

TÜRKİYE'DEKİ BAZ İSTASYONLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Engin DEMİR* 
Fatma ESEN** 

Alınma: 13.05.2025; düzeltme: 01.07.2025; kabul: 01.07.2025

Öz: Mobil haberleşme sistemlerinin hızla gelişmesi ve hayatın her alanına nüfuz etmesiyle birlikte kesintisiz iletişimin sağlanması amacıyla baz istasyonu sayılarında hızlı artışlar meydana gelmiştir. Bu hızlı artışın enerji tüketimi üzerinde önemli bir etki yaratması nedeniyle enerji verimliliği kritik hale gelmiştir. Bu çalışma, Türkiye'deki baz istasyonlarında enerji verimliliğini artırmaya yönelik yürütülen uygulamaları saha verileri ve literatür bulguları ile incelemektedir. Yapılan incelemeler sonrası; yenilenebilir enerji kullanımı ile %35-40, enerji tasarruflu ekipmanları ile %18-22, çevre dostu soğutma sistemleri ile %25-40 ve akıllı yönetim çözümleri ile %15-20 enerji tasarrufu sağlandığı görülmüştür. Çalışmada aynı zamanda yerli operatörlerin uygulamaları ve ilgili mevzuat çerçevesindeki gelişmeleri analiz ederek, sürdürülebilir bir iletişim altyapısı için atılması gereken adımlar vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, Baz istasyonları, Yenilenebilir enerji kaynakları, Mobil iletişim altyapısı, Akıllı enerji yönetimi, Sürdürülebilir teknolojiler

Evaluation of Energy Efficiency Studies in Base Stations in Turkey

Abstract: With the rapid development of mobile communication systems and their penetration into all areas of life, there has been a rapid increase in the number of base stations in order to ensure uninterrupted communication. Due to significant impact of this rapid increase on energy consumption, energy efficiency has become critical. This study examines the applications carried out to increase energy efficiency in base stations in Turkey with field data and literature findings. Following the investigations, it was observed that renewable energy use resulted in 35-40%, energy-efficient equipment resulted in 18-22%, environmentally friendly cooling systems resulted in 25-40% and smart management solutions resulted in 15-20% energy savings. The study also analyses the practices of local operators and developments within the framework of relevant legislation, emphasizing the steps to be taken for a sustainable communication infrastructure.

Keywords: Energy efficiency, Base stations, Renewable energy sources, Mobile communication infrastructure, Smart energy management, Sustainable technologies

1. GİRİŞ

Mobil haberleşme teknolojilerinde son yıllarda yaşanan büyük gelişmeler, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de iletişim altyapısının hızla genişlemesine neden olmuştur (Demir ve Yılmaz, 2020). Örneğin, Türkiye'de 2005 yılında yaklaşık olarak 5.000 olan baz istasyonu sayısı, 2024 yılı itibarıyla 150.000'i geçmiştir. 3G'den 4.5G'ye, 2025'te ise 5G'ye geçiş aşaması ile;

* Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Görükle, Nilüfer, Bursa
İletişim Yazarı: Engin DEMİR (engindemir_0707@hotmail.com)

** Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Görükle, Nilüfer, Bursa

yüksek hızda veri aktarımı, düşük gecikme süreleri ve daha fazla cihaz bağlantısı gibi taleplerin karşılanması için baz istasyonu sayısında belirgin ve dikkat çekici bir artış gözlemlenmektedir (Aktaş ve Alemdar, 2021).

Bu artış, telekomünikasyon altyapılarının toplam enerji tüketimindeki payını da ciddi ölçüde yükseltmiştir. Özellikle şehirleşmenin ve nüfusun yoğun olduğu yerlerde özellikle veri talebinin artması, baz istasyonlarının daha fazla güç sarf etmesine neden olmakla birlikte enerji tüketimini artırmaktadır. Baz istasyonlarından yalnızca iletişim (anten, radyo gibi) ekipmanlarının değil, aynı zamanda destekleyici ve iklimlendirme sistemlerinden de (soğutma, ısıtma, yedekleme vb.) kaynaklı enerji sarfı meydana gelmektedir. Bu altyapıların çoğunluğu yılın 365 günü, 24 saat kesintisiz çalışması gerektiği için enerji tüketiminde ciddi bir yük oluşturmaktadır. Nitekim literatürde yapılan çalışmalar ortalama bir baz istasyonunun yıllık enerji tüketiminin ortalama 10-30 MWh arasında değiştiğini ortaya koymaktadır (Görgün ve diğ., 2015). Günümüzde, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %30-40'ının bu destekleyici sistemlerden kaynaklandığı görülmektedir.

Bu açıdan, mobil iletişim altyapısında enerji verimliliği için baz istasyonlarının optimize edilmesi, sadece teknik bir zorunluluk değil; aynı zamanda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği destekleyen ve işletme maliyetlerinin azaltılması açısından önemli ve stratejik bir gerekliliktir. Nitekim Türkiye'nin ulusal enerji politikaları, enerji verimliliği ilkeleri doğrultusunda farklı sektörlerde enerji verimliliği hedeflemektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2024-2028 Stratejik Planı'nda da enerji yoğunluğunun düşürülmesi ve yenilenebilir enerji kaynak kullanımının artırılması öncelikli hedefler arasında yer almaktadır (ETKB, 2024).

Bu belirlenen ülke hedefleri doğrultusunda, mobil iletişim altyapısında enerji verimliliğine yönelik uygulamaların artırılmasının teşvik edilmesi, sadece çevresel sürdürülebilirlik ve operatörlerin enerji maliyetlerini düşürmek açısından değil, aynı zamanda Türkiye'nin enerji ithalatını azaltma stratejisine de doğrudan katkı sağlamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle de güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi sistemlerinin uygun koşullardaki baz istasyonlarına entegre edilerek hibrit sisteme geçilmesi, enerji verimliliğini artırmak için öne çıkan önemli stratejiler arasında yer almaktadır. Türkiye'nin birçok bölgesinde güneşlenme süresinin yüksek olması, rüzgâr gücünün yeterli olması bu sistemlerin uygulanabilirliğini artırmaktadır. Ayrıca akıllı enerji yönetim sistemleri, uyarlanabilir yük dengeleme çözümleri ve gelişmiş batarya teknolojileri, akıllı ev iklimlendirme sistemleri de enerji tüketiminin düşmesine katkı sağlayacaktır (Aktaş ve Alemdar, 2021).

Literatürde, baz istasyonlarında enerji verimliliğini artırma amacıyla çeşitli modelleme ve optimizasyon çalışmaları bulunmaktadır. Örneğin Aykın (2014) küçük hücreli baz istasyonları için etkinlik yönetimi algoritmaları geliştirerek, heterojen 5G ağlarında enerji tüketimini düşürmeye yönelik çözümler önermektedir. Aktaş ve Alemdar (2021) ise yeşil ağlar kapsamında, pekiştirmeli öğrenme algoritmaları ile enerji tüketiminin gerçek zamanlı olarak optimize edilmesini sağlamaktadır. Bu tür yapay zekâ temelli yaklaşımlar, Türkiye'deki mobil iletişim operatörleri için gelecekte uygulanabilir teknolojiler arasında değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye'deki baz istasyonlarında enerji verimliliği çalışmaları uygulamalarının mevcut durumu, başarı düzeyi ve karşılaşılan zorluklar bütüncül bir perspektifle ele alınmaktadır. Aynı zamanda baz istasyonlarının enerji ihtiyaç ve tüketimini düşürmek amacıyla uygulanan teknolojilerin ve politika yaklaşımlarının etkinliği, teknik ve ekonomik parametreler ışığında değerlendirilmektedir.

Çalışma, enerji verimliliğini artırmak adına geliştirilen modellerin sahadaki uygulanabilirliğini tartışarak, gelecekte geliştirilebilecek stratejilere bilimsel bir zemin oluşturmayı hedeflemektedir. Ülke genelinde tüketilen elektriğin %2'lik kısmı telekomünikasyon sektörü kaynaklı olduğundan dolayı uygulanacak enerji verimliliği çalışmaları hem sürdürülebilir iletişim hem de sürdürülebilir çevre açısından olumlu katkı sağlayacaktır.

2. TÜRKİYE'DE BAZ İSTASYONLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ YÖNTEMLERİ VE UYGULAMALARI

Türkiye'de mobil haberleşme altyapısının hızla büyümesiyle birlikte, telekomünikasyon sektörünün yıllık enerji tüketimi toplam ülke tüketiminin yaklaşık olarak %2-3'üne karşılık gelmektedir (Demir ve Yılmaz, 2020). Bu oran, çevre ve ekonomik sorunlar nedeniyle baz istasyonlarının enerji ihtiyaçlarının düşürülmesi konusunda hızlı ve sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda geliştirilen stratejiler, genel olarak dört ana başlık altında incelenmektedir. Bunlar: yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, akıllı enerji yönetim sistemlerinin entegrasyonu, pasif ve aktif soğutma optimizasyonları ile dinamik enerji yönetimi uygulamalarıdır. Bu yöntemlerin hem ekonomik hem de çevresel açıdan yararları literatürde detaylı bir biçimde açıklanmaktadır (Aslanbaş ve diğ., 2020). Ayrıca, bu strateji uygulamalarının sadece enerji tüketimini azaltmakla kalmadığı, aynı zamanda da işletme maliyetlerini düşürdüğünü ortaya koymuştur. Özellikle de ülkemiz gibi yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek olan diğer ülkelerde, bu uygulamalar daha da önemli hale gelmektedir.

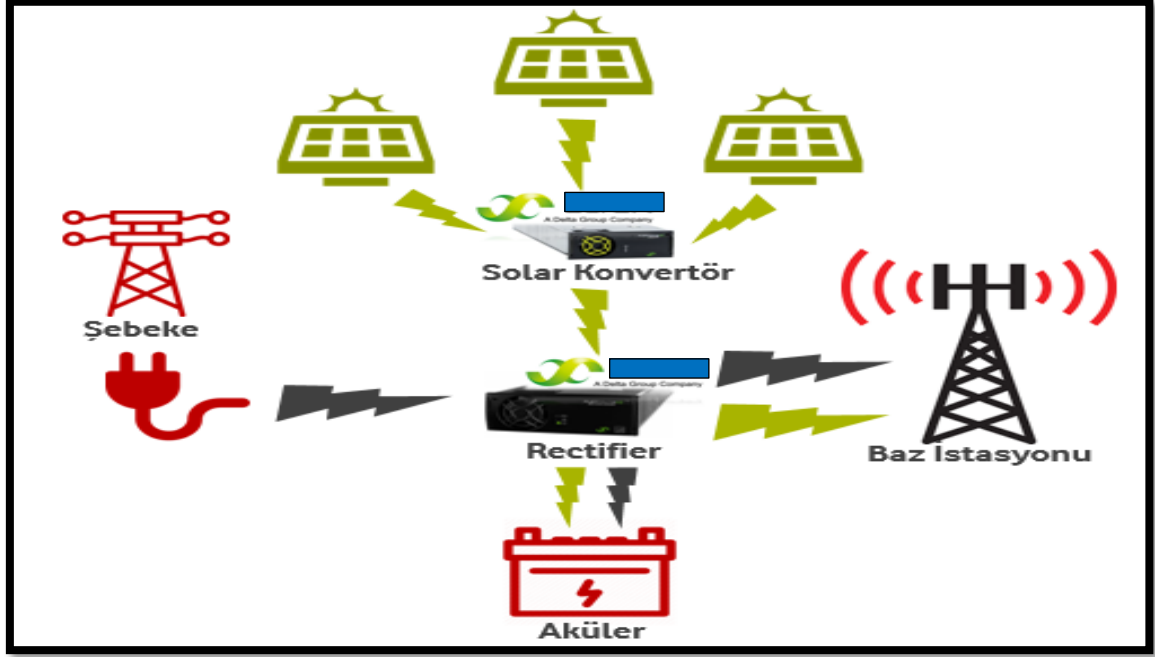
2.1. Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Entegrasyonu

Baz istasyonlarının enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, enerji maliyetlerinin azaltılması, karbon ayak izinin düşürülmesi ve sürdürülebilir iletişimin sağlanması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle güneş enerjisi sistemleri teknolojilerinin gelişmesi ve rekabetin artmasıyla hem yatırım maliyetinin düşmesi hem de teknolojik erişilebilirliğin artması nedeniyle Türkiye'de baz istasyonlarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Görgün ve diğ., 2015). Türkiye'nin yıllık ortalama güneşlenme süresinin 2700 saati aşması nedeniyle, güneş panelleriyle yenilenebilir enerji üretimini daha cazip hale getirmektedir (Aslanbaş ve diğ., 2020). Fotovoltaik sistemler, özellikle şebeke elektriğinin ulaşmadığı kırsal alanlarda veya şebeke elektriği yatırımları maliyetlerinin çok yüksek olduğu iletişim altyapısının sürdürülebilirliğini sağlamada kritik rol oynamaktadır.

Yapılan çalışmalar ve uygulamalar, güneş enerjisi ile desteklenen baz istasyonlarının yıllık enerji tüketiminde %41'e varan oranlarda enerji tasarrufu sağladığını göstermektedir. Bu oran kurulan sistemlerin performansı, kurulum yapılan coğrafyanın güneşlenme süresi, panel markası ve sistem verimliliği gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte, hibrit sistemler kullanılarak güneş enerjisine rüzgâr türbinlerinin veya yakıt hücrelerinin eklenmesi, sürdürülebilir ve kesintisiz enerji temini açısından daha güvenli bir yapı sunmaktadır (Aslanbaş ve diğ., 2020).

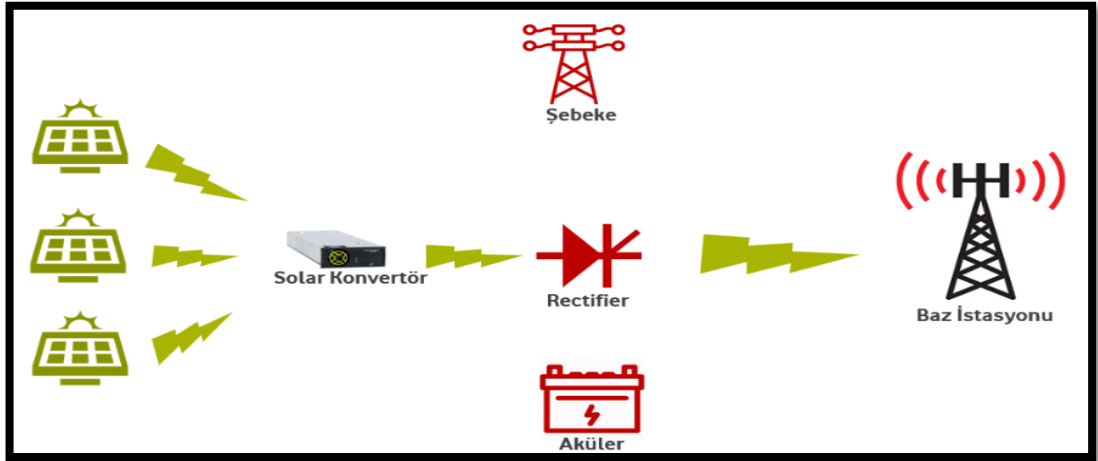
Ayrıca, güneşten enerji üretimiyle birlikte depolama sistemlerinin entegrasyonu da çok önem arz etmektedir. Lityum iyon pillerin verimli bir şekilde kullanılması, enerji sürekliliğini sağlayarak kesintisiz iletişimi desteklemekte ve sistem performansını yükseltmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin uygulamaları kadar, üretilen bu enerjinin yönetilmesi de büyük önem arz etmektedir. Şekil 1 de on grid (şebekeyle bağlantılı) güneş enerjisi sistemlerinin (GES) çalışma şeması görülmektedir.

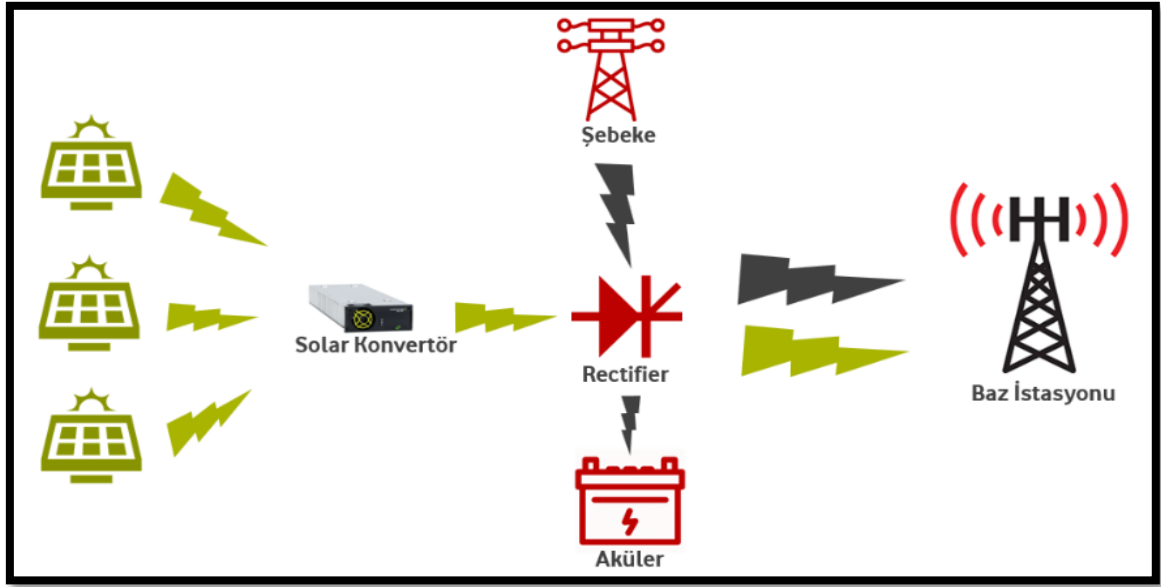


Şekil 1:
Güneş Enerji Sistemi Çalışma Şeması

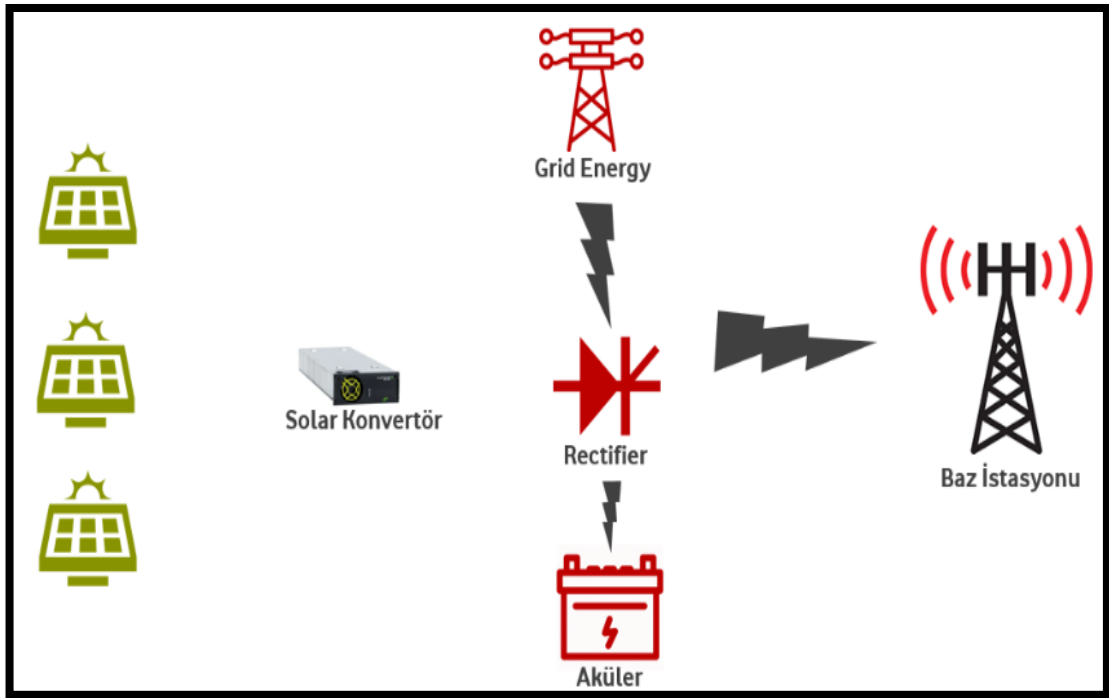
Güneş enerji sistemlerinden (GES) elde edilen enerji güneşli bir günde baz istasyonunun tüm enerji ihtiyacını karşılarken, bulutlu bir günde sistemden gelen enerji yeterli olmadığından şebekeden de enerji desteği gerekmektedir. Gece sistemden enerji üretimi olmadığı için baz istasyonu için gerekli enerji tümüyle şebekeden karşılanmaktadır (Şekilde 2-4).



Şekil 2:
Güneşli Günde GES Çalışma Şeması



Şekil 3:
Bulutlu Günde GES Çalışma Şeması



Şekil 4:
Gece GES Çalışma Şeması

Şekil 5'te Bursa ilinde bir operatörün baz istasyonunun enerji ihtiyacını karşılamak için kurulan on grid (şebekeyle bağlantılı) GES uygulaması, Şekil 6'da ise Balıkesir ilinde farklı bir operatörün GES uygulaması gösterimleri yapılmıştır.



Şekil 5:
Bursa İli GES Uygulaması



Şekil 6:
Balıkesir İli GES Uygulaması

2.2. Akıllı Enerji Yönetim Sistemleri

Mobil haberleşme altyapısının hızla artan enerji ihtiyacı, baz istasyonlarında enerji verimliliğini sağlamak hedef ve amacıyla akıllı enerji yönetim sistemlerinin kullanımını çok önemli kılmaktadır. Bu sistemler, enerji tüketimini optimize etmek, işletme maliyetlerini azaltmak ve çevresel etkileri en aza indirmek için geliştirilmiştir.

Akıllı enerji yönetim sistemleri, gerçek zamanlı veri analizi ve otomatik kontrol mekanizmaları ile enerji tüketimini etkin bir şekilde yönetmektedir. Bu sistemler, enerji kullanımını izleyerek gereksiz enerji tüketimini önlemekte ve bakım ihtiyaçlarını önceden tespit ederek işletme verimliliğini artırmaktadır (Üstünsoy ve Sayan, 2017).

Türkiye'deki büyük operatörler (Türk Telekom, Turkcell, Vodafone) tarafından kullanılan bazı baz istasyonlarında yapay zekâ destekli HVAC kontrol sistemleri uygulanmaya başlanmıştır (Akgül ve diğ., 2021). Bu sistemler; sıcaklık, nem, dış ortam koşulları ve enerji tüketimini analiz ederek, fan hızını ve soğutucu devreyi optimize etmektedir (Akgül ve diğ., 2021). Ayrıca uzaktan izleme ve kontrol sistemleri sayesinde bakım maliyetleri de azalmaktadır.

Vodafone Türkiye, geliştirdiği enerji optimizasyon platformu sayesinde 2022 yılında yaklaşık olarak %18 oranında enerji tasarrufu sağladığını açıklamıştır. Bu sistemler aynı zamanda arıza tahmini, yedek güç kaynaklarının yönetimi ve ekipman yaşam döngüsü analizlerinde de kullanılmaktadır (Vodafone Türkiye Sürdürülebilirlik Raporu, 2020).

Benzer şekilde, Türk Telekom da 2023 yılında 200'den fazla baz istasyonunda akıllı enerji yönetim sistemleri kurarak %16'lık bir tasarruf sağlamıştır (Türk Telekom Sürdürülebilirlik Raporu, 2023).

Ayrıca, akıllı ulaşım sistemlerinde yol kenarlarındaki baz istasyonlarının enerji etkinliği üzerine yapılan araştırma ve çalışmalar, bu sistemlerin enerji verimliliğini artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle, yol kenarı baz istasyonlarının kullanımını planlayan modeller geliştirilerek enerji tüketimi azaltılmakta ve servis kalitesi korunmaktadır (Yazar ve Eren, 2025).

Bu enerji yönetim sistemlerinin uygulanması, enerji kullanımının azaltılmasının yanı sıra, ağır genel güvenilirliğini artırmakta ve sürdürülebilir bir haberleşme altyapısı sağlamaktadır. Bu yüzden, akıllı enerji yönetim sistemlerinin baz istasyonlarına entegrasyonu, enerji verimliliği hedeflerine ulaşmada stratejik ve bir öneme sahiptir.

Ancak, enerjinin etkin bir şekilde yönetimi kadar, tüketim miktarının azaltılması da enerji verimliliği açısından kritik rol oynamaktadır.

2.3. Uyku Modu ve Dinamik Güç Yönetimi

Mobil haberleşme sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilen yöntemlerden biri, baz istasyonlarının düşük trafik yoğunluğu dönemlerinde uyku moduna geçirilmesidir. Bu yaklaşım, enerji tüketimini azaltmanın yanı sıra, sistemin genel verimliliğini de artırmakta önemli rol oynamaktadır (Yıldız, 2021).

Uyku modu uygulamaları, özellikle kablosuz algılayıcı ağlarda enerji tasarrufu sağlamak adına yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, gereksiz enerji tüketimini önlemek amacıyla, belirli kısımlar uyku moduna alınarak radyo frekansı iletim fonksiyonları kapatılmaktadır (Yıldız, 2021).

Dinamik güç yönetimi ise, baz istasyonlarının enerji tüketimini gerçek zamanlı olarak optimize etmeyi hedefleyen bir yaklaşımdır. Bu yöntem, trafik yoğunluğuna bağlı olarak baz istasyonlarının güç seviyelerini ayarlayarak, enerji verimliliğini artırmaktadır (Yıldız, 2021).

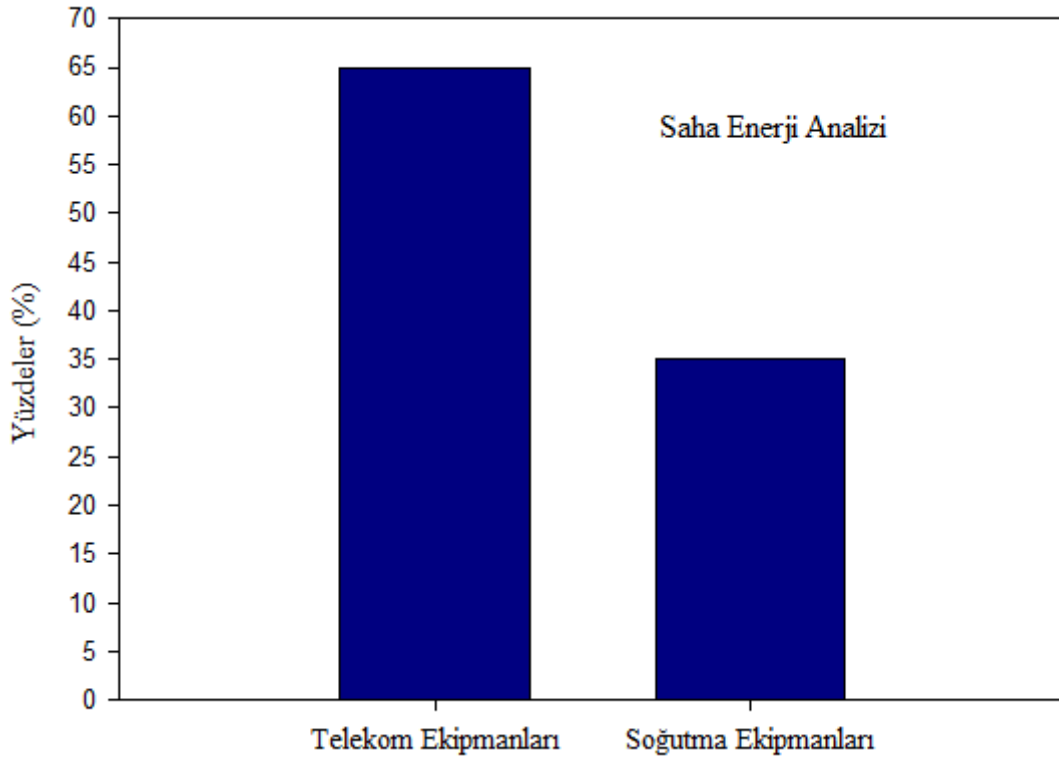
Huawei Türkiye'nin 5G test şebekelerinde uygulanan bu yöntemle %22 oranında enerji tasarrufu sağlandığı bildirilmiştir. Bu yöntem, özellikle nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu şehir içi iletişim ağlarında ciddi bir katkı anlamına gelir (Huawei Türkiye, 2023).

Bu sistemlerin uygulanması, enerji verimliliğinin yanı sıra, iletişim ağının genel güvenilirliğini artırmakta ve sürdürülebilir bir haberleşme altyapısı sağlamaktadır. Bu yüzden, uyku modu ve dinamik güç yönetimi uygulamaları, enerji verimliliği hedeflerine ulaşmada stratejik öneme sahip sistemlerdir.

2.4. Enerji Verimli Soğutma Sistemleri

Sıcaklık optimizasyonu, sahadaki konteyner ya da dış mekân kabinin sıcaklığını istenilen (sistemlerin sağlıklı çalışması için gerekli olan sıcaklık) optimum değerde tutulmasıdır. Sıcaklık optimizasyonunu etkileyen parametreler ise; akü özellikleri, sahanın tipi (konteyner/dış mekân), sahada bulunan soğutma sistemleri ve özellikleri ve sahadaki elektronik ekipman yoğunluğu ve etkinliğidir.

Sahada enerji analizi yapıldığında, Telekom ekipmanlarının %65, soğutma ekipmanlarının ise %35 enerji tükettiği gözlemlenmektedir. Şekil 7’de saha enerji tüketim ekipmanları analizi gösterimi verilmektedir.



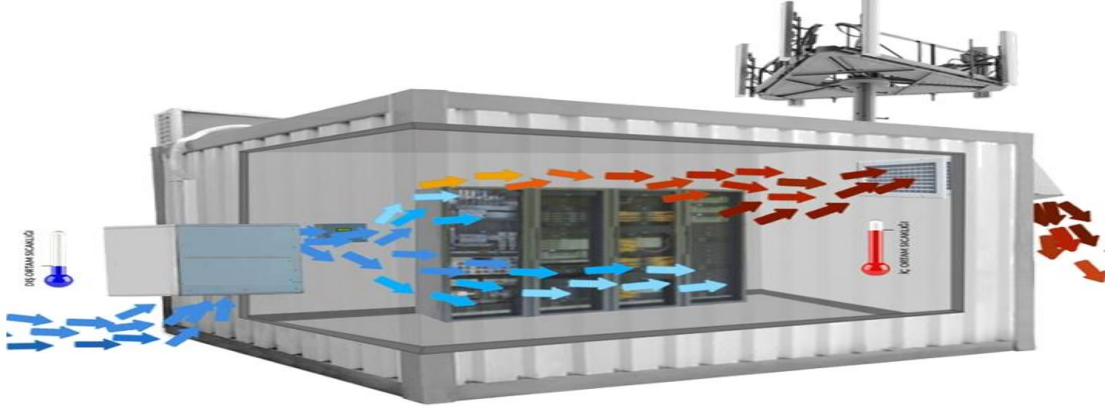
Şekil 7:
Saha Enerji Analizi

Enerji verimliliğini sağlamak için sahalarda split klimalarla birlikte Free Cooling (Doğal Havalandırma) Ekipmanı (FCE) kullanılmaktadır.

FCE’lerin çalışma yöntemi ve özellikleri;

- Doğal havalandırma sistemleridir.
- İç ortamda ısınan hava dışarı tahliye edilir.
- Dış ortamdaki soğuk hava bir fan ve bir filtre ile içeriye alınır.
- Fanın çalışması için dış ortam sıcaklığı, konteyner içi sıcaklıktan en az 2 derece daha soğuk olmalıdır.

- İç ortam sıcaklık ve dış ortam sıcaklık farkına bağlı olarak, FCB fanı değişken fan hızlarında çalışır.
 - Değişken fan çalışma hızları ile minimum güç tüketimi ve istenilen soğutma sağlanır.
- Şekil 8’de Doğal Havalandırma sisteminin çalışması gösterilmektedir.



Şekil 8:
Free cooling Çalışma Prensibi

Turkcell, 2020 yılında başlattığı “Yeşil Baz İstasyonu Projesi” kapsamında, Türkiye genelinde yaklaşık 5.000 istasyonda doğal havalandırma sistemlerine geçmiş ve yıllık yaklaşık 20 milyon kWh enerji tasarrufu sağlandığını açıklamıştır (Turkcell Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporu, 2021). Şekil 9’da baz istasyonuna uygulanan doğal havalandırma ekipmanı iç ve dış görüntüsü verilmektedir.



Şekil 9:
Doğal havalandırma ekipmanı saha uygulaması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Türkiye’deki baz istasyonlarında enerji verimliliği uygulamaları ve önlemleri, sektörel veriler ve örnek uygulamalar üzerinden değerlendirilmiştir. Baz istasyonlarında çeşitli teknolojik uygulama ve yatırımlar sayesinde önemli derecede enerji tasarruflarının mümkün olduğu tespit edilmiştir.

3.1. Bulguların Genel Özeti

Bu çalışma kapsamında araştırılan ve incelenen veriler, Türkiye’de enerji verimliliğine yönelik çalışmaların dört temel strateji etrafında şekillendiğini ve bu stratejilerin operatörler tarafından farklı oranlarda benimsenerek uyguladığını ortaya koymuştur. Bunlar; Yenilenebilir enerji uygulamaları, akıllı enerji yönetim sistemleri, uyku modu teknolojileri ve enerji verimli iklimlendirme sistemleri olmak üzere öne çıkan teknolojilerdir.

Yapılan çalışmalara göre, güneş enerjisi sistemleri uygulanan baz istasyonlarında %35-41 oranında enerji tasarrufu sağlanırken (Kara ve Bayraktar, 2022), yapay zekâ destekli akıllı enerji yönetimi uygulamaları ağ genelinde %20’e kadar ek verimlilik yaratabilmektedir (Türkmen ve Şahin, 2023).

Tablo 1 Türkiye’de mevcut baz istasyonlarında enerji verimliliği amacıyla öne çıkan sistemlerin uygulama yaygınlıkları ve ortalama enerji tasarruflarını kapsamlı bir şekilde gösterilmektedir. Buna göre güneş enerjisi ve doğal soğutma sistemleri en yüksek enerji verimliliği sağlayan uygulamalardır. Turkcell’in doğal soğutma sistemi uygulamaları ile yıllık 20 milyon kWh enerji tasarrufu gerçekleştirdiği belirtilmektedir (Turkcell Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporu, 2021).

Tablo 1. Enerji Verimliliği Yöntemlerinin Yaygınlık ve Tasarruf Ortalaması

Yöntem	Yaygınlık (%)	Ortalama Tasarruf (%)
Güneş Enerji Sistemleri	32	35-40
Akıllı Enerji Yönetim Sistemleri	45	15-20
Uyku Modu/Dinamik Güç Yönetimi	38	18-22
Free Cooling	29	25-40

Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) verilerine göre, Avrupa ülkelerinde baz istasyonlarında uygulanan enerji verimliliği yöntemleriyle ortalama %20–25 enerji tasarrufu sağlanırken, Türkiye’de bu oran %15–22 aralığındadır. Ülkemiz ve Avrupa ülkeleri arasındaki bu fark, Türkiye’deki uygulamaların daha yeni olması ve bazı bölgelerde altyapı eksikliklerinin sürmesiyle açıklanabilir (European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2021).

ABD merkezli bir çalışmada, enerji verimliliği optimizasyonu için yapay zekâ temelli algoritmaların baz istasyonlarında uygulandığı görülmektedir. Özellikle makine öğrenmesi modelleriyle trafik yoğunluğuna göre otomatik güç ayarlamaları yapılması sayesinde, enerji tüketiminde %23’e varan düşüş sağlandığı bildirilmiştir. Bu çalışma, gelecekte Türkiye’de de uygulanabilir nitelikte bir model sunmaktadır (Rangan ve diğ., 2014). Çalışmada ayrıca 5G altyapılarında enerji verimliliği konusunun sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik açısından da öncelikli olduğu vurgulanmaktadır.

Çin’de gerçekleştirilen kapsamlı bir saha çalışmasında, baz istasyonlarının enerji performanslarının yapay zekâ destekli denetleyicilerle artırıldığı ve ısı yönetimi stratejileriyle desteklendiği belirtilmiştir. Bu sistemlerle, toplam enerji tüketiminde %18’lik bir azalma sağlanmış ve karbon emisyonları da ölçülebilir seviyede düşürülmüştür (Zhang ve diğ., 2020). Bu tür uygulamalar, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için teknoloji transferine yönelik önemli fırsatlar sunmaktadır.

Güneş enerjisi sistemleri teknik şartlar nedeniyle kırsal bölgelerde etkin ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Akıllı enerji yönetimi sistemleri, yeni nesil baz istasyonlarında uygulanmaktadır. Uyku modu ve dinamik yönetim teknolojileri daha çok 4.5G ve 5G istasyonlarında yer almaktadır. Free Cooling ve hibrit soğutma sistemleri, sıcak bölgelerde enerji tasarrufu ve verimliliğine katkı vermekte fakat mevsimsel sınırlamalara tabidir.

Türkiye’de baz istasyonlarında enerji verimliliği uygulamaları umut verici bir oranda olsa da mevcut altyapının dönüşümü, teknik bilgi eksiklikleri, yüksek yatırım maliyetleri ve mevzuatsal desteklerin sınırlılığı ve yetersizliği gibi sebeplerden dolayı yavaş ilerlemektedir. Özellikle yerli üretim güneş paneli sistemleri üreticilerinin desteklenerek teşvik edilmesi, enerji verimli soğutma sistemleri için yeni Ar-Ge projelerinin desteklenmesi ve eski nesil baz istasyonlarına yönelik modernizasyon programlarının hızlandırılması bu alandaki ilerlemeyi ciddi şekilde destekleyecektir.

Gelecekte yapay zekâ temelli enerji yönetim sistemleri, esnek mikro şebeke uygulamaları ve enerji depolama teknolojilerinin entegrasyonu, Türkiye’nin mobil haberleşme altyapısının enerji verimliliği hedeflerine ulaşmasında önemli rol oynayacaktır.

Enerji verimliliği teknolojileri sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da önemli faydalar sağlamaktadır. Operatörler arasında farklı stratejilerin benimsenmesi ve uygulanması, altyapı farklılıkları, iklim koşulları ve yatırım maliyetlerine bağlı olmaktadır. Ayrıca kamu teşvikleri ve mevzuat desteği de enerji verimliliği uygulamalarının yaygınlığını etkileyen en önemli faktörlerdendir.

4. SONUÇLAR

Mobil haberleşme teknolojilerinde meydana gelen hızlı gelişmeler ve Türkiye’deki mobil haberleşme altyapısı ihtiyacının giderek artması nedeniyle baz istasyonlarının sayısının her geçen gün artmasına yol açmaktadır. Bu baz istasyonu sayılarındaki artışın enerji tüketiminde belirgin bir yükselişe neden olmasından dolayı enerji verimliliği konusu daha da kritik hale gelmektedir. Bu nedenle Türkiye’deki baz istasyonlarında enerji verimliliğini artırmak adına yapılacak uygulamaların yaygınlaştırılması önem kazanmaktadır.

Baz istasyonlarında enerji verimliliğini artıran yenilikçi teknolojiler ve yöntemler büyük faydalar sağlamaktadır. Fakat, Türkiye’deki baz istasyonlarında enerji verimliliğini artırmaya yönelik mevcut uygulamaların değerlendirilmesi kapsamındaki çalışmalar sınırlıdır. Bu yüzden, sektördeki tüm paydaşların iş birliği içinde çalışması, enerji verimliliği konusunda yapılacak yatırımların daha etkin olmasını sağlayacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonuna yönelik stratejilerin hızla benimsenmesi ve bu doğrultuda mevzuatın güncellenmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında Türkiye’de baz istasyonlarında, enerji verimliliğini artırmaya yönelik uygulamalar, saha verileri ve literatür bulguları detaylı biçimde incelenmiştir. İnceleme sonucu elde edilen bulgular, sektördeki enerji tüketiminin minimize edilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması için çeşitli teknolojik çözümlerin etkinliğini ortaya koymaktadır. Araştırmanın bulgularına dayanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. **Yenilenebilir Enerji Kullanımı Artırılmalıdır:** Güneş enerjisi sistemlerinin kırsal alan baz istasyonlarında entegrasyonu ile %35–40 arasında enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir. Bu teknolojilerin desteklenmesi, enerji maliyetlerini azaltırken karbon salımını da önemli ölçüde düşürecek ve çevresel sürdürülebilirliğe de önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Şebekeye olan enerji bağımlılığını düşürecek ve sürdürülebilir kesintisiz iletişim sağlayacaktır.
2. **Akıllı Enerji Yönetim Sistemlerinin Yaygınlaştırılması Gerekmemektedir:** Gerçek zamanlı veri analizi ve yük optimizasyonu yapan sistemlerin kullanılması sayesinde %15–20 arası enerji tasarrufu sağlandığı görülmüştür.

Bu sistemlerin daha fazla baz istasyonunda uygulanması hem operasyonel verimliliği artıracak hem de işletme, arıza ve bakım maliyetlerini azaltacaktır.

3. **Uyku Modu ve Dinamik Güç Yönetimi Uygulamaları Geliştirilmelidir:** Düşük trafik dönemlerinde enerji tüketimini %18–22 oranında azaltan bu uygulamalar, şebeke planlamalarında standart hale getirilmelidir. Özellikle şehir içi yoğun bölgelerde enerji optimizasyonu için uyku modları etkin şekilde kullanılmalıdır. Bu sistemler sayesinde ekipmanların çalışma ömrü uzayacaktır.
4. **Enerji Verimli Soğutma Sistemleri Stratejik Olarak Konumlandırılmalıdır:** Free Cooling sistemleri gibi enerji tasarruflu soğutma yöntemleri, serin iklim bölgelerinde uygulanarak %25–40 gibi tasarruf potansiyelinden yararlanılabilir. İklim analizleri yapılarak uygun bölgelerde bu sistemlerin kullanımının artırılması hatta zorunlu hale getirilmesi önerilmektedir. Bu sistem sayesinde iklimlendirme için kullanılan klimaların çalışma süreleri düşürülerek hem enerji tüketimi azalacak hem de klimaların kullanım ömrü uzayacaktır.
5. **Kamu Teşvikleri ve Mevzuat Destekleri Artırılmalıdır:** Enerji verimliliği yatırımları için operatörlerin vergi avantajları veya teşvik programları ile desteklenmesi, dönüşüm sürecini ve operatörlerin bu sistemlere olan yatırımlarını hızlandıracaktır. Ayrıca Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planında mobil iletişim altyapısına özel bir yer verilmelidir.
6. **İleri Araştırmalar ve Teknolojik Gelişmeler Desteklenmelidir:** Veri merkezleri ile baz istasyonlarının entegre enerji yönetimi, yapay zekâ tabanlı güç optimizasyon sistemleri ve yenilikçi batarya teknolojileri üzerine ileri araştırmalar yapılması kritik önem taşımaktadır. İleri teknoloji lityum batarya sistemleri üzerine ar-ge çalışmaları yapılmalıdır ve yenilebilir enerjiden elde edilen enerji depolanarak, gece ve kış aylarında şebekeye minimum oranda ihtiyaç duyarak enerji sürekliliği sağlanmalıdır.

Sonuç olarak, Türkiye'deki baz istasyonlarında enerji verimliliğini artırmaya yönelik uygulamaların etkinliğinin artırılması, yalnızca maliyetleri düşürmekle kalmayıp, çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli katkılar sağlayacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, baz istasyonlarının çevresel etkilerini azaltmanın yanı sıra, enerji tasarrufu sağlamak adına büyük fırsatlar sunmaktadır. Ayrıca, akıllı enerji yönetim sistemleri, enerji verimli soğutma sistemlerinin entegrasyonu ve enerji depolama sistemleri Türkiye'deki baz istasyonlarının enerji verimliliğini önemli ölçüde artıracaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Çalışmada ele alınan çalışmalar ve sektör uygulamaları, yazarların kişisel veya kurumsal çıkarlarına bağlı olmadan, bağımsız bir perspektifle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, literatürde yer alan bilimsel çalışmalar ve sektör raporları temel alınarak objektif bir şekilde sunulmuştur.

YAZAR KATKISI

Bu çalışmaya katkı sağlayan yazarlar ve katkıları şu şekildedir: **Engin DEMİR**, çalışmanın kavramsal ve değerlendirme süreçlerinin belirlenmesi ve yönetiminde, literatür taramasının yapılmasında, enerji verimliliği ve teknolojik yeniliklerin uygulanabilirliğine dair teorik çerçevenin oluşturulmasında önemli bir rol üstlenmiştir. **Fatma ESEN** ise toplanan veri analizi süreçlerini yürütmüş, enerji verimliliği uygulamalarının teknik değerlendirilmesini gerçekleştirmiş ve elde edilen analizlerin yorumlanmasında katkıda bulunmuştur.

KAYNAKLAR

1. Akgül, M., Özkan, B., & Yıldız, F. (2021) Enerji verimliliği açısından yapay zekâ tabanlı iklimlendirme sistemleri. *Journal of Energy Systems*, 5(3), 199-207.
2. Aktaş, S., & Alemdar, H. (2021) Base Station Power Optimization for Green Networks Using Reinforcement Learning. *Proceedings of the 4th International Symposium on Advanced and Applied Convergence*. <https://doi.org/10.35377/saucis.04.02.932709>
3. Aslanbaş, S., Şencan Şahin, A., & Yakut, A.K. (2020) GSM Baz İstasyonunun Güç İhtiyacını Karşılacak Fotovoltaik Sistem Tasarımı. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 12(1), 27-33.
4. Aykın, I. (2014) *Activity management algorithm for improving energy efficiency of small cell base stations in 5G heterogeneous networks* (Master's Thesis, Bilkent University, Institute of Science). Bilkent University.
5. Demir, T., & Yılmaz, S. (2020) Mobil Tabanlı Şebekelerde Enerji Yönetimi: Mevcut Durum ve Gelecek Trendler. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 600-610.
6. [https://enerji.gov.tr/2024-2028 Stratejik Plani.pdf](https://enerji.gov.tr/2024-2028%20Stratejik%20Plani.pdf), Erişim Tarihi: 01.03.2025, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB, 2024) *2024-2028 Stratejik Planı*.
7. European Telecommunications Standards Institute (ETSI, 2021) *Energy Efficiency Metrics for Wireless Access Networks*. ETSI Technical Report.
8. Görgün, H., Sevil, M., & Ercan, M. (2015) Baz istasyonlarının matematiksel olarak güç tüketim fonksiyonunun belirlenmesi ve enerji tüketiminin kestirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 31(1), 73-81.
9. <https://huawei.com.tr>, Erişim Tarihi: 01.04.2025, Huawei Türkiye (2023) *5G Enerji Verimliliği Proje Sonuçları Raporu*.
10. Kara, M., & Bayraktar, M. (2022) Güneş Enerjili Mobil Haberleşme İstasyonları için Enerji Verimliliği Analizi. *Journal of Energy Systems*, 6(2), 89-97.
11. Rangan, S., Rappaport, T. S., & Erkip, E. (2014). Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: *Potentials and Challenges*. *Proceedings of the IEEE*, 102(3), 366-385. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2299397>
12. <https://www.turkcell.com.tr>, Erişim Tarihi: 25.03.2025, Turkcell (2021) *Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporu*.
13. <https://turktelekom.com.tr>, Erişim Tarihi: 01.04.2025, Türk Telekom (2024) *Enerji Verimliliği Faaliyetleri Raporu*.
14. Türkmen, İ., & Şahin, F. (2023) 5G Şebekelerinde Enerji Verimliliği için Yapay Zekâ Yaklaşımları. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2023(1), 25-34.
15. Üstünsoy, F., & Sayan, H. H. (2017) PLC destekli SCADA ile enerji yönetimi için örnek laboratuvar çalışması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 30(4), 1-10. <https://doi.org/10.2339/politeknik.385922>
16. <https://vodafone.com.tr>, Erişim Tarihi: 01.04.2025, Vodafone Türkiye (2023) *Sürdürülebilirlik Raporu*.
17. Yazar, Y., & Eren, T. (2025) Afet sonrası taşınabilir baz istasyonu yer seçimi: Bingöl şehir merkezi örneği. *Politeknik Dergisi*, 28(1), 1-12. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1310410>
18. Yıldız, A. (2021) *Yeni nesil yeşil hücreli haberleşme sistemlerinde baz istasyonu anahtarlama ile enerji verimli kullanıcı ataması* (Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü) Ankara TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi.
19. Zhang, Y., Wang, C., & Liu, Y. (2020). *AI-Based Energy Optimization for Sustainable Base Station Networks in Smart Cities*. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 5(3), 356-368. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2019.2902467>

