

Altyapılı Bilişsel Radyo Ağlarında Çizelgeleme

Proje No: 109E256

Doç. Dr. Fatih Alagöz

1 Eylül 2012

İSTANBUL

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ.....	3
Özet	4
Abstract	5
Keywords: Cognitive radio networks, scheduling, resource allocation.GİRİŞ.....	5
GİRİŞ	6
GENEL BİLGİLER.....	8
GEREÇ VE YÖNTEM	8
BULGULAR	8
1.1 Çıkan iş oranını azamileştiren çizelgeleme problemi.....	8
1.2 Çizelgeleme gecikmesini asgarileştirme problemi	9
1.3 Azami-asgari açıdan adil çizelgeleme problemi.....	10
1.4 Orantısal Açıdan Adil Çizelgeleme Problemi	12
1.5 Çıkan iş oranı açısından tatmin olan İK sayısını azamileştirme problemi	17
1.6 Çıkan iş oranını azamileştirme problemine açık artırma teorisiyle çözüm	21
1.7 Frekans kanalını değiştirme maliyetini dikkate alan bir çizelgeleyici	25
1.8 Ortama Erişim Kontrolü Katmanında Algılama Planlaması	26
TARTIŞMA VE SONUÇ.....	29
KAYNAKÇA	34

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 Ortalama çıkan iş oranı ve Jain adillik değerleri.....	15
Şekil 2 Değişen sayıda İK için çizelgeleyicilerin başarımlar değerleri.....	16
Şekil 3 Önerdiğimiz algoritma sonuçları ile CPLEX sonuçlarının karşılaştırılması	23
Şekil 4 Değişen F ve a_i değerleri için önerdiğimiz algoritma sonuçları ile CPLEX sonuçlarının karşılaştırılması	23
Şekil 5 Değişen a_i ve F değerleri için önerdiğimiz algoritma sonuçları ile CPLEX sonuçlarının karşılaştırılması	24
Şekil 6 Bir zaman dilimi spektrum dinleme ve veri iletimi olmak üzere iki kısımdan oluşur.	26
Şekil 7 Spektrum boşlukları bulma başarımları (<i>Sensed</i> : Spektrum dinlemesi yapılan kanal sayısı, <i>Is idle</i> : Boş olan kanal sayısı , <i>Sensed Idle</i> : Durumu boş olup da dinlenmiş olan kanal sayısı, <i>Decided Idle</i> : Boş olduğunu karar verilen kanal sayısı, <i>Decide Idle and Is Idle</i> : Boş olduğunu karar verilen ve gerçekten boş olan kanal sayısı)	28
Şekil 8 Spektrum dinleme süresinin boş bulunan kanal sayısına etkisi.....	29

Özet

TÜBİTAK tarafından 109E256 Proje kodu ile desteklenen bu projede merkezi bilişsel radyo ağları için bir çizelgeleme çatısı öneriyoruz. Bu çatıdaki çizelgeleme algoritmaları ikincil kullanıcıların veri iletimine odaklanmakta ve merkezi bilişsel baz istasyonuna hangi frekans, zaman dilimi ve veri hızıyla iletim yapacaklarını belirlemektedir. Çizelgeleyicilerin ortak özellikleri merkezi bilişsel baz istasyonunun hizmet alanı içindeki birincil kullanıcıların rahatsız olmamalarını, ikincil kullanıcılar arasında çarpışma olmamasını ve ikincil kullanıcılar ile bilişsel baz istasyonu arasındaki iletişimin itimat edilebilir olmasını garanti etmeleridir.

Çizelgeleyicilerimiz birbirlerinden temel olarak amaç fonksiyonlarıyla ayrılmaktadır. Hücredeki ikincil kullanıcıların toplam iş oranını azamileştiren, ikincil kullanıcıların çizelgeleme gecikmesini asgarileştiren, azami-asgari, ağırlıklı azami-asgari ve orantısal açıdan adillik sağlayan, iş oranı açısından tatmin olan ikincil kullanıcı sayısını azamileştiren ve farklı frekans bantlarına geçişin farklı gecikme maliyetlerini dikkate alan çizelgeleyiciler öneriyoruz. Buluşsal algoritmalara ve benzetim çalışmalarına ek olarak aynı zamanda çizge teorisi tabanlı bir yaklaşım öneriyor, NP-zorluk ve yaklaşıklanamama sonuçları ispatlıyor ve polinom zamanlı çizge algoritmaları ile yaklaşıklama algoritmaları öneriyoruz. Son olarak, spektrum dinleme problemine ortama erişim katmanında odaklanıyor ve ikincil kullanıcıların mümkün olduğunca çok sayıda boş birincil kanalı bulabilmelerini amaçlayan bir işbirlikçi çok kanalda spektrum dinleme algoritması öneriyoruz.

Anahtar Kelimeler: Bilişsel radyo ağları, çizelgeleme, kaynak atama.

Abstract

In this project supported by the Turkish Science and Technology Foundation under the grant number 109E256, we presented a scheduling framework for centralized cognitive radio networks. Scheduling algorithms in this framework focus on the data transmission of the secondary users and determine with which frequency, time slot and data rate each secondary user will transmit to the cognitive base station. Common features of the schedulers are that all of them ensure that the primary users in the service area of the cognitive base station are not disturbed, no collisions occur among the secondary users, and reliable communication of the secondary users with the cognitive base station is maintained.

Our schedulers differ from each other mainly in terms of their objectives. We propose schedulers that maximize the overall cognitive radio cell throughput, minimize the average scheduling delay of the secondary users, provide max-min, weighted maxmin and proportional throughput fairness, maximize the number of secondary users that are satisfied in terms of throughput, and take the different delay costs of switching to different frequency bands into account. In addition to heuristic algorithms and simulation based studies, we also present a graph theoretic approach and prove several NP-hardness and inapproximability results, propose polynomial time graph algorithms as well as approximation algorithms. Finally, we focus on spectrum sensing at the medium access control layer and propose a cooperative sensing scheme in a multi channel environment that aims the discover as many idle primary channels as possible.

Keywords: Cognitive radio networks, scheduling, resource allocation.

GİRİŞ

Lisanslı spektrum bantları şu anda oldukça kısıtlı olmasına rağmen, kablosuz teknolojilerin mütemadiyen ilerlemesiyle radyo spektrumuna olan talep artmaktadır. Ancak yakın zamanda yapılan araştırmalar, lisanslı spektrum bantlarının çok azının (yaklaşık %15) gerçek anlamda kullanıldığını göstermektedir. Ayrıca, spektrum kullanımı bazı bantlarda çok yoğunken bazılarında çok seyrek. Bu verimsiz ve dengesiz spektrum kullanımı gerçek problemin spektrumun kendisinin sınırlı olması değil, var olan spektrum atama ve yönetim metotları olduğunu göstermektedir.

Bu verimsiz spektrum kullanımı, dinamik spektrum erişimi (DSE) olarak adlandırılan yeni iletişim paradigmaları üzerinde odaklanan araştırma çalışmalarını teşvik etmiştir. Bilişsel radyo kavramı ise DSE kavramını gerçekleyen teknolojidir. Zaman-uzamsal anlamda kullanılmayan spektrum boşluklarını fırsatçı bir şekilde kullanma fikri, bilişsel radyonun varoluş sebebini oluşturur.

Bir bilişsel radyo ağındaki (BRA) düğümler birincil (lisanslı) kullanıcılar ve ikincil lisanssız, (bilişsel) kullanıcılar olarak sınıflandırılabilir. Altyapılı bir BRA, ikincil baz istasyonundan (İBİ) ve bu İBİ tarafından yönetilen İK'lerden oluşur. Geleneksel altyapılı kablosuz ağlardaki (hücreli ağlar gibi) çizelgeleme yöntemleri, DSE kavramının kendine özgü özellikleri ve zorlukları nedeniyle BRA'da uygulanamazlar. Birincil kullanıcı (BK) aktivitesi nedeniyle değişen kanal uygunluğu ve BK'lerin İK'lerden bihaber olmaları gerekliliği, BRA için gereken çizelgeleme yöntemlerini geleneksel kablosuz ağlardakinden farklı kılar. Ayrıca, veri iletim kararlarına hakemlik etmeye ilave olarak, BRA'da ortama erişim kontrolü (MAC) protokolleri İK'ler arasındaki spektrum algılama kararlarını düzenlemek gibi kendine özgü bir işlevselliğe de sahip olmak zorundadır. Bu özgün tasarım güçlükleri, geniş kapsamlı bir MAC çerçevesinin tasarımını gerektirir.

Bu projede, altyapılı BRA için yeni bir MAC çerçevesinde pek çok çizelgeleme algoritması geliştirilmiştir. Analitik formülasyonların yanında, tüm çizelgeleyicilerin benzetim çalışmaları aracılığıyla karşılaştırmalı performans analizini de yapmıştır.

Geliştirilen çizelgeleyicilerin ortak özellikleri, hepsinin İBİ'nin servis alanı içerisindeki BK'lerin rahatsız olmamalarını, İK'ler arasında çarpışma olmamasını ve İBİ ile İK'ler arasında itimat edilebilir bir haberleşme olmasını garantilemeleridir. Ayrıca, bu gruptaki tüm çizelgeleyiciler İK'lere frekans, zaman dilimi ve veri iletim hızlarının atanmasını gerçekleştirir. Birbirlerinden temel farkları ise amaç fonksiyonlarıdır. Bu çizelgeleyicilerin temel amaçlarını şöyle özetleyebiliriz:

- Bilişsel radyo hücrendeki toplam çıkan iş oranını azamileştirmek
- İK'lerin ortalama çizelgeleme gecikmelerini asgarileştirmek
- İK'ler arasında çıkan iş oranı açısından azami-asgari adillik sağlamak
- İK'ler arasında çıkan iş oranı açısından orantısız adillik sağlamak
- Çıkan iş oranı açısından tatmin olan İK sayısını azamileştirmek
- Çıkan iş oranını azamileştirme problemini açık artırma teorisiyle verimli bir şekilde çözmek
- Farklı frekans bantlarına geçiş yapmanın farklı maliyetleri olmasını dikkate almak

Projede geliştirilen spektrum dinlenmesine odaklanan çizelgeleyici ise MAC katmanında spektrum algılaması planlarken her İK tarafından algılanacak kanalların kümesini ve algılama sırasını belirler. Geliştirdiğimiz yöntem bir işbirlikçi spektrum algılama mekanizmasıdır. Çalışmamızın başlıca ayırt edilebilen özelliği, yazındaki diğer MAC çerçevelerinden farklı olarak, İK'lerin hem veri iletimi hem de spektrum algılaması dönemlerini çizelgelemeyi inceliyor ve dolayısıyla da tam ve bütünsel bir MAC çerçevesi sağlıyoruz.

GENEL BİLGİLER

GEREÇ VE YÖNTEM

Projemizdeki bütün iş paketlerinde genel olarak problem bir eniyileme problemi olarak tanımlanmış ve bu problemin yapısı incelenmiştir. Kaynak atama problemleri çoğunlukla NP-zorlukta problemler olduğundan bu problemlerin çözümü yerine gerçek sistemlerde daha etkin bir şekilde tanımlanabilecek buluşsal yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerin en iyileme ile elde edilecek çözümü karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerin başarımları analizi için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Benzetim çalışmaları buluşsal yöntemlerin çözümü için Java, lineer eniyileme problemlerinin çözümü için ILOG CPLEX Java eklentisi, lineer olmayan problemlerin çözümü için Ziena KNITRO Solver kullanılmıştır. Çözümlerin görselleştirilmesi ve birtakım hesaplamalar için MATLAB yazılım aracı kullanılmıştır.

BULGULAR

1.1 Çıkan iş oranını azamileştiren çizelgeleme problemi

Bazı İK'ler kanal kaliteleri daha iyi olduğu için frekans kaynaklarından daha çok yararlanıp daha fazla çıkan iş oranına ulaşma şansına sahip olabilirler. Bu iş paketinde tasarladığımız çizelgeleyicinin amacı İK'lerin çıkan iş oranları toplamını azamileştirmektir. Bunu yaparken aynı zamanda merkezi bilişsel baz istasyonunun hizmet alanı içindeki BK'lerin rahatsız olmamalarını, ikincil kullanıcılar arasında çarpışma olmamasını ve ikincil kullanıcılar ile bilişsel baz istasyonu arasındaki iletişimin itimat edilebilir olmasını garanti etme gibi özelliklere de sahiptirler. Çıkan iş oranını azamileştiren çizelgeleme probleminin çözümü aşağıdaki ikili tamsayı doğrusal programlama probleminin çözümüyle eşdeğerdir:

$$\begin{aligned}
& \max \left(\sum_{i=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \frac{U_{if} X_{ift}}{T} \right) \\
& \quad s.t. \\
& \quad \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T X_{ift} \geq 1; \forall i \in \mathcal{N} \\
& \quad \sum_{i=1}^N X_{ift} \leq 1; \forall f \in \mathcal{F}, \forall t \in \mathcal{T} \\
& \quad \sum_{f=1}^F X_{ift} \leq a_i; \forall i \in \mathcal{N}, \forall t \in \mathcal{T}
\end{aligned}$$

Burada U_{if} değişkeni İK i 'nin f frekansını kullanarak çizelgeleme dönemindeki herhangi bir zaman diliminde en fazla kaç paket gönderebileceğini, yani azami veri iletim hızını belirten bir girdi değişkenidir. X_{ift} değişkeni ise İK i f frekansını kullanarak t zaman diliminde veri iletimi yapıyorsa 1'e, yapmıyorsa 0'a eşit olan bir ikili karar değişkenidir. Amaç fonksiyonu İK'lerin veri iletim hızları toplamını azamileştirmektedir. İlk kısıt ise her İK'ye en az bir zaman dilimi atanmasını sağlamaktadır. Bunun amacı herkese az da olsa bir miktar veri göndermek için bir şans vermek, daha doğrusu zamansal adilliği sağlamaktır. TCP gibi bazı üst katman protokolleri eğer kullanıcıdan belli bir süre boyunca hiç paket almazsa aradaki bağlantıyı kapatabilmektedir. Zamansal adillik kısıtımız böyle bir durumun oluşmasını engellemektedir. İkinci kısıtımız ise belli bir frekans ve zaman dilimine en fazla bir tane İK'nin atanmasını sağlamaktadır. Eğer birden fazla kullanıcı aynı frekansını kullanarak aynı anda baz istasyonuna veri gönderimi yaparsa, baz istasyonunda CDMA gibi bir sağıttık spektrum teknolojisi olmadığı için bu kullanıcıları birbirlerinden ayırt edemez, yani çarpışma olur. Son kısıtımız ise belli bir zaman diliminde belli bir kullanıcıya o kullanıcının anten sayısından (a_i) daha fazla frekans atanmasını engellemektedir. Her kullanıcı (İK) belli bir anda belli bir antenini en fazla bir frekansa ayarlayabilmektedir. Dolayısıyla belli bir zaman dilimi için belli bir kullanıcıya anten sayısından daha fazla frekans atamanın bir anlamı yoktur; çünkü zaten o frekansların hepsini kullanamayacaktır.

1.2 Çizelgeleme gecikmesini asgarileştirme problemi

Bir kullanıcıya çizelgeleyici tarafından belli bir çizelgeleme döneminde veri iletimi yapması için karar verildiği halde bu çizelgeleme dönemindeki her zaman diliminde veri iletimi yapma kararı verilmemiş olabilir. Mesela kullanıcı ilk iki zaman diliminde hiç veri göndermeyecek, ancak üçüncü zaman diliminde veri gönderecek olabilir. Bunun sebebi ortama çoklu kullanıcı ve çoklu frekanslı bir şekilde erişilmesidir; yani ilk iki zaman diliminde diğer İK'lerin kullanımı için karar verilmiş olabilir. Buna “çizelgeleme gecikmesi” diyoruz. Aşağıdaki amaç fonksiyonu çizelgeleme gecikmesini asgarileştirmektedir:

$$\min \left(\frac{\sum_i \sum_f \sum_t t U_{if} X_{ift}}{\sum_i \sum_f \sum_t U_{if} X_{ift}} \right)$$

Buradaki pay değeri paketlerin bekleme süresini ifade etmektedir. Eğer $X_{ift}=1$ ise o zaman U_{if} tane paketin her biri t zaman dilimi bekliyor demektir. Payda değeri ise gönderilen toplam paket sayısını ifade etmektedir. Yani amaç fonksiyonu, ortalama olarak bir paketin ne kadarlık çizelgeleme gecikmesini uğradığını ifade etmekte ve bu gecikme miktarını asgarileştirmektedir. Mesela U_{if} değeri fazla olan kullanıcıları mümkün olduğu kadar erken zaman dilimlerine, az olanları ise daha sonraki zaman dilimlerine atamak ortalama çizelgeleme gecikmesi açısından mantıklıdır.

Bu problem öncelikle formüle edilip performans analizi yapılmış, ardından da genetik algoritma tabanlı çözümler önerilmiştir. Aşağıdaki yayınlarda detaylı bir şekilde incelenmiştir:

- D.Gözüpek, F.Alagöz, "Throughput and delay optimal scheduling in cognitive radio networks under interference temperature constraints", *Journal of Communications and Networks JCN*), vol.11, no.2, pp.147-155, 2009.
- D.Gözüpek, F.Alagöz, "Genetic algorithm-based scheduling in cognitive radio networks under interference temperature constraints", *Wiley's International Journal of Communication Systems IJCS*), vol.24, no.2, pp.239-257, 2011.

1.3 Azami-asgari açıdan adil çizelgeleme problemi

Eğer çizelgeleyicinin amacı toplam çıkan iş oranını azamileştirmek ise, bazı İK'lere karşı adil davranmamış olabilir. Mesela kanal durumu iyi olan bazı kullanıcılar mütemadiyen kaynakların pek çoğuna erişirken kanal duruu kötü olanların çıkan iş oranı çok düşük olabilir. Eğer bilişsel baz istasyonu İK'lere karşı adil olmayı amaçlıyorsa bu adilliği sağlayan çizelgeleyiciler kullanılmalıdır.

Azami-asgari açıdan adil çizelgeleyicinin amacı, çıkan iş oranı en az olan İK'nin çıkan iş oranını azmaileştirmektir. Yani pratikte herkesin çıkan iş oranını olabildiği kadar birbirine yakın yapar. Aniden bir BK'nın spektrumu kullanmaya başlayıp daha sonra kaybolması ya da kanal kalitesinin geçici süreliğine bozulması gibi nedenlerle İK'nin çıkan iş oranı geçici süreliğine çok düşük olabilir. Eğer çizelgeleyici yakın geçmişteki çıkan iş oranı miktarlarını da dikkate alırsa bu geçici kayıpları telafi edebilir. Bu bağlamda, en son ϕ çizelgeleme dönemi boyunca İK i 'nin toplanmış ortalama çıkan iş miktarını R_{ϕ}^i ile ifade edelim. R_{ϕ}^i 'nin değeri "paket/zaman dilimi"dir. Tüm İK'ler için R_{ϕ}^i değerleri en başta 0'a eşittir. Üssel olarak

ağırlıklandırılmış alçak geçiren süzgece dayalı olan $\overline{R}_\varphi^i$ değerini ise aşağıdaki gibi tanımlayalım:

$$\overline{R}_\varphi^i = (1 - \frac{1}{\min(k, \varphi)})R_\varphi^i + \frac{1}{\min(k, \varphi)} \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T U_{if} X_{ift}}{T}$$

Burada $\frac{\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T U_{if} X_{ift}}{T}$ değeri İK i'nin şu anki çizelgeleme dönemi olan k'daki çıkan iş oranına denk gelmektedir; $\frac{1}{\min(k, \varphi)}$ ise verilen ağırlıktır. Öte yandan, $(1 - \frac{1}{\min(k, \varphi)})$ değeri ise R_φ^i 'e verilen ağırlığı ifade etmektedir. Üssel olarak ağırlıklandırılmış filtre kullanmak bize şu ana daha yakın olan çizelgeleme dönemlerine daha çok, uzak olanlara ise daha az önem (ağırlık) verme imkanı tanımaktadır. Her çizelgeleme dönemi k'dan sonra R_φ^i 'nin değeri $R_\varphi^i \leftarrow \overline{R}_\varphi^i$ olarak güncellenmektedir. Belli bir çizelgeleme dönemi için hem k hem de φ değerleri sabit olduğu için bundan sonra $\min(k, \varphi)$ yerine φ ifadesini kullanacağız.

Bu bağlamda amaç fonksiyonu değiştirilip yeni bir kısıt eklenerek azami-asgari açıdan adillik sağlanabilir. Aşağıdaki amaç fonksiyonu ve yeni kısıt, çıkan iş oranını azamileştiren çizelgeleme problemiyle birleştirildiğinde oluşan karma tamsayı doğrusal program, azami-asgari açıdan adil çizelgeleyicimizi ifade eder:

$$\begin{aligned} & \max Z \\ & s.t. \\ & Z \leq (1 - \frac{1}{\varphi})R_\varphi^i + \frac{1}{\varphi} \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T U_{if} X_{ift}}{T} \end{aligned}$$

Bu projede, aynı zamanda “ağırlıklı azami-asgari açıdan adil çizelgeleyici” de tasarladık. Bazı pratik durumlarda bilişsel baz istasyonu operatörü farklı İK'lere farklı servisler vermek isteyebilir. İK'lere verilen öncelikleri her İK'ye bir “hedef ağırlık” vererek nitelendirebiliriz. Bir İK'nin hedef ağırlığı ne kadar fazlaysa, çizelgeleme esnasındaki frekans ve zaman dilimi atamasında o İK'ya baz istasyonu tarafından o kadar çok iltimas gösteriliyor demektir. $0 \leq \eta_i \leq 1$ ve $\sum_{i=1}^N \eta_i = 1$ olacak şekilde η_i değeri İK i'ye verilen hedef ağırlığı temsil eder. Ağırlıklı azami-asgari açıdan adil çizelgeleyicinin amacı, her İK'nin çıkan iş miktarının toplam çıkan iş miktarına olan oranının o İK'nin η_i değerine mümkün olduğu kadar yakın olmasını sağlamaktır. Bu bağlamda, azami-asgari açıdan adil çizelgeleyici değiştirilerek ve yine toplam çıkan iş oranını azamileştiren çizelgeleyicideki tüm kısıtlar kullanılarak ağırlıklı azami-asgari açıdan adil çizelgeleyici aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\begin{aligned}
& \max Z' \\
& s.t. \\
& Z' \leq \frac{(1 - \frac{1}{\varphi})R_{\varphi}^i + \frac{1}{\varphi} \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T U_{if} X_{ift}}{\eta_i}
\end{aligned}$$

Toplam çıkan iş oranını azamileştiren, azam-asgari açıdan adil, ağırlıklı azami-asgari açıdan adil ve Bölüm 1.3'te bahsedilen orantısal açıdan adil çizelgeleme problemlerinin karşılaştırmalı performans analizlerini yapıp dergi makalesi olarak göndermiş bulunmaktayız:

- D.Gözüpek, F.Alagöz, “A fair scheduling framework for centralized cognitive radio networks”, submitted for journal publication.

1.4 Orantısal Açıdan Adil Çizelgeleme Problemi

Her İK'nin toplam çıkan iş oranından önceden belirlenmiş oranları kadar pay almalarını sağlama kavramına “orantısal açıdan adalet” denir. Orantısal adalet kavramı sistemdeki kullanıcıların memnuniyeti ve sistemin kazancı arasında bir denge sağlamaya çalışır. Bir veri hızı ataması için herhangi başka bir tatbik edilebilir (feasible) veri hızı ataması yapıldığında orantısal değişimlerin toplamı pozitif değilse *orantısal açıdan adildir* denir. Buna göre, orantısal açıdan adalet veri hızlarının logaritmalarının toplamını en iyileyerek sağlanır. İK'ler arasında orantısal adalet sağlama amacıyla birlikte BK'leri rahatsız etmeme ve İK'lerle İBİ arasında itimat edilebilir bir haberleşme sağlama kısıtlarına sahip olan bir çizelgeleyici tasarlamak bu iş paketimizin amacıdır. Orantısal açıdan adil çizelgeleme problemini şu şekilde ifade edebiliriz:

$$\begin{aligned}
& \max_{\underline{u}_t, \underline{f}_t} E \left\{ \sum_{i=1}^N u_{it} \right\} \\
& s.t. \\
& P_{rjt}^f \leq P_{IF_{max}}^{fj}; \forall j \in \Phi_{CBS}^{ft}, \forall f \in \mathcal{F} \\
& u_{it} = B \times \frac{T_s}{S} \times \ln \left(1 + \frac{P_{rCBS}^{ift}}{\zeta} \right); \forall i \in \mathcal{N} \\
& f_{it} \neq f_{i't}; \forall i, i' \in \mathcal{N}, i \neq i' \\
& u_{it} \leq x_{it}; \forall i \in \mathcal{N}
\end{aligned}$$

Tablo 1'de kullanılan semboller ve açıklamaları görülmektedir.

Tablo 1: Semboller ve açıklamaları

$\mathcal{F} = \{1, 2, \dots, F\}$	Frekans kümesi
$\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$	İKların kümesi
$P_{IF_{max}}^{fj}$	f frekansı için j BK tarafından tolere edilebilir maksimum enterferans gücü
$P_{r_j}^{ft}$	t zaman diliminde j BK tarafından f frekansında alınan sinyalin gücü
Φ_{CBS}^{ft}	t zaman diliminde CBS yani bilişsel baz istasyonun kapsamında bulunan ve f frekansını aktif olarak kullanan BKların kümesi
$P_{r_{CBS}}^{ift}$	CBS'in t zaman diliminde f frekansında i İKsının iletildiği sinyali alma gücü
B	Bir frekans kanalının bant genişliğini
S	Paket boyu (bit/paket)
T_s	Zaman diliminin uzunluğu (saniye/zaman dilimi)
σ^2	Gürültünün gücü
R_{φ}^i	i İK sınıfının son φ çizelgeleme dönemindeki toplam ortalama çıkan iş (throughput) (paket/zaman dilimi)

İK i için son çizelgeleme dönemindeki toplam ortalama çıkan iş miktarını gösteren R_{φ}^i değerini her zaman dilimi sonunda güncellemek için üstel ağırlıklandırılmış alçak geçirgen filtre içeren aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$R_{\varphi}^i \leftarrow (1 - \frac{1}{\varphi})R_{\varphi}^i + \frac{1}{\varphi} \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T U_{if} X_{ift}}{T} .$$

Yukarıdaki formülasyonu esas problemimizde yerine koyduğumuzda orantısal açıdan adillik sağlayan çizelgeleme problemimizi aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$\max \left(\sum_{i=1}^N \log \left((1 - \frac{1}{\varphi})R_{\varphi}^i + \frac{1}{\varphi} \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T U_{if} X_{ift}}{T} \right) \right) \\ s.t.$$

$$\begin{aligned}
\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T X_{ift} &\geq 1; \forall i \in \mathcal{N} \\
\sum_{i=1}^N X_{ift} &\leq 1; \forall f \in \mathcal{F}, \forall t \in \mathcal{T} \\
\sum_{f=1}^F X_{ift} &\leq a_i; \forall i \in \mathcal{N}, \forall t \in \mathcal{T}
\end{aligned}$$

Tanımladığımız bu tamsayı program, problem formülasyonundan da görüleceği gibi objektif fonksiyonu içerdiği logaritmadan kaynaklı linear kısıtlar ile sınırlandırılmış linear olmayan konkav bir fonksiyonu eniyilemeye çalışır. Bu ailedeki problemlerin çözümü için yazında farklı yaklaşımlar mevcuttur (Hemmecke 2010, Quesada 1992). Biz çalışmamızda linear olmayan bu problemin çözümü için KNITRO (KNITRO) kullandık ve başarımlarını incelemesini gerçekleştirdik. Başarımlarını değerlendirmelerimizin bir özetini aşağıda sunacağız.

Sistem Modeli

600 metre yarıçapında kapsama alanına sahip bir baz istasyonunda çalışan çizelgeleme algoritmasının başarımlarını değerlendirmesini yapacağız. Benzetim çalışmalarını Java ile yazdığımız benzetim aracında gerçekleştirdik. 5000 çizelgeleme dönemi için U_{if} değerlerini hesapladık ve çıkan iş oranını eniyileme, azami-asgari adil ve ağırlıklı azami-asgari çizelgeleyicileri CPLEX optimizasyon aracı kullanarak problemimizi çözdük. Orantısız adil çizelgeleyici problemi ise linear olmayan problem olduğundan çözümü için KNITRO kullanıldı.

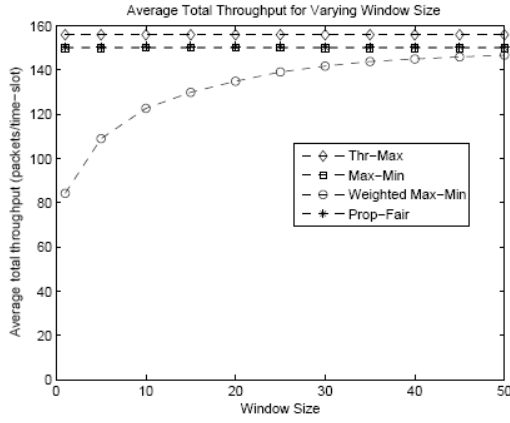
Her çizelgeleme dönemi 10 zaman diliminden oluşmakta ve her zaman dilimi 100 ms sürmektedir. IEEE 802.22 standardına göre her İK bir bandı en fazla 2 saniye içinde boşaltmak zorunda olduğundan biz $100 \text{ ms} \times 10 = 1$ saniyelik çizelgeleme dönemini dikkate aldık. İlk İK ve BK lokasyonları gelişigüzel (random) dağıtılmakta ve rasgele hareketlilik modeline göre lokasyonlar güncellenmektedir. İstatistiki olarak İK sayısı, BK sayısı, frekans sayısı, hız değerleri incelenmiş, ve en etkili parametre değerleri/kombinasyonları dikkate alınarak başarımların analizi gerçekleştirilmiştir. Her değişkenin düşük ve yüksek olarak adlandıracağımız iki değerini incelemek istersek faktöryal tasarıma göre toplam 26 yani 64 tane farklı kombinasyon bulunmaktadır. ANOVA analizine göre İK sayısı ve BK sayısı temel parametreler olarak belirlenmiştir.

Başarımların Değerlendirmeleri

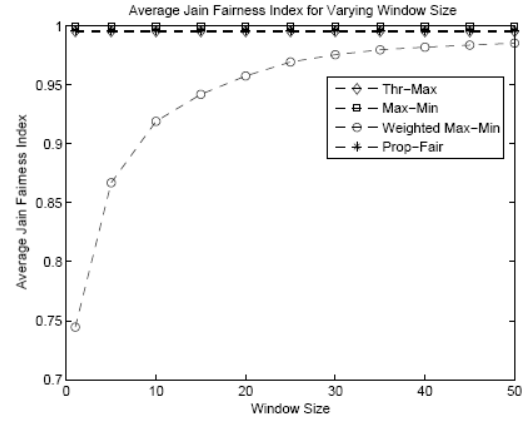
Adillik kavramsal olarak farklı şekillerde tanımlansa da (fayda bazlı veya zaman-paylaşım bazlı) biz fayda fonksiyonu olarak alıyoruz ve adillik metriği olarak *Jain adillik* metriğini kullanıyoruz. İK i'nin fayda değeri (yani çıkan iş oranı) θ_i olsun. Bu durumda Jain değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{Jain değeri: } \frac{(\sum_{i=1}^N \theta_i)^2}{N \times \sum_{i=1}^N \theta_i^2}$$

Kabaca, Jain değeri sistemdeki kaynak atamasından memnun olanların oranını veriyor diyebiliriz. Yani 1 değerine yakın bir Jain değeri adil bir sisteme işaret ederken 0 değerine yakın bir sistem adil olmayan bir sisteme karşılık gelir.



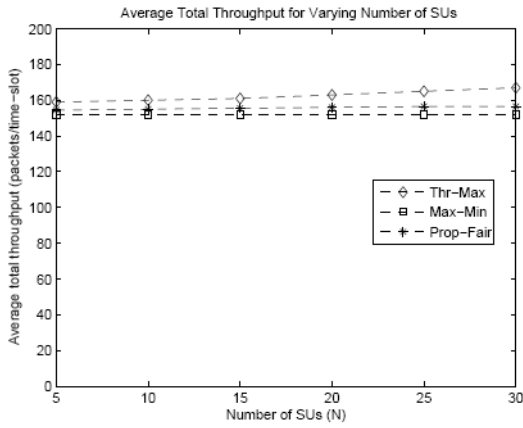
(a) Average total throughput.



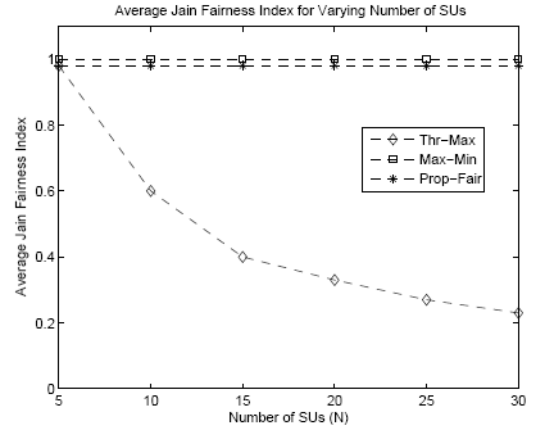
(b) Average Jain fairness index.

Şekil 1 Ortalama çıkan iş oranı ve Jain adillik değerleri

Pencere büyüklüğü olarak adlandırdığımız değişkenimiz her bir kullanıcıya ait en son kaç değeri kullanacağımızı belirlemektedir. Yukarıdaki şekilde de verildiği gibi çıkan iş oranını en iyileyen çizelgeleyici en yüksek ortalama çıkan iş oranına sahiptir. Diğer adillik kıstasına sahip çizelgeleyicilerin ise adillik dikkate aldıkları pencere boyutuna göre başarımları gösterilmektedir. Orantısal ve azami-asgari çizelgeleyicilerin de iş oranı açısından maksimum değerlere yakın olduğu görülmektedir. Jain değerlendirmesine göre de ağırlıklı azami-asgari çizelgeleyici diğerlerinden düşük olmakla birlikte yine de yüksek bir indekse sahiptir. Artan pencere boyutu ile adillik başarımları da artmaktadır.



(a) Average total throughput.



(b) Average Jain fairness index.

Şekil 2 Değişen sayıda İK için çizelgeleyicilerin başarımlar değerleri

Şekil 2’de artan İK sayısı için başarımlar değerleri gösterilmektedir. Ağırlıklı azami-asgari çizelgeleyici şekilde gösterilmemektedir, çünkü her İK değeri için hedeflenen ağırlıklar belirlenmelidir ve bu durumda çizelgeleyiciler karşılaştırılabilir değildir. Bununla birlikte kullanıcı sayısı arttıkça hedeflenen ağırlıklar çok küçülmekte ve bu durumda adillik ve çıkan iş oranını doğru bir şekilde değerlendirmek güçleşmektedir. Bilindiği gibi kullanıcı sayısı arttıkça kullanıcı çeşitliliği artmaktadır ve bu durumda kanal durumunun en iyi değeri artmaktadır. Böylece çıkan iş oranını en iyileyici çizelgeleyici başarımlar bir miktar artmaktadır. Ancak bu durumda Jain adillik değeri azalmaktadır. Yani çıkan iş oranını artırma ve adillik sağlama objektifleri çatışan objektifler olarak ortaya çıkmaktadır. Azami-asgari çizelgeleyicinin amacı kullanıcılar arasında bir denge sağlamak olduğundan çıkan iş oranı açısından diğerlerine göre daha düşüktür. Ancak beklenildiği gibi adillik açısından en yüksek değere sahiptir. Orantısal açıdan adil çizelgeleyici ise çıkan iş oranı ve kişisel İK çıkan iş oranları arasında bir denge kurmaya çalışmaktadır. Çıkan iş oranı ve adillik değerleri diğer iki çizelgeleyicinin başarımlar değerleri arasındadır.

Özetlemek gerekirse çıkan iş oranını en iyileyen, azami-asgari adil, ağırlıklı azami-asgari adil ve orantısal açıdan adil çizelgeleyicilerin çıkan iş oranı ve adillik değerlerinin artan İK ve artan frekans sayısı altında incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Adillik perspektifi olan çizelgeleyiciler geçmişteki başarımlar değerlerini pencere olarak adlandırdığımız belirli bir zaman dilimi boyunca dikkate alarak kaynak ataması yapmaktadır ve çıkan iş oranını en iyileyen yani fırsatçı bir mekanizmadan adillik açısından daha iyi başarımlar göstermekte ancak çıkan iş oranı açısından bir miktar daha düşük değerler vermektedir.

Tasarladığımız çıkan iş oranını en iyileyen, azami-asgari adil, ağırlıklı azami-asgari adil ve orantısal açıdan adil çizelgeleyicileri karşılaştırmalı performans analizleriyle birlikte dergi makalesi olarak göndermiş bulunmaktayız:

- D.Gözüpek, F.Alagöz, “A fair scheduling framework for centralized cognitive radio networks”, submitted for journal publication.

Ayrıca, bu çizelgeleyicileri çizge teorisi ve kestirim algoritmaları açısından da kapsamlı olarak inceledik. Çıkan iş oranını eniyileyen çizelgeleyici için polinom zamanlı optimum bir algoritma önerdik; diğer çizelgeleyicilerin ise güçlü anlamda NP-zor (NP-hard in the strong sense) olduğunu ispatladık. Ayrıca bu problemlerin çok özel hallerinin bile kestirim algoritmaları açısından zor olduğunu, yani iyi sonuçlar veren kestirim algoritmalarının bulunamayacağını ispatladık. Bazı daha özel haller içinse sadece o özel durumlar için geçerli olabilecek kestirim algoritmaları önerdik. Bu teorik çalışmayı ise IEEE/ACM Transactions on Networking dergisine göndermiş bulunmaktayız:

- D.Gözüpek, M.Shalom, F.Alagöz, “A graph theoretic approach to scheduling in cognitive radio networks”, submitted to *IEEE/ACM Transactions on Networking*.

1.5 Çıkan iş oranı açısından tatmin olan İK sayısını azamileştirme problemi

Bilişsel radyo ağlarında yararlı çizelgeleme algoritmaları, kanal şartlarındaki değişimlerinden ve birincil kullanıcıların spektral etkinliklerinden faydalanarak kaynakları paylaştırır. Ancak çizelgeleme algoritmalarının birçoğu kişi başına düşen iş oranı gereksinimini göz ardı eder. Bu çalışmada, İş oranı Açısından Tatmin Olmuş İK Sayısını Azamileştirme (TOKSA) çizelgesi problemini formüle ettik. Bu problem, bir merkezi bilişsel radyo ağında iş oranı açısından tatmin edilmiş ikincil kullanıcıların sayısını azamileştirir. TOKSA'nın NP-zorlukta olduğunu $P = NP$ olmadığı takdirde 2'den daha iyi herhangi bir sabit faktörde yaklaşıtılamayacağını gösterdik. Ayrıca, TOKSA'nın en az AAÇ (Azami-Asgari Adil Çizelgeleyici-MMFS) problemi kadar- literatürde hesaplama bakımından çok zor bir problem olduğu önceden ispat edilmiştir- zor olduğunu ispat ettik. En İyi İlk Kaynak Ataması (BFRA-Best First Resource Assignment) ve Parçalı Geri-İzsürme ile Kaynak Ataması (RAPB-Resource Assignment With Partial Backtracking) isimli iki sezgisel algoritma öne sürdük. Öne sürdüğümüz algoritmaların düşük hesaplama karmaşıklığına erişirken, aynı zamanda yüksek performans sergilediğini gösterdik.

Problem Formülasyonu

Proje önerisinde iş oranı açısından tatmin olan İK sayısını azamileştirme problemini optimizasyon problemi olarak ifade etmiştik. Bu çalışma döneminde ise önceki formülasyonumuzu doğrusal bir tamsayı programına çevirdik. Formülasyonu bu şekilde ifade edebilmemiz bize CPLEX gibi benzetim araçlarını kullanabilme yetisini kazandırdı. Dolayısıyla optimum sonucun nerede olduğunu kesin olmamakla birlikte kesine çok yakın bir şekilde bulabiliriz. Doğrusal tamsayı programımız aşağıdaki şekildedir:

$$\begin{aligned}
& \max \left(\sum_{i=1}^N s_i \right) \\
& \text{s.t.} \\
& \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \frac{U_{if} X_{ift}}{T} \geq \Omega_i^{\min} \times s_i, \forall i \in N \\
& \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T X_{ift} \geq 1; \forall i \in N \\
& \sum_{i=1}^N X_{ift} \leq 1; \forall f \in F, \forall t \in T \\
& \sum_{f=1}^F X_{ift} \leq a_i; \forall i \in N, \forall t \in T
\end{aligned}$$

Burada $\Omega_i^{\min}$ değeri ikincil kullanıcı i'nin asgari çıkan iş oranı gerekliliğini ifade etmektedir. s_i ise ikincil kullanıcı i'nin tatmin olup olmadığını gösteren ikili bir değişkendir. Amaç fonksiyonu tatmin olan kullanıcı sayısını azamileştirmektedir. İlk kısıt ise s_i değişkeninin değeri 1 olduğunda i'nin çıkan iş oranı değerinin asgari gerekliliğinden fazla olmasını sağlamaktadır. Eğer s_i değişkeninin değeri 0 ise o zaman bu kısıtın anlamı kalmamaktadır. Geri kalanlar ise önceki tanımlamalarımızda var olan kısıtların aynısıdır.

Hesaplama Karmaşıklığı

Yaklaşım (Approximation) Algoritmaları: II bir azamileştirme algoritması olsun ve $p \geq 1$ olsun. II'nin bir örneği olan I'nın uygun çözümü olan s, eğer objektif fonksiyon değeri ($O_{II}(s)$), I'nın en iyi objektif fonksiyon değeri olan $O_{II}^*(s)$ 'in en az p faktörü ise, bir p-yaklaşımıdır (p-approximation). ALG algoritması; eğer II'nin her bir örneği olan I için p-yaklaşımı döndürüyorsa, azamileştirme algoritması II için bir p-yaklaşım algoritmasıdır. II problemi, eğer bu problem için polinom-zamanlı bir p-yaklaşım algoritması varsa, p-yaklaşılabilir. II problemi; eğer bu problem için polinom-zamanlı bir p-yaklaşım algoritması yoksa, P=NP olmadığı takdirde, p-yaklaşılabilir. Azamileştirme problemi II 'den, azamileştirme problemi II' 'ye oran korumalı yaklaşım indirgemesi bir çift f,g algoritmalarıdır, öyle ki; a) f, II'nin her bir örneği için I'yi, II'nin örneği olan I' = f(I)'ya çevirir. b) g ise I = f(I)'nın her p-yaklaşımı s'yi I'nın bir p-yaklaşımı olan g(s)'ye çevirir. Bunu şu şekilde gösteriyoruz: $II \leq APX II'$. Yaklaşık koruma indirgemesinde eğer $II \leq APX II'$ ve $II' \leq APX II$ sağlanıyorsa, II ve II' eşittir.

Kutu Kaplama (Bin Covering) problemi: Kutu kaplama problemi, kutu paketleme probleminin basit bir versiyonudur. $c_1, c_2, \dots, c_n \in (0,1]$ boyutlu n tane cisim veriliyor, açılan kutuların sayısını maksimize etmeye çalışıyoruz öyle ki her kutunun içindeki cisimlerin toplamı en az 1 olsun (Assmann, 1984). Kutu kaplama problemi P=NP olmadığı takdirde 2'den daha iyi herhangi bir katsayı ile yaklaştırılmaz. Bu sonuç, cisimlerin totali 2 olan örneklerinin ayırma (partition) problemini çözeceği kutu kaplama problemleri için uygulanan 2-yaklaşımli algoritma gözlemine dayanmaktadır.

Azami-Asgari Adil Çizelgeleyici Problemi: (AAAC) Bundan önceki çalışmamızda (Gözüpek, 2011c) aşağıdaki ILP problemini formüle etmiştik:

$$\max Z'$$

$$Z' \leq \sum_{i=1}^N \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T U_{if} X_{ift}$$

Objektif fonksiyon ve hemen altındaki sınır birlikte, en az iş oranına sahip olan İK'nin çıkan iş oranı değerini azamileştirir. Eğer $U_{i'f} = U_{i''f} \forall i' \neq i''$ ve $i', i'' \in N$ ise, o zaman U_{if} yerine U_f kullanabiliriz. $T = 1$, $a_i \geq F$, $U_{if} \in \{0, U_f\}$ ve her f frekansı en fazla iki İK için sıfır olmayan bir U_f değerine sahipken AAAC'nin $P=NP$ olmadığı takdirde 2'den daha iyi bir katsayı faktörü ile yaklaşımlandırılmayacağını (Gözüpek, 2011c)'te göstermiştik. Ayrıca aynı çalışmamızda AAAC'nin çok özel durumlarının kuvvetli sezgilerle NP-Hard olduğunu da göstermiştik.

Teorem 1. KUTU KAPLAMA $\leq$ APX TOKSA.

İspat: KUTU KAPLAMA'nın TOKSA'nin özel bir durumu olduğunu şu şekilde gösterebiliriz: $U_{if'} = U_{if''} \forall f' \neq f''$ ve $f', f'' \in F$; ör., belirli bir i 'a denk gelen her f için U_{if} değerleri aynıdır. Diğer bir deyişle, U_{if} yerine U_i kullanalım. $c_i = \frac{U_i}{\Omega_i} \leq 1$ olsun. Ayrıca $T = 1$ ve $a_i \geq F$, $\forall i \in N$ olsun. Bu özel durum, İK'lerin kutulara karşılık geldiği ve c_i değerlerinin de cisim boyutuna karşılık geldiği KUTU KAPLAMA'ya denk gelmektedir.

Sonuç (Corollary) 1. (Assmann, 1984) TOKSA kuvvetli sezgilerle NP-Hard'dır.

Sonuç (Corollary) 2. (Jansen, 2002) TOKSA $P = NP$ olmadığı takdirde 2'den daha iyi bir katsayı faktörü ile yaklaşımlanamaz.

Teorem 2. AAAC, TOKSA'yı polinom zamana indirger.

İspat: TOKSA için polinom zamanlı bir A algoritmamız olduğunu varsayalım. A algoritmasını AAAC'yi, polinom zamanda çözmek için şu şekilde kullanabiliriz: Ω_{MMFS}^{UB} , AAAC'nin sonucu için üst sınır olsun. İlk tahminimizi, bu üst sınıra eşitleyebiliriz; ör., $\Omega_i = \Omega_{MMFS}^{UB} \forall i \in N$ ve A algoritmasını çalıştırırız. Eğer sonuç N 'ye eşitse, o zaman AAAC için sonuç Ω_{MMFS}^{UB} 'e eşit demektir. Değilse, 0 ve Ω_{MMFS}^{UB} arasında ikili arama yapabiliriz, ve tahminimizin doğru olup olmadığını kontrol etmek için A algoritmasını çalıştırabiliriz. Böylece, A algoritmasını kullanarak polinom zamanda AAAC için en iyi değeri bulabiliriz.

Sonuç (Corollary) 3. TOKSA en az AAAC kadar zordur.

Öne Sürülen Algoritmalar

1) En İyi İlk Kaynak Ataması (BFRA-Best First Resource Assignment)

EİKA'nın amacı TOKSA problemi için hesaplama bakımından etkili bir çözüm geliştirmektir. EİKA TOKSA için uygulanabilir sonuç geliştirirken, tatmin olmuş kullanıcı sayısı ve iş oranı bakımından yeterliliği sağlamaktadır. İlk amaç tatmin olmuş kullanıcı sayısını yüksek tutmakken, ikinci amaç yüksek iş oranına ulaşmaktır.

AŞAMA 1: FxZ sayıda $FZKİ_{fz}$ (frekans ve zaman kaynak ikilisi) üret. Her bir İK için, kullanılabilir $FZKİ$ 'ler içinden maximum W_{ixy} 'ye sahip olan $FZKİ_{xy}$ bul ve ata. PN_i 'yi $PN_i \leftarrow PN_i - W_{ixy}$ şeklinde güncelle. $PN_i \leq 0$ ise bu İK'yi tatmin olmuş olarak işaretle. Her İK'ye bir $FZKİ$ atandığında, geriye kalan $(FxZ) - N$ sayıdaki $FZKİ$ 'yi, KK(kaynak kuyruğu)'ya ekle.

AŞAMA 2: Kuyruğun en başındaki $FZKİ$ 'yi çıkar. Buna $FZKİ_{fz}$ diyelim. z zaman aralığı için kullanılabilir antene sahip olan tatmin olmamış İK'leri ara. Eğer böyle bir İK yoksa $FZKİ$ 'yi FKK (fazla kaynak kuyruğu)'na koy. Eğer böyle bir İK varsa, D_{ifz} 'si minimum olan İK i'yi bul ve PN_i 'yi $PN_i \leftarrow PN_i - W_{ixy}$ şeklinde güncellerken, İK i'ye $FZKİ_{fz}$ 'yi ata. Eğer $PN_i \leq 0$ ise, İK i'yi tatmin olmuş olarak işaretle. Eğer KK boşsa veya bütün İK'lar tatmin olmuş ise, Step 3'e git, değilse Step 2'yi tekrar et.

AŞAMA 3: FKK'daki her $FZKİ$ için tatmin olmuş İK ara. bu $FZKİ$ ile ilişkilendirilmiş zaman aralığında kullanılabilir antene sahip olan İK'lardan maximum ağırlığı olan $FZKİ$ 'yi ara.

2) Parçalı Geri-İzsürme ile Kaynak Ataması (RAPB-Resource Assignment With Partial Backtracking)

EİKA düşük hesaplama karmaşıklığına sahip açgözlü bir algoritmadır. Ancak performansı yüksek oranda KK'daki $FZKİ$ 'lerinin sırasına bağlıdır. Bu da kuyrukta sondaki $FZKİ$ 'lerin yüksek ağırlığı olmasına rağmen $FZKİ$ 'lerden kuyruğun başına yakın olanlar bir İK'ye atanma bakımından daha önceliklidirler. Bu durum, EİKA algoritmasının, $FZKİ$ bir İK'ye atanmışsa bunun değişmesine imkân tanımamasından kaynaklanmaktadır. PGİKA algoritması, EİKA'nın bu dezavantajını, önceden atanmış $FZKİ$ 'yi, daha yeni çıkarılmış olan ve o belirli İK için W_{ifz} değeri daha yüksek olan $FZKİ$ ile değiştirerek telafi etmektedir. EİKA ile PGİKA'nın en önemli farkı, PGİKA'yı kuyruğa konan $FZKİ$ 'lerin sırasından bağımsız yapan, geri iz sürme özelliğidir. Aşağıda PGİKA'nın aşamaları anlatılmaktadır. Dikkat edilirse görülecektir ki Aşama 1 ve Aşama 6, EİKA ve PGİKA için aynıdır.

AŞAMA 1: FxZ sayıda $FZKİ_{fz}$ (frekans ve zaman kaynak ikilisi) üret. Her bir İK için, kullanılabilir $FZKİ$ 'ler içinden maximum W_{ixy} 'ye sahip olan $FZKİ_{xy}$ bul ve ata. PN_i 'yi $PN_i \leftarrow PN_i - W_{ixy}$ şeklinde güncelle. $PN_i \leq 0$ ise bu İK'yi tatmin olmuş olarak işaretle. Her İK'ye bir $FZKİ$ atandığında, geriye kalan $(FxZ) - N$ sayıdaki $FZKİ$ 'yi, KK(kaynak kuyruğu)'ya ekle.

AŞAMA 2: Eğer KK boşsa, Aşama 6'ya git. Değilse, kuyruğun başındaki $FZKİ$ 'yi çıkar. Buna $FZKİ_{fz}$ diyelim. Tatmin olmamış bütün İK'leri işaretlenmemiş hale getir ve Aşama 3'e git.

AŞAMA 3: Tatmin olmamış ve işaretlenmemiş İK'ler içinde minimum D_{ifz} 'li İK i'yi bul. Eğer bu İK , $FZKİ$ 'nin ait olduğu zaman dilimi içinde kullanılabilir antene sahipse, $FZKİ$ 'yi buna ata, değilse Aşama 4'e git. Eğer atama geçerli ise, PN_i 'yi , $PN_i \leftarrow PN_i - W_{ifz}$ olarak güncelle ve Aşama 2'ye geçmeden önce $PN_i \leq 0$ olup olmadığını kontrol et, öyleyse bu İK'yı tatmin olmuş olarak işaretle.

AŞAMA 4: $FZKİ$ 'nin ağırlığını karşılaştır, ör. W_{ifz} , zaman dilimi z için bir anten işgal eden ve önceden atanmış olan $FZKİ$ 'lerin ağırlıkları. Eğer W_{ifz} en küçüklerinden büyükse, $İK$ i'den en az ağırlıklı $FZKİ$ 'yi al ve KK 'nın sonuna koy ve $FZKİ_{fz}$ 'yi $İK$ i'ye ata. Alınan $FZKİ$ 'nin ağırlığını W_{ikz} olarak gösterirsek, PN_i 'yi 'yi , $PN_i \leftarrow PN_i + W_{ikz} - W_{ifz}$ olarak güncelle ve eğer $PN_i \leq 0$ ise bu $İK$ 'yi tatmin olmuş olarak işaretle. Aşama 2'ye git. Aksine, eğer W_{ikz} en küçüğü ise, $İK$ 'yi kontrol edilmiş olarak işaretle. Ve Aşama 5 ile devam et.

AŞAMA 5: Eğer tatmin edilmemiş $İK$ 'ler içinde kontrol edilmemiş kullanıcı hiç yoksa, Aşama 3'e git. Değilse, $FZKİ$ 'yi FKK 'ye koy ve Aşama 2'ye git.

AŞAMA 6: Eğer FKK 'de birkaç $FZKİ$ varsa, kuyruktaki her bir $FZKİ$ için, tatmin olmuş $İK$ ara.bu $FZKİ$ ile ilişkilendirilmiş zaman aralığında kullanılabilir antene sahip olan $İK$ 'lerden en yüksek ağırlığı olan $FZKİ$ 'yi ara.

Sonuç

Bu çalışmada, merkezi bilişsel radyo ağları için iş oranı açısından tatmin olan ikincil kullanıcı sayısını azamileştirmeyi amaçlayan bir çizelgeleme problemi formüle edilmiştir. Bu problemin NP-zorlukta olduğunu $P = NP$ olmadığı takdirde 2'den daha iyi herhangi bir sabit faktörde yaklaşıtılamayacağını ispatladık. Ayrıca hesaplama açısından etkili iki sezgisel algoritma öne sürdük. Değişken girdi parametreleri ile denediğimiz çok sayıda benzetim çalışmalarımız gösterdi ki öne sürdüğümüz algoritmalar ağ içindeki tatmin olmuş ikincil kullanıcıların sayısı bakımından CPLEX çözümlerine çok yakın bir başarımla göstermektedir. Üstelik bizim algoritmalarımız ağırlık iş oranı bakımından CPLEX'ten daha iyi sonuçlara ulaşmaktadır; çünkü CPLEX'in tersine biz toplam iş oranını da hesaba kattık.

Bu iş paketinin çıktısı bir dergi makalesi olarak hazırlanmış ve IEEE Transactions on Vehicular Technology dergisinde basılmak üzere kabul edilmiştir. Bu makalemizin bilgileri aşağıda verilmektedir:

- D.Gözüpek, B.Eraslan, F.Alagöz, "Throughput satisfaction based scheduling for cognitive radio networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, accepted, 2012.

1.6 Çıkan iş oranını azamileştirme problemine açık artırma teorisile çözüm

Bu iş paketinde açık artırma teorisinden yararlanarak kaynak ataması problemine çözüm önerisi getirdik. Başlangıç olarak çalışmamızda her $İK$ 'nin yalnızca bir anteni olduğu düşünülmüştür. Çalışmanın ilerleyen zamanlarında daha gerçekçi bir çözüm için $İK$ 'lerin birden fazla anteni olması durumu değerlendirilmiştir.

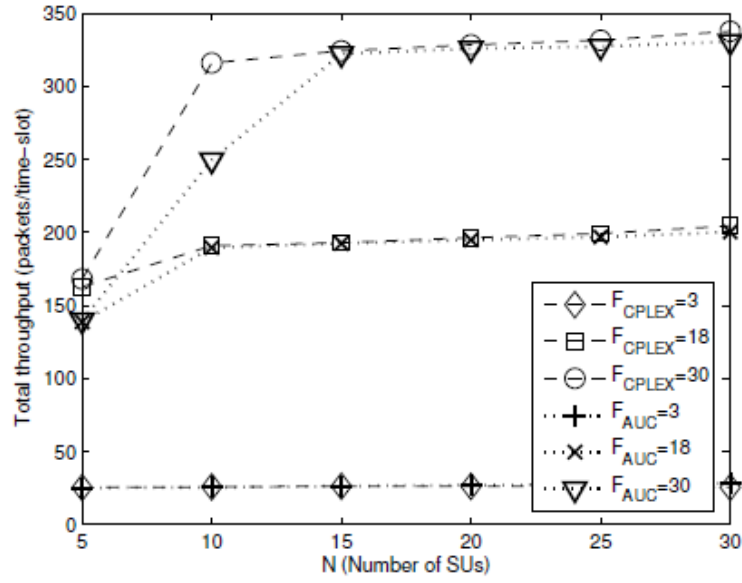
Yapılan çalışmada bir çizelgeleme dönemi içerisinde $İK$ 'nin bir frekans üzerinden yolladığı paket sayısının değişmediği kabul edilmiştir. Şöyle ki tüm $İK$ 'ler ve frekanslar için $U_{if1} = U_{if2} = U_{if3} = \dots U_{ifT-1} = U_{ifT}$. Böylece $İK$ i'nin yolladığı paket sayısı U_{if} olarak ifade edilebilir.

Önerdiğimiz çizelgeleme algoritması toplam çıkan iş oranını azamileştirirken, hiçbir çizelgeleme dönemi içerisinde tatmin olmayan kullanıcı olmasını engellemektedir. Bu amaçla her kullanıcıya, o çizelgeleme dönemi için, en az bir frekans zaman ikilisi atanmaktadır.

Algoritmamızda birinci fiyat kapalı zarf usulü ihale (first price sealed bid auction) şeklindeki açık arttırma yöntemi uygulanmıştır. Bu tip açık arttırmalarda teklif verenler tek ve gizli teklif verirler. Tekliflerden en yüksek olan ihaleyi alır ve önerdiği fiyatı satıcıya öder. Algoritmamızda İK'lerin U_{if} değerleri açık arttırma teorisindeki fiyat tekliflerine denk gelmektedir.

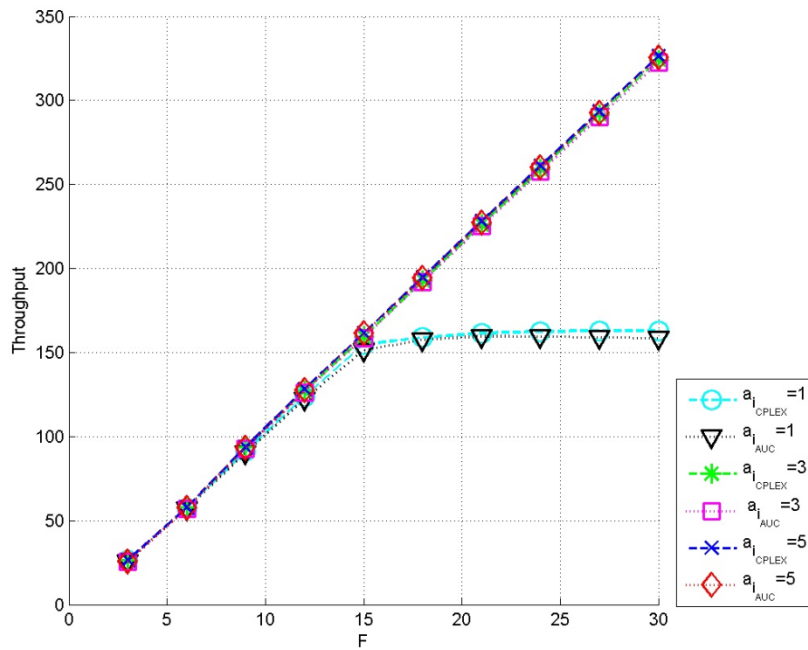
Böylelikle her İK'nin U_{if} değeri diğer İK'lerinkinden bağımsızdır ve teklifler birbirlerinden etkilenmemektedir. Bunun dışında, ağdaki toplam çıkan iş oranını en iyileştirmek için, algoritmanın basamaklarında birinci fiyat kapalı zarf usulü ihale kullanılarak, açık arttırmaya çıkarılan frekansların en yüksek teklif veren İK'lere atanır. Önerdiğimiz yöntemde açık arttırmalar aynı anda yapıldığı için bir açık arttırmanın sonucu diğerlerini etkilememektedir.

Benzetim çalışmaları için (Gözüpek, 2010b) bahsettiğimiz bilişsel radyo ağı ortamını kullandık. Her akıllı radyo ağı hücresi 600 metre yarıçapında olup, her çizelgeleme dönemi 10 zaman diliminden oluşmakta ve her zaman dilimi 100 milisaniye uzunluğundadır. Her benzetim kümesi içinde yer alan 5000 çizelgeleme dönemindeki U_{if} değerleri; BK'lerin hızları, İK'lerin hızları ve BK sayısı göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır (Gözüpek, 2010b). BK ve İK'lerin hareketlilik modeli için rastgele ara nokta hareketlilik modelini kullandık. Deneylerimizde BK ve İK'lerin ikisinin de hızlarını 13m/s ve anten sayılarını da tüm kullanıcılar için 3 aldık. İK'lerin sayısı (N) ise 5 ve 30 arasında değişmektedir. Şekil 3'de toplam çıkan iş oranını $F=3$, $F = 18$ ve $F = 30$ değerleri için gösterilmiştir. F_{CPLX} CPLEX benzetim sırasında kullanılan frekans sayısını gösterirken, F_{AUC} ise önerdiğimiz açık arttırma tabanlı algorithmada kullanılan frekans sayısını göstermektedir. Bütün çözüm durumları için önerdiğimiz algoritmanın sonuçları ile CPLEX çözümlerinin çok yakın olduğunu gözlemledik. Buna ek olarak benzetim sonuçları, İK'lerin U_{if} değerleri birbirine yakın olduğunda algoritmanın en kötü durum davranışı göstermeye eğilimli olduğunu gösterdi. Bunun nedeni, teklif verenlerin genellikle aynı açık arttırmadaki frekanslara teklif vermesi ve bu yüzden toplam açık arttırma prosedürü uzamasıdır. Yine de algoritmamızın en kötü durumdaki hesaplama karmaşıklığı $O((FN)+N^2\log(N))$ (Eraslan, 2011) olduğu göz önünde bulundurulduğunda, algoritmamız kabul edilebilir bir çalışma zamanına sahiptir.



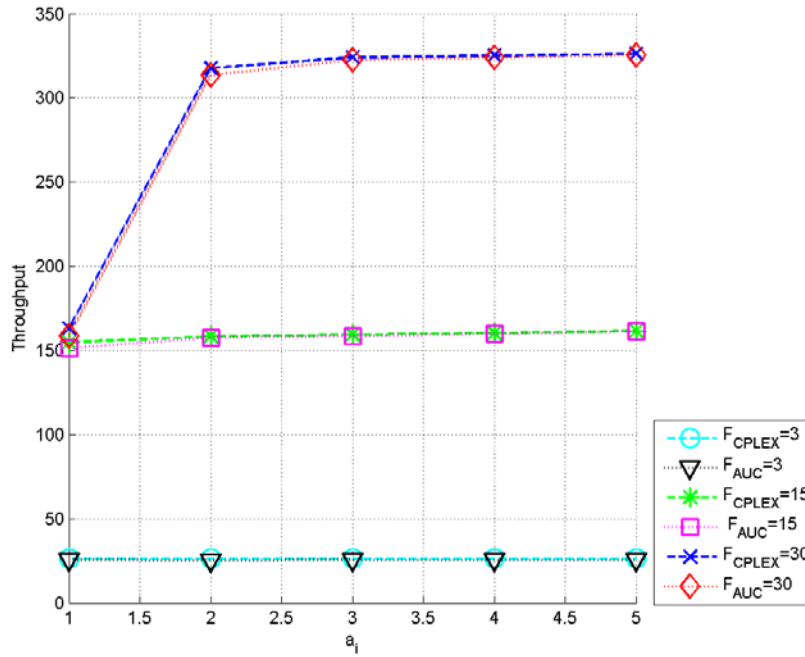
Şekil 3 Önerdiğimiz algoritma sonuçları ile CPLEX sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 3 ve Şekil 4'te algoritmamızın benzetim sonuçları ile daha önce elde ettiğimiz CPLEX sonuçları kıyaslanmıştır. İK'lerin sayısı (N) ise 5 ve 30 arasında değişmektedir. İş oranını azamileştirme probleminde, mümkün (feasible) bir sonuç elde etmek için, $N \leq (F \times T)$ olmalıdır. Bu nedenle benzetim çalışmalarımızda, her çizelgeleme döneminde en az 3 boş frekans bulunmaktadır. Bu grafiklerde gösterilen çıkan iş oranı değerleri aynı F ve a_i değerleri ile elde edilen 5000 çizelgeleme zamanının ortalamasıdır.



Şekil 4 Değişen F ve a_i değerleri için önerdiğimiz algoritma sonuçları ile CPLEX sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4'te görüldüğü gibi, $a_i = 1$, $a_i = 3$ ve $a_i = 5$ iken ve F ise 3 ve 15 aralığındayken, F arttıkça çıkan iş oranı da artmaktadır. Bunun nedeni ise bu aralıkta $F \leq (N \times a_i)$ olduğundan tüm boş frekanslar İK'lere atanabilmektedir. Ancak, $a_i = 1$ ve $F > 15$ için, F değerindeki artışa rağmen çıkan iş oranında çok değişiklik gözlenmemektedir. Her antene en fazla bir frekans atanabildiğinden, bir İK anten sayısından daha fazla frekansı kullanamamaktadır. Böyle durumlarda benzetim sisteminde T zaman dilimi için $F - (N \times a_i)$ tane frekans boş kalmaya devam etmektedir. Böylelikle F değerindeki artış, $F > 15$ ve $a_i = 1$ için, çıkan iş oranını etkilememektedir.



Şekil 5 Değişen a_i ve F değerleri için önerdiğimiz algoritma sonuçları ile CPLEX sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5'te ise önerdiğimiz algorithmandan elde edilen çıkan iş oranı sonuçları ve CPLEX sonuçları, $F=3$, $F=15$ ve $F=30$, $N=15$ ve a_i değerleri 1 ile 5 arasında değişirken, karşılaştırılmıştır. F_{CPLEX} CPLEX benzetim sırasında kullanılan frekans sayısını gösterirken, F_{AUC} ise önerdiğimiz açık arttırma tabanlı algorithmanda kullanılan frekans sayısını göstermektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde çıkan iş oranı, değişen a_i değerlerinde, $F=3$ ve $F=15$ için fazla değişiklik göstermemektedir. Ancak her İK'nin 2 anteni olduğu ve $F=30$ durumunda çıkan iş oranında ciddi bir artış görülmektedir. Bunun nedeni $a_i=1$ olduğunda boş frekansların sadece 15 tanesi İK'lere atanabilmektedir. Ancak $a_i=2$ olduğu durumda boş olan tüm 30 frekans İK'lere atanabilmektedir.

Önerdiğimiz açık arttırma tabanlı algoritmanın çıkan iş oranı değerleri, değişen N , F ve a_i parametreleri için, en iyi (optimal) CPLEX değerlerine çok yakın çıkmıştır. Önerdiğimiz

algoritmanın en kötü durum hesaplama karmaşıklığı $O(FN + N^2 \log(N))$ olduğu düşünüldüğünde, bu algoritma merkezi İBİ mimarileri için uygun bir çizelgeleyicidir.

Bu çalışmanın sonuçlarını aşağıdaki dergi makalesinde yayınladık:

- B.Eraslan, D.Gözüpek, F.Alagöz, “An auction theory based algorithm for throughput maximizing scheduling in centralized cognitive radio networks”, *IEEE Communications Letters*, vol.15, no.7, pp.734-736, 2011.

1.7 Frekans kanalını değiştirme maliyetini dikkate alan bir çizelgeleyici

Kablosuz cihazlar kullandıkları frekansı değiştirdiklerinde bir gecikme maliyeti olur. Bilişsel radyo haricindeki kablosuz teknolojiler önceden belirlenmiş ve nispeten dar bir bantta yayın yaptıkları için bu gecikme maliyeti çoğunlukla ihmal edilebilir. Ancak bilişsel radyo cihazlarının diğer teknolojilerden farklı olarak çok geniş bir spektrumda çalışmaları tasarlanmıştır. Bu durumda frekans değiştirme maliyeti ihmal edilemez. Bu gecikme maliyeti genel olarak eski ve yeni frekanslar arasındaki uzaklığa bağlıdır. Mesela 800 MHz'den 10 GHz'e geçiş yapmak, 800 MHz'den 850 MHz'e geçiş yapmaktan daha fazla gecikmeye yol açar.

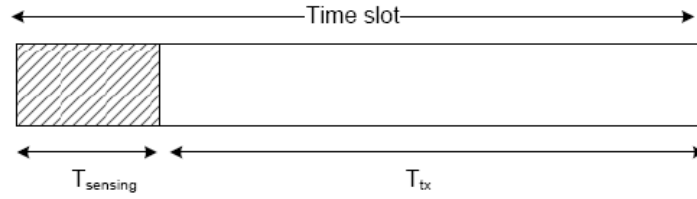
Bilişsel radyo ağlarında çizelgeleme gecikmesi genellikle ortalama alanındaki çalışmalarda incelenmiştir. Bu çalışmalarda ise çoğunlukla frekans değiştirmeye bağlı gecikmenin sabit olduğu, eski ve yeni frekanslar arasındaki uzaklıktan bağımsız olduğu varsayımı yapılmıştır. Bilişsel radyolarda çizelgeleme alanındaki çalışmalar ise frekans değiştirme maliyetini hiç dikkate almamışlardır. Bildiğimiz kadarıyla, bizim çalışmamız bilişsel radyo ağlarında çizelgeleme alanındaki çalışmalar içinde frekans değiştirme maliyetinin frekanslar arasındaki uzaklığa bağlı olmasını dikkate alan ilk çalışmadır.

Bu bağlamda öncelikle çıkan iş oranını azamileştiren çizelgeleyiciyi frekans değiştirme maliyetini de dikkate alacak şekilde değiştirerek yeniden formüle ettik. Daha sonra bu problem için bir algoritma önerdik ve algoritmamızın polinom zamanda çalıştığını ispatladık. Daha sonra ise performans analizini yaparak teorik üst sınırına oldukça yakın çözümler verdiğini gösterdik. Bu çalışmamız aşağıdaki dergi makalesinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir:

- D.Gözüpek, S.Buhari, F.Alagöz, “A spectrum switching delay-aware scheduling algorithm for centralized cognitive radio networks”, accepted to *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012.

1.8 Ortama Erişim Kontrolü Katmanında Algılama Planlaması

Bir zaman diliminin spektrum dinlemesi ve spektrum erişimi (veri iletimi) olmak üzere iki kısma ayrılmış olduğunu düşünelim. Spektrum dinleme periyodunun uzunluğu sabit ve T_{sensing} kadar olsun. N tane İK ve F tane frekanstan oluşan bir BR ağında amacımız spektrum dinleme aşamasında bulunan spektrum boşluklarının en iyilenmesidir. Eğer kaynaklar en iyilenirse bir sonraki periyot yani veri iletimi aşamasında da çıkan iş oranı en iyilenebilecektir.



Şekil 6 Bir zaman dilimi spektrum dinleme ve veri iletimi olmak üzere iki kısımdan oluşur.

$X_{i,f}$ İK i'nin f frekansını dinlemek için atanması durumunda 1 değerini aksi takdirde sıfır değerini alan bir karar değişkeni olsun. Problem formülasyonumuzu aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz:

$$\max \sum_i \sum_f P_{idle}^f (1 - P_{fa}^f) X_{i,f} \quad (1)$$

$$\sum_f t_{i,f} X_{i,f} \leq T_{\text{sensing}} \quad (2)$$

$$P_{fa}^f = 1 - \Pi_{1(X_{i,f}=1)} (1 - P_{fa}) \quad (3)$$

Yukarıda verilen P_{idle}^f f frekansının boş olma ihtimalini göstermektedir. Bu değer objektif fonksiyonda bulunması boş olma ihtimali daha yüksek olan kanalların seçilmesi açısından önemlidir. Bu değerlerin İK'lerin gözlemleri sonucunda öğrenme mekanizmaları ile bulunabildiğini yani İK'ler tarafından bilindiğini kabul etmekteyiz.

Diğer terim $(1 - P_{fa}^f)$ ise bu frekansın boş olması durumunda İK'ler tarafından yanlış alarm verilmeden boş olduğunun anlaşılması için eklenmiştir. Yani objektif fonksiyonumuz bulunan spektrum boşluklarını en iyilemeyi amaçlamaktadır. Kısıtımız ise (2)'de verildiği gibi her bir İK'nin spektrum dinleme için harcayacağı toplam süre spektrum dinleme süresini aşamamasıdır. (3) ile verilen ise İK'lerin kanallara spektrum dinlemesi için atanması sonucunda bir f frekansının işbirlikçi yanlış alarm ihtimalidir. $t_{i,f}$ ise İK i kullanıcısının f frekansını dinlemesi ve belirli bir başarımlı ölçütünü (P_d , P_{fa}) sağlama için gereken minimum zamandır. Bu değer (Liang, 2008)'da aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$t_{i,f} = \frac{1/y_{i,f}^2 [Q^{-1}(P_f) - Q^{-1}(P_d) \sqrt{2y_{i,f} + 1}]^2}{f_s}$$

Ancak objektif fonksiyonu dikkatli incelendiğinde görülecektir ki problem linear olmayan bir problemdir. Ayrıca bu problemin linear problemlere çevirilmesi zor olacağından bu problem için bir buluşsal yöntem geliştirdik.

Önerdiğimiz yöntem:

1- Frekanslar bantlarının en yüksek ihtimalle boş olandan en düşük boş olana doğru sıralanır. Frekans listesinde saklanır.

2- Frekans listesinin başındaki frekans için değerleri hesaplanır. Ve (2) numaralı kısıtı karşılayan İK'ler kullanıcı listesine eklenir. değerleri en küçükten en büyüğe doğru sıralanır.

3- Bu kullanıcıların faydası objektif fonksiyondaki (sıra 7) gibi hesaplanır. Sıra 7 bizim en iyilemek istediğimiz fonksiyonun ifadesidir. Şekil 4'de bu fonksiyonun artan sayıda frekansı dinleyen İK ile değişimi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi bu örnek için 5 İK ile en iyi değere ulaşılmaktadır.

3- En iyilenen sayı için yeterli sayıda CR varsa, en kısa değerinden başlayarak bu değeri sağlayan İK'ler için $X_{i,f}$ değerleri 1'e eşitlenir. Yani bu İK'ler f frekansını dinlemek için atanırlar.

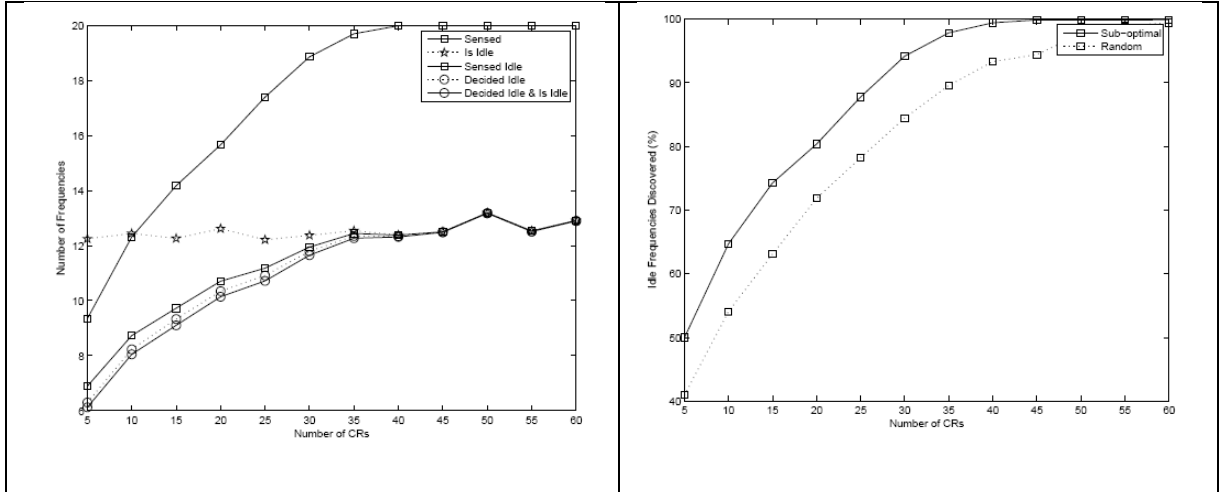
Frekans listesindeki her frekans için aynı işlem uygulanır. Algoritmamızı Algorithm 1'de vermekteyiz.

Algorithm 1 Determine the set of frequencies to be sensed for each CR i , $X = [X_{i,f}]$

Require: P_{idle}^f , P_{fa} , P_d , $\gamma_{i,f}$ are known by the BS.

- 1: Evaluate $t_{i,f}$ for all i, f pairs.
 - 2: SortedList $\leftarrow$ Sort frequencies in decreasing order according to P_{idle}^f
 - 3: $T_{s,i}$ is sensing time for CR i , $T_{s,i} = 0$.
 - 4: **for** each f in SortedList **do**
 - 5: CRList $\leftarrow$ Select CRs satisfying $t_{i,f} \leq (T_{sensing} - T_{s,i})$
 - 6: Sort $t_{i,f}$ for frequency f in increasing order
 - 7: Evaluate $\arg \max_n (1 - P_{fa})^n n$, n is the number of CRs to sense f .
 - 8: **if** n is smaller than the size of CRList **then**
 - 9: Select n CRs from the CRList one by one.
 - 10: **else**
 - 11: Select all CRs in the CRList.
 - 12: **end if**
 - 13: **for** each selected CR **do**
 - 14: $T_{s,i} = T_{s,i} + t_{i,f}$
 - 15: $X_{i,f} = 1$
 - 16: **end for**
 - 17: **end for**
-

Başarım Değerlendirmesi

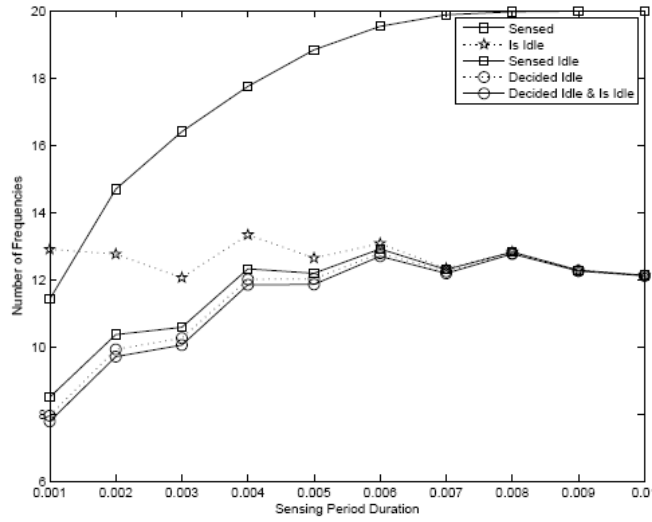


Şekil 7 Spektrum boşlukları bulma başarımı (*Sensed*: Spektrum dinlemesi yapılan kanal sayısı, *Is idle*: Boş olan kanal sayısı, *Sensed Idle*: Durumu boş olup da dinlenmiş olan kanal sayısı, *Decided Idle*: Boş olduğunu karar verilen kanal sayısı, *Decide Idle and Is Idle*: Boş olduğunu karar verilen ve gerçekten boş olan kanal sayısı)

Şekil 7’den de görüldüğü gibi önerdiğimiz yöntem artan İK sayısı ile birlikte daha fazla kanal dinleyebilmekte ve daha fazla boş kanal bulabilmekte. Boş kanal sayısının 12 olduğu bu

sistemde ancak 35 İK dinleme eylemini gerçekleştirirse tüm bu boş kanallar bulunabilmekte. Bu sayıdan sonra daha fazla İK'nin ise iş birliğine katılımı sonucu değiştirmemektedir. Zira tüm boş kanalların başarıyla bulunabilmesi için sadece 35 İK yeterlidir. Bu durum Şekil 7(b)'den daha net görülmektedir. *Rasgele olarak adlandırdığımız yöntem* ise kanalların boş olma durumlarını dikkate almadan rasgele bir kanal seçmekte ve ona önerdiğimiz yöntem ile atamalar gerçekleştirmektedir. Bizim yöntemimizin kanalın boş olma durumunu (P_{idle}) dikkate alarak başarımı arttırdığı görülmektedir.

Dinleme süresini değiştirdiğimizde ise Şekil 8'de görüldüğü gibi boş bulunan kanal sayısı artmakta ve sonra tüm boş kanallar başarıyla bulunduğundan sabit kalmaktadır. Bu senaryodan spektrum dinleme süresinin ne uzunlukta belirlenmesi gerektiğine karar verilebilmektedir.



Şekil 8 Spektrum dinleme süresinin boş bulunan kanal sayısına etkisi

Bu çalışmamızı konferans makalesi şeklinde düzenlemekteyiz.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Projemiz planlandığı sürede başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Boğaziçi Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde bu konuda bir doktora tezi ve bir master tezi tamamlanmıştır. Bunlara ek olarak hepsi SCI/SCI-E indekslerinde taranan hakemli dergilerde kabul edilmiş/yayınlanmış olan 9 dergi makalesi ve iki uluslararası konferans makalesi ile gönderilmiş olan 2 dergi makalesi proje çıktıları arasındadır. Bu çıktılar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Yayının Adı	Yayınlandığı Yer	İndeks	Etki Değeri
1. Throughput Satisfaction Based Scheduling for Cognitive Radio Networks	IEEE Transactions on Vehicular Technology (Dergi)	SCI (Science Citation Index)	1.49
2. A Spectrum Switching Delay Aware Scheduling Algorithm for Centralized Cognitive Radio Networks	IEEE Transactions on Mobile Computing (Dergi)	SCI (Science Citation Index)	2.381
3. Genetic Algorithm-Based Scheduling in Cognitive Radio Networks under Interference Temperature Constraints	Wiley's International Journal of Communication Systems (Dergi)	SCI-E(Science Citation Index-Expanded)	0.229
4. Throughput and Delay Optimal Scheduling in Cognitive Radio Networks under Interference Temperature Constraints	Journal of Communications and Networks (Dergi)	SCI (Science Citation Index)	0.351
5. An auction theory based algorithm for throughput maximizing scheduling in centralized cognitive radio networks	IEEE Communications Letters (Dergi)	SCI (Science Citation Index)	1.06
6. An Interference Aware Throughput Maximizing Scheduler for Centralized Cognitive Radio Networks	IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) (Konferans)	-	-
7. A Graph Theoretic Approach to Scheduling in Cognitive Radio Networks	IEEE/ACM Transactions on Networking (gönderildi) (Dergi)	SCI (Science Citation Index)	2.292
8. A Fair Scheduling Framework for Centralized	Wiley Journal on Wireless Communications and Mobile	SCI-E(Science Citation Index-	0.81

Cognitive Radio Networks	Computing (gönderildi) (Dergi)	Expanded)	
9. A Markovian Approach for best-fit channel selection in cognitive radio networks	Elsevier Ad Hoc Networks (Dergi)	SCI-E(Science Citation Index-Expanded)	2.11
10. Distributed Channel Selection in CRAHNS: A Non-Selfish Scheme Mitigating the Effect of Spectrum Fragmentation	Elsevier Ad Hoc Networks (Dergi)	SCI-E(Science Citation Index-Expanded)	2.11
11. Cognitive Femtocell Networks: An Overlay Architecture for Localized Dynamic Spectrum Access	IEEE Wireless Communications Magazine - SI on "Dynamic Spectrum Management" (Dergi)	SCI (Science Citation Index)	2.575
12. Analytical Modeling and Resource Planning for Cognitive Radio Systems	Wiley Journal on Wireless Communications and Mobile Computing (Dergi)	SCI-E(Science Citation Index-Expanded)	0.81
13. A Survey of Research on Greening Data Centers	IEEE Global Communications Conference (GlobeCom) (Konferans)	-	-

Bu proje kapsamında, merkezi bilişsel radyo ağları için yeni bir grup çizelgeleme algoritması önerilmiştir. Önerilen tüm çizelgeleyiciler ikincil kullanıcıların bilişsel baz istasyonuna hangi frekans, zaman dilimi ve veri iletim hızıyla gönderim yapacaklarını belirlemektedirler. Ayrıca, literatürdeki mevcut çalışmaların ötesinde, frekans, zaman dilimi ve veri iletim hızı atanması, ikincil kullanıcıların baz istasyonu ile itimat edilebilir bir haberleşme yapmasının sağlanması, birincil kullanıcıların rahatsız edilmemesinin garanti edilmesi, ikincil kullanıcıların birden fazla antene sahip olmalarının da göz önüne alınması, hem zamansal hem de çıkan iş oranı açısından adilliğin sağlanması gibi pek çok özelliği barındırmaktadırlar. Literatürde, bu kadar çok kriteri bu kadar kapsamlı bir şekilde ele alan başka bir çalışma bulunmamaktadır.

IP 2 ve IP 3'te girişim sıcaklığı modeli bağlamında çıkan iş oranını azamileştiren ve çizelgeleme gecikmesini asgarileştiren çizelgeleme problemleri tasarlanmış ve bu problemler için bulgusal sonuçlar veren algoritmalar önerilmiştir. *Girişim sıcaklığı kısıtları bağlamında literatürdeki ilk çizelgeleme çalışmasıdır.* Bu çalışma, Science Citation Index (SCI) tarafından taranan “*Journal of Communications and Networks*” isimli dergide yayınlanmıştır

Daha sonra ise çıkan iş oranını azamileştiren ve çizelgeleme gecikmesini asgarileştiren çizelgeleme problemleri için genetik algoritma tabanlı algoritmalar önerilmiştir. Karmaşıklıklarının az olmasının yanı sıra daha önceden önerilmiş olan bulgusal sonuç veren algoritmalarından daha iyi sonuç vermektedirler. Bu bağlamda kromozom şifreleme ve uygunluk fonksiyonu değerlendirme ve karşılaştırma yöntemleri önerilmiş, turnuva seçmesi ve birörnek çaprazlama gibi teknikler kullanılmıştır. Oldukça kapsamlı benzetim çalışmaları yapılmıştır. *Genetik algoritma tabanlı yöntemleri bilişsel radyolarda çizelgeleme için kullanan literatürdeki ilk çalışmadır.* Bu çalışma, Science Citation Index-Expanded (SCI-E) tarafından taranan “Wiley’s International Journal of Communication Systems” isimli dergide yayınlanmıştır.

IP 4 ve IP 5 kapsamında ise geleneksel spektrum sezme mekanizmalarıyla birlikte uygulanabilen bir takım çizelgeleyiciler önerilmiştir. Çıkan iş oranını azamileştiren, azami-asgari, ağırlıklı azami-asgari ve orantısal açıdan adilliği sağlayan çizelgeleyiciler tasarlanmıştır. Bu çizelgeleyiciler için bulgusal sonuçlar veren algoritmalar önerilmiş ve bu algoritmaların CPLEX optimizasyon yazılımı sonuçlarıyla karşılaştırmalı performans analizi yapılmıştır. Bu bölümde önerilen çizelgeleyicilerin çok kanallı ve çok kullanıcı ortamında frekans, zaman dilimi, veri iletim hızı ve güç ataması yapma, frekans kanallarının heterojenliğini ve kullanıcıların birden fazla antene sahip olabildiği durumları dikkate alma, hem çıkan iş oranı açısından hem de zamansal açıdan adilliği birlikte dikkate alma ve kullanıcıların yakın zamandaki çıkan iş oranlarını şu anki çizelgeleme döneminde kullanarak adillik ve çıkan iş oranı açısından esneklik sağlama gibi pek çok farklı özelliği bulunmaktadır. *Literatürde bu özelliklerin hepsini birden bünyesinde barındıran başka bir çalışma bulunmamaktadır.* Bu çalışma, Science Citation Index-Expanded (SCI-E) tarafından taranan “Wiley Journal on Wireless Communications and Mobile Computing” isimli dergiye gönderilmiştir.

Daha sonra ise çıkan iş oranını azamileştiren, azami-asgari, ağırlıklı azami-asgari ve orantısal açıdan adilliği sağlayan çizelgeleyiciler için oldukça kapsamlı bir çizge teorisi yaklaşımı getirilmiştir. Çıkan iş oranını azamileştiren çizelgeleyici için polinom zamanlı bir algoritma sunulmuş ve özel halleri incelenmiştir. Adil çizelgeleyicilerin ise her birinin NP-zorlukta olduğu ispatlanmıştır. Daha sonrasında ise adil çizelgeleyicilerin özel halleri yaklaştırım algoritmaları açısından incelenmiş ve tatmin edici sonuçlar veren yaklaştırım algoritmalarının bu problemlerin çok özel halleri için bile bulunamayacağı ispatlanmıştır. Azami-asgari açısından adil çizelgeleyici için ise spektrum ortamının heterojenliğine bağlı olan bir yaklaştırım algoritması önerilmiştir. *Literatürde bilişsel radyo ağları konusunda bu denli kapsamlı bir çizge teorisi ve yaklaştırma algoritmaları çalışması bulunmamaktadır.* Bu çalışma, Science Citation Index (SCI) tarafından taranan “IEEE/ACM Transactions on Networking” isimli dergiye gönderilmiştir.

IP 6’da çıkan iş oranı açısından tatmin olan ikincil kullanıcı sayısını azamileştiren bir çizelgeleme problemi tanımlanmış ve bu problemin de hem NP-zorluk hem de yaklaştırım algoritmaları açısından zor bir problem olduğu ispatlanmıştır. *Literatürde bilişsel radyo ağlarında çıkan iş oranı açısından tatmin olan kullanıcı sayısını azamileştiren bir çizelgeleme*

problemi daha önceden önerilmemiştir; bu tezdeki çalışma bu bağlamda yapılmış ilk çalışmadır. Bu çalışma, Science Citation Index (SCI) tarafından taranan “*IEEE Transactions on Vehicular Technology*” isimli dergiye kabul edilmiştir.

IP 7’de çıkan iş oranını azamileştirme problemine açık artırma teorisi tabanlı bir buluşsal algoritma önerilmiştir. Önerdiğimiz algoritma düşük karmaşıklıkta olup CPLEX optimizasyon yazılımı ile elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar vermektedir. Bu çalışma, Bu çalışma, Science Citation Index (SCI) tarafından taranan “*IEEE Communications Letters*” isimli dergide yayınlanmıştır.

IP 8’de farklı frekanslara geçişin farklı gecikme maliyetleri olduğunu dikkate alan bir çizelgeleme problemi ve bu probleme bulgusal çözüm bulan bir algoritma önerilmiştir. Literatürdeki çok az çalışma frekans değiştirme maliyetini dikkate almaktadır; bu çalışmalar ise frekanslar arasındaki uzaklığı dikkate almamakta ve sabit bir frekans değiştirme maliyeti olduğunu varsaymaktadırlar. *Bilişsel radyo ağlarında frekans değiştirmenin frekanslar arasındaki uzaklığa bağlı olan maliyeti olduğunu dikkate alan ilk çizelgeleme çalışmasıdır.* Bu çalışma, Science Citation Index (SCI) tarafından taranan “*IEEE Transactions on Mobile Computing*” isimli dergiye kabul edilmiştir.

IP 9’da geliştirilen işbirlikçi spektrum algılama algoritması diğer iş paketlerinden farklı olarak iletme değil de iletimden önceki aşamaya yani boş birincil kanalların mümkün olduğunca yüksek başarımla keşfedilmesine odaklanır. Çok kanalda spektrum algılamasının en optimal şekilde nasıl yapılacağına karar vermek NP-zorlukta bir problemidir. Bu nedenle İP 8’de bir buluşsal yöntem geliştirilmiş ve başarımlar analizleri yapılmıştır. Bu çalışma uluslararası konferans makalesi şeklinde düzenlenmektedir.

Özetle, bu projenin ürünleri olarak **11 tane dergi makalesi** ve 2 tane uluslararası konferans makalesi bulunmaktadır. Dergi makalelerinin 5 tane SCI endeksli ve 4 tane SCI-E endeksli olmak üzere toplam **9 tanesi yayınlanmış/kabul edilmiştir**; ayrıca 1 SCI endeksli ve 1 SCI-E endeksli olmak üzere toplam **2 tanesi de gönderilmiş ve cevap beklenmektedir.** Bu proje kapsamında önerilen çizelgeleyicilerin pratik önemi de bulunmaktadır. Bilişsel radyo ağları konusunda hücrel bir baz istasyonu tasarlamak isteyen ya da mevcut baz istasyonlarına dinamik spektrum erişimi/bilişsel radyo özelliklerini ekleyerek yeni hizmetler vermek isteyen operatörler, bu çalışmada önerilen çizelgeleyicileri değişen koşullara göre kendini uyarlayabilen, dinamik ve adaptif bir şekilde kullanabilirler. Projenin her bölümü bir bütünün birbirleriyle ilişkili parçalarıdır.

KAYNAKÇA

(Assmann, 1984) S. Assmann, D. Johnson, D. Kleitman, and J. Leung, “On a dual version of the one-dimensional bin packing problem,” *Journal of algorithms*, vol. 5, no. 4, pp. 502–525, 1984.

(CPLEX) CPLEX, <http://www.ilog.com/products/cplex>.

(Gözüpek, 2011c) D. Gözüpek, M. Shalom, and F. Alagöz, “A graph theoretic approach to scheduling in cognitive radio networks,” submitted for journal publication, 2011.

(Jansen, 2002) K. Jansen and R. Solis-Oba, “An asymptotic fully polynomial time approximation scheme for bin covering,” *Algorithms and Computation*, pp. 271–295, 2002.

(KNITRO) KNITRO Solver, Ziena Optimization Inc., <http://www.ziena.com/knitro.htm>.

(Liang, 2008) Liang, Y.C. and Zeng, Y. and Peh, E.C.Y. and Hoang, A.T., Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, pp. 1326-1337.

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. FATİH ALAGÖZ
Proje No:	109E256
Proje Başlığı:	Altyapılı Bilişsel Radyo Ağlarında Çizelgeleme
Proje Türü:	Araştırma
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	BOĞAZİÇİ Ü. MÜHENDİSLİK F. BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2010 - 01/09/2012
Onaylanan Bütçe:	175260.0
Harcanan Bütçe:	162760.0
Öz:	Projemizde merkezi bilişsel radyo ağları için bir çizelgeleme çatısı öneriyoruz. Önerdiğimiz çizelgeleme algoritmaları ikincil kullanıcıların (İK) veri iletiminde merkezi bilişsel baz istasyonuna (BS) hangi frekans, zaman dilimi ve veri hızıyla iletim yapacaklarını belirlemektedir. Çizelgeleyiciler BS kapsamındaki BK?ların rahatsız olmamalarını, İK?ların çarpışmamasını ve iletişimin itimat edilebilir olmasını sağlarlar. İK?ların toplam iş oranını azamileştiren, çizelgeleme gecikmesini asgarileştiren, (ağırlıklı) azami-asgari, ve orantısız açıdan adillik sağlayan, iş oranından tatmin olan İK sayısını azamileştiren ve farklı frekans bantlarına geçişin farklı gecikme maliyetlerini dikkate alan çizelgeleyiciler öneriyoruz.
Anahtar Kelimeler:	Bilişsel radyo ağları, çizelgeleme, kaynak atama.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- An interference aware throughput maximizing scheduler for centralized cognitive radio networks (Bildiri), 2- A Survey of Research on Greening Data Centers (Bildiri), 3- An Interference Aware Throughput Maximizing Scheduler for Centralized Cognitive Radio Networks (Bildiri), 1- An opportunistic pervasive networking paradigm:Multi-hop Cognitive Radio Networks (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 2- null (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 3- Distributed channel selection in CRAHNS: A non-selfish scheme for mitigating spectrum fragmentation (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 4- A Markovian approach for best-fit channel selection in cognitive radio networks (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 5- An Auction Theory Based Algorithm for Throughput Maximizing Scheduling in Centralized Cognitive Radio Networks (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 6- Genetic algorithm-based scheduling in cognitive radio networks under interference temperature constraints (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 7- Throughput and Delay Optimal Scheduling in Cognitive Radio Networks Under Interference Temperature Constraints (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 8- A Spectrum Switching Delay Aware Scheduling Algorithm for Centralized Cognitive Radio Networks (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 9- A Graph Theoretic Approach to Scheduling in Cognitive Radio Networks (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 10- A Fair Scheduling Framework for Centralized Cognitive Radio Networks (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 11- COGNITIVE FEMTOCELL NETWORKS: AN OVERLAY ARCHITECTURE FOR LOCALIZED DYNAMIC SPECTRUM ACCESS (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 12- Throughput Satisfaction Based Scheduling for Cognitive Radio Networks (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm), 13- Green Wireless Communications via Cognitive Dimension: An Overview (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm)