



Gerze Meslek Yüksekokulu'nun Karbon Ayak İzi Hesaplaması, Monte Carlo Analizi ve Sürdürülebilirlik Stratejileri

Hüseyin SÖYLER

Sinop Üniversitesi, Gerze Meslek Yüksekokulu, Sinop, Türkiye

Geliş Tarihi: 31.01.2025

Kabul Tarihi: 18.05.2025

Basım Tarihi: 31.07.2025

Atıf yapmak için: Söyler, H. (2025). Gerze Meslek Yüksekokulu'nun Karbon Ayak İzi Hesaplaması, Monte Carlo Analizi ve Sürdürülebilirlik Stratejileri. *Anadolu Çev. ve Hay. Dergisi*, 10(4), 328-337. <https://doi.org/10.35229/jaes.1630670>

How to cite: Söyler, H. (2025). Carbon Footprint Calculation, Monte Carlo Analysis and Sustainability Strategies of Gerze Vocational School. *J. Anatolian Env. and Anim. Sciences*, 10(4), 328-337. <https://doi.org/10.35229/jaes.1630670>

*ORCID: <https://orcid.org/0000-00021216-7049>

***Sorumlu yazarın:**

Hüseyin SÖYLER
Sinop Üniversitesi, Gerze Meslek Yüksekokulu,
Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, 57600, Gerze/
Sinop, Türkiye.
✉: hsoyler@sinop.edu.tr

Öz: Bu çalışmada, Sinop Üniversitesi Gerze Meslek Yüksekokulu yerleşkesinin 2024 yılına ait karbon ayak izi IPCC Tier 1 ve DEFRA yöntemleriyle hesaplanmıştır. Hesaplamalarda ısıtma, elektrik tüketimi ve ulaşım faaliyetlerinden kaynaklanan karbon salınımları dikkate alınmıştır. IPCC Tier 1 yöntemine göre toplam karbon ayak izi 137.404,94 kg CO₂, DEFRA yöntemine göre ise 104.826,96 kg CO₂ olarak belirlenmiştir. Analiz kapsamında, doğalgazdan kaynaklı emisyonların en yüksek değere sahip olduğu; bunu sırasıyla elektrik tüketimi ve ulaşım kaynaklı emisyonların takip ettiği görülmüştür. Karbon ayak izi hesaplamalarının daha doğru ve güvenilir sonuçlar vermesi amacıyla Monte Carlo Simülasyonu (10.000 iterasyon) uygulanmış; simülasyon sonucunda IPCC yöntemi için ortalama emisyon değeri 131.895,5 kg CO₂, standart sapma 3.685,7 kg CO₂, minimum değer 124.555 kg CO₂ ve maksimum değer 139.163 kg CO₂ olarak elde edilmiştir. Ayrıca, IPCC Tier 1 ve DEFRA yöntemlerine göre yapılan hesaplamalar karşılaştırmalı olarak ele alınmış ve yöntemler arası farklar değerlendirilmiştir. Çalışmada ulaşılan sonuçlar doğrultusunda, meslek yüksekokullarında karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik kısa ve orta vadeli uygulanabilir çözüm önerileri geliştirilmiş; kurumsal sürdürülebilirlik yönetimi bağlamında değerlendirmelere yer verilmiştir. Bu yönüyle çalışma, kırsal bölgelerde yer alan eğitim kurumları için uygulanabilir karbon azaltım stratejileri geliştirilmesine katkı sunmakta ve sürdürülebilirlik yönetimi açısından örnek bir model oluşturmaktadır.

Anahtar kelimeler: Karbon ayak izi, sera gazı emisyonu, karbon nötrlüğü, çevresel sürdürülebilirlik, monte carlo simülasyonu.

Carbon Footprint Calculation, Monte Carlo Analysis and Sustainability Strategies of Gerze Vocational School

Abstract: This study presents a comprehensive carbon footprint analysis of Sinop University Gerze Vocational School for the year 2024 using IPCC Tier 1 and DEFRA methodologies. Emissions resulting from natural gas consumption for heating, electricity use, and transportation activities were evaluated. According to the IPCC Tier 1 method, the total carbon footprint was calculated as 137,404.94 kg CO₂, while the DEFRA method yielded 104,826.96 kg CO₂. The analysis identified natural gas as the largest emission source, followed by electricity consumption and transportation. To improve the reliability of the calculations, a Monte Carlo simulation with 10,000 iterations was performed. For the IPCC method, the simulation produced an average emission value of 131,895.5 kg CO₂, with a standard deviation of 3,685.7 kg CO₂, a minimum value of 124,555 kg CO₂, and a maximum value of 139,163 kg CO₂, within a 95% confidence interval. The study also compares the results obtained from the IPCC and DEFRA methods, highlighting the methodological differences. Based on these findings, short- and medium-term mitigation strategies were proposed for reducing carbon emissions in vocational schools, supported by an institutional sustainability perspective. In this respect, the study contributes to the development of applicable carbon reduction strategies for educational institutions located in rural areas and serves as a model for sustainability management.

***Corresponding author's:**

Hüseyin SÖYLER
Sinop University, Gerze Vocational School,
Department of Transport Services, 57600,
Gerze/SINOP, Türkiye
✉: hsoyler@sinop.edu.tr

Keywords: Carbon Footprint, Greenhouse Gas Emission, Carbon Neutrality, Environmental Sustainability, Monte Carlo Simulation.

GİRİŞ

Temel olarak fosil yakıtların yakılması ve ormanların yok olmasından kaynaklanan iklim değişikliği, küresel sıcaklık artışına, aşırı hava olaylarına ve deniz seviyesinin yükselmesine neden olmaktadır. Bu değişiklikler biyoçeşitliliği ve insan refahını önemli ölçüde etkilemekte, mahsul verimliliğini azaltmakta ve doğal afetleri artırmaktadır (Shivanna, 2022). İklim değişikliği tarımı, endüstriyi ve genel kalkınmayı tehdit ederek Dünya'nın büyük bölümünü potansiyel olarak yerleşime elverişsiz hale getirmektedir (Adamo et al., 2021). Bazıları iklim değişikliğinin doğal bir olgu olduğunu savunsa da, çoğu bilim insanı bunun öncelikle insan kaynaklı olduğu konusunda hemfikir (Nda et al., 2018). İklim değişikliğinin bu olumsuz etkilerini azaltma çabaları arasında sera gazı emisyonlarının azaltılması ve ormanların artırılması yer almaktadır. Ayrıca uluslararası anlaşmalar küresel ısınmayı Sanayi Devrimi öncesi seviyelerin 1,5°C üzerinde sınırlamayı hedeflemektedir. Ancak mevcut tahminlere göre bu hedefe ulaşmak için acilen ek önlemlere ihtiyaç olduğu görülmektedir (Shivanna, 2022).

Sanayi Devrimi, atmosferik CO₂ konsantrasyonlarında önemli bir artışa yol açmıştır (Setiawan ve Asvial, 2016). Bu artış temel olarak, küresel insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının %80'inden fazlasını oluşturan fosil yakıtların yaygın kullanımına bağlanmaktadır. Bu etkileri hafifletmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş ve karbon emisyonlarının azaltılması büyük önem taşımaktadır. Stratejiler arasında enerji verimliliğinin artırılması, karbon vergilerinin uygulanması ve yenilenebilir teknolojilere yatırım yapılması yer almaktadır (Akan ve Akan, 2012). Bunların yanı sıra karbon yakalama ve depolama da fosil yakıt yanmasından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak için potansiyel bir çözüm olarak önerilmektedir (Tandon & Mallik, 2018). Fosil yakıtların ekonomik avantajlarının üstesinden gelebilmek için teknolojik ilerlemelere ve destekleyici hükümet politikalarına ihtiyaç vardır (Soeder, 2021).

İklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir gösterge olan karbon ayak izi, bireylerin, kuruluşların veya ürünlerin toplam sera gazı emisyonlarını tipik olarak CO₂ eşdeğeri cinsinden ölçmektedir (Wright et al., 2011). Karbon ayak izi enerji tüketimi, ulaşım ve atık yönetimi gibi faaliyetlerden kaynaklanan doğrudan ve dolaylı emisyonları kapsamaktadır (Ivanova et al., 2023). Karbon ayak izinin azaltılması, enerji verimliliğinin artırılmasını, yenilenebilir enerji kaynaklarının benimsenmesini ve çeşitli sektörlerde sürdürülebilir uygulamaların hayata geçirilmesini içermektedir (Ivanova et al., 2023; Shabir et al., 2023).

Karbon ayak izi hesaplama yöntemlerinde genellikle IPCC Tier 1 ve DEFRA gibi uluslararası kabul

görmüş yaklaşımlar kullanılmaktadır. IPCC Tier 1 yaklaşımı varsayılan emisyon faktörlerini ve yakıt tüketimi verilerini kullanırken, daha yüksek kademeler ülkeye özgü verileri ve daha ayrıntılı modelleri içermektedir. Tier 1 yöntemi basitliği nedeniyle yaygın olarak kullanılsa da bölgesel farklılıkları hesaba katmayabilir. Tier 2 ve Tier 3 gibi daha gelişmiş yöntemler, yerel verileri ve ayrıntılı modelleri bir araya getirerek daha doğru tahminler sağlayabilmektedir (Kim et al., 2011; Lokupitiya & Paustian, 2006). Ancak daha yüksek kademeli yöntemlerin uygulanması genellikle daha kapsamlı veri ve kaynak gerektirir ki bu da birçok ülke için bir kısıtlama olabilir. Kullanılan yöntem ne olursa olsun, Monte Carlo Simülasyonları gibi teknikler aracılığıyla belirsizliklerin ele alınması, karbon ayak izi hesaplamalarının sağlamlığını artırabilir (Şevik ve Şahin, 2024).



Şekil 1. İklim değişikliği ve karbon ayak izi sebepleri ve etkileri.
Figure 1. Causes and effects of climate change and carbon footprint.

Karbon ayak izi hesaplamaları, kuruluşların çevresel etkilerini değerlendirmeleri ve sürdürülebilirlik stratejileri geliştirmeleri için çok önemlidir. Eğitim ve araştırma merkezleri olarak üniversiteler, sürdürülebilirliğin teşvik edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Karbon ayak izlerini doğru bir şekilde hesaplamak için kuruluşların farklı kapsamlardaki çeşitli emisyon kaynaklarını hesaba katabilecek özel araçlara ihtiyacı vardır (Valls-Val & Bovea, 2021). Araştırmalar, kuruluşlarda karbon emisyonlarına en çok katkıda bulunan unsurların genellikle hareketlilik, özellikle de hava yolculuğu ile ısınma ve elektrik için enerji tüketimi olduğunu göstermiştir (Almeida et al., 2014; Loyarte-López et al., 2020). Üniversitelerdeki karbon ayak izi hesaplamalarına ilişkin vaka çalışmaları değerli bilgiler sağlayabilir ve en iyi uygulamaların geliştirilmesine yardımcı olabilir. Ancak bu alanda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Kuruluşların etkili azaltım önlemlerini belirlemelerine ve karbon nötrlüğü hedefleri doğrultusunda çalışmalarına olanak sağlamaktadır (Kiehle et al., 2022).

Meslek yüksekokulunun karbon ayak izini hesaplamak, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda önemli bir adımdır. Kampüsün enerji tüketimi, ulaşım faaliyetleri, atık yönetimi ve kullanılan malzemeler gibi süreçlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının analizi, çevreye olan etkimizin bilimsel olarak ortaya konulmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada, karbon ayak izi hesaplama yöntemlerinden Tier 1 ve DEFRA metotları kullanılarak meslek yüksekokulumuz için karbon ayak izi analizi yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmayla birlikte enerji tüketiminde yenilenebilir kaynaklara yönelme, atık yönetiminde geri dönüşüm oranını artırma ve yeşil ulaşımı teşvik etme gibi hedefler belirlenmiştir. Sürdürülebilirlik ve karbon nötr hedefleri için çeşitli teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojilerin en önemlilerinden biri de yapay zeka teknolojisidir. Günümüzde yapay zeka, eğitim, iletişim, çevre koruma, ekonomi, sağlık, büyük veri analizi ve enerji yönetimi gibi birçok alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Karaoğlu, 2024). Eğitim kurumları gibi büyük enerji tüketimine sahip yapıların karbon ayak izi azaltma stratejilerinde yapay zeka tabanlı optimizasyon algoritmaları, enerji tüketimi profillerini analiz ederek verimliliği artırabilir. Bu teknolojiler, ulaşım emisyonlarının modellenmesinde ve sürdürülebilirlik raporlamalarının doğruluğunda yeni ufuklar açmaktadır. Gerze Meslek Yüksekokulu'nda karbon ayak izi analizi çalışmaları, gelecekte yapay zeka destekli enerji yönetim sistemleri ile entegre edilerek daha hızlı ve kapsamlı bir şekilde sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Elde edilen sonuçlar, kurumumuzun sürdürülebilirlik raporlamalarında kullanılarak çevresel performansın ölçülmesine katkı sağlayacaktır. Bu tür bir analiz, yalnızca kurumumuzun çevreye olan etkisini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda öğrenciler ve çalışanlar arasında sürdürülebilir yaşam bilincini yaygınlaştırmaya da hizmet edecektir.

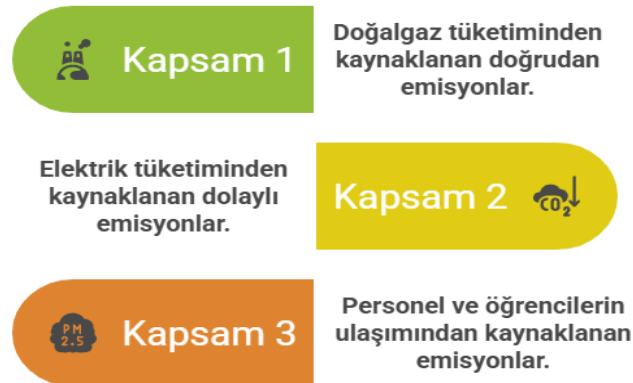
Ayrıca eğitim kurumlarında karbon ayak izi hesaplamaları, çevresel etkilerin sistematik şekilde izlenmesi, enerji ve kaynak kullanımının daha verimli hale getirilmesi ve sürdürülebilirlik stratejilerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tür analizler, yalnızca kurumsal düzeyde değil, aynı zamanda öğrenci ve personel gibi paydaşların farkındalık düzeyinin artırılmasına da katkı sağlamaktadır. Bu tür çalışmalar, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) çerçevesinde değerlendirildiğinde; özellikle Amaç 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji), Amaç 11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) ve Amaç 13 (İklim Eylemi) ile doğrudan ilişkilidir (Bui & Pham 2024; United Nations 2015; Valls-Val & Bovea 2022). Bu bağlamda, yükseköğretim kurumlarında yapılan karbon ayak izi analizleri, ülkemizin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasına katkı sunabilecek nitelikte veriler üretmektedir.

MATERYAL VE METOT

Çalışma Alanının Tanımı: Cittaslow (Yavaş Şehir) hareketi, yerel kimlikleri koruyarak daha sürdürülebilir ve yaşanabilir şehirler yaratmayı amaçlar. Bu hareketin önemli bir unsuru, karbon ayak izinin azaltılmasıdır. Cittaslow şehirleri, enerji tüketimini minimize etmek, yerel ve organik ürünlerin kullanımını teşvik etmek, yeşil alanları artırmak ve toplu taşımayı desteklemek gibi yöntemlerle çevresel sürdürülebilirliği önceliklendirir. Doğal kaynakların daha verimli kullanılması ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu, bu şehirlerin karbon salınımının azaltılmasına katkı sağlar. Ayrıca, şehir sakinlerini bilinçlendirerek bireysel karbon ayak izlerini küçültmelerini teşvik ederler. Bu yaklaşım, sadece çevreye değil aynı zamanda toplumsal refaha da hizmet eder. Cittaslow şehirlerinin iklim değişikliğiyle mücadelede bir model oluşturması, diğer şehirler için ilham kaynağıdır ve daha sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir adımdır (Belli ve Çelik 2022; Brodziński & Kurowska 2021; CittaSlow 2025).

Sinop ilinin Gerze ilçesi Türkiye'deki 26 cittaslow ilçeden bir tanesidir ve ünvanı 2017 yılında almıştır. Karbon ayak izinin hesaplanması ve azaltılması tüm şehirler için önemlidir ancak bu durum cittaslow şehirler için çok daha mühim bir konudur. Bu yüzden cittaslow bir şehirde bulunan Sinop Üniversitesi Gerze Meslek Yüksekokulu'nda karbon ayak izi analizinin yapılması ve azaltılması için farkındalık oluşturmak amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Sinop Üniversitesi Gerze Meslek Yüksekokulu'nda 40 akademik personel, 9 idari personel, 13 yardımcı hizmetler personeli ve 357 öğrenci bulunmaktadır. Karbon ayak izi hesabını yapmak için önce meslek yüksekokulunun toplam elektrik tüketimi ve ısıtma için kullanılan doğalgaz kullanılmıştır. Buna göre; 2024 yılı Ocak ve Aralık ayları arasındaki 12 aylık tüketim miktarları kullanılmıştır. Meslek yüksekokulunda elektrik tüketimi; 4 adet asansör, bina içi ve çevre aydınlatması, personel ofisleri, bilgi işlem odaları, bilgisayar laboratuvarları, tekstil atölyeleri ve öğrenci uygulama mutfağından kaynaklanmaktadır. Doğalgaz tüketimi ise 20 bin metre kare kapalı alanına sahip MYO'nun ısıtılması ve öğrenci uygulama mutfağındaki tüketimden oluşmaktadır. Karbon ayak izi hesaplanırken elektrik ve doğalgaz tüketimlerinin yanı sıra meslek yüksekokulu personeli ve öğrencileri tarafından kullanılan araçlardan kaynaklanan CO₂ salınımı dikkate alınmıştır. Meslek yüksekokulunda görevli bütün personellerin okula gelmek için kullandıkları araçların teknik özellikleri ve meslek yüksekokuluna gelmek için günlük olarak kat edilen mesafeler hesaplanmıştır. Gerze Meslek Yüksekokulu personeline ait araçlar, ulaşım kaynaklı karbon ayak izi hesaplamalarında daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla yakıt türü (benzin, dizel, LPG) ve motor hacmi (litre) bazında sınıflandırılmıştır. Toplam 48 aracın

değerlendirildiği çalışmada, dizel araç sayısı 24, benzinli araç sayısı 16 ve LPG'li araç sayısı 6 olarak tespit edilmiştir. Araçların motor hacimleri genel olarak 1.2–1.6 litre aralığında yoğunlaşmaktadır. Karbon ayak izi hesaplamalarında, her bir yakıt türü ve motor hacmi kombinasyonu için IPCC (2006) ve DEFRA (2020) kaynaklarında yer alan uygun CO₂ emisyon faktörleri kullanılmıştır. Her taşıt grubunun emisyonu ayrı ayrı hesaplanarak, toplam ulaşım kaynaklı karbon emisyonu belirlenmiştir. Ayrıca öğrenim gören kız öğrencilerin 194 tanesi ilçede bulunan Gençlik ve Spor Bakanlığı Kredi ve Yurtlar Müdürlüğü'ne ait yurttan ikamet etmektedir. Öğrenci yurdu ile meslek yüksekokulu arasındaki mesafe ölçülmüştür ve hesaplamalarda bu değer dikkate alınmıştır. Bu çalışmada karbon ayak izini incelemek için, Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 oluşturulmuştur. Buna göre, Kapsam 1 değerlendirmesinde; MYO'nun ısıtılmasında kullanılan doğalgaz tüketimi kullanılmıştır. Kapsam 2'de toplam elektrik tüketimi, Kapsam 3'de ise MYO personeli ve öğrencilerin ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyonları kullanılmıştır.



Şekil 2. Karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan kapsamlar.
Figure 2. Scopes used in carbon footprint calculations.

Tablo 1. Yakıtların net kalorifik değerleri ve emisyon faktörleri.

Yakıt türü	Net kalorifik değer	CO ₂ (kg/TJ)	CH ₄ (kg/TJ)	N ₂ O (kg/TJ)
	(Tj/Gg)			
Motorin	43	74100	3,9	3,9
Benzin	44,3	69300	25	8
LPG	47,3	63100	5	0,1
Doğalgaz	48	56100	5	0,1

Gerze MYO'nun 2024 yılına ait karbon ayak izi hesaplaması yapılırken 2021-2022 yıllarına ait elektrik dönüşüm faktörleri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yayınladığı raporlardan alınmıştır. Bu değerler tablo 2'de verilmiştir (EİGM Raporları, 2023).

Tablo 2. Elektrik tüketim dönüşüm faktörleri.

Yıllar	Dönüşüm faktörü gram CO ₂ /kWh
2021	439
2022	442

MYO'nun Tüketim Verileri: Gerze MYO'ya ait emisyon kaynakları ile ilgili veriler Tablo 3'te verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan elektrik ve doğalgaz tüketim verileri, 2024 yılına ait olmak üzere Sinop Üniversitesi Gerze Meslek Yüksekokulu Müdürlüğü'nden resmi yazı ile talep edilerek temin edilmiştir.

Tablo 3. Tüketim miktarları.

Table 3. Consumption amounts.

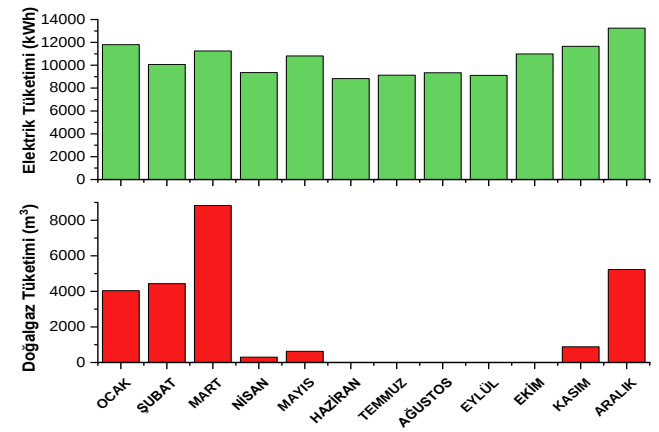
Doğalgaz (m ³)	Elektrik (kWh)	Motorin (lt)	Benzin (lt)	LPG (lt)
Kapsam 1	Kapsam 2	Kapsam 3		
24335	125600	7132	1869	237

MYO'da 12 ay boyunca tüketilen elektrik, doğalgaz ve akaryakıt toplamaları Tablo 4'te verilmiştir. Ayrıca 2024 yılı Ocak ve Aralık ayları arasındaki doğalgaz ve elektrikten kaynaklanan kullanım değerleri Şekil 3'te verilmiştir.

Tablo 4. Gerze MYO emisyon kaynakları.

Table 4. Gerze Vocational School emission sources.

Emisyon kaynakları	Değerleri
Personel sayısı	62
Öğrenci sayısı	1599
Personele ait araç sayısı	48
Isınmada kullanılan yakıt türü (m ³)	Doğalgaz
Öğrenci yurdu ile Meslek yüksekokulu arasındaki mesafe (km)	2,7
Toplu taşıma araçlarının yakıt türü	Dizel



Şekil 3. 2024 yılı aylara göre doğalgaz ve elektrik kullanım oranları.

Figure 3. Natural gas and electricity utilisation rates by months in 2024.

Şekil 3'te Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim ayları arasında genel olarak hava sıcaklıklarının yüksek olmasından dolayı ısınma faaliyeti yapılmadığından bu aylardaki doğalgaz tüketimi sıfır m³'dür.

Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntemleri: Bu çalışmada karbon ayak izi hesaplaması için IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ve DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) yöntemleri kullanılmıştır.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Yöntemi: IPCC, küresel ısınmanın etkilerini değerlendiren ve sera gazı emisyonlarını hesaplamak için kullanılan en yaygın yaklaşımdır. Bu yöntem; Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 gibi üç seviyeden oluşur. Tier 1 seviyesinde, küresel ortalamalar kullanılarak hesaplama yapılır. Bu yöntem, ülke ve sektör bazında emisyon faktörleri kullanır

ve genellikle basit hesaplamalar için uygundur. Tier 2, yerel veriler ve daha detaylı emisyon faktörleri kullanarak daha hassas sonuçlar sağlar. Tier 3, en detaylı ve doğru hesaplama yöntemidir; bu seviyede, ülke veya sektör spesifik veriler ile faaliyetin her bir ayrıntısı göz önünde bulundurularak emisyon hesaplanır. Bu metodoloji, daha hassas ve güvenilir veriler sağlamak amacıyla kullanılır (IPCC 2014; Janssens et al. 2017; Peter et al. 2016).

DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) Yöntemi: Birleşik Krallık Çevre, Gıda ve Köy İşleri Bakanlığı tarafından geliştirilen DEFRA Yöntemi, özellikle İngiltere ve Avrupa için daha yerel verilere dayalı hesaplamalar yapılmasına olanak sağlar. Bu yöntem, elektrik tüketimi, ulaşım, doğalgaz, atık ve diğer sektörlerden kaynaklanan emisyonları hesaplar. DEFRA'nın yaklaşımı, yerel enerji karışımını dikkate alarak, enerji üretiminde kullanılan kaynakların bölgesel farklılıklarını yansıtarak daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar (Cowie, et al., 2012; Greenhouse gas reporting, 2020).

Monte Carlo Simülasyonu: Bu çalışmada, Monte Carlo Simülasyonu, karbon ayak izi hesaplamalarındaki belirsizlikleri değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Monte Carlo Simülasyonu, belirli parametrelerdeki rastgele değişiklikleri hesaba katmak için kullanılan bir tekniktir ve her bir değişkenin (doğalgaz tüketimi, elektrik tüketimi, ulaşım emisyonları vb.) olasılık dağılımlarını modelleyerek büyük sayıda rastgele örneklem üretir (Bari et al. 2023; Gupta, 2014; Heijungs, 2020). Bu yöntem sayesinde, emisyon hesaplamalarının doğruluğu artırılmış ve hesaplamalarda oluşabilecek belirsizlikler daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmiştir. Simülasyon, her bir emisyon kaynağının etkilerini göz önünde bulundurarak 10.000 iterasyon üzerinden gerçekleştirilmiş ve sonuçların %95 güven aralığında 124.555 kg ile 139.163 kg CO₂ arasında değiştiği bulunmuştur. Ortalama karbon emisyon değeri ise 131.895 kg CO₂ olarak hesaplanmıştır. Bu simülasyon, emisyon hesaplamalarının güvenilirliğini artırarak, elde edilen verilerin tutarlılığını ve ölçüm hassasiyetini sağlamıştır. Monte Carlo Simülasyonu, veri kaynaklarındaki potansiyel dalgalanmalara karşı daha sağlam bir tahmin

yapmaya olanak tanımaktadır (Kostić, et al., 2017; Le et al. 2020).

BULGULAR

Gerze MYO'nun 2024 yılı tüketim verileri kullanılarak IPCC Tier 1 yöntemi ve DEFRA yöntemi ile Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 hesaplamaları yapılmıştır. Her bir yakıt türü için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre Kapsam 1 metodunda doğalgaz, motorin, benzin ve LPG için hesaplamalar yapılmıştır. Tablo 5'te IPCC Tier 1 ve DEFRA Yaklaşımlarına göre Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 CO₂ emisyonu miktarları görülmektedir.

Tablo 5 incelendiğinde IPCC Tier 1 yaklaşımına göre; Kapsam 1 içinde yer alan yakıtlar içerisinde en fazla karbon emisyonuna 47.181,08 kg ile doğalgazın sebep olduğu görülmüştür. Bu durum MYO'nun ısıtılmasında doğalgaz kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Ancak 20 bin metrekaare kapalı alanı ısıtmak için doğalgazın kömüre göre çok daha ekonomik ve daha çevreci olduğu düşünülmektedir. Araçlardan kaynaklanan karbon emisyonları incelendiğinde en fazla karbon emisyonun 19.088,74 kg ile motorinden kaynaklandığı görülmektedir.

Bu durumun dizel araçların yakıt tüketimi değerlerinin benzinli araçlardan daha düşük değere sahip olmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Benzinden kaynaklanan karbon emisyonu miktarı ise 5.041,52 kg olarak belirlenmiştir. Son olarak LPG'den kaynaklanan karbon emisyonu fosil yakıtlar içerisindeki en küçük değere sahiptir. IPCC Tier 1 yaklaşımına göre yapılan karbon emisyonunda elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonlar Kapsam 2 altında değerlendirilmiştir. 2024 yılında Gerze MYO'nun elektrik tüketimi toplam 125.600.4 kWh'dır. Buna göre hesaplamalar yapıldığından elektrikten kaynaklanan karbon emisyonunun 62.800 kg olduğu belirlenmiştir.

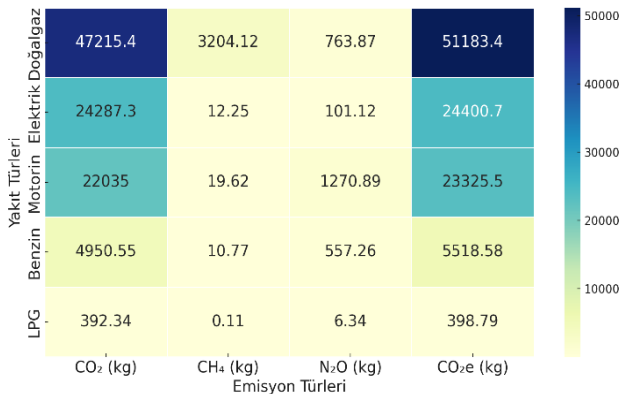
IPCC Tier 1 yaklaşımı; Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3'e göre yapılan analizler sonucundaki karbon emisyonları toplandığında 2024 yılı için Gerze MYO'nun toplam karbon emisyonu 137.404,94 kg olarak bulunmuştur.

Tablo 5. IPCC Tier 1 ve DEFRA yaklaşımlarına göre 2024 yılı CO₂ emisyonu hesabı.

Table 5. CO₂ emission calculation for 2024 according to IPCC Tier 1 and DEFRA approaches.

		Yakıtlar	CO ₂ Salınımı (kg)	CH ₄ Salınımı (kg)	N ₂ O Salınımı (kg)	CO _{2e} Salınımı (kg)
IPCC Tier 1 Yaklaşımı	Kapsam 1	Doğalgaz	47.181,08	608,37	724,39	48.513,85
	Kapsam 2	Elektrik	62.800	94,20	373,49	63.267,69
	Kapsam 3	Motorin	19.119,76	17,83	1271,42	20.409,01
		Benzin	4319,7	9,35	557,26	486,31
		LPG	321,63	0,11	6,34	328,08
		Toplam CO₂ emisyonu				137.404,94
DEFRA Yaklaşımı	Kapsam 1	Doğalgaz	47.215,44	3.204,12	763,87	51.183,43
	Kapsam 2	Elektrik	24.287,33	12,25	101,12	24.400,70
	Kapsam 3	Motorin	22034,95	19,62	1.270,89	23325,46
		Benzin	4950,55	10,77	557,26	5518,58
		LPG	392,34	0,11	6,34	398,79
		Toplam CO₂ emisyonu				104.826,96

Şekil 4'te IPCC Tier 1 metoduna göre hesaplanmış tüm yakıtlara ait emisyon ısı dağılımı haritası verilmiştir.



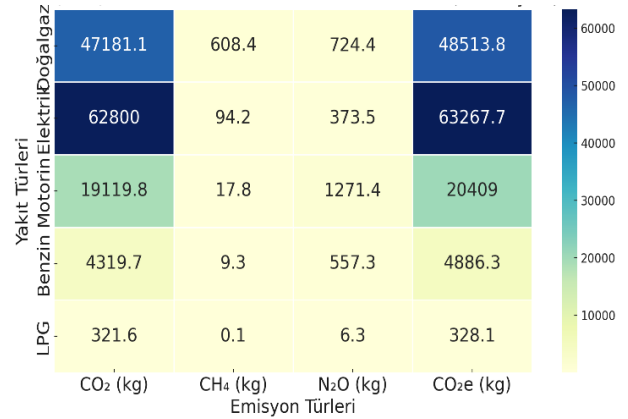
Şekil 4. IPCC Tier 1'e göre emisyon dağılımı ısı haritası.

Figure 4. Emission distribution heat map according to IPCC Tier 1.

Ayrıca aynı tüketim değerleri ile Birleşik Krallık Çevre, Gıda ve Köy İşleri Bakanlığı'nın (Department for Environment, Food ve Rural Affairs, DEFRA) yayımladığı sera gazı emisyon hesaplama yöntemine göre de hesaplama yapılmıştır. Tablo 5 incelendiğinde IPCC Tier 1 metodunda olduğu gibi Kapsam 1 içinde yapılan hesaplamalarda doğalgaz en fazla karbon emisyonu değerine sahiptir. Bu değer 47.215,44 olarak hesaplanmıştır. Fosil yakıtlardan kaynaklanan karbon emisyonları incelendiğinde en fazla karbon emisyonu değerine 22034,95 kg ile motorinin sahip olduğu görülmektedir. Benzinden kaynaklanan karbon emisyonu miktarı ise 4950,55 kg olarak belirlenmiştir. Son olarak LPG'den kaynaklanan karbon emisyonu fosil yakıtlar içerisindeki en küçük değere sahiptir. Bu değer 392,34 kg olarak hesaplanmıştır. DEFRA yaklaşımına göre yapılan karbon emisyonunda elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonlar Kapsam 2 altında değerlendirilmiştir. 2024 yılında Gerze MYO'nun elektrik tüketimi toplam 125.600,4 kWh'dır. Buna göre hesaplamalar yapıldığından elektrikten kaynaklanan karbon emisyonunun 24.287,33 kg olduğu belirlenmiştir. Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 altında yapılan karbon emisyonları toplandığında 2024 yılı için Gerze MYO'nun toplam karbon emisyonu 104.826,96 kg olarak bulunmuştur. Şekil 5'te DEFRA metoduna göre yapılmış emisyon ısı dağılımı haritası verilmiştir.

Her iki yöntemle göre de en yüksek karbon emisyonu, doğalgaz tüketimine bağlı olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, literatürdeki benzer kampüs ölçekli karbon ayak izi çalışmalarını destekler niteliktedir. Kiehle et al., (2023) tarafından Finlandiya'daki bir üniversitede yapılan çalışmada toplam emisyonların %40'ından fazlasının bina ısıtmasında kullanılan doğalgazdan kaynaklandığı rapor edilmiştir. (Kiehle et al.

2023). Benzer başka çalışmada ise, üniversitelerde doğalgaz tüketiminin elektrik ve ulaşımın ardından en yüksek emisyon kaynağı olduğu vurgulanmıştır (Valls-Val & Bovea 2022). Ayrıca, Leal Filho et al. (2019) üniversitelerde enerji tüketiminin önemli bir kısmının doğalgazdan kaynaklandığını ve bunun sürdürülebilirlik stratejilerinde öncelikli bir alan olduğunu belirtmiştir (Leal Filho et al. 2019).



Şekil 5. DEFRA'ya göre emisyon dağılımı ısı haritası.

Figure 5. Emission distribution heat map according to DEFRA.

Elektrik tüketimine bağlı karbon emisyonları, çalışmada ikinci sırada yer almakta olup, özellikle kampüslerde kullanılan aydınlatma, ofis ekipmanları ve ısıtma-soğutma sistemlerinin elektrikle çalışması nedeniyle önemli bir paya sahiptir. Yükseköğretim kurumlarındaki karbon ayak izleri üzerine yapılan son çalışmalar, elektrik tüketimi, ulaşım ve yakıt kullanımının başlıca emisyon kaynakları olduğunu ortaya koymaktadır (Herth & Blok 2023; Paredes et al., 2024; Ridhosari & Rahman, 2020).

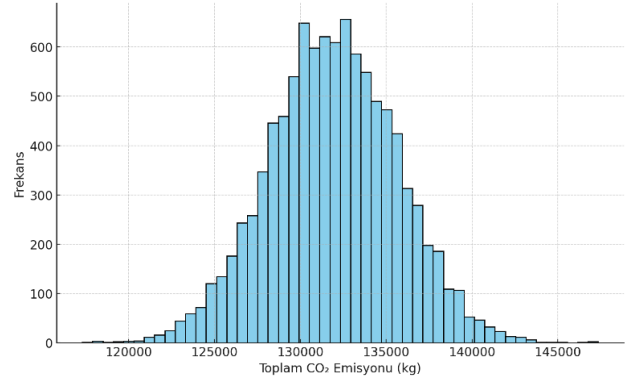
Ayrıca, Türkiye'deki Yükseköğretim kurumlarında yapılan karbon ayak izi analizlerinde, elektrik tüketiminin toplam emisyonların yaklaşık %30'unu oluşturduğu belirtilmiştir (Başoğlu, 2018; Binboğa ve Ünal, 2018; Kmaş et al., 2019; Sreng & Gümrükçüoğlu, 2017).

Ulaşım kaynaklı emisyonlar ise üçüncü sırada yer almakta olup, personel ve öğrenci taşımacılığına dayalıdır. Ulaşım ile ilgili emisyonlar, özellikle toplu taşımanın sınırlı olduğu kırsal alanlarda, yükseköğretim kurumlarının karbon ayak izine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (Kaiser & Barstow 2022; Oestreich et al. 2024). Özellikle kampüs yerleşkesinden uzak konumlanan meslek yüksekokullarında bireysel araç kullanımının yaygınlığı, ulaşım kaynaklı sera gazı emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bu durumu ortaya koyan çalışmalar, toplu taşıma seçeneklerinin sınırlı olduğu bölgelerde ulaşım temelli emisyonların daha yüksek olduğunu ve kampüs erişilebilirliğinin karbon ayak izi üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu doğrulamaktadır. Bu bağlamda Gerze

MYO'nun sonuçları, doğalgaz, elektrik ve ulaşımaya bağlı emisyonların azaltılmasının, sürdürülebilir kampüs hedeflerine ulaşmak açısından kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

MYO'nun 2024 yılında su kullanımından kaynaklanan oluşturduğu toplam karbon emisyon salınımı da hesaplanmıştır. Ancak diğer tüketilen enerji kaynaklarına göre oldukça küçük bir değer bulunmuştur. Bu değer kayda bulunmamış ve hesaplama katılmamıştır.

Karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan emisyon değerlerinin doğruluğu, hesaplamalarda kullanılan verilerin güvenilirliği ve bu verilerdeki belirsizlik düzeyi ile doğrudan ilişkilidir. Doğalgaz, elektrik ve fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyon değerleri farklı faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, hesaplamaların belirsizlik düzeylerinin değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Gerze Meslek Yüksekokulu'nun toplam karbon emisyonuna ilişkin hesaplamalarda kullanılan parametrelerin belirsizlik düzeyi, Monte Carlo Simülasyonu ile analiz edilmiştir. Bu yöntem sayesinde, emisyon hesaplamalarında mevcut belirsizliklerin güven aralıkları belirlenmiş ve olası emisyon dağılımı görselleştirilmiştir. Şekil 6'da Monte Carlo Simülasyonu sonucunda elde edilen toplam karbon emisyonu dağılımı gösterilmiştir. 10.000 iterasyon üzerinden yapılan simülasyon sonucunda, toplam emisyon değerlerinin 124.555 kg ile 139.163 kg CO₂ arasında değiştiği ve ortalama emisyon değerinin 131.895 kg CO₂ olduğu tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçları, hesaplanan toplam emisyon değerinin (%95 güven aralığında) belirsizlik payıyla uyumlu bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Histogramda, emisyon değerlerinin yoğunluğunun 125.000 kg ile 135.000 kg arasında toplandığı gözlemlenmiştir. Bu durum, veri kaynaklarının tutarlılığını ve ölçüm hassasiyetini göstermektedir. Bununla birlikte, düşük standart sapmalı belirsizlik seviyeleri, hesaplamaların genellikle güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde Monte Carlo Simülasyonları, karbon ayak izi analizlerinde sıkça tercih edilen yöntemlerden biridir. Karbon ayak izi çalışmaları, genellikle girdi verilerinin belirsizliği, modelleme tercihleri ve senaryo seçimlerindeki değişkenlikler nedeniyle önemli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Monte Carlo Simülasyonları; bu belirsizlikleri dağıtarak, sonuçlara ilişkin istatistiksel güven aralıkları sunma imkânı sağlar (Henriksson et al., 2015). Buna ek olarak, hassasiyet analizleri, kullanılan modelleme yaklaşımlarının sağlamlığını test etmede ve belirsizliğin azaltılabileceği kritik noktaların belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Wilting, 2012).



Şekil 6. Monte Carlo simülasyonu.

Figure 6. Monte Carlo simulation.

Ancak, ulaşımdan kaynaklanan emisyonlar ve enerji tüketimi gibi parametrelerdeki potansiyel dalgalanmaların, hesaplama sonuçlarını etkileme potansiyeline sahip olduğu unutulmamalıdır. Bu tür analizler, karbon ayak izi hesaplamalarında belirsizliğin azaltılmasına yönelik veri kalitesini iyileştirmenin ve enerji verimliliği projelerini optimize etmenin önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Sinop Üniversitesi Gerze Meslek Yüksekokulu'nun 2024 yılına ait karbon ayak izi IPCC Tier 1 ve DEFRA yöntemleriyle kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Araştırma, karbon emisyonlarının kaynaklarına dair detaylı bir anlayış sunarak, MYO kampüsünün çevresel etkisini azaltmaya yönelik stratejik hedefler belirlenmesine olanak tanımıştır.

Hesaplamalar, enerji tüketiminin ve ulaşım faaliyetlerinin karbon ayak izine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermiştir. Doğalgaz, bina ısıtmasında kullanılan ana yakıt olması nedeniyle en yüksek karbon emisyonuna neden olan kaynak olarak öne çıkmıştır. Elektrik tüketimi ise enerji kaynaklı emisyonlarda ikinci sırada yer almış, özellikle aydınlatma, asansörler ve bilgisayar laboratuvarlarının elektrik tüketiminde büyük rol oynadığı belirlenmiştir. Ulaşım faaliyetleri bağlamında, dizel yakıt kullanan araçların emisyonlara daha yüksek oranda katkıda bulunduğu gözlenmiştir.

Bu bulgular, enerji tüketimi ve ulaşım gibi doğrudan emisyon kaynaklarının yanı sıra, dolaylı emisyonların (örneğin, elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonlar) da dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle IPCC Tier 1 ve DEFRA yaklaşımlarının karşılaştırılması, metodolojik farklılıkların sonuçlar üzerindeki etkisini vurgulamıştır.

IPCC Tier 1 ve DEFRA yaklaşımlarının karbon ayak izi hesaplamalarındaki farklılıkları, kullanılan emisyon faktörleri, sera gazlarının kapsamı, elektrik üretiminde bölgesel enerji karışımı, veri detay seviyesi ve hesaplama metodolojisi gibi unsurlar açıklamaktadır.

IPCC Tier 1 yaklaşımı, küresel ortalamalara dayalı standart emisyon faktörlerini kullanarak daha genel bir perspektif sunarken, DEFRA yöntemi bölgesel enerji karışımını ve yerel faktörleri dikkate alarak daha spesifik sonuçlar üretir. Örneğin, DEFRA metodolojisi İngiltere'nin enerji karışımını dikkate alarak elektrik kaynaklı emisyonları daha düşük hesaplayabilirken, IPCC Tier 1 daha genel bir enerji üretim karışımını varsayabilir. Ayrıca, IPCC Tier 1 yaklaşımı temel düzeyde veri kullanarak daha geniş bir karşılaştırma yapmayı hedeflerken, DEFRA yöntemi sera gazlarının yakıt türüne özgü etkilerini ve kullanım şekillerini detaylı bir şekilde ele alır. Bu durum, özellikle metan (CH₄) ve dinitrojen monoksit (N₂O) gibi sera gazlarının emisyon hesaplamalarındaki farklılıklarda belirginleşmektedir. DEFRA, yerel enerji üretim süreçleri ve ulaşım kaynaklı emisyonları daha ayrıntılı bir şekilde analiz ederken, IPCC Tier 1 daha standart ve basitleştirilmiş bir metodoloji sunar. Bu farklılıklar, iki metodolojinin sonuçları arasındaki farkları açıklamakta ve çalışmanın amacı doğrultusunda uygun metodolojinin seçilmesinin önemini vurgulamaktadır. IPCC Tier 1 daha geniş kapsamlı ve uluslararası karşılaştırmalar için uygun bir çerçeve sunarken, DEFRA yöntemi bölgesel analizlerde daha doğru ve detaylı sonuçlar elde etmek için tercih edilebilir.

Sonuç olarak, Gerze MYO'nun karbon ayak izi azaltma stratejileri, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kullanımı ve yeşil ulaşım çözümlerinin entegrasyonu gibi kapsamlı bir yaklaşım gerektirmektedir. Bu analiz, sadece kampüsün çevresel etkisini azaltmayı değil, aynı zamanda öğrenciler ve personel arasında çevresel farkındalık yaratmayı da hedeflemektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda, karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik öneriler aşağıda sıralanmıştır:

Özellikle kampüs yerleşkesinden bağımsız konumda bulunan meslek yüksekokulları için karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik yerel düzeyde geliştirilecek uygulanabilir stratejiler büyük önem taşımaktadır. Bu kurumlar, merkezi enerji altyapılarına sınırlı erişim nedeniyle kısa ve orta vadeli hedeflerle etkili sonuçlar elde edebilirler.

Kısa Vadeli Hedefler: LED aydınlatma sistemlerine geçilerek elektrik tüketimi azaltılmalı, gereksiz enerji kullanımını önlemek için görsel uyarı sistemleri ve farkındalık eğitimleri uygulanmalıdır. Bireysel karbon ayak izi ölçüm araçları tanıtılarak öğrenci ve personelde çevresel farkındalık artırılmalıdır. Geri dönüşüm kutularının sayısı artırılarak atıkların ayrıştırılması teşvik edilmeli; özellikle organik atıkların kompostlanması sağlanmalıdır. Enerji tüketimini düzenli izlemeye yönelik basit sayaçlar veya mobil uygulamalar

kullanılabilir. "Enerji Farkındalık Haftası" gibi tematik etkinliklerle kampüs içi katılım ve bilinç artırılabilir.

Orta Vadeli Hedefler: Servis güzergâhları optimize edilmeli, yerel belediyelerle iş birliği yapılarak toplu taşıma entegrasyonu sağlanmalıdır. Kampüs çevresinde güneş paneli destekli dış aydınlatma sistemleri gibi küçük ölçekli yenilenebilir enerji uygulamaları hayata geçirilmelidir. Yapay zeka tabanlı enerji yönetim sistemleri ile enerji tüketimi ve karbon emisyonları izlenmeli, tüketim desenlerine göre optimizasyon yapılmalıdır. Bina yalıtım iyileştirmeleriyle doğalgaz tüketimi azaltılmalı; pencere ve kapı contalarının bakımı da buna entegre edilmelidir. Elektrikli araç şarj istasyonları kurulumu, ileride yapılacak sürdürülebilir ulaşım projeleri için altyapı oluşturacaktır.

Bu tür yerel düzeyde uygulanabilir öneriler, özellikle kırsal bölgelerde yer alan meslek yüksekokullarının da karbon nötrlüğü hedeflerine katkı sunmalarını destekleyecek, çevresel duyarlılık ve enerji verimliliği kültürünün yaygınlaşmasına katkı sağlayacaktır.

Gerze Meslek Yüksekokulu özelinde gerçekleştirilen bu karbon ayak izi analizi, sadece kurumun çevresel etkilerinin belirlenmesi açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik yönetimi ve çevresel farkındalık oluşturulması açısından da önemli bir örnek teşkil etmektedir. Elde edilen veriler, enerji tüketimi, ulaşım ve diğer emisyon kaynakları konusunda alınabilecek azaltım önlemlerine yön verecek niteliktedir. Ayrıca bu çalışma, yükseköğretim kurumlarının sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlama potansiyelini göstermekte olup, benzer kurumlar için yol gösterici niteliktedir. Bu kapsamda, karbon ayak izi analizlerinin yaygınlaştırılması, iklim değişikliğiyle mücadele, enerji verimliliği uygulamaları ve yeşil kampüs politikaları açısından ulusal düzeyde stratejik katkı sunabilecektir.

KAYNAKLAR

- Adamo, N., Al-Ansari, N., & Sissakian, V.K. (2021). Review of Climate Change Impacts on Human Environment: Past, Present and Future Projections. *Engineering*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:244741167>
- Akpan, U., & Akpan, G. E. (2012). The Contribution of Energy Consumption to Climate Change: A Feasible Policy Direction. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2, 21-33. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129681378>
- Almeida, J., Verbist, B., Achten, W. M. J., Maertens, M., Muys, B., & Muys, B. (2014). Sustainability in Development Cooperation: Preliminary Findings on the Carbon Footprint of Development Aid Organizations. *Sustainable Development*, 22, 349-359. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53349763>

- Bari, S., Iqbal, A., Rahman, M., & Jat, A. (2023). Probabilistic analysis of transport induced emissions in Melbourne city roads. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2023-01-0890
- Başıoğlu, Y. (2018). Akademisyen ve İdari Personelin Ekolojik ve Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi: Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(3), 464-70. DOI: 10.21923/jesd.427682
- Belli, A., & Çelik, E.Z. (2022). Sürdürülebilir çevre örneği: Türkiye’de yavaş şehirler (Cittaslow). *Birey ve Toplum Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(1), 63-89. DOI: 10.20493/birtop.1082260
- Binboğa, G., & Ünal, A. (2018). Sürdürülebilirlik Ekseninde Manisa Celal Bayar Üniversitesi’nin Karbon Ayak İzinin Hesaplanmasına Yönelik Bir Araştırma. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 21, 187-202. DOI: 10.18092/ulikidince.323532
- Brodziński, Z., & Kurowska, K. (2021). Cittaslow Idea as a New Proposition to Stimulate Sustainable Local Development. *Sustainability*, 13(9). DOI: 10.3390/su13095039
- Bui, H.T.M., Bui, T., & Pham, B.T. (2024). The Role of Higher Education in Achieving Sustainable Development Goals: An Evaluation of Motivation and Capacity of Vietnamese Institutions. *The International Journal of Management Education*, 22(3), 101088. DOI: 10.1016/J.IJME.2024.101088
- CittaSlow. (2025). CittaSlow. <https://www.cittaslow.org/cittaslow>. (26 Mart 2027)
- Cowie, A., Eckard, R., & Eady, S. (2012). Greenhouse Gas Accounting for Inventory, Emissions Trading and Life Cycle Assessment in the Land-Based Sector: A Review. *Crop and Pasture Science*, 63(3), 284. DOI: 10.1071/CP11188
- EİGM Raporları. (2023). EİGM Raporları - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>. (26 Mart 2027)
- Greenhouse Gas Reporting. (2020). Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors 2020 - GOV.UK. <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2020>. (26 Mart 2027).
- Gupta, A.K. (2014). Monte Carlo Simulations. Pp. 69-80 in *Numerical Methods using MATLAB*. Berkeley, CA: Apress.
- Heijungs, R. (2020). On the Number of Monte Carlo Runs in Comparative Probabilistic LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(2), 394-402. DOI: 10.1007/s11367-019-01698-4
- Henriksson, P.J.G., Heijungs, R., Dao, H.M., Phan, L.T., de Snoo, G.R., & Guinée, J.B. (2015). Product Carbon Footprints and Their Uncertainties in Comparative Decision Contexts. *PLOS ONE* 10(3), e0121221. DOI: 10.1371/journal.pone.0121221
- Herth, A., & Blok, K. (2023). Quantifying Universities’ Direct and Indirect Carbon Emissions – the Case of Delft University of Technology. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 24(9), 21-52. DOI: 10.1108/IJSHE-04-2022-0121
- IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. General Guidance and Reporting. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (26 Mart 2027).
- IPCC. (2014). AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change - IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> (26 Mart 2027).
- Ivanova, S., Zhidkova, E., & Prosekov, A. (2023). Limiting the Carbon Footprint of an Enterprise: Calculation Methods and Solutions. *Qubahan Academic Journal*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264955032>
- Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., Bergamaschi, P., Pagliari, V., Olivier, J. G. J., Peters, J. A. H. W., van Aardenne, J. A., Monni, S., Doering, U., Petrescu, A. M. R., Solazzo, E., & Oreggioni, G. D. (2019). EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the Three Major Greenhouse Gas Emissions for the Period 1970-2012.
- Kaiser, N., & Barstow, C.K. (2022). Rural Transportation Infrastructure in Low- and Middle-Income Countries: A Review of Impacts, Implications, and Interventions. *Sustainability*, 14(4), 2149. DOI: 10.3390/su14042149
- Karaoğlu, A. (2024). Yapay Zeka ile Çevre Koruma: Orman Yangınları, Sel ve Afet Yönetimi. In *Sürdürülebilir Gelecek İçin Çevre, Enerji ve Yapay Zeka: Küresel Çözümler ve Stratejiler* (1st ed., p. 162). Efe Akademik Yayıncılık. DOI: 10.59617/efepub2024180
- Kiehle, J., Kopsakangas-Savolainen, M., Hilli, M., & Pongrácz, E. (2022). Carbon footprint at institutions of higher education: The case of the University of Oulu. *Journal of Environmental Management*, 329, 117056. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:254956396>
- Kim, K.-D., Ko, H.-K., Lee, T.-J., & Kim, D.-S. (2011). Comparison of Greenhouse Gas Emissions from Road Transportation of Local Government by Calculation Methods. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27, 405-415.
- Kostić, S., Vasović, N., & Marinković, B. (2017). Robust Optimization of Concrete Strength Estimation Using Response Surface Methodology and Monte Carlo Simulation. *Engineering Optimization* 49(5), 864-77. DOI: 10.1080/0305215X.2016.1211432
- Kumaş, K., Akyüz, A., & Güngör, A. (2019). Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bucak Yerleşkesi Yükseköğretim Birimlerinin Karbon Ayak İzi Tespiti. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1277-1291. DOI: 10.28948/ngumuh.598212
- Le, T.-T., Pham, B.T., Le, V.M., Ly, H.-B., & Le, L.M. (2020). A Robustness Analysis of Different Nonlinear Autoregressive Networks Using Monte Carlo Simulations for Predicting High Fluctuation Rainfall. Pp. 205-12.
- Leal Filho, W., Vargas, V.R., Salvia, A.L., Brandli, L.L., Pallant, E., Klavins, M., Ray, S., Moggi, S., Maruna, M., Conticelli, E., Ayanore, M.A., Radovic, V., Gupta, B., Sen, S., Paço, A., Michalopoulou, E.,

- Saikim, F.H., Koh, H.L., Frankenberger, F., Kanchanamukda, W., Cunha, D.A., Akib, N.A.M., Clarke, A., Wall, T., & Vaccari, M. (2019). The role of higher education institutions in sustainability initiatives at the local level. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1004-15. DOI: [10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.059](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.059).
- Lokupitiya, E., & Paustian, K. (2006). Agricultural Soil Greenhouse Gas Emissions: A Review of National Inventory Methods. *Journal of Environmental Quality*, 35(4), 1413-27.
- Loyarte-López, E., Barral, M., & Morla, J.C. (2020). Methodology for Carbon Footprint Calculation Towards Sustainable Innovation in Intangible Assets. *Sustainability*, 12, 1-14. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213049311>
- Nda, M., bin Adnan, M.S., Ahmad, K.A., Usman, N., Razi, M.A.M., & Daud, Z. (2018). A Review on the Causes, Effects and Mitigation of Climate Changes on the Environmental Aspects. *International Journal of Integrated Engineering*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134840491>
- Oestreich, L., Neuenfeldt Júnior, Á., & Ruiz-Padillo, A. (2024). Guidelines to Promote Sustainable Transport in Higher Education Universities: A Bibliometric and Systematic Review. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 25(8), 1912-28. DOI: [10.1108/IJSHE-07-2023-0266](https://doi.org/10.1108/IJSHE-07-2023-0266)
- Paredes-Canencio, K.N., Lasso, A., Castrillon, R., Vidal-Medina, J.R., & Quispe, E.C. (2024). Carbon Footprint of Higher Education Institutions. *Environment, Development and Sustainability*, 26(12), 30239-72. DOI: [10.1007/s10668-024-04596-4](https://doi.org/10.1007/s10668-024-04596-4)
- Peter, C., Fiore, A., Hagemann, U., Nendel, C., & Xiloyannis, C. (2016). Improving the Accounting of Field Emissions in the Carbon Footprint of Agricultural Products: A Comparison of Default IPCC Methods with Readily Available Medium-Effort Modeling Approaches. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(6), 791-805. DOI: [10.1007/s11367-016-1056-2](https://doi.org/10.1007/s11367-016-1056-2)
- Ridhosari, B., & Rahman, A. (2020). Carbon Footprint Assessment at Universitas Pertamina from the Scope of Electricity, Transportation, and Waste Generation: Toward a Green Campus and Promotion of Environmental Sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119172. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.119172](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119172)
- Setiawan, E.A., & Asvial, M. (2016). Renewable Energy's Role in a Changing World. *International Journal of Technology*, 7, 1280. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113770202>
- Şevik, S.E.Y., & Şahin, A.D. (2024). Quantifying Sectoral Carbon Footprints in Türkiye's Largest Metropolitan Cities: A Monte Carlo Simulation Approach. *Sustainability*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:267985901>
- Shabir, I., Dash, K.K., Dar, A.H., Pandey, V.K., Fayaz, U., & Shivangi Srivastava, R. N. (2023). Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review. *Future Foods*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:256588026>
- Shivanna, K.R. (2022). Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part A, Physical Sciences*, 88, 160-171. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:248502423>
- Soeder, D.J. (2021). Greenhouse gas sources and mitigation strategies from a geosciences perspective. *Advances in Geo-Energy Research*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:237686474>
- Sreng, R., & Yiğit, M.G. (2017). Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü 2015 Yılı Karbon Ayakizi Çalışması. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 21(5), 1095-1099. DOI: [10.16984/saufenbilder.340009](https://doi.org/10.16984/saufenbilder.340009)
- Tandon, S.K., & Mallik, J. (2018). Links between Energy Usage and Climate: Implications on Increasing CO₂ Emissions and Carbon Capture and Storage. *Current Science*, 114, 1430-1437. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:90928205>
- United Nations. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development United Nations Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. *United Nations*.
- Valls-Val, K., & Bovea, M.D. (2021). Carbon Footprint Assessment Tool For Universities: CO2UNV. *Sustainable Production and Consumption*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:244445730>
- Wilting, H.C. (2012). Sensitivity And Uncertainty Analysis In Mrio Modelling; Some Empirical Results With Regard To The Dutch Carbon Footprint. *Economic Systems Research*, 24(2), 141-71. DOI: [10.1080/09535314.2011.628302](https://doi.org/10.1080/09535314.2011.628302)
- Wright, L.A., Coello, J., Kemp, S., & Williams, I.D. (2011). Carbon footprinting for climate change management in cities. *Carbon Management*, 2, 49-60. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:153546752>