



Bilişsel radyo ağlarında değişen paket boyutlarının enerji tüketimi üzerindeki etkisinin analizi

Analysis of the varying packet sizes effect on energy consumption in cognitive radio networks

Sercan Demirci¹ , Doğan Yıldız^{2,*} 

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

² Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

Öz

Kablosuz iletişim teknolojileri, bu teknolojilere olan ihtiyaç ve taleple doğru orantılı olarak gelişmektedir. Dolayısıyla, bu doğrultuda yapılan çalışmalar günden güne önem kazanmaktadır. Sosyal ağlar, dosya paylaşımı ve çoklu ortam iletişimi gibi yoğun veri trafiği olan uygulamaların artışı, kablosuz iletişimde önemli bir yeri olan spektruma olan ihtiyacı günden güne artırmaktadır. Güncel kablosuz iletişim cihazları, sabit bir spektrum atama tekniği ile çalışmakta ve genellikle spektrumun belirli bölümlerini kullanmaktadır. Bilişsel Radyo Ağları (Cognitive Radio Networks, CRN'ler), spektrumun kullanılmayan ve boşta olan bölümlerine dinamik olarak erişerek en uygun durumdaki iletişim kanalının seçilmesini sağlamaktadır. CR kullanıcıları arasında frekans değişimi sonucu ortaya çıkan enerji tüketiminin azaltılabilmesi amacıyla, kullanıcılar arasındaki iletişimde kullanılan paket boyutunun belirlenmesi önem taşımaktadır. Çünkü, CR kullanıcılarının frekanslarını dinamik olarak değiştirmeleri, kendilerine veri iletişimi için ayrılan zaman dilimlerinde kalan süreyi azaltmaktadır. Azalan bu süre içerisinde en uygun paket boyutunun belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, paket uzunluk değerlerinin CRN'lerdeki enerji verimliliğine etkileri, Python benzetim ortamında farklı değişken parametreleri için nümerik analizler yoluyla incelenmiştir. Bu parametrelerle yapılan incelemeler; birim kanal değişim gücünün ve süresinin paket boyutlarına göre toplam enerjiye etkisi, farklı zaman dilimlerinin paket boyutlarına göre toplam enerjiye etkisi, başarısız gönderim oranının paket boyutlarına göre toplam enerjiye etkisi ve toplam bilişsel sürenin değişimine göre paket gönderim/alım veriminin değişimi şeklinde özetlenebilir.

Anahtar kelimeler: Bilişsel radyo ağları, Kanal değiştirme maliyeti, Paket boyutu, Optimizasyon

1 Giriş

Gelişen kablosuz iletişim teknolojileriyle birlikte kablosuz uygulamaların sayısı günden güne artmış ve bu durum da frekans spektrumunun verimli kullanılması problemini ortaya çıkarmıştır. Frekans spektrumunun

Abstract

Wireless communication technologies are developing directly proportional to the need and demand for these technologies. Therefore, studies in this direction are gaining importance day by day. The increase in applications with heavy data traffic, such as social networks, file sharing, and multimedia communication, increases the need for spectrum, which is essential in daily wireless communication. Current wireless communication devices work with a fixed spectrum assignment technique and generally use certain parts of the spectrum. Cognitive Radio Networks (CRNs) dynamically access the unused and idle parts of the spectrum, allowing the selection of the most appropriate communication channel. It is crucial to determine the packet size used in communication between users in order to reduce the energy consumption resulting from frequency changes among CR users. Because CR users dynamically change their frequencies, reducing the time remaining in the time slots allocated to them for data communication. In this decreasing time, it is also crucial to determine the most suitable package size. In this study, the effects of packet length values on energy efficiency in CRNs were investigated through numerical analyzes for different variable parameters in a Python simulation environment. Investigations made with these parameters can be summarized as follows: The impact of unit channel change power and duration on the total energy according to the packet size, the impact of different time zones on the total energy according to the packet size, the impact of the unsuccessful transmission rate on the total energy according to the packet size, and the variation in the packet sending/receiving efficiency according to the change in the whole cognitive time.

Keywords: Cognitive radio networks, Frequency switching cost, Packet size, Optimization

verimsiz kullanıldığı bir örnek ölçüm Şekil 1'de görülmektedir.

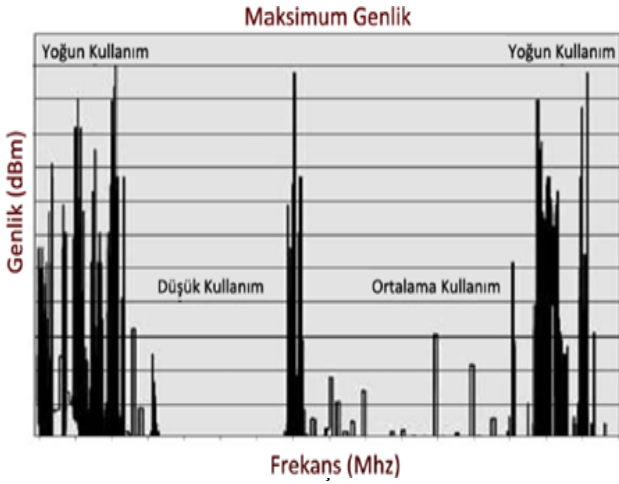
Mevcut frekans bantlarının belirli kablosuz iletişim sistemlerine lisanslı olarak tahsis edilmiş olması, frekans kullanım verimliliğini oldukça düşürmektedir. Bu nedenle, mevcut frekans spektrumunun daha iyi ve verimli

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dogan.yildiz@omu.edu.tr (D. Yıldız)

Geliş / Received: 07.04.2023 Kabul / Accepted: 21.06.2023 Yayınlanma / Published: 15.07.2023

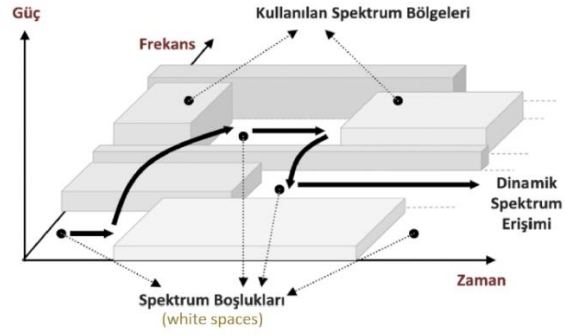
doi: 10.28948/ngumuh.1278682

kullanılması, gelişen teknoloji ile birlikte hem ihtiyaç hem de zorunluluk olarak ortaya çıkmıştır. Bu zorunluluğa çözüm olarak geliştirilen bilişsel radyo ağları (Cognitive Radio Networks, CRN'ler), frekans kıtlığından doğacak iletişim sorunlarını aşmak üzere tasarlanmış bir teknolojidir. Bu teknoloji ile lisanslanmış frekans kanallarının, birincil yani lisanslı kullanıcılar (Primary Users, PU'lar) tarafından kullanılmadığı zaman dilimlerinde fırsatçı olarak bekleyen ikincil kullanıcılara (Secondary Users, SU'lar) iletişim için tahsis edilmesi amaçlanır [1]. PU, adından da anlaşılacağı üzere, kanal üzerinde özel haklara sahip olan, kanalı kullanmaya yetkili kullanıcıdır. Frekansın lisansına sahip olan PU, kanalı kullanmadığı zaman dilimlerinde SU'ların kullanımına açmaktadır. SU'lara literatürde bilişsel kullanıcı da denmektedir [2]. Bazı zaman dilimlerinde boşta kalan lisanslı frekans bantlarının kullanılmasıyla bilişsel kullanıcılara, lisanslı kullanıcılara müdahale etmeden fırsatçı erişim ile ekstra frekans imkânı sağlanacaktır. Ayrıca, dinamik spektrum erişim teknikleri ve heterojen kablosuz mimariler sayesinde birçok cihazın yüksek bant genişliği imkânı olacaktır [1].



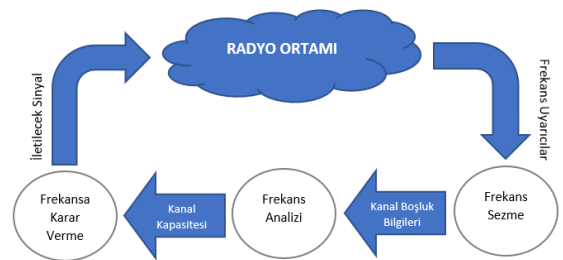
Şekil 1. Spektrum kullanım yoğunluğu [1]

Lisanssız kullanıcılar tarafından frekans bantlarının fırsatçı kullanımı, bazı aşamalardan sonra mümkün olabilmektedir. Bu aşamalar; spektrum algılama, dinamik spektrum yönetimi, iletim parametrelerinin ayarlanması, spektrum değiştirme ve spektrum paylaşma olarak ifade edilebilir. Bu aşamalarda geliştirilen doğru algoritmalar ile lisanssız kullanıcılar frekans spektrumundan en iyi şekilde faydalanabilmektedir [3]. CRN'ler vasıtasıyla spektrumun verimsiz kalan bölümlerine dinamik erişim sağlanarak en iyi ve en uygun durumdaki iletişim kanalının seçilmesine olanak tanınmış olur. İletim parametrelerinin dinamikliği sayesinde kanal değiştirme ve en iyi spektrum elde edilebilir. Bununla birlikte, frekans bantı üzerinde özel haklara sahip olan lisanslı kullanıcının iletişiminin engellenmemesi gerekliliği, CRN'lerdeki en önemli zorunluluklardan birisidir [4].



Şekil 2. Spektrum boşluk yapısı [1]

CRN'ler, geçici bir zaman aralığında kullanılmayan ve Şekil 2'de de gösterildiği gibi "spektrum boşlukları" veya "beyaz boşluklar" olarak bilinen spektrum fırsatçı bir şekilde kullanarak sabit spektrum atama politikası sorununu çözmeyi amaçlar [5]. Bilişsel radyonun alıcı ve vericilerinin çevresindeki frekansları sezmesi, elde ettiği verileri analiz etmesi ve bu verilere bakarak en uygun frekansı seçerek parametreleri üzerinde yapılması gereken değişikliklere karar vermesi gibi özellikleri bilişsel olma özellikleri olarak nitelenebilir. SU açısından bir CRN çevrimi Şekil 3'teki gibidir. Bilişsel ağ ortamında bulunan SU, ilk olarak frekans sezme işlemini yaparak boşta olan kanalları algılar. Bu algılamadan sonra, tespit ettiği kanallar arasında kendi gereksinimlerine en uygun olanı analiz ederek iletişim için kullanacağı frekans kararını verir. Bu çevrimdeki gibi bir süreci olan CRN'de, PU'nun ilgili frekansa dönmesi halinde SU'nun bu bantı ivedi bir şekilde terk etme zorunluluğunun olduğu unutulmamalıdır. Böyle bir durumda da SU aynı çevrimi yeni baştan başlatır veya çeşitli algoritmalar sayesinde yedek olarak belirlediği frekanslara direkt geçiş yapar [6].



Şekil 3. Bilişsel kullanıcı ağ çevrimi [6]

CRN'lerde enerjiye doğrudan etki eden birçok parametre vardır. Frekans algılama, iletim gücü, iletim süresi, paket boyutu bu parametrelere örnek olarak verilebilir. Oluşturulacak CRN yapısında bu parametrelerin optimize edilmesi ve algoritmik olarak düzenlenmesi gerekmektedir [7]. CRN'ler için algılamanın, iletim süresinin ve iletim gücünün enerji verimli olarak optimize edilmesini konu edinen [8] numaralı çalışma, aynı zamanda birincil kullanıcının parazit etkilerden korunmasını da göz önüne almıştır. Bu etkileri ele alarak CRN'ler için enerji verimliliğini en üst düzeye çıkaran yinelemeli bir alt optimal

algoritma tasarımı elde etmeyi hedefleyen yazarlar, bu etkilerin enerji tüketimindeki rollerini de çalışma kapsamında sunmuşlardır. Ayrıca, tek bir SU için iletim ve algılama süresinin ortak optimizasyonu ve iletim gücünün enerji verimliliği üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Geliştirilen algoritmaların analizlerini, oluşturdukları benzetim ortamında yapmışlardır. Yapılan testlerin sonuçları, önerilen sistemin enerji verimliliği maksimizasyonu ve karmaşıklık yapısı yönünden mevcut çalışmalara göre daha iyi sonuçlar elde ettiğini göstermiştir. [9] numaralı çalışmada, CRN'nin enerji verimliliğini en çok etkileyen SU'ların enerji tüketimi analiz edilmiştir. SU'ların değişen ağ koşullarına göre toplam enerji tüketiminin bir analizi sunulmuş ve SU'ların bu koşullardaki toplam enerji tüketimleri araştırılmıştır. Sunulan analiz, SU'ların ağ içerisindeki her bir durumunu içermekle beraber toplam enerji tüketiminin azaltılarak ağ ömrünün uzatılmasına yönelik çözümler de içermektedir. SU'lar arasındaki başarılı iletim durumunda oluşan enerji tüketimleri, çarpışma analizleri, boşa kalma ve uyku durumu, kanal tarama ile geri çekilme süreçleri incelenmiştir. Analizler ile elde edilen sayısal sonuçlar, ağdaki enerji tüketimi üzerinde SU sayısının ve kanalları taramak için geçen sürenin oldukça etkili olduğunu ortaya konmuştur. [10] çalışması, CRN'lerde çok kanallı frekans erişiminin enerji verimliliğini incelemiştir. Bu çalışmada, CRN kullanıcısının frekanslar arası geçişler yapması ve tek bir frekansta frekansın müsait olmasını beklemesi durumlarının enerji verimliliğine etkisi konu edilmiştir. Tek bir frekansın bilişsel kullanıcıya tahsis edilmesi, daha az iletim fırsatına sebep olsa bile bu eylemin frekans geçişlerinden kaynaklanan enerji verimsizliğini ortadan kaldırdığı söylenebilir. Yani, enerjisi kısıtlı cihazlara statik bantlar tahsis edilebilir. Çalışma [11], bilişsel radyo sensör ağları (Cognitive Radio Sensor Networks, CRSN) için enerji açısından verimli bir algılama protokolü tasarlamayı hedeflemiştir. Bu çalışma; kanal değiştirme, karar verme ve hesaplama gibi enerji tüketen eylemlerin tükettiği enerjii azaltmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, enerji verimli ve işbirlikçi şemalar sunulmuştur. Önerilen şemalar, kanal algılamada tüketilen enerjii azaltmak için rastgele kanal algılama ve basitleştirilmiş birleştirme kullanmıştır. Yapılan testler sonucunda, önerilen şemaların genel olarak yarı yarıya bir oranla enerjiden tasarruf sağladığı görülmüştür. Karar alma süresinin de %30-%90 oranında azalması, önerilen şemaların emsallerine kıyasla oldukça iyi performans göstermesini sağlamıştır. Yine önerilen şemalar için, yanlış algılama oranı da test edilmiş ve benzer çalışmalar ile hemen hemen aynı değer elde edildiği gözlenmiştir. CRN'lerde spektrum algılama, iletişimde anahtar süreç olarak karşımıza çıkmaktadır. Algılama esnasında enerji tüketimi, ek gecikme, PU güvenliğini tehdit etme gibi hususlar kurulacak sistemin ana noktaları olmaktadır. Çalışma [12]'de CRN'lerde işbirlikçi spektrum algılama sırasında optimal spektrum algılama süresi ve SU sayısına bağlı olarak spektrumun ikincil kullanımında verim optimizasyonuna odaklanılmaktadır. CRN'ler için verimliliği optimize edilmiş spektrum algılama tasarımının optimum algılama süresi ve optimum SU sayısı gibi iki ana parametreye göre yapılabileceği düşünülmüştür. Optimum

algılama süresi ile SU'ların toplam ortalama veriminin en üst düzeye çıkarılması ve optimum SU sayısı ile de toplam iş hacminin en üst düzeye çıkarılması hedeflenmiştir. Her kanal için algılama süresi ve SU'ların sayısının optimum değerleri birlikte analiz edilmiştir. Önerilen yöntemin performans değerlendirmesi için gerekli benzetim, MATLAB ortamında kurulmuştur. Literatürdeki çalışmalar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve önerilen sistem sayesinde iş hacminde %91'e yakın bir kazanç, algılama süresindeki düşüş ile de verimlilikte %98'e yakın bir iyileştirme olduğu gözlemlenmiştir.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, paket boyutunun düğümler arasındaki iletişim performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yapılan araştırmalara göre, boyutu uzun olan paketlerin kanal üzerinde sert koşullar oluşturduğu ve buna bağlı olarak yüksek kayıpların söz konusu olabileceği; daha kısa paketlerin ise yüksek veri ek yüküne neden olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, sabit olarak belirlenmiş bir paket boyutunun ağ içerisinde dezavantaj oluşturması muhtemel bir durum olarak gözükmektedir. Bu noktada, değişen ağ koşullarına göre dinamik olarak belirlenen paket boyutu optimizasyonun önemi ortaya çıkmaktadır.

Paket boyutu optimizasyonu, değişen kanal koşullarına göre paket boyutunun dinamik bir şekilde ayarlanması olarak tanımlanabilir. Ağ performansını en üst seviyeye çıkarmak amacıyla ağ durumuna göre paket boyutunun sistematik tahsisi, paket boyutu optimizasyonu kapsamında gerçekleştirilir. Paket boyutu optimizasyonu, sadece sürekli değişen bir paket boyutunu temsil etmemektedir. Tersine, ağır duruma göre paket boyutu için doğru optimizasyon türünün seçilmesini ifade etmektedir. Bu noktada, 3 farklı optimizasyon grubundan bahsedilebilir:

1. Sabit paket boyutlu optimizasyon yaklaşımı,
2. Dinamik paket boyutlu optimizasyon yaklaşımı,
3. Matematiksel optimizasyon çerçeveleri.

Bu üç yaklaşımın birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Kurulan ağ sistemi üzerinde analizler yapılarak paket boyutunun sistematik dizaynı için hangi yaklaşımın uygun olduğu belirlenmelidir. Değişen ağ koşulları, bu yaklaşımların performansını doğrudan etkilemektedir. Sabit paket boyutu yaklaşımı; kolay, uygulanabilir ve daha az ek yük oluşturmasından dolayı avantajlı gözükse de, bu yaklaşım, değişen ağ koşullarına göre dinamik bir paket boyutu belirleme yeteneğinden yoksun olduğundan tekrar gönderim ve fazla enerji tüketimi gibi sorunlara sebep olabilmektedir. Dinamik paket boyutlu optimizasyon yaklaşımının kanal durumuna göre paketler üretmesi, ağ verimini olumlu yönde etkilemektedir. Ancak, bu yaklaşımın gereksiz yere ağ çerçevesi içerisinde kullanılması, özellikle enerji-kısıtlı cihazlar üzerinde verimsizliğe neden olabilmektedir. Matematiksel optimizasyon çerçeveleri ise, güç tüketimini en aza indirerek verimi artırmaktadır. Ancak, bu yaklaşım da kaynakları kısıtlı ağlar için uygulanması zor bir seçenek olarak görünmektedir. Yaklaşımların bu avantaj ve dezavantajlarından yola çıkarak kurulan ağ yapısına göre paket boyutu optimizasyonun doğru tercihi, elde edilecek

verimi olumlu yönde etkileyecektir [13]. CRN'lerde iletim paket boyutunun ve kanal seçim mekanizmasının optimizasyonunu ele alan çalışma [14], enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı hedeflemektedir. SU tarafından seçilen kanala göre dinamik paket boyutu yönteminin kullanılması, hem sistemin performansını olumlu yönde etkilemiş hem de bu sayede enerji verimliliğinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Çok kanallı CRN'lerde enerji verimliliği ve ağ ömrü iyileştirilmesi ile ilgili incelemeler çalışma [15]'de yapılmıştır. İyileştirmenin iki ana dayanağı bulunmaktadır. Bunlar, paket boyutu optimizasyonu ve sensör enerjisinin farkındalığından faydalanarak kanal atamasının yapılmasıdır. Paket boyutu optimizasyonu ile değişen kanal koşullarına göre en uygun boyuttaki paketler başarıyla iletilerek sensörlerin pilinin verimli bir şekilde kullanılması amaçlanmıştır. Enerji farkındalıklı kanal atamasının yapılmasıyla da rastgele kanal atamaya göre ağ ömrünün uzatılacağı öngörülmüştür. Çalışma, kanal durumlarının zamanla değişen performansları için makine öğrenmesi tahminlemesinden faydalanılarak geliştirilmiştir. Paket boyutu optimizasyonu ve bilinçli kanal atama algoritması, CRN'lerde enerjinin verimli kullanılması noktasında oldukça başarılı sayılabilecek iki temel gelişme olarak görülebilir. İlgili çalışma kapsamında bu iki temel üzerine yapılan araştırmaların ağ ömrünü iyileştirmeye olumlu katkı sağlamıştır. Kurulan sistem, benzetim ortamında test edilmiş ve elde edilen sonuçlar mevcut değerlerle kıyaslanmıştır. Paket boyutu optimizasyonu, bit başına enerjiyi en aza indirmek ve hem PU davranışından hem de sensör etkinliğinden gelen mevcut bilgilerden yararlanmak için kullanılır. Bu sayede, sensörlerin kullanım ömrü boyunca enerji verimliliği artırılmış olur. Ancak, bu çalışmada ağ içerisindeki kusur durumları ve hatalı iletim gibi olasılıklar göz ardı edilmiştir. Bu durumların da mevcut ağ yapılarında olabileceği düşünüldüğünde, bu durum bahsedilen çalışma için eksik olarak görülebilir. Çalışma [7], CRSN'ler için dinamik paket boyutu optimizasyonu ve kanal seçim şeması önermiştir. Optimizasyon problemini hizmet kalitesi kısıtlamalarıyla çözmek için Markov sürecinden faydalanılmıştır. Çalışmadaki amaç ise; kabul edilebilir bir giriş seviyesi, gecikme ve bit hata oranı korunurken, enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve mevcut en iyi kanalı ve en uygun paket boyutunu belirlemek olmuştur. CRSN'ler için dağıtılmış bir ortak kanal seçimi, dinamik paket boyutu optimizasyon şemasının önerilmesi, optimizasyon probleminin kısıtlı bir Markov karar süreci olarak modellenmesi ve algoritmanın karmaşıklığının değerlendirilerek önerilen sistem performansının CRSN'lerdeki mevcut paket kontrol şemasıyla karşılaştırılması bu çalışmanın katkıları olarak sıralanabilir. Optimum paket boyutu ve kanal belirlenirken göz önüne alınan bazı parametreler; iletim verimliliği, enerji verimliliği, spektrum kullanımı, uçtan uca gecikme ve PU müdahalesi olmuştur. Önerilen yöntemin benzetim ortamında testi sonucunda, hem paket boyutunun hem de kanal seçiminin sistem performansı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Servis kalitesinde bu çalışma ile yapılan iyileştirmeler mevcut çalışmalar ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda görülmüştür.

Bir CR cihazının çalışma frekansını değiştirilmesi, güç yükselteçlerinin sık aralıklarla ayarlanmasına ve dolayısıyla frekans değiştirme gecikmesi, frekans değiştirme gücü gibi durumların oluşmasına neden olmaktadır [16, 17]. Bu iki durum birlikte, frekans değiştirme nedeniyle tüketilen enerjiyi belirlemektedir. Frekans değiştirmenin maliyeti, çalışma frekans aralığı dar olduğunda ihmal edilebilmektedir. Ancak, CRN'ler genel olarak geniş bir frekans aralığında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Dolayısıyla, hem frekans değiştirme gecikmesi hem de frekans değiştirme gücü önemli parametrelerdir. Ek olarak, CRN'lerde PU'ların operasyonlarının olumsuz etkilenmediği garanti edilmelidir. Bu amaçla, CR cihazlarının boş frekansları algılama yetenekleri olmalıdır.

Frekans geçiş enerjisinin frekans geçiş gecikmesi ve frekans geçiş gücü gibi iki bileşeni bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar frekans geçiş gücünün CR cihazları için önemini ortaya koymaktadır. Hatta, bu konuda yapılan araştırmalar frekans geçiş gücünün iletim gücü kadar yüksek olabileceğini göstermektedir. Örneğin, [18-20] incelemelerinde, RT2860 sürücüsü ile Linux sisteminde çalışan Ralink 802.11n kablosuz kartının deneysel ölçümleri verilmiştir. Bu çalışmalarda, veri paketlerini iletmeye harcanan gücün frekans geçişi için tüketilen güç (P_{sw}) ile aynı olduğu (her ikisi de 750 mW) sonucuna ulaşılmıştır. Benzer şekilde, [21] çalışması benzetimlerinde frekans geçiş gücünü 1000 mW olarak ayarlamıştır.

Başka bir deyişle, frekans geçiş gecikmesi, CR cihazının geçiş yapacağı uygun kanalı tespit etmesinin ardından frekans sentezleyicinin donanım geçişi için harcadığı gecikmeyi ifade etmektedir. Bu gecikme, voltaj kontrollü osilatörün giriş ve çıkış frekanslarının pozisyonlarına bağlıdır. Yani, bu frekans değişimi cihazlar tarafından adım adım gerçekleştirirler ve bu sayede sonraki frekanslara geçiş zamanı uzar [16], [18, 22-24]. [25] çalışmasında, verimlilik üzerine bahsedilen frekans geçiş gecikmelerinin etkisi incelenmiştir. [16], [22, 24], [21, 26-30] gibi ilgili diğer çalışmalarda da frekans geçiş gecikmesinin frekans mesafesine bağlılığı araştırılmıştır. Frekans geçişi için gerekli olan süre, bu işlem için tüketilen enerjiyi de etkilediğinden ilgili süre optimize edilmesi gereken önemli bir değişkendir. [31] çalışmasında, çok sekmeli ve tek alıcı-vericili CR ağlarında enerji verimliliğinin optimizasyonu amacıyla frekans değiştirme maliyeti dikkate alınmıştır. [32] çalışmasında, CR cihazları farklı frekans bantlarına geçiş yaparken oluşan frekans mesafesine bağlı enerji tüketimi dikkate alınarak, yönlendirme problemini IoT ağları için ele alınmıştır.

CRN'lerde frekans değiştirme maliyeti, genellikle gecikme parametresiyle incelenmiştir [16], [18, 22], [27-29]. Bu çalışmaların çoğunluğu frekans geçiş maliyetinin sabit olduğunu varsayarak, bahsedilen maliyetin frekanslar arasındaki mesafeye olan ilişkisini göz ardı etmektedir. Son günlerde, frekans geçişinde frekans mesafesinin enerji verimliliğine olan bağımlılığı da araştırmacılar tarafından ilgi duyulan konular arasında gelmektedir [33-36].

Bir paketin boyutu, kablosuz veri iletişimlerinin kalitesi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Her şeyden önce, uzun

paketlerle karşılaştırıldığında, kısa paketlerin hataya açık kablosuz kanallardan etkilenme olasılığı daha düşüktür. Ancak, kısa paketler de başlıklar nedeniyle ek yüke maruz kalır. Bu nedenle, paketin kanal hatalarından zarar görmemesi ve ek yükten etkilenmemesi için uygun bir paket boyutunun seçilmesi önemlidir. Ayrıca, SU hareketliliğinin neden olduğu kanal sönümlenmesi de SU paket boyutu üzerinde belirli bir etkiye sahiptir. Daha da önemlisi, SU paket boyutu üzerindeki tüm etkiler zaman ve mekâna göre sürekli değişir. Bu da bu konuyu son derece zorlaştırır. SU paket boyutunun dikkatli bir tasarımı olmadan, hem SU hem de PU iletimleri ciddi performans düşüşüne maruz kalabilir. CR ağlarındaki önceki çalışmaların çoğu, SU paket boyutunun ağ performansı üzerindeki etkisini dikkate almamaktadır. Ek olarak, CR ağlarındaki mevcut çalışmaların çoğu yalnızca hem SU'ların hem de PU'ların statik olduğu sabit ağlara odaklanmaktadır. Bununla birlikte, gelecekteki mobil cihazların CR işlevselliğini içerecekleri ve bir mobil senaryoda iletişim parametrelerini optimize edebilecekleri öngörülebilir. Bu çalışmada, mobil CR ağlarında sönümlenme kanalları altında optimal SU paket boyutu sorunu incelenmiştir. Bu etkiler, matematiksel olarak modellenmiş ve en uygun SU paket boyutunu elde edilmiştir. SU paket boyutunun hem SU hem de PU iletişimde önemli bir rol oynadığı ve bu nedenle dikkatli bir tasarıma ihtiyaç olduğu gösterilmiştir. Yani, CRN'lerde frekans değiştirme maliyeti dikkate alınarak paket boyutunun optimize edilmesi hedeflenmiştir. Bilişsel ağın temel değişkenlerinin değişiminin paket boyutlarına göre toplam enerjiye etkisi analiz edilerek optimum sonuçlar hakkında değerlendirmeler sunulmuştur. Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: II. bölümde, ele alınan CRN ağının sistem modeli ve bu ağın enerji tüketim modeli ile ilgili detaylı bilgiler sunulmuştur. III. bölümde, frekans değiştirme maliyeti farkındalıklı paket boyutu optimizasyonunun analizini ve sonuçlarını içermektedir. IV. bölümde de çalışmada elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

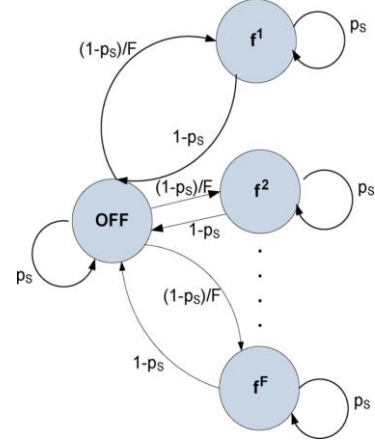
2 Materyal ve metot

Bu bölümde, çalışma kapsamında ele alınan CRN ağının sistem modeli ve bu ağın enerji tüketim modeli ile ilgili detaylı bilgiler sunulacaktır.

2.1 CRN ağının sistem modeli

CRN, yönlü bir $G = (V, E)$ çizgesi ile ifade edilmektedir. V , CR düğümlerini ve E ise bu düğümler arasında bulunan iletişim linklerini temsil etmektedir. Lisanslı frekans bantlarının kümesi de $F = [1, f, \dots, F]$ olarak ifade edilmektedir. PU'ların $f \in F$ bandı üzerindeki aktiviteleri, f bandının kullanılabilir durumda olup olmamasına bağlıdır. Bu çalışmada, klasik bir CRN'de olduğu gibi, ortamda PU'lar ve SU'lar bulunmakta ve bu kullanıcılar gönderici/alıcı şeklinde görev almaktadır. Her bir lisanslı kullanıcının kendine ait frekansın olmasından ötürü, PU sayısı ile frekans sayısı eşittir. Diğer yandan, PU, dolayısıyla frekans sayısı, elde edilecek sonuçları etkileyen bir değişkendir. SU'lar için frekansların uygun olup olmadığı, Markov Süreci ile kurgulanmıştır. PU'ların frekans kullanım davranışının modellendiği Markov süreci Şekil 4'te yer almaktadır [37]. Markov sürecinde PU'nun kapalı veya açık

olma durumu modellenmiştir. PU'nun kapalı veya açık olması, frekansın boş veya dolu olması anlamına gelir ve bu durumun ihtimali p_s ile temsil edilir. p_s değeri SU'nun harcayacağı enerjiye doğrudan etki eder ve bu etkinin analizi de bu çalışma kapsamında yer almaktadır.



Şekil 4. PU Frekans doluluk modeli [37]

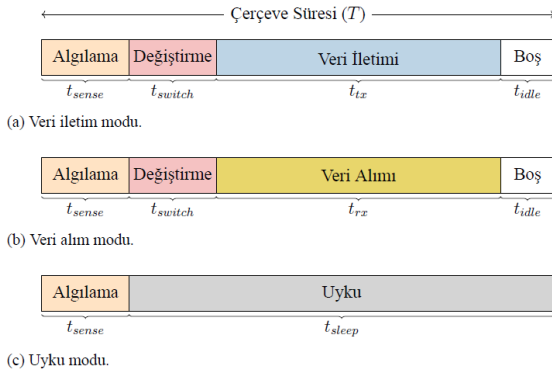
SU'nun frekans algılama esnasında frekansların durumu ile ilgili karşılaşılabileceği 4 ihtimal bulunmaktadır. Bunlar:

1. Frekans boş iken SU'nun boş algılaması
2. Frekans boş iken SU'nun dolu algılaması
3. Frekans dolu iken SU'nun boş algılaması
4. Frekans dolu iken SU'nun dolu algılaması

Bu seçeneklerden SU'ların iletişim koşullarına uyan tek seçenek bulunmaktadır ve bu da ilk seçenektir. Diğer seçenekler SU için gönderim ve alıma uygun olmadıklarından, algılama esnasında faydasız enerji tüketimine neden olurlar. Hatta 3. seçenek, CRN'ler için PU'nun haklarını ihlal ettiği için karşılaşılmaması istenmeyen bir seçenektir. Bu kapsamda, SU'nun mevcut frekansın durumunu doğru tespit etmesi oldukça önemli bir husustur.

2.2 Enerji tüketim modeli

Gönderici ve alıcı arasında l_{ij}^f gibi bir link olduğunu varsayalım. Buna göre, Şekil 5'te verilen çerçeve kullanılarak l_{ij}^f linki üzerinde harcanan enerji biçimlendirilebilmektedir. i ve j gibi iki CR düğümünün öncelikle, l_{ij}^f linki üzerinde boş olabilecek f frekansını algılama yetenekleri olmalıdır. Sonrasında, i düğümünün veri iletişimi yapabilmesi amacıyla antenini f frekansına getirmesi gerekmektedir. Benzer şekilde j düğümünün de, i düğümünden gelen veriyi alabilmesi için antenini f frekansına getirmelidir. Veri iletişimi tamamlanmasının ardından düğümler, arta kalan zaman diliminde boş duruma geçmektedirler. Hiçbir şekilde veri transferinde bulunmayan düğümler ise uyku modunda kalmaktadırlar. Bu çalışmadaki CRN tasarımında, [34, 38] çalışmalarında önerilen enerji tüketim modeli baz alınmıştır.



Şekil 5. Çerçeve Yapısı

l_{ij}^f linki üzerinde enerji harcanmasına neden olan ve Şekil 5'te özetlenen süreçler aşağıdaki gibi detaylandırılabilir:

2.2.1 Algılama

CR düğümlerinin frekans kaynaklarından dinamik olarak yararlanabilmesi için iletişimden önce algılama yapmaları gerekmektedir. Algılama işlemi sırasında tüketilen enerji E_{sense} , Denklem (1)'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$E_{sense} = P_{sense} \times t_{sense} \text{ Joule} \quad (1)$$

Burada, E_{sense} algılama işlemi için harcanan enerjiyi, t_{sense} algılama işlemi için harcanan toplam süreyi ve P_{sense} ise algılama sırasında birim zamanda harcanan gücü temsil etmektedir.

2.2.2 Değiştirme

SU'ların gönderim için en uygun frekansı seçmesi, enerji açısından verimli bir yaklaşımdır. Ancak bu çalışmada, en uygun frekansın seçilmesi yerine rastgele seçim yapılması tercih edilmiştir. Bu sayede, frekans değiştirme maliyetinin SU'lar için ne kadar önemli olduğu görülecektir. Mevcut frekanslar arasından rastgele bir seçim yapılarak gönderici ve alıcı SU'nun bu frekansa geçmesi sağlanmıştır.

SU'lar, algılama ve karar verme işlemini yaptıktan sonra uygun frekansa geçiş işlemini yaparlar. Bu geçiş işlemi belirli bir sürede gerçekleşir. t_{switch} ile ifade edilen algılanan frekansa geçiş süresi; t_{delay} ile ifade edilen 1 Mhz frekans değişimi için geçen süreye, f_{step} ile ifade edilen frekanslar arası Mhz cinsinden uzaklığa ve bulunulan frekans ile algılanan frekans arası uzaklığa bağlıdır. Bu durum, Denklem (2) ile modellenmiştir [39].

$$t_{switch} = |f - f'| \times t_{delay} \times f_{step} \text{ s} \quad (2)$$

Aynı zamanda SU'lar tarafında da frekansa geçiş için enerji tüketimi olacaktır ve bu da bu çalışmada incelenen konulardan biridir. Frekans geçişinde harcanan toplam enerji; algılanan frekansa geçiş süresine ve frekanslar arası geçişte birim zamanda tüketilen güce bağlıdır.

Frekans geçiş işlemi, hem alıcı hem de verici CR'ler tarafından yapılacağı için bahsi geçen enerji hesabı her iki taraf içinde yapılmalıdır. Bu noktada, dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise gönderici ve alıcı arasındaki iletişimin başlaması için her iki tarafın da hazır durumda olması gerekliliğidir. Bu senaryoda harcanan enerji, E_{switch} Denklem (3)'teki gibi hesaplanmaktadır [39].

$$E_{switch} = P_{switch} \times t_{switch} \text{ Joule} \quad (3)$$

2.2.3 Veri iletimi

Bilişsel radyo alıcı ve verici kullanıcıları arasındaki hat kapasitesi, Denklem 4'te verilen Shannon formülü kullanılarak hesaplanır. Burada C_{ij}^f link kapasitesini, W_{ij}^f bant genişliğini, SNR_{ij}^f bilişsel alıcı için sinyal-gürültü oranını ve p_{ij}^f de f frekansının link üzerinde kapalı durumda olma olasılığını ifade eder.

$$C_{ij}^f = W_{ij}^f \times (1 + SNR_{ij}^f) \times p_{ij}^f \text{ bits/s} \quad (4)$$

Veri iletimi için harcanan enerjinin büyüklüğü iletim süresine bağlıdır. İletim süresi ise L paket boyutu ve C_{ij}^f link kapasitesine bağlıdır. Dolayısıyla, f frekansını kullanan l_{ij} linki üzerinde veri iletimi için geçen süre $t_{tx}^{ij,f}$, Denklem (5)'teki hesaplanabilir:

$$t_{tx}^{ij,f} = \frac{L}{C_{ij}^f} \text{ s} \quad (5)$$

CR düğümleri veri transferi için zamanlanmaları esnasında da enerji harcamaktadırlar. SU'da donanımsal olarak harcanan $P_{circuit}$ gücünün hesabında; β , SU'nun donanımından kaynaklı bir bileşeni, η , amplifikatör verimliliğini ve P_{tx} veri iletiminde birim zamanda harcanan gücü ifade etmektedir [38].

$$P_{circuit} = \beta + \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \times P_{tx} \text{ Watt} \quad (6)$$

Nihayetinde, veri iletiminde harcanan enerji olan E_{tx} , iletimde birim zamanda harcanan güce, donanımsal kaynaklı harcanan güce ve iletimin toplam süresine bağlı olarak Denklem (7)'deki gibi hesaplanır [38].

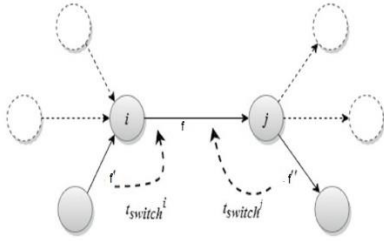
$$E_{tx} = (P_{tx} + P_{circuit}) \times t_{tx}^{ij,f} \text{ Joule} \quad (7)$$

Hat üzerinde iletilen verinin paket boyutuna bağlı olarak toplam verinin alıcı tarafa ulaşma süresi de değişecektir. Bu da harcanacak toplam enerjiyi doğrudan etkiler. Büyük paket boyutu toplam verinin iletim süresini her ne kadar kısaltacak olsa da paket kaybı durumunda o paketin tekrar iletilmesi, harcanacak enerjiyi küçük paket boyutuna oranla arttıracaktır. Tersine, küçük paket boyutunun tercih edilmesi

de toplam verinin iletim süresini arttıracak gibi görünse de paket kaybı durumunda tekrar iletimlerde harcanacak enerji, büyük paket boyutuna oranla daha düşük olacaktır. Dolayısıyla, paket boyutunun hattın kapasitesine ve verimlilik durumuna göre belirlenmesi daha doğru olacaktır.

2.2.4 Veri alımı

Kullanıcılar arasında veri alışverişi belirli bir zaman çerçevesi kapsamında gerçekleşir. Zaman çerçevesi tamamlandığında kullanıcıların o frekansı terk etmesi ve frekansın uygun olduğu süreçte ise veri alışverişini sürdürmesi gerekir. Bu çalışmada, frekansın SU'ların kullanımına uygun olduğu varsayılarak zaman kısıtları her döngüde yeniden başlatılmıştır. Ancak, paket boyutlarının zaman döngüsünde ne kadarlık bir çevrime etki ettiğini incelemek amacıyla, belirlenen verinin tamamen gönderiminin ihtiyaç duyacağı döngü sayısı da kayıt altına alınmıştır. SU'ların veri alışverişi için tanımlanan döngü süresi; frekans algılama, frekansa geçiş, parametre ayarlamaları, gönderici ve alıcının aynı anda hazır olmaları ve gönderim/alım işlemlerini içermektedir [40].



Şekil 6. Bir frekans değiştirme örneği

Bilişsel gönderici tarafından hatta gönderilen paketler, bilişsel alıcı tarafından alınırken de enerji tüketimi yaşanacaktır. Bu tüketim E_{rx} ile ifade edilirse, Denklem (8)'e göre, 1 bitlik verinin alınması sırasında harcanan enerji olan $E_{rx/bit}$ 'in ve paket boyutu L 'nin alıcı tarafta harcanacak enerjiyi etkilediği söylenebilir [34]:

$$E_{rx} = E_{rx/bit} \times L \text{ Joule} \quad (8)$$

2.2.5 Boş

Boş durumdaki alıcı, veri almaya hazırdır. Ancak, herhangi bir veri alımı yapmaz. Alıcının birçok parçası donanımsal olarak aktiftir. Gönderici, veri iletiminin ardından zaman dilimini bitene kadar boş durumda kalmaktadır. Boş durumdaki düğüm, P_{idle} ile ifade edilen gücü harcamaktadır. Boş durumda kalma süresi ise $(T - t_{sense} - t_{switch}^{ij,f} - t_{tx}^{ij,f})$ saniye formülü ile hesaplanmaktadır. Boş durumda bulunan düğümün harcadığı enerji E_{idle} Denklem (9)'daki gibi hesaplanmaktadır [34]:

$$E_{idle} = P_{idle} \times (T - t_{sense} - t_{switch}^{ij,f} - t_{tx}^{ij,f}) \text{ Joule} \quad (9)$$

Bilişsel radyo kullanıcıları, veri gönderim ve alımını yaptıktan sonra zaman döngülerinden arta kalan vakit boyunca boş olarak beklemektedirler. Boş durumda bekleyen bilişsel kullanıcılar da yine birim zamanda harcanan güce bağlı olarak E_{idle} ile ifade edilen enerjiyi tüketmektedirler. Kullanıcılar için belirlenen zaman diliminden; algılama, frekans değişimi ve iletimden arta kalan süre boyunca boşta bekleme birim zamanda tüketilen gücü, P_{idle} ile değişen bir enerji harcanır [41].

2.2.6 Uyku

Uyku durumundaki düğümler tüm parçalarını donanımsal olarak OFF konumuna almaktadırlar. Eğer veri iletimi için algılanan frekans müsait değilse ilgili düğüm, bu zaman dilimi için uyku moduna geçmektedir. Uyku modunda geçirdiği süre $T - t_{sense}$ saniye ve harcadığı güç ise P_{sleep} kadardır. Uyku modunda tükettiği enerji E_{sleep} ise Denklem (10)'daki gibidir [34]:

$$E_{sleep} = P_{sleep} \times (T - t_{sense}) \text{ Joule} \quad (10)$$

Bahsi geçen süreçler dikkate alındığında, f frekansını ve ij linkini kullanan alıcı (i) ve verici (j) CR düğümlerinin harcadığı toplam enerji, E_{ij}^f , Denklem (11)'deki gibi ifade edilmektedir. Ayrıca, Şekil 6, bir frekans değiştirme örneğini göstermektedir [32].

$$E_{ij}^f = 2P_{sense}t_{sense} + (P_{switch}t_{switch}^i + P_{switch}t_{switch}^j + P_{idle}(\max(t_{switch}^i, t_{switch}^j) - \min(t_{switch}^i, t_{switch}^j))) + (P_{tx} + P_{circuit})t_{tx}^{ij,b} + E_{(rx/bit)}L + 2P_{idle}(T - t_{sense} - t_{switch}^{ij,b} - t_{tx,rx}^{ij,b}) \text{ Joule} \quad (11)$$

İnternet ağlarında verinin %100 olasılıkla alıcı uca teslim edileceği garanti edilmez. Hat üzerinde paketin kaybolması olası durumlardan biridir. Dolayısıyla, bu ihtimal de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kapsamda, verinin alıcı uca ulaşmama ihtimali üzerinden tekrar gönderimlerin hesaplanması gerekmektedir. Alıcısına ulaşmayan paketlerin gönderici tarafından tekrar iletim hattına verilmesi ve hat üzerinden alıcısına ulaşması, ek enerji tüketimine sebep olacaktır. Bu da CRN'lerde en istenmeyen durumlardan birisidir. Bu çalışmada, paketlerin başarılı şekilde alıcı tarafa ulaşmama ihtimali ile ek enerji tüketimi hesabı da yapılmıştır. Değişik paket kaybı oranları ile paket kayıplarının toplam enerjiye nasıl etki ettiği bu çalışmada yapılan analizler arasında yer almaktadır.

CRN'lerde başarılı bir iletişim modeli yukarıda izah edilen süreçlerden geçmektedir. Frekans değiştirme maliyeti dikkate alınarak paket boyutu frekans değiştirme süresine ve harcanan enerjiye etkisi ile ilgili yapılan benzetim sonuçları bir sonraki bölümde yer almaktadır.

3 Bulgular ve tartışma

CRN'leri diğer ağlardan ayıran en önemli fark, gönderici ve alıcı birimlerin frekanslar arasında geçiş yapmasıdır. Bu

geçiş işlemi enerji açısından maliyetli olduğundan pil kapasitesi kısıtlı cihazlar için sorun oluşturabilecektir. Bu bölümde de özellikle pil kapasitesi kısıtlı cihazlara bir ön veri olabilmesi amacıyla, bu çalışmada elde edilen sayısal sonuçların analizi yer almaktadır. Bu sonuçların eldesinde kullanılan bazı temel parametreler ve değerleri Tablo 1'deki gibi kabul edilmiştir.

Tablo 1. Bu çalışmada kullanılan temel Sayısal değerler

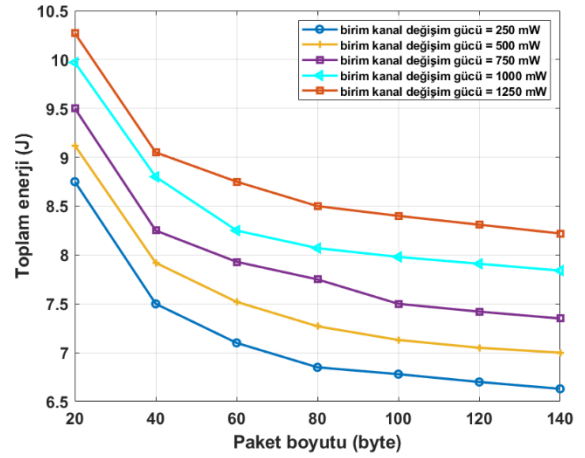
Sembol	Parametre	Değer
isleme_suresi	Paket İşleme Süresi	5 ms
dosya_boyutu	İletilecek Toplam Veri Boyutu	200 byte
frekans_adimi	İki frekans Arası Uzaklık	20 Mhz
P_n	Alıcı Tarafın Gürültü Gücü	-115
P_ant_output	Anten Çıkış Gücü	-7
X_sigma	Standart Sapma	1.42 dB
d_0	Referans Mesafe	1 m
d_ij	Alıcı-Verici Birimler Arası Mesafe	5 m
n	Sinyalin Bozulma Hızı	3.69
Y_0	Referans Mesafedeki Yol Kaybı	31 dB
E_rx_bit	Alıcı Birimin 1 Bitlik Veri Alımı İçin Harcadığı Enerji	5 nj/bit
η	Amplifikatör Verimliliği	0.9
B2	Düğümün Donanımdan Kaynaklı Komponenti	0.1 ms/Mh
SNR	Alıcı Birimin Sinyal-Gürültü Oranı	5
bant_genisligi	Hattın Bant Genişliği	5 Mhz
P_isleme	Paketi İşlerken Harcanan Birim Süredeki Güç	750 mW
P_uyku	Uyku Modunda Birim Sürede Tüketilen Güç	10 mW
P_link	Veri İletiminde Birim Sürede Harcanan Güç	750 mW
P_bos	Boş Durumda Birim Sürede Harcanan Güç	500 mW
P_degisim	Kanal Değişim İçin Birim Zamanda Harcanan Güç	750 mW
P_algilama	Algılama İçin Birim Zamanda Harcanan Güç	110 mW
t_algilama	Algılama Süresi	2.5 ms

Gönderici taraf, paketi hatta göndermeden önce ön işlemeden geçirir. Ön işlemede geçen süre ve birim işlemede tüketilen enerji, paketi işlemede harcanacak toplam enerjiye etki eder. Paket işleme süresi 5 ms olarak belirlenmiş ve birim sürede harcanan güç 750 mW olarak alınmıştır.

Bu çalışmada, paket boyutları 20, 24, 30, 40, 60, 120 ve 240 byte olacak şekilde alınmış ve her bir paket boyutunun

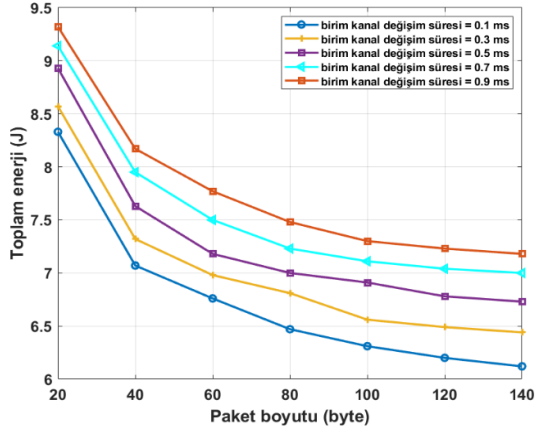
çeşitli bilişsel radyo elementleri ile optimize değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bilişsel kullanıcılar kanal algılama işlemini yaptıktan sonra uygun frekansı bulur ve frekanslar arasında geçiş yaparak gönderim ve alım işlemini gerçekleştirirler. Frekanslar arası geçişin enerji maliyetini etkileyen en önemli noktalardan birisi de iki ardışık frekans arası geçiş yapılırken harcanan birim güçtür. Bu birim güç değişiminin harcanan toplam enerjiye etkisi, paket boyutu farkındalıklı olarak Şekil 7'de yer alan grafik ile analiz edilmiştir. Grafikte birim güç üzerine beş farklı analiz bulunmaktadır. Buradan, birim kanal değişim gücünün artmasının aynı paket boyutu esas alındığında harcanan toplam gücün artmasına neden olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, birim kanal değişim gücünün yüksek olduğu ortamlarda pil kapasitesi kısıtlı cihazlar için verimsizliğin doğabileceği açık olarak ifade edilebilir. Ancak, paket boyutu da değerlendirme kapsamına alındığında optimum sonuçlar değişebilmektedir. Birim kanal değişim gücünün 250mW olduğu ortamda paket boyutunun 20 byte olması ile harcanacak toplam enerjinin, birim kanal değişim gücünün 500 mW olduğu ortamda paket boyutunun 40 byte olması ile harcanacak toplam enerjiden fazla olması, birim kanal değişim gücünün her zaman küçük olması zorunluluğunu ortadan kaldırmaktadır. Bu da CRN'lerde paket boyutuna göre optimum sonucu yakalamanın önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 7. Birim Kanal Değişim Gücünün Paket Boyutlarına Göre Toplam Enerjiye Etkisi

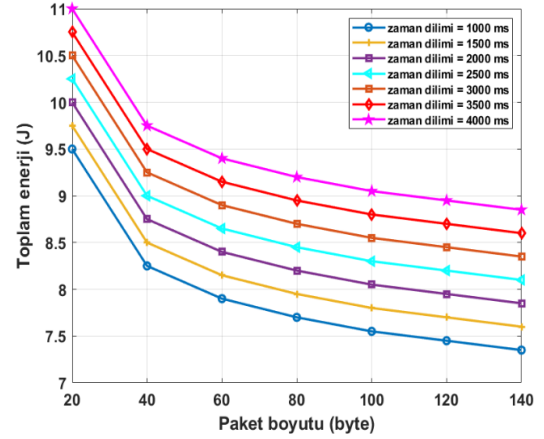
Frekanslar arası geçişte enerji maliyetini belirleyen en önemli faktörlerden birisi de iki frekans arası geçiş süresidir. Dolayısıyla, geçişteki birim sürenin toplam harcanan enerjiye etkisinin analiz edilmesi de bu noktada doğru olacaktır. Şekil 8'de birim kanal değişim süresinin ve paket boyutunun değişimlerinin toplam enerjiye nasıl etki ettiği sunulmuştur. Beş farklı kanal değişim süresi ile farklı paket boyutlarının incelenmesi, optimum verimliliği yakalama noktasında yardımcı olacaktır.



Şekil 8. Birim Kanal Değişim Süresinin Paket Boyutlarına Göre Toplam Enerjiye Etkisi

Birim kanal değişim süresinin mümkün olan en küçük değerde olması, grafikten de görüleceği üzere, harcanan toplam enerjiye olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Ek olarak paket boyutlarının hattın taşıma kapasitesine göre olabildiğince büyük seçilmesi de, toplam enerjiyi yine birim kalan değişim süresi ile aynı yönde (olumlu) etkilemektedir. Ancak, bu iki değişkenin birlikte analiz edilerek optimum verimliliğin yakalanabileceği değerlerin tercih edilmesi gerekmektedir. Grafiği incelediğimizde, birim kanal değişim süresinin 0.1 ms ve paket boyutunun 40 byte olduğu ortamdaki toplam enerjinin, kanal değişim süresinin 0.7 ms ve paket boyutunun 60 byte olduğu ortama göre daha küçük olduğu gözlenmektedir. Yani, paket boyutu büyük iken birim kanal değişim süresinin de büyük olması, paket boyutu ve birim kanal değişim süresinin daha küçük olduğu durumlara göre her zaman avantajlı değildir. Bu durum da optimum sonuca ancak iki değişkenin birlikte göz önüne alınması ile ulaşılabileceğini gösterir.

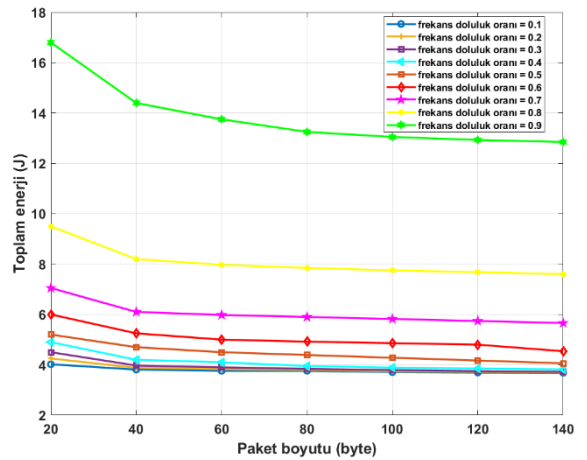
Bilindiği üzere radyo ağlarında kullanıcılar, verilerini alıcı taraflara belirlenen zaman dilimi içerisinde gönderirler. Kullanıcılar, bu zaman dilimlerinin bir kısmında paketlerini işlerken bir kısmında da iletim hattına göndererek alıcı tarafa ulaştırırlar. Gönderim tamamlandıktan sonra belirlenen zaman dilimi bitmediyse kalan zaman süresince boş durumda beklerler. Bu durum CRN'lerde de hemen hemen aynı olmakla beraber bu ağlarda ufak farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıkların başlıcaları boş frekansları algılama, karar verme ve frekanslar arası geçiş yapma olarak sıralanabilir. SU kendisine tanımlanan zaman dilimi içerisinde bu işlemleri yapar ve veri gönderimini tamamlamaya çalışır. Toplam verinin büyüklüğüne göre bu zaman dilimi bazı noktalarda yeterli olmayabilir. Bu durumda da kanalın durumuna göre yani PU'nun boşta olmasına göre yeni zaman diliminden faydalanabilir. Burada en önemli parametrenin toplam veri boyutu olduğu söylenebilir. Toplam verinin alıcı tarafa ne kadar sürede iletebileceği paket boyutuna bağlıdır. Gönderim tamamlandıktan sonra SU'nun ne kadar süre boşta bekleyeceği de harcanacak toplam enerjiye etki etmektedir. Şekil 9'da paket boyutu ve zaman diliminin değişimine göre harcanan toplam enerjinin büyüklüğü gösterilmiştir.



Şekil 9. Farklı Zaman Dilimlerinin Paket Boyutlarına Göre Toplam Enerjiye Etkisi

Şekil 9'dan da görüldüğü üzere, zaman diliminin artması, harcanan toplam enerjinin de artmasına neden olmaktadır. Bu durum paket boyutlarına göre değerlendirildiğinde ise, paket boyunun artmasıyla verinin daha büyük boyutlar halinde gönderildiği ve bundan ötürü iletim süresinin kısalması ile de harcanan toplam enerjinin azaldığı sonucuna varılır. Paket boyutu ile zaman diliminin birlikte analiz edilmesiyle harcanan toplam enerjiyi optimize etmek mümkün olmaktadır. Birim kanal değişim gücü ve birim kanal değişim sürelerinde olduğu gibi, paket boyutu ve zaman diliminin mevcut hatta göre uyarlanması ile optimum verimlilik sağlanacaktır.

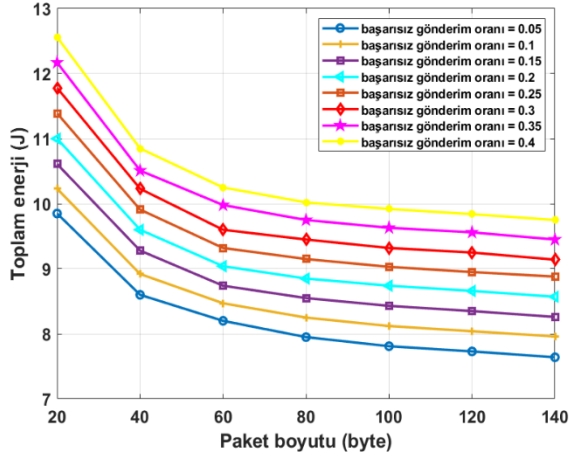
Şimdiye kadar incelenen üç farklı faktörün harcanan toplam enerjiye grafiksel olarak hemen hemen aynı şekilde etki ettiği gözlenmiştir. Paket boyutlarına göre optimum verimliliğin yakalanması da yaklaşık olarak aynı şekildedir. Ancak, frekans doluluk oranına göre toplam enerjinin grafiksel değişimi, diğer üç faktörde olduğu gibi aynı değişimi göstermemektedir. Şekil 10, paket boyutu ve frekans doluluk oranlarına göre harcanan toplam enerjinin grafiksel değişimini sunmaktadır.



Şekil 10. Frekans Doluluk Oranının Paket Boyutlarına Göre Toplam Enerjiye Etkisi

Frekans doluluk oranı, SU'ların gönderim ve alım yapabileceği ortamlardaki frekansların doluluk oranını belirtir. Bu oranın yüksek olması, SU'ların gönderim ve alım için uygun frekans bulmasını zorlaştırır. Bu da algılama esnasında fazla enerji tüketimine sebep olur. Tam tersi şekilde, oranın düşük olması da frekansların boşta ve SU'lar için uygun durumda olduklarını belirtir. Bu da SU'ların zorlanmadan frekans bulmasını ve iletişime başlamasını sağlar. Şekil 10'da da görüleceği üzere, frekans doluluk oranı yüksek olduğu zaman SU'nun harcadığı toplam enerji de yüksek olmaktadır. Özellikle çok yüksek oranlar olan 0.9 ve 0.8 oranları, harcanacak toplam enerjiyi oldukça yüksek kılmaktadır. Bu seviyelerden daha düşük doluluk oranlarında da hemen hemen aynı miktarda toplam enerji tüketilmektedir. Paket boyutuna göre incelenecek olursa, harcanacak toplam enerjinin paket boyutunun artmasıyla düştüğü söylenebilir.

Bilgisayar ağlarında veri iletim ve alımı esnasında paketlerin kaybolması olası bir durumdur. Bu durumun tespiti ve yeniden gönderimler için çeşitli metotlar bulunmaktadır. Ama tahmin edileceği üzere bu tespit ve yeniden gönderimler, gönderici ve alıcı birimler için ek enerji yükleri olarak ortaya çıkmaktadır. Paket kaybı ne kadar düşük olursa harcanacak zaman ve enerji de o kadar düşük olacaktır. Bu durumun bir analizi amacıyla, Şekil 11'de paketlerin başarısız gönderim oranlarına göre paket boyutu dikkate alınarak toplam enerjinin değişimi incelenmiştir.

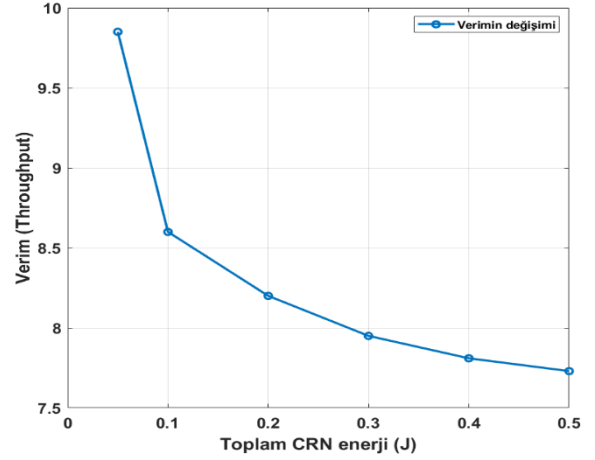


Şekil 11. Başarısız Gönderim Oranının Paket Boyutlarına Göre Toplam Enerjiye Etkisi

Görüldüğü üzere başarısız gönderim ihtimalinin fazla olması, aynı paket boyutlarında harcanacak toplam enerjiyi arttırmaktadır. Çünkü paket kaybı yaşanması halinde kaybedilen paketlerin tekrar gönderilmesi gerekmektedir. Bu da enerji açısından verimsizliğe neden olmaktadır. Dolayısıyla, iletişim anında paket kaybını azaltacak önlemler verimliliği arttıracaktır.

Gönderici ve alıcı arasında toplam gönderilebilecek paket boyutunun zamana oranı verimi (throughput) ifade eder. CRN'lerde verimin en önemli değişkeni toplam bilişsel süreç olarak ifade edilebilir. Bilişsel süreç için harcanan

toplam süre ne kadar fazla ise paket gönderim/alımı için kalan süre o kadar azalır. Bu durumun bir analizi Şekil 12'de yer almaktadır.



Şekil 12. Toplam Bilişsel Sürenin Değişimine Göre Paket Gönderim/Alım Veriminin Değişimi

Bilişsel süreç daha önce de bahsedildiği gibi; frekans algılama, karar verme ve değişim gibi aşamalardan meydana gelmektedir. Bilişsel süreç için harcanan süre kullanıcıya tanımlanan zaman diliminden düşüldüğü takdirde, geriye paket gönderim/alım için kullanılacak zaman dilimi kalmaktadır. Şekil 12'deki grafik incelendiğinde bilişsel süreç için harcanan süre ve dolayısıyla enerji arttığı takdirde zaman diliminden geriye kalan sürenin azalacağı ve verimin de aynı oranda azalacağı görülmektedir.

4 Sonuçlar

CRN'ler literatürde, gelişen teknoloji ile yaşanacak frekans kıtlığı sorununa çözüm olacak etkili bir ağ iletişim yöntemi olarak yerini almaktadır. Hem frekans verimliliği hem de frekans kıtlığı sorunlarını azaltmaya yönelik olumlu katkı sağlayacak bu yöntemin enerji açısından verimli uygulanması gerekmektedir. Uygulamanın getireceği ek yüklerin doğru yönetilmesi, özellikle de pil kapasitesi kısıtlı cihazlar için oldukça önemli bir husustur. Bundan dolayı, CRN'lerin getirmiş olduğu ek maliyetlerin paket boyutu ile birlikte verimi maksimize edecek şekilde optimize edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, CRN'lerin çeşitli parametrelerinin paket boyutu dikkate alınarak optimize edilmesi ve CRN'lerde verimlilik konuları incelenmiştir. CRN'nin değişken parametrelerine göre kullanıcıların tüketeceği enerji hesaplanmış ve bu değişimler şekillerle ifade edilmiştir. Yapılan analizler ile de CRN parametrelerinin ağırlık enerjisi yapısına ne derece etki ettiği gözlenmiştir. Bu analizlere göre, paket boyutu farkındalıklı CRN'nin değişkenlerinin optimize edilmesinin ağırlık verimliliğini tek bir değerden etkisinden kurtaracağı ve bu optimizasyonun hem verimliliğe hem de enerji optimizasyonuna olumlu yönde katkı sağlayacağı söylenebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey, *Computer Networks*, 50 (13), 2127-2159, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.05.001>.
- [2] O. B. Akan, O. B. Karli, and O. Ergul, Cognitive radio sensor networks, *IEEE Network*, 23 (4), 34-40, 2009. [10.1109/MNET.2009.5191144](https://doi.org/10.1109/MNET.2009.5191144)
- [3] M. Song, C. Xin, Y. Zhao, and X. Cheng, Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio, *IEEE Wireless Communications*, 19 (1), 23-29, 2012. [10.1109/MWC.2012.6155873](https://doi.org/10.1109/MWC.2012.6155873)
- [4] J. Mitola and G. Q. Maguire, Cognitive radio: making software radios more personal, *IEEE Personal Communications*, 6, (4), 13-18, 1999. [10.1109/98.788210](https://doi.org/10.1109/98.788210)
- [5] S. Haykin, Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23 (2), 201-220, 2005. [10.1109/JSAC.2004.839380](https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380)
- [6] M. Zareei, A. M. Islam, S. Baharun, C. Vargas-Rosales, L. Azpilicueta, and N. Mansoor, Medium access control protocols for cognitive radio ad hoc networks: A survey, *Sensors*, 17 (9), 2136, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17092136>
- [7] A. Jamal, C.-K. Tham, and W.-C. Wong, Dynamic packet size optimization and channel selection for cognitive radio sensor networks, *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 1 (4), 394-405, 2015. [10.1109/TCCN.2016.2531082](https://doi.org/10.1109/TCCN.2016.2531082)
- [8] M. Awasthi, M. J. Nigam, and V. Kumar, Energy efficient sensing, transmitting time and transmission power for cognitive radio networks, in 2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON), pp. 1-5, Roorkee, India, 2017.
- [9] E. F. Orumwense, T. J. Afullo, and V. M. Srivastava, Secondary user energy consumption in cognitive radio networks, in AFRICON 2015, pp. 1-5, Addis Ababa, Ethiopia, 2015.
- [10] S. Agarwal and S. De, Impact of channel switching in energy constrained cognitive radio networks, *IEEE Communications Letters*, 19 (6), 977-980, 2015. [10.1109/LCOMM.2015.2416334](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2416334)
- [11] H. Ali, A. Khattab, and M. Fikri, Energy-efficient cooperative sensing for cognitive wireless sensor networks, in 5th International Conference on Energy Aware Computing Systems & Applications, pp. 1-4, Cairo, 2015.
- [12] T. Thanuja, K. A. Daman, and A. S. Patil, Optimized spectrum sensing techniques for enhanced throughput in cognitive radio network, in 2020 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI), pp. 137-141, Pune, India, 2020.
- [13] M. Yigit, H. U. Yildiz, S. Kurt, B. Tavli, and V. C. Gungor, A survey on packet size optimization for terrestrial, underwater, underground, and body area sensor networks, *International Journal of Communication Systems*, 31 (11), e3572, 2018. <https://doi.org/10.1002/dac.3572>
- [14] A. D. Sezer and S. Gezici, Average capacity maximization via channel switching in the presence of additive white Gaussian noise channels and switching delays, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15 (9), 6228-6243, 2016. [10.1109/TWC.2016.2582150](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2582150)
- [15] X. Li, D. Wang, J. McNair, and J. Chen, Dynamic spectrum access with packet size adaptation and residual energy balancing for energy-constrained cognitive radio sensor networks, *Journal of Network and Computer Applications*, 41, 157-166, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2013.11.001>
- [16] Cheng, G., Liu, W., Li, Y., and Cheng, W., Spectrum aware on-demand routing in cognitive radio networks, In 2007 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, pp. 571-574, IEEE, Dublin, Ireland, 2007.
- [17] Kim, H. and Shin, K.G., Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(5), 533-545, 2010. [10.1109/TMC.2007.70751](https://doi.org/10.1109/TMC.2007.70751)
- [18] Cheng, G., Liu, W., Li, Y., and Cheng, W., Joint on-demand routing and spectrum assignment in cognitive radio networks, In 2007 IEEE international conference on communications, pp. 6499-6503, IEEE, Glasgow, UK, 2007.
- [19] Namboodiri, V., Are cognitive radios energy efficient? A study of the wireless LAN scenario, In 2009 IEEE 28th international performance computing and communications conference, pp. 437-442, IEEE, Scottsdale, AZ, USA, 2009.
- [20] Namboodiri, V. and Gao, L., Energy-Efficient VoIP over Wireless LANs, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9(4), 566-581, 2010. [10.1109/TMC.2009.150](https://doi.org/10.1109/TMC.2009.150)
- [21] Bayhan, S., Zheng, L., Chen, J., Di Francesco, M., Kangasharju, J., and Chiang, M., Improving cellular capacity with white space offloading, In 2017 15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), pp. 1-8, IEEE, Paris, France, 2017.
- [22] Krishnamurthy, S., Thoppian, M., Venkatesan, S., and Prakash, R., Control channel based MAC-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks, In MILCOM 2005-2005 IEEE Military Communications Conference, pp. 455-460, IEEE, Atlantic City, NJ, 2005.
- [23] Ma, H., Zheng, L., and Ma, X., Spectrum aware routing for multi-hop cognitive radio networks with a single transceiver, In 2008 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and

- Communications (CrownCom 2008), pp. 1-6. IEEE, Singapore, 2008.
- [24] Marougi, S. D., Frequency-switching speed and post-tuning drift measurement of fast-switching microwave-frequency synthesizers, *IET Science, Measurement & Technology*, 1(2), 82-86, 2007. [10.1049/iet-smt:20060011](https://doi.org/10.1049/iet-smt:20060011)
- [25] Gozuepek, D., Buhari, S. and Alagoz, F., A spectrum switching delay-aware scheduling algorithm for centralized cognitive radio networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(7), 1270–1280, 2013. [10.1109/TMC.2012.101](https://doi.org/10.1109/TMC.2012.101)
- [26] Arkoulis, S., Anifantis, E., Karyotis, V., Papavassiliou, S., and Mitrou, N., On the optimal, fair and channel-aware cognitive radio network reconfiguration, *Computer Networks*, 57(8), 1739-1757, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2013.03.004>
- [27] Chen, J., Li, H., Wu, J., and Zhang, R., Starp: a novel routing protocol for multi-hop dynamic spectrum access networks, In *Proceedings of the 1st ACM workshop on Mobile internet through cellular networks*, pp. 49-54, Beijing China, 2009
- [28] Chowdhury, K. R., and Felice, M. D., Search: A routing protocol for mobile cognitive radio ad-hoc networks, *Computer Communications*, 32(18), 1983-1997, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2009.06.011>
- [29] Filippini, I., Ekici, E., and Cesana, M., Minimum maintenance cost routing in cognitive radio networks, In *2009 IEEE 6th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems* pp. 284-293, IEEE, Macau, China, 2009.
- [30] Guirguis, A., and ElNainay, M., Channel selection scheme for cooperative routing protocols in cognitive radio networks, In *2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pp. 735-739, IEEE, Silicon Valley, CA, USA, 2017.
- [31] Demirci, S., and Gözüpek, D., Switching cost-aware joint frequency assignment and scheduling for industrial cognitive radio networks, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(7), 4365-4377, 2019. [10.1109/TII.2019.2950563](https://doi.org/10.1109/TII.2019.2950563)
- [32] Arat, F., and Demirci, S., Channel Switching Cost-Aware Energy Efficient Routing in Cognitive Radio-Enabled Internet of Things, *Mobile Networks and Applications*, 27(4), 1531-1550, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11036-022-02039-w>
- [33] Agarwal, S., and De, S., Dynamic spectrum access for energy-constrained CR: single channel versus switched multichannel, *IET Communications*, 10(7), 761-769, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2015.0523>
- [34] Bayhan, S., and Alagoz, F., Scheduling in centralized cognitive radio networks for energy efficiency, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(2), 582-595, 2012. [10.1109/TVT.2012.2225650](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2225650)
- [35] Celik, A., and Kamal, A. E., Green cooperative spectrum sensing and scheduling in heterogeneous cognitive radio networks, *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2(3), 238-248, 2016. [10.1109/TCCN.2016.2608337](https://doi.org/10.1109/TCCN.2016.2608337)
- [36] Shami, N., and Rasti, M., A joint multi-channel assignment and power control scheme for energy efficiency in cognitive radio networks, In *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1-6, IEEE, Doha, Qatar, 2016.
- [37] D. Gözüpek and F. Alagoz, An interference aware throughput maximizing scheduler for centralized cognitive radio networks, in *21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1527-1532, Istanbul, Turkey, 2010 .
- [38] Shu, T., Krunz, M., and Vrudhula, S., Joint optimization of transmit power-time and bit energy efficiency in CDMA wireless sensor networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(11), 3109-3118, 2006. [10.1109/TWC.2006.04738](https://doi.org/10.1109/TWC.2006.04738)
- [39] C. Majumdar, D. Lee, A. A. Patel, S. Merchant, and U. B. Desai, Packet-size optimization for multiple-input multiple-output cognitive radio sensor networks-aided internet of things, *IEEE Access*, 5, 14419-14440, 2017. [10.1109/ACCESS.2017.2687083](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2687083)
- [40] Namdar M., Basgumus A., Outage Performance Analysis of Underlay Cognitive Radio Networks with Decode-and-Forward Relaying book chapter in *Cognitive Radio* (Editor: T. Trump), IntechOpen, ISBN: 978-953-51-3338-4, pp. 25-37, 2017.
- [41] Namdar M., Ilhan, H., Exact closed-form solution for detection probability in cognitive radio networks with switch-and-examine combining diversity, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(9), 8215-8222, 2018. [10.1109/TVT.2018.2840227](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2840227)

