

Carbon footprint analysis and climate normalization based on energy sources at the residential scale

Ferhat Akkuş 

ARTICLE INFO

Dates:

Received: 26.02.2026

Accepted: 27.04.2026

Doi:

10.65206/pajes.1898259

Corresponding author:

Ferhat Akkuş
(ferhat.akkus@batman.edu.tr)

Author addresses:

Department of Mechanical
Engineering, Faculty of
Engineering and Architecture,
Batman University, Batman,
72100, Türkiye
(ferhat.akkus@batman.edu.tr)

ABSTRACT

Context—The residential sector accounts for a significant share of global energy consumption and greenhouse gas emissions. Although energy consumption based on electricity, water, and natural gas used in residential buildings is among the key determinants of carbon footprint formation, many carbon footprint studies conducted at the residential scale focus on total annual emissions. This situation highlights the need for climate-normalized, comparable carbon footprint indicators.

Objective—This study aims to conduct a carbon footprint analysis by energy source at the residential scale and to evaluate inter-annual emission changes more accurately using a climate-normalization approach.

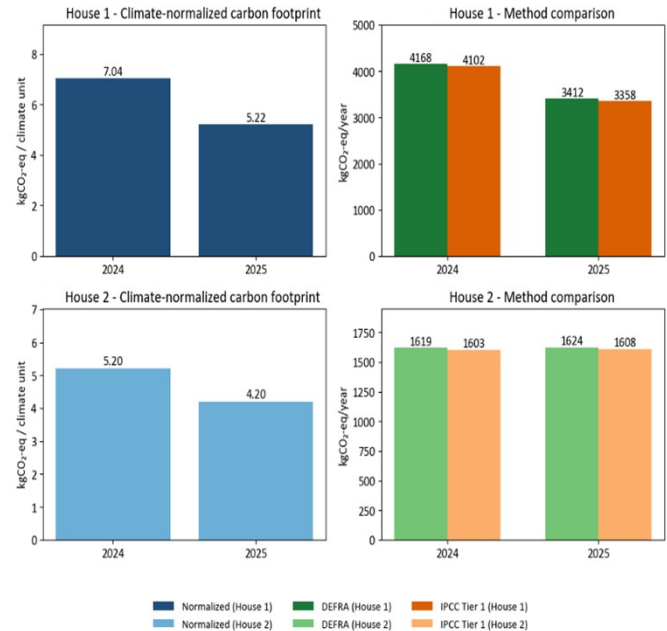
Method—Carbon footprints were calculated using the IPCC Tier 1 and DEFRA methods, based on electricity, water, and natural gas consumption data for two residential properties for the years 2024–2025. Climate normalization was applied by dividing electricity consumption by SGD values and natural gas consumption by IGD values. The carbon footprint results for Residential Building 1 and Residential Building 2 for the years 2024 and 2025 are presented alongside climate-normalized indicators and total values calculated using different methodologies (DEFRA–IPCC Tier 1). The graphs on the left show carbon footprint trends obtained by normalizing

electricity consumption based on cooling degree-days (CDD) and natural gas consumption based on heating degree-days (HDD). The decrease in the climate-normalized carbon footprint values for both homes in 2025 indicates a reduction in energy consumption per unit of climate load and an improvement in energy efficiency. The graphs on the right, meanwhile, show a comparison of the DEFRA and IPCC Tier 1 methodologies used in total carbon footprint calculations. In both homes, the values obtained using the DEFRA approach are systematically higher than the IPCC Tier 1 results. Overall, the graphical summary demonstrates that climate normalization plays a critical role in revealing actual performance when assessing the carbon footprint at the residential scale, and that the choice of methodology has a limited yet systematic effect on the results.

Results—It has been determined that the total carbon footprint calculated for 2025 has decreased and that this reduction is maintained even after climate normalization. The decrease is primarily attributed to a decline in natural gas consumption. Although different methodologies yield different absolute values, the trends remain consistent.

Conclusion—This study demonstrates that climate normalization is a critical complementary tool for assessing the carbon footprint at the residential level. This approach enables a more accurate interpretation of emissions and highlights the need for reduction strategies to focus specifically on energy consumption from heating.

Key Words—Carbon footprint, Residential scale, Energy sources, Climate normalization, Heating and cooling degree days, Energy consumption.



Konut ölçeğinde enerji kaynaklarına göre karbon ayak izi analizi ve iklim normalizasyonu

Ferhat Akkuş 

MAKALE BİLGİLERİ

Tarihler:

Geliş: 26.02.2026

Kabul: 27.04.2026

Doi:

10.65206/pajes.1898259

Sorumlu yazar:

Ferhat Akkuş

(ferhat.akkus@batman.edu.tr)

Yazar adresleri:

Makine Mühendisliği Bölümü,
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Batman Üniversitesi, Batman,
72100, Türkiye
(ferhat.akkus@batman.edu.tr)

ÖZ

Arka Plan—Konut sektörü, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları açısından küresel ölçekte önemli bir paya sahiptir. Özellikle konutlarda kullanılan elektrik, su ve doğalgaza dayalı enerji tüketimi, karbon ayak izi oluşumunun temel belirleyicileri arasında bulunmasına rağmen konut ölçeğinde gerçekleştirilen birçok karbon ayak izi çalışmasında, yıllık toplam emisyon değerlerine odaklanılmaktadır. Bu durum, iklim etkisinden arındırılmış, karşılaştırılabilir karbon ayak izi göstergelerine olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Amaç—Bu çalışma, konut ölçeğinde enerji kaynaklarına göre karbon ayak izi analizi gerçekleştirilmesi ve iklim normalizasyonu yaklaşımı kullanılarak yıllar arası emisyon değişimlerini daha sağlıklı biçimde değerlendirmeyi hedeflemektedir.

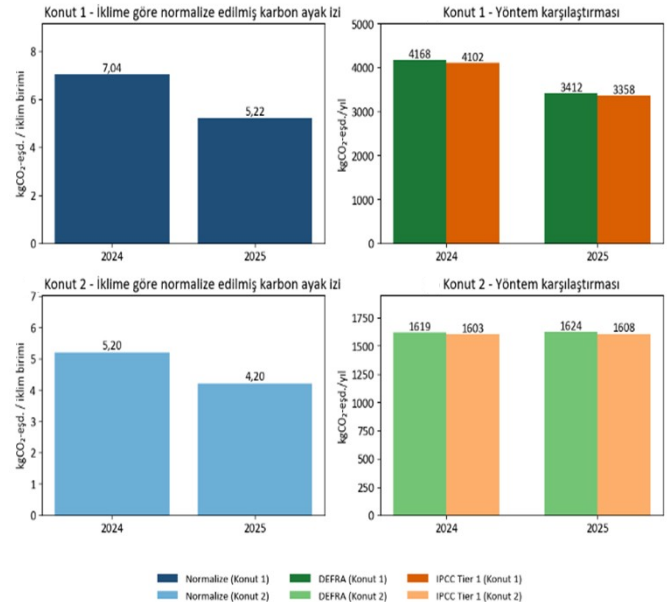
Yöntem—2024–2025 yıllarına ait iki konutun elektrik, su ve doğalgaz tüketim verileri kullanılarak IPCC Tier 1 ve DEFRA yöntemleriyle karbon ayak izi hesaplanmıştır. Elektrik tüketimi SGD, doğalgaz tüketimi IGD değerlerine bölünerek iklim normalizasyonu uygulanmıştır. Konut 1 ve Konut 2 için 2024 ve 2025 yıllarına ait karbon ayak izi sonuçlarını, iklim normalize edilmiş göstergeler ve farklı metodolojilere (DEFRA–IPCC Tier 1) göre hesaplanan toplam değerler birlikte sunmaktadır. Sol tarafta yer alan grafikler, elektrik tüketiminin ısıtma gün-dereceleri (SGD) ve doğalgaz tüketiminin ısıtma gün-dereceleri (IGD) dikkate alınarak

normalize edilmesiyle elde edilen karbon ayak izi eğilimlerini göstermektedir. 2025 yılında her iki konutun da iklim normalize edilmiş karbon ayak izi değerlerinin azalması, birim iklim yükü başına düşen enerji tüketiminin azaldığını ve enerji kullanım verimliliğinde iyileşme sağlandığını göstermektedir. Sağ tarafta yer alan grafiklerde ise toplam karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan DEFRA ve IPCC Tier 1 metodolojilerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Her iki konutta da DEFRA yaklaşımı ile elde edilen değerlerin IPCC Tier 1 sonuçlarına göre sistematik olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Genel olarak grafiksel özet, karbon ayak izinin konut ölçeğinde değerlendirmesinde iklim normalizasyonunun gerçek performansı ortaya koymada kritik bir rol oynadığını ve metodoloji seçiminin sonuçlar üzerinde sınırlı ancak sistematik bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Bulgular—2025 yılında hesaplanan toplam karbon ayak izinin azaldığı ve bu azalmanın iklim normalizasyonu sonrasında da korunduğu belirlenmiştir. Azalışın temel olarak doğalgaz tüketimindeki düşüşten kaynaklandığı görülmüştür. Farklı metodolojiler farklı mutlak değerler üretse de eğilimler tutarlıdır.

Sonuç—Bu çalışma konut ölçeğinde karbon ayak izinin değerlendirilmesinde iklim normalizasyonunun kritik bir tamamlayıcı araç olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Bu yaklaşım, emisyonların daha doğru yorumlanmasını sağlamakta ve azaltım stratejilerinin özellikle ısıtma kaynaklı enerji tüketimine odaklanması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler—Karbon ayak izi, Konut ölçeği, Enerji kaynakları, İklim normalizasyonu, Isıtma ve ısıtma gün dereceleri, Enerji tüketimi.

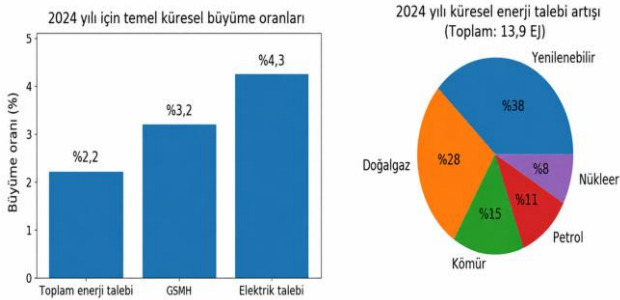


I. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun hızla artması, teknoloji ve sanayi alanlarında yaşanan gelişmeler, son yüzyılda enerji talebini büyük oranda artırmıştır. Ekonomik büyüme, yaşam standartlarının yükselmesi ve endüstriyel faaliyetlerin çeşitlenmesi ile yaygınlaşan enerji üretim ve tüketim süreçleri, ağırlıklı olarak kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil kökenli yakıtlara dayanmaktadır [1]. Bu durum, enerji kaynaklarının yoğun kullanımına ve çevresel baskıların artmasına neden olmakta ve küresel ölçekte sürdürülebilirlik tartışmalarını gündeme getirmiştir. Ayrıca fosil enerjiye olan bağlılığın artması, yalnızca kaynakların tükenmesi riskini değil, aynı zamanda çevre kirliliği ve ekosistem dengelerinin bozulması gibi ciddi sorunları da beraberinde getirmiştir. Nitekim 2024 yılı itibarıyla, Şekil 1’de görüldüğü üzere, küresel enerji talebi %2.2 oranında artış gösterirken elektrik talebindeki artış %4.3 seviyesine ulaşmıştır. Aynı dönemde gerçekleşen 13.9 EJ (Exajoule = 10^{18} J)’lük küresel enerji talebi artışının önemli bir bölümü yenilenebilir kaynaklardan karşılanmakla birlikte, doğal gaz, kömür ve petrol gibi fosil yakıtların toplam payının hâlen oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, küresel enerji sistemlerinde devam eden dönüşüme rağmen karbon ayak izi üzerindeki baskının sürdürülmesini ortaya koymaktadır [2].

Şekil 1’de sunulan küresel enerji talebindeki artış eğilimleri, çevresel, ekonomik ve sosyal sistemleri etkileyen en önemli sorunlardan biri olan iklim değişikliğinin temel itici güçlerinden birini oluşturmaktadır. Enerji talebindeki artışın, yenilenebilir enerji kaynaklarının payı artmasına rağmen hâlen önemli ölçüde kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlara dayalı olarak karşılanması, atmosferdeki sera gazı birikimini artırmaktadır. İklim değişikliğinin ana fiziksel mekanizması, atmosferin doğal radyatif dengesinin bozulması olup, bu süreçte yeryüzünden yayılan uzun dalga boylu ısınnın atmosferde tutulmasında sera gazları belirleyici rol oynamaktadır [3].

Karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), diazot monoksit (N_2O) ve florlu gazlardan meydana gelen sera gazları, doğal sera etkisini kuvvetlendirerek küresel ortalama sıcaklıkların artmasına neden olmaktadır. Bu gazlar içerisinde, özellikle enerji üretimi ve tüketimi süreçleriyle direkt olarak ilişkili olan CO_2 , uzun atmosferik kalış süresi ve küresel enerji sistemlerindeki baskın rolünden dolayı iklim değişikliğinin başlıca belirleyicisi olarak öne çıkmaktadır [4]. 2024 yılında gerçekleşen enerji talebi artışının büyük ölçüde fosil kaynaklardan karşılanması, enerji tüketimi ile CO_2 emisyonları arasındaki güçlü doğrusal ilişkiyi ortaya koymaktadır. Bu durum, küresel ölçekte artan enerji bağımlılığının sera gazı konsantrasyonları üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Bu noktada, emisyonların hangi sektörlerden kaynaklandığı ve toplam emisyon miktarı iklim değişikliği ile mücadelede kritik öneme sahiptir. Enerji tüketiminin sektörel bazda dağılımı incelendiğinde, insan yaşamının sürdürüldüğü yapı çevrelerin toplam enerji talebi içerisindeki payının oldukça yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 1. 2024 yılında küresel enerji talebindeki büyüme oranları ve enerji talebi artışının kaynaklara göre dağılımı [2]

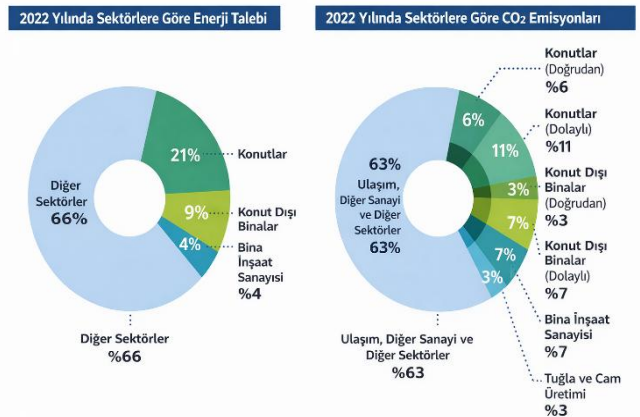
Figure 1. Growth rates of global energy demand in 2024 and the distribution of energy demand increase by source [2].

Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, küresel enerjiye bağlı CO_2 emisyonları 2022 yılında yaklaşık 36.8 Gt (Gigaton = 10^9 ton) seviyesine ulaşmış olup, bu emisyonların önemli bir bölümü bina ve yapılaşmış çevre ile ilişkili enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Bu durum, bina sektörünü enerji tüketimine bağlı CO_2 emisyonlarının oluşumunda merkezi bir konuma yerleştirmektedir. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) raporlarına göre, küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümü enerji üretimi ve tüketiminden kaynaklanmakta olup; bu emisyonların yaklaşık %30-40'ı bina sektörüne atfedilmektedir [5], [6].

Bina sektörü içerisinde ise konutlar, yaygınlıkları ve süreklilik arz eden enerji talepleri nedeniyle öne çıkmaktadır. Isıtma, soğutma, aydınlatma, elektrikli ev aletleri ve sıcak su kullanımı gibi temel faaliyetler, konutların enerji tüketimini ve buna bağlı olarak da karbon ayak izi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bunlara ek olarak, konutlarda gerçekleşen su tüketimi; arıtma, iletim ve dağıtım süreçlerinde ek enerji gereksinimi doğurarak dolaylı CO_2 emisyonlarının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle konut ölçeğinde gerçekleştirilen karbon ayak izi çalışmaları, iklim değişikliği ile mücadelede yerel ve bölgesel politika geliştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir [7], [8]. Bu çerçevede Uluslararası Enerji Ajansı ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı tarafından yayımlanan güncel raporlara göre, bina sektöründen kaynaklanan doğrudan ve dolaylı CO_2 emisyonları, küresel enerji ve süreç kaynaklı CO_2 emisyonlarının yaklaşık %30-37'sine karşılık gelmekte olup; bu emisyonların önemli bir bölümü binalarda kullanılan elektrik enerjisinin üretimi sırasında ortaya çıkan dolaylı emisyonlar nedeniyle oluşmaktadır (Şekil 2) [9].

Şekil 2’de sunulan veriler, bina sektörünün küresel enerji sistemi içerisindeki ağırlığını açık biçimde ortaya koymaktadır. 2022 yılı itibarıyla konutlar, konut dışı binalar ve bina inşaat sanayisi birlikte değerlendirildiğinde, bina sektörü küresel nihai enerji tüketiminin yaklaşık %34’ünü oluşturmaktadır. Aynı zamanda, bina sektörüne atfedilen doğrudan ve dolaylı CO_2 emisyonlarının küresel toplam içerisindeki payının enerji tüketimiyle benzer büyüklükte olması, sektörün karbon ayak izi üzerindeki belirleyici rolünü teyit etmektedir.

Özellikle konutlar ile ticari ve kamu binalarında yoğunlaşan ısıtma, soğutma ve elektrikli ekipman kullanımı, bina kaynaklı CO_2 emisyonlarının başlıca belirleyicileri arasında yer almaktadır. Elektrikli kullanımının hız kazanmasına karşın, elektrik üretiminde fosil yakıtların küresel ölçekte hâlen önemli bir paya sahip olması, bina kaynaklı dolaylı emisyonların artmasına neden olmaktadır. Bu durum, bina sektörünü iklim değişikliği ile mücadelede öncelikli müdahale alanlarından biri hâline getirmekte ve sektöre yönelik enerji verimliliği



Şekil 2. 2022 yılında binaların toplam nihai enerji tüketimindeki ve küresel enerji ve süreçle ilgili CO_2 emisyonlarındaki payı [9].

Figure 2. The share of buildings in total final energy consumption and global energy and process-related CO_2 emissions in 2022 [9].

politikalarının önemini artırmaktadır [10], [11]. Bu bağlamda, bina ölçeğinde enerji verimliliğinin artırılması, düşük karbonlu enerji kaynaklarının entegrasyonu ve kullanıcı davranışlarını hedefleyen politika ve uygulamaların geliştirilmesi, küresel CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik etkili ve sürdürülebilir stratejiler olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu stratejilerin etkin biçimde tasarlanabilmesi ve uygulanabilmesi için, bina ölçeğinde karbon ayak izinin nicel olarak belirlenmesi ve emisyonları etkileyen temel bileşenlerin ayrıntılı biçimde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu noktada, karbon ayak izi kavramı, bina ve konut ölçeğinde enerji ve kaynak kullanımının çevresel etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmeye olanak tanıyan temel bir gösterge olarak öne çıkmaktadır. Karbon ayak izi, bir bireyin, yapının veya faaliyetin belirli bir zaman dilimi içerisinde neden olduğu toplam sera gazı emisyonlarının karbondioksit eşdeğeri (CO₂-eşd.) cinsinden ifade edilmesiyle tanımlanmaktadır. Konut ölçeğinde karbon ayak izi hesaplamaları, ağırlıklı olarak elektrik, ısıtma amaçlı yakıtlar ve su tüketimine dayalı veriler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu hesaplamalarda benimsenen metodoloji ve kullanılan emisyon faktörleri, elde edilen sonuçların büyüklüğü ve karşılaştırılabilirliği üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır [12], [13].

Hükümetler arası IPCC, sera gazı emisyonlarının hesaplanmasına yönelik olarak Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 olmak üzere üç seviyeli bir metodolojik çerçeve önermektedir. Tier 1, varsayılan emisyon faktörlerine dayanan, veri gereksinimi düşük ve uygulanabilirliği yüksek bir yöntem olup; özellikle bireysel konutlar ve sınırlı veri erişimine sahip bölgelerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntem, hesaplama sürecinde şeffaflık ve karşılaştırılabilirlik sağlarken, bölgesel enerji üretim yapıları ve yerel tüketim farklılıklarını sınırlı ölçüde yansıtabilmektedir [14].

Literatürde Tier 1 yaklaşımı ile gerçekleştirilen çalışmalarda, konut enerji tüketimlerinin karbon ayak izi üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Baiocchi ve Minx [15], konut kaynaklı emisyonların şehir ölçeğinde değerlendirilmesinde IPCC temelli yöntemlerin uygulanabilirliğini ortaya koymuştur.

IPCC metodolojisine alternatif olarak literatürde yaygın biçimde kullanılan bir diğer yaklaşım, sera gazı protokolü (Greenhouse Gas Protocol—GHG Protocol) çerçevesinde geliştirilen ve Birleşik Krallık Çevre, Gıda ve Kırsal İşler Bakanlığı (Department for Environment, Food & Rural Affairs—DEFRA) tarafından yayımlanan emisyon faktörleridir. DEFRA emisyon faktörleri, elektrik üretim karması ve yakıt türlerine ilişkin güncel ve ayrıntılı veriler sunması nedeniyle özellikle elektrik tüketimine dayalı karbon ayak izi hesaplamalarında sıklıkla tercih edilmektedir [16]. Bu durum, DEFRA tabanlı hesaplamaların IPCC Tier 1 sonuçlarına kıyasla farklı değerler üretmesine neden olabilmektedir.

Jones ve Kammen [17], konut ölçeğinde gerçekleştirilen karbon ayak izi çalışmalarında IPCC ve DEFRA emisyon faktörlerinin kullanılması durumunda, hesaplanan emisyon değerlerinin anlamlı ölçüde değiştiğini rapor etmiştir. Benzer şekilde, Türkiye’de konut enerji tüketimine dayalı karbon ayak izi hesaplamalarında metodoloji seçiminin sonuçlar üzerindeki etkisini Hünerli ve ark. [18] çalışmalarında IPCC Tier 1 ve DEFRA yöntemlerini kullanarak ortaya koymuşlardır. Ayrıca, Türkiye’de konut kaynaklı karbon emisyonlarının analizinde hane başına yıllık yaklaşık 4.8 ton CO₂ emisyonu olduğu rapor edilmiştir [19]. Bununla birlikte, Türkiye’de yapılan çalışmaların büyük bir bölümü belirli bir şehir veya bölge ile sınırlı kalmaktayken farklı iklim koşulları karşılaştırmalı olarak ele alınmamaktadır. Bu nedenle, IPCC Tier 1 ve DEFRA yaklaşımlarının aynı çalışma kapsamında ve aynı veri seti kullanılarak karşılaştırıldığı araştırmaların sınırlı olduğu görülmektedir [20].

Konut karbon ayak izi üzerinde etkili olan bir diğer önemli faktör ise iklimsel koşullardır. Yıllık ortalama sıcaklık, ısıtma ve soğutma derece günleri ile bağıl nem oranı, konutların enerji

tüketim profillerini doğrudan etkilemektedir. Soğuk iklim bölgelerinde ısıtma amaçlı yakıt tüketimi ön plana çıkarken, sıcak iklim bölgelerinde soğutma ihtiyacına bağlı olarak elektrik tüketimi artış göstermektedir. Bu durum, farklı iklim bölgelerinde yer alan konutların karbon ayak izlerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Türkiye, farklı iklim tiplerini aynı coğrafyada barındırmasına rağmen, konut ölçeğinde iklim temelli karşılaştırmalı karbon ayak izi çalışmalarının sınırlı sayıda olduğu bir ülkedir. Mevcut çalışmaların büyük bir bölümü tek bir şehir veya bölge ile sınırlı kalmakta; farklı iklim koşullarının enerji tüketimi ve buna bağlı karbon ayak izi üzerindeki etkileri yeterince bütüncül ve karşılaştırmalı biçimde ele alınmamaktadır. Bu durum, konut ölçeğindeki karbon ayak izi analizlerinde iklimsel değişkenlerin rolünün net biçimde ortaya konulmasını güçleştirmekte ve literatürde önemli bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır. Bu bağlamda, farklı iklim koşullarına sahip şehirlerde yer alan konutların aynı metodoloji ve aynı veri türleri kullanılarak değerlendirilmesi, karşılaştırılabilir ve genellenebilir sonuçlar elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Kırşehir (39.1425° K, 34.1709° D; rakım ≈ 985 m) ilinde bulunan bir konuta ait 2024–2025 dönemine ilişkin elektrik, doğalgaz ve su tüketim verileri kullanılarak karbon ayak izi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bunun için IPCC Tier 1 ve DEFRA emisyon faktörlerinden yararlanılmış; elde edilen bulgular metodolojik farklılıklar ve iklimsel koşullar çerçevesinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece hem hesaplama yaklaşımının hem de coğrafi ve iklimsel değişkenlerin konut ölçeğindeki karbon ayak izi üzerindeki etkileri nicel olarak ortaya konmuş ve Türkiye bağlamında literatüre özgün bir katkı sunulması hedeflenmiştir. Bu yönüyle çalışma, Türkiye’de yer alan konutun karbon ayak izini aynı veri seti ve sistem sınırları altında IPCC Tier 1 ve DEFRA emisyon faktörleri kullanarak doğrudan karşılaştırmalı biçimde ele alan sınırlı sayıdaki araştırmalardan biridir. Literatürde çoğunlukla tek metodolojiye odaklanan çalışmaların aksine, bu araştırmada iklimsel göstergelerin ve metodolojik tercihin sonuçlar üzerindeki etkisi ayrıştırılarak analiz edilmiş; böylece konut ölçeğinde karbon ayak izi hesaplamalarında metodoloji seçimi ve iklimsel normalizasyonun önemi açık biçimde ortaya konmuştur.

Bu çalışmanın devamında, II. Bölüm’de kullanılan veri seti, iklimsel göstergeler ve karbon ayak izi hesaplama metodolojileri ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır. III. Bölüm’de enerji tüketimi, iklim normalize edilmiş yoğunluklar ve karbon ayak izi sonuçları sunulmakta ve literatür ile karşılaştırmalı olarak tartışılmaktadır. Son olarak, IV. Bölüm’de ise elde edilen bulgular özetlenmekte ve çalışmanın politika yapıcılar ve gelecekteki araştırmalar açısından sunduğu çıkarımlar değerlendirilmektedir.

II. YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada, Türkiye’nin karasal iklim özelliklerini temsil eden şehrindeki konut değerlendirilmiştir. Çalışma alanı olarak, İç Anadolu’daki Kırşehir (39.1425° K, 34.1709° D; rakım ≈ 985 m) ili seçilmiştir. Coğrafi konumu nedeniyle farklı ısıtma ve soğutma gereksinimlerine sahip olan bu il, iklimsel açıdan karşılaştırmalı analiz için uygun bir örneklem sunmaktadır. Şehirde sürekli ikamet edilen iki konut incelemeye dâhil edilmiştir. Konutların karbon ayak izinin hesabı; yapının tipi, kullanım amacı ve hane halkı sayısı gibi temel özelliklere ek olarak, büyük ölçüde iklim koşullarına ve hesaplama yöntemlerine göre değişiklik göstermektedir. Bu yaklaşım, sonuçların karşılaştırılabilirliğini artırmak amacıyla benimsenmiştir. Bu çalışma, istatistiksel genelleme amacı taşımaktan ziyade konut ölçeğinde karbon ayak izi hesaplama metodolojilerinin ve iklimsel etkilerin nicel olarak ortaya konulmasını hedefleyen bir vaka çalışması yaklaşımı çerçevesinde yürütülmüştür. Seçilen konut, benzer kullanım özelliklerine sahip yerleşim birimlerini temsil eden tipik bir örnek olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada, öncelikle şehrin iklimsel karakteristiklerini nicel olarak ortaya koymak amacıyla ısıtma gün-derecesi (IGD) ve soğutma gün-derecesi (SGD) göstergeleri kullanılmıştır. IGD ve SGD, dış ortam sıcaklığının belirli bir referans sıcaklığın altında veya üzerinde kaldığı günlerdeki sıcaklık farklarının toplamını ifade eden ve binaların ısıtma ile soğutma enerji gereksinimlerini değerlendirmede yaygın olarak kullanılan meteorolojik parametrelerdir. IGD değerinin yüksek olması, ısıtma amaçlı enerji talebinin baskın olduğunu; SGD değerinin yüksek olması ise soğutma ihtiyacına bağlı elektrik tüketiminin öne çıktığını göstermektedir. Bu doğrultuda, Kırşehir iline ait 2024–2025 dönemini kapsayan yıllık IGD ve SGD değerleri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) merkez istasyonlarından temin edilmiştir. Elde edilen iklim verileri, şehrin ısıtma ve soğutma ağırlıklı iklim karakterlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek amacıyla Tablo 1’de sunulmuştur [21].

Tablo 1’de sunulan 2024–2025 yıllarına ait IGD ve SGD değerleri, incelenen şehrin iklimsel karakterleri arasındaki belirgin farklılığı nicel olarak ortaya koymaktadır. Kırşehir için hesaplanan yüksek IGD değerleri (2024: 2357; 2025: 2460), SGD değerlerine (2024: 210; 2025: 264) kıyasla yaklaşık 9–11 kat daha yüksek olup; konutlarda ısıtma amaçlı enerji gereksiniminin baskın olduğunu göstermektedir. Bu değerlendirmeye göre IGD/SGD oranının 1’den büyük olması durumu ısıtma yükünün baskın olduğunu ve Kırşehir için IGD/SGD oranının oldukça yüksek olması, soğutma ihtiyacına bağlı elektrik tüketiminin toplam enerji talebi içerisinde sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu farklılıklar, şehrin enerji tüketim profillerinin ve buna bağlı karbon ayak izlerinin iklimsel koşullardan etkilendiğini açıkça göstermektedir. Bu bağlamda, IGD ve SGD göstergeleri, konuta ait enerji tüketim verilerinin yorumlanmasında temel bir referans olup; özellikle çeyreklik ve yıllık tüketim verilerinin açıklamada destekleyici bir rol üstlenmektedir.

İklimsel koşulların nicel olarak ortaya konmasının ardından, çalışmada incelenen konuta ait elektrik, doğalgaz ve su tüketim verileri sunulmuştur. Bu kapsamda, Kırşehir ilinde yer alan konuta ait 2024–2025 dönemini kapsayan aylık tüketim verileri, mevsimsel etkilerin daha net değerlendirilebilmesi amacıyla üçer aylık (çeyreklik) dönemler hâlinde gruplandırılarak analiz edilmiştir. Çeyreklik tüketim değerleri, iklimsel değişimlerin enerji ve su kullanımı üzerindeki etkilerini açıklayıcı bir araç olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda, Kırşehir ilinde yer alan iki farklı konuta ait çeyreklik ve yıllık tüketim verileri Tablo 2’de sunulmuştur. Böylece, konutların enerji ve su tüketim profilleri, iklimsel farklılıklar bağlamında karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmiştir.

Karbon ayak izi hesaplamalarında ise emisyon faktörlerinin yıllık ortalama değerlere dayanması nedeniyle tüm tüketim verileri yıllık toplam değerlere dönüştürülerek değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, söz konusu şehrin hem iklimsel hem de metodolojik açıdan tutarlı bir zeminde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Çalışmada, elektrik tüketimi (kWh), doğalgaz tüketimi (m³) ve su tüketimi (m³) olmak üzere üç temel tüketim kalemi dikkate

Tablo 1. Kırşehir iline ait yıllık ısıtma ve soğutma gün-dereceleri (2024–2025) [21].

Table 1. Annual heating and cooling degree-day data for Kırşehir province (2024–2025) [21].

Şehir (Merkez İstasyon)	Yıl	IGD	SGD
Kırşehir	2024	2357	210
	2025	2460	264

alınmış; bu kalemler konut ölçeğinde oluşan doğrudan ve dolaylı CO₂ emisyonlarının belirlenmesinde temel girdi parametreleri olarak ele alınmıştır. Su tüketimi verileri, konutların kaynak kullanım profillerinin bütüncül biçimde ortaya konulması amacıyla sunulmuş; ancak suyun karbon ayak izi, yerel arıtma, iletim ve dağıtım altyapılarına yüksek derecede bağımlı olması ve standartlaştırılmış ulusal emisyon faktörlerinin sınırlı güvenilirlik sunması nedeniyle toplam karbon ayak izi hesaplamalarına dahil edilmemiştir. Bu nedenle su tüketimi, çevresel farkındalık ve kaynak kullanımı göstergesi olarak raporlanmış, ancak nicel karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılmamıştır. Tablo 2’de sunulan Kırşehir ilinde yer alan iki farklı konuta ait yıllık tüketim verileri incelendiğinde, her iki konutun enerji tüketiminde mevsimsel değişikliklerin belirgin etki gösterdiği görülmektedir.

Özellikle IGD değerlerinin yüksek olduğu kış aylarında doğalgaz tüketiminin ciddi oranda arttığı görülmektedir. Buna karşılık, yaz döneminde elektrik tüketiminde artış gözlenmekte olup, bu artış klima, fan vb. gibi serinletme sistemleri ve artan soğutma talebi ile birlikte aydınlatma ve elektrikli ev aletlerinin kullanımındaki mevsimsel yoğunluktan kaynaklanmaktadır. Konut 1 için değerlendirildiğinde, 2025 yılında 2024 yılına göre elektrik tüketiminde yaklaşık %6.9 oranında azalma (2894 kWh → 2694 kWh), doğalgaz tüketiminde ise %22.9 oranında bir düşüş (1454 m³ → 1121 m³) görülmektedir. Su tüketiminde ise sınırlı bir değişim gözlenmiştir (114 m³ → 110 m³). Konut 2’de ise tüketim değerlerinin yıllar arasında daha istikrarlı olduğu görülmekte olup elektrik, doğalgaz ve su tüketiminde her iki yılda da fark %1’in altındadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, doğalgaz tüketiminin toplam enerji tüketimi içerisindeki belirleyici olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle kış dönemlerinde ısıtma ihtiyacının artmasıyla enerji kullanım profili doğrudan etkilenmektedir. Elektrik tüketiminin ise yaz aylarında artış göstermesine rağmen yıllık toplam enerji dengesi içerisinde daha sınırlı bir paya sahiptir.

Bu çalışmada karbon ayak izi hesaplamalarına ilişkin sistem sınırları, konutların kullanım aşamasında gerçekleşen enerji tüketimleri ile sınırlandırılmıştır. Bu kapsamda yalnızca elektrik ve doğalgaz tüketimlerinden kaynaklanan doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonları dikkate alınmıştır. Bina yapım süreci, yapı malzemelerinin gömülü karbonu, bakım-onarım faaliyetleri, kullanıcı ulaşım kaynaklı emisyonlar ve evsel atıklar sistem sınırları dışında bırakılmıştır. Bu tercih, çalışmanın temel amacının metodolojik karşılaştırma ve iklimsel etkinin nicel olarak ortaya konulması nedeniyle yapılmıştır. Sonuç olarak,

Tablo 2. Kırşehir ilinde yer alan 2 farklı konuta ait üç aylık (çeyreklik) enerji ve su tüketimleri ile yıllık toplam (2024–2025).

Table 2. Quarterly (three-month) energy and water consumption and annual totals for two different residences located in Kırşehir province (2024–2025).

Konut	Yıl	Tüketim Türü	Ocak–Mart	Nisan–Haziran	Temmuz–Eylül	Ekim–Aralık	Toplam
Konut 1	2024	Elektrik (kWh/yıl)	672	708	857	657	2894
	2025		428	648	961	657	2694
	2024	Doğalgaz (m ³ /yıl)	710	68	93	583	1454
	2025		593	78	82	368	1121
	2024	Su (m ³ /yıl)	26	28	39	21	114
	2025		24	25	33	28	110
Konut 2	2024	Elektrik (kWh/yıl)	306	272	309	413	1300
	2025		297	333	286	401	1317
	2024	Doğalgaz (m ³ /yıl)	204	37	30	247	518
	2025		203	52	27	235	517
	2024	Su (m ³ /yıl)	36	22	19	35	112
	2025		25	23	18	44	110

Kırşehir'in iklimsel özellikleri göz önüne alındığında, konutların enerji tüketim profilinin ısıtma ağırlıklı olduğu ve enerji verimliliği çalışmalarında özellikle doğalgaz tüketimini azaltmaya yönelik stratejilerin (yalıtım iyileştirmeleri, yüksek verimli kazan sistemleri, alternatif enerji kaynakları vb.) öncelikli olarak ele alınması gerektiği değerlendirilmektedir.

Çalışmanın temel amacı, söz konusu farklılıkların iklim kaynaklı olup olmadığını ortaya koymak olduğundan, değerlendirmede yalnızca toplam alan ya da kişi başına düşen tüketim değerleriyle yetinilmemiştir. Bunun yerine, enerji tüketimleri meteorolojik göstergelerle ilişkilendirilerek analiz edilmiştir. Bu kapsamda, ısıtma odaklı enerji tüketimini temsil eden doğalgaz verileri yıllık IGD değerlerine; soğutma ağırlıklı elektrik tüketimi ise yıllık SGD değerlerine oranlanmıştır. Böylece enerji tüketimi birim iklim yükü başına düşen yoğunluk değerleri üzerinden incelenmiş ve farklılıkların iklim temelli yorumu daha sağlam bir analitik zemine oturtulmuştur. Isıtma ihtiyacının yoğun olduğu dönemlerde, doğalgaz tüketimi doğrudan ısıtma yükünü temsil edecek şekilde IGD değerlerine oranlanmıştır. Bu süreçte, ısıtma sistemlerinde kullanılan kombi elektrik tüketimi gibi yardımcı elektrik tüketimi ayrı bir bileşen olarak ayrıştırılmamış olup toplam elektrik tüketimi içerisinde değerlendirilmiştir. Bunun nedeni, söz konusu tüketimin toplam elektrik tüketimi içerisindeki payının sınırlı olması ve mevcut veri seti içerisinde ayrıştırılabilmesinin mümkün olmamasıdır. Soğutma ihtiyacının baskın olduğu dönemde ise elektrik tüketimi SGD değerlerine oranlanmıştır. Bu kapsamda, sıcak su üretimi gibi yıl boyunca devam eden doğalgaz ve elektrik enerjisi tüketimleri ayrı olarak ayrıştırılmamış ve toplam tüketim içerisinde değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımla, veri setinin bütünlüğünün korunması ve tüm enerji tüketimlerinin iklimsel etkilerle birlikte bütüncül olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda iklim normalize edilmiş enerji yoğunlukları hesaplanarak Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3 incelendiğinde, 2024–2025 yıllarına ait elektrik tüketiminin SGD, doğalgaz tüketiminin ise IGD oranlanarak iklim normalize edilerek enerji yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu normalizasyon yaklaşımı, enerji tüketiminin iklimsel yükten arındırılmış biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Konut 1 için değerlendirildiğinde, elektrik yoğunluğunun 2024 yılında 13.78 kWh/SGD iken 2025 yılında yaklaşık %26 azalarak 10.21 kWh/SGD seviyesine düştüğü görülmüştür. Benzer şekilde, doğalgaz yoğunluğu da 0.62 m³/IGD'den 0.46 m³/IGD'ye gerileyerek yaklaşık %26 oranında azalmıştır. Konut 2'de ise elektrik yoğunluğu değerleri 2024 ve 2025 yıllarında sırasıyla 0.55 ve 0.56 kWh/SGD olarak hesaplanmıştır. Doğalgaz yoğunluğu ise 2024 yılında 2.46 m³/IGD iken 2025 yılında 1.96 m³/IGD değerine düşerek yaklaşık %20 oranında azalma eğilimindedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, normalize edilmiş enerji yoğunlukları konutlar arasında farklılık göstermektedir. Özellikle Konut 1'de elektrik ve doğalgaz yoğunluğunda belirgin bir azalma gözlenirken, Konut 2'de ise elektrik yoğunluğu büyük ölçüde sabit kalmış, doğalgaz yoğunluğunda ise sınırlı bir düşüş gözlenmiştir.

SGD değerlerinin Kırşehir'de düşük olması; elektrik tüketiminin tamamının soğutma yüküyle doğrusal ilişkili olmadığını göstermektedir. Benzer şekilde, IGD değerlerinin yüksek olması birim ısıtma yükü başına tüketim farklılıklarına işaret etmektedir. Sonuç olarak, iklim normalize edilmiş yoğunluk

göstergeleri şehirlerarası enerji kullanım karakteristiklerinde yapısal ve davranışsal farklılıkların bulunduğunu göstermektedir. Normalizasyon işlemi, toplam tüketim değerlerinden bağımsız olarak birim iklim yükü başına enerji kullanımını nicel olarak karşılaştırma imkânı sağlamaktadır.

İklim normalize edilmiş enerji yoğunluklarının belirlenmesinin ardından tüketilen enerjinin çevresel etkilerinin nicel olarak ortaya konulabilmesi için karbon ayak izi değerleri hesaplanmıştır. Bu kapsamda karbon emisyon hesaplamaları, GHG Protocol ve DEFRA emisyon faktörü yaklaşımı ile IPCC Tier 1 yöntemi şeklinde iki farklı metodolojik çerçevede doğrultusunda ele alınmıştır.

Karbon ayak izi hesaplamalarında iki veri seti kullanılmıştır. İlk olarak, konuta ait yıllık enerji tüketim verilerinin (kWh/yıl ve m³/yıl) kullanılmasıyla mutlak yıllık karbon ayak izi (kgCO₂/yıl) hesaplanmıştır. Bu hesaplama, ilgili metodolojilerin öngördüğü şekilde aktivite verisi ile emisyon faktörünün çarpımına dayanmaktadır ve konutların fiili sera gazı emisyon büyüklüğünü temsil etmektedir. İkinci aşamada, iklimsel değişkenliklerin enerji tüketimi üzerindeki etkisinin azaltılması ve farklı dönemlerde karşılaştırılabilirlik sağlaması için iklim normalize edilmiş enerji tüketim değerleri kullanılarak karbon emisyonları hesaplanmıştır. Bu yaklaşımda, IGD ve SGD parametreleri kullanılarak düzeltilmiş tüketim değerleri emisyon faktörleri ile çarpılmış ve iklimden arındırılmış karbon ayak izi değerleri üretilmiştir. Bu iki aşamalı hesaplama yaklaşımı ile konutların gerçek yıllık karbon emisyonları ve iklim koşullarından bağımsızlaştırılmış emisyon performansı birlikte değerlendirilmiştir. Böylece mutlak emisyon büyüklükleri ile normalize edilmiş karbon yoğunlukları karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir hale getirilmiştir [22], [23].

Karbon ayak izi hesaplamalarında uluslararası kabul görmüş standartların esas alınması, sonuçların karşılaştırılabilirliği ve metodolojik tutarlılığı açısından oldukça önemli olup bu doğrultuda çalışmada, bina ve konut ölçeğinde sera gazı emisyonlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan GHG Protocol (Corporate Standard) ve DEFRA (UK Government GHG Conversion Factors) emisyon faktörü yaklaşımı temel alınmıştır. Bu yaklaşım, (1)'de olduğu gibi enerji tüketim verilerinin ilgili emisyon faktörleri ile çarpılması esasına dayanan aktivite temelli bir hesaplama yöntemidir ve kurumsal karbon raporlamasında yaygın biçimde uygulanmaktadır [24]:

$$CO_2 = AD \times EF, \quad (1)$$

burada CO₂ karbon ayak izi miktarını, AD enerji tüketimini ve EF ise birim enerji başına düşen emisyon katsayısını ifade etmektedir. GHG Protocol kapsamında bina içi yakıt kullanımı doğrudan emisyon, şebekeden temin edilen elektrik tüketimi ise dolaylı enerji emisyonu olarak sınıflandırılmaktadır. DEFRA tarafından yayımlanan emisyon faktörleri ise farklı enerji türleri için birim tüketim başına düşen sera gazı emisyon katsayılarını sağlamaktadır. Bu çalışmada konutlara ait yıllık enerji tüketim verileri aktivite verisi olarak kabul edilmiş ve ilgili enerji türleri için geçerli emisyon faktörleri kullanılarak karbon ayak izi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Türkiye ulusal şebeke elektrik üretim karmasına dayalı ortalama emisyon faktörü yaklaşık 0.42 kgCO₂/kWh, Doğalgaz için DEFRA ve IPCC varsayılan yanma temelli emisyon katsayısı yaklaşık 2.02 kgCO₂/m³ ve suyun emisyon katsayısı ise 0.15 kgCO₂/m³ alınarak kullanılmıştır. Hesaplamalar elektrik ve doğalgaz tüketimleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Su tüketiminin dolaylı emisyon niteliği taşıması ve yerel altyapıya bağlı değişkenlik göstermesi nedeniyle karbon ayak izi hesaplamasına dahil edilmemiştir [6].

İklim normalize edilmiş enerji yoğunluklarının belirlenmesinden sonra tüketilen enerjinin çevresel etkisinin nicel olarak ortaya konulabilmesi amacıyla karbon ayak izi değerleri (2)'de hesaplanmıştır [25]:

Tablo 3. Kırşehir ilinde incelenen konutlara ait iklim normalize edilmiş yıllık enerji yoğunluğu.

Table 3. Climate-normalized annual energy intensity of a residential buildings examined in Kırşehir province.

Konut	Yıl	Elektrik Yoğunluğu (kWh/SGD)	Doğalgaz Yoğunluğu (m ³ /IGD)
Konut 1	2024	13.78	0.62
	2025	10.21	0.46
Konut 2	2024	0.55	2.46
	2025	0.56	1.96

$$CO_2 = (AD \times EF)/(DD), \quad (2)$$

burada CO_2 karbon ayak izi miktarını, AD enerji tüketimini, EF birim enerji başına düşen emisyon katsayısını ve DD ise analiz edilen enerji kullanım türüne bağlı olarak ısıtma gün derecesi veya soğutma gün derecesini ifade etmektedir. Bu eşitlik sayesinde karbon ayak izi değerinin iklim koşullarından bağımsızlaştırılması hedeflenmiştir. GHG Protocol ve DEFRA emisyon faktörü yaklaşımlarının yanı sıra, IPCC metodolojisi de karbon emisyonlarının hesaplanmasında ve ulusal sera gazı envanterlerinin hazırlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. IPCC tarafından yayımlanan Tier 1 yöntemi, varsayılan emisyon faktörlerinin kullanıldığı temel hesaplama seviyesini temsil etmektedir. Bu yöntem, veri gereksiniminin sınırlı olduğu durumlarda uygulanabilirliği yüksek, uluslararası kabul görmüş bir hesaplama çerçevesi sunmaktadır. IPCC Tier 1 yaklaşımında karbon emisyonu hesaplaması genel olarak yakıt tüketimi ile yakıtın karbon içerik katsayısına dayanmakta olup (3)'te verilmiştir [9], [26]:

$$CO_2 = FC \times NCV \times EF_c \times OF, \quad (3)$$

burada CO_2 karbon ayak izi miktarını, FC yıllık yakıt miktarını, NCV alt ısı değerini, EF_c karbon emisyon faktörünü ve OF oksidasyon faktörünü tanımlamaktadır. Türkiye' de doğalgaz için yaygın olarak kullanılan EF_c 56,1 kgCO₂/GJ, NCV 35,17 MJ/m³ ve OF değeri 1 olarak alınmaktadır. GHG Protocol ve IPCC Tier 1 yöntemlerinde elektrik kaynaklı emisyon hesabı için benzer formülasyon kullanılmaktadır. Her iki yöntemde de tüketilen elektrik, ulusal şebeke emisyon faktörü ile çarpılmaktadır. Ancak IPCC yaklaşımı ulusal envanter hazırlama amacı taşıırken, GHG Protocol kurumsal raporlama çerçevesinde emisyonları tanımlamaktadır. Haliyle hesaplama formülü aynı olmakla birlikte metodolojik bağlam farklılık göstermektedir. Tüketim kaynaklı çevresel etkilerin bütüncül olarak değerlendirilebilmesi için toplam karbon ayak izi (4)'de hesaplanmıştır. Bu kapsamda elektrik, doğalgaz ve su tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları ayrı ayrı hesaplanmış ve ardından tüm emisyon bileşenleri bir araya getirilerek toplam karbon ayak izi değeri elde edilmiştir [18], [27]:

$$CF_{Toplam} = CF_{Elektrik} + CF_{Doğalgaz} + CF_{Su} \quad (4)$$

burada CF_{Toplam} toplam karbon ayak izi (kgCO₂-eq/yıl), $CF_{Elektrik}$, $CF_{Doğalgaz}$ ve CF_{Su} sırasıyla elektrik, doğalgaz ve su tüketimlerinin karbon ayak izini ifade etmektedir. Toplam karbon ayak izi hem yıllık ham tüketim değerleri hem de iklim normalize edilmiş tüketim değerleri üzerinden ayrı ayrı değerlendirilmiş ve böylece iklim koşullarının emisyon sonuçları üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan emisyon faktörleri, IPCC küresel ısıtma potansiyeli katsayılarını içeren CO₂ eşdeğeri (CO₂-eq) bazlı değerlerdir. Bu nedenle çalışmada elde edilen tüm karbon ayak izi sonuçları kgCO₂-eq/yıl biriminde ifade edilmiştir. Bununla birlikte, çalışmada karbon ayak izinin değerlendirilmesinin temelinde elektrik ve doğalgaz tüketimlerinden kaynaklanan emisyonlar yer almaktadır. Su tüketiminden kaynaklanan emisyonlar ise, sadece genel metodolojik çerçeveyi sunmak amacıyla (4)'te yer almakta olup; analizlere dahil edilmemiştir. Bu durumun nedeni, su tüketiminin dolaylı emisyon niteliği taşıması ve yerel altyapı koşullarına bağlı

olarak değişkenlik göstermesidir. Böylece incelenen enerji tüketimine bağlı sera gazı emisyonlarının nicel büyüklüğü, iklim etkisinden arındırılarak ortaya konulmuştur.

Karbon ayak izi hesaplamalarında metodolojik yaklaşıma bağlı farklılıklar analiz edilmiştir. Çalışmada ulusal ortalama şebeke emisyon faktörleri esas alınmış, emisyon faktörlerinin dönemsel değişimi stabil kabul edilmiş ve sistem sınırları tüketim kaynaklı doğrudan ve dolaylı enerji emisyonları ile sınırlandırılmıştır. Bu metodolojik yaklaşım sayesinde, iklim normalizasyonunun enerji tüketimi ve buna bağlı sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuş ve incelenen örneklem için güvenilir, tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir karbon ayak izi sonuçları elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra bulgular bölümünde, hesaplanan emisyon değerleri bölgesel ve yöntemsel farklılıklar çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan emisyon faktörleri yıllık ortalama ve sabit değerler olarak kabul edilmiştir. Emisyon faktörlerinin dönemsel olarak değişimi, bölgesel üretim karmasındaki dalgalanmalar ve ölçüm belirsizlikleri değerlendirme kapsamı dışında tutulmuştur. Bu durumda çalışmanın temel sınırlılıklarından biri olmasının yanında, metodolojik karşılaştırmaların ve iklim normalizasyonunun etkisini inceleme amacı doğrultusunda sonuçlar üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu kabul edilmektedir. Gelecek çalışmalarda, zamana bağlı emisyon faktörleri ve belirsizlik analizlerinin entegrasyonu ile daha ayrıntılı değerlendirmeler yapılması mümkündür.

III. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Bu bölümde, Kırşehir ilinde yer alan iki konuta ait 2024–2025 dönemine ilişkin enerji tüketimi ve karbon ayak izi sonuçları bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Bulgular; yıllık enerji tüketimleri ve iklim normalize edilmiş enerji yoğunlukları, mutlak karbon ayak izi sonuçları, iklim etkisinin ayrıştırılması, metodoloji karşılaştırmaları, konut alanının (m²) etkisi ve enerji türlerinin göreceli katkıları başlıkları altında sunulmuş ve neden-sonuç ilişkileri çerçevesinde tartışılmıştır.

İncelenen konutlara ait yıllık elektrik, doğalgaz ve su tüketimleri ile iklim normalize edilmiş enerji yoğunlukları birlikte değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, mutlak tüketim değerleri ile iklimsel etkilerden arındırılmış yoğunluk göstergelerinin aynı çerçevede ele alınmasına olanak sağlamaktadır. Kırşehir iline ait incelenen konutun yıllık enerji tüketimleri ve iklim normalize edilmiş enerji yoğunlukları Tablo 4' te verilmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde, her iki yıl içinde iki konutta da toplam enerji tüketiminde baskın bileşenin doğalgaz olduğu görülmektedir. Özellikle 2024 yılında doğalgaz tüketiminin yüksek olması, bu yıl için hesaplanan yüksek IGD değerleri ile uyumludur. Elektrik tüketiminin yaz aylarında artış göstermesi toplam enerji talebi içerisinde ikincil paya sahiptir. Konut bazında değerlendirildiğinde, Konut 1'de 2025 yılında elektrik ve doğalgaz tüketiminde azalma gözlenirken, Konut 2'de tüketim değerlerinin yıllar arasında büyük ölçüde aynı seviyelerde kaldığı görülmektedir. Su tüketimi ise her iki konutta da sınırlı değişim göstermektedir. İklim normalize edilmiş enerji yoğunlukları değerlendirildiğinde, 2025 yılında Konut 1' de elektrik (kWh/SGD) ve doğalgaz (m³/IGD) yoğunluklarında belirgin bir

Tablo 4. Kırşehir ilinde incelenen konutlara ait yıllık enerji tüketimleri ve iklim normalize edilmiş enerji yoğunlukları (2024–2025).

Table 4. Annual energy consumption and climate-normalized energy intensities of the houses examined in Kırşehir province (2024–2025).

Konut	Yıl	Elektrik Tüketimi (kWh/yıl)	Doğalgaz Tüketimi (m ³ /yıl)	Su Tüketimi (m ³ /yıl)	Elektrik Yoğunluğu (kWh/SGD)	Doğalgaz Yoğunluğu (m ³ /IGD)
Konut 1	2024	2894	1454	114	13.78	0.62
	2025	2694	1121	110	10.21	0.46
Konut 2	2024	1300	518	112	0.55	2.46
	2025	1317	517	110	0.56	1.96

Not: Elektrik yoğunluğu soğutma gün-derecesi (SGD), doğalgaz yoğunluğu ise ısıtma gün-derecesi (IGD) esas alınarak hesaplanmıştır.

düşüş meydana gelmiştir. Konut 2'de ise elektrik yoğunluğu büyük ölçüde stabil iken, doğalgaz yoğunluğunda sınırlı bir azalma gözlenmiştir. Özetle, normalize edilmiş enerji yoğunlukları her iki konut içinde farklılık göstermekte olup, enerji tüketiminin sadece iklimsel koşullara değil, aynı zamanda konut özellikleri ve kullanım alışkanlıklarına bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.

Enerji tüketimlerinden kaynaklanan çevresel etkinin nicel olarak ortaya konulabilmesi amacıyla, elektrik, doğalgaz ve su tüketimlerine bağlı karbon ayak izi değerleri IPCC Tier 1 ve DEFRA metodolojileri kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 5' te verilmiştir.

Tablo 5 incelendiğinde karbon ayak izinin, IPCC Tier 1 ve DEFRA metodolojileri kullanılarak elektrik, doğalgaz ve su tüketimleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Elektrik ve su tüketimine bağlı karbon ayak izi değerlerinin her iki metodolojide aynı çıkmasının nedeni, enerji ve kaynak türleri için kullanılan emisyon faktörlerinin metodolojilerin eşdeğer veya çok yakın değerlere sahip olmasıdır. Özellikle elektrik tüketimi için kullanılan emisyon faktörleri, IPCC Tier 1 ve DEFRA metodolojilerinde aynı üretim karmasına dayandığından, hesaplanan karbon ayak izi değerleri birebir örtüşmektedir. Benzer şekilde, su tüketimine bağlı karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan emisyon faktörleri, arıtma, iletim ve dağıtım süreçlerine ilişkin sabit ortalama değerler üzerinden tanımlandığından, metodolojiye duyarlı bir farklılık oluşturmamaktadır. Buna karşılık, doğalgaz tüketimine bağlı karbon ayak izi değerlerinde IPCC Tier 1 ve DEFRA metodolojileri arasında farklar gözlenmektedir. Bu farklar, doğalgazın alt ısı değeri, yanma verimi ve emisyon faktörü tanımlarındaki metodolojik ayrışmalardan meydana gelmektedir. DEFRA yaklaşımında kullanılan emisyon faktörlerinin, yanma sürecine ilişkin daha yüksek varsayımlar içermesi, doğalgaz kaynaklı karbon ayak izi değerlerinin IPCC Tier 1 sonuçlarına kıyasla daha yüksek hesaplanmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, karbon ayak izi değerlerinin hesaplanmasında su tüketimi Tablo 5'te metodolojik bütünlüğü göstermek amacıyla sunulmuştur ancak toplam karbon ayak izi üzerindeki etkisinin yaklaşık %0.4 düzeyinde olması sebebiyle analizlere dâhil edilmemiştir.

Tablo 5'deki hesaplama sonuçlarına göre Konut 1 için 2024 yılında elektrik kaynaklı emisyonlar her iki yöntemde de 1215 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanırken, su tüketimine bağlı emisyonlar 17 kgCO₂-eq/yıl seviyesinde sabit kalmıştır. Benzer şekilde, 2025 yılında da elektrik (1131 kgCO₂-eq/yıl) ve su (17 kgCO₂-eq/yıl) kaynaklı emisyonların metodolojiden bağımsız olarak aynı değerleri verdiği görülmektedir. 2024 yılında doğalgaz kaynaklı emisyonlar DEFRA metodolojisine göre 2936 kgCO₂-eq/yıl, IPCC Tier 1 metodolojisine göre ise 2870 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanmıştır. 2025 yılında bu değerler sırasıyla 2264 ve 2210 kgCO₂-eq/yıl seviyelerine düşmüştür. Konut 2 için de benzer bir eğilim söz konusu olup elektrik kaynaklı emisyonlar 2024 yılında DEFRA metodolojisine göre 598 kgCO₂-eq/yıl, IPCC Tier 1 metodolojisine göre ise 546 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanmıştır. 2025 yılında ise bu değerler sırasıyla 605 ve 553 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanmıştır.

ve 553 kgCO₂-eq/yıl olarak bulunmuştur. Su tüketimine bağlı emisyonlar her iki yıl ve metodolojide 17 kgCO₂-eq/yıl seviyesinde sabit kalmıştır. Buna karşılık, doğalgaz tüketimine bağlı karbon ayak izi değerlerinde iki metodoloji arasında belirgin farklar gözlenmektedir. 2024 yılı için doğalgaz emisyonları DEFRA metodolojisinde 1004 kgCO₂-eq/yıl, IPCC Tier 1 metodolojisinde 1040 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanırken; 2025 yılında sırasıyla 1002 ve 1038 kgCO₂-eq/yıl değerleri elde edilmiştir. Toplam karbon ayak izi değerlerinin incelenmesi durumunda ise, Konut 1 için 2024 yılında toplam emisyonlar DEFRA metodolojisine göre 4168 kgCO₂-eq/yıl, IPCC Tier 1 metodolojisine göre 4102 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanmıştır. 2025 yılında ise bu değerler sırasıyla 3412 ve 3358 kgCO₂-eq/yıl seviyelerine kadar gerilemiştir. Konut 2'de ise toplam emisyonlar 2024 yılı için yaklaşık 1619–1603 kgCO₂-eq/yıl aralığında, 2025 yılı için ise 1624–1608 kgCO₂-eq/yıl aralığında hesaplanmıştır.

Toplam karbon ayak izi içerisinde enerji türlerinin dağılımı incelendiğinde, emisyonların büyük bir bölümünün doğalgaz tüketiminden kaynaklandığı, elektrik tüketiminin ikinci sırada yer aldığı ve su tüketiminin katkısının oldukça düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bu durum, konut ölçeğinde özellikle ısıtma amacıyla kullanılan enerjinin karbon ayak izi üzerindeki belirleyici etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, IPCC Tier 1 ve DEFRA metodolojileri arasında toplam karbon ayak izi hesaplamalarında doğalgaz tüketimine ilişkin emisyon faktörlerinden kaynaklan sınırlı farklar bulunmaktadır.

İklim koşullarının karbon ayak izi üzerindeki etkisini ayırtmak ve yıllar arası karşılaştırılabilirliği artırmak amacıyla, toplam karbon ayak izi değerleri IGD ve SGD değerleri kullanılarak normalize edilmiştir (Şekil 3). Bu yöntemle birlikte, mutlak emisyonlardaki değişimlerin iklimsel farklılıklardan mı yoksa enerji kullanım alışkanlıklarından mı kaynaklandığı daha net biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

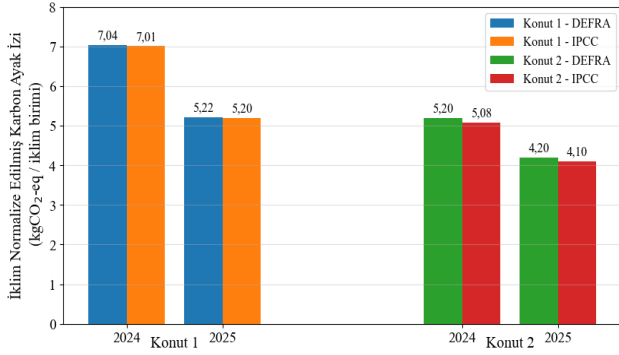
Şekil 3 incelendiğinde, 2024 ve 2025 yılları için her iki konuta ait iklim normalizasyonu uygulanmış toplam karbon ayak izi değerlerinin yıl bazında değişimini göstermektedir. Bu değerler, elektrik ve doğalgaz tüketimlerine ait yıllık toplam emisyonların doğrudan karşılaştırılması yerine, ilgili yıla ait IGD ve SGD değerleri dikkate alınarak normalize edilmesiyle elde edilmiştir. Böylece, yıllar arası karbon ayak izi değişimlerinin karbon ayak izi değişimlerinin iklimsel farklılıklardan bağımsız olarak değerlendirilmesi mümkün hale getirilmiştir. Şekil 3'te sunulan iklim normalize edilmiş karbon ayak izi değerleri, elektrik tüketiminde SGD, doğalgaz tüketimi için ise IGD değerlerine bölünerek elde edilen enerji yoğunluklarının, ilgili emisyon faktörleri ile çarpılması yoluyla hesaplanmış olup bu yaklaşım, birim iklim yükü başına düşen sera gazı emisyonlarını temsil etmekte ve mutlak emisyon değerlerinden bağımsız bir karşılaştırmaya olanak sağlamaktadır. Elde edilen iklim normalize edilmiş toplam karbon ayak izi sonuçlarına göre, Konut 1 için DEFRA metodolojisine göre 2024 yılında 7.04 iken 2025 yılında 5.22'ye, IPCC Tier 1 metodolojisine göre ise 7.01'den 5.20'ye düşmüştür. Konut 2 için bu değerler DEFRA

Tablo 5. IPCC Tier 1 ve DEFRA metodolojilerine göre hesaplanan toplam karbon ayak izi bileşenleri.

Table 5. Total carbon footprint components calculated according to IPCC Tier 1 and DEFRA methodologies.

Konut	Yıl	Metodoloji	Elektrik (kgCO ₂ -eq/yıl)	Doğalgaz (kgCO ₂ -eq/yıl)	Su (kgCO ₂ -eq/yıl)	Toplam (kgCO ₂ -eq/yıl)
Konut 1	2024	DEFRA	1215	2936	17	4168
	2024	IPCC Tier 1	1215	2870	17	4102
	2025	DEFRA	1131	2264	17	3412
	2025	IPCC Tier 1	1131	2210	17	3358
Konut 2	2024	DEFRA	598	1004	17	1619
	2024	IPCC Tier 1	546	1040	17	1603
	2025	DEFRA	605	1002	17	1624
	2025	IPCC Tier 1	553	1038	17	1608

Not: Elektrik yoğunluğu soğutma gün-derecesi (SGD), doğalgaz yoğunluğu ise ısıtma gün-derecesi (IGD) esas alınarak hesaplanmıştır.



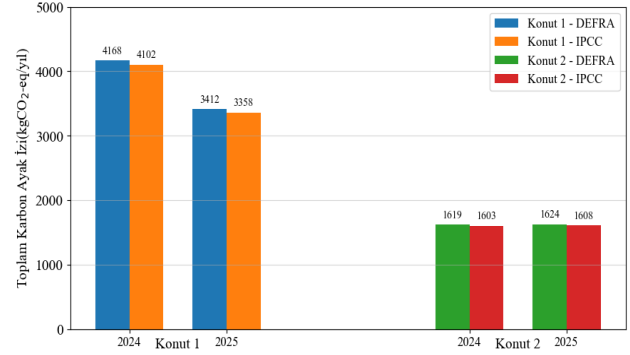
Şekil 3. 2024 ve 2025 yılları için iklim normalizasyonu uygulanmış toplam karbon ayak izi değerlerinin yıl bazında değişimi.

Figure 3. The annual change in total carbon footprint values, adjusted for climate normalization, for the years 2024 and 2025.

metodolojisine göre 5.20'den 4.20'ye, IPCC Tier 1 metodolojisine göre ise 5.08'den 4.10'a gerilemiştir. Bu sonuçlar, her iki konutta için de 2025 yılında birim iklim yükü başına düşen karbon ayak izinin azaldığını açıkça göstermektedir. Bu azalma, sadece yıllar arası iklim farklılıklarından kaynaklanmamakta olup, normalize edilmiş değerlerin düşmesi, enerji kullanım yoğunluğunda bir iyileşmeye işaret etmektedir. Bir başka ifadeyle, 2025 yılında IGD ve SGD değerlerinin artmasına karşın, birim iklim yükü başına enerji tüketiminin azalması; enerji verimliliğinde artış ve kullanıcı davranışlarındaki değişim ile açıklanabilir. Enerji verimliliği kapsamında, konutlardaki ısı yalıtımı iyileştirmeleri, yüksek verimle çalışan ısıtma sistemlerinin kullanımı ve etkin enerji cihazlarının yaygınlaşması enerji tüketiminin azaltılmasında oldukça önemlidir. Kullanıcı davranışları açısından, iç ortam sıcaklık değerlerinin optimize edilmesi, gereksiz enerji kullanımının azaltılması ve enerji tasarrufu bilincinin artması gibi faktörler enerji tüketimini direkt olarak etkilemektedir. Literatürde, binalarda enerji verimliliği uygulamalarının enerji tüketimini %20–40 oranında azaltabildiği ve kullanıcı davranışlarının toplam enerji talebi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Her iki metodolojiye göre de elde edilen normalize edilmiş sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, özellikle iklim etkisinden arındırılmış değerlendirmelerde, emisyon faktörü farklılıklarının toplam sonuç üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Ancak doğalgaz tüketiminin yüksek olduğu durumlarda, emisyon faktörü farklılıklarına bağlı olarak küçük sapmalar meydana gelmiştir. Genel olarak, iklim normalizasyonu yaklaşımının konut ölçeğinde karbon ayak izi analizlerinde daha gerçekçi ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesine imkân sağladığını ortaya koymaktadır [22], [27], [28].

Toplam karbon ayak izi emisyon hesaplama metodolojilerinin (DEFRA ve IPCC Tier 1) toplam karbon ayak izinin üzerindeki etkileri Şekil 4'te karşılaştırılmıştır. Şekil 4 incelendiğinde, her iki konut ve her iki yıl için de DEFRA metodolojisi kullanılarak hesaplanan toplam karbon ayak izi değerlerinin IPCC Tier 1 sonuçlarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Konut 1 için toplam karbon ayak izinin 2024 yılında DEFRA ve IPCC Tier 1 metodolojileri ile hesaplanan değerleri sırasıyla 4168 kgCO₂-eq/yıl ve 4102 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanmıştır. 2025 yılında ise bu değerler 3412 ve 3358 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanmıştır. Konut 2 için toplam karbon ayak izi hesaplamalarında 2024 yılında DEFRA metodolojisine göre 1619 kgCO₂-eq/yıl, IPCC Tier 1 metodolojisine göre ise 1603 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanmıştır. 2025 yılında ise bu değerler sırasıyla 1624 ve 1608 kgCO₂-eq/yıl olarak hesaplanmıştır.

Metodolojiler arasındaki fark, doğalgaz tüketimine ilişkin emisyon faktörlerinin tanımlanmasında kullanılan varsayımlar neden olmaktadır. Doğalgaz için DEFRA metodolojisi daha yüksek emisyon faktörleri kullanırken, IPCC Tier 1 metodolojisi daha genel ve standartlaştırılmış değerleri esas almaktadır. Fakat



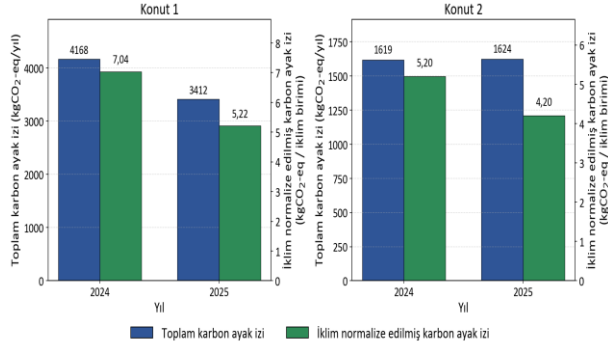
Şekil 4. 2024 ve 2025 yılları için DEFRA ve IPCC Tier 1 metodolojilerine göre hesaplanan toplam karbon ayak izi değerlerinin karşılaştırılması.

Figure 4. Comparison of total carbon footprint values calculated according to DEFRA and IPCC Tier 1 methodologies for the years 2024 and 2025.

elektrik ve su tüketimine bağlı karbon ayak izi bileşenlerinde her iki metodoloji için aynı emisyon faktörlerinin kullanılması, toplam farkın ağırlıklı olarak doğalgaz emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Her iki konut için metodolojiler arasındaki farkın sınırlı düzeyde olup Konut 1'de bu farkın yaklaşık %1.6 seviyesinde, Konut 2'de ise %1 civarında gerçekleşmiştir. Bu durum, toplam karbon ayak izi sonuçlarının metodolojiye bağlı olmakta ve kullanılan emisyon faktörlerinin genel olarak benzer eğilimler göstermektedir. Ayrıca, metodoloji kaynaklı farklılıklara rağmen, her iki yaklaşımda da yıllar arası eğilimlerin oldukça tutarlıdır. Toplam karbon ayak izinin 2025 yılında azalması her iki konut için de her iki metodoloji tarafından benzer oranlardadır. Bu durum, konut ölçeğinde karbon ayak izi değerlendirmelerinde eğilim analizlerinin metodoloji seçiminden büyük ölçüde bağımsız olarak güvenilir biçimde yapılabileceğini göstermektedir.

Toplam karbon ayak izi sonuçlarının daha sağlıklı biçimde yorumlanabilmesi için, toplam karbon ayak izi değerleri ile iklim normalize edilmiş göstergeler birlikte değerlendirilmiştir (Şekil 5). Bu yaklaşım, yıllar arası emisyon değişimlerinin yalnızca toplam enerji tüketimindeki farklılıklardan mı yoksa iklim koşullarındaki değişimlerden mi kaynaklandığının ayrıştırılmasına imkân sağlamaktadır. Bu kapsamda, toplam karbon ayak izi değerleri ile IGD ve SGD değerlerine göre normalize edilmiş karbon ayak izi sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Şekil 5 incelendiğinde, Konut 1 ve Konut 2'ye ait DEFRA metodolojisi kullanılarak hesaplanan karbon ayak izi sonuçları toplam değerler ve iklim normalize edilmiş göstergeler birlikte sunulmuştur. Her konut için yıllık toplam karbon ayak izi değerleri (kgCO₂-eq/yıl) sol eksenle, IGD ve SGD dikkate alınarak hesaplanan iklim normalize edilmiş karbon ayak izi değerleri (kgCO₂-eq/iklim birimi) ise sağ eksenle gösterilmektedir. Bu çift eksenli gösterim, mutlak emisyon büyüklükleri ile iklimden arındırılmış performans göstergelerinin eş zamanlı olarak değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Toplam karbon ayak izi değerlendirildiğinde, Konut 1'de 2025 yılında 2024 yılına kıyasla belirgin bir azalma (4168'den 3412 kgCO₂-eq/yıl'a) gözlenirken, Konut 2'de toplam emisyon değerlerinin neredeyse sabit kaldığı (1619'dan 1624 kgCO₂-eq/yıl'a) görülmektedir. Bu durum, konutlar arasında enerji kullanım karakteristiğinin farklı olduğunu ortaya koymaktadır. İklim normalize edilmiş sonuçlar değerlendirildiğinde ise, her iki konut için de 2025 yılında karbon ayak izi değerleri azalmaktadır. Konut 1 için normalize edilmiş değerler 7.04'ten 5.22'ye düşerken, Konut 2 için ise 5.20'den 4.20'ye düşmüştür. Bu sonuçlara göre her iki konutta da birim iklim yükü başına düşen emisyonların toplam emisyon değerlerinden bağımsız olarak azaldığı görülmektedir. 2025 yılında IGD ve SGD değerleri artmasına rağmen normalize edilmiş karbon ayak izi değerleri azalmaktadır. Bu durum, düşüşün sadece iklimsel koşullardaki değişimlerden



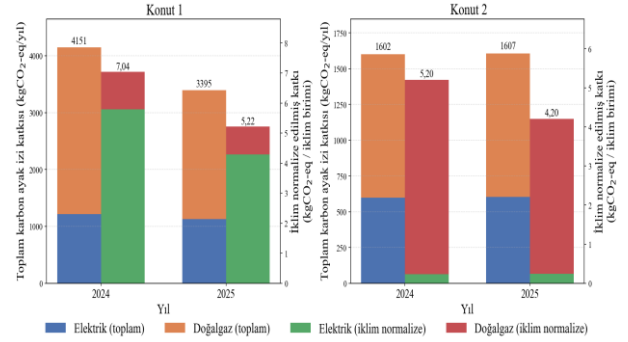
Şekil 5. 2024 ve 2025 yılları için DEFRA metodolojisi kullanılarak toplam ve iklim normalizasyonu uygulanmış karbon ayak izi değerlerinin birlikte gösterimi.

Figure 5. Presentation of total and climate-normalized carbon footprint values for 2024 and 2025 using the DEFRA methodology.

kaynaklanmadığını, aynı zamanda enerji kullanım yoğunluğunda bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Şekil 5 sonuçlarına göre, sadece mutlak karbon ayak izi değerlerinin yeterli olmadığını, iklim normalizasyonu uygulanarak yapılan analizlerin konutların gerçek enerji performansını daha doğru biçimde yansıttığını göstermektedir.

Toplam karbon ayak izi eğilimlerinin daha ayrıntılı biçimde yorumlanabilmesi amacıyla, elektrik ve doğalgaz tüketimlerinin karbon ayak izi içindeki göreceli katkıları ayrıca incelenmiştir. Bu kapsamda, mutlak karbon ayak izi bileşenleri ile iklim normalizasyonu uygulanmış karbon ayak izi bileşenleri birlikte değerlendirilerek, yıllar arası değişimin hangi enerji kaynağından kaynaklandığı ortaya konulmuştur.

Şekil 6 incelendiğinde, Konut 1 ve Konut 2 için elektrik ve doğalgaz tüketimlerinin toplam karbon ayak izi içindeki katkıları (sol eksen) ve iklim normalize edilmiş karşılıkları birlikte gösterilmektedir. Bu gösterim, enerji kaynaklarının toplam emisyon katkıları ile birim iklim yükü başına düşen emisyon davranışlarının eş zamanlı olarak değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Toplam karbon ayak izi bileşenleri değerlendirildiğinde, her iki konut içinde karbon ayak izinin baskın bileşeninin doğalgaz tüketiminin sebep olduğu açıkça görülmektedir. Doğalgaz kaynaklı emisyonlarda Konut 1 için 2024 yılında 2936 kgCO₂-eq/yıl'dan 2025 yılında 2264 kgCO₂-eq/yıl'a düşerken, Konut 2 için ise 2024 yılında 1004 kgCO₂-eq/yıl, 2025 yılında 1002 kgCO₂-eq/yıl seviyesinde kalmaktadır. Elektrik kaynaklı emisyonlarda Konut 1 için 1215'ten 1131 kgCO₂-eq/yıl'a gerilemiş, Konut 2 için ise 598'den 605 kgCO₂-eq/yıl'a hafif bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre, özellikle Konut 1'de toplam karbon ayak izindeki azalmanın büyük ölçüde doğalgaz tüketimindeki düşüşten kaynaklandığını göstermektedir. İklim normalize edilmiş bileşenler incelendiğinde, doğalgaz kaynaklı karbon ayak izi değerlerinde her iki konut için de belirgin bir azalma görülmektedir. Konut 1 için doğalgazın iklim normalize edilmiş katkısı 1.25'ten 0.93'e düşerken, Konut 2 için ise 4.97'den 3.96'ya gerilemiştir. Bu durum, IGD değerlerinin artmasına karşın birim ısıtma yükü başına düşen doğalgaz tüketiminin azaldığını ve ısıtma kaynaklı enerji verimliliğinde iyileşme sağlandığını göstermektedir. Elektrik tüketimine bağlı iklim normalize edilmiş karbon ayak izi değerlerinde ise Konut 1 için elektrik katkısı 5.79'dan 4.29'a düşerken, Konut 2 için ise 0.23'ten 0.24'e çok küçük bir değişim göstermiştir. Bu durum, elektrik tüketiminin iklimsel değişkenlere doğalgaz tüketimi kadar duyarlı olmadığını ve daha çok kullanıcı davranışlarına bağlı olduğunu göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, konut ölçeğinde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik öncelikle ısıtma kaynaklı enerji tüketimine odaklanılması gerektiğini göstermektedir. Özellikle doğalgaz kullanımının azaltılması toplam karbon ayak izi üzerinde en belirleyici iyileşmeyi sağlamaktadır.



Şekil 6. 2024 ve 2025 yılları için elektrik ve doğalgaz tüketimlerinin toplam ve iklim normalizasyonu uygulanmış karbon ayak izi değerlerinin karşılaştırılması.

Figure 6. 2024 and 2025 Comparison of total and climate-normalized carbon footprint values for electricity and natural gas consumption for the years 2024 and 2025.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, konut ölçeğinde karbon ayak izi değerlendirmelerinin yalnızca yıllık toplam emisyon değerleri üzerinden yapılmasının sınırlı olabileceğini, iklim koşullarının etkisini dikkate alarak normalize edilmiş göstergelerin yorum gücünü artırdığını göstermektedir. 2024 ve 2025 yıllarına ait sonuçlar beraber değerlendirildiğinde, toplam karbon ayak izinde meydana gelen düşüşün, iklim normalizasyonu sonrasında da devam etmesi, emisyon düşüşünün yalnızca iklimsel farklılıklardan kaynaklanmadığını göstermektedir. İklim normalize edilmiş karbon ayak izi sonuçlarının IGD ve SGD artması durumlarında birim iklim yükü başına düşen emisyonların azaldığını göstermiştir. Bu durum, enerji kullanım yoğunluğunda ve özellikle ısıtma kaynaklı tüketimde yapısal bir iyileşme sağlandığını göstermektedir. Hesaplama metodolojilerine ilişkin karşılaştırmalarda ise kullanılan yaklaşım farklılıkları olmasına rağmen yıllar arası eğilimlerin tutarlı olduğu ve bulguların metodolojik açıdan güvenilir olduğu doğrulanmaktadır. Enerji kaynağı temelli analizler, toplam karbon ayak izindeki değişimin esas olarak doğalgaz tüketiminden kaynaklandığını; elektrik tüketiminin etkisinin daha sınırlı olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, konut ölçeğinde karbon azaltım politikalarında ve uygulamalarında öncelikle ısıtma sistemlerinin ve doğalgaz kullanımının odaklanması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu bulguların literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılması, elde edilen sonuçların genellenabilirliğini ve akademik geçerliliğini değerlendirmek açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda, farklı çalışmalarda kullanılan metodolojik yaklaşımlar, elde edilen temel sonuçlar ve bu çalışmanın literatüre sunduğu katkılar karşılaştırmalı olarak Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6'da verilen literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, genellikle karbon ayak izinin hesaplanmasında enerji tüketiminin ve iklimsel etkilerin ayrı ayrı ele alındığı görülmektedir. Bu çalışmalar, konut emisyonlarının ağırlıklı olarak enerji tüketimine bağlı olduğunu ve iklim koşullarının belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Özellikle IPCC tabanlı çalışmalar enerji tüketimiyle emisyonlar arasındaki ilişkiyi vurgularken, çoklu metodolojilerin kullanıldığı çalışmalar karbon ayak izinin hesaplama yöntemine duyarlı olduğunu göstermektedir. Enerji ve iklim arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar ise ısıtma yükünün baskın rolünü ortaya koymaktadır. Türkiye özelinde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Hünerli ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada IPCC Tier 1 ve DEFRA yöntemlerinin karşılaştırıldığı, Kaya tarafından yapılan çalışmada ise konut başına karbon ayak izi büyüklüğünün nicel olarak ortaya konulmuştur. Ayrıca, mevcut çalışmaların büyük bir çoğunluğu belirli bölgeler ile sınırlı kalmakta ve iklim temelli normalize analizleri yeterince içermediği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak, aynı şehirde bulunan iki farklı konut için IGD ve SGD göstergeleri kullanılarak sayısal

Tablo 6. Literatürdeki çalışmalar ile mevcut çalışmanın karşılaştırılması.**Table 6.** Comparison of the present study with studies in the literature.

Ref.	Metodoloji	Sonuçlar	Bu Çalışmanın Farkı
[15]	IPCC tabanlı karbon ayak izi hesaplama	Konut emisyonları enerji tüketimine bağlıdır.	IPCC yöntemi DEFRA ile birlikte karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır.
[17]	Çoklu emisyon hesaplama yöntemleri	Konut karbon ayak izi metodolojiye bağlı olarak değişmektedir.	Aynı veri seti üzerinde iki metodun (IPCC-DEFRA) doğrudan karşılaştırılması yapılmıştır.
[18]	IPCC Tier 1 ve DEFRA metodolojilerinin karşılaştırması	Metodoloji sonuçları etkiler.	Aynı veri setinde yöntemsel ve iklimsel karşılaştırma yapılmıştır.
[19]	Türkiye konut karbon ayak izi analizi	Hane başına ~4.8 ton CO ₂	Bölgesel haneler üzerinde nicel emisyon değeri sunulmuştur.
[20]	Türkiye enerji verimliliği analizi	Enerji verimliliği kritik rol oynar.	İklim normalizasyonu olmayan çalışmaların sınırlılığı gösterilmiştir.
[25]	Enerji ve iklim ilişkisi analizi	Isıtma kaynaklı enerji tüketimi baskındır.	Isıtma etkisi doğrudan emisyon yoğunluğu üzerinden nicel olarak gösterilmiştir.
[29]	Küresel bina sektörü analizi	Binalar emisyonların büyük kısmını oluşturur.	Konut ölçeğinde detaylı ve normalize analiz yapılmıştır.

biçimde normalize edilmiş ve IPCC Tier 1 ile DEFRA metodolojileri aynı veri seti üzerinde doğrudan karşılaştırılmıştır. Bu bütüncül yaklaşım sayesinde iklimsel değişkenliğin ve metodolojik farklılıkların karbon ayak izi üzerindeki etkisi birlikte değerlendirilmiştir. Bu yönüyle çalışma, iklim normalize edilmiş ve karşılaştırmalı analizler sunarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.

IV. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Kırşehir ilinde yer alan iki konuta ait 2024 ve 2025 yıllarına ait elektrik, su ve doğalgaz tüketim verileri kullanılarak toplam karbon ayak izi hesaplanmış ve bulunan sonuçlar iklim normalizasyonu uygulanmış göstergelerle birlikte değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, yıllar arası karbon ayak izi değişimlerinin mutlak emisyon değerlerinin yanında iklim koşullarının etkisinden ayrıştırılarak daha sağlıklı biçimde yorumlanmasını sağlamaktır.

Elde edilen sonuçlar, 2025 yılında toplam karbon ayak izinin 2024 yılına göre azaldığını göstermiştir. Bu azalış, iklim normalizasyonu uygulandıktan sonra da korunmakta olup, emisyon düşüşünün yalnızca IGD ve SGD değişimlerden kaynaklanmadığını ortaya koymaktadır. Birim iklim yükü başına düşen karbon ayak izi değerlerinin azalması, konut ölçeğinde enerji kullanım yoğunluğunun ve özellikle ısıtma kaynaklı tüketiminde gerçek bir iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Hesaplama metodolojileri karşılaştırıldığında, IPCC Tier 1 ve DEFRA yaklaşımlarının farklı mutlak değerler üretmesine rağmen, yıllar arası eğilimler açısından tutarlı sonuçlar vermektedir. Çalışmada elde edilen bulguların kullanılan emisyon hesaplama yönteminden bağımsız olarak güvenilir olduğunu ve genel eğilimin metodoloji kaynaklı bir belirsizlik içermediğini göstermektedir. Enerji kaynağı bazı karşılaştırılma yapıldığında, toplam karbon ayak izindeki azalış ağırlıklı olarak doğalgaz tüketimindeki iyileşmeden kaynaklanmaktadır. İklim normalize edilmiş göstergeler, ısıtma gün-derecelerinin artmasına rağmen doğalgaz kullanımına bağlı emisyon yoğunluğunun azaldığını göstermiştir. Elektrik tüketiminin karbon ayak izi üzerindeki etkisi ise her iki yılda da daha sınırlı kalmıştır. Bu bulgu, konut ölçeğinde karbon azaltım stratejilerinin öncelikle ısıtma sistemleri ve doğalgaz kullanımına odaklanması gerektiğini göstermektedir.

Genel olarak bu çalışmada, toplam karbon ayak izi ile iklim normalize edilmiş göstergelerin birlikte kullanılması, konut ölçeğinde karbon ayak izi eğilimlerinin daha doğru, karşılaştırılabilir ve anlamlı biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. İklim normalizasyonu, yıllar arası karşılaştırmalarda iklimsel belirsizlikleri azaltan tamamlayıcı bir analiz aracı olarak öne çıkmaktadır.

Gelecek çalışmalarda ise farklı iklim bölgelerinde yer alan konutların karşılaştırılması, bina alanı, bina yapı malzemelerinin etkileri ve kişi başına düşen enerji tüketiminin analize dahil

edilmesi ve yenilenebilir enerji uygulamalarının karbon ayak izi üzerindeki etkilerinin incelenmesi, bu yaklaşımın kapsamını genişletecek ve literatüre ek katkılar sağlayacaktır.

YAZAR BEYANI (AUTHOR STATEMENT)

İntihal Kontrolü (Plagiarism Check)—Makale iThenticate programı ile taranmış ve derginin intihal politikası ile uyumlu bulunmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)—Makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Etik Kurul Onayı (Ethics Committee Approval)—Makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Yapay Zekâ Araçlarının Kullanımı (Use of Artificial Intelligence Tools)—Bu çalışmada yapay zekâ araçlarından yalnızca metnin dilbilgisi, yazım ve ifade açıklığının kontrol edilmesi amacıyla yararlanılmıştır. Yapay zekâ; içerik üretimi, literatür oluşturma, veri analizi, yorumlama veya bilimsel değerlendirme süreçlerinde kullanılmamıştır. Tüm akademik içerik, sonuçlar ve bilimsel çıkarımlar yazarlara aittir.

Finansman ve Proje Desteği (Funding)—Bu çalışma için herhangi bir kurumsal/finansal destek alınmamıştır.

Veri Paylaşım (Data availability)—Bu çalışmada yeni veri üretilmemiş veya analiz edilmemiştir.

Yazar Katkısı (CRediT Author Contribution)—Kavramsallaştırma, Yöntem, Yazılım, Doğrulama, Biçimsel Analiz, Araştırma, Analiz Araçlarının Sağlanması, Veri Düzenleme, Yazma – ilk taslak, Yazma – inceleme ve düzeltme, Görselleştirme, Proje Yönetimi, Finansman temini makalenin yazarı tarafından gerçekleştirilmiştir.

Teşekkür (Acknowledgment)—Yazar, yapıcı yorumları ve makaleye yaptıkları iyileştirmeler için isimli hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. C. Gök Kısa, "TR83 bölgesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının CRITIC tabanlı gri ilişkisel analiz yaklaşımı ile değerlendirilmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 542–548, 2021. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.99389>.
- [2] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2025", <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025> (20.04.2026).
- [3] J. R. San Cristóbal, "Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method", *Renewable Energy*, 36(2), 498–502, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.031>.
- [4] L. F. Cabeza, Q. Bai, P. Bertoldi, J. M. Kihila, A. F. P. Lucena, É. Mata, S. Mirasgedis, A. Novikova, Y. Saheb, "Buildings", *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, P. R. Shukla, J. Skeea, R. Slade, A. Al Khouradje, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasijsa, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, Eds., Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2023, chapter 9, 953–1048, <https://doi.org/10.1017/9781009157926.011>.
- [5] OECD, *OECD Regions and Cities at a Glance 2024*, Paris: OECD Publishing, 2024, <https://doi.org/10.1787/f42db3bf-en>.
- [6] IEA, "CO2 Emissions in 2022", Paris, <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022> (20.04.2026).
- [7] K. Karanasios, "Sustainable facilities management: a sociotechnical system perspective and a review of the literature", *Journal of Facilities Management*, 24(1), 21–61, 2026. <https://doi.org/10.1108/JFM-04-2024-0046>.

- [8] N. I. Ibrahim, C. Vering, N. Giannetti, M. Kim, S. Sholahudin, T. Storek, D. Müller, K. Saito, "State-of-the-art of the digital twin concept in HVAC+R systems for thermal management of buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 229, 116601, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116601>.
- [9] United Nations Environment Programme, "Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector", Nairobi, 2024. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>.
- [10] J. Y. Teng, H. Yin, "Forecasting the carbon footprint of civil buildings under different floor area growth trends and varying energy supply methods", *Scientific Reports*, 13(1), 21978, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49270-3>.
- [11] A. Atmaca, N. Atmaca, "Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey", *Journal of Cleaner Production*, 340, 130691, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130691>.
- [12] Y. Sun, "The impact of green buildings on CO2 emissions: Evidence from commercial and residential buildings", *Journal of Cleaner Production*, 469, 143168, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143168>.
- [13] P. J. Zarco-Periñán, F. J. Zarco-Soto, I. M. Zarco-Soto, J. L. Martínez-Ramos, R. Sánchez-Durán, "CO2 Emissions in Buildings: A Synopsis of Current Studies", *Energies*, 15(18), 6635, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15186635>.
- [14] S. Dhakal, J. C. Minx, F. L. Toth, A. Abdel-Aziz, M. J. Figueroa Meza, K. Hubacek, I. G. C. Jonckheere, Y. -G. Kim, G. F. Nemet, S. Pachauri, X. C. Tan, T. Wiedmann, "Emissions Trends and Drivers", *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, P. R. Shukla, J. Skeea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, Eds., Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2023, chapter 2, 215–294, <https://doi.org/10.1017/9781009157926.004>.
- [15] G. Baiocchi, J. C. Minx, "Understanding Changes in the UK's CO2 Emissions: A Global Perspective", *Environmental Science & Technology*, 44(4), 1177–1184, 2010. <https://doi.org/10.1021/es902662h>.
- [16] Department for Energy Security and Net Zero, "Government greenhouse gas conversion factors for company reporting: Methodology paper for conversion factors final report", 2023. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/647f50dd103ca60013039a8a/2023-ghg-cf-methodology-paper.pdf> (20.04.2026)
- [17] C. Jones, D. M. Kammen, "Spatial Distribution of U.S. Household Carbon Footprints Reveals Suburbanization Undermines Greenhouse Gas Benefits of Urban Population Density", *Environmental Science & Technology*, 48(2), 895–902, 2014. <https://doi.org/10.1021/es4034364>.
- [18] E. Hünlerli, G. K. Dolgun, T. Ural, H. Güllüce, D. Karabacak, "Calculation of Muğla Sıtkı Koçman University's Carbon Footprint with IPCC Tier 1 Approach and DEFRA Method", *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 10(1), 1–28, 2024. <https://doi.org/10.34186/klujes.1386656>.
- [19] M. Kaya, "Energy Consumption Patterns and Residential Carbon Footprint in Turkey", *Journal of Environment*, 5(1), 47–58, 2025. <https://doi.org/10.47941/je.2520>.
- [20] C. Yıldız, "Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 12(1), 176–213, 2024. <https://doi.org/10.29109/guisc.1293759>.
- [21] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, "Isıtma ve Soğutma Gün Dereceleri", <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/gun-derece.aspx?a=12&g=yillik&m=63-01&y=1996%E2%80%A62025>, (26.02.2026)
- [22] B. K. Sovacool, C. Cooper, M. Bazilian, K. Johnson, D. Zoppo, S. Clarke, J. Eidsness, M. Crafton, T. Velumail, H. A. Raza, "What moves and works: Broadening the consideration of energy poverty", *Energy Policy*, 42, 715–719, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.007>.
- [23] Ü. Aydın, "Sivas Cumhuriyet Üniversitesi karbon ayak izi envanterinin hesaplanması", *Yüksek Lisans Tezi*, Sivas Cumhuriyet Fen Bilimleri Üniversitesi, Sivas, Türkiye, 2023.
- [24] S. Coşkun, N. Doğan, "Tekstil Endüstrisinde Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 28–35, 2021. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.670336>.
- [25] M. Santamouris, "Cooling the buildings – past, present and future", *Energy and Buildings*, 128, 617–638, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>.
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change, "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (20.04.2026).
- [27] International Energy Agency, "Energy Efficiency 2023", <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023> (20.04.2026).
- [28] Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), "Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge: Cambridge University Press, 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.
- [29] D. Ürge-Vorsatz, R. Khosla, R. Bernhardt, Y. C. Chan, D. Vérez, S. Hu, L. F. Cabeza, "Advances Toward a Net-Zero Global Building Sector", *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 227–269, 2020. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012420-045843>.