

YEŞİL HÜCRESEL AĞLARIN ENERJİ VERİMLİLİĞİNDEKİ ROLÜ

Merve Metin*, Ercüment Türk**

*Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bornova, İZMİR
merve.metin@hotmail.com

**Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bornova, İZMİR
ercument_turk@hotmail.com

ÖZET

Son on yılda mobil telefon kullanıcılarının sayısında büyük bir artışa tanık olduk. Teknoloji, 1990'ların başındaki sadece sesli hizmetlerden bugünün kablosuz geniş bantlı hizmetlerine gelişti ki bu da DSL ve kablolu internet bağlantılarına basit ve ucuz bir alternatif sağladı. Ancak mobil geniş bantlı teknolojideki bu gelişme önemli bir enerji masrafiyle birlikte geliyor. Kullanıcı seviyeleri arttıkça bu gibi şebekelerin işletim masrafları rekabeti devam ettirebilmek için önemli ölçüde düşürülmesi gerekmektedir. Gelişen ülkelerdeki mobil piyasaları şimdilerde mobil kullanımında büyük bir artışa şahit olmaktadır. Çin'de, örnek olarak İngiltere'deki kullanıcı sayısının 10 ila 20 katı kullanıcı olacaktır ve bu ülkenin büyüklüğünü yansıtan, oransal olarak daha yüksek güç tüketimine neden olacaktır. Yeni kurulan Mobil VCE "yeşil haberleşme" programının amacı, kablosuz ağların enerji tüketim sorunlarının daha derin incelenmesidir. Proje gelecekteki kablosuz ağların tasarımlarının en üst düzeyde olması ve kablosuz aygıt bileşenlerinin optimize edilmesi olarak iki ana temadan oluşmaktadır. Bu kapsamda, enerji tasarruflu yeşil çözümlerin geliştirilmesi, hem çevre dostu oldukları hem de yatırımcıların enerji maliyetlerini düşürdükleri için ciddi önem kazanmaktadır. Öte yandan her geçen gün kullanıcıların kalite standartlarının ve ihtiyaçlarının artması, hücresel servis sağlayıcılarını zaman ve mekân ayırımı gözetmeksizin belirli bir seviyenin üzerinde hizmet vermeye mecbur hale getirmiştir. Bu da daha fazla baz istasyonunun kurulmasına ve bu amaç için daha fazla enerji harcanmasına neden olmaktadır. Bu makale yeşil telsiz ağları için yapılan çalışmalarda karşılaşılan zorlukları ve detaylı çalışma için öncelikli alanları tanımlamaktadır.

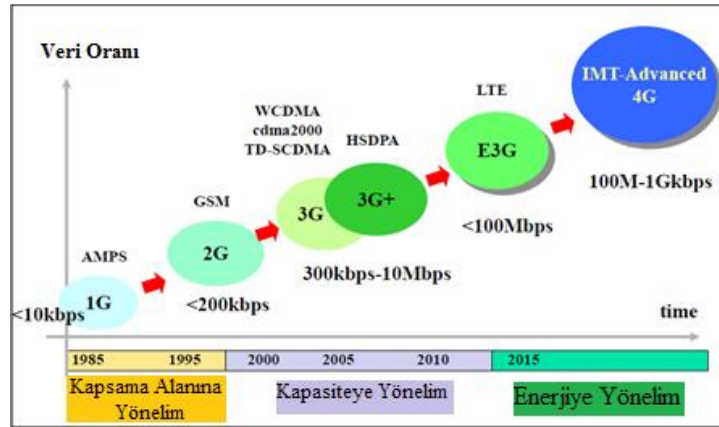
Anahtar Kelimeler: Yeşil Ağlar, Baz İstasyonu Planlama, Hücresel Ağlar, Enerji Tasarrufu, Yeşil Telsiz Ağları

1. GİRİŞ

Küresel ısınma dünyayı tehdit eden en önemli çevre sorunlarından biridir. Deniz suyu seviyesinin artması, iklimlerin değişmesi küresel ısınmanın en büyük etkileri olarak gösterilebilir. Yapılan araştırmalar ilerleyen yıllarda küresel ısınma sonucu milyonlarca insanın bu felaketlerden etkileneceğini ortaya koymaktadır. Bu yüzden küresel ısınmanın önüne geçilmesi için hem hükümetler hem de sivil toplum örgütleri çalışmalar yapmakta, akademik çalışmalar desteklenmekte ve popüler hale getirilmektedir.

Küresel ısınmanın en temel nedeni atmosferde normalden fazla bulunan sera gazlarıdır. Çevresel hareketlerin çoğunun amacını sera gazlarının ve özellikle karbondioksit (CO₂) salınımını azaltmak yatmaktadır. Bu kapsamda bilişim teknolojileri sanayisinde karbon emisyonunu azaltmak enerji verimliliğini artırma çalışmaları hız kazanmıştır. Akıllı telefonlardaki artış, veri üretim ve iletişim gereksinimlerinin artması ile İstatistikler Bilgi ve İletişim Teknolojisi (BİT) sektörünün gelecek yıllarda daha da büyüyeceğini göstermektedir. Bu nedenle bu sektörde uygulanacak olan yeşil çözümler oldukça önem kazanmaktadır. Diğer yandan artan enerji maliyetleri de telekomünikasyon firmalarının da tasarruf etmesini gerektirmektedir.

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki kablosuz ağlar bir çok parçadan oluşmuş olsa da en çok enerji tüketen kısım baz istasyonlarıdır. Bu yüzden doğrudan baz istasyonlarında yapılacak tasarruf ile kablosuz ağlarda enerji verimliliği konusunda kayda değer bir başarı sağlanabilecektir. Bu çalışmada; mevcut kablosuz haberleşme ağlarının Şekil 1’de de gösterilen gelişimi ve tükettikleri enerji miktarları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Hücresel ağlarda en fazla enerji tüketen eleman olan baz istasyonlarının nasıl etkin bir biçimde kullanılacağı tartışılmış, literatürdeki bu konu ile ilgili çalışmalar ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



Şekil 1- Mobil Ağların Evrim Süreci [1]

2. “YEŞİL TELSİZ AĞLARI” NEDİR?

Yeşil Telsiz Ağları veya başka bir deyimle “Yeşil Radyo” ilk olarak Mobile VCE tarafından 2007 yılının başlarında ortaya atılan bir kavram olup, bu tarihten sonra endüstride sıklıkla kullanılır hale gelmiştir. Yeşil ağlar araştırmasının amacı yüksek veri hızlı servislerin sağlanması için gerekli enerji miktarında görünür bir azalmayı güvence altına almaktır. Bunun yanında yeni servisler sağlarken karbondioksit emisyonu ve operasyonel giderleri azaltmak da yeşil ağlar projesinin amaçları arasındadır. Bu çalışma hem yapısal hem de enerji verimliliği sağlayacak diğer alanlardaki teknoloji yaklaşımlarını araştırmaktadır.

Günümüzde iklim değışikliği ve global enerji kullanımının azaltılması ihtiyacı herkes tarafından kabul edilmiş gerçektir. Bugün dünya üzerindeki 4 milyar insan mobil telefon kullanmakta; bilgi ve iletişime kolay erişim de ekonomik gelişime katkı sağlamaktadır. Mobil cihazların kullanımı bir çok şekilde teşvik edilmekte ve yaygınlaşmaktadır.

İngiltere’de normal bir mobil telefon ağı, mobil telefonun kendisi tarafından tüketilen güç hariç yaklaşık olarak 40MW güç harcamaktadır. Operatörlerin açısından bakıldığında düşük enerji tüketimi doğrudan daha düşük operasyon giderleri (OPEX) sağlamaktadır. Kablosuz ağlardaki düşük karbon emisyonu ve operasyon giderleri yeşil iletişim programındaki iki ana faktördür. [2] Baz istasyonları için yapılan enerji tüketim optimizasyonlarının iletişim ağlarının toplam enerji verimliliği üzerinde büyük bir etkisi vardır. Yeşil telsiz ağları çalışması mevcut kablosuz iletişim ağları üzerinde yüz kat bir azalma sağlamayı hedeflemektedir. Bu, servis kalitesinden (QoS) ödün vermeden ve kurulum giderlerinin negatif etkileri olmaksızın gerçekleştirilmelidir. Yüz kat enerji azaltma hedefi, düşük enerji kullanımını sağlamak için optimum ađ yapılarını tanımlayarak ve kablosuz ağların güç gereksinimlerini minimize edecek teknikler geliştirerek gerçekleştirilecektir.

3. YEŞİL TELSİZ AĞLAR KONUSUNDAKİ ULUSLARARASI ARAŞTIRMALAR

Mobil kablosuz geniş bant ağlarındaki enerji verimliliğini geliştirme amacındaki üç ana proje; MVCE (mobile Virtual Center of Excellence) Green Radio, GreenTouch ve EARTH çalışmalarıdır. [3]

Green Radio çalışmasındaki liderlerden biri olan VCE, endüstri ihtiyaçları ve akademik çalışmalar arasında bir köprü oluşturmaktadır. VCE’nin endüstri üyeleri, halihazırda paylaşılmakta olan stratejik görüş ve araştırma girişimlerini geliştirmekte ve buna öncülük etmektedir.

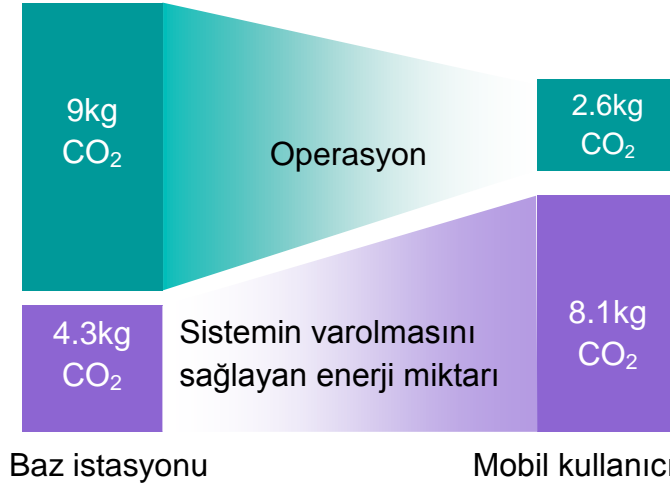
GreenTouch Bilgi ve İletişim Teknolojileri (BİT) sektörüne, internet de dahil olmak üzere temel dönüştürücü haberleşmesine ve veri ağlarına karar veren, ayrıca akademik ve sivil araştırmacılara kaynak oluşturan, çevresel karbon etkilerini azaltmak için adanmış sivil toplum araştırma uzmanlarından oluşan bir konsorsiyumdur.[4]

EARTH; Mobil haberleşme sistemlerinin enerji etkinliğini araştıran azimli bir FP7 IP projesidir. Yeni verimli enerji ekipmanları, kurulum stratejileri ve ađ yönetim sistemlerine entegre çözümler uygulamayı hedef edinmiştir. [5]

4. KABLOSUZ AĞLARIN MEVCUT DURUMDAKİ ENERJİ TÜKETİM DURUMLARI

Telekomükasyon sistemleri büyük bir yayılım ile dağınık geniş bantlı mobil kablosuz haberleşme için talep görmektedir. Şimdiye kadar yapılmış olan yenilikler, kullanıcıların servis kalitesi (QoS) isteklerini karşılamak için kablosuz haberleşme ağlarının kapsama alanı ve kapasitelerini arttırmaya yönelik olmuştur. [3]

Bu günlerde mobil abone sayısı küresel nüfusun yarısından fazlasına eşittir. Buna bağlı olarak ise telekomükasyon pazarındaki abonelerin veri hızlarının daha da artacağı ve yeni nesil mobil ağlar için ek baz istasyonlarının açılacağı tahmin edilmektedir. Kablosuz ağların enerji tüketimindeki artış istemeden karbondioksit emisyonunun artmasına ve operatörler için zorlu operasyon maliyetlerine neden olmaktadır.

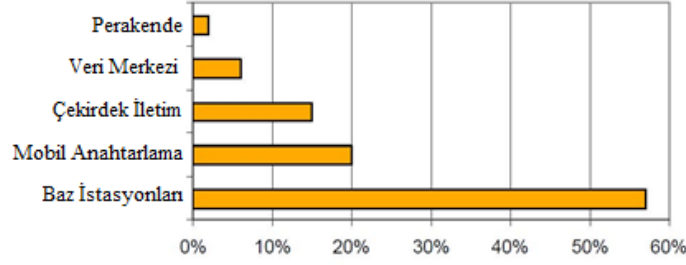


Şekil 2 - Baz istasyonu ve mobil kullanıcıların enerji tüketimi [6]

Kablosuz ağlardaki enerji kullanımını çalışma zamanı (operasyon) ve kurulum (var olma) zamanı olmak üzere iki ana grupta incelenmelidir. Farklı çalışmalar gösteriyor ki; mobil kullanıcıların operasyon sırasındaki enerji tüketimleri, baz istasyonlarının operasyon sırasındaki enerji tüketiminden çok daha düşük kalmaktadır. Öte yandan kurulum sırasındaki harcanan enerjileri kıyaslanacak olursa mobil kullanıcıların baz istasyonlarından daha fazla enerjiye gereksinimi olduğu görülür. Bu denge Şekil 2’de açıkça görülmektedir. Yeşil telsiz ağları konusundaki çalışmalar ise genellikle baz istasyonları üzerinde yoğunlaşmaktadır.

5. YEŞİL TELSİZ AĞLAR KONUSUNDA KARŞILAŞILAN TEMEL ZORLUKLAR

Yeşil telsiz ağların belirgin amaçlarından biri; telsiz erişim ağlarının operasyonu için gerekli olan toplam enerji ihtiyacını azaltmak amacıyla yenilikçi metotlar araştırmak ve yaratmak ve böylesi bir güç azaltımı için uygun telsiz mimarilerini tanımlamaktır. Şekil 3’te şu an kullanılmakta olan farklı elemanlar içeren kablosuz bir ağın güç tüketimleri gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, kablosuz hücreli bir ağ sisteminde enerji tüketimine neden olan en büyük etken baz istasyonlarıdır. Baz istasyonlarını sırasıyla anahtarlama elemanları, çekirdek iletim, veri merkezleri ve perakende sistemleri takip etmektedir.



Şekil 3 - Normal bir kablosuz hücresel ağı enerji tüketim oranları [7]

Araştırmacıların yeşil haberleşme sistemlerini kurmak konusunda önlerindeki temel zorluklar üç ana başlık altında özetlenebilir.

5.1. KAYNAK TAHSİSİ:

Radyo frekansı tipik bir baz istasyonunun genel enerji tüketimi için önemli bir faktör olarak tespit edilmiştir. Kaynak tahsisi, baz istasyonlarının hücre içindeki farklı kullanıcılara ne zaman ve nasıl veri transfer edileceğine karar verilmesi olarak tanımlanabilir. Böyle bir konudaki enerji düşümü iletim anahtarlarının ve baz istasyonu soğutmasının kapatılması aracılığıyla çok daha fazla enerji tasarrufuna öncülük edebilir.

Buna ek olarak, yapılan analizler kablosuz hücresel ağlardaki trafiğin çok düzensiz olduğunu göstermektedir. 200 hücreye ait bir analiz ise maksimum kullanım görülen saatlerde bile trafiğin %90'ının ağda bulunan hücrelerden sadece %40 'ı tarafından taşındığını göstermektedir. Bu nedenle değişen trafik doluluk koşullarında enerji tüketimini minimize etmede kullanılan teknikler önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Burada sırayla birbirini tamamlayan iki teknik olan düşük ve yüksek trafik doluluk durumlarını tanımlayabiliriz.

Düşük trafik doluluk koşulları altında, baz istasyonları, kullanıcıların talep ettiği miktardan fazla veriyi gönderebilecek bant genişliğine sahiptir. Bir frekans alanı yaklaşımı yedek bir bant genişliğini enerji tüketimini düşürmek için kullanır. Kanal kapasitesi kullanılabilir bant genişliği ile lineer olarak ölçeklenebilirken, radyo iletim gücü ile logaritmik olarak ölçeklenir.

Trafik yoğun olduğu zaman, baz istasyonları pek çok kullanıcıya çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) tekniği gibi teknikler kullanıp eş zamanlı olarak veri aktarımı sağlayabilmektedir. Bu durumda, toplam çoklu kullanıcı kapasitesini arttırmak amacıyla çoklu kullanıcı çeşitlemesini kullanmak mümkün olabilmektedir. Performans değerlendirme sonuçları, mobil kullanıcı sayıları yeterince fazla olduğunda çok kullanıcılı çoklu giriş çoklu çıkış yöntemi aracılığıyla uygun metotlar kullanılarak beş kat enerji kazancına erişilebileceğini göstermektedir.

5.2. GİRİŞİM YÖNETİMİ VE ÖNLEMLERİ:

Girişim engelleme konuları birçok baz istasyonunun aynı spektrumunu paylaştığı haberleşme sistemlerinde girişim ile mücadele için oldukça önemlidir. Girişimin etkisi

kullanıcı iki hücrenin sınırına yaklaştığında SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) nedeniyle daha şiddetli olmaktadır ve bu yüzden veri hızı düşmektedir. Çoğu mevcut girişim engelleme çalışması enerji verimliliği göz ardı edilerek, spektral verimliliğin ve veri oranının artırılması için tasarlanmıştır. Ama yeşil telsiz ağlar konusundaki araştırma çabaları enerji verimliliği sayılabilen girişim engelleme çalışmaları üzerine yoğunlaşmıştır. Mobil terminallerde girişim seviyesi düşürülebilirse, bu baz istasyonlarında kablosuz iletişim enerjisinin SINR'den ödün vermeksizin düşürülmesine olanak sağlayacaktır. [6]

Aşağıdaki üç plan iniş yolu hüzmleme koordinasyonu tarafından kullanılabilir:

- Diğer baz istasyonları kullanıcıya doğru sinyal göndermekten kaçınırken, Yüksek SINR sağlayan baz istasyonu kullanıcıya servis sağlar
- Tüm kullanıcılara çoklu anten beamforming ve coherent user-end combining kullanan çoklu baz istasyonlarından servis sağlanır.
- Kullanıcılara konumlarına göre bir ya da daha fazla baz istasyonu tahsis edilmiştir.

5.3. ENERJİYİ VERİMLİ YÖNLENDİRME VE ÇOK SEKMELİ YÖNLENDİRME

Yukarda anlatılan girişim bastırma tekniklerine benzer şekilde bir baz istasyonu ve mobil terminal arasındaki bilgi alışverişi için rölelerin kullanımı, baz istasyonunun enerji verimliliğini artırmak için etkili bir yol olabilir. Bunun nedeni veri oranı artırılarak ya da iletim enerjisinin düşürülmesine izin verilerek, iletim mesafesi düşürülebilir. Röleler karmaşık altyapı değişiklikleri olmadan ağ enerji tüketiminde önemli bir azalma sağlayabilir. Röleler sinyal kalitesini arttırmak için sokaklarda ya da binalarda konuşlandırılabilir.

Bu alandaki çalışmalar için gelecekteki önemli bir hedef, röleme tekniklerine ait enerji verimliliğinin femtocellerin kullanımı ile karşılaştırılmasıdır. Röleler en yakın baz istasyonu aracılığıyla internet erişimini sağlamaktadır. Aksine, femtoceller evlere ve ofislere kurulan küçük düşük güçlü, servis sağlamak amacıyla internet erişimini kullanan baz istasyonlarıdır. Ağ bağlantısındaki bu farklı biçimlerin enerji tüketiminin tam etkisini anlamak yeşil telsiz ağlar projesi için önemli fakat zor bir iştir.[6]

6. YEŞİL TELSİZ AĞLARININ TASARIM, KURULUM VE YÖNETİMİ (OPERASYONU)

Şimdiye kadar bir çok telsiz erişim teknolojisi aynı alan üzerinden farklı servis gereksinimlerini uyumlandıracak ve çoklu telsiz erişim teknoloji geçişlerini sağlayacak şekilde inşa edilmiştir. Bu konuda en önemli 3 nokta şunlardır [3] :

6.1. AĞ KURULUMU:

Hücrel ağlar için gelişimin verimi, kapasite ve kapsama geliştirme fikirleri üzerinde birçok çalışma gerçekleştirilmişken, toplam enerji tüketimindeki enerji verimliliğini geliştirmek için hangi tekniklerin uygulanabileceği konusunda oldukça az görüş bulunmaktadır. Dahası, son zamanlarda heterojen telsiz erişim ağları kavramı hem akademik hem de endüstri çevreleri tarafından araştırılmaktadır.Heterojen ağ kurulumu

(HetNet) çok çeşitli kablosuz ağ teknolojileri, uygulamaları ve farklı servis kaliteleri gerektiren uygulamaları için olduğu gibi farklı protokol dizileri için de esnek ve açık bir mimari sunmaktadır.

Farklı telsiz erişim teknolojileri tarafından sunulan tamamlayıcı özellikler, kurulum çeşitliliği kazancını bağımsız ağların birleşmiş performansından daha yüksek toplam performans elde etmek için kullanmayı mümkün kılmaktadır. Açıkçası, heterojen ağların en büyük avantajı, kullanılabilir bantların uzaysal spektrumun tekrar kullanımı yoluyla ağ kapasite ve kapsama alanı üzerinde kayda değer kazanç sağlamasıdır. Bu kazanç çok açık bir şekilde ağın toplam enerji tüketimini azaltmak için kullanılabilir.

Burada ilk olarak yapılması gereken, heterojen ağların kurulum senaryolarının enerji verimliliğindeki teorik ve pratik limitleri belirlemektir. Amaç ise; farklı hücre boyutları ve farklı ağ topolojileri kullanılan kurulum stratejileri, telsiz erişim teknolojileri arasındaki koordinasyon ve makro baz istasyonları, femto hücreler, röleler ve tekrarlayıcıları içeren ağ kurulumları araştırmalarını kullanarak sistemin enerji tüketiminin nasıl düşürüleceğini anlamaktır. Sonrasında, ikinci yapılacak çalışma ise farklı alanları birbiriyle uyumlu hale getirip birleştirerek sistemin toplam enerji tüketiminin nasıl düşürüleceğinin tanımlanmasıdır. Yapılan bu çalışma, enerji verimli telsiz kaynak yönetim (RRM) tekniklerinin ana hedefidir. Sonuç olarak, enerji tasarrufu sağlayan bir ağ kurulumu, yüksek enerji verimliliği sağlayacak olan optimum hücre boyutunu, ortak spektrumu ve adaptif kaynak tahsisi yöntemlerini belirleyerek sağlanabilmektedir.

6.2. AĞ YÖNETİMİ:

Yenilikçi ağ yönetim çalışmaları geniş ağların enerji tüketimindeki tasarrufa öncülük etmektedir. Buradaki zorlu nokta, telsiz ağındaki farklı fonksiyon ve düğümler arasındaki koordinasyondan kazanç elde etmek için telsiz ağ düğümlerin nasıl ayarlanacağını anlamasıdır.

Çalışılan sistemler ağın enerji verimliliği optimizasyonunun minimum müdahale ile kendiliğinden gerçekleşmesini sağlamalıdır. Buradaki düşünce, sistemde mobil ağların hücresel yapısının gün içindeki koşullara göre dinamik bir şekilde değiştirilmesidir.

6.3. TELSİZ KAYNAK YÖNETİMİ:

Telsiz kaynak yönetim algoritmaları maksimum sistem yükü altındaki sınırlı ağ kaynakları ve istenen servis kalitesi arasındaki uyumsuzluğu aşacak şekilde sistem kapasitesini maksimize etmek için tasarlanmaktadır.

Yeni geliştirilen telsiz kaynak yönetim projeleri, yük değişimlerinin yanında güç kuvvetlendirici gibi telsiz frekans başlangıç elemanlarını ve çıkış-iniş radyo kanallarının güç ve bant genişliği sınırlamalarını da hesaba katmalıdır. Yapılan bu çalışmalar, güç kontrolü ve iletim planlamaları için çoklu hücre beraberliği de göz önünde bulundurularak telsiz kaynak yönetim tasarımlarının gelişimi ile daha da iyileştirilecektir. Dahası, aktif kullanıcıların talep ettiği servis kalitesi sağlanabilirken doğru iletilen bit başına düşen enerji minimize edilebilecek duruma gelebilecektir.

7. YEŞİL TELSİZ AĞLARININ TEMEL İKİLEMLERİ

Yeşil telsiz ağları konsepti temel olarak bazı ödün ikilemleri içermektedir. Bu ikimler kurulum verimi-enerji verimi ikilemi, spektrum verimi-enerji verimi ikilemi, bant genişliği-güç ikilemi ve gecikme-güç ikilemi olmak üzere dört tanedir. [8]

7.1. KURULUM VERİMİ-ENERJİ VERİMİ İKİLEMİ

Kurulum verimi, sistem veri hacminin birim ünite başına kurulum maliyeti ölçüsü, mobil operatörler için önemli bir şebeke performansı göstergesidir. Kurulma maliyeti hem sermaye giderleri (CapEx) hem de operasyonel giderlerden (OpEx) oluşur. Radyo erişim ağları için CapEx genellikle; baz istasyonu donanımı, ana taşıyıcı iletim donanımı, tesis kurulumu ve radyo ağ kontrolörü donanımı gibi altyapı masraflarından oluşur. Diğer yandan OpEx için ana etmenler elektrik faturası, tesis ve ana taşıyıcı kiralama ve operasyon ve bakım masraflarıdır. Genellikle kablosuz ağ mühendisleri şebeke planlaması sırasında CapEx ve OpEx'i hesaplarlar. EE, birim enerji tüketimi başına sistem veri hacmi, çoğunlukla şebeke operasyonu sırasında dikkate alınır. İki farklı koşul, şebeke planlaması için genellikle zıt tasarım kriterine yol açar. Örneğin, tesis kiralama, baz istasyonu donanımı ve bakımı masraflarından kaçınmak için şebeke planlama mühendisleri hücre kapsamını olabildiğince genişletirler.

Ancak bu durum sadece iletim gücü göz önüne alındığında ve gönderim masrafı hücre etki alanıyla sürekli ve orantılı olarak değiştiği durumda doğrudur. Gerçekte, sınırlı sayıda baz istasyonu ve donanım masrafı hedef hücre boyutuyla orantılı değildir. Ayrıca toplam şebeke enerjisi hem iletim-bağımlı enerji(radyo yükselticisi tarafından tüketilen enerji) hem de iletim-bağımsız enerjiden(tesis soğutması güç tüketimi) oluşmaktadır.

7.2. SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ - ENERJİ VERİMLİLİĞİ İKİLEMİ

Spektrum verimliliği, birim bant genişliği başına sistem veri hacmi, kablosuz şebeke optimizasyonu için geniş ölçüde kabul görmüş bir kriterdir. Spektrum verimliliğinin tepe değeri her zaman 3GPP'nin gelişimi için anahtar performans ölçütü olmuştur. Örnek olarak, 3GPP'nin hedef indirme yolu SE 0.05 bps/Hz den 5 bps/Hz ye yükseldiğinde sistem GSM'den LTE'ye gelişmiş olur. Tam aksine enerji verimliliği, son zamanlara kadar çoğu araştırmalarda göz ardı edilmiş ve 3GPP tarafından önemli bir performans ölçütü olarak görülmemiştir. Günümüzde, yeşil gelişim büyük bir trend haline gelirken verimli enerjili iletim giderek daha önemli bir hal almaktadır. Maalesef spektrum ve enerji verimlilikleri her zaman tutarlı değildir ve bazen birbirleriyle çelişmektedirler. Bu nedenle iki ölçütün gelecek sistemlerde nasıl dengeleneceği özenli bir çalışma gerektirmektedir. Spektrum-enerji ilişkisi aşağıdaki denklem ile gösterilebilir:

$$\eta_{EE} = \frac{\eta_{SE}}{(2^{\eta_{SE}} - 1)N_0}, \quad (1)$$

Teorik analizler yoluyla öngörülen performans limitlerine, donanımsal kısıtlamalar yüzünden gerçek sistemlerde her zaman ulaşamaz. Örneğin, bir baz istasyonundaki gücün

tipik enerji dönüşümü verimi %40 dan azdır. Ayrıca, güç yükselticilerinin sınırlı lineer bölgeleri de iletilen sinyaller için bir kısıtlandırma getirmektedir.

7.3. BANT GENİŞLİĞİ – GÜÇ İKİLEMİ

Bant genişliği ve güç kavramları kablosuz haberleşmede en önemli fakat aynı zamanda sınırlı kaynaklardır. Shannon'ın kapasite formülünden, iletim oranı R olarak verildiğinde iletim gücü ve sinyal bant genişliği arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P = W N_0 (2^{\frac{R}{W}} - 1). \quad (2)$$

Yukarıdaki ifadeden kolayca görülebileceği gibi minimum güç tüketimi olan $N_0 \ln(2)$ bant genişliği olmadığı durumda tüketilir. Temel bant genişliği-güç ilişkisi, belirli veri iletim oranında sinyal bant genişliğinin istenilen ölçülerde sınırlandırılmasının, iletim güç tüketiminin azaltılması dolayısıyla daha iyi enerji verimliliği elde edilmesi için tercih edildiğini göstermektedir. Aslına bakılırsa kablosuz sistemlerin gelişimi de bant genişliği ihtiyacında aynı yönelimi göstermektedir. Örneğin, GSM sistemlerinde her bir taşıyıcı için bant genişliği 200 kHz iken UMTS sistemlerinde 5 MHz'dir. Gelecekteki kablosuz sistemlerde, LTE ya da gelişmiş LTE, sistem bant genişliği 20 MHz'dir hatta taşıyıcı kümeleme tekniği gibi teknikler kullanılarak 100 MHz'ye kadar ulaşılabilir. bant genişliği-güç ilişkisi, radyo kaynak yönetimi için de çok önemlidir. İlk olarak bilişsel radyo teknikleri kullanarak kullanılmayan spektrumu algılayan ve kümeleyen, daha sonra da kullanılabilir bant genişliğine göre modülasyon derecesini her seferinde ayarlayan, “yeşil” iletim stratejisi belirlenmesinde kullanılmıştır. Ancak pratik sistemlerde, filtre kaybı gibi devre güç tüketimi aslında sistem bant genişliği ile değişmektedir ve bu durum bant genişliği ve güç ilişkisini karıştırmaktadır.

7.4. GECİKME - GÜÇ İKİLEMİ

Yukarıda anlatılan ikilemler genel olarak fiziksel katman ile ilgili konulardadır. Bunlardan farklı olarak, gecikme kavramı servis kalitesinin bir ölçüsü olmakla beraber aynı zamanda daha üst katman trafik türleriyle ilgilidir. Sonuç olarak, iletim düzenlerinin tasarımı sırasında gecikme-güç ikilemini daha da karmaşık hale getiren kanal ve trafik belirsizliklerinin üstesinden gelinmelidir.

Gecikme-güç ilişkisi trafik dinamikleri de göz önüne alındığında daha karmaşık bir hal almaktadır. Bu durumda, servis gecikmesi hem trafik içerisindeki bekleme süresini hem de gönderim süresini içermelidir. Bu iki kısım için geçen süre aynı zamanda kuyruk gecikmesi olarak da bilinmektedir. Buna ek olarak, trafik akışı dikkate alındığında, bit başına ortalama gecikme süresi yerine paket başına ortalama gecikme süresi kullanılması daha uygun olacaktır.

8. SONUÇ

Yeni nesil kablosuz ağlardan her yerde ve her zaman yüksek hızlı internet erişimini sağlaması beklenmektedir. Iphone ve diğer akıllı telefonların popülerliği kuşkusuz mobil video ve oyun gibi uygulamaların kullanımını arttırır, yeni trafik taleplerini yaratır.

Katlanarak büyüyen veri trafiği ve her yerde erişim gereksinimi, ağ altyapılarının genişlemesini ve enerji talebinin hızla tırmanmasını dramatik bir şekilde tetiklemiştir. Bu nedenle, sürdürülebilir kapasite artışı sağlamak ve aynı zamanda elektrik maliyetini sınırlamak mobil operatörler için acil bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Kablosuz ağların enerji tüketimindeki artış doğrudan çevresel koruma ve sürdürülebilir kalkınma için büyük bir tehdit olarak kabul edilmiş sera gazı emisyonunun artmasına neden olmuştur. Avrupa Birliği bu konuda tüm dünyada enerji tasarrufu ve sera gazlarını %20 oranında azaltma hedefine öncülük etmektedir. Ayrıca Çin hükümeti Gayrisafi yurtiçi hasıla (GDP) başına enerji tüketimini % 20 oranında azaltmaya ve 2020 yılına kadar genel kirliliği % 10 azaltma taahhüdü vermiştir. Sosyal sorumluluk baskısı ise kablosuz operatörlerin enerji tüketimi ve karbon emisyonunu azaltmasını teşvik eden bir başka itici güçtür. Vodafone Grubu, 2006 yılındaki 1.23 milyon ton olan karbon emisyonu miktarını 2020 yılına kadar %50 oranında azaltacağını duyurmuştur. [8]

Yeşil telsiz ağları, hem akademik hem de endüstri dünyasında bir trend haline gelen gelecek kablosuz mimari ve teknikleri gelişimi için geniş bir araştırma konusudur. Bu çalışmadan önce, kablosuz ağların enerji tasarrufuna yönelik çalışmalar; ekstra verimli güç yükselticileri tasarımı, verici kayıplarının azaltılması ve pasif soğutma sistemi tasarımı konularında yoğunlaşmıştı. Ama bu çalışmalar birbirinden izole olmakla beraber 5 yada 10 yıl içerisinde enerji tasarrufu sağlama konusunda global bir görüş oluşturmamaktaydı. Yeşil telsiz ağlar çalışması ise karşılıklı tüm sistem seviyelerinde, baştan aşağı tüm mimaride ve iletişim protokollerinde izole olmayan çalışmalar ile elde edilecek olan yenilikçi ve sürdürülebilir fikirleri hedeflemektedir.

9. KAYNAKLAR

- [1] J. Norbu, “GREEN RADIO: Radio Technique to Enable Energy Efficient Wireless Network”, Seminar presentation, CST, Rinchending, 2012
- [2]<http://www.mobilevce.com/green-radio>
- [3] E. Calvanese Strinati, A. De Domenico, L. Herault, “Green Communications: An Emerging Challenge for Mobile Broadband Communication Networks”, *Journal of Green Engineering*, 267–301, 2011
- [4]<http://www.greentouch.org/index.php?page=about-us>
- [5]<https://www.ict-earth.eu/>
- [6] C.Han, T. Harrold, S. Armour, I. Krikidis, S. Videv, P.M. Grant, H. Haas, J. S. Thompson, I. Ku, C.X. Wang, T.A. Le, M.R. Nakhai, J. Zhang, L. Hanzo, “Green Radio: Radio Techniques to Enable Energy-Efficient Wireless Networks”, *Communications Magazine, IEEE*, 49, 46-54, 2011
- [7] P. Grant, “Green Radio – Towards Sustainable Wireless Networks”, Core 5 Programme, 2009
- [8] Y. Chen, S. Zhang, S. Xu, G. Y. Li, “Fundamental Tradeoffs on Green Wireless Networks”, *Communications Magazine, IEEE*, 49, 30-37, 2011