



KARBON NÖTR GELECEĞE DOĞRU: AKILLI SİSTEMLERİN ENTEGRE UYGULAMALARIYLA KARBON AYAK İZİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Recep Önder SÜRMELİ^{1,a,*}

¹Çevre Mühendisliği, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Merkez, Bartın.

^arsurmeli@bartin.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2869-6639

(Geliş/Received: 06.05.2025; Kabul/Accepted: 25.06.2025)

ÖZET

Günümüzde sera gazları kaynaklı olan küresel ısınma ve iklim değişikliği, çevresel sürdürülebilirlik ve canlı yaşamı açısından en büyük tehditlerden biri haline gelmiştir. Karbon ayak izinin azaltılması, bu tehdidi en aza indirmek için başlıca stratejilerden birisi olup, akıllı sistemler bu süreçte oldukça önem taşımaktadır ve anahtar bir rol oynamaktadır. Bu derleme makalesi, akıllı sistemlerin karbon nötr bir geleceğe ulaşmadaki etkisini ve potansiyelini incelemektedir. Öncelikle, akıllı cihazlar, enerji yönetim sistemleri, ulaşım çözümleri ile su ve atıksu yönetimi gibi alanlardaki yenilikçi teknolojilerin çevresel sürdürülebilirliğe katkıları incelenmektedir. Çalışmada, IoT tabanlı enerji yönetimi, akıllı bina sistemleri, yenilenebilir enerjinin entegre edilmesi ve akıllı şebekeler gibi teknolojilerin enerji verimliliğini artırarak sera gazı salınımlarını nasıl düşürdüğü detaylı bir şekilde aktarılmakta ve örneklerle anlatılmaktadır. Ayrıca, elektrikli ve otonom araçlar, akıllı trafik yönetimi ve toplu taşıma ile beraber mikro mobilite optimizasyonunun şehirlerde sürdürülebilir bir hareketliliği teşvik ettiği vurgulanmaktadır. Bunun yanı sıra, akıllı su yönetimi ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarının atık miktarını ve karbon dioksit başta olmak üzere sera gazı salınımını azaltmadaki rolü değerlendirilmektedir. Ancak, akıllı sistemlerin yaygınlaşmasını engelleyen bazı temel zorluklar bulunmaktadır. Çalışmada, bu engellerin aşılması için gerekli olan politikalar, teşvik mekanizmaları ve araştırma-geliştirme faaliyetleri tartışılmaktadır. Son olarak, akıllı sistemlerin geleceği ve gelişim alanları üzerine öneriler sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karbon ayak izi, karbon nötr, akıllı sistemler, enerji verimliliği, akıllı ulaşım, akıllı cihazlar, akıllı enerji yönetimi, sürdürülebilirlik

TOWARDS A CARBON-NEUTRAL FUTURE: THE IMPACT OF INTEGRATED APPLICATIONS OF SMART SYSTEMS ON CARBON FOOTPRINT

ABSTRACT

Today, global warming and climate change were primarily driven by greenhouse gas emissions, which have become some of the most significant threats to environmental sustainability and all life forms. Reducing the carbon footprint is one of the key strategies for diminishing this threat, and smart systems play a crucial and central pivot role in this process. This review article examines the influence and

potential of smart systems in achieving a carbon-neutral future. It first investigates the contributions of innovative technologies in areas such as smart devices, energy management systems, transportation solutions, and water and wastewater management to environmental sustainability. The study provides a detailed discussion on how IoT-based energy management, smart building systems, the integration of renewable energy, and smart grids enhance energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions. Furthermore, it features how electric and autonomous vehicles, intelligent traffic management, public transportation, and micro-mobility optimization boost sustainable urban mobility. In addition, the role of smart water management and circular economy approaches in limiting waste generation and reducing greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide is evaluated. However, several key challenges delay the extensive adoption of smart systems. This study discusses the policies, stimulus mechanisms, and research and development efforts needed to overcome these barriers. Finally, it offers recommendations on the future of smart systems and potential areas for further development.

Keywords: Carbon footprint, carbon neutral, smart systems, energy efficiency, smart transportation, smart devices, smart energy management, sustainability

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde küresel ısınma ve iklim değişikliği, insan yaşamı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından en önemli ve ciddi risklerden biri olarak görülmekte ve her geçen gün etkilerini arttırarak devam etmektedir. Fosil yakıt kullanımı, sanayileşme, ulaşım ve tarım faaliyetleri, enerji tüketimi gibi insan kaynaklı eylemler, atmosfere büyük miktarda sera gazı (CO_2 , CH_4 , N_2O , florlu gazlar vb.) salımına neden olarak küresel sıcaklık artışını hızlandırmaktadır [1]. Bu bağlamda, karbon ayak izi, bireylerin, kuruluşların, etkinliklerin ve ülkelerin faaliyetleri sonucunda atmosfere salınan toplam sera gazı miktarını ifade eder [2] ve karbon dioksit eşdeğeri ($\text{CO}_2\text{eq}/\text{CO}_2\text{e}$) olarak tümünün toplamı olarak gösterilmektedir. Bu emisyonların azaltılması, küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir strateji ve girişim olmakta, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kullanımı ve akıllı teknolojilerin entegrasyonu gibi çeşitli yöntemlerle sağlanabilmektedir [3].

Son yıllarda Birleşmiş Milletler'in küresel sürdürülebilir kalkınma amaçlarına (SKA) yönelik yapılan çalışmalar, karbon ayak izini düşürerek minimize etmeye ve hatta sıfırlamayı amaçlayan (karbon nötr) kapsamlı politikalar içermektedir [4]. SKA ve Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası girişimler, ülkeleri ve şirketleri düşük karbonlu ekonomilere geçiş yapmaya teşvik etmekte [5] ve bazı durumlarda da zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, birçok ülke ve kurum, karbon nötr olma hedeflerini benimseyerek, azaltma veya dengeleme politikalarını hayata geçirmektedir [6, 7]. Bu politikalar arasında genellikle yenilenebilir enerji yatırımları, enerji verimli teknolojilerin yaygınlaştırılması ve dijitalleşme odaklı çözümler öne çıkmaktadır [8, 9].

Teknoloji alanındaki atılımlar, bu kritik sorunsalın çözümü noktasında kritik bir rol oynamaktadır. Akıllı sistemler, enerji yönetiminden ulaşım planlamasına, atık kontrolünden su yönetimine kadar geniş bir kapsamda sürdürülebilir çözümler sunmakta ve yüksek katkı sağlamaktadır [10, 11]. Yapay zekâ (artificial intelligence (AI)), büyük veri analitiği (big data

analytics), nesnelerin interneti (internet of things (IoT)) ve otomasyon teknolojileri, enerji tüketimini optimize etmek ve gereksiz kaynak kullanımını engellemek için giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [12, 13]. Akıllı şebekeler (smart grids) aracılığıyla elektrik üretimi ve dağıtımı daha verimli bir duruma getirilmekte, akıllı ulaşım sistemleri sayesinde ise yüksek fosil yakıt tüketimi ve emisyonlar azaltılabilmektedir [14, 15].

Özellikle enerji sektöründe akıllı çözümler büyük fırsatlar sunmakta olup, uygulanacak çözümlerin etkisi de önemli farklar yaratabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesi ve dağıtık enerji üretimi gibi yaklaşımlar, fosil yakıtlara olan ihtiyacı azaltmakta, enerji depolama sistemleri ve akıllı sayaçlar gibi teknolojiler tüketicilere daha verimli enerji kullanımı olanağı sunmaktadır [16]. Endüstriyel ve ticari tesislerde, yapay zekâ destekli enerji yönetim sistemleri ile gereksiz ve verimsiz enerji tüketimi tespit edilmekte, enerji verimliliği artırılmaktadır [17].

Bununla birlikte, ulaşım ve lojistik sektöründe de akıllı sistemler oldukça önemli roller üstlenmektedir. Elektrikli ve otonom araçlar, akıllı trafik yönetimi sistemleri ve paylaşımlı mobilite çözümleri, ulaşım kaynaklı ortaya çıkan istenmeyen salınımları düşürmeye yardımcı olmaktadır [18, 19]. Şehir içi ulaşımında akıllı toplu taşıma sistemleri, bireysel araç kullanımını azaltmakta böylece trafik yoğunluğu düşürülmekte ve yakıt tüketimi minimize edilmektedir. Ayrıca, lojistik sektöründe rota optimizasyonu sağlayan yapay zekâ algoritmaları, zamandan kazanç sağlamak hem de fazla yakıt kullanımını azaltmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [20].

Bu çalışmada, karbon ayak izini azaltmada akıllı sistemlerin rolü incelenerek detaylı olarak ele alınmakta ve karbon nötr olabilmek için çeşitli yaklaşımlar incelenmektedir. Öncelikle, akıllı cihazlar ile enerji verimliliği, akıllı enerji yönetimi, ulaşım ve atık ve su yönetimi gibi temel alanlarda kullanılan teknolojiler araştırılarak, bu sistemlerin etkinliği ve başarılı uygulama örnekleri değerlendirilmektedir. Son olarak, akıllı sistemlerin yaygınlaşmasındaki zorluklar ve geleceğe yönelik olası gelişmeler tartışılmaktadır.

2. AKILLI SİSTEMLERİN KARBON AYAK İZİNİ AZALTMADAKİ ÖNEMİ (THE IMPORTANCE OF SMART SYSTEMS IN REDUCING CARBON FOOTPRINT)

Günümüzde hızla gelişen dijital tabanlı teknolojiler, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada belirleyici derecede önemli bir rol oynamaktadır. Akıllı sistemler, enerji yönetimi, ulaşım, su ve atık yönetimi gibi birçok alanda yenilikçi çözümler sunmakta ve bu sayede kazanımlar elde edilmektedir [21-23]. Bu sistemler, büyük veri analitiği, yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT) ve otomasyon teknolojilerini kullanarak kaynakların daha verimli ve sürdürülebilir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır [24]. Özellikle enerji tüketimi, en büyük emisyon kaynaklarından biri olduğu için [25], akıllı cihazlar ve enerji verimliliği sağlayan teknolojiler büyük bir önem taşımaktadır [26].

Akıllı cihazlar, alışılmış sistemlere göre daha az enerji tüketen ve kullanıcı alışkanlıkları ile uyumlu teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. IoT tabanlı enerji yönetimi, akıllı cihazlar ile donatılmış akıllı bina sistemleri ve otomasyon çözümleri tercihi ile enerji kullanımı optimize edilmekte ve gereksiz tüketim önlenmektedir [27]. Özellikle akıllı bina sistemlerinde kullanılmakta olan otomatik aydınlatma ve iklimlendirme sistemleri, enerji verimliliğini arttırmaktadır. Bu bağlamda, bu tip teknolojilerin daha çok kullanılması hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından büyük avantajlar sunmaktadır [28].

2.1. Akıllı Cihazlar ve Enerji Verimliliği (Smart Devices and Energy Efficiency)

2.1.1. IoT Tabanlı Enerji Yönetimi (IoT-Based Energy Management)

Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi, elektronik cihazların internet üzerinden birbiriyle bağlantılı çalışmasını sağlayarak, enerji tüketiminin düşürülmesi ve optimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Akıllı sensörler ve izleme sistemleri ile donatılmış bu yapı, enerji kullanım verilerini toplayarak gerçek zamanlı analizler yapılmasını mümkün kılmaktadır [29]. Böylece enerji tüketimindeki aşırıliklar tespit edilmekte ve gereksiz tüketimin önüne geçilmektedir. Akıllı termostatlar, aydınlatma sistemleri ve elektrik şebekelerine entegre edilen IoT çözümleri sayesinde, binalardaki enerji yönetimi daha kullanışlı ve verimli hale getirilmektedir [30].

2.1.2. Akıllı Bina Sistemleri (Smart Building Systems)

Akıllı bina sistemleri, enerji tüketimini en aza indirmek için tasarlanmakta ve geliştirilmektedir. Binalardaki en büyük enerji tüketim kaynakları arasında ısıtma, soğutma, havalandırma sistemleri ve aydınlatma yer almaktadır [31]. Akıllı havalandırma sistemleri (HVAC), ortam sıcaklığı ve hava kalitesini sürekli izleyerek, enerji kullanımını optimize etmektedir. Örneğin, yapay zekâ destekli sistemler, kullanıcıların bina içindeki hareketlerini analiz ederek, yalnızca gerekli alanlarda iklimlendirme sistemlerini devreye sokmaktadır [32].

Bunun yanı sıra, akıllı aydınlatma sistemleri de enerji verimliliğini artıran önemli teknolojiler arasında yer almaktadır. Hareket sensörleri ve zamanlayıcılar ile donatılmış bu sistemler, ortamda kimse bulunmadığında otomatik olarak kapanmakta ve gereksiz enerji tüketiminin önüne geçmektedir [33]. Ayrıca, akıllı bina yalıtım sistemleri, termal görüntüleme ve otomatik perde sistemleri gibi teknolojilerle desteklenerek ısı kayıplarını en düşük seviyeye indirmekte ve ısıtma-soğutma sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır [34].

2.1.3. Enerji Verimli Cihazlar ve Otomasyon Sistemleri (Energy-Efficient Devices and Automation Systems)

Günümüzde yeni nesil birçok elektrikli cihaz, enerji verimli tasarımlar ve akıllı kontrol aparatları ile donatılarak üretilmektedir. Enerji tasarruflu beyaz eşyalar, LED aydınlatmalar, düşük güç tüketen bilgisayarlar ve akıllı prizler, gereksiz enerji kullanımını düşürmeye

yardımcı olmaktadır [27]. Bu cihazlar, kullanım alışkanlıklarını analiz ederek enerji tüketimini otomatik olarak optimize eden algoritmalar ile de çalışmaktadır [35].

Otomasyon sistemleri de enerji verimliliğini artırmada oldukça önemli bir görev üstlenmektedir. Örneğin, endüstriyel tesislerde kullanılan akıllı üretim hatları, gereksiz enerji tüketimini engellemek için makinelerin yalnızca ihtiyaç duyulduğunda çalışmasını sağlamaktadır. Akıllı enerji yönetim panelleri, fabrikalar ve büyük tesislerde enerji tüketimini izleyerek gereksiz kullanımın önüne geçer ve enerji maliyetlerini de oldukça düşürmektedir [36].

2.2. Akıllı Enerji Yönetim Sistemleri (Smart Energy Management Systems)

Dünyada sürekli olarak artan enerji talebi ve fosil yakıt tüketiminin olumsuz çevresel etkileri, sürdürülebilir enerji yönetim sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Akıllı enerji yönetim sistemleri, enerji üretimi, dağıtımı ve tüketimini daha etkin ve verimli hale getirmek için dijital teknolojileri kullanarak enerji kaynaklarının sürdürülebilir bir formda kullanılmasını ve idare edilmesini sağlamaktadır [37]. Bu akıllı sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarının bütünleşmesi, akıllı şebekeler ve enerji depolama sistemleri gibi öncü çözümlerle kayda değer katkılar sunmaktadır [10]. Aynı zamanda, veri analitiği ve yapay zekâ destekli enerji yönetimi ile enerji tüketimi iyileştirilmekte ve gereksiz kaynak israfının önüne geçilmektedir [38].

2.2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Entegrasyonu (Integration of Renewable Energy Sources)

Klasik enerji üretim yolları büyük ölçüde fosil yakıtlara dayandığından, küresel karbon emisyonlarının önemli bir kısmı enerji sektörünün faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır [39]. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle (biyogaz üretimi vb.) gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve çeşitlendirilmesi gerekmektedir. [40]. Ancak, bu kaynaklar doğası gereği değişken olduğu için, enerji talebine kesintisiz ve dengeli bir şekilde yanıt verebilmek adına akıllı enerji yönetim sistemleri ile uyumlu çalışmaları gerekmektedir [41].

Akıllı enerji sistemleri, yenilenebilir enerji üretimini gerçek zamanlı olarak izlemekte ve talep ile üretim arasında optimum bir denge olmasını temin etmektedir [42]. Örneğin, güneş panellerinden elde edilen enerjinin en yüksek olduğu zaman dilimlerinde, fazla enerjinin depolanması veya doğrudan kullanılması için akıllı algoritmalar kullanılarak şebekeye yük bindirmeden enerjinin en verimli şekilde kullanılması sağlanmaktadır [43, 44]. Böylece, geleneksel enerji kaynaklarına olan talep azalmaktadır.

2.2.2. Akıllı Şebekeler ve Enerji Depolama Sistemleri (Smart Grids and Energy Storage Systems)

Akıllı şebekeler, enerji üretimi, iletimi ve tüketimi süreçlerini iyileştirmek amacıyla bilgi ve iletişim teknolojilerinin entegre edildiği modern elektrik altyapılarıdır. Akıllı şebekelerin temel amacı, enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak, güvenilirliğini sağlamak ve sürdürülebilir bir enerji geleceği oluşturmaktır. Geleneksel elektrik şebekeleri, enerji üretim ve tüketim dengesini manuel kontrol yöntemleriyle sağlarken, akıllı şebekeler dijital teknolojiler ve otomasyon sistemleri sayesinde enerji akışını daha etkin ve verimli bir şekilde yönetmektedir [37]. Akıllı şebekeler ise, sensörler, IoT cihazları ve büyük veri analitiği kullanarak enerji arzını ve talebini gerçek zamanlı olarak izlemekte, optimize etmekte ve düzenlemektedir [45].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) entegrasyonu, akıllı şebekelerin en önemli zorluklarından biridir. YEK'lerin doğası gereği dalgalı ve öngörülemez olması, enerji arzında istikrarsızlıklara yol açabilir. Bu durum, enerji depolama sistemlerinin önemini artırmaktadır. Enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen fazla enerjiyi depolamakta ve gerektiğinde kullanılmasını sağlamak ve şebeke dengesizliğini azaltmaktadır. Bu sayede, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı sağlanmakta ve enerji israfı ile aşırı yüklenme gibi problemler daha önlenabilir olmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada, mobil batarya sistemlerinin akıllı şebekelerde enerji depolama amacı için kullanılabileceği belirtilmektedir [46]. Bu, akıllı şebekelerin esnekliğini artırmakta, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, gündüz saatlerinde güneş panelleri tarafından üretilen fazla enerji, bataryalarda depolanmakta ve gece saatlerinde kullanılabilir. Bu sayede, şebekedeki dalgalanmalar azalmakta ve enerji kesintileri önlenilmektedir.

2.2.3. Veri Analitiği ile Enerji Tüketimi Optimizasyonu (Energy Consumption Optimization through Data Analytics)

Akıllı enerji yönetim sistemlerinin bir diğer önemli yapı taşı, veri analitiği destekli enerji tüketimi optimizasyonudur. Büyük veri analitiği, enerji kullanım alışkanlıklarını izlemekte ve gereksiz enerji tüketimini düşürmek ve verimliliği artırmak için kritik kararlar alınmasını sağlamaktadır [47]. Örneğin, akıllı sayaçlar ve enerji yönetim panelleri, tüketicilerin enerji kullanımını detaylı bir şekilde takip etme ve yönetme olanağı tanımaktadır. Bu sistemler, en yüksek enerji tüketim saatlerini belirlemekte ve kullanıcılara tasarruf önerileri vermektedir. Endüstriyel tesisler ve büyük ölçekli işletmelerde ise yapay zekâ algoritmaları, üretim süreçlerinde enerji tüketimini analiz ederek otomasyon çözümleri sunabilmektedir [48].

Özellikle, talep tarafı yönetimi (Demand Side Management, DSM) olarak bilinen yöntemle, kullanıcılar enerji tüketimlerini şebekenin düşük talep aldığı saat dilimlerine kaydırmakta; bu sayede hem enerji maliyetlerini düşürmekte hem de genel enerji verimliliğini artırmaktadır [49]. Bu sistemler, elektrikli araç şarj istasyonlarından akıllı ev sistemlerine kadar oldukça geniş bir kullanım alanında uygulanmakta ve enerji şebekelerinin sürdürülebilirliğini önemli katkılar

sunmaktadır [50]. Akıllı enerji yönetim sistemleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu, akıllı şebekeler ve enerji depolama çözümleri ile enerji verimliliği artırmaktadır [10, 51].

Önümüzdeki yıllarda, yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaşması ve akıllı enerji yönetim sistemlerinin daha fazla benimsenmesiyle, küresel ölçekte karbon emisyonlarının azalması beklenmektedir [10, 52]. Ancak, bu sistemlerin tam anlamıyla etkin hale gelebilmesi için altyapı yatırımlarının artırılması, enerji politikalarının bu yönde düzenlenmesi ve toplumda farkındalığın artırılması gerekmektedir.

2.3. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Sürdürülebilir Hareketlilik (Smart Transportation Systems and Sustainable Mobility)

Günümüzde ulaşım sektörü, küresel karbon emisyonlarının oldukça büyük bir kısmından sorumlu tutulmaktadır. Özellikle fosil yakıtla çalışan kara, deniz ve hava araçlarının yaydığı sera gazları iklim değişikliğini hızlandırmaktadır [53, 54]. Şehirleşmenin ve motorlu taşıt kullanımının artması ve küresel ticaretin çok hızlı gelişmesi, hava kirliliğini ve enerji tüketimini artırmakta, bu da sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, akıllı ulaşım sistemleri ve sürdürülebilir hareketlilik çözümleri, ulaşımın çevresel etkilerini azaltmada kritik bir rol üstlenmektedir [55]. Elektrikli ve otonom araçlar, akıllı trafik yönetim sistemleri ve toplu taşıma optimizasyonu gibi yenilikçi yaklaşımlar bir gereklilik haline gelmektedir [19, 56].

2.3.1. Elektrikli ve Otonom Araçlar (Electric and Autonomous Vehicles)

Elektrikli araçlar, fosil yakıtlı içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha düşük karbon emisyonlarına sahip olmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla şarj edildiklerinde, emisyon seviyeleri çok düşük seviyelere ulaşmaktadır [57]. Ayrıca, batarya teknolojilerindeki gelişmeler ve hızlı şarj istasyonlarının yaygınlaşması, elektrikli araçların kullanımını artırmakta ve sürdürülebilir ulaşımı teşvik etmektedir [58].

Otonom araçlar ise yapay zekâ ve gelişmiş sensör sistemlerini kullanarak sürücüsüz çalışabilen yeni nesil ulaşım çözümleri sunmaktadır. Otonom sürüş teknolojileri, daha verimli yakıt kullanımı ve trafik akışının optimize edilmesi gibi önemli avantajlar sağlayarak enerji tüketimini azaltmaktadır [59]. Ayrıca, otonom araçların paylaşım sistemleriyle entegre edilmesi sayesinde bireysel araç sahipliği azalmakta yaklaşımının benimsenmesi sayesinde bireysel araç sahipliğini azaltmakta, böylece kazanımlar artmaktadır [19, 60].

2.3.2. Akıllı Trafik Yönetim Sistemleri (Smart Traffic Management Systems)

Trafik sıkışıklığı ve yoğunluğu, fazla fosil yakıt tüketimine neden olan en önemli faktörlerden biridir [61]. Akıllı trafik yönetim sistemleri, trafik akışını en uygun hale getirmek ve aşırı dur-kalk hareketlerini azaltmak için sensörler, yapay zekâ ve büyük veri analitiğini kullanmaktadır

[62]. Bu sistemler, trafik yoğunluklarını anlık olarak analiz ederek, trafik ışıklarını ve sinyalizasyon sistemlerini aktif ve hızlı bir şekilde yönetmektedir [63].

Örneğin, trafik kameraları ve IoT tabanlı yol sensörleri, araç yoğunluğunu sürekli izlemekte, trafik ışıklarının süresini dinamik bir şekilde anlık olarak ayarlamaktadır. Bu sayede, hem gereksiz bekleme süreleri azaltılmakta hem de tüketim minimuma indirilmektedir [64]. Ayrıca, sürücülere en uygun ve verimli yolculuk rotalarını öneren akıllı navigasyon sistemleri sayesinde trafik sıkışıklıkları azaltılmakta ve daha kısa sürede yolculuk mümkün hale gelmektedir [65].

2.3.3. Toplu Taşıma Optimizasyonu ve Mikro Mobilité Çözümleri (Public Transport Optimization and Micromobility Solutions)

Toplu taşıma sistemlerinin verimli ve etkin kullanımı, sera gazı salınımlarını azaltmada önemli bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır [66]. Akıllı ulaşım sistemleri, toplu taşıma ağlarını daha aktif hale getirmek amacıyla büyük veri analitiği ve IoT teknolojilerini kullanarak yolcu yoğunluklarını analiz etmekte, otobüs, metro veya tramvay seferlerini bu doğrultuda iyileştirmektedir [67]. Örneğin, dinamik güzergâh planlama sistemleri, yolcu taleplerine göre otobüs ve tren hatlarını anlık olarak güncellenmekte ve daha verimli bir ulaşım ağı oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, dijital biletleme ve akıllı durak sistemleri gibi teknolojiler, yolcuların toplu taşımayı daha hızlı ve verimli bir şekilde kullanmalarını sağlamaktadır.

Mikro mobilité çözümleri de şehir içi ulaşımında sürdürülebilir alternatifler sunmaktadır. Elektrikli scooterlar, bisiklet paylaşım sistemleri ve yaya dostu ulaşım projeleri, bireysel araç kullanımını azaltmaktadır[68]. Akıllı mikro mobilité sistemleri, kullanıcıların en uygun aracı ve güzergâhı seçmesini sağlamakta ve şehir içi ulaşım daha verimli hale gelmektedir.

Elektrikli ve otonom araçlar, akıllı trafik yönetim sistemleri ve sürdürülebilir toplu taşıma çözümleri sayesinde, ulaşım kaynaklı emisyonlar minimize edilmektedir [18, 19]. Özellikle şehir planlamalarında bu sistemlerin yaygınlaştırılması, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bu teknolojilerin daha geniş çapta benimsenebilmesi için, altyapı yatırımlarının artırılması, teşvik mekanizmalarının oluşturulması ve kullanıcı farkındalığının yükseltilmesi gerekmektedir. Önümüzdeki yıllarda, akıllı ulaşım teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte daha etkili ve yenilikçi çözümlerin hayata geçirilmesi beklenmektedir.

2.4. Akıllı Su ve Atık Yönetimi Çözümleri (Smart Water and Waste Management Solutions)

Sürdürülebilir şehirler oluşturmak amacıyla, su ve atık yönetimi, çevresel etkilerin minimize edilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Geleneksel su ve atık yönetimi genellikle manuel kontrol mekanizmaları ile sağlandığı için kaynak israfına ve yüksek karbon emisyonlarına neden olabilmektedir [69]. Günümüzde ise akıllı su yönetimi, yapay zekâ ile desteklenen atık

yönetim sistemleri ve döngüsel ekonomi tabanlı bakış açısı sayesinde daha verimli, sürdürülebilir ve düşük karbon ayak izine sahip mekanizmalar geliştirilmektedir [69]. Bu öncü metotlar, su kaçaklarının hızlı tespitinden atıkların geri dönüştürülmesine kadar geniş bir yelpazede uygulanarak doğal kaynakların korunmasına da katkı sağlamaktadır.

2.4.1. Akıllı Su Yönetim Sistemleri ve Kaçak Tespiti (Smart Water Management Systems and Leak Detection)

Temiz su kaynaklarının giderek azalması [70], suyun etkin ve verimli kullanılması gerçeğini ortaya çıkarmıştır [71]. Bu sebeple farklı yaklaşımların kullanılması bir gereklilik olarak kabul edilmektedir. Akıllı su yönetim sistemleri, büyük veri analitiği, IoT sensörleri ve yapay zekâ destekli analiz yöntemleriyle su iletimini ve tüketimini optimize etmekte, kontrol altında tutmakta, su kayıplarını önlemektedir [72, 73]. Özellikle akıllı sayaçların kullanımı ve uzaktan takip sistemlerinin yaygınlaşması, kullanıcıların su tüketimini anlık olarak izlemelerini sağlamakta ve aşırı su tüketimini engellemektedir. Bunların yanı sıra, IoT tabanlı sensörler sayesinde su kaçakları daha erken tespit edilmekte, böylece su kayıpları hızlıca önlenmekte hem de su ile beraber enerji tasarrufu sağlanmaktadır [74, 75]. Akıllı su yönetimi, tarımsal sulama operasyonlarında da büyük önem taşımaktadır. Toprağın nem seviyesini anlık olarak ölçmekte, sadece ürünlerin ihtiyaç duyduğu miktarda su kullanımı sağlanmakta ve önemli derecede su israfı önlenmektedir [76].

2.4.2. Atık Yönetiminde Yapay Zekâ ve Otomasyonun Kullanımı (Use of Artificial Intelligence and Automation in Waste Management)

Yenilikçi atık yönetimi sistemleri ise, yapay zekâ ve otomasyon teknolojilerini kullanarak atıkların daha etkin bir şekilde sınıflandırılmasını ve geri dönüştürülmesini sağlamaktadır. Geleneksel atık yönetimi süreçlerinde, atık ayrıştırma işlemleri genellikle manuel olarak kişiler tarafından gerçekleştirilirken, günümüzde yapay zekâ destekli robotlar ve akıllı sensörler sayesinde atık türleri otomatik olarak tespit edilmekte ve geri dönüşüm oranları artırılmaktadır [77].

Örneğin, görüntü işleme teknolojileriyle desteklenen akıllı atık ayrıştırma sistemleri, organik, plastik, cam ve metal atıkları yüksek doğruluk oranıyla ayırmakta, böylece geri dönüşüm proseslerini daha etkin ve verimli hale getirmektedir [78]. Bu sayede, toplanan atıkların düzenli/düzensiz depolama sahalarına gönderilmesi yerine geri dönüşüme sokularak tekrar kullanılması sağlanmakta ve atıkların doğaya olan olumsuz etkileri azaltılmaktadır. Ayrıca, yapay zekâ destekli analiz sistemlerinin kullanılması ile atık toplama rotaları optimize edilmekte, böylece çöp kamyonlarının fazladan yakıt tüketimi önlenmekte ve lojistik süreçleri optimize edilmektedir [79]. Son olarak bu yaklaşımlar ülkemizde titizlikle uygulanmaya çalışılan sıfır atık girişimine de büyük katkılar sağlamaktadır.

2.4.3. Döngüsel Ekonomi ve Karbon Ayak İzi Azaltma Stratejileri (Circular Economy and Carbon Footprint Reduction Strategies)

Döngüsel ekonomi, atık oluşumunun en aza indirildiği, kaynakların tekrar tekrar kullanılabilirdiği ve üretim aşamalarının daha sürdürülebilir hale getirildiği, bir ekonomik model olarak tanımlanmaktadır [80]. Klasik ve yaygınlaşmış ekonomi modeli olan "al-kullan-at" yaklaşımı, atık miktarını artırarak çevre üzerinde baskı oluşturmaktadır. Döngüsel ekonomi stratejileri ise malzemelerin ve kaynakların geri kazanıldığı sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır [81].

Bu kapsamda, biyolojik olarak parçalanabilme özelliği olan malzemelerin tercih edilmesi, endüstri ve maden kaynaklı atıkların yeniden değerlendirilmesi [82] ve kompostlaştırma sistemleri gibi uygulamalar, karbon ayak izini düşürmek için önemli yöntemler arasında yer almaktadır [83]. Örneğin, organik atıkların biyogaz tesislerinde enerji üretimi için kullanılması, [84] hem atık miktarını azaltmakta hem de fosil yakıtlara olan bağımlılığı düşürerek sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır [85]. Aynı şekilde, su ve atık geri dönüşüm süreçlerinin dijitalleşmesi, kaynak kullanımını optimize ederek doğrudan katkı sağlamaktadır.

3. KARBON AYAK İZİNİ AZALTMAYA YÖNELİK AKILLI SİSTEM UYGULAMALARI (SMART SYSTEM APPLICATIONS FOR REDUCING CARBON FOOTPRINT)

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkilerinin derinleşmesi ile akıllı sistemlerin kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Akıllı teknolojiler ile bezenmiş bu sistemler, enerji verimliliğini artırmakta, ulaşımı iyileştirmekte, su yönetiminden atıkların geri dönüşümüne kadar oldukça çeşitli alanda uygulanarak çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Dünya genelinde birçok ülke ve şehir, akıllı sistemleri kullanmak için çalışmalar yürütmektedir. Bu kapsamda, şehir içi ulaşımdan sanayi tesislerine, bireysel enerji yönetim çözümlerinden büyük ölçekli altyapı projelerine kadar birçok başarılı uygulama hayata geçirilmektedir.

3.1. Küresel Düzeyde Başarılı Akıllı Sistem Uygulamaları (Successful Smart System Applications at the Global Level)

Gelişmiş ülkelerde akıllı sistemler, sürdürülebilirlik politikalarının temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Örneğin, Singapur'un "Smart Nation" isimli akıllı şehir girişimi şehir altyapısını optimize etmek, enerji tüketimi azaltmak için büyük veriyi ve IoT teknolojilerini etkin bir şekilde kullanmaktadır [86]. Akıllı bina sistemleri sayesinde, enerji tüketimi anlık olarak izlenmekte ve gereksiz enerji kullanımının önüne geçilmektedir.

Benzer şekilde, Kopenhag, 2025 yılına kadar karbon nötr bir şehir olma hedefi doğrultusunda, akıllı ulaşım sistemleri ve yenilenebilir enerji çözümlerini uygulamaktadır [87]. Şehirde kullanılan akıllı trafik yönetim sistemleri, trafik akışını optimize ederek yakıt tüketimini düşürmekte ve toplu taşıma araçlarının verimli çalışmasını sağlamaktadır. Ayrıca, Kopenhag'ın

enerji şebekesi, rüzgar ve güneş enerjisinden elde edilen elektrik ile entegre çalışarak fosil yakıt kullanımını minimuma indirmektedir [88].

3.2. Yerel Düzeyde Akıllı Sistem Uygulamaları (Smart System Applications at the Local Level)

Türkiye’de de yönelik akıllı sistem uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır. İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyükşehirlerde akıllı trafik yönetim sistemleri devreye alınmakta, trafik yoğunluğunu azaltılmakta ve yakıt tüketimi optimize edilmektedir [89]. İstanbul’da kullanılan dinamik kavşak yönetim sistemleri, araç trafiğini anlık olarak izlemekte, trafik ışıklarının süresini optimize etmekte, böylece gereksiz dur-kalk hareketlerinden kaynaklanan yakıt tüketimini azaltmaktadır [90].

Bunun yanı sıra, Türkiye’nin birçok bölgesinde akıllı bina sistemlerinin uygulanması ve enerji verimli şehir aydınlatmalarının kullanımı yaygınlaşmaktadır [91]. Özellikle LED temelli akıllı sokak aydınlatmaları, hareket sensörleri aracılığıyla yalnızca gerektiğinde aktifleşerek elektrik tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, sanayi tesislerinde tercih edilen akıllı üretim ve otomasyon teknolojileri sayesinde, endüstri kaynaklı emisyonların azaltılması yönünde çeşitli projeler yürütülmektedir [92].

3.3. Şehirlerde ve Endüstride Akıllı Sistemlerin Adaptasyonu (Adaptation of Smart Systems in Cities and Industry)

Şehirleşmenin hızlı bir şekilde artmasıyla, akıllı şehir kavramı sürdürülebilir kent yönetimi için büyük önem kazanmaktadır. Akıllı şehirler, yenilenebilir enerji kullanımına yönelten akıllı şebekeler, su yönetim sistemleri, sürdürülebilir ulaşım çözümleri ve bütünleşik atık yönetimi gibi yenilikçi çözümler ile katkı sunmaktadır [93].

Sanayi sektörüne bakıldığında ise karbon salınımlarının azaltılması, özellikle enerjinin yoğun kullanıldığı üretim süreçlerinde büyük önem taşımaktadır. Akıllı üretim sistemleri, veri analitiği ve IoT cihazları kullanarak enerji tüketimini iyileştirmekte, böylece hem maliyetleri düşürmekte hem de çevresel etkiyi en aza indirmektedir [94, 95]. Örneğin, çelik ve çimento gibi enerji yoğun sektörlerde, üretim süreçlerine entegre edilen akıllı sensörler ve otomatik enerji yönetim sistemleri ile gereksiz enerji kullanımı önlenmektedir [96].

3.4. Karbon Azaltımına Yönelik Politika ve Teşvikler (Policies and Incentives for Carbon Reduction)

Akıllı sistemlerin etkili ve verimli olabilmesi için yasal düzenlemeler, teşvik mekanizmaları ve sürdürülebilir kalkınma politikaları büyük rol oynamaktadır [97]. Avrupa Birliği, ABD ve Çin gibi ülkeler, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik teşvikler sağlayarak akıllı sistemlerin yaygınlaşmasını desteklemektedir [98].

Örneğin, Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını %55 oranında azaltma hedefi doğrultusunda; akıllı enerji yönetimi, elektrikli araç teşvikleri ve akıllı şehir projelerini desteklemektedir [99, 100]. Bu kapsamda, yenilenebilir enerji projeleri, enerji verimliliğine yönelik bina dönüşümleri ve dijital teknoloji yatırımları teşvik edilerek desteklenmektedir [100].

Türkiye’de ise Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) [101] ve sanayi sektörüne yönelik enerji verimliliği teşvikleri, emisyonları düşürmeye yönelik önemli adımlar arasında yer almaktadır [102, 103]. Ayrıca; yeşil enerji sertifikaları ve karbon ticaret mekanizmaları, özel sektörün sürdürülebilir enerji projelerine yönelmesini teşvik etmektedir [102, 104].

4. GELİŞTİRİLMESİ GEREKEN ALANLAR VE YENİ ARAŞTIRMA FIRSATLARI (AREAS FOR IMPROVEMENT AND EMERGING RESEARCH OPPORTUNITIES)

Akıllı sistemlerin karbon emisyonlarını azaltmadaki etkisini artırmak için yeni araştırmalar ve teknolojik yeniliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle şu alanlarda daha fazla çalışma ve geliştirmelerin yapılması gerekmektedir:

- Yenilenebilir enerji entegrasyonu: Güneş, rüzgar, jeotermal ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin, verimli ve kesintisiz kullanımı için akıllı depolama çözümlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Veri analitiği ve tahmin modelleri: Yapay zekâ destekli tahmin sistemleriyle, enerji tüketim alışkanlıkları ve eğilimleri daha iyi analiz edilerek daha verimli enerji yönetimi sağlanması önem arz etmektedir.
- Akıllı şehir projelerinin genişletilmesi: Akıllı şehir teknolojileri, şehir planlamasına daha fazla entegre edilmesi gerekmektedir.
- Dijital ikiz teknolojisi: Sanal modelleme ve simülasyon tekniklerinin kullanılarak enerji tüketimi ve çevresel etkiler önceden tahmin edilip iyileştirilmesine katkı sunulmaktadır.
- Otonom ve elektrikli araçların yaygınlaşması: Akıllı enerji ağlarının gelişmesi ve yapay zekâ tabanlı enerji verimliliği uygulamalarının arttırılması sağlanmaktadır.
- Blok zinciri (blockchain) teknolojisinin kullanılması: Karbon kredileri ve yeşil finansman projelerinin şeffaf ve güvenilir bir şekilde yönetilmesine yardımcı olmaktadır.
- Akıllı tarım sistemlerinin geliştirilmesi: Su yönetimi ve sanayi süreçlerinde enerji verimliliği sağlanarak, emisyonların daha da düşmesi sağlanmaktadır.

Bu araştırma alanlarına yönelik yatırımların artırılması, akıllı sistemlerin katkısını daha da güçlendirecektir.

4.1. Politika ve Finansman Desteklerinin Önemi (The Importance of Policy and Financial Support)

Akıllı sistemlerin yaygınlaşmasını sağlamak için devlet politikaları ve finansman desteği kritik bir rol oynamaktadır. Karbon vergileri, yeşil teşvikler, sübvansiyonlar ve yenilenebilir enerji yatırımları, akıllı sistemlerin benimsenmesini hızlandırabilecek kritik noktalardır. Bunun yanı sıra, özel sektör ve kamu iş birlikleriyle sürdürülebilir teknoloji projeleri teşvik edilmelidir.

Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve benzeri uluslararası girişimler, karbon nötr hedeflerine ulaşmada akıllı sistemlerin önemini vurgulamaktadır. Bu tür küresel politikalar, ülkeleri daha sürdürülebilir enerji ve ulaşım çözümlerine yatırım yapmaya teşvik edici araçlar arasında yer almaktadır.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION & DISCUSSIONS)

Sonuç olarak, akıllı sistemler karbon ayak izinin azaltılmasında kritik ve önemli bir rol üstlenmektedir. Ancak, bu sistemlerin daha etkin ve yaygın hale gelebilmesi için teknolojik inovasyonlar artırılması, politika desteklerinin sağlanması ve finansal teşviklerde iyileştirmeler ile de güçlendirilmesi gerekmektedir. Veri güvenliğinin sağlanması, yatırım maliyetlerinde yaşanan yükseklik ve etik gibi mevcut engeller aşıldığında, akıllı sistemler sürdürülebilir kalkınmanın temel taşlarından biri haline gelecektir.

Bu nedenle, hükümetler, akademik kuruluşlar ve özel sektör aktörleri, daha güçlü bir iş birliği ve ortak stratejiyle hareket etmelidir. Karbon nötr bir geleceğe ulaşmak için akıllı sistemlerin yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler üretmesi kaçınılmaz bir zorunluluktur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI REDDİ

Bu çalışma ile hiçbir şekilde çıkar elde edilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Skytt, T., S.N. Nielsen, and B.-G. Jonsson, *Global warming potential and absolute global temperature change potential from carbon dioxide and methane fluxes as indicators of regional sustainability – A case study of Jämtland, Sweden*. Ecological Indicators, 2020. **110**: p. 105831.
2. Çelekli, A. and Ö.E. Zariç, *From Emissions to Environmental Impact: Understanding the Carbon Footprint*. International Journal of Environment and Geoinformatics, 2023. **10**(4): p. 146-156.
3. Alofaysan, H., *The Effect of Environmental Smart Technology and Renewable Energy on Carbon Footprint: A Sustainability Perspective from the MENA Region*. Energies, 2024. **17**(11): p. 2624.
4. Sofuoğlu, E. and D. Kirikkaleli, *Towards achieving net zero emission targets and sustainable development goals, can long-term material footprint strategies be a useful tool?* Environmental Science and Pollution Research, 2023. **30**(10): p. 26636-26649.

5. Akrofi, M.M., M. Okitasari, and R. Kandpal, *Recent trends on the linkages between energy, SDGs and the Paris Agreement: a review of policy-based studies*. Discover Sustainability, 2022. **3**(1): p. 32.
6. Chen, L., et al., *Strategies to achieve a carbon neutral society: a review*. Environmental Chemistry Letters, 2022. **20**(4): p. 2277-2310.
7. Zhao, X., et al., *Challenges toward carbon neutrality in China: Strategies and countermeasures*. Resources, Conservation and Recycling, 2022. **176**: p. 105959.
8. Zhang, H., *Pathways to carbon neutrality in major exporting countries: the threshold effect of digital transition*. Environmental Science and Pollution Research, 2023. **30**(3): p. 7522-7542.
9. Erdogan, S., U.K. Pata, and S.A. Solarin, *Towards carbon-neutral world: The effect of renewable energy investments and technologies in G7 countries*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023. **186**: p. 113683.
10. Elkhorchani, H. and K. Grayaa, *Novel home energy management system using wireless communication technologies for carbon emission reduction within a smart grid*. Journal of Cleaner Production, 2016. **135**: p. 950-962.
11. Mahapatra, C., A.K. Moharana, and V.C.M. Leung, *Energy Management in Smart Cities Based on Internet of Things: Peak Demand Reduction and Energy Savings*. Sensors, 2017. **17**(12): p. 2812.
12. Li, J., et al., *Methods and applications for Artificial Intelligence, Big Data, Internet of Things, and Blockchain in smart energy management*. Energy and AI, 2023. **11**: p. 100208.
13. Alaybeyoğlu, E. and C. Turhan, *TAŞRA BÖLGELERDE KULLANILAN SİSTEMLERİN KABLOSUZ TEKNOLOJİLER YARDIMIYLA DENETİMİ*. Akıllı Sistemler Dergisi, 2023. **2**(1): p. 68-73.
14. Bayindir, R., et al., *Smart grid technologies and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **66**: p. 499-516.
15. Coronado Mondragon, A.E., E.S. Coronado, and C.E. Coronado Mondragon, *Defining a convergence network platform framework for smart grid and intelligent transport systems*. Energy, 2015. **89**: p. 402-409.
16. Diahovchenko, I., et al., *Progress and Challenges in Smart Grids: Distributed Generation, Smart Metering, Energy Storage and Smart Loads*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2020. **44**(4): p. 1319-1333.
17. Bagdadee, A.H., L. Zhang, and M. Saddam Hossain Remus. *A Brief Review of the IoT-Based Energy Management System in the Smart Industry*. in *Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems*. 2020. Singapore: Springer Singapore.
18. Massar, M., et al., *Impacts of Autonomous Vehicles on Greenhouse Gas Emissions—Positive or Negative?* International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021. **18**(11): p. 5567.
19. Patella, S.M., et al., *Carbon Footprint of autonomous vehicles at the urban mobility system level: A traffic simulation-based approach*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019. **74**: p. 189-200.
20. Chen, W., et al., *Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainable Criteria: A Review*. Sustainability, 2024. **16**(21): p. 9145.
21. Mishra, P. and G. Singh, *Energy Management Systems in Sustainable Smart Cities Based on the Internet of Energy: A Technical Review*. Energies, 2023. **16**(19): p. 6903.
22. Dincer, I. and C. Acar, *Smart energy systems for a sustainable future*. Applied Energy, 2017. **194**: p. 225-235.

23. Salman, M.Y. and H. Hasar, *Review on environmental aspects in smart city concept: Water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques*. Sustainable Cities and Society, 2023. **94**: p. 104567.
24. Goundar, S., A. Purwar, and A. Singh, *Applications of artificial intelligence, big data and internet of things in sustainable development*. 2022: CRC Press.
25. Nguyen, K.H. and M. Kakinaka, *Renewable energy consumption, carbon emissions, and development stages: Some evidence from panel cointegration analysis*. Renewable Energy, 2019. **132**: p. 1049-1057.
26. Shah, S.F.A., et al., *The Role of Machine Learning and the Internet of Things in Smart Buildings for Energy Efficiency*. Applied Sciences, 2022. **12**(15): p. 7882.
27. Shah, A.S., et al., *A Review on Energy Consumption Optimization Techniques in IoT Based Smart Building Environments*. Information, 2019. **10**(3): p. 108.
28. Baharudin, N., et al., *Smart lighting system control strategies for commercial buildings: A review*. International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration, 2021. **8**(74): p. 45.
29. Sinoplu, M. and E.B. Ceyhan, *Akıllı Binalarda Yapay Zekâ Destekli Enerji Yönetimi: Bir İnceleme*. Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2023. **5**(1): p. 39-63.
30. Asopa, P., et al. *Reducing Carbon Footprint for Sustainable development of Smart Cities using IoT*. in *2021 Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)*. 2021.
31. Homod, R.Z., *Analysis and optimization of HVAC control systems based on energy and performance considerations for smart buildings*. Renewable Energy, 2018. **126**: p. 49-64.
32. Vijayan, D.S., et al., *Automation systems in smart buildings: a review*. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020.
33. Sikder, A.K., et al. *IoT-enabled smart lighting systems for smart cities*. in *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. 2018.
34. Metallidou, C.K., K.E. Psannis, and E.A. Egyptiadou, *Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches*. IEEE Access, 2020. **8**: p. 63679-63699.
35. Youssef, H., et al., *Optimizing energy consumption patterns of smart home using a developed elite evolutionary strategy artificial ecosystem optimization algorithm*. Energy, 2023. **278**: p. 127793.
36. Stavropoulos, P., et al., *A Framework for CO2 Emission Reduction in Manufacturing Industries: A Steel Industry Case*. Designs, 2022. **6**(2): p. 22.
37. Rathor, S.K. and D. Saxena, *Energy management system for smart grid: An overview and key issues*. International Journal of Energy Research, 2020. **44**(6): p. 4067-4109.
38. Marinakis, V., *Big Data for Energy Management and Energy-Efficient Buildings*. Energies, 2020. **13**(7): p. 1555.
39. Das, A.K. and A. Sharma, *Chapter 1 - Climate change and the energy sector*, in *Advancement in Oxygenated Fuels for Sustainable Development*, N. Kumar, et al., Editors. 2023, Elsevier. p. 1-6.
40. Shan, S., et al., *Role of green technology innovation and renewable energy in carbon neutrality: A sustainable investigation from Turkey*. Journal of Environmental Management, 2021. **294**: p. 113004.

41. Hoang, A.T., V.V. Pham, and X.P. Nguyen, *Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process*. Journal of Cleaner Production, 2021. **305**: p. 127161.
42. Aslan, E., N. Bešli, and A. Gümüşçü, *İnşaat Güneş Enerjisi Santrallerinin Akıllı Şebekelere Entegrasyonu*. Turkish Journal of Scientific Reviews, 2017. **10**(2): p. 10-13.
43. Bahçeci, S. and F. Daldaban, *Dağıtım Şebekelerinde Güneş Panelleri ve Enerji Depolama Sistemi Uygulaması*. El-Cezeri, 2017. **4**(3): p. 308-313.
44. Kaygusuz, A. and A. Acar, *Güç Sistemlerinde Farklı Enerji Depolama Seviyelerinde Sistem Kararlılığının İncelenmesi*. Computer Science, 2023. **Vol:8**(Issue:1): p. 1-15.
45. Mostafa, N., H.S.M. Ramadan, and O. Elfarouk, *Renewable energy management in smart grids by using big data analytics and machine learning*. Machine Learning with Applications, 2022. **9**: p. 100363.
46. Wong, Y.S., et al. *Stationary and mobile battery energy storage systems for smart grids*. in *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. 2011.
47. Diamantoulakis, P.D., V.M. Kapinas, and G.K. Karagiannidis, *Big Data Analytics for Dynamic Energy Management in Smart Grids*. Big Data Research, 2015. **2**(3): p. 94-101.
48. Qian, F., et al., *Artificial intelligence for smart energy systems in process industries*. Applied Energy, 2022. **324**: p. 119684.
49. Oprea, S.-V., et al., *Insights into demand-side management with big data analytics in electricity consumers' behaviour*. Computers & Electrical Engineering, 2021. **89**: p. 106902.
50. Mariano-Hernández, D., et al., *A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis*. Journal of Building Engineering, 2021. **33**: p. 101692.
51. Imran, A., et al., *Heuristic-Based Programable Controller for Efficient Energy Management Under Renewable Energy Sources and Energy Storage System in Smart Grid*. IEEE Access, 2020. **8**: p. 139587-139608.
52. Attia, M., et al. *Towards an efficient energy management to reduce CO2 emissions and billing cost in smart buildings*. in *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. 2018.
53. Sun, Y.-F., Y.-J. Zhang, and B. Su, *How does global transport sector improve the emissions reduction performance? A demand-side analysis*. Applied Energy, 2022. **311**: p. 118648.
54. Khalili, S., et al., *Global Transportation Demand Development with Impacts on the Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions in a Climate-Constrained World*. Energies, 2019. **12**(20): p. 3870.
55. Bamwesigye, D. and P. Hlavackova, *Analysis of Sustainable Transport for Smart Cities*. Sustainability, 2019. **11**(7): p. 2140.
56. Liu, C. and L. Ke, *Cloud assisted Internet of things intelligent transportation system and the traffic control system in the smart city*. Journal of Control and Decision, 2023. **10**(2): p. 174-187.
57. Xia, X., et al., *Life cycle carbon footprint of electric vehicles in different countries: A review*. Separation and Purification Technology, 2022. **301**: p. 122063.
58. Mohammed, A., et al., *Strategies and sustainability in fast charging station deployment for electric vehicles*. Scientific Reports, 2024. **14**(1): p. 283.

59. Chen, B., et al., *The Effects of Autonomous Vehicles on Traffic Efficiency and Energy Consumption*. Systems, 2023. **11**(7): p. 347.
60. Onat, N.C., et al., *Rebound effects undermine carbon footprint reduction potential of autonomous electric vehicles*. Nature Communications, 2023. **14**(1): p. 6258.
61. Pataki, D.E., et al., *An integrated approach to improving fossil fuel emissions scenarios with urban ecosystem studies*. Ecological Complexity, 2009. **6**(1): p. 1-14.
62. Nallaperuma, D., et al., *Online Incremental Machine Learning Platform for Big Data-Driven Smart Traffic Management*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019. **20**(12): p. 4679-4690.
63. Sharif, A., et al. *Internet of things — smart traffic management system for smart cities using big data analytics*. in *2017 14th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*. 2017.
64. Khang, A. and K. Singh, *Internet of Things (IoT) Smart Sensing Traffic Lights for Revolutionizing Urban Traffic Management*, in *Driving Green Transportation System Through Artificial Intelligence and Automation : Approaches, Technologies and Applications*, A. Khang, Editor. 2025, Springer Nature Switzerland: Cham. p. 105-118.
65. Nasir, M.K., et al., *Reduction of Fuel Consumption and Exhaust Pollutant Using Intelligent Transport Systems*. The Scientific World Journal, 2014. **2014**(1): p. 836375.
66. Ercan, T., N.C. Onat, and O. Tatari, *Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach*. Journal of Cleaner Production, 2016. **133**: p. 1260-1276.
67. Ushakov, D., et al., *The Internet of Things impact on smart public transportation*. Transportation Research Procedia, 2022. **63**: p. 2392-2400.
68. Zhang, Y., et al., *A comparative analysis of the potential of carbon emission reductions from shared micro-mobility*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024. **72**: p. 104088.
69. Gupta, A.D., et al., *Smart Water Technology for Efficient Water Resource Management: A Review*. Energies, 2020. **13**(23): p. 6268.
70. Delikanlı, N.E., et al., *Removal of crystal violet dye with an innovative biosorbent (equisetum ramosissimum desf.)*. 2024, 2024. **23**(3): p. 12.
71. Delikanlı, N.E., *Bartın İlinde İçme/Kullanma Suları Üzerine Ön Çalışma*. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 2025. **11**(1): p. 1-13.
72. Singh, M. and S. Ahmed, *IoT based smart water management systems: A systematic review*. Materials Today: Proceedings, 2021. **46**: p. 5211-5218.
73. Krishnan, S.R., et al., *Smart Water Resource Management Using Artificial Intelligence—A Review*. Sustainability, 2022. **14**(20): p. 13384.
74. Fardan, S. and A. Al-Sartawi, *Roll of Artificial Intelligence in Smart Metering System for Water Distribution*, in *Artificial Intelligence, Internet of Things, and Society 5.0*, A. Hannon and A. Mahmood, Editors. 2023, Springer Nature Switzerland: Cham. p. 291-298.
75. Slaný, V., et al., *An Integrated IoT Architecture for Smart Metering Using Next Generation Sensor for Water Management Based on LoRaWAN Technology: A Pilot Study*. Sensors, 2020. **20**(17): p. 4712.
76. Kamiński, C., et al., *Smart Water Management Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture*. Sensors, 2019. **19**(2): p. 276.

77. Ahmed, M.M., E. Hassanien, and A.E. Hassanien, *IoT-based intelligent waste management system*. Neural Computing and Applications, 2023. **35**(32): p. 23551-23579.
78. Mookkaiah, S.S., et al., *Design and development of smart Internet of Things–based solid waste management system using computer vision*. Environmental Science and Pollution Research, 2022. **29**(43): p. 64871-64885.
79. Fang, B., et al., *Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review*. Environmental Chemistry Letters, 2023. **21**(4): p. 1959-1989.
80. Moraga, G., et al., *Circular economy indicators: What do they measure?* Resources, Conservation and Recycling, 2019. **146**: p. 452-461.
81. Ragossnig, A.M. and D.R. Schneider, *Circular economy, recycling and end-of-waste*. Waste Management & Research, 2019. **37**(2): p. 109-111.
82. Sürmeli, R.Ö., et al., *Phosphate recovery from digestate using magnesium-modified fungal biochar*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2024.
83. Senadheera, U.E., et al., *Beyond Composting Basics: A Sustainable Development Goals—Oriented Strategic Guidance to IoT Integration for Composting in Modern Urban Ecosystems*. Sustainability, 2024. **16**(23): p. 10332.
84. Bayrakdar, A., et al., *Biogas production from chicken manure: Co-digestion with spent poppy straw*. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017. **119**: p. 205-210.
85. Afotey, B. and G.T. Sarpong, *Estimation of biogas production potential and greenhouse gas emissions reduction for sustainable energy management using intelligent computing technique*. Measurement: Sensors, 2023. **25**: p. 100650.
86. Ferro-Escobar, R., H. Vacca-González, and H. Gómez-Castillo, *Smart and Sustainable Cities in Collaboration with IoT: The Singapore Success Case*, in *Machine Learning for Smart Environments/Cities: An IoT Approach*, G. Marques, A. González-Briones, and J.M. Molina López, Editors. 2022, Springer International Publishing: Cham. p. 213-243.
87. Nikolaeva, A., *Smart Cities and (Smart) Cycling: Exploring the Synergies in Copenhagen and Amsterdam*. Journal of Urban Technology, 2024. **31**(1): p. 29-49.
88. Mathiesen, B.V., et al., *Copenhagen Energy Vision: A sustainable vision for bringing a Capital to 100% renewable energy*. 2015.
89. Aslan, M.M., *Akıllı Kent Uygulamalarının Kentlerde Yaşanan Trafik Sorununun ve Ulaşımına Bağlı Olarak Ortaya Çıkan Çevre Kirliliğinin Azaltılmasına Etkisi: Akıllı Ulaşım Uygulamaları*. JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy, 2024. **9**(2): p. 388-399.
90. Yazkan, B. *Impact of Adaptive Traffic Management System on Carbon Emissions: Istanbul Case*. in *A Pathway to Safe, Smart, and Resilient Road and Mobility Networks*. 2024. Cham: Springer Nature Switzerland.
91. Bıyık, C., *Smart Cities in Turkey: Approaches, Advances and Applications with Greater Consideration for Future Urban Transport Development*. Energies, 2019. **12**(12): p. 2308.
92. Uslu, H. and H. Erkekoğlu, *ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİK DÖNÜŞÜM SÜRECİNDE SEÇİLMİŞ ÜLKELER VE TÜRKİYE’NİN DURUMU: AMPİRİK BİR ANALİZ*. Verimlilik Dergisi, 2021(4): p. 51-65.
93. Turner, S.W. and S. Uludag, *Toward Smart Cities via the Smart Grid and Intelligent Transportation Systems*. Smart Grid, 2017: p. 117-166.
94. Ma, S., et al., *Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries*. Applied Energy, 2022. **326**: p. 119986.

95. Zhang, Y., et al., *A big data driven analytical framework for energy-intensive manufacturing industries*. Journal of Cleaner Production, 2018. **197**: p. 57-72.
96. Oguntola, O., K. Boakye, and S. Simske, *Towards Leveraging Artificial Intelligence for Sustainable Cement Manufacturing: A Systematic Review of AI Applications in Electrical Energy Consumption Optimization*. Sustainability, 2024. **16**(11): p. 4798.
97. Bocken, N.M.P. and J.M. Allwood, *Strategies to reduce the carbon footprint of consumer goods by influencing stakeholders*. Journal of Cleaner Production, 2012. **35**: p. 118-129.
98. Guo, Q., Y. Wang, and X. Dong, *Effects of smart city construction on energy saving and CO2 emission reduction: Evidence from China*. Applied Energy, 2022. **313**: p. 118879.
99. Borysiak, O., et al., *Smart Transition to Climate Management of the Green Energy Transmission Chain*. Sustainability, 2022. **14**(18): p. 11449.
100. Fetting, C., *The European green deal*. ESDN Report, December, 2020. **2**(9): p. 53.
101. Sinan, B., *TÜRKİYE'DE YEKDEM İLE DÖVİZ KURU, ELEKTRİK TÜKETİMİ ARASINDAKİ İLİŞKİ (2012.1-2020.2)*. Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2021. **6**(2): p. 191-207.
102. Aydoğdu, Ç., *Yenilenebilir Enerji Sektöründe ve Enerji Verimliliğinde Kamusal Destekler ve Türkiye'de Yansımaları*. Akademik İzdüşüm Dergisi, 2021. **6**(1): p. 52-74.
103. Orun, A.F. and B. Demirgil, *TÜRKİYE'DE YENİLENEBİLİR ENERJİ YATIRIMLARINA YÖNELİK TEŞVİKLER VE YENİLENEBİLİR ENERJİNİN EKONOMİK ETKİLERİ*. Uluslararası İktisadi ve İdari Akademik Araştırmalar Dergisi, 2021. **1**(2): p. 90-112.
104. Özcan, M., B. Ergün, and E. Ocaklı, *Türkiye'de Kullanılan Yenilenebilir Enerji Sertifika Sistemlerinin Değerlendirilmesi*. EMO Bilimsel Dergi, 2021. **11**(21): p. 29-41.