



Elektrik, Doğalgaz ve Su Tüketim Verilerine Dayalı Konut Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi: Ankara İli Örneği

Furkan Buğra ÖZTAŞKIN^{1*}

¹Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Machinery and Metal Technologies, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2026
Düzeltilme: 10/08/2026
Kabul: 04/09/2026

Anahtar Kelimeler

Enerji Kaynakları
Enerji Tüketimi
Karbon Ayak İzi
İklim Normalizasyonu
Konut Ölçeği

Article Info

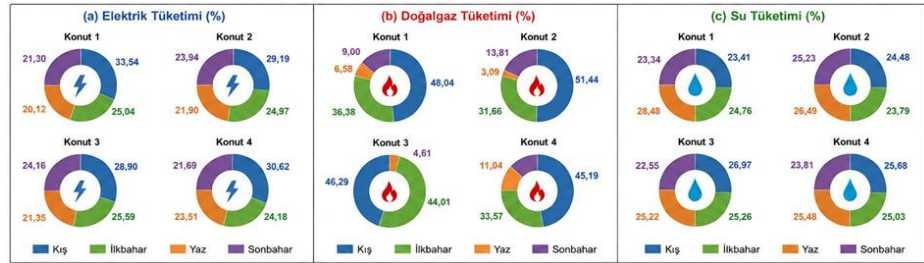
Research article
Received: 06/07/2026
Revision: 10/08/2026
Accepted: 04/09/2026

Keywords

Energy Sources
Energy Consumption
Carbon Footprint
Climate Normalization
Household Scale

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Meteorolojik faktörler, konutların enerji profili ve emisyon çıkışlarını doğrudan belirlemektedir. Doğalgaz ve elektrik tüketimi kışın artış eğilimi sergilerken, su tüketimi ve yaz aylarındaki soğutma ihtiyaçları sıcaklıkların artmasıyla birlikte artmaktadır. / Meteorological factors directly determine the energy profile and emission output of residential buildings. Natural gas and electricity consumption tend to increase in winter, while water consumption and cooling needs increase with rising temperatures in summer.



Şekil A: Konutlara ait ortalama mevsimsel tüketim dağılımları / Figure A: Average seasonal consumption distributions for households.

Highlights (Önemli noktalar)

- 2021-2025 yılları arasında dört farklı konutun gerçek elektrik, doğalgaz ve su tüketimleri analiz edilmiştir. / The actual electricity, natural gas, and water consumption of four different residences was analyzed between 2021 and 2025.
- Mevsimsel tüketim değişimleri IGD ve SGD göstergeleriyle birlikte değerlendirilmiştir. / Seasonal consumption variations were evaluated using both IGD and SGD indicators.
- Karbon ayak izi IPCC ve DEFRA metodolojileri karşılaştırmalı olarak hesaplanmıştır. / Carbon footprint was calculated using a comparative analysis of IPCC and DEFRA methodologies.

Aim (Amaç): Bu çalışmanın amacı, Ankara'da farklı konumlarda bulunan dört konutun 2021-2025 dönemine ait elektrik, doğalgaz ve su tüketimlerini yıllık ve mevsimsel olarak incelemektir. / The aim of this study is to examine the electricity, natural gas, and water consumption of four residences located in different locations in Ankara on an annual and seasonal basis for the period 2021-2025.

Originality (Özgünlük): Çalışmanın özgünlüğü; beş yıllık gerçek konut tüketim verilerini, mevsimsel tüketim dağılımlarını, IGD-SGD tabanlı iklim normalizasyonunu ve IPCC-DEFRA emisyon faktörü yaklaşımlarını aynı değerlendirme çerçevesinde birleştirmesidir. / The originality of this study lies in its integration of five years of real residential consumption data, seasonal consumption distributions, IGD-SGD-based climate normalization, and IPCC-DEFRA emission factor approaches within the same assessment framework.

Results (Bulgular): IPCC yaklaşımında toplam karbon ayak izi 2.272,59-7.766,50 kgCO₂e/yıl, DEFRA yaklaşımında ise 2.270,60-7.585,67 kgCO₂e/yıl aralığında değişmiştir. / In the IPCC approach, the total carbon footprint ranged from 2,272.59 to 7,766.50 kgCO₂e/year, while in the DEFRA approach it ranged from 2,270.60 to 7,585.67 kgCO₂e/year.

Conclusion (Sonuç): Sonuçlar, konut kaynaklı karbon emisyonlarının temel belirleyicisinin doğalgaz tüketimi olduğunu ve yıllar arası enerji karşılaştırmalarında meteorolojik koşulların dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Konut karbon ayak izinin azaltılmasında önceliğin ısıtma talebinin düşürülmesi, bina enerji verimliliğinin artırılması ve düşük karbonlu enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması olduğu sonucuna ulaşılmıştır. / The results showed that the main determinant of residential carbon emissions is natural gas consumption, and that meteorological conditions should be considered in inter-year energy comparisons. It was concluded that the priority in reducing residential carbon footprint should be lowering heating demand, increasing building energy efficiency, and promoting low carbon energy systems.



Elektrik, Doğalgaz ve Su Tüketim Verilerine Dayalı Konut Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi: Ankara İli Örneği

Furkan Buğra ÖZTAŞKIN^{1*}

¹Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Machinery and Metal Technologies, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2026
Düzeltilme: 10/08/2026
Kabul: 04/09/2026

Anahtar Kelimeler

Enerji Kaynakları
Enerji Tüketimi
Karbon Ayak İzi
İklim Normalizasyonu
Konut Ölçeği

Öz

Bu çalışmada, Ankara ilinde farklı konumlarda bulunan dört farklı konutun 2021-2025 dönemine ait doğalgaz, elektrik ve su tüketimleri kullanılarak enerji tüketim eğilimleri ve karbon ayak izi performansları değerlendirilmiştir. Enerji tüketim verileri mevsimsel ve yıllık ölçekte analiz edildi. Meteorolojik etkilerin belirlenmesinde Isıtma Gün Derecesi (IGD) ve Soğutma Gün Derecesi (SGD) göstergelerinden yararlanılmıştır. Yıllar arasındaki iklimsel farklılıkların enerji tüketimleri üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla doğalgaz tüketimleri IGD, elektrik tüketimleri ise SGD tabanlı olarak normalize edilmiştir. Karbon ayak izi hesaplamaları IPCC ve DEFRA emisyon faktörü yaklaşımlarına göre gerçekleştirilmiş ve doğalgaz, elektrik ve su kaynaklı emisyon katkıları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, doğalgaz tüketiminin kış dönemindeki payının %45,19-51,44 arasında değiştiğini ve doğalgaz kaynaklı emisyonların toplam karbon ayak izinin %69,71-84,99'unu oluşturduğunu göstermiştir. Elektrik kaynaklı emisyon katkısı %14,13-29,37, su kaynaklı katkı ise %0,39-2,10 aralığında belirlenmiştir. Toplam karbon ayak izi IPCC yaklaşımında 2.272,59-7.766,50 kgCO₂e/yıl, DEFRA yaklaşımında ise 2.270,60-7.585,67 kgCO₂e/yıl arasında değişmiştir. Her iki yaklaşımın benzer eğilimler sergilediği, ancak kullanılan emisyon faktörlerine bağlı olarak mutlak değerlerde farklılıklar oluştuğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, konut kaynaklı karbon emisyonlarının azaltılmasında öncelikle ısınma amaçlı doğalgaz tüketiminin azaltılması, bina enerji verimliliğinin geliştirilmesi ve meteorolojik koşulların enerji performansı değerlendirmelerine dâhil edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Determining and Evaluating the Carbon Footprint of a Household Based on Electricity, Natural Gas, and Water Consumption Data: The Case of Ankara Province

Article Info

Research article
Received: 06/07/2026
Revision: 10/08/2026
Accepted: 04/09/2026

Keywords

Energy Sources
Energy Consumption
Carbon Footprint
Climate Normalization
Household Scale

Abstract

This study evaluates energy consumption trends and carbon footprint performance of four different residences located in different locations in Ankara province, using natural gas, electricity, and water consumption data for the period 2021-2025. Energy consumption data were analyzed on a seasonal and annual scale. Heating Degree Day (HDD) and Cooling Degree Day (CDD) indicators were used to determine meteorological effects. To reduce the impact of climatic differences between years on energy consumption, natural gas consumption was normalized based on HDD, and electricity consumption was normalized based on CDD. Carbon footprint calculations were performed according to IPCC and DEFRA emission factor approaches, and the emission contributions of natural gas, electricity, and water were compared. The results showed that the share of natural gas consumption in the winter period varied between 45.19% and 51.44%, and natural gas-related emissions constituted 69.71% to 84.99% of the total carbon footprint. The emission contribution from electricity ranged from 14.13% to 29.37%, and the contribution from water ranged from 0.39% to 2.10%. The total carbon footprint varied between 2,272.59 and 7,766.50 kgCO₂e/year in the IPCC approach and between 2,270.60 and 7,585.67 kgCO₂e/year in the DEFRA approach. It was determined that both approaches showed similar trends, but differences in absolute values occurred depending on the emission factors used. The findings indicate that reducing residential carbon emissions primarily requires reducing natural gas consumption for heating, improving building energy efficiency, and including meteorological conditions in energy performance assessments.

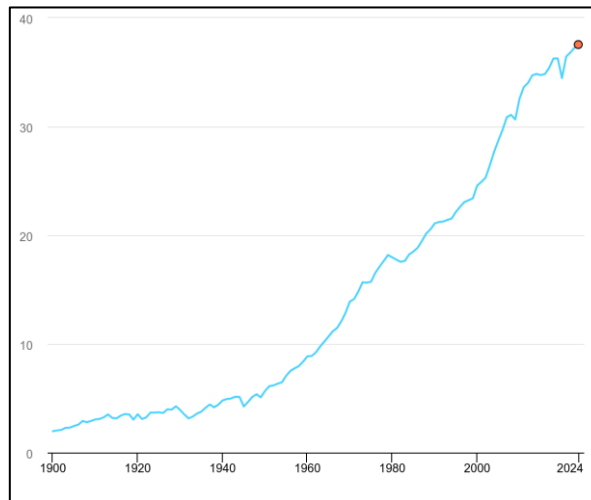
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusundaki hızlı artışla birlikte, teknoloji ve sanayi alanlarındaki ilerlemeler, enerji talebini artırmıştır. Toplumların ekonomik olarak büyümesi, yaşam standartlarının iyileşmesi ve çeşitlenen endüstriyel faaliyetleri ile enerjinin üretim ve tüketim süreçleri yaygınlaşmıştır. Bu süreçlerin karşılanması çoğunlukla fosil kökenli yakıtlarla (kömür, petrol ve doğalgaz) yenilenemez enerji kaynakları tarafından karşılanmaktadır [1,2]. Küresel iklim değişikliğine neden olan insan faaliyetlerinin üretim ve tüketim süreçleri sonucunda doğrudan ya da dolaylı olarak atmosfere salınan toplam sera gazı emisyonlarını ifade eden terim, karbon ayak izi olarak ifade edilmektedir [3,4]. Enerji kaynaklarının aşırı ve bilinçsiz kullanımıyla birlikte artan çevresel baskılar, küresel ölçekte çevresel sürdürülebilirlik tartışmalarına neden olmaktadır.

Çevresel sürdürülebilirliği tehdit eden en büyük sorunlardan biri iklim değişikliğidir. Atmosferdeki sera gazları konsantrasyonlarındaki sürekli artış, küresel sıcaklıkların artmasına, aşırı hava olaylarındaki sık artışa ve doğal ekosistemlerde ciddi değişimlere yol açmaktadır [5]. Sera etkisine yol açan temel gazlar, karbondioksit (CO_2), diazot monoksit (N_2O), metan (CH_4), florlu gazlar ve kloroflorokarbonlardır (CFC). Hem doğal süreçler sonucu hem de insan kaynaklı faaliyetler sonucu açığa çıkan bu gazların atmosferik konsantrasyonları, 1750 yılından itibaren belirgin bir artış göstermiştir [6–10]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'na göre, 2024 yılında küresel enerji kaynaklı karbondioksit (CO_2) emisyonları 37,6 milyar ton seviyesine ulaşmış ve tarihsel olarak en yüksek değerlerine ulaşmıştır [11]. Şekil 1'de

sunulan IEA'nın küresel CO_2 emisyonları verilerine göre 1900-2024 yılları arasındaki dönemde sürekli artış göstermiş ve yaklaşık 2 Gt CO_2 seviyesinden 37,5 Gt CO_2 seviyesine ulaşmıştır. 1950'den sonra gelişen sanayileşme ve 2000 sonrası yüksek ekonomik büyüme ile bu dönemlerinde artışlar çok hızlı gerçekleşmiştir. Son yıllarda emisyon artış hızında kısmi yavaşlamalar olmasına rağmen artış genel eğilimi devam etmektedir. 2024 yılında emisyon seviyesi tüm zamanların en yüksek değerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, dünyada olduğu gibi Türkiye'de de sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik ulusal bir strateji geliştirilmesinin önemini ortaya koymaktadır [12].

CO_2 emisyonlarının küresel ölçekte sürekli olarak artması nedeniyle, enerji tüketiminin çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışmaların yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, yüksek enerji tüketimine sahip olan sektörlerin belirlenmesi ve bu sektörlerin verimlilik stratejileri oldukça önemlidir. Enerji tüketiminde sanayi ve ulaşım sektörlerinin yanı sıra bina sektörü de yüksek bir paya sahip olup özellikle konutlar yüksek enerji talep etmektedir (Şekil 2). Bu nedenle binalar, enerji talebindeki payları ve sera gazı emisyonlarına olan katkıları nedeniyle sürdürülebilir kalkınma ve iklim değişikliğiyle mücadele politikalarının odağında yer almaktadır. Binalarda enerji tüketim yapısının ve karbon ayak izinin incelenmesi, emisyon azaltım potansiyelinin ortaya konulması için oldukça kritik bir öneme sahiptir [13]. İklim değişikliğinin binalar üzerindeki etkileri belirgin hâle gelmiştir. Ortam sıcaklıklarının artması ile binaların ısı dengesinde sapmalar meydana gelmiştir. Bu sapmalar sonucu ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketim miktarları değişmektedir [14,15]



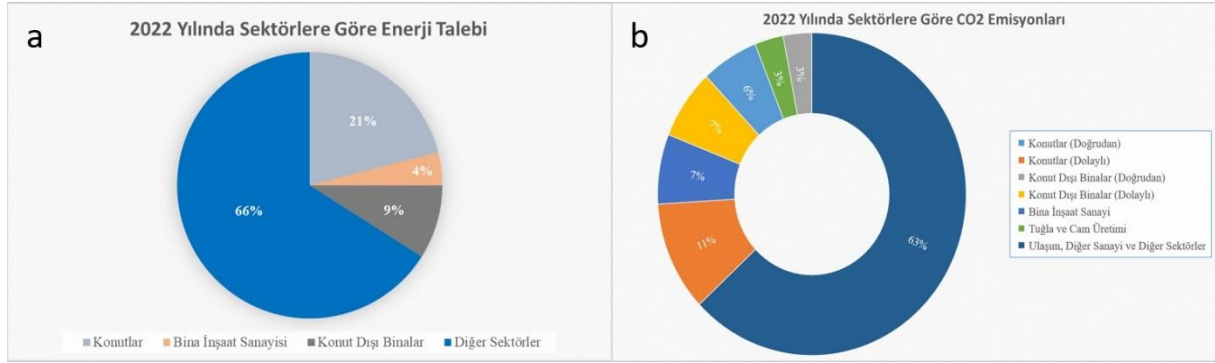
Şekil 1. IEA küresel enerji kaynaklı karbondioksit (CO_2) emisyonları (IEA global energy-related carbon dioxide (CO_2) emissions) [11]

Bina sektörünün global enerji sistemi içindeki önemi Şekil 2'de belirgin bir şekilde görülmektedir. Verilere göre (Şekil 2.a), 2022 yılına kadar bina inşaat sanayisi, konutlar ve konut dışı binaların toplam küresel nihai enerji tüketiminin %34'lük bir oranı kapladığı anlaşılmaktadır. Bunlara ek olarak Şekil 2.b'de sunulan grafikte bina sektörünün hem doğrudan hem de dolaylı karbondioksit emisyonlarının dünya çapındaki payının enerji tüketimiyle aynı oranlarda olduğu açıkça görülmektedir. Bu veriler, sektörün karbon ayak izi üzerindeki önemli rolü olduğunu desteklemektedir.

Enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonların azaltılmasında oldukça önemli rolü bulunan bina sektörü, Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) Altıncı Değerlendirme Raporu'na göre küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık

%21'inden ve küresel nihai enerji tüketiminin %31'inden sorumludur. Ayrıca bina sektörünün toplam enerji talebinin %70'ini konutlar oluşturmaktan dolayı, konutlardaki hem enerji verimliliği hem de karbon azaltım stratejileri, ulusal ve küresel emisyon azaltım hedeflerinin sağlanmasında önemli katkılar sunabilmektedir [16,17].

Konut odaklı iklim değişikliği çalışmalarında; nüfus artışı, iç mekânlarda konfor standartlarının yükselmesi, daha geniş yaşam alanları arayışları, hane halkı büyüklüğünün azalması gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Çevresel etkiler ve kaynak tüketimi açısından mevcut yapı çevre, önemli bir tasarruf potansiyeli göstermektedir [18]. İklim değişikliğini orta ve uzun vadede önlemeye yönelik yapılan çalışmalarda, binalarda enerji kullanımının ve buna bağlı olarak sera gazı salınımlarının düşürülmesi üzerinde ortak karar oluşmuştur [19].



Şekil 2. 2022 yılında binaların küresel enerji ve süreçle ilgili CO₂ emisyonlarındaki payı (The share of buildings in global energy and process-related CO₂ emissions in 2022) [4]

Konutlarda ısıtma, soğutma, aydınlatma ve günlük yaşam faaliyetleri gibi birçok faktörler enerji tüketimini etkilemektedir. Özellikle petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil kökenli yakıtların kullanıldığı ısıtma sistemleri, konut kaynaklı karbon emisyonlarının ciddi bir bölümünü oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra elektrik ve su tüketimleri, kullanıcı davranışları, bina özellikleri ve meteorolojik koşulların da enerji tüketim seviyelerini direkt olarak etkilemesinden dolayı, konutların karbon ayak izi performanslarının değerlendirilmesinde enerji tüketim miktarları ile birlikte iklim koşullarının da dikkate alınması gerekmektedir [20].

Belirli bir faaliyet sonucunda atmosfere salınan sera gazlarının karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) cinsinden ifade edilerek karbon ayak izi terimini oluşturmaktadır [21]. Karbon ayak izi çalışmalarının konut ölçeğinde gerçekleştirilmesi, doğalgaz, elektrik ve su gibi enerji kaynaklarının

tüketim alışkanlıklarının çevresel etkilerinin belirlenmesine ve sürdürülebilir enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır [13]. Konutlarda ısıtma amacıyla kömür kullanımının da olmasına rağmen doğalgaz alt yapısının da yaygınlaşması ile Ankara'da doğalgaz kullanımı yaygın hâle gelmiştir [22].

IPCC, sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında metodolojik çerçeveler önermektedir [22,23]. Tier 1 metodolojisi varsayılan emisyon faktörlerine dayanan, veri gereksiniminin düşük ve uygulanabilirliği yüksek bir yöntemdir [24]. Özellikle bireysel konutlar gibi sınırlı veri erişimine sahip bölgelerde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu metodoloji, hesaplamalara şeffaflık ve karşılaştırılabilirlik sağlamaktadır [25,26]. IPCC metodolojisinde kullanılan emisyon faktörlerine alternatif olarak GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol, Sera Gazı Protokolü) çerçevesinde geliştirilen ve Birleşik Krallık Çevre, Gıda ve Kırsal

İşler Bakanlığı (Department for Environment, Food & Rural Affairs, DEFRA) tarafından yayımlanan emisyon faktörleri kullanılmaktadır. DEFRA emisyon faktörleri, elektrik üretim karması ve yakıt türlerine ilişkin güncel ve ayrıntılı veriler sunmaktadırlar. Bu durum özellikle elektrik tüketimine dayalı karbon ayak izi hesaplamalarında tercih edilmektedir [27–29]. DEFRA hesaplamalarının IPCC Tier 1 sonuçlarına göre farklı değerlerin üretilmesine neden olabilmektedir.

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda, konutlardaki enerji tüketimlerinin karbon ayak izi üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Baiocchi ve Minx, şehir ölçeğinde konutların emisyon değerlendirmeleri için IPCC yönteminin uygulanabilir bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir [30]. Ayrıca Jones ve Kammen, karbon ayak izi çalışmalarında konut ölçeğinde değerlendirme yapılması durumlarında DEFRA ve IPCC emisyon faktörlerinin kullanılması önererek, hesaplanan emisyon değerlerinin anlamlı sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir [31].

Bunlara ek olarak, Hünerli ve ark. yaptıkları çalışmalarında karbon ayak izi hesaplamalarında konut enerji tüketimine bağlı olarak seçilecek metodolojinin sonuçlara olan etkisini belirleyebilmek amacıyla DEFRA ve IPCC Tier 1 yöntemlerini kullandıkları görülmektedir [32]. Konutlardan kaynaklanan karbon emisyonlarının analizine göre ülkemizde hane başına ortalama 4,8 CO₂ emisyon değeri olduğunu belirtmişlerdir [33]. Ülkemizde gerçekleştirilen çalışmaların ciddi bir oranının bölge ve şehir üzerinde yapıldığı, ayrıca farklı iklim koşullarının birbirleri ile karşılaştırmalı olarak yapılan çalışmaların yapılmadığı anlaşılmıştır. Bundan dolayı DEFRA ve IPCC Tier 1 yöntemlerinin aynı çalışma ve veri seti analiz edilerek karşılaştırma yapılan çalışmaların sınırlı düzeyde olduğu açık bir şekilde görülmektedir [34].

İklimsel koşullar karbon ayak izi üzerinde belirleyici bir unsurdur. Konutların enerji tüketim profillerini etkileyen durumlar, yıllık ortalama sıcaklık, ısıtma ve soğutma gün dereceleri ile bağlı nem oranıdır. Sıcak iklim kuşaklarında soğutma ihtiyacı için elektrik tüketiminde artış görülmekte iken, soğuk iklim kuşaklarında ise ısınma amacıyla yakıt tüketimi öne çıkmaktadır. Farklı iklim bölgelerinde bulunan konutların karbon ayak izi bakımından karşılaştırılmalı bir şekilde analiz edilmesi gerekli hâle gelmiştir.

Türkiye, geniş bir iklim çeşitliliğine sahip olmasına rağmen, konut bazında iklim temelli karşılaştırmalı karbon ayak izi çalışmaları sınırlı sayıda olduğu bir

ülkedir. Yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, şehir ve bölge ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Enerji tüketimine bağlı karbon ayak izi üzerindeki etkileri farklı iklim koşullarında yeterli düzeyde ele alınmamaktadır. Bu durum, konut ölçeğinde yapılan karbon ayak izi çalışmalarında iklimsel değişkenlerin rolünü açıkça ortaya konulmasını zorlaştırmakta ve literatürde kritik bir araştırma boşluğunu meydana getirmektedir. Farklı iklim koşullarına sahip şehirlerdeki konutların aynı metodoloji ve veri türleri kullanılarak incelenmesi, genellenebilir sonuçların değerlendirilmesi ve karşılaştırılması açısından kritik önem taşımaktadır.

Elektrik veya enerji tüketimlerine dayanan konut karbon ayak izi çalışmaları önemli bir literatür kaynağı sağlamaktadır. Fakat su tüketimleri ve meteorolojik değişkenler bu çalışmaların kapsamının dışında değerlendirilmiştir. Dahası aynı veri seti üzerinde farklı emisyon faktörü yaklaşımlarının karşılaştırıldığı çalışmalar da sınırlı sayıda bulunmaktadır.

Soğutma ve ısıtma amacıyla gerçekleşen enerji tüketimleri, meteorolojik koşullar ile birbirine bağlantılıdır. Soğutma Gün Derecesi (SGD) ve Isıtma Gün Derecesi (IGD) göstergelerinden yararlanılarak yıllara bağlı enerji tüketimindeki değişiklikler doğru bir şekilde anlamlandırılabilir. Enerji tüketimlerinin meteorolojik etkilerden arındırılmasını sağlayan iklim normalizasyonu yaklaşımları ile birlikte farklı yıllar arasında yapılan karşılaştırmaların daha sağlıklı ve objektif bir şekilde yapılmasına imkân tanımaktadır.

Bu çalışmada, Ankara (39°57' K, 32°53' D, rakım ≈ 890 m) ilinde farklı bölgelerde yer alan dört konutun 2021-2025 yılları arasındaki doğalgaz, elektrik ve su tüketim verileri kullanılarak karbon ayak izi performansları araştırılmıştır. Bu kapsamda öncelik olarak mevsimsel ve yıllık tüketim eğilimleri analiz edilmiştir. Buna ek olarak enerji tüketimlerinin normalizasyonu Ankara iline ait meteorolojik veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karbon ayak izi hesaplamaları DEFRA ve IPCC emisyon faktörü yaklaşımlarından yararlanılarak metodolojik farklılıklar ve iklimsel şartlar kapsamında sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu çalışma, bütüncül bir karbon ayak izi değerlendirmesi sunmak amacıyla gerçek tüketim verilerini, meteorolojik göstergeleri ve farklı emisyon faktörü yaklaşımlarını konut ölçeğinde birlikte ele almaktadır. Bu çalışmayla hem metodolojik tercihin hem de coğrafi ve iklimsel faktörlerin konut bazlı karbon ayak izi üzerindeki etkileri somut verilerle ortaya konmuştur. Literatürde genellikle tek bir metodolojiye

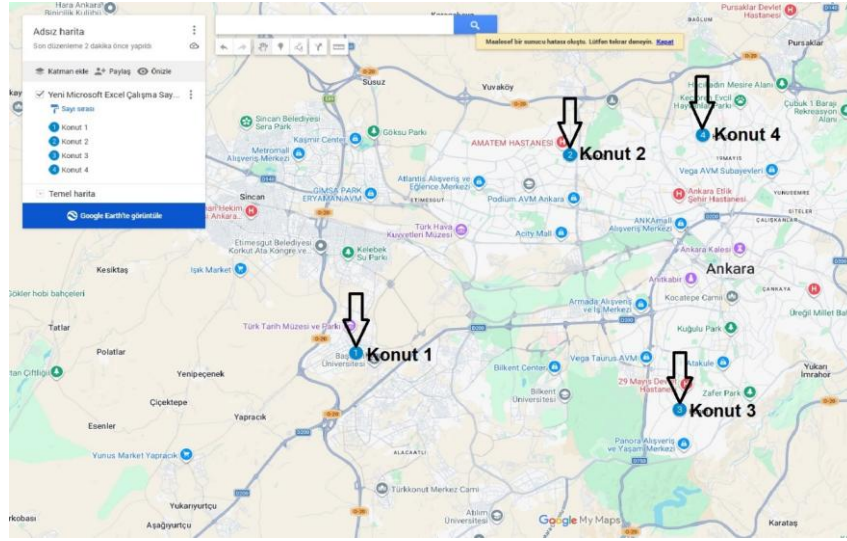
odaklanırken, bu çalışmada aynı veri seti ve sistem sınırları dâhilinde DEFRA ve IPCC emisyon faktörleri doğrudan karşılaştırılmıştır. Hesaplama yöntemleri ve iklimsel göstergelerin sonuçlar üzerindeki etkisini ayırıştırarak analiz eden bu yaklaşım, konut ölçeğindeki emisyon değerlendirmelerinde iklimsel normalizasyonun ve doğru metodoloji seçiminin kritik rolünü göstermesi açısından Türkiye literatürüne özgün bir katkı sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, Ankara ili sınırları içerisinde bulunan dört farklı konuta ait elektrik, doğalgaz ve su

tüketim verileri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen konutlar, farklı yerleşim bölgelerini temsil edecek şekilde seçilmiş olup, konum bilgileri coğrafi koordinatlar yardımıyla tanımlanmıştır.

Araştırma kapsamında “Konut 1”, “Konut 2”, “Konut 3” ve “Konut 4” olarak kodlanan meskenlerin 2021-2025 yıllarına ait veri setleri incelenmiştir. Her bir konut için, aylık elektrik tüketimi kWh, doğalgaz tüketimi m³ ve su tüketimi m³ birimleriyle kaydedilmiştir. Çalışmada incelenen konutların konum bilgileri Şekil 3’te ve koordinat, bina yaşı, yalıtım durumu, daire alanı ve hane halkı sayısı bilgileri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 3. İncelenen konutların harita üzerindeki konum bilgileri (Location information of the examined properties on the map)

Tablo 1. İncelenen konutların kimlik bilgileri (Identity information of the examined residences)

Konut	Enlem (°N)	Boylam (°E)	Bina Yaşı (Yıl)	Yalıtım Durumu	Daire Alanı (m ²)	Hane Halkı Sayısı (Kişi)
Konut 1	39.8941	32.6435	12	Yalıtımlı	180	2
Konut 2	39.9862	32.7671	18	Yalıtımlı	140	4
Konut 3	39.8678	32.8304	14	Yalıtımlı	240	2
Konut 4	39.9956	32.8438	14	Yalıtımlı	95	2

Ankara il sınırları içerisinde yer alan ve Tablo 1’de coğrafi konum bilgileri verilen konutların tamamı benzer karasal iklim özelliklerini göstermektedir. Konutların doğalgaz, elektrik ve su tüketimlerinin iklim koşulları ile ilişkisini değerlendirebilmek amacıyla çalışma dönemine ait sıcaklık, bağıl nem, yağış miktarı ile Isıtma Gün Derecesi (IGD) ve Soğutma Gün Derecesi (SGD) meteorolojik verileri incelenmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden temin edilen bu veriler, yıllık enerji tüketimlerinin yorumlanmasında kullanılmıştır. Ankara ili yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk ve kar yağışlı karasal iklim özellikleri göstermektedir. Meteorolojik durumların, konutların enerji tüketimini doğrudan

etkilediği ortadadır. Konutların enerji tüketimlerinin mevsimsel dağılımlarının değerlendirilmesinde meteorolojik koşulların etkisi göz önünde bulundurulmuştur. 2021-2025 yılları arasında Ankara iline ait aylık ortalama meteorolojik veriler Tablo 2’de sunulmuştur. İncelenen dönemlerde sıcaklık değerlerinin kış aylarında belirgin şekilde düştüğü, yaz aylarında ise yükseldiği görülmektedir. Özellikle aralık ve şubat ayları arasındaki kış döneminde sıcaklıkların düşük seyretmesi, konutlardaki ısıtma ihtiyacını doğrudan artırmaktadır. Buna karşılık haziran ve ağustos ayları arasında sıcaklıkların aşırı artması, soğutma amaçlı enerji tüketimini etkilemektedir.

Tablo 2. Aylık ortalama meteorolojik veriler (2021-2025 ortalaması) (Monthly average meteorological data (2021-2025 average))

Aylar	Sıcaklık (°C)	Yağış (mm)	IGD	SGD
Ocak	0,4	39,8	452,4	
Şubat	1,8	34,7	396,4	
Mart	5,8	39,2	339	
Nisan	11,3	42,3	149,4	3
Mayıs	16,1	52,1	46,2	6,7
Haziran	20,1	36,8	10,5	35,2
Temmuz	23,5	14,5		106,2
Ağustos	23,6	12,5		135,4
Eylül	19	17,9	11	16,2
Ekim	13,2	26,9	113,8	
Kasım	7,4	31,4	245,6	
Aralık	2,6	44,1	391,8	

Aylık sıcaklık değişimleri ile ilişkili olarak IGD değerlerinin kış aylarında ve SGD değerlerinin ise yaz döneminde maksimum değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum, enerji tüketimlerinde kullanıcı davranışlarının yanı sıra iklim koşullarından da önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Ek olarak, bağıl nem ve yağışlardaki mevsimsel değişimler, dolaylı etkiler oluşturabilmektedir. Meteorolojik verilerin incelenmesinin ardından, konutlara ait 2021-2025 yıllarını içeren aylık olarak

elektrik, doğalgaz ve su tüketimlerinin verileri analiz edilmiştir. Elektrik tüketimleri kWh, doğalgaz tüketimleri m³ ve su tüketimleri m³ cinsinden değerlendirilmiştir. Her bir tüketim için alınan aylık veriler yıllık verilere dönüştürülerek karşılaştırmalı analizler yapılmış olup, konutlar arasındaki farklılıkların belirlenebilmesi hedeflenmiştir. Konutlara ait hesaplanan yıllık elektrik, doğalgaz ve su tüketim verileri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Yıllık toplam tüketimler (2021-2025 Yılları) (Total annual consumption (2021-2025))

Yıl	Konut	Su (m ³ /yıl)	Doğalgaz (m ³ /yıl)	Elektrik (kWh/yıl)
2025	Konut 1	192	1434	851
	Konut 2	153	2355	1974
	Konut 3	154	2084	2375
	Konut 4	129	723	1848
2024	Konut 1	185	1643	735
	Konut 2	162	2288	2020
	Konut 3	173	1684	2357
	Konut 4	193	771	1817
2023	Konut 1	200	1508	917
	Konut 2	171	1808	1918
	Konut 3	144	1653	1941
	Konut 4	173	1048	1816
2022	Konut 1	173	1573	2071
	Konut 2	142	2826	2052
	Konut 3	121	2255	1517
	Konut 4	156	1181	1698
2021	Konut 1	144	1700	2531
	Konut 2	135	3401	2118
	Konut 3	137	2610	1716
	Konut 4	197	1210	1577

Tablo 3'te yer alan 2021-2025 yılları arasında dört konuta ait hesaplanan yıllık tüketim değerlerinin hem yıllara hem de konutlara göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Konutlar içerisinde doğalgaz tüketimleri 723-3.401 m³/yıl, elektrik tüketimleri 735-2.531 kWh/yıl ve su tüketimleri ise 129-200 m³/yıl geniş bir aralıkta değiştiği belirlenmiştir. Söz konusu değişim, konutların kullanım yoğunlukları, kullanıcı davranışları, enerji ihtiyaçları ve yaşam alışkanlıklarındaki farklılıkların bir göstergesidir.

Konutların yıllık tüketimleri, kaynakların kullanım düzeylerini ortaya koymasına rağmen, Ankara ilinin belirgin iklimsel özelliklerine bağlı olarak, enerji tüketimlerinin mevsimsel sıcaklık değişimlerinden büyük oranda etkilenmesi beklenmektedir. Bu nedenle tüketimlerin değerlendirilmesinde sadece yıllık toplam tüketimler değil, yıl içerisindeki

dağılımlarının da incelenmesi oldukça önemlidir. Bu doğrultuda, konutların aylık elektrik, doğalgaz ve su tüketimleri kullanılarak mevsimsel tüketim analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla kış (aralık-ocak-şubat), ilkbahar (mart-nisan-mayıs), yaz (haziran-temmuz-ağustos) ve sonbahar (eylül-ekim-kasım) olmak üzere dört mevsim tanımlanmıştır. Her mevsime ait tüketim miktarlarının yıllık toplam tüketim içerisindeki payları yüzde (%) olarak belirlenmiştir. Mevsimsel tüketimlerin yüzdesel dağılımları sayesinde, konutların tüketim davranışlarının karşılaştırılması imkânı sağlanmaktadır. Böylece tüketim türlerinin dönemsel yoğunluğu ortaya konulabilmekte ve meteorolojik şartlarının tüketimler üzerindeki ilişki daha net değerlendirilmektedir. Elde edilen mevsimsel tüketim dağılımları Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Konutlara ait mevsimsel tüketim dağılımları ortalaması (%) (Average seasonal consumption distribution (%) for households)

Kaynak Tüketimi	Konut	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar
Elektrik	Konut 1	33.54	25.04	20.12	21.30
	Konut 2	29.19	24.97	21.90	23.94
	Konut 3	28.90	25.59	21.35	24.16
	Konut 4	30.62	24.19	23.51	21.69
Doğalgaz	Konut 1	48.04	36.38	6.58	9.00
	Konut 2	51.44	31.66	3.09	13.81
	Konut 3	46.29	44.01	5.08	4.61
	Konut 4	45.19	33.57	11.04	10.20
Su	Konut 1	23.41	24.76	28.48	23.35
	Konut 2	24.48	23.79	26.50	25.24
	Konut 3	26.97	25.26	25.22	22.55
	Konut 4	25.68	25.03	25.48	23.81

Konutların Tablo 4'te sunulan mevsimsel tüketimlerinin yüzdesel dağılımları incelendiğinde, tüm konutlardaki enerji tüketimlerinin belirgin bir mevsimsel karakter gösterdiği açıkça anlaşılmaktadır.

Elektrik tüketim profili incelendiğinde, en yüksek tüketimin %28,90 ile %33,54 arasında değişen paylarla kış aylarında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu tüketim miktarları, aydınlatma sürelerinin uzun olması ve elektrikli ev aletlerinin kullanım yoğunluğuna bağlı olabilmektedir. Yaz ve sonbahar aylarındaki elektrik tüketim oranlarının diğer aylara göre dengeli olduğu fakat ilkbahar aylarında ise bazı konutlarda tüketim payının yeniden arttığı görülmektedir.

Kaynak tüketimleri incelendiğinde, konutların doğalgaz tüketiminde mevsimsel etkilerin belirgin olduğu açıkça görülmektedir. Tüm konutlarda yıllık doğalgaz tüketimlerinin yarısından fazlası %45,19 ile %51,44 arasında değişerek kış aylarında gerçekleşmektedir. Buna karşılık yaz aylarında toplam doğalgaz tüketiminin sadece %3,09-11,04'lük kısmını oluşturarak düşük seviyelerde kaldığı belirlenmiştir. Bu veriler, Ankara'nın karasal iklim özelliklerinin ve kış aylarında artan ısınma ihtiyacının doğalgaz tüketimindeki yükselişte baskın bir role sahip olduğunu göstermektedir.

Elektrik ve doğalgaz tüketimlerinden farklı bir eğilim sergileyen su tüketimi, tüm konutlarda %25,22 ile %28,48 arasında değişen oranlarla en yüksek seviyeye yaz aylarında ulaşmıştır. Bu durum, yaz dönemindeki sıcaklık artışlarının su

kullanım gereksinimini yükseltmesinden kaynaklanmaktadır. Sonbahar, kış ve ilkbahar mevsimlerinde ise su kullanımının yaz mevsimine göre bir miktar düşük seviyelerde gerçekleştiği görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm konutların doğalgaz ve elektrik tüketimlerinin ağırlıklı olarak kış mevsiminde yoğunlaştığı, su tüketimlerinin yaz döneminde arttığı görülmektedir. Bu bulgular, konut tüketimlerinin meteorolojik koşullardan belirgin şekilde etkilendiğini göstermektedir.

Elektrik, doğalgaz ve su tüketimlerinin çevresel etkilerinin nicel olarak değerlendirilebilmesi amacıyla karbon ayak izi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Karbon ayak izi hesaplamaları, atmosfere salınan sera gazlarının karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) cinsinden ifade edilmesidir. Konut ölçeğinde karbon emisyonlarını ağırlıklı olarak elektrik, doğalgaz ve su tüketimi oluşturmaktan dolayı bu çalışmada tüketim türleri ayrı ayrı değerlendirilerek toplam karbon ayak izi değeri bu bileşenlerin toplamı üzerinden oluşmaktadır.

Karbon ayak izi hesaplamalarında, IPCC ve DEFRA yöntemlerinden faydalanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu kapsamda elektrik, doğalgaz ve su tüketimi için ayrı emisyon faktörleri kullanılmıştır. Karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan matematiksel model Eşitlik 1'de sunulmuştur [35].

$$CO_2e = AD * EF \quad (1)$$

Eşitlikte verilen CO₂e karbondioksit eşdeğeri karbon ayak izi miktarını (kgCO₂e/yıl), AD enerji tüketimini (m³/yıl veya kWh/yıl), EF ise birim enerji başına düşen emisyon katsayısını ifade etmektedir.

IPCC metodolojisi, sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında faaliyet verilerinin uygun emisyon faktörleri ile ilişkilendirilmesine, DEFRA metodolojisi ise güncel emisyon faktörlerinin farklı faaliyet türleri için standardize edilerek karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Bu nedenle çalışmada hesaplama yaklaşımı olarak IPCC ve DEFRA metodolojileri benimsenmiş ve literatürde yaygın olarak kabul edilen katsayılardan faydalanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan emisyon faktörleri Tablo 5'te sunulmuştur.

Her iki metodoloji de faaliyet verisi temelli karbon ayak izi hesaplama prensibini benimsemektedir. Tercih edilen emisyon faktörleri kaynağa, bölgeye ve hesaplama kapsamına olarak farklılık göstermektedir. IPCC metodolojisi ağırlıklı olarak ulusal sera gazı envanterlerinin hazırlanmasına, DEFRA metodolojisi ise uygulamaya yönelik güncel emisyon faktörlerini sağlamaktadır.

Tablo 5. IPCC ve DEFRA metodolojilerinde kullanılan emisyon faktörleri (Emission factors used in IPCC and DEFRA methodologies)

Tüketim Türü	Birim	IPCC Temelli Faktör	DEFRA Faktörü
Elektrik	kWh	0,42-0,49	0,193-0,233
Doğalgaz	m ³	1,88-1,90	1,84-2,02
Su	m ³	0,30-0,40	0,149-0,344

Bu çalışmada, IPCC metodolojisinde emisyon faktörü aralıkları dikkate alınarak elektrik tüketimi için 0,45 kgCO₂e/kWh, doğalgaz tüketimi için 1,90 kgCO₂e/m³ ve su tüketimi için 0,35 kgCO₂e/m³ değerleri, DEFRA metodolojileri için elektrik tüketiminde 0,20 kgCO₂e/kWh, doğalgaz tüketiminde 2,00 kgCO₂e/m³ ve su tüketiminde 0,16 kgCO₂e/m³ değerleri emisyon katsayıları olarak kullanılmıştır. Seçilen emisyon faktörü katsayıları, konut ölçeğinde gerçekleştirilen karbon ayak izi çalışmalarında kullanılan değerlerle uyumludur. Böylece iki farklı metodolojinin kullanılması, hesaplanan emisyonların karşılaştırılabilmesine imkân sağlamaktadır.

Karbon ayak izi hesaplamalarına esas tüketim verileri kullanıcı davranışlarının yanı sıra meteorolojik koşullardan da etkilenmektedir. Özellikle doğalgaz tüketimi, dış ortam sıcaklıklarına bağlı olarak ısıtma ihtiyaçları ile direkt ilişkilidir. Elektrik ve su tüketimleri de mevsimsel sıcaklık değişimlerinden belirli oranlarda etkilenmektedir. Bu sebeple tüketim verilerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla iklim normalizasyonu uygulanmaktadır. Bu normalizasyon uygulamasıyla birlikte incelenen yıllar arasında oluşan sıcaklık farklılıklarından kaynaklı enerji tüketiminin azaltılarak tüketim verilerinin ortak iklim referansına göre değerlendirilmesine imkân sağlanmaktadır. Bu

yöntem sayesinde tüketimden kaynaklı değişimlerin meteorolojik koşullardan mı kullanıcı davranışlarından mı kaynaklandığı doğru biçimde ortaya konulması sağlanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında iklim normalizasyonu hesaplamalarında IGD ve SGD göstergelerinden faydalanılmıştır. İlk olarak çalışılan dönemin ortalama IGD ve SGD değerleri belirlenmiş ve ardından her yılın enerji tüketim verileri kullanılarak iklim normalizasyonu gerçekleştirilmiştir. İklim normalizasyonunda kullanılan denklemler Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'te sunulmuştur [36].

$$DG_{Norm} = DG_{Gerçek} * IGD_{Ortalama} / IGD_y \quad (2)$$

$$E_{Norm} = E_{Gerçek} * SGD_{Ortalama} / SGD_y \quad (3)$$

Burada DG_{Norm} normalize edilmiş doğalgaz tüketimini ($m^3/yıl$), $DG_{Gerçek}$ doğalgaz tüketimini ($m^3/yıl$) $IGD_{Ortalama}$ 2021-2025 ortalama IGD'ni, IGD_y ilgili yılın IGD değerini, E_{Norm} normalize edilmiş elektrik tüketimini, $E_{Gerçek}$ elektrik tüketimini, $SGD_{Ortalama}$ 2021-2025 ortalama SGD'ni ve SGD_y ilgili yılın SGD değerini ifade etmektedir.

İklim normalizasyonu, yıllık sıcaklık değişimlerinin enerji tüketim profilleri üzerindeki bozucu etkisini minimize etmek üzere sürece dahil edilmiştir. Söz konusu yöntem, tüketim miktarının standart bir iklim referansı üzerinden analiz edilmesine ve kıyaslanabilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Dış ortam sıcaklıklarından doğrudan etkilenen doğalgaz tüketimlerinde, gerçekleştirilen normalizasyon işleminin sonuçların güvenilirliğini ve yorumlanabilirliğini artırması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada Ankara ilinde yer alan dört farklı konutun elektrik, doğalgaz ve su tüketim verileri değerlendirilmiştir. İlk olarak çalışılan bölgenin coğrafi özellikleri ve meteorolojik koşulları incelenmiş, ardından yıllık ve mevsimsel tüketim analizleri gerçekleştirilmiştir. İklim koşullarının tüketim verileri üzerindeki etkisini belirlenmesi amacıyla IGD ve SGD göstergelerinden yararlanılarak iklim normalizasyonu yaklaşımı uygulanmıştır. Karbon ayak izi hesaplamalarında IPCC ve DEFRA metodolojileri kullanılarak, emisyon faktörlerinin belirlenmesinde literatürde yaygın olarak kullanılan katsayılardan faydalanılmıştır. Bu kapsamda konut tüketim verilerinden kaynaklanan emisyonlar ayrı ayrı hesaplanarak toplam karbon ayak izi değerlerinin

belirlenmesine yönelik metodolojik altyapı oluşturulmuştur. Bir sonraki bölümde, iklimsel ve mevsimsel tüketim bulguları, iklim normalizasyonu sonuçları her iki metodolojiye göre hesaplanan karbon ayak izi değerleri sunulmakta ve karşılaştırmalı olarak tartışılmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu bölümde, Ankara ilinde yer alan dört farklı konutun 2021-2025 yılları arasındaki elektrik, doğalgaz ve su tüketim verilerinden elde edilen bulgular sunulmaktadır. Analiz kapsamında, öncelikle konutların yıllık tüketim verileri ve tüketimlerin mevsimsel dağılımları incelenmiştir. Ardından iklim normalizasyonu analizleri yapılarak meteorolojik koşulların enerji tüketimlerine etkileri araştırılmıştır. Son bölümde ise IPCC ve DEFRA metodolojileri kullanılarak karbon ayak izi değerleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

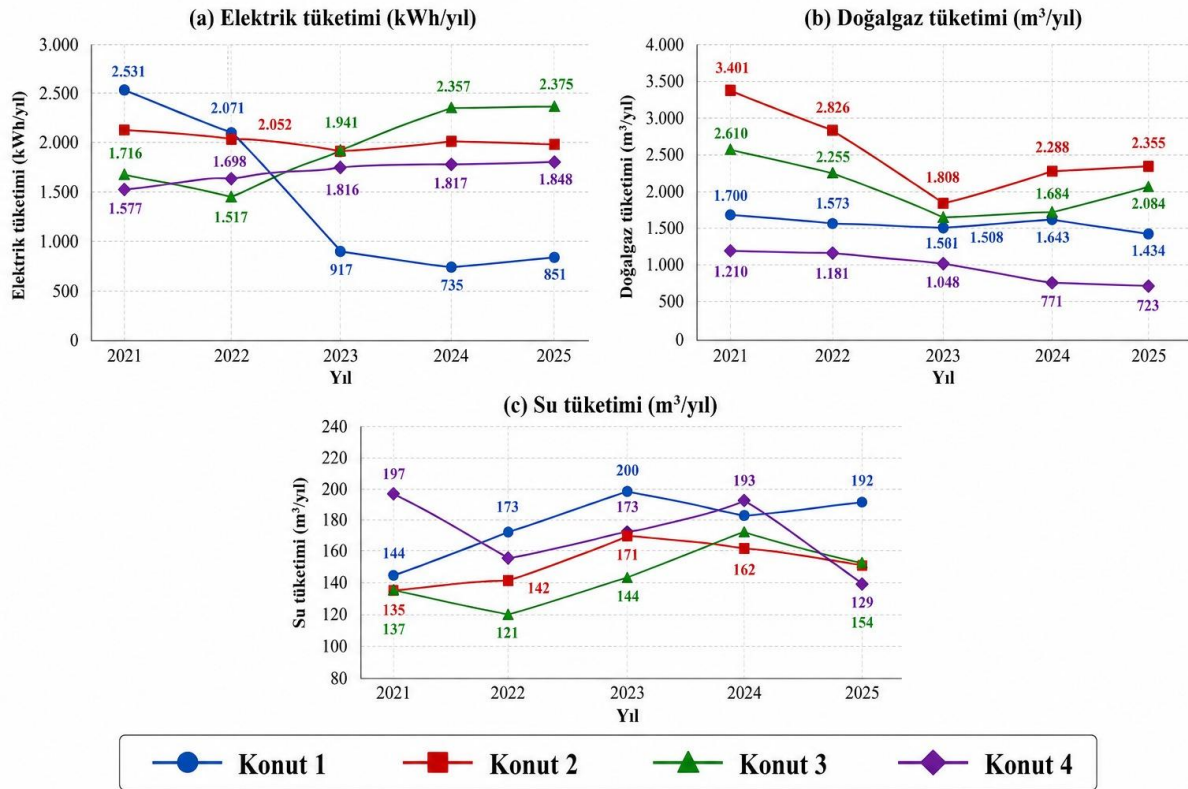
Konutlardaki tüketimler, iklimsel koşullar, kullanıcı davranışları, kullanım yoğunluğu ve spesifik enerji gereksinimleri gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle tüketim verilerinin yıllık ve mevsimsel ölçekte incelenmesi, karbon ayak izini oluşturan temel bileşenlerin doğru tespit edilmesine katkı sunmaktadır. Özellikle Ankara ilinin karasal iklim yapısı göz önüne alındığında, ısıtma amaçlı doğalgaz tüketimi ile belirli dönemlerde elektrik kullanımının meteorolojik değişkenlerle ilişkili olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda elde edilen bulgular, tüketim davranışlarının ortaya konulması, bu tüketimlerin karbon ayak izi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla sistematik olarak değerlendirilmiştir. Böylece farklı konutların tüketim profilleri ve çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Konutlara ait yıllık tüketim verileri incelendiğinde hem konutlar arasında farklılıkların bulunduğu hem de tüketim eğilimleri yıllara göre değişiklik gösterdiği anlaşılmıştır. Özellikle enerji tüketimindeki değişimler kullanıcı davranışları, konut kullanım yoğunluğu ve meteorolojik koşullardaki farklılıklardan meydana gelebilmektedir. Konutların elektrik tüketimleri incelendiğinde, Konut 2 ve Konut 3'ün incelenen dönem boyunca maksimum tüketim değerlerine ulaştığı, Konut 1'de 2023 yılından itibaren azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Konutların doğalgaz tüketimlerinde incelenen yıllar içerisinde genel bir düşüş eğilimi görülmektedir. Bu durumda enerji verimliliği uygulamaları, kullanım alışkanlıklarındaki değişimler veya yıllara bağlı

iklim farklılıkları sebep olabilmektedir. Konutların su tüketimleri incelendiğinde ise elektrik ve doğalgaz tüketimlerine göre stabil bir dağılıma sahip olduğu, yıllar içerisinde sınırlı değişimlerin meydana geldiği anlaşılmaktadır. Yıllık tüketim değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4'de sunulmuştur.

Konutların elektrik tüketimlerinde birbirinden farklı eğilimler gösterdiği Şekil 4(a)'da görülmektedir. İncelenen dönem boyunca Konut 2'nin diğer konutlara göre daha kararlı elektrik tüketim profiline sahip olduğu belirlenmiştir. Konut 3'te ise

2023 yılından sonra bir artış meydana geldiği, buna karşılık Konut 1'in de aynı yıldan sonra bir tüketim azalması gerçekleştiği tespit edilmiştir. Doğalgaz tüketim eğilimleri değerlendirildiğinde (Şekil 4(b)) tüm konutlar için 2021-2025 yılları arasında aşağı yönlü bir eğilim olduğu anlaşılmaktadır. En yüksek doğalgaz tüketiminin Konut 2'de ve en az tüketimin Konut 4'te olduğu ortaya çıkmıştır. Su tüketim verileri doğalgaz ve elektrik tüketimlerine göre daha dengeli bir dağılım göstermektedir (Şekil 4(c)). İncelenen dönemlerde Konut 1 en yüksek su tüketim değerlerine ulaşırken, Konut 4 en düşük seviyede kalmıştır.



Şekil 4. Konutlara ait yıllık tüketim değişimleri: (a) elektrik tüketimi, (b) doğalgaz tüketimi ve (c) su tüketimi (Annual consumption changes for households: (a) electricity consumption, (b) natural gas consumption, and (c) water consumption)

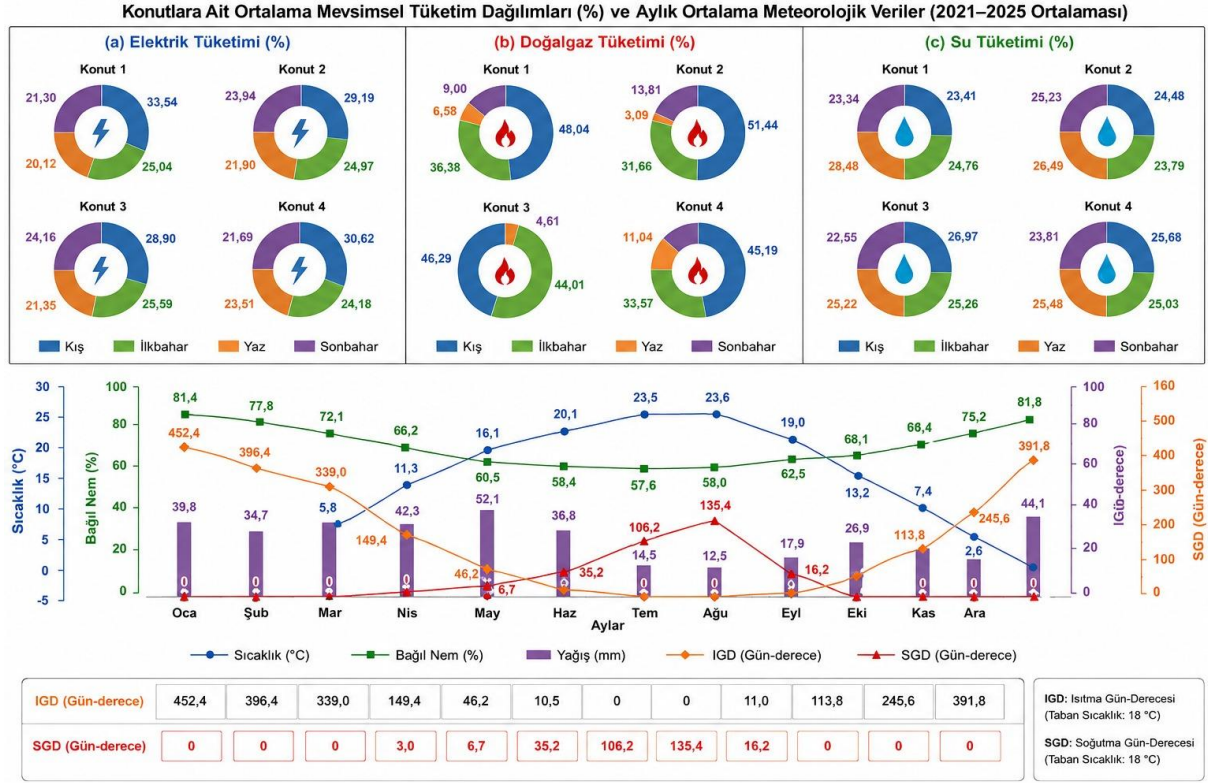
Konutların elektrik tüketimlerinde birbirinden farklı eğilimler gösterdiği Şekil 4(a)'da görülmektedir. İncelenen dönem boyunca Konut 2'nin diğer konutlara göre daha kararlı elektrik tüketim profiline sahip olduğu belirlenmiştir. Konut 3'te ise 2023 yılından sonra bir artış meydana geldiği, buna karşılık Konut 1'in de aynı yıldan sonra bir tüketim azalması gerçekleştiği tespit edilmiştir. Doğalgaz tüketim eğilimleri değerlendirildiğinde (Şekil 4(b)) tüm konutlar için 2021-2025 yılları arasında aşağı yönlü bir eğilim olduğu anlaşılmaktadır. En yüksek doğalgaz tüketiminin Konut 2'de ve en az tüketimin Konut 4'te olduğu ortaya çıkmıştır. Su tüketim verileri doğalgaz ve elektrik tüketimlerine göre

daha dengeli bir dağılım göstermektedir (Şekil 4(c)). İncelenen dönemlerde Konut 1 en yüksek su tüketim değerlerine ulaşırken, Konut 4 en düşük seviyede kalmıştır.

Konutların yıllık toplam tüketim verilerinin mevsimsel sıcaklık değişimlerinden etkilenmesinden dolayı tüketimlerin yıl içerisindeki dağılımlarının incelenmesi oldukça önemlidir. Bu doğrultuda konutlarda tüketilen elektrik, doğalgaz ve suyun mevsimsel değişimlerinin değerlendirilmesi için tüketim verileri kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar dönemleri altında analiz edilmiştir. Mevsimsel tüketim analizleri toplam tüketim

miktarlarının yanı sıra tüketim davranışlarının hangi dönemlerde yoğunlaştığının belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Böylece Ankara ilinin karasal iklim özelliklerine sahip meteorolojik koşulları sayesinde konutların tüketim verileri arasındaki ilişkinin daha

net anlaşılması mümkündür. Bu kapsamda her bir konut için elektrik, doğalgaz ve su tüketimlerinin ortalama mevsimsel dağılımları ile çalışma dönemine ait aylık ortalama sıcaklık, bağıl nem, yağış, IGD ve SGD değerleri Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Konutlara ait ortalama mevsimsel tüketim dağılımları: (a) elektrik tüketimi, (b) doğalgaz tüketimi ve (c) su tüketimi (Average seasonal consumption distributions for households: (a) electricity consumption, (b) natural gas consumption, and (c) water consumption)

Şekil 5 incelendiğinde, meteorolojik şartlardan en fazla etkilenen tüketim türünün doğalgaz olduğu belirlenmiştir. Özellikle ocak, şubat ve aralık aylarında sıcaklıkların düşük olmasına bağlı olarak IGD değerlerinin yükselmesi, tüm konutlarda doğalgaz tüketimini artırmaktadır. Elektrik tüketimlerinin kış mevsiminde aydınlatma ihtiyacı ve elektrikli cihaz kullanımının artmasından kaynaklanan toplam yıllık tüketim içerisindeki payının diğer mevsimlere kıyasla daha yüksek olmasına rağmen doğalgaz tüketimine göre daha dengeli dağılım sergilediği anlaşılmıştır. Yaz mevsiminde SGD değerlerinin artmasına karşın elektrik tüketimlerinde aşırı bir yükseliş olmamasının nedeni, incelenen konutlarda soğutma amaçlı elektrik kullanımının sınırlı düzeyde olduğu söylenebilir. Su tüketiminde ise yaz aylarında sıcaklıkların artması ve bağıl nemin düşmesi belirleyici olmaktadır. İncelenen tüm konutlarda su kullanımının yaz mevsiminde en yüksek seviyeye ulaşması, bu eğilimde ağırlıklı olarak mevsimsel

yaşam alışkanlıklarının belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

Doğalgaz tüketiminin doğrudan iklimsel ısınma gereksinimine bağlı olduğu istatistiksel olarak doğrulanmıştır. Mevsimsel dağılım olarak doğalgaz tüketimleri incelendiğinde yıllık toplam tüketimin %45,19 ile %51,44 gibi baskın bir oranda kış mevsiminde gerçekleşmiştir. Yaz aylarında ise bu payın %3,09 ile %11,04 oranlarında olduğu belirlenmiştir. Doğalgaz kaynaklı emisyon dinamiklerinin temel belirleyicisi olarak mevsimsel IGD dalgalanmaları olduğu ortaya çıkmıştır.

Su tüketim miktarının meteorolojik değişkenlerle ilişkisi incelendiğinde, yıllık ortalama sıcaklık ile su kullanımı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Yaz aylarında kişisel hijyen ve serinleme gibi gereksinimlerin artmasıyla su tüketim payı %25,22 ile %28,48 seviyelerine yükselmiştir. Bu mevsimsel ihtiyaçlar, konutların su ayak izini doğrudan şekillendirmektedir.

Elektrik tüketimi incelendiğinde aydınlatma, ev aletleri, elektrikli cihazlar vb. kullanım payının yüksek olması nedeniyle yıllık toplam elektrik kullanımı ile IGD ve SGD parametreleri arasındaki doğrusal korelasyonun konutun cihaz yapısına bağlı olarak farklılaştığı görülmektedir. Ancak mevsimsel dağılımlar elektrik tüketiminin en yüksek değerlerine kış mevsiminde ulaşarak %28,90 ile %33,54 seviyelerinde, %20,12 ile %23,50 arasındaki payını ise yaz aylarında soğutma döneminde aldığını göstermektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen değerlendirmeler meteorolojik faktörlerin konut enerji profili ve emisyon çıktıları üzerinde birincil derecede yönlendirici olduğunu kanıtlamaktadır. Meteorolojik koşullar ile tüketim verileri birlikte

değerlendirildiğinde, konutların elektrik, doğalgaz ve su tüketim davranışlarının Ankara ilinin karasal iklim özellikleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle doğalgaz tüketiminin, ısınma amacıyla kullanımının sıcaklık değişimlerinde belirleyici olmasına rağmen elektrik ve su tüketimlerinin mevsimsel etkilerden etkilendiği hâlde daha dengeli ve kararlı bir dağılım sergilediği anlaşılmaktadır. Normalize IGD, ortalama IGD değerinin yıllık IGD değerine oranlanması ile elde edilmiştir. Aynı hesaplama yöntemiyle normalize SGD, ortalama SGD değerinin yıllık SGD değerine oranlanması ile bulunmuştur. Tüketim verilerinin daha sağlıklı değerlendirilebilmesi amacıyla yıllara ait IGD ve SGD değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Ankara ili yıllık ve normalize IGD ve SGD değerleri (Annual and normalized IGD and SGD values for Ankara province)

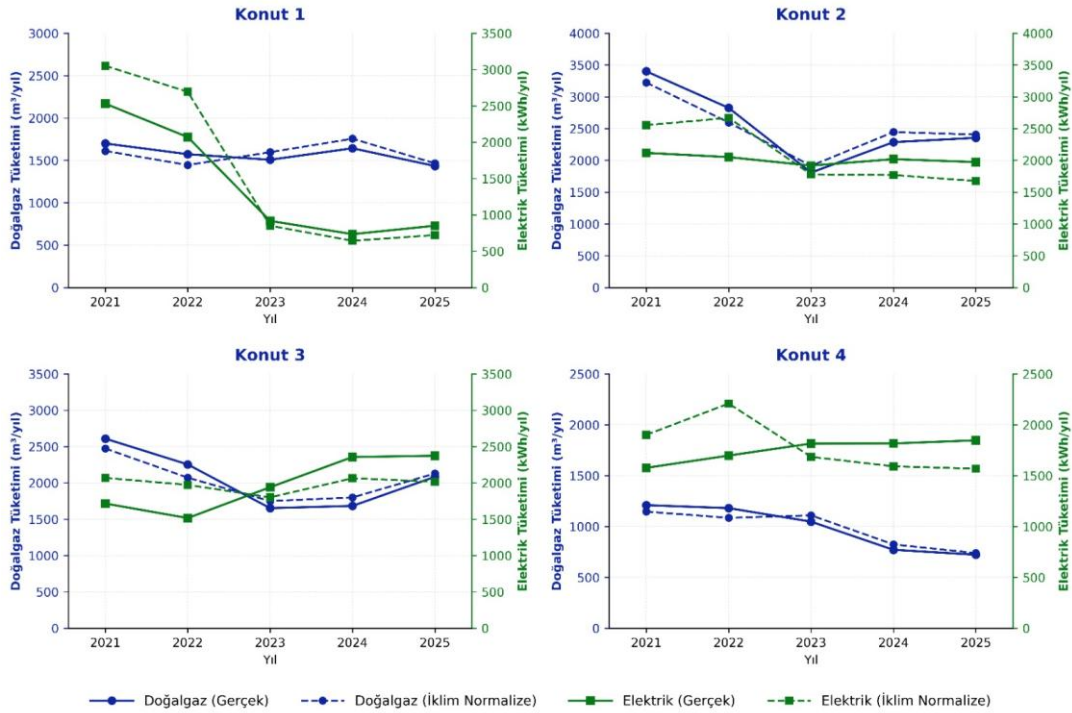
Yıl	IGD	SGD	Normalize IGD	Normalize SGD
2021	2262	247	0,948	1,206
2022	2335	229	0,919	1,301
2023	2025	321	1,059	0,928
2024	2007	340	1,069	0,876
2025	2098	351	1,022	0,849
Ortalama	2145	298		

Tablo 6 incelendiğinde yıllar arasında belirgin meteorolojik farklılıkların bulunduğu anlaşılmıştır. En yüksek IGD değerinin 2022 yılında 2335 olduğu bu durum ilgili yılda ısınma ihtiyacının diğer yıllara kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. En düşük IGD değerinin ise 2024 yılında 2007 olduğundan en ılıman kış koşullarının yaşandığı yıl olarak öne çıkmaktadır. SGD değerlerine bakıldığında ise en yüksek değerin 351 ile 2025 yılında olduğu, bu durum yaz aylarında yüksek sıcaklıkların yaşandığını ve soğutma gereksiniminin arttığını ortaya koymaktadır. En düşük SGD değeri 229 ile 2022 yılına ait olup soğutma ihtiyacının en düşük olduğu yıl olarak belirlenmiştir. Analizlerde doğalgaz tüketimlerinin normalizasyonunda IGD katsayıları, elektrik tüketimlerinin normalizasyonunda ise SGD katsayıları kullanılmıştır. Böylece farklı yıllardaki meteorolojik koşulların ortak bir iklim referansına göre karşılaştırılması amaçlanmıştır. Su tüketimlerine ise iklim normalizasyonu uygulanmamasının nedeni su tüketiminin direkt olarak ısıtma/soğutma ihtiyaçlarına bağlı olmaması ve yıllık değişimlerin ağırlıklı olarak kullanıcı davranışları, hane halkı büyüklüğü ve günlük kullanım alışkanlıklarına bağlı olarak değişmesidir. Ayrıca mevsimsel dağılımlara göre su

tüketimlerinin elektrik ve doğalgaza göre daha stabil dağılım sergilediği görülmektedir. Bu nedenle iklim normalizasyonu sadece meteorolojik koşullardan direkt etkilenen elektrik ve doğalgaz tüketimleri için uygulanmıştır. İklim normalizasyonu tüketim değerlerinin yıllara göre değişimi Şekil 6'da sunulmuştur.

Şekil 6'ya göre doğalgaz tüketimleri üzerinde iklim normalizasyonunun belirgin etkileri olduğu görülmektedir. 2021 ve 2022 yıllarında IGD değerlerinin yüksek olması nedeniyle normalize edilmiş doğalgaz tüketimleri gerçek tüketim değerlerinin altında kalmıştır. 2023, 2024 ve 2025 yıllarında düşük IGD değerleri gözlenmiş olup, normalize tüketimlerin gerçek tüketimlerden daha fazla olduğu belirginleşmiştir. Bu durum, ilgili yılların daha ılıman kış koşullarını yaşamasından kaynaklı olarak gerçek tüketimlerin normalize tüketimlere kıyasla düşük gerçekleştiğini göstermektedir. Elektrik tüketimlerindeki değişimler doğalgaz tüketimlerine göre daha sınırlıdır. Bununla birlikte 2024 ve 2025 yıllarında SGD değerlerinin yüksek olması normalize elektrik tüketimlerinde artış eğilimi kaydedilmiştir. Bu eğilim, yaz mevsiminde soğutma gereksinimlerinin

artmasıyla birlikte elektrik tüketimlerinin artmasında etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Konutlara ait gerçek ve iklim normalize edilmiş doğalgaz ve elektrik tüketimlerinin yıllara göre değişimi (Changes in actual and climate-normalized natural gas and electricity consumption of residential buildings over the years)

Elde edilen sonuçlar, konutlardaki tüketim miktarlarının meteorolojik koşullardan kaynaklı olarak değişkenlik gösterdiğini doğrulamaktadır. Doğalgaz tüketiminin yüksek olduğu Konut 2 ve Konut 3'te normalizasyon etkisi daha belirgin halde olduğu, tüketim seviyelerinin daha düşük olduğu Konut 4'te değişimlerin sınırlı kaldığı görülmektedir. Genel olarak, konutların doğalgaz ve elektrik tüketimlerinde meteorolojik koşulların dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca yıllar arasındaki karşılaştırmaların yapılmasında iklim etkilerinden arındırılmış verilerin kullanılması daha sağlıklı yorumlar yapılabileceğini göstermektedir.

Yıllar arasındaki iklimsel dalgalanmaların enerji tüketim eğilimleri üzerindeki yanıltıcı etkisini arındırmak amacıyla uygulanan IGD ve SGD tabanlı normalizasyon hesaplamaları gerçek veriler ile iklim düzeltmeli veriler arasında belirgin nicel farklar oluşturmaktadır. Kış mevsiminin daha ılıman geçtiği 2021 ve 2022 yıllarında ($IGD_{norm} < 1$), gerçek doğalgaz tüketimleri iklim etkisinden arındırıldığında sırasıyla %5,2 ve %8,1 oranında daha düşük normalize tüketim değerleri elde edilmiştir. Buna karşın iklim koşullarının daha sert seyrettiği 2023, 2024 ve 2025 yıllarında ($IGD_{norm} > 1$) normalize doğalgaz tüketimleri ham

verilere göre sırasıyla %5,9, %6,9 ve %2,2 oranında artış göstermiştir.

Yaz mevsiminde soğutma yükünü temsil eden SGD normalizasyonu elektrik tüketiminde daha yüksek sapmalar ortaya koymuştur. Soğutma ihtiyacının belirgin şekilde yüksek seyrettiği 2021 ve 2022 yıllarında ($SGD_{norm} > 1$), normalize elektrik tüketimleri ham verilere kıyasla sırasıyla %20,6 ve %30,1 oranında yükselmiştir. Soğutma gün derecesi göstergesinin referansın altında kaldığı 2023, 2024 ve 2025 yıllarında ise normalize değerlerde sırasıyla %7,2, %12,4 ve %15,1 oranlarında azalma olduğu hesaplanmıştır.

Elde edilen nicel değişimler iklimsel normalizasyonun uygulanmadığı durumda, özellikle iklim krizine bağlı aşırı sıcak veya soğuk yıllarda konutların gerçek enerji verimliliği performansının ve buna bağlı karbon emisyonlarının %30,1'e kadar oranlarda hatalı hesaplanabileceğini açıkça göstermektedir. Bu durum konutlarda uzun dönemli emisyon izleme çalışmalarında iklimsel gürültünün arındırılmasının yöntemsel bir zorunluluk olduğunu doğrulamaktadır. İklim normalizasyonu sonuçlarının değerlendirilmesinin ardından, konutların çevresel etkilerini belirlemek amacıyla

elektrik, doğalgaz ve su tüketimlerinden DEFRA metodolojilerine göre hesaplanmıştır. Elde kaynaklanan karbon ayak izi değerleri IPCC ve edilen sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. IPCC ve DEFRA metodolojilerine göre toplam karbon ayak izi sonuçları (Total carbon footprint results according to IPCC and DEFRA methodologies)

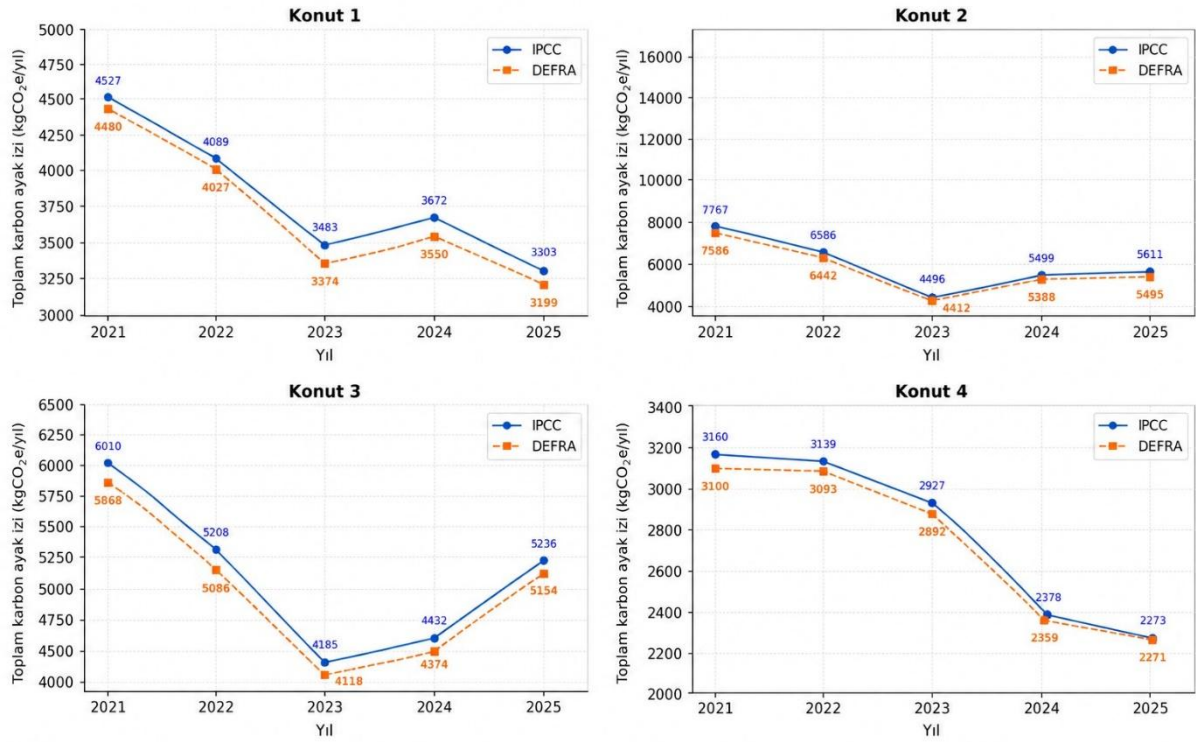
Metodoloji		DEFRA Tüketim Türü CO ₂ e				IPCC Tüketim Türü CO ₂ e			
Konut	Yıl	Su	Doğalgaz	Elektrik	Toplam	Su	Doğalgaz	Elektrik	Toplam
Konut 1	2025	28,8	2779,09	391,46	3199,35	66,048	2880,02	357,42	3303,48
Konut 2	2025	22,95	4563,99	908,04	5494,98	52,632	4729,73	829,08	5611,45
Konut 3	2025	23,1	4038,79	1092,5	5154,39	52,976	4185,46	997,5	5235,94
Konut 4	2025	19,35	1401,17	850,08	2270,60	44,376	1452,06	776,16	2272,59
Konut 1	2024	27,75	3184,13	338,1	3549,98	63,64	3299,77	308,7	3672,11
Konut 2	2024	24,3	4434,14	929,2	5387,64	55,728	4595,17	848,4	5499,30
Konut 3	2024	25,95	3263,59	1084,22	4373,76	59,512	3382,11	989,94	4431,56
Konut 4	2024	28,95	1494,20	835,82	2358,97	66,392	1548,46	763,14	2377,99
Konut 1	2023	30	2922,50	421,82	3374,32	68,8	3028,64	385,14	3482,58
Konut 2	2023	25,65	3503,90	882,28	4411,83	58,824	3631,15	805,56	4495,54
Konut 3	2023	21,6	3203,51	892,86	4117,97	49,536	3319,85	815,22	4184,61
Konut 4	2023	25,95	2031,02	835,36	2892,33	59,512	2104,78	762,72	2927,01
Konut 1	2022	25,95	3048,47	952,66	4027,08	59,512	3159,18	869,82	4088,51
Konut 2	2022	21,3	5476,788	943,92	6442,008	48,848	5675,68	861,84	6586,37
Konut 3	2022	18,15	4370,19	697,82	5086,16	41,624	4528,90	637,14	5207,66
Konut 4	2022	23,4	2288,78	781,08	3093,26	53,664	2371,90	713,16	3138,72
Konut 1	2021	21,6	3294,6	1164,26	4480,46	49,536	3414,25	1063,02	4526,80
Konut 2	2021	20,25	6591,14	974,28	7585,67	46,44	6830,50	889,56	7766,50
Konut 3	2021	20,55	5058,18	789,36	5868,09	47,128	5241,87	720,72	6009,72
Konut 4	2021	29,55	2344,98	725,42	3099,95	67,768	2430,14	662,34	3160,25

Tablo 7 incelendiğinde tüm konutlar için karbon ayak izinin baskın bileşeni doğalgaz tüketimi olup ikinci sırada elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonlar yer almaktadır. Karbon ayak izi hesaplamalarında en düşük pay konut su tüketimlerine ait olduğu belirlenmiştir. Bu durum, konut tüketim verilerinin neden olduğu karbon emisyonlarının ağırlıklı olarak ısınma enerjisi amacıyla kullanılan doğalgaz tüketiminden kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır.

Çalışma dönemleri arasında karbon ayak izinin en yüksek değeri her iki metodoloji için de 2021 yılında Konut 2 için hesaplanmıştır. Toplam karbon ayak izi IPCC metodolojisine göre 7.766,50 kgCO₂e ve DEFRA metodolojilerine göre ise 7.585,67 kgCO₂e olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık

incelenen tüm yıllar boyunca en düşük karbon ayak izi değerleri Konut 4'te elde edilmiştir.

IPCC ve DEFRA metodolojilerinin sonuçları karşılaştırıldığında, iki metodoloji arasında farklılıklar olmasına rağmen benzer eğilimler sergilediği görülmektedir. Her iki metodolojiye göre konutlar arasındaki en yüksek ve en düşük emisyon seviyelerine sahip konutlar tutarlı biçimde belirlenmiştir. Bununla birlikte IPCC metodolojisinin daha yüksek elektrik ve doğalgaz emisyon faktörleri değerlerine sahip olması nedeniyle toplam karbon ayak izi değerleri DEFRA metodolojisi sonuçlarından daha yüksek gerçekleşmiştir. IPCC ve DEFRA metodolojileri kullanılarak hesaplanan toplam karbon ayak izi değerlerinin yıllara göre değişimi Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Konutlara ait IPCC ve DEFRA metodolojilerine göre toplam karbon ayak izi değişimleri (Changes in total carbon footprint of residential buildings according to IPCC and DEFRA methodologies)

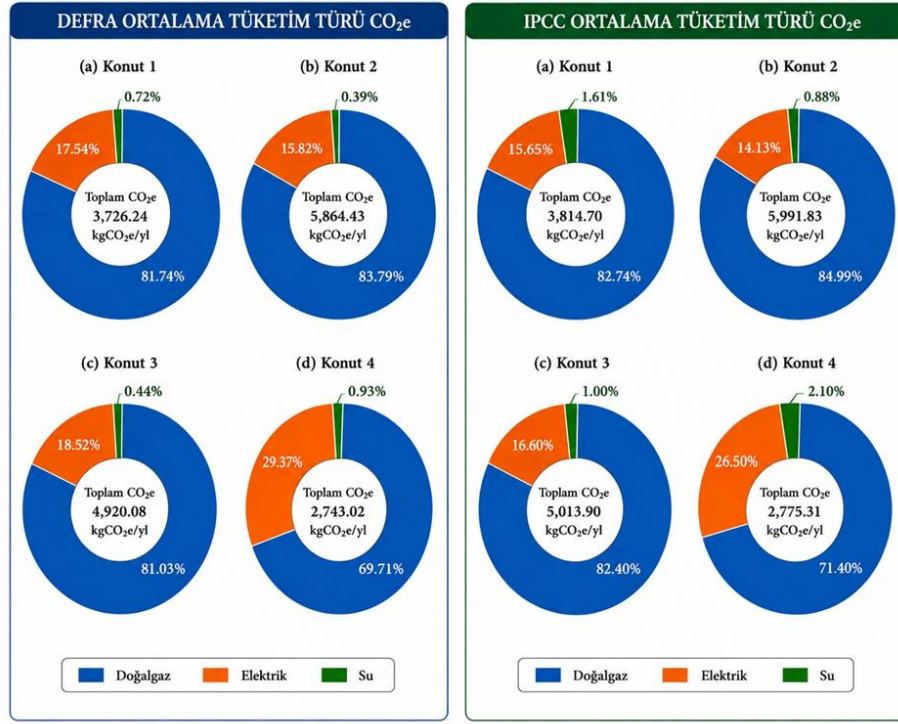
Sonuçlara göre her iki metodoloji için de benzer eğilimler görülmektedir. Yıllara bağlı karbon ayak izi değişimleri tüm konutlar için ağırlıklı olarak doğalgaz tüketiminden kaynaklanmaktadır. Özellikle doğalgaz kullanımının yüksek olduğu kış mevsiminin sert gerçekleştiği yıllarda toplam karbon ayak izi değerlerinde artışlar meydana gelmiştir.

IPCC ve DEFRA metodolojileri arasında mutlak değerler bakımından farklılıklar bulunmasına rağmen konutların performans sıralamaları değişmemektedir. Her iki metodolojiye göre de en yüksek karbon ayak izi değerleri Konut 2'de, en düşük ise Konut 4'te elde edilmiştir. Özellikle 2021 yılında hesaplanan karbon ayak izi değerleri çalışma dönemi içerisindeki Konut 2 için en yüksek emisyon seviyelerini temsil etmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, IPCC metodolojisi DEFRA metodolojisine göre daha yüksek toplam karbon ayak izi değerleri üretmiştir. Bunun nedeni elektrik ve doğalgaz tüketimlerinde kullanılan emisyon faktörleri arasındaki farklılıklardır.

Karbon ayak izi sonuçlarının değerlendirilmesinde toplam emisyon miktarlarının yanı sıra tüketim türünün sağladığı katkı miktarının belirlenmesi, emisyon azaltım stratejilerinin oluşturulması açısından oldukça önemlidir. Konutların elektrik,

doğalgaz ve su tüketimlerinden kaynaklanan emisyonların toplam karbon ayak izi içerisindeki payları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Şekilde her bir konutun ortalama karbon ayak izi bileşenlerinin dağılımı verilmekte olup, farklı tüketim türlerinin toplam emisyonlara etkisi karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Şekil 8 incelendiğinde tüm konutlarda karbon ayak izinin baskın bileşenini doğalgaz tüketimleri oluşturmaktadır. Konutlardaki toplam karbon ayak izi içerisinde doğalgaz kaynaklı emisyonların payı %69,71-84,99 arasında değişmektedir. Bu durum, konutlardaki toplam karbon emisyonları çoğunlukla ısıtma amaçlı enerji kullanımından kaynaklanmaktadır. Elektrik tüketimlerinden kaynaklanan emisyonlar toplam karbon ayak izinin yaklaşık %14,13-29,37'lik kısmını oluşturduğu belirlenmiştir. Elektrik kaynaklı emisyonlar konutlar arasında farklılık göstermekte ve genel olarak toplam emisyonlar içerisinde doğalgaz tüketiminden sonra ikinci sırada yer almaktadır. Konut 4 özelinde doğalgaz tüketiminin diğer konutlara kıyasla düşük olması elektrik kaynaklı emisyonların toplam karbon ayak izi içerisindeki payının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Tüm konutlarda su tüketimlerinden kaynaklanan emisyonlar ise oldukça düşük seviyelerde ve %0,39-2,10 aralığında sınırlı kaldığı belirlenmiştir.



Şekil 8. Konutlara ait ortalama karbon ayak izi bileşenlerinin dağılımı (%) (Distribution of average carbon footprint components of residential buildings (%))

Genel bir değerlendirme yapıldığında, çalışma kapsamında Ankara ili sınırları içerisinde incelenen dört konuta ait elektrik, doğalgaz ve su tüketimlerinin yıllara ve mevsimlere bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Doğalgaz tüketimlerinin meteorolojik koşullardan etkilendiği, elektrik tüketimlerinin ise iklim koşullarına ve kullanıcı davranışlarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Mevsimsel tüketim dağılımlarına göre kış aylarında doğalgaz tüketimlerinin aşırı arttığı, yaz aylarında ise elektrik ve su tüketimlerinde artma meydana geldiği tespit edilmiştir.

İklim normalizasyonu sonuçlarına göre yıllar arasındaki meteorolojik farklılıkların konutlardaki enerji tüketimlerini etkilediği ve özellikle doğalgaz tüketimlerinin incelenmesinde iklim göstergelerinin önemli olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte tüm konutlarda toplam karbon ayak izi emisyonlarının ağırlıklı olarak doğalgaz tüketimlerinden kaynaklandığı ortaya konulmuştur. Elektrik tüketimleri toplam karbon ayak izinin ikinci büyük bileşenini, su tüketimleri ise üçüncü bileşenini oluşturmaktadır.

IPCC ve DEFRA metodolojilerinin sonuçlarına göre kullanılan emisyon faktörlerindeki farklılıklara bağlı olarak toplam karbon ayak izi değerlerinde belirli değişimler meydana gelmekte olup her iki metodoloji de benzer eğilimler göstermektedir. Her iki metodolojiye göre en yüksek karbon ayak izi

değerleri doğalgaz tüketimine sahip konutlardan, düşük enerji tüketimine sahip konutlarda ise düşük emisyon seviyeleri hesaplanmıştır.

Elde edilen bulguların literatürdeki mevcut araştırmalarla karşılaştırılması, sonuçların geçerliliğini test etmek ve çalışmanın özgün değerini ortaya koymak açısından kritik bir önem taşımaktadır. Literatürde yer alan mevcut araştırmalar incelendiğinde, konut kaynaklı emisyonların temel olarak enerji tüketim dinamiklerine dayandığı [30], emisyon hesaplama sonuçlarının ise seçilen metodolojiye doğrudan bağlı olduğu anlaşılmıştır [31,32]. Örnek olarak yapılan çalışmada Türkiye ölçeğinde hane başına yıllık ortalama ~4.8 ton CO₂ emisyonu hesaplanırken [33], enerji verimliliği [34], ısıtma odaklı tüketim baskısı [37] ve binaların küresel sektördeki emisyon payı [38] gibi kritik parametreler farklı boyutlarıyla incelenmiştir.

Bu çalışmaların önemli bir kısmı tek bir hesaplama metodolojisine odaklanmış ya da iklimsel değişkenlerin etkisini doğrudan dahil etmemiştir. Mevcut araştırmalardan farklı olarak bu çalışmada, aynı veri seti ve sistem sınırları dahilinde DEFRA ve IPCC metodolojileri eş zamanlı ve karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır. İklimsel normalizasyonun olmaması durumunda oluşacak metodolojik sınırlılıklara dikkat çekilmiştir. Ayrıca

ısıtma baskısı emisyon yoğunluğu üzerinden doğrudan nicelleştirilmiştir.

Karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan IPCC ve DEFRA yaklaşımları genel eğilimler açısından birbirleriyle uyumlu sonuçlar göstermesine rağmen, mutlak emisyon değerlerinde gözlenen farklılıklar temel olarak emisyon faktörlerinin türetilme metodolojisinden ve yerel koşulları temsil kabiliyetinden kaynaklanmaktadır. IPCC metodolojisi küresel ve bölgesel varsayımlara dayanan daha genel kategorik faktörler sunmaktadır. Bununla birlikte DEFRA metodolojisi iletim/dağıtım kayıpları ve yaşam döngüsü emisyonlarını da içeren geniş bir analiz çerçevesi sağlamaktadır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, 2021-2025 yılları arasında Ankara ilinde farklı karakteristiklere sahip dört konutun detaylı tüketim verilerine dayanmaktadır. Örneklem sayısının dört konutla sınırlı olması, elde edilen mutlak emisyon değerlerinin tüm kent ölçeğine doğrudan genellenmesi bakımından bir sınırlılık oluşturmaktadır. Çalışma detaylı veri seti ve iklimsel normalizasyon (IGD/SGD) yaklaşımı ile konut bazlı enerji tüketim davranışlarını ve karbon ayak izi dinamiklerini detaylı bir şekilde ortaya koyan örnek olay çalışması niteliğindedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Ankara ili sınırları içerisinde farklı bölgelerde bulunan dört farklı konutun 2021-2025 yılları arasındaki elektrik, doğalgaz ve su tüketim verileri kullanılarak karbon ayak izi performansları değerlendirilmiştir. Ayrıca meteorolojik veriler, mevsimsel tüketim eğilimleri ve metodolojik farklılıklardan kaynaklanan farklı emisyon faktörü sonuçlarının üzerindeki etkileri incelenmiştir.

- Analiz sonuçları, konutların yıllık tüketim miktarlarında belirgin farklılıklar olduğunu göstermektedir. İnceleme döneminde en yüksek doğalgaz tüketimi 2021 yılında Konut 2'de 3.401 m³/yıl, en düşük tüketim ise 2025 yılında Konut 4'te 723 m³/yıl olarak kaydedilmiştir. Elektrik profili incelendiğinde en yüksek tüketim 2021 yılında Konut 1'de 2.531 kWh/yıl, en düşük tüketim ise 2024 yılında yine Konut 1'de 735 kWh/yıl olduğu belirlenmiştir. Su tüketimlerinin yıllık 121-200 m³ aralığında değişim gösterdiği saptanmıştır.
- Mevsimsel tüketim profilleri değerlendirildiğinde, doğalgaz kullanımının kış mevsiminde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. İncelenen konutlarda kış dönemine ait doğalgaz

payının %45,19 ile %51,44 arasında değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum karbonsuzlaşma stratejilerinin öncelikli olarak ısıtma yükünün azaltılmasına örneğin yalıtım malzemesi ve kalınlık optimizasyonu ile pencerelerde yüksek performanslı kaplamalı cam sistemlerinin tercihi gibi uygulamalara odaklanması gerektiğini göstermektedir.

- Elektrik tüketimlerinin kış aylarındaki payının %28,90-33,54 aralığında daha dengeli bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Su tüketimlerinde ise en fazla tüketimin yaz döneminde gerçekleştiği ve %25,22-28,48 arasında değiştiği görülmektedir.
- Çalışma dönemine ait meteorolojik değerlendirmeler sonucunda, yıllık IGD değerlerinin 2.007-2.335, SGD değerlerinin ise 229-354 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. En yüksek IGD değerinin 2022 yılında, en yüksek SGD değeri ise 2025 yılında kaydedilmiştir. İklim normalizasyonu sonuçları, kış aylarındaki doğalgaz tüketiminin meteorolojik koşullardan etkilendiğini doğrulamaktadır.
- Tüm konutlarda yapılan karbon ayak izi hesaplamaları sonucunda emisyonların baskın kaynağının doğalgaz tüketimleri olduğu belirlenmiştir. Karbon ayak izi bileşenlerinin ortalaması incelendiğinde doğalgaz kaynaklı emisyonlar toplam karbon ayak izinin %69,71-84,99, elektrik kaynaklı emisyonlar %14,13-29,37 ve su tüketimlerinden kaynaklanan emisyonların ise %0,39-2,10 seviyelerinde kaldığı görülmüştür.
- IPCC metodolojisine göre en yüksek toplam karbon ayak izi değeri 2021 yılında Konut 2 için 7.766,50 kgCO₂e, en düşük değer ise 2025 yılında Konut 4 için 2.272,59 kgCO₂e olarak belirlenmiştir. DEFRA metodolojisinde ise en yüksek değer 2021 yılında Konut 2 için 7.585,67 kgCO₂e, en düşük değer ise 2025 yılında Konut 4 için 2.270,60 kgCO₂e olarak elde edilmiştir. Her iki yaklaşım benzer eğilimler göstermiş ve konutların göreceli performans sıralamalarını değiştirmemiştir.
- IGD tabanlı iklim normalizasyonu sonucunda, ılıman geçen 2021 ve 2022 kış aylarında normalize doğalgaz tüketimleri gerçek verilere kıyasla sırasıyla %5,2 ve %8,1 oranında düşük çıkarken, iklimin sert seyrettiği 2023-2025 döneminde ise sırasıyla %5,9, %6,9 ve %2,2 oranında artış göstermiştir.
- SGD iklim normalizasyonu sonucunda normalize elektrik tüketimleri, soğutma ihtiyacının yüksek olduğu 2021 ve 2022 yıllarında ham verilere göre sırasıyla %20,6 ve %30,1 artmıştır. 2023, 2024 ve 2025 yıllarında

ise sırasıyla %7,2, %12,4 ve %15,1 arasında azalış göstermiştir.

- Elde edilen bulgular, konut kaynaklı karbon emisyonlarının ağırlıklı olarak ısınma amaçlı enerji kullanımından kaynaklandığını göstermektedir. Bu sebeple karbon azaltım stratejilerinde önceliğin doğalgaz tüketimlerinin azaltılmasına, bina yalıtım performansının artırılmasına, yüksek verimli ısıtma sistemlerinin kullanılmasına ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılmasına odaklanılması gerekmektedir.
- Çalışmanın temel sınırlılığı analizlerin aynı şehir sınırlarında dört farklı konut ile sınırlandırılmış olmasıdır. Gelecek çalışmalarda farklı iklim bölgelerinden daha fazla sayıda konutun değerlendirilmesi, yenilenebilir enerji sistemlerinin karbon ayak izi üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar kullanılarak konut karbon ayak izi tahmin modellerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma herhangi bir kurum, kuruluş veya fon tarafından destek almamıştır. / This study was not supported by any institution, organization, or fund.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Furkan Buğra ÖZTAŞKIN: Verileri toplama, sonuçlarını analiz etme, görselleştirme ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He collected the data, analyzed the results, visualized them, and wrote the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gök Kısa A.C. Evaluation of renewable energy sources in TR83 region by CRITIC based grey relational analysis approach. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences. 2021; 27: 542–548. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.99389>.
- [2] Kılıç Ş., Doğdu Yüçetürk G., Pekdemir T. Bilim–Politika Uçurumunu Aşmak: Küresel ve Ulusal İklim Politikalarının Bilimsel Bulgular ve Siyasi Eylemler Bağlamında Eleştirel İncelemesi. Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik İTÜ Dergisi-e (2026).
- [3] Wiedmann T., Minx J. A Definition of “Carbon Footprint” ISA UK Research Report 07-01, 2007. www.censa.org.uk.
- [4] Wackernagel M., Rees W.E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. New Society Publishers. 9 (1998).
- [5] Wilby R.L. A Review of Climate Change Impacts on the Built Environment. Built Environment. 2007; 33: 31–45. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.31>.
- [6] Yatarkalkmaz M.M., Özdemir M.B. The Calculation of Greenhouse Gas Emissions of a Family and Projections for Emission Reduction. Journal of Energy Systems. 2019; 3: 96–110. <https://doi.org/10.30521/jes.566516>.
- [7] Gençtürk F., Biroğul S. Carbon Footprint Through the Lens of Information and Communication Technology. Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi. 2025; 9: 118–132. <https://doi.org/10.62301/usmt.1712846>.
- [8] Dulkadiroğlu H. Türkiye’de Elektrik Üretiminin Sera Gazı Emisyonları Açısından İncelenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2018; 7: 67–74. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.369948>.
- [9] Türkeş M. İklim Değişikliğinde Son Gelişmeler: IPCC 2013 Raporu Aralık 2013. İstanbul Politikalar Merkezi. 2013.
- [10] Binboğa G., Ünal A. Sürdürülebilirlik Ekseninde Manisa Celal Bayar Üniversitesi’nin Karbon Ayak İzinin

- Hesaplanmasına Yönelik Bir Araştırma. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi. 2018; 187–202. <https://doi.org/10.18092/ulikidince.323532>.
- [11] IEA. World Energy Outlook 2025, International Energy Agency (2025). <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>. (erişildi 01.07.2026)
- [12] Kılıç E., Puig R., Zengin G., Zengin C.A., Fullana-i-Palmer P. Corporate Carbon Footprint for Country Climate Change Mitigation: A Case Study of a Tannery in Turkey. Science of The Total Environment. 2018; 635: 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.111>.
- [13] 2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond Foundations Mainstreaming Sustainable Solutions to Cut Emissions from the Buildings Sector. United Nations Environment Programme. 2024. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>.
- [14] de Wilde P., Coley D. The Implications of a Changing Climate for Buildings. Building and Environment. 2012; 55: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.014>.
- [15] Dino I.G., Meral Akgül C. Impact of Climate Change on the Existing Residential Building Stock in Turkey: An Analysis on Energy Use, Greenhouse Gas Emissions and Occupant Comfort, Renewable Energy. 2019; 141: 828–846. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.150>
- [16] OECD. OECD Regions and Cities at a Glance 2024. OECD Publishing. 2024. <https://doi.org/10.1787/f42db3bf-en>.
- [17] IEA. CO₂ Emissions in 2022. International Energy Agency (2022). <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>. (erişildi 01.07.2026)
- [18] Altun M., Meral Akgül Ç., Akçamete A. Kabuk Yalıtımının Bina Isıtma Enerjisi İhtiyacına, Maliyetine ve Karbon Ayak İzine Etkisinin Yaşam Döngüsü Bakış Açısıyla Değerlendirmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2019; 35: 147–164. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.445751>.
- [19] Meral Akgül C., Gürsel Dino İ. RCP4.5 ve RCP8.5 İklim Senaryolarına Göre Konutlarda İklim Değişikliği Etki Değerlendirmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2020; 35: 1665–1684. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.534970>.
- [20] Karanasios K. Sustainable Facilities Management: A Sociotechnical System Perspective and a Review of the Literature. Journal of Facilities Management. 2026; 24: 21–61. <https://doi.org/10.1108/JFM-04-2024-0046>.
- [21] Ibrahim N.I., Vering C., Giannetti N., Kim M., Sholahudin, Storek T., Müller D., Saito K. State-of-the-Art of the Digital Twin Concept in HVAC+R Systems for Thermal Management of Buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2026; 229: 116601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116601>.
- [22] Can A., Atımtay A.T., Tokdemir T. CO₂ Emission Inventory in Türkiye and Estimation of CO₂ Concentration over Türkiye by Using Dispersion Modelling. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. 2025; 13: 308–329. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1590432>.
- [23] Ergüç R., Sarı Y., Argun M.E. Konya/Selçuklu İlçesi Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. Selçuk University Journal of Engineering, Science and Technology. 2019; 7: 287–297. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2019.199>.
- [24] Atabey T. Karbon Ayak İzinin Hesaplanması: Diyarbakır Örneği. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2013.
- [25] Emissions Trends and Drivers, in: Climate Change 2022- Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press. 2023; 215–294. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.004>.
- [26] Teng J., Yin H. Forecasting the Carbon Footprint of Civil Buildings Under Different Floor Area Growth Trends and Varying Energy Supply Methods. Scientific Reports. 2023; 13: 21978.

- <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49270-3>.
- [27] Bramwell R., Brown P., Galatioto F., Ingledew D., Karagianni E., Maccarthy J., Mullen P., Walker C., Willis D., Wong J., Energy R., Harris B. 2023 Government Greenhouse Gas Conversion Factors for Company Reporting Methodology Paper for Conversion Factors Final Report. 2, 2023. www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/.
- [28] Atmaca A., Atmaca N. Carbon Footprint Assessment of Residential Buildings. A Review and A Case Study in Turkey. Journal of Cleaner Production. 2022; 340: 130691. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130691>.
- [29] Kurnuç Seyhan A., Çerçi M. IPCC Tier 1 ve DEFRA Metotları ile Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi: Erzincan Binalı Yıldırım Üniversitesi'nin Yakıt ve Elektrik Tüketimi Örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2022; 26: 386–397. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1061021>.
- [30] Baiocchi G., Minx J.C. Understanding Changes in the UK's CO₂ Emissions: A Global Perspective. Environmental Science & Technology. 2010; 44: 1177–1184. <https://doi.org/10.1021/es902662h>.
- [31] Jones C., Kammen D.M. Spatial Distribution of U.S. Household Carbon Footprints Reveals Suburbanization Undermines Greenhouse Gas Benefits of Urban Population Density. Environmental Science & Technology. 2014; 48: 895–902. <https://doi.org/10.1021/es4034364>.
- [32] Hünerli E., Karaca Dolgun G., Ural T., Güllüce H., Karabacak D. Calculation of Muğla Sıtkı Koçman University's Carbon Footprint with IPCC Tier 1 Approach and DEFRA Method. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi. 2024; 10: 1–28. <https://doi.org/10.34186/klujes.1386656>.
- [33] Kaya M. Energy Consumption Patterns and Residential Carbon Footprint in Turkey. Journal of Environment. 2025; 5: 47–58. <https://doi.org/10.47941/je.2520>.
- [34] Yıldız C. Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. 2024; 12: 176–213. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1293759>.
- [35] Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Institute for Global Environmental Strategies. Institute for Global Environmental Strategies. 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (erişildi 01.07.2026)
- [36] Jang Y., Park J., Kim Y., Yu K.-H. Energy Savings, Carbon-Equivalent Abatement Cost, and Payback of Residential Window Retrofits: Evidence from a Heating-Dominated Mid-Latitude City-Gyeonggi Province. South Korea, Buildings. 2025; 16: 71. 1-36. <https://doi.org/10.3390/buildings16010071>.
- [37] Santamouris M. Cooling the Buildings - Past, Present And Future. Energy and Buildings. 2016; 128: 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>.
- [38] Ürge-Vorsatz D., Khosla R., Bernhardt R., Chan Y.C., Vérez D., Hu S., Cabeza L.F. Advances Toward a Net-Zero Global Building Sector. Annual Review of Environment and Resources. 2020; 45: 227–269. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012420-045843>.