLI ENERJİ ÖNGÖRÜ ALGORİTMASI

Bu bölümde, bir güneş paneli tarafından harmanlanıp ilgili Bİ'nin kullanımına sunulan enerji miktarlarının bir Kalman Filtre tabanlı algoritma, K-SEP (Kalman based Solar Energy Predictor), ile tahmin edilmesi anlatılmaktadır. Bir gün boyunca harmanlanan enerji miktarlarının tahmin edilmesi amacıyla, Kalman filtresine ait durum ve ölçüm modelleri aşağıda gösterildiği şekilde tasarlanmıştır:

$$x(k+1) = \alpha_1 x(k) + \alpha_2 x(k-47) + \beta_1 y(k) + w(k) \quad (4)$$

$$z(k) = x(k) + v(k) \quad (5)$$

denklemlerde, x ve z sırasıyla durum (enerji seviyesi) ve ölçümü temsil etmektedirler. Bahsedilen modelin oluşturulmasını sağlayan ana fikir güneşten gelen ışınının günlük devridir: her gün sabah saatlerinde güneş doğmakta, öğlen saatlerinde güneş yükselip en yüksek seviyesine ulaşmakta,

²Burada, çok uzun gönderi blokları kullanıldığı düşünülerek, ergodik kapasiteye neredeyse ulaşıldığı kabul edilmiştir.

ve akşam saatlerinde güneş batmaktadır. Modele göre; herhangi bir günün $(k + 1)$ 'nci yarım-saatinde harmanlanacak enerji miktarı, $x(k + 1)$, aynı günün k 'nci yarım-saatinde harmanlanmış olan enerji miktarıyla, $x(k)$, aynı günün k 'nci yarım-saatinde alınan güneş radyasyonu değeriyle, $y(k)$, ve bir önceki günün $(k+1)$ 'nci yarım-saatinde harmanlanmış olan enerji miktarıyla, $x(k-47)$ ($x((k+1)-48) = x(k-47)$), ilişkili olarak düşünülebilir. Bu ilişkiyi belirleyen katsayılar olarak kullanılacak α_1 , α_2 ve β_1 , Denklem 4'teki her bir parametrenin önemini belirten ağırlık katsayılarıdır. Aynı denklemde yer alan w , modelleme hatasını ve dolayısı ile de kontrol edilemeyen bazı faktörlerin (Örneğin; bulut hareketlerinin sebep olduğu geçici gölgelenmeler, güneş panelinin gerektiği gibi çalışmasını engelleyecek dış etkenler, veya kötü niyetli davranışlar sonucu güneş paneline zarar verilmesi, vs.) harmanlanan enerji miktarlarına etkisini temsil etmektedir. Ölçüm modelindeki, v ise ölçüm gürültüsünü temsil etmektedir. Bu makalede w ve v , elemanları, sırasıyla σ_w^2 ve σ_v^2 standart sapmalı, sıfır ortalamalı, bağımsız ve özdeş dağılımlı Gauss (i.i.d) değişkenleri olarak modellenmiştir.

Bir gün içerisinde 48 tane yarım-saat olduğundan, yukarıda belirtilen denklemler ana yapıya sadık kalınarak, Denklem 6'te gösterilen matris sistemine dönüştürülebilir.

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k) \\ x(k-1) \\ \vdots \\ x(k-45) \\ x(k-46) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \dots & 0 & \alpha_2 \\ 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-1) \\ x(k-2) \\ \vdots \\ x(k-46) \\ x(k-47) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} y(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w(k) \quad (6)$$

Şimdi, herhangi bir günde harmanlanan enerji miktarlarını, $\bar{\xi}_k = [x(k) \ x(k-1) \ \dots \ x(k-47)]'$ vektöründe toplayalım ve $A = \begin{bmatrix} A_1 & \alpha_2 \\ I & A_2 \end{bmatrix}$ matrisini tanımlayalım. Bu matriste I , 48×48 boyutlu bir birim matrisini, $A_1 = [\alpha_1 \ 0 \ \dots \ 0]$ ve $A_2 = [0 \ \dots \ 0]'$ ise 47 elemanlı satır ve sütun vektörlerini temsil etmektedir. \bar{A} matrisinin yanısırla $\bar{\Gamma} = [\beta_1 \ 0 \ \dots \ 0]'$, ve, $\bar{\Gamma} = [\beta_1 \ \dots \ 0]'$ vektörlerini tanımlayalım. Bu durumda, Denklem 6'teki durum modeli ve Denklem 5'deki ölçüm modeli aşağıdaki denklemlere dönüşmektedir:

$$\bar{\xi}_{k+1} = \bar{A}\bar{\xi}_k + \bar{B}y(k) + \bar{\Gamma}w(k) \quad (7)$$

$$z(k) = x(k) + v(k) \quad (8)$$

Bu denklem düzeni, yapısal olarak [1]da bahsedilen modele (Sayfa 252, Denklem (5.27)) eşdeğerdir. Bu sebeple, model için geliştirilen Kesikli-Zamanlı Çizgisel Kalman Filtresi kullanılarak bir sonraki yarım-saat'te harmanlanacak enerji miktarını hesaplayabiliriz. Fakat, öncelikle, Denklem 7'teki α_1 , α_2 ve β_1 'nin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, şu veri uyumu (data-fitting) yöntemi kullanılmıştır: Navin Sharma [7] tarafından sağlanan Amherst, Massachusetts, ABD'ye ait 18 günlük (01.10.09-18.10.09) gerçek güneş paneli çıkış gücü ölçümleri kullanılarak, 17 gün (816 yarım-saat) üzerinden, gerçek ve hesaplanan veriler arasındaki ortalama karesel hata, $MSE = \frac{1}{816} \sum_{k=48}^{863} (x(k+1) - (\alpha_1 x(k) + \alpha_2 x(k-47) + \beta_1 y(k)))^2$, yı enküçültecek bir Newton algoritması tasarlanmıştır. Kilojoule cinsinden $x(k)$ 'ler ile yapılan

simulasyonlar sonucunda, en iyi $\alpha_1 = 0.718$, $\alpha_2 = 0.143$, $\beta_1 = 0.006$ değerleri elde edilmiştir. K-SEP algoritmasının başarımını karşılaştırmak ve PTF-On algoritmasında kullanılacak üzere başka bir enerji öngörü algoritması daha geliştirilmiştir. Bu algoritma, S-SEP (Simple Solar Energy Predictor), en basit haliyle, bugüne ait k 'inci yarım-saat'te harmanlanacak enerji miktarını, önceki iki güne ait k 'inci yarım-saat'lerde harmanlanan enerjilerin ortalaması olarak öngörmektedir.

IV. PTF-ON ALGORİTMASI

Bu bölümde, bir önceden-bilgisiz gönderi gücü ve ZD atama algoritması olan PTF-On açıklanacaktır. PTF-On algoritması, Bölüm II'de enerji harmanlama modeline uygun olarak çalışmakta ve, hem günler arası şablon periyodikliğini hem de gece boyunca B.İ'nin enerjisi kalacağı durumları iyi yansıtabilmek için, bir günün ortasından (12:00) ertesi günün ortasına kadar geçen süreçte çalışmasını tamamlamaktadır. PTF-On algoritması enerji öngörü algoritması ile PTF algoritmasının kombinasyonundan oluşmaktadır. PTF algoritmasının çalışabilmesi için, bir çizelgeleme periyodu boyunca harmanlanacak tüm enerjiler önceden bilinmelidir. Bu sebeple, PTF-On'un ilk kısmı öngörü ile ilgilidir. m 'inci çizelgeleme periyodu'na ait l 'inci ZD, aynı zamanda, bu çizelgeleme periyodu'nun $l - 1$ 'inci ZD kaydırılmış versiyonunun, (Ψ_l) 'in, ilk ZD'dir. Böylelikle, m 'inci çizelgeleme periyodu'na ait her ZD başında, yani her Ψ için 48 enerji hasatı tahmin edilmektedir. Bu tahminlerin bir kısmı K-SEP, bir kısmı S-SEP ile yapılmaktadır. Bunun sebebi, K-SEP kullanılması durumunda herbir harman için yarımşar saat geçmesini beklemek gerekmesidir. Oysa ki, tahmin anında o ZD'lerine ulaşılmamıştır. Buna ek olarak, S-SEP'in enerji tahminleri için önceki iki güne ait enerji değerlerine ihtiyaç duyması sebebiyle, aktif çizelgeleme periyodu öncesinde, iki pasif çizelgeleme periyodu'nun (96 saat), geçmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, uygulama ilk defa kullanıldığında, iki günlük bir gözlem süreci gerekmekte, sonrasında bu gözlemler algoritma çalışırken yapılabilmektedir. PTF-On şu şekilde çalışmaktadır:

- 1) **Başlangıç:** m 'inci çizelgeleme periyodu'nun ilk ZD'nin başında, 12:00'de, algoritma başlatılır.
- 2) **Harmanlanan enerjilerin öngörülmesi:** l 'inci ZD başında, yani saat 12:00+($l-1$). T itibarı ile, B.İ'ye verilen enerji miktarı, $E_{m,l}$, bilinmektedir. Böylece, K-SEP algoritması kullanılarak, bir sonraki ZD içerisinde gelecek olan enerji miktarı, $1 \leq l \leq 47$ ise $E'_{m,l+1}$, $l = 48$ ise $E'_{m+1,1}$, hesaplanır. Geriye kalan 46 enerji harmanı S-SEP kullanılarak hesaplanır: $\{E''_{m,j}\}_{j=l+2,\dots,48}$, $\{E''_{m+1,i}\}_{i=1,\dots,l-1}$. Böylelikle, l 'in başında, Ψ_l için bir sanal harman dizilimine, $\bar{E}_{sanal,l}$, ulaşılır. Örneğin; $\bar{E}_{sanal,3} = [E_{m,3}, E'_{m,4}, E''_{m,5}, \dots, E''_{m,48}, E'_{m+1,1}, E''_{m+1,2}]$.
- 3) **Gönderi gücü atama:** $l = 1$ ise, Ψ_1 'e ait gönderi gücü dizilimi, \bar{P}_1 , $\bar{E}_{sanal,1}$ kullanılarak belirlenir. Değil ise, $\bar{E}_{sanal,l}$ 'in ilk enerji seviyesi, $l-1$ 'inci ZD'nden kalan enerji³ üzerine eklenerek güncellenir ve buna göre \bar{P}_l belirlenir. l 'nci ZD'nde kullanılacak gönderi gücü $\bar{P}_l(1)$ 'dir. \bar{P}_l , şu şekilde bulunur: (a) ZD i 'den, ZD $i+1$ 'e geçerken: Harmanlanan enerji

³ $l-1$ 'inci ZD'nde, gerçekte harmanlanan enerji seviyesi ile harcanan enerji (tahmin edilen enerji seviyesi) arasında fark olacaktır.

miktarı azalıyor, ZD i'den ZD i+1'e Δ kadar enerji aktarılıp her iki ZD 'ndeki gönderi güçleri eşitlenir. Bu işlem, Ψ_l boyunca tüm ZD 'leri için atanan gönderi güçleri azalmayan bir seri oluşturana kadar devam ettirilir. Böylelikle, sanal bir "azalmayan güç akışı" elde edilir. (b) Elde edilen "sanal azalmayan güç akışı" esas alınarak, her ZD başında sanal olarak harmanlanan enerji miktarı, o ZD 'nde harcanır. Böylelikle, ZD 'leri boyunca azalmayan gönderi güçleri içeren \bar{P}_l bulunur.

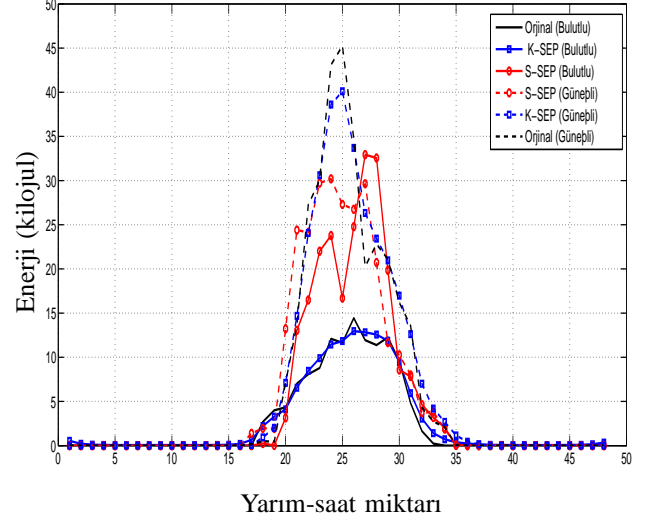
- 4) **Zaman dilimi atama:** $R_{nl} = W \log_2 \left(1 + \frac{q_n P_l}{N_o W} \right)$ iken, bir ZD 'nin GD n 'ye atanması durumunda, GD n 'ye gönderilecek olan bit sayısı şu şekilde ifade edilsin; $B_{nl} = R_{nl} T$. $l = 1$ ise o ZD , ZD içinde en yüksek veri hızına, R_{n1} , sahip olan kullanıcıya atanır. Daha sonraki ZD 'leri için ise şu kural uygulanır: Her ZD başında, $l \in \{2, \dots, K\}$ en yüksek β_l 'ya sahip olan kullanıcı belirlenerek, (GD n için, $\beta_n = B_{nl} / (\sum_{i=1}^l B_{ni})$ şeklinde hesaplanmaktadır.), tüm ZD bu kullanıcıya atanır. Eğer, birden çok kullanıcı aynı β_l 'yı paylaşıyorsa, o ZD kanalı en iyi olan GD 'ye atanır.
- 5) **Durdurma kriteri:** Bir sonraki ZD , m 'inci çizelgeleme periyodu'na ait ise 2) ile devam edilir. Değil ise, durulur.

V. SIMULASYON SONUÇLARI

Bu bölümde, makale kapsamında sunulan, K-SEP ve PTF-On algoritmalarının başarımını gösteren sonuçlar sunulmaktadır. Öncelikle, Bölüm III'de bahsedilen α_1 , α_2 ve β_1 değerleri kullanılarak K-SEP algoritması birçok simülasyonla test edilmiştir. Bu test için ortalama karesel hata (MSE) kullanılmış ve $\Gamma = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \tilde{x}_i)^2$ şeklinde hesaplanmıştır. Burada x ve \tilde{x} sırasıyla, gerçek ve öngörülen enerji miktarlarını temsil etmektedir. Γ günlük hesaplanmakta, bu sebeple de $M = 48$ olarak kullanılmaktadır. Şekil 1'de güneşli (G) ve bulutlu (B) iki gün için (12 ve 15/10/2009) günlük Γ 'ler kJ cinsinden gösterilmiştir. K-SEP'in ve S-SEP'in bir gün boyunca yaptığı tahminler yine Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil'den de görüldüğü üzere, K-SEP, S-SEP'e hem tahmin hem de Γ açısından üstünlük sağlamaktadır.

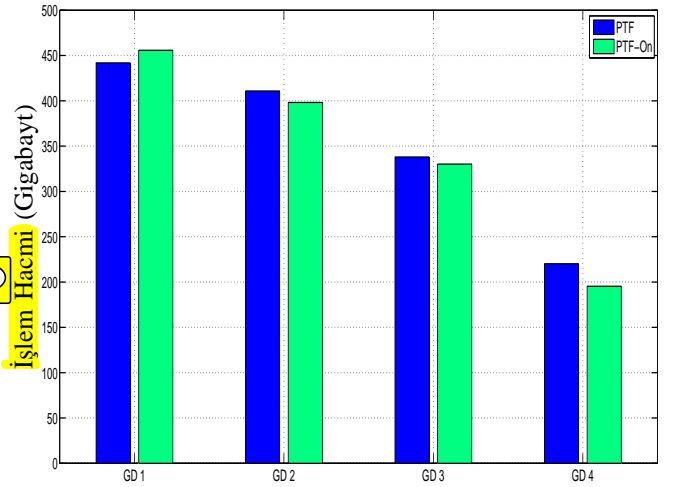
PTF-On'u test etmek için yaptığımız simülasyonlarda, bant genişliği ve gürültü için şu değerler kullanılır: $W = 10 \text{ MHz}$, $N_o = 10^{-19} \text{ W/Hz}$. Geniş bir Γ da dört adet KAA'nın ve dolayısıyla, dört adet GD 'nin olduğu düşünülmüştür. Bu GD 'lerinin yol kayıpları sırası ile 65, 72, 81 ve 98 dB'dir. Bu sistemde, önceden-bilgisiz PTF-On algoritmasının başarımı, önceden-bilgili PTF algoritmasının başarımı ile karşılaştırılmıştır. Bir hafta için, yani 09/10/2009 saat 12:00'den 16/10/2009 saat 12:00'ye kadar, 24 saatlik, yedi çizelgeleme periyodu boyunca testler yapılmıştır. Bu testlerde PTF-On'un önceden-bilgisiz olmasından kaynaklanan "yüzdeler amaç fonksiyonu kaybı", $U_{loss} = \frac{U_{PTF} - U_{PTF-On}}{U_{PTF}} \cdot 100$ ve "yüzdeler veri akışı kaybı", $Thr_{loss} = \frac{Thr_{PTF} - Thr_{PTF-On}}{Thr_{PTF}} \cdot 100$, ki burada $Thr = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^K \tau_{nt} W \log_2 \left(1 + \frac{q_n P_t}{N_o W} \right)$ olup, gigabayt cinsinden hesaplanmıştır. Günlük ortalama amaç fonksiyonu ve veri akışı kayıpları (bir haftalık süre içerisindeki tüm U_{loss} (Thr_{loss})'ların ortalaması) sırasıyla, % 0.138 ve % 2.557'dir.

$$\Gamma_{K-SEP}^G: 2.32, \Gamma_{K-SEP}^B: 0.28, \Gamma_{S-SEP}^G: 20.19, \Gamma_{S-SEP}^B: 32.36$$



Şekil 1. K-SEP ve S-SEP algoritmalarının, bulutlu ve güneşli günlerdeki başarım karşılaştırması

Bunun yanı sıra, GD 'lere ait günlük ortalama işlem hacimleri hem PTF hem de PTF-On algoritması için Şekil 2'de sunulmuştur. Bu sonuçlar, önceden-bilgisiz PTF-On algoritmasının başarımının, önceden-bilgili PTF algoritmasının başarımına çok yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. PTF ve PTF-On algoritmalarının başarım karşılaştırması

VI. SONUÇ

Bu makalede, güneş enerjisi ile beslenen bir baz istasyonu barındıran bir KAA yapısında, orantısız adil güç ve zaman paylaşımı problemi incelenmiştir. Yapılan çalışmanın amacı; çizelgeleme periyodu boyunca harmanlanıp baz istasyonunun kullanımına sunulacak olan enerji miktarlarını tahmin ederek, sunulan probleme yönelik en iyi önceden-bilgisiz (online) çözüme ulaşmaktır. Yapılan simülasyonlar ve elde edilen sayısal sonuçlar göstermektedir ki; bu makalede sunulan eş zamanlı enerji tahmin ve kaynak paylaşımı algoritmasının

(PTF-On) başarımı, optimal önceden-bilgili (offline) kaynak paylaşımının başarımına oldukça yakındır.

Bu makalenin devamında, önerilen algoritmanın başka enerji harmanlama yöntemleri (rüzgar, sarsıntı, vs.) ile kullanılacak şekilde geliştirilmesi planlanmaktadır.



KAYNAKÇA

- [1] J. L. Crassidis and J. L. Junkins, *Optimal Estimation of Dynamic Systems*. Abingdon: Chapman and Hall, 2004.
- [2] Q. Ling, Z. Tian, Y. Yin, and Y. Li, "Localized structural health monitoring using energy-efficient wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 11, pp. 1596–1604, nov. 2009.
- [3] Z. Mao, C. E. Koksal, and N. B. Shroff, "Resource allocation in sensor networks with renewable energy," in *IEEE ICCCN*, 2010, pp. 1–6.
- [4] —, "Near optimal power and rate control of multi-hop sensor networks with energy replenishment: Basic limitations with finite energy and data storage," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 57, no. 4, pp. 815–829, 2012.
- [5] D. K. Noh and K. Kang, "A practical flow control scheme considering optimal energy allocation in solar-powered wsns," in *Proceedings of 18th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, 2009, pp. 1–6.
- [6] J. L. Riquelme, F. Soto, J. Suardáaz, P. SÁnchez, A. Iborra, and J. Vera, "Wireless sensor networks for precision horticulture in southern spain," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 68, no. 1, pp. 25 – 35, 2009.
- [7] N. Sharma, J. Gummesson, D. Irwin, and P. J. Shenoy, "Cloudy computing: Leveraging weather forecasts in energy harvesting sensor systems," in *SECON'10*, 2010, pp. 136–144.
- [8] N. Tekbiyik, T. Girici, E. Uysal-Biyikoglu, and K. Leblebicioglu, "Proportional fair resource allocation on an energy harvesting downlink," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, (accepted for publication, Dec. 2012).
- [9] R. Zviedris, A. Elsts, G. Strazdins, A. Mednis, and L. Selavo, "Lynxnet: Wild animal monitoring using sensor networks." ser. *Lecture Notes in Computer Science*, P. J. Marrón, T. Voigt, P. I. Corke, and L. Mottola, Eds., vol. 6511. Springer, 2010, pp. 170–173.