

Mobil Yaşam Alanlarında Karbon Ayak İzinin Azaltılması: Enerji Verimliliği ve Çift Tanklı Su Isıtıcı Modelleri

Mehmet Akif KARTAL ^{1,a}, Ahmet FEYZİOĞLU ^{2,b}

¹Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Balıkesir, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-9156-8907; ^bORCID: 0000-0003-0296-106X

Makale Bilgileri

Geliş : 25.03.2025

Kabul : 17.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665293

Sorumlu Yazar

Mehmet Akif KARTAL

mkartal@bandirma.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Tank kontrolü

Sera gazı emisyonu

Karbonsuzlaştırma

LSTM

Maliyet-etkinlik analizi

Atıf şekli: KARTAL, M.A., FEYZİOĞLU, A., (2025). Mobil Yaşam Alanlarında Karbon Ayak İzinin Azaltılması: Enerji Verimliliği ve Çift Tanklı Su Isıtıcı Modelleri. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 899-914.

ÖZ

Bu çalışma, karavan ve mobil konutlar için tek tanklı (STE) ve çift tanklı (DUT) elektrikli su ısıtıcılarını karşılaştırmaktadır. Beş yıllık veri ve LSTM tabanlı yaz tüketim tahminiyle, sıcak su kullanımının mevsimler arası farkının azaldığı ve yıllık %0.56 düşüş gösterdiği belirlenmiştir.

Simülasyonlar, 200 L/1 kW DUT sisteminin STE'ye göre litre başına enerji tüketimini %12.2 azalttığını, Türkiye şebeke emisyon faktörüyle hesaplanan GHG emisyonunu ise ortalama %47.1 düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Yüksek başlangıç maliyetine rağmen DUT sistemlerinin geri ödeme süresi ortalama 3.5 yıl (yüksek elektrik fiyatlarında 2.65 yıl) olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, DUT mimarisinin mobil yaşam alanlarında sürdürülebilir, düşük karbonlu ve ekonomik bir çözüm olduğunu kanıtlamaktadır.

Reducing Carbon Footprint in Mobile Living Spaces: Energy Efficiency and Double Tank Water Heater Models

Article Info

Received : 25.03.2025

Accepted : 17.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665293

Corresponding Author

Mehmet Akif KARTAL

mkartal@bandirma.edu.tr

Keywords

Tank control

Greenhouse gas emission

Decarbonization

LSTM

Cost-effectiveness analysis

How to cite: KARTAL, M.A., FEYZİOĞLU, A., (2025). Reducing Carbon Footprint in Mobile Living Spaces: Energy Efficiency and Double Tank Water Heater Models. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 899-914.

ABSTRACT

This study compares single-tank (STE) and dual-tank (DUT) electric water heaters for caravans and mobile homes. Based on five years of data and an LSTM-based summer consumption forecast, it was determined that seasonal differences in hot water usage are decreasing, with an annual decline of approximately 0.56%.

Simulations revealed that the 200 L/1 kW DUT system reduces energy consumption per litre by up to 12.2% compared to STE, and achieves an average 47.1% reduction in GHG emissions (calculated using Turkey's grid emission factor).

Despite the higher initial cost, the payback period for DUT systems is calculated at an average of 3.5 years (as low as 2.65 years in regions with high electricity prices). The results demonstrate that the DUT architecture provides a sustainable, low-carbon, and economically viable hot water solution for mobile living spaces.

1. GİRİŞ

Avrupa Birliği (AB), 2050 yılına kadar net sıfır karbon hedefine ulaşmak için tasarlanmış, iddialı bir plan olan Yeşil Mutabakatı devreye sokmuştur. AB, bu çevre odaklı büyüme modelini benimseyerek, ekonomik ilerleme ile ekolojik sorumluluğu birleştirmeyi ve küresel CO₂ azaltım çabalarına öncülük etmeyi hedeflemektedir [1].

Ayrıca, Paris İklim Anlaşması'nın belirlediği, küresel ısınmayı sanayi dönemi öncesi seviyelere göre 1,5°C'de sınırlama hedefine ulaşmak için, karbonsuzlaşma (dekarbonizasyon) kritik bir zorunluluk haline gelmiştir. GHG salınımını azaltma ve atmosferdeki CO₂ yoğunluğunu düşürme süreci olan karbonsuzlaşma; ileri teknolojilerden (rüzgâr ve güneş enerjisi gibi) toprağın doğal karbon tutma kapasitesini artırmaya yönelik çözümlere kadar geniş bir yelpazede yöntemleri kapsamaktadır. Bu strateji, hem bilimsel camianın hem de hükümetlerin en önemli araştırma ve uygulama gündemidir [2].

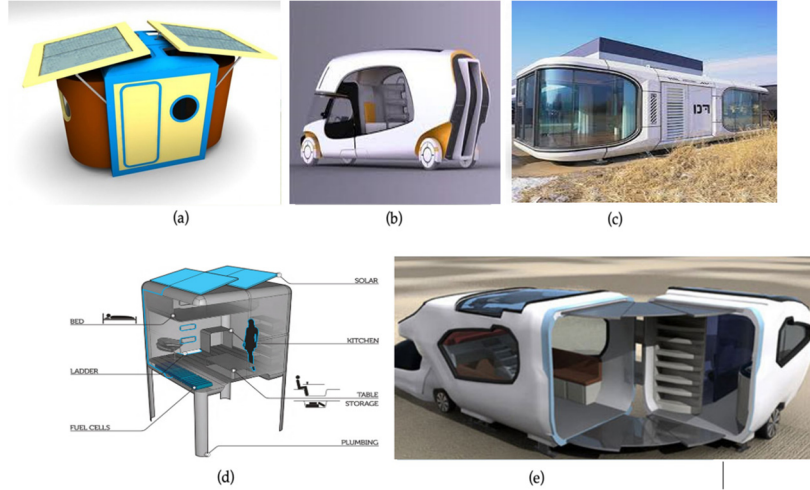
Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir modelleme çalışması, Kaliforniya'daki konut tipi su ısıtma sistemlerinin karbonsuzlaştırılmasına odaklanmıştır. Bu analiz, 2050'ye gelindiğinde ısı pompaları, güneş enerjisi ve akıllı sistemlerin entegrasyonu sayesinde, GHG emisyonlarında 1990 seviyesine kıyasla yüzde 80'in üzerinde bir düşüş sağlanabileceğini ve yıllık 10 milyon tonluk bir tasarruf potansiyeli olduğunu göstermektedir. Bu tür bir enerji dönüşümünün ekonomik yükü, teknolojinin gelişimi, enerji maliyetlerindeki değişimler ve hane halkı su tüketimi gibi faktörlere bağlı kalacaktır [3]. Benzer şekilde, konutlarda mekan ve su ısıtmasının elektrifikasyon yoluyla karbonsuzlaştırılması, fosil yakıt kullanımını azaltarak önemli emisyon düşüşleri sağlayabilir [4]. Karbonsuzlaşma, tüm ulusların iklim değişikliğinin yıkıcı etkilerini hafifletmek ve dünya sıcaklığındaki artışı makul sınırlar içinde tutmak için uygulaması zorunlu olan, merkezi bir politikadır. Dolayısıyla emisyon düşürücü yeşil enerjilere de sürekli yönelim gösterilmesi bunun bir sonucudur [5-8].

1.1. Karavancılıkta Sürdürülebilirlik ve Düşük Karbonlu Seyahatin Yükselişi

Günümüzde, seyahat ve konaklama tercihlerinde karavan kullanımı önemli bir yer tutmaktadır. Avrupa'da bu eğilim oldukça güçlüdür; örneğin, Almanya 673.800'ü aşan karavan sayısı ile lider konumdadır, onu 550.000'den fazla karavanla Birleşik Krallık takip etmektedir [9]. Eurostat verilerine göre, 2019 yılında Avrupa Birliği genelinde vatandaşlar 419 milyonu geçgin geceyi karavan veya kampta geçirmişlerdir. Bu konaklamaların büyük bir kısmı Fransa (128,99 milyon), İngiltere (58,95 milyon) ve İtalya'da (54,99 milyon) gerçekleşmiştir. Bu eğilim ABD'de de görülmekte olup, Outdoor Industry Association 2016'da Amerikalıların yaklaşık 587,01 milyon gün kamp yaptığını raporlamıştır [10].

Çevresel etkiler açısından, karavan seyahati giderek daha fazla ilgi odağı olmaktadır. Gezginler artık tatillerinin iklim üzerindeki etkilerini daha fazla önemsemektedir [11]. Heidelberg merkezli Enerji ve Çevre Araştırmaları Enstitüsü (IFEU) tarafından yapılan bir değerlendirme, karavanla yolculuk yapmanın, uçakla seyahate veya otel konaklamasına kıyasla daha düşük sera gazı salımına neden olduğunu ortaya koymuştur [12]. Benzer şekilde, Öko-Institut tarafından 2007 ve 2013'te yapılan iki çalışma, karavancılığın genel olarak olumlu bir iklim dengesi sunduğunu desteklemektedir [12]. Başka bir analiz, karavan/kamp tatilinin, uluslararası yolculuklara göre daha az maliyetli ve daha az zaman gerektirdiğini belirtmektedir. Tipik bir aile, karavanla seyahat ederek ulaşım harcamalarından %92'ye, CO₂ emisyonlarından ise %95'e varan oranda tasarruf sağlayabilirken, yolculuk süresi de yaklaşık 8,6 saat azalmaktadır [10]. Çevreye duyarlı karavan ve mobil ev tasarımları da bu trendi desteklemektedir. Şekil 1'de görülen, (a), (b), (c) T-Van, (d) Habitat microhome ve (e) ForFreedom gibi yeni nesil mobil evler, sürdürülebilirlik, aerodinamik ve fütüristik görünüme odaklanmaktadır.

Bu araçlar genellikle güneş enerjisi panelleri, gelişmiş yalıtım, entegre tuvalet ve su sistemleri gibi donanımlarla çevresel ayak izlerini minimize etmektedir [13]. Ayrıca, bina entegre fotovoltaiik (BIPV) sistemler içeren solar ev tasarımları, yenilenebilir enerji entegrasyonu ile karavan ve mobil yapıların sürdürülebilirliğini daha da artırabilir [14]. Bu çalışmanın temel hedefi, kamp ve mobil ev sektöründe kullanılan elektrikli su ısıtıcısı (EWH) tankları için optimum bir model geliştirmektir. Daha az enerji tüketen, dolayısıyla daha düşük karbon salımına yol açan bu yeni modelin, karavanların çevre dostu ve sürdürülebilir niteliklerine önemli bir katkı sağlaması beklenmektedir.



Şekil 1. Çevre dostu karavan ve mobil evler: (a) , (b) , (c) T-Van, (d) Habitat microhome mobil ev, (e) ForFreedom karavan [13]

Karavanlarda sıcak su depolama ve ısıtma çözümlerinin iyileştirilmesi, karavan tatillerini daha cazip hale getirecek ve dolaylı olarak düşük karbonlu turizmi teşvik edecektir. Mevcut karavan su ısıtma sistemleri, genellikle gaz, elektrik, dizel veya bunların hibrit kombinasyonları ile çalışabilmektedir [15]. Karavanlar için iki temel sıcak su sistemi türü mevcuttur: suyu bir tankta depolayan depolamalı sistemler ve suyu anlık olarak ısıtan sürekli akışlı (tankless) sistemler [16]. Bu çalışma, kavramsal olarak DTE tarafından tasarlanan, düşük enerji tüketimi ve karbon emisyonu vadeden yeni bir EWH modelini geliştirmeyi ve bu modeli piyasada yaygın olarak kullanılan tek tanklı modellerle karşılaştırmayı amaçlamaktadır.

1.2. Konut Sektöründe Karbonsuzlaştırma Stratejileri ve Elektrikli Su Isıtıcısı Tank Sistemlerinin Enerji Performansı Analizi

Konut sektörü, toplam enerji talebinin artmasında kritik bir rol oynamaktadır. Evlerdeki elektrikli cihazların yaygınlaşması ve kullanım yoğunluğunun yükselmesi hem enerji rezervlerini zorlamakta hem de zararlı çevresel salımları artırmaktadır. Bu meydan okumaya karşı en etkili çözüm, bina yapılarının karbondan arındırılmasıdır. Yenilenebilir güç kaynaklarının entegrasyonu ve binaların enerji performansının yükseltilmesiyle maliyetler düşürülebilirken, ekolojik etkiler de azaltılabilmektedir. Mevcut potansiyelin yüksek olması, bu yönde acil eyleme geçilme gereğini ortaya koymaktadır [17-19]. Avrupa'da yapılan araştırmalar, bina içi elektrik kullanımının artırılması ve özellikle ısı pompaları gibi verimli teknolojilerin, emisyonların düşürülmesindeki kilit rolünü teyit etmektedir [20-22]. Amerika Birleşik Devletleri'nde konutlarda fosil yakıt tüketimi, 2014 yılında ülkenin toplam sera gazı salımlarının (yaklaşık 345,09 milyon metrik ton CO₂ eşdeğeri) yaklaşık %4,99'unu oluşturmuştur [23]. Bu tüketimin büyük kısmı (%69,01) mekân ısıtmasından, önemli bir kısmı ise (%22,10) su ısıtmasından kaynaklanmaktadır [24]. Türkiye gibi doğal gaz fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde, elektrikle çalışan yeni nesil ısıtma cihazları maliyet avantajları nedeniyle tüketiciler tarafından daha çok tercih edilmektedir.

Elektrikli su ısıtıcıları (EWH) ve klimalar, buzdolabı veya çamaşır makinesi gibi diğer ev aletlerine kıyasla yüksek güç gereksinimine sahiptir. Bazı ülkelerde EWH sistemleri, şebekedeki en yüksek talep anlarının önemli bir bölümünü karşılayarak diğer ev aletlerinin %29'undan fazla enerji tüketebilmektedir [25]. Bu sistemlerin en çok iyileştirilme ihtiyacı olan bileşeni EWH tankıdır; çünkü bu tanklar hem ciddi miktarda ev enerjisi harcar hem de termal depolama yetenekleri sayesinde şebekenin pik talep anlarına uyum sağlamak için büyük güç kullanma eğilimindedir [26]. Bu durum, su ısıtıcılarında verimliliği artırmak için konutların anlık talebine uyum sağlayabilen kontrol mekanizmaları geliştirmeyi ve en uygun yönetim sistemini seçmeyi zorunlu kılmaktadır [27-29].

Sıcak su ısıtıcılarının enerji verimliliği, çeşitli koşullar altında pek çok araştırmada incelenmiştir. Bir çalışma, düşük hacimli sıcak su çekimi yapan ailelerin verilerine dayanarak tipik sıcak su tüketim desenlerini belirlemiştir [30-31]. Bu tüketimlerin kısa aralıklarla (yalnızca 10 ila 20 dakika aryla) gerçekleşme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Dinamik bir boru modeli kullanılarak yapılan analizde, ortalama haneler için boru hatlarındaki termal kayıpların, sıcak su tankının sağladığı toplam termal

enerjinin %19 dan fazlasını aştığı tespit edilmiştir. Boru yalıtımı uygulamasının bu kayıpları %5 ila %7 aralığına düşürebileceği öne sürülmüştür [30].

ABD hanelerinden elde edilen ortalama saatlik sıcak su talep profili referans alınarak [32], farklı boyut ve güçteki tek tanklı (STE) ve çift tanklı (DTE) sistemler analiz edilmiştir [33]. Tek tanklı ısıtıcıların sağladığı su hacminin tank kapasitesinden ziyade daha çok güç derecesiyle ilişkili olduğu görülmüştür. Ancak tank hacminin büyümesiyle enerji kullanımının da arttığı saptanmıştır. STE, DTE (seri bağlantılı) ile karşılaştırılarak sıcak su çıktısı ve enerji tasarrufu potansiyeli değerlendirilmiştir. Seri bağlı DTE'lerin, litre başına daha az enerji harcayarak daha fazla sıcak su sağladığı, en iyi performansın ise ikinci tank hacminin toplam hacmin %25'i ve gücünün toplam gücün %75'i olduğu konfigürasyonda elde edildiği belirlenmiştir. Kar ve diğerlerinin daha ileri bir simülasyon çalışması, tek tanklı, tam karışimli DTE ve kademeli DTE performanslarını karşılaştırmıştır [34]. Tam karışimli DTE'nin, aynı boyut ve güçte STE'ye göre litre sıcak su başına %60'a kadar daha fazla sıcak su sağlayarak enerji tüketiminde %55'e kadar düşüş sağladığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, yapılan incelemeler STE'lerin performansının kısıtlı olduğunu ve DTE'lerin her koşulda üstün performans sergilediğini ve daha az enerji tüketimine katkıda bulunduğunu doğrulamıştır [35].

EWH ve klimaların davranışını modellemek ve etkin yerel talep yanıt uygulamaları için bir yöntem sunmak üzere iki farklı model geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, bu modellerin su ve oda sıcaklığını yönetirken senaryo çeşitliliğine ve ayar noktalarına uyum sağlayabildiğini ve doğru çalıştığını göstermiştir. Konut talep yanıt sistemleri uygulandığında, ev gücü tüketiminin kontrol altına alınabileceği ve bu sayede tasarruf edilebileceği gözlemlenmiştir. Mabina ve Mukoma da benzer bir yaklaşımla EWH'leri, stratejik yük azaltma ve yük kaydırma amacıyla doğrudan yük kontrolü için kullanmışlardır [36]. Kontrol stratejileriyle güç tüketimindeki düşüşü ve elektrik fiyatlandırması üzerinden finansal kazançları incelemişlerdir. Çalışmaları, EWH kullanımının planlanması ve yükün düşük maliyetli zamanlara kaydırılmasıyla hem enerji hem de maddi tasarruf elde edilebileceğini göstermiştir. Bu yaklaşımla yaklaşık %36 enerji ve %41 maliyet düşüşü sağlanmıştır. Kepplinger ve arkadaşları [37], tamamen karışimli termal model kullanarak su ısıtıcıları için talep tarafı yönetimini optimize etmişlerdir. Tahmin edilen talep, geçmiş veriler ve en yakın komşu algoritmasıyla belirlenmiştir. Uzun süreli simülasyonlar, gece tarifesine geçişle %12 maliyet ve %12 enerji tasarrufu potansiyeli olduğunu ortaya koymuştur. Booysen ve arkadaşları [38] ise evsel su ısıtma için termostatsız üç farklı kontrol stratejisini incelemiştir: enerji arzını sıcak suyla eşleştirme, sıcaklık çıktısını eşleştirme ve Legionella sterilizasyonunu içeren ikinci stratejinin bir varyasyonu.

Ritchie ve arkadaşları [39-40], iki düğümlü bir EWH termal modeli ekleyerek ve enerji tasarruflarını hesaplayarak bu çalışmaları ileriye taşımıştır. A* optimizasyon algoritması ile tahmin edilen su talebi için en uygun EWH kontrol sırasını belirlemişlerdir. Geçmiş kullanım verilerine dayalı bir su kullanım modeli ile tahminler yaparak, sıcaklık eşleştirme stratejilerinin %2,2, enerji eşleştirme stratejilerinin ise %9,6 enerji tasarrufu sağladığını bulmuşlardır.

Mevcut çalışma, Ritchie ve arkadaşlarının [41] çalışmasının bir devamı ve genişletilmiş halidir. Enerji tüketimi hesaplamalarında diğer araştırmalardaki tank modellerine benzer şekilde tek ve çift tank modellerine odaklanılmaktadır [26,34,42,43]. Bu araştırma, enerji tüketimi hesaplamalarında hem tek hem de çift tank konfigürasyonlarını temel almıştır. Ancak, çalışmamızın bilimsel farklarından biri, yalnızca enerji verimliliğine odaklanmak yerine, bu su ısıtıcı tanklarının sera gazı (GHG) salımlarını hesaplayarak ve iki tank tipini bu emisyon açısından karşılaştırarak, dekarbonizasyon sürecine sağladıkları katkıyı nicel olarak ortaya koymasındır."

2. MATERYAL VE METOT

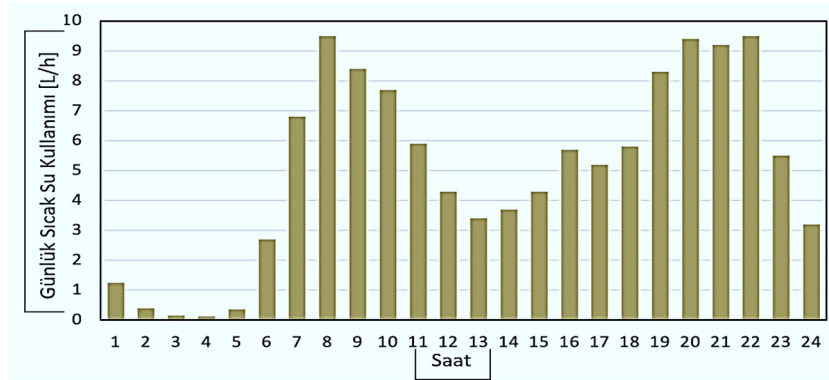
2.1. Konut Tipi Sıcak Su Talep Verilerinin Derlenmesi ve Analizi

Elektrikli su ısıtıcılarının (EWH) performansını değerlendirmede, hanelerin saatlik sıcak su tüketim kalıplarını gösteren profillerin kullanılması esastır. Hane halkı sıcak su kullanım eğilimleri, birçok akademik çalışma ile detaylı olarak incelenmiştir [32,44-46]. İstatistiksel analizler, günlük periyotlarda sıcak su kullanımının saatlik ortalamalar arasında önemli değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur [47,48]. Bu tanımlanmış ve analiz edilmiş veriler, su ısıtıcılarının enerji verimliliğini artırmaya yönelik karşılaştırmalı çalışmalar için temel oluşturur [49].

Bu araştırmanın gereklilikleri doğrultusunda, tank simülasyonlarında kullanılmak üzere hane halkı sıcak su tüketim verileri ölçülerek derlenmiştir. Toplam 25 farklı hanenin 24 saatlik sıcak su kullanım bilgileri, sonbahar ve kış mevsimlerini kapsayan (Ekim'den Mart'a kadar) altı aylık bir süre boyunca kaydedilmiştir. Bu altı aylık dönemin verileri ortalama alınarak, tipik bir ailenin günlük sıcak su kullanım alışkanlığını temsil eden bir tüketim profili oluşturulmuştur. EWH simülasyonunda kullanılan temel fiziksel ve kontrol parametreleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

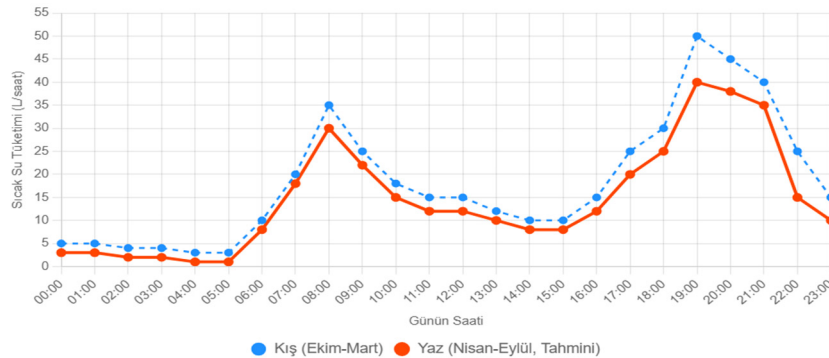
Çizelge 1. EWH simülasyonunda kullanılan temel fiziksel ve kontrol parametreleri

Parametre	Birim	Değer	Açıklama
Toplam tank hacmi V_{top}	L	40	Mobil yaşam alanları için tipik kabul edilen hacim
DUT birinci tank hacmi V_1	L	30	Hızlı ısıtma sağlayan ön tank
DUT ikinci tank hacmi V_2	L	10	Daha düşük sıcaklıkta depolama tankı
Ortam sıcaklığı T_{amb}	C	18	Karavan içi ortalama kış ortam sıcaklığı
Giriş suyu sıcaklığı T_{in}	C	15	Kış dönemi (Ekim-Mart) ortalama şebeke/tank sıcaklığı
Simülasyon süresi t_{sim}	Saat	24	Tipik günlük sıcak su kullanım profilini kapsar
Tank ısı kaybı katsayısı UA	W/°C	0,55	Poliüretan yalıtımlı tipik EWH için kabul edilen değer
Suyun özgül ısı c_p	J/kg°C	4186	Termal analizde kullanılan standart değer



Şekil 2. Saatlik sıcak su kullanım profili

Şekil 2'deki saatlik kullanım profili, tank modellerinin MATLAB/Simulink platformundaki simülasyonlarında girdi olarak kullanılmıştır. Günlük profil incelendiğinde, genellikle sabah erken saatlerde ve akşam saatlerinde olmak üzere iki belirgin tüketim zirvesi görülmektedir. Bu durum, bireylerin tipik olarak uyanma, işten/okuldan dönme ve akşam dinlenme rutinleri sırasında su kullanımını arttırmalarından kaynaklanır.



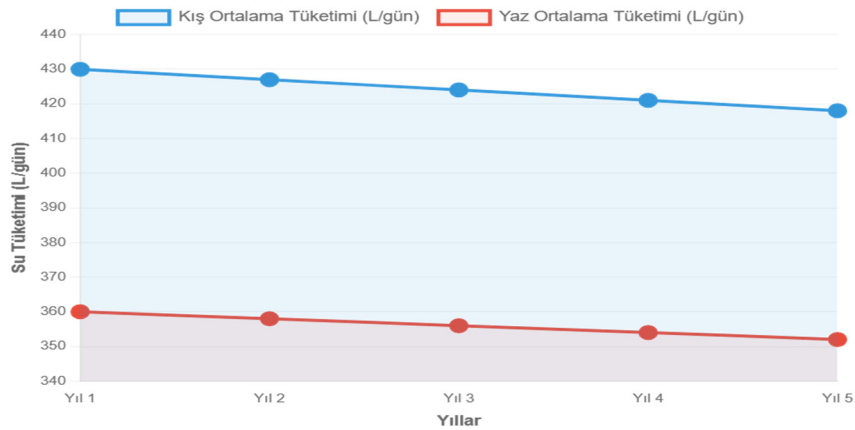
Şekil 3. Kış ve yaz dönemlerinin saatlik sıcak su kullanım profil karşılaştırması

Şekil 3, çizgi türünde gösterilen bir grafik olmakla birlikte iki veri setini içermektedir: Kış (Ekim-Mart) verileri mavi kesikli çizgiyle gösterilirken, Yaz (Nisan-Eylül, Tahmini) verileri ise turuncu düz çizgiyle gösterilmektedir. X eksenini günün saatlerini (00:00 - 23:00), Y eksenini ise sıcak su tüketimini (0 - 55 L/saat) temsil etmektedir. Şekil 3, makalenin 2.1 bölümünde kullanılan Ekim-Mart dönemine ait ortalama günlük sıcak su tüketim profili (Kış Ortalaması) ile bu veriler kullanılarak LSTM tahmin modeliyle elde edilen Nisan-Eylül dönemi (Yaz Tahmini) profilini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Tahmin edilen yaz profili, günün her saatinde kış ortalamasının belirgin şekilde altında yer almaktadır. Bu düşüş, aşağıdaki iki temel fiziksel ve davranışsal faktörle doğrudan ilişkilidir:

- Fiziksel Etki (Giriş Suyu Sıcaklığı): Yaz aylarında şebekeden gelen soğuk suyun sıcaklığı yükseldiği için, suyun istenen 60°C sıcaklığına çıkarılması için gereken termal enerji daha düşüktür. Aynı konfor seviyesini sağlamak için hanelerin toplam hacimsel sıcak su çekim miktarı azalmaktadır.
- Davranışsal Etki: Yaz dönemi boyunca kullanıcıların ev dışında geçirdikleri sürenin artması (tatil, dış mekan aktivitesi) ve buna bağlı olarak ev içi sıcak su talebinin azalması, özellikle akşam zirvesindeki düşüşü desteklemektedir.

Sonuç olarak; LSTM modelinin sunduğu bu profil, DUT için geliştirilen akıllı kontrol stratejisinin hayati önemini göstermektedir. Yaz döneminde toplam tüketimin %16 daha az olacağının öngörülmesi, DUT'un ısıtma döngülerini ve depolama seviyelerini gereksiz yere aşırı ısıtma yapmayacak şekilde ayarlamasına olanak tanır. Bu proaktif kontrol sayesinde, sistemin özellikle gece ve öğle saatlerindeki termal bekleme kayıpları daha da azaltılarak DUT'un mevsimsel enerji verimliliği maksimize edilecektir. Bu da GHG emisyonu azaltım bulgularının özellikle 1 kW ve 2 kW gibi düşük güç seviyelerinde daha da güçlenmesine sebep olacaktır.



Şekil 4. Beş (5) yıllık sıcak su tüketim grafiği

Şekil 4'e göre, beş yıllık dönemde hem kış hem de yaz mevsimlerinde su tüketiminde istikrarlı bir azalma eğilimi gözlemlenmektedir. Kış tüketimi 430 L/gün'den 418 L/gün'e (%2,8), yaz tüketimi ise 360 L/gün'den 352 L/gün'e (%2,2) düşerek, yıllık bazda yaklaşık %0,56'lık sabit bir azalma gerçekleşmiştir. Bu düşüş eğilimi, su tasarruflu teknolojilerin yaygınlaşması, su koruma bilincinin artması ve uygulanan su yönetimi politikalarının etkinliği gibi yapısal faktörlere işaret etmektedir. Ayrıca, kış ve yaz tüketimleri arasındaki farkın 70 L/gün'den 66 L/gün'e daralması, mevsimsel tüketim alışkanlıklarının zamanla daha homojen hale geldiğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular, mevcut su verimliliği politikalarının sürdürülmesi ve tasarruf teknolojilerine yönelik teşviklerin devam etmesi gerektiğini desteklemektedir. Doğrusala yakın seyreden azalma eğrisi, tüketimdeki düşüşün geçici değil kalıcı davranış değişikliklerinden kaynaklandığını ve sistemik bir dönüşümü yansıttığını ortaya koymaktadır. Mevcut trendin devam etmesi halinde, önümüzdeki beş yılda toplam tüketimde yaklaşık %5,4'lük ilave bir düşüş beklenebilir. Bu çalışma, mevsimsel tüketim desenlerinin uzun dönemli analizinin su yönetimi politikalarının etkinliğinin değerlendirilmesinde önemli bir metodolojik araç olarak kullanılabileceğini de göstermektedir.

Çizelge 2. Beş yıllık sıcak su tüketim verilerinin karşılaştırılması

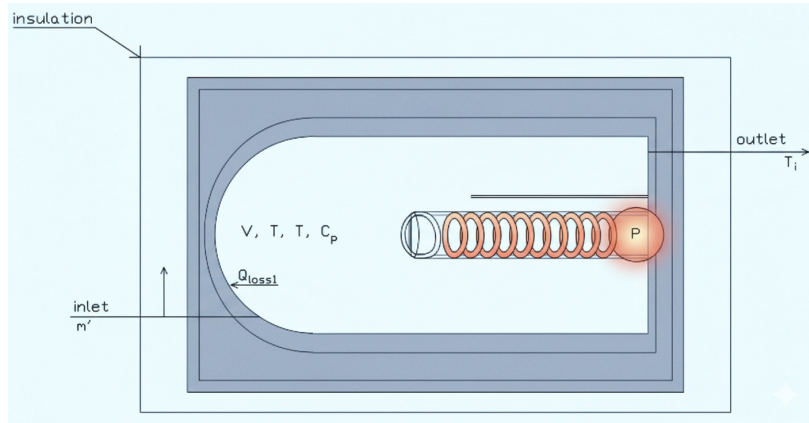
Yıllar	Kış ort. (L/gün)	Yaz ort. (L/gün)	Yıllık ortalama tüketim eğilimi
Yıl 1	430 L	360 L	Referans düzeyi
Yıl 2	427 L	358 L	≈%0.7 Düşüş
Yıl 3	424 L	356 L	≈%1.4 Düşüş
Yıl 4	421 L	354 L	≈%2.1 Düşüş
Yıl 5	418 L	352 L	≈%2.8 Düşüş

5 yıllık dönemde hem kış hem de yaz aylarında su tüketiminde düzenli bir düşüş eğilimi gözlemlenmektedir. Kış aylarında ortalama tüketim 430 L/gün'den 418 L/gün'e, yaz aylarında ise 360 L/gün'den 352 L/gün'e düşmüştür. Buda Çizelge 2'de, toplamda yaklaşık %2.8'lik bir azalmaya karşılık olarak gösterilmektedir.

2.2. EWH Sistemlerinin Termodinamik Modellemesi: STE ve DUT Konfigürasyonları

Çalışmanın modelleme kısmında, Tek Tanklı EWH sistemi Şekil 5'te gösterildiği gibi, tek bir elektrikli ısıtma rezistansına sahip, homojen olarak karışık bir tank olarak tasarlanmıştır. Bu EWH'ler, 50 mm fiberglas yalıtım ile çevrili ve 2 mm çelik tank duvarlarına sahip yapılar olarak modellenmiştir [50]. Her tank için dış yüzey alanı ve tank hacmi arasındaki ilişki, yaklaşık olarak aşağıdaki Eşitlik 1 ile belirlenmiştir:

$$A=6V^{(2/3)} \quad (1)$$



Şekil 5. Debi, enerji, sıcaklık ve hacmi gösteren tek tanklı bir su ısıtıcısının modeli

Bu hesaplamada, boy/çap oranının 2 olduğu varsayılmış ve yalıtım kalınlığından dolayı dış yüzey alanında %10 oranında bir artış faktörü eklenmiştir.

Tank yüzeyinden çevreye yayılan ısı kaybı Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır [51]:

$$Q_{loss}=UA(T-T_a) \quad (2)$$

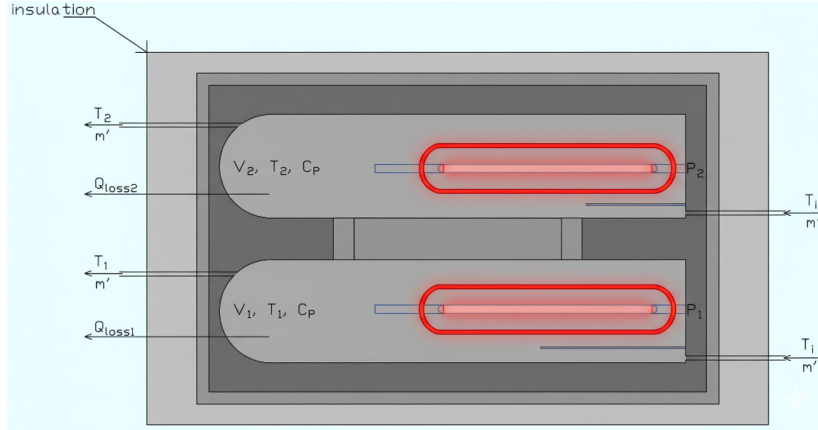
Burada {U}, genel ısı transfer katsayısını; {A}, tankın yüzey alanını; {T}, tank içindeki suyun sıcaklığını; {T_a} ise 20 °C olarak kabul edilen ortam hava sıcaklığını temsil eder [52]. Gelen su sıcaklığı hesaplamalarda 15 °C olarak sabitlenmiştir.

Tank içindeki enerji değişimi ve ısı dengesi ise Eşitlik 3 ile ifade edilmektedir [51-52]:

$$\rho VC_p dT/dt=P+m C_p(T_i-T)-AU(T-T_a) \quad (3)$$

Bu enerji dengesi formülünde ρ suyun yoğunluğunu, V tank hacmini, C_p suyun özgül ısını, T sıcaklığı, t zamanı, m sıcak su akış hızını, T_i gelen soğuk su sıcaklığını ve T_a ortam sıcaklığını ifade eder [52-56].

Çalışmada incelenen Çift Tanklı DTE sistemi, Şekil 6'da gösterildiği gibi seri olarak birbirine bağlanmış iki ayrı tanktan oluşur. Bu DTE konfigürasyonu, toplam hacim kapasitesi $V = V_1 + V_2$ ve toplam güç derecesi $P = P_1 + P_2$ açısından tek tanklı eşdeğerine eşdeğerdir. İki tankın ayrı ayrı hacimleri ve güçleri, maksimum sıcak su çıktısı ve en yüksek enerji tasarrufu sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 6. Akış hızını, enerjiyi, sıcaklığı ve hacmi gösteren bir DUT su ısıtıcısının modeli

Birinci tank için geçici enerji dengesi Eşitlik 4'te, ikinci tank için ise Eşitlik 5'te sunulmuştur:

$$\rho V_1 C_p \frac{dT_1}{dt} = P_1 + \dot{m} C_p (T_i - T_1) - A_1 U (T_1 - T_a) \quad (4)$$

$$\rho V_2 C_p \frac{dT_2}{dt} = P_2 + \dot{m} C_p (T_1 - T_2) - A_2 U (T_2 - T_a) \quad (5)$$

Burada m' sıcak su akış hızını, T_1 ve T_2 ilgili tank bölümlerinin sıcaklıklarını, A_1 ve A_2 ise yüzey alanlarını gösterir. İkinci tank T_2 sıcak suyun kullanıma sunulduğu kısım olduğu için bu sıcaklık kritik öneme sahiptir.

Simülasyonlarda kullanılan hem tek tanklı hem de DTE sistemlerinin toplam kapasiteleri 100 litre ve 200 litre olarak belirlenmiştir. Optimizasyon süreci boyunca, her bir tanka 1, 2, 3 ve 4 kW değerlerinde güç yüklenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında sistemin dengeye ulaşması için simülasyonlar 120 saat (5 gün) boyunca kesintisiz çalıştırılmıştır. Tek tanklı EWH'ler için yapılan parametrik optimizasyon, her tank hacmi ve güç seviyesi için günlük sağlanabilecek maksimum sıcak su miktarını belirlemeyi amaçlamıştır. İkinci tank hacminin toplam hacmin %25'i ve gücünün toplam gücün %75'i olduğu konfigürasyonda elde edilmiştir. Isıtıcıdaki suyun başlangıç sıcaklığı tüm optimizasyonlar için 60 °C kabul edilmiş ve ANSI Standartlarına uygun olarak, Açma-Kapama termostatik kontrol mekanizması kullanılarak bu sıcaklık 60°C ile 65°C aralığında tutulmuştur.

2.3. Tüketilen Elektrik Enerjisi Üzerinden Emisyonların Belirlenmesi

Tek tanklı ve Çift Tanklı su ısıtıcılarının sera gazı {GHG} salımlarını karşılaştırmak amacıyla, öncelikle hesaplanan enerji tüketim değerleri kullanılarak karbon emisyon miktarlarının bulunması gerekmektedir. Herhangi bir elektrikli cihazın çalışması için kullanılan elektrik enerjisi, üretim sürecinde (fosil yakıtlardan elektrik elde edilirken) belli miktarda GHG yayılmasına neden olur. Bu GHG salım miktarını öngörmek için, kullanılan yakıt çeşitlerinin (kömür, doğal gaz, petrol gibi) elektrik üretimindeki payları ve bunlara özgü emisyon faktörleri hesaba katılmalıdır [57]. Elektrik üretimi sırasında ortaya çıkan karbondioksit ve diğer salımlar, kullanılan yakıt karışımına ve santralin operasyonel niteliklerine göre değişkenlik gösterir; bu veriler ülke bazında spesifik olarak sunulur. Ureden ve Ozden [58] tarafından yapılan çalışmada, elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında kullanılan temel formülasyon sunulmuştur. Bu araştırmada da Elektrikli Su Isıtıcısı için emisyon miktarı bu formül esas alınarak tahmin edilmiştir. Elektrik tüketiminden kaynaklanan toplam emisyon miktarını hesaplamak için kullanılan matematiksel ifade Eşitlik 6'da detaylandırılmıştır [59-62]:

$$\frac{E_{kgCO_2}}{year} = \left(\frac{FV_{kWh}}{year} \times EF_{kgCO_2}{kWh} \times T\&DL\% \right) + \left(\frac{FV_{kWh}}{year} \times EF_{kgCO_2}{kWh} \right) \quad (6)$$

burada;

$\frac{E_{kgCO_2}}{year}$ Karbondioksit emisyonu kg'dır $\frac{kgCO_2}{year}$,

FV Faaliyet verileridir (kWh/yıl) Yılda tüketilen toplam elektrik miktarı,

EF Emisyon Faktörüdür (kg CO₂/kWh) (Türkiye için 0,6488 kg CO₂/kWh olarak alınmış ve detaylı bilgi TEİAŞ yıllık raporlarından alınmıştır) [62, 58].

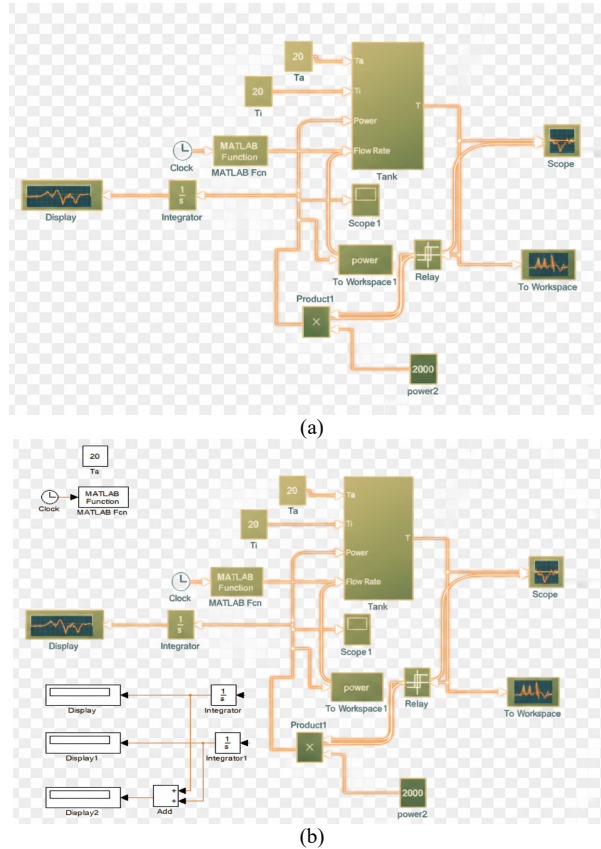
T&DL İletim ve Dağıtım Kayıpları (%13,8)'dir (Türkiye için ortalama %13,8 olarak alınmış ve detaylı bilgi TEİAŞ yıllık raporlarından alınmıştır) [57, 52].

Eşitlik 1'deki FV (kWh/yıl) verisinin kWh/gün verisi olarak kullanılması nedeniyle bu çalışmada emisyon miktarının E kg CO₂/gün olarak hesaplandığını belirtmekte fayda vardır.

3. BULGULAR

3.1. Tank Modelleri Üzerinde Yapılan Simülasyonların Enerji Tüketim Bulguları

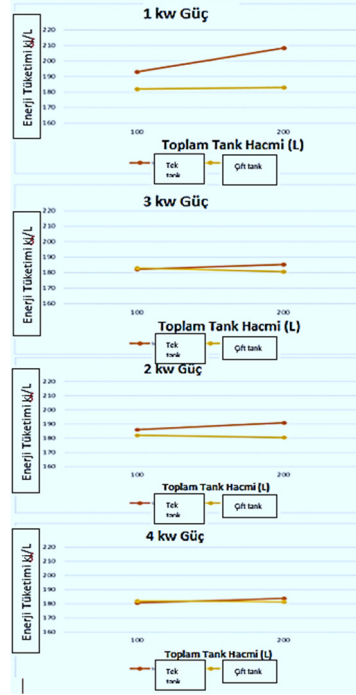
Tek tanklı sistemin enerji sarfıyatı sonuçları, Bölüm 2.2 tanımlanan eşitliklerin uygulanması ve saatlik sıcak su üretiminin günlük toplam tüketim eğilimine göre ayarlanmasıyla elde edilmiştir. Hem tek tanklı hem de çift tanklı sistemler için geliştirilen MATLAB/Simulink ortamındaki açma-kapama kontrollü modeller Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7a,b. Tek ve çift tank MATLAB/Simulink açma-kapama kontrol modelleri

STE ve DUT konfigürasyonlarının istenen sıcak su hacmini sağlamak için ihtiyaç duyduğu enerji miktarı hesaplanmış ve bu sonuçlar, farklı tank hacimleri ve güç seviyeleri baz alınarak Şekil 8'de sunulmuştur.

Şekil 8'deki bulgulara göre, STE simülasyonlarında, aynı güç derecesi ve aynı sıcak su çıktısı sağlansa bile, litre sıcak su başına harcanan enerji miktarı tank hacmi büyüdükçe artış göstermektedir. Daha küçük tanklar litre başına daha az enerji gerektirse de ürettikleri toplam sıcak su miktarı daha düşüktür.



Şekil 8. Farklı güç oranları için sıcak suyun litre başına enerji tüketim eğrileri

Öte yandan, DUT sistemlerinde, aynı güç seviyesi ve çıktı korunurken, litre başına enerji ihtiyacı tank boyutu büyüdükçe azalma eğilimine girer. Bu durum, Şekil 8'deki eğrilerde net biçimde gözlemlenmektedir. Genel olarak, küçük tankların günlük kullanım için sağladığı sıcak suyun daha az olduğu ve ısıtılmış suyun litre başına daha fazla enerji sarfiyatına neden olduğu tespit edilmiştir.

Açma-kapama termostatik kontrol kullanılan STE ile karşılaştırıldığında, DTE ortalama enerji tüketiminde daha düşük değerler sağlamıştır: 1 kW'ta yaklaşık %9; 2 kW'ta yaklaşık %3,7; 3 kW'ta yaklaşık %1,1 ve 4 kW'ta %0,2 gibi düşüşler kaydedilmiştir. 100 litrelik hacim hariç, açma-kapama kontrollü çift tanklı EWH'nin enerji tüketimi oldukça düşüktür. Özellikle 200 litrelik hacim ve 1 kW güç seviyesinde, DUT sisteminin STE'ye göre %12,2 daha az enerji tükettiği belirlenmiştir.

3.2. Tüketilen Elektrik Enerjisi Üzerinden GHG Emisyonunun Hesaplanması

Tek tank ve DUT'un ideal güç oranlarında çalıştırılmasıyla hesaplanan toplam enerji tüketimi ve GHG emisyon değeri (E kg CO₂/gün) Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmiştir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan tank boyutu 100 litredir. Günlük GHG emisyonu (CO₂ eşdeğeri) değerleri, tankların günlük enerji tüketimi kullanılarak Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Enerji tüketimi açısından tek tank için GHG analizi

Güç (W)	Bekleme süresi	Enerji tüketimi (J)	Güç tüketimi (kWh)	GHG emisyon (kg CO ₂ /gün)
45	9.50	1704.74	4.74×10^{-4}	7.31×10^{-4}
50	9.15	1688.27	4.69×10^{-4}	7.24×10^{-4}
65	8.19	1632.84	4.54×10^{-4}	7×10^{-4}
75	7.60	1591.79	4.42×10^{-4}	6.83×10^{-4}
80	7.32	1570.30	4.36×10^{-4}	6.74×10^{-4}

Çizelge 4. Enerji tüketimi açısından DUT için GHG analizi

Güç (W)	Bekleme süresi	Enerji tüketimi (J)	Güç tüketimi (kWh)	GHG emisyon (kg CO ₂ /gün)
45	5.51	910.07	2.53×10^{-4}	3.90×10^{-4}
50	5.28	899.41	2.50×10^{-4}	3.86×10^{-4}
65	4.66	863.86	2.40×10^{-4}	3.71×10^{-4}
75	4.29	837.82	2.33×10^{-4}	3.59×10^{-4}
80	4.12	824.27	2.29×10^{-4}	3.54×10^{-4}

STE ve DUT sistemlere ait GHG emisyon değerleri, Çizelge 5'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu verilere göre, DUT sistemi, uygulanan tüm güç seviyelerinde tek tanklı sisteme göre daha düşük GHG emisyon değerlerine sahiptir. Bu sonuç, EWH modellerinde DUT konfigürasyonlarının tercih edilmesinin, yüksek karbon salımından düşük karbon salımına doğru bir geçişi mümkün kıldığını göstermektedir. Bu geçişin çarpıcı bir örneği olarak, 80 W güç seviyesinde yapılan simülasyon, DUT'un tek tanklı sisteme kıyasla %47,5 oranında daha az GHG salımı yaptığını ortaya koymuştur.

Çizelge 5. DUT'un tek tankla karşılaştırılması

Güç (W)	DUT'un tek tank ile karşılaştırılması
45	%46.62 daha az
50	%46.73 daha az
65	%47.09 daha az
75	%47.37 daha az
80	%47.51 daha az

3.3. DUT Isıtıcıların Enerji Tasarrufu Potansiyelinin Maliyet-Etkinlik Açısından İncelenmesi

3.3.1. Başlangıç Yatırım Giderleri

DUT modelinin, tek tanklı muadillerine göre daha sofistike bir yapıya sahip olması nedeniyle, ilk yatırım maliyetinin daha yüksek olması beklenir. Örneğin, piyasada tek tanklı bir su ısıtıcısının maliyeti 450 ile 1100\$ arasında değişirken, çift tanklı bir sistemin fiyatı yaklaşık 900\$ ile 1600\$ civarında olabilir. Bu durum, DUT modelinin başlangıçta yaklaşık %50 ila %98 arasında daha pahalı olabileceğine işaret etmektedir.

3.3.2. Yatırımın Geri Dönüş Süresi (Amortisman)

DUT modelinin enerji tüketiminde ortalama %47,1'lik bir azalma sağladığı belirtilmiştir. Enerji maliyetlerinin hesaplanmasında bir hanenin yıllık elektrik tüketimini ve elektrik birim fiyatı baz alınmıştır:

Yıllık Enerji Tüketimi: Tek tanklı bir su ısıtıcısı yılda yaklaşık 2000 kWh enerji tüketebilir.
 Elektrik Birim Fiyatı: Türkiye'de ortalama elektrik fiyatı 0,15 USD/kWh olarak alınabilir.
 Yıllık Enerji Maliyeti: $2000 \text{ kWh} \times 0,15 \text{ USD/kWh} = 300 \text{ USD/yıl}$.

DUT modeli enerji tüketimini %47,1 azalttığına göre:
 Yıllık Tasarruf: $300 \text{ USD} \times 0,471 = 141,3 \text{ USD/yıl}$.

Eğer DUT modelinin ilk yatırım maliyeti tek tanklı modele göre 500 USD daha fazla ise:
 Geri Ödeme Süresi: $500 \text{ USD} / 141,3 \text{ USD/yıl} \approx 3,5 \text{ yıl}$.

3.3.3. Uzun Vadeli Finansal Avantajlar

DUT modelinin sağladığı yıllık tasarruf 141,3 USD olarak hesaplanmıştır. 10 yıllık bir kullanım ömrü boyunca:
 Toplam Tasarruf: $141,3 \text{ USD/yıl} \times 10 \text{ yıl} = 1413 \text{ USD}$.

Bu, DUT modelinin uzun vadede önemli bir ekonomik avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

3.3.4. Uzun Vadeli Finansal Avantajlar

Elektrik fiyatları bölgelere göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, elektrik fiyatının 0,20 USD/kWh olduğu bir bölgede:

Yıllık Enerji Maliyeti: $2000 \text{ kWh} * 0,20 \text{ USD/kWh} = 400 \text{ USD/yıl}$.

Yıllık Tasarruf: $400 \text{ USD} * 0,471 = 188,4 \text{ USD/yıl}$.

Geri Ödeme Süresi: $500 \text{ USD} / 188,4 \text{ USD/yıl} \approx 2,65 \text{ yıl}$.

Bu durumda, elektrik fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde DUT modelinin geri ödeme süresi daha da kısalmaktadır.

3.3.5. İşletme ve Bakım Giderleri

Çift tanklı sistemin daha karmaşık yapısı, potansiyel olarak bakım masraflarını artırabilir. Örneğin, tek tanklı bir sistemin yıllık bakım maliyeti 20\$ iken, DUT modelinin bakım maliyeti 30\$ ila 40\$ civarında seyredebilir. Bu da yıllık 10\$ ila 20\$'lık bir ek maliyet anlamına gelir. Ancak, bu ek giderler, elde edilen yıllık enerji tasarrufuyla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır.

Nihai Sonuçlar: DUT modelinin ilk yatırım maliyeti STE'ye göre yaklaşık 500-510\$ daha fazla olabilir. Ortalama geri ödeme süresi 3,4-3,5 yıl civarındadır ve yüksek elektrik fiyatlı bölgelerde 2,4-2,7 yıla kadar düşebilir. 10 yıllık kullanım süresinde 1350\$-1450\$ civarında toplam tasarruf sağlanması beklenirken, ek bakım giderleri önemsizdir. Bu sonuçlar, DUT modelinin hem çevresel GHG azaltımı hem de ekonomik açıdan avantajlı bir çözüm olduğunu desteklemektedir.

3.4. ÇTESİ Modelinin Kontrol Mekanizması

3.4.1. On-Off Kontrol Yaklaşımı

ÇTESİ modelinde uygulanan on-off kontrol mekanizması, tank içine entegre edilmiş sıcaklık algılayıcıları ile senkronize olarak işler. Bu sensörler, tank içindeki suyun termal durumunu sürekli izleyerek, sıcaklık belirlenmiş bir üst veya alt limite ulaştığında ısıtma elemanını aktive ederek ya da pasif duruma getirerek devreden çıkarır. Bu yöntem sayesinde, enerji sarfıyatı en düşük duruma indirgenirken sistemin genel verimliliği de maksimuma çıkarılabilmektedir.

3.4.2. Feedback Sistemleri

Sıcaklık sensörlerinden elde edilen veriler, feedback mekanizmaları aracılığıyla optimizasyonu sağlanmaktadır. Örneğin, su sıcaklığı önceden tanımlanmış bir eşik değerinin altına düştüğü anda, sistem otomatik olarak ısıtma periyodunu aktive eder. Böylelikle konforlu ve sürekliliği sağlanmış verimli bir sistemle sıcak su talebi karşılanmaktadır.

3.4.3. Çift Tank Mimarisi ve Verimlilik

Çift tanklı mimari, sıcak su kütesinin iki ayrı bölüme ayrılmasını sağlayarak, suyun daha verimli kullanılmasını mümkün kılar. Ön tank, gelen suyun hızlı bir şekilde ön ısıtmasını gerçekleştirirken, ikinci tank daha kritik ve yüksek sıcaklıktaki suyun depolanmasını sağlamaktadır. Bu modelleme, suyun termal profillerini optimize ederek sistemin genel enerji verimliliği seviyesini arttırmaktadır.

3.4.4. DUT Performansını Maksimize Eden Hacim ve Güç Optimizasyonu

Çalışma kapsamında, en iyi performans ikinci tank hacminin toplam hacmin %25'i ve gücünün toplam gücün %75'i olduğu konfigürasyonda elde edildiği belirlenmiştir. Bu oranlar hem simülasyon sonuçları hem de literatürdeki deneysel bulgular dikkate alınarak optimize edilmiştir:

- Hacim Optimizasyonu: İkinci tankın görece küçük hacmi, suyun kısmen daha düşük sıcaklıkta depolanmasını sağlayarak, uzun süreli ısı kayıplarını en aza indirmek üzere tasarlanmıştır.

- Güç Optimizasyonu: İkinci tankın yüksek güç değeri, ön tankın başlattığı ısıtma sürecini destekleyerek sistemin kullanıcı taleplerine daha hızlı yanıt vermesini hedefler.

Neticede, bu özel kontrol stratejisi ve yapısal optimizasyon süreçleri, ÇTESI modelinin enerji verimliliğini üst düzeye çıkarırken, aynı zamanda kullanıcı konforu gereksinimlerini de hesaba katmaktadır. Suyun bölümlere ayrılması sistem performansını artırırken, on-off kontrolü ile etkin enerji tasarrufu sağlanmış olur.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, mobil yaşam alanlarında enerji verimliliğini artırmak ve karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla, elektrikli su ısıtıcısı (EWH) tank konfigürasyonlarını (tek tanklı (STE) ve çift tanklı (DUT)) kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Termodinamik modelleme ve simülasyonlara dayanan bu araştırma, DUT sistemlerinin, özellikle belirli tasarım parametreleri altında, STE'lere kıyasla hem enerji tüketimi hem de sera gazı (GHG) emisyonları açısından kayda değer üstünlükler sağladığını ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, DUT modellerinin performansının tank hacmi ve güç seviyesiyle önemli ölçüde değişkenlik gösterdiğini doğrulamaktadır. Kar ve Yazıcıoğlu [34] ile Kar ve Al-Dossary [31] tarafından daha önce vurgulandığı üzere, çift tanklı sistemlerin avantajları, optimize edilmiş hacim ve güç dağılımıyla ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, ikinci tank hacminin toplam hacmin %25'i ve gücünün toplam gücün %75'i olduğu konfigürasyonun optimum performansı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, literatürdeki önceki optimizasyon çalışmalarıyla uyumludur [52]. Simülasyon sonuçları, 100 litrelik küçük tanklar ve yüksek güç seviyeleri (3-4 kW) için enerji tüketimindeki iyileşmenin sınırlı (%0,4 artıştan %1,23 azalışa kadar) olduğunu göstermiştir. Ancak, 200 litrelik bir tank ve 1 kW gibi düşük bir güç seviyesinde, DUT sisteminin enerji tüketiminde STE'ye kıyasla %12,2'lik belirgin bir azalma sağladığı tespit edilmiştir. Bu da DUT sistemleri için daha büyük tank hacimleri ve düşük-orta seviye güç derecelerinin tavsiye edildiği anlamına gelmektedir.

Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri, enerji tüketimindeki bu azalmanın karbon ayak izi üzerindeki somut etkisidir. Enerji tüketim verileri ve Türkiye'ye özgü emisyon faktörü [57,58,62] kullanılarak yapılan hesaplamalar, DUT modelinin, uygulanan tüm güç seviyelerinde (45W- 80W) STE'ye kıyasla ortalama %47,1 daha düşük GHG emisyonu gerçekleştirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, konutlarda enerji verimliliği ve talep tarafı yönetimi üzerine yapılan önceki çalışmaları [35,36,38] destekler nitelikte olup, elektrikli su ısıtmanın karbonsuzlaştırılması [3,6] hedefleri doğrultusunda DUT sistemlerinin etkin bir seçenek olduğunu kanıtlamaktadır.

Çalışmanın bir diğer özgün katkısı, mevsimsel tüketim dinamiklerini ve uzun vadeli eğilimleri LSTM modeli ve beş yıllık verilerle incelemesidir. Tahmin edilen yaz profili ve gözlemlenen yıllık azalma eğilimi, su ısıtma ihtiyacının mevsime ve davranışsal değişkenlere bağlı olduğunu net bir şekilde göstermiştir. Bu dinamik profil, DUT gibi akıllı sistemlerin, ısıtma stratejilerini gerçek ihtiyaca göre uyarlayarak "gereksiz ısıtma" ve termal bekleme kayıplarını daha da minimize etme potansiyelini ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, Booyesen ve arkadaşları [38] ve Ritchie ve arkadaşları [39,40] tarafından vurgulanan, tahmine dayalı kontrol stratejilerinin önemini bir kez daha teyit etmektedir.

Ekonomik analiz, DUT sistemlerinin önündeki en büyük engel olan yüksek başlangıç yatırım maliyetine rağmen, sağlanan enerji tasarrufu sayesinde ortalama 3,5 yıllık makul bir geri ödeme süresi olduğunu göstermiştir. Elektrik fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde bu süre 2,65 yıla kadar düşebilmekte ve 10 yıllık kullanım ömrü boyunca önemli bir net tasarruf sağlanabilmektedir. Bu bulgular, DUT teknolojisinin sadece çevresel değil, aynı zamanda uzun vadede ekonomik açıdan da uygulanabilir olduğunu desteklemektedir.

DUT modelinin mekanizması, sadece mobil yaşam alanlarına özgü bir çözüm olmayıp, termal depolama sistemlerinin genel verimliliğini artıran evrensel bir mühendislik ilkesine dayanmaktadır. Özellikle yüksek elektrik fiyatlarının ve katı GHG düzenlemelerinin olduğu büyük ölçekli konut ve ticari sektörler, bu çalışmada ispatlanan enerji tasarrufu ve emisyon azalımı potansiyelinden önemli ölçüde faydalanabilir. Bu genelleme potansiyeli, çalışmamızın teorik ve pratik değerini önemli ölçüde artırmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, karavan ve mobil yaşam alanları için çift tanklı elektrikli su ısıtıcı sistemlerinin, optimize edilmiş tasarım ve kontrol stratejileriyle birlikte kullanılmasının, enerji verimliliğini artırmada, enerji maliyetlerini düşürmede ve sera gazı emisyonlarını azaltmada son derece etkili bir strateji olduğunu ortaya koymaktadır.

6. TEŞEKKÜR

Veri Kullanılabilirliği Beyanı: Bu çalışmada sıcak su ısıtıcı kullanım profili verileri Ahmet Feyzioğlu ve Abdülkerim Kar'ın "Development of Electrical Water Heaters for Energy Conservation" başlıklı kitabından elde edilmiştir.

7. KAYNAKLAR

1. Fetting, C. (2020). The european green deal. *ESDN Report*, ESDN Office, Vienna.
2. The Paris Agreement, (2016). *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC).
3. Raghavan, S.V., Wei, M., Kammen, D.M. (2017). Scenarios to decarbonize residential water heating in california. *Energy Policy*, 109, 441-451.
4. Sheikh, I. (2017). Decarbonizing residential space and water heating: The case for electrification. *In Proceedings of the eceee 2017 Summer Study on Energy Efficiency*, 1-329. European Council for an Energy Efficient Economy.
5. Shimoda, Y., Sugiyama, M., Nishimoto, R., Momonoki, T. (2021). Evaluating decarbonization scenarios and energy management requirement for the residential sector in Japan through bottom-up simulations of energy end-use demand in 2050. *Applied Energy*, 303, 117510.
6. Kartal, M.A. (2024). Data-driven decarbonization: optimizing p+r in istanbul with machine learning energy modeling and its. *Front. Energy Res.*, 12, 1395814.
7. Kartal, M.A. (2024). Contamination in heat exchangers: types, energy effects and prevention methods. *IgMin Res.*, 2(7), 503-507.
8. Aslan, E. (2024). Araçlarda CO2 emisyonlarının farklı yapay sinir ağı modelleri kullanılarak tahminlerinin karşılaştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(2), 309-324.
9. Butler, D. *Caravanning statistics*. <https://www.finder.com/uk/caravanning-statistics>, Access date: 10.11.2022.
10. Pitchup.com. *Facts and figures*. <https://www.pitchup.com/about/media/>, Access date: 10.11.2022.
11. Federation, E.C. Environment. <https://www.e-c-f.com/artikel/environment/>, Access date: 09.11.2022.
12. Bergk, F., Biemann K., Kämper, C., Kräck, J. & Knörr, W. (2020). Klimabilanz von reisen mit reisemobilen und caravans. *IFEU*, Heidelberg.
13. Five eco friendly caravans for a green living on the go. <https://ecofriend.com/eco-friendly-caravans-green-living.html>, Access date: 09.11.2022.
14. Tantekin, A. & Özdil, N.F. (2022). Energy analysis in a solar house with building-integrated photovoltaic (bipv) system. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(3), 685-698.
15. Things you should know about water heaters for caravans and motor homes. <https://www.truma.com/uk/en/camping-guides/guide-water-heater-caravan>, Access date: 10.11.2022.
16. Caravan Hot Water Heaters. <https://ringhotwater.com.au/product-category/caravan-rv/caravan-hot-water-heaters/>, Access date: 11.10.2022.
17. Dennis, K. (2015). Environmentally beneficial electrification: electricity as the end-use option. *The Electricity Journal*, 28(9), 100-112.
18. Munuera, L., Bradford, J., Kelly, N. & Hawkes, A. (2013). The role of energy efficiency in decarbonising heat via electrification. *Proc. ECEEE 2013 Summer Study on Energy Efficiency*, 1159-1164.
19. Wei, M., Nelson, J.H., Greenblatt, J.B., Mileva, A., Johnston, J., Ting, M., Yang, C., Jones, C., McMahon, J.E. & Kammen, D.M. (2013). Deep carbon reductions in california require electrification and integration across economic sectors. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014038.
20. Kelly, J.A., Fu, M. & Clinch, J.P. (2016). Residential home heating: the potential for air source heat pump technologies as an alternative to solid and liquid fuels. *Energy Policy*, 98, 431-442.

21. Maclean, K., Sansom, R., Watson, T. & Gross, R. (2016). Managing heat system decarbonisation: comparing the impacts and costs of transitions in heat infrastructure. *Imperial College Centre for Energy Policy and Technology*, 1-62.
22. SNET, E. (2016). Final 10-year etip snet r&i roadmap covering 2017-26. *European Technology and Innovation Platform Smart Networks for the Energy Transition (ETIP SNET)*.
23. EPA, U. (2016). Inventory of us greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2014. EPA 430-R-16-002. *US Environmental Protection Agency Washington, DC, USA*.
24. U.S. Department of Energy. (2012). 2011 Buildings energy data book. *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy*.
25. Nehrir, M.H., Jia, R., Pierre, D.A. & Hammerstrom, D.J. (2007). Power management of aggregate electric water heater loads by voltage control. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, 1-6.
26. Diao, R., Lu, S., Elizondo, M., Mayhorn, E., Zhang, Y. & Samaan, N. (2012). Electric water heater modeling and control strategies for demand response. *IEEE power and energy society general meeting, IEEE*, 1-8.
27. Aalami, H.A. & Nojavan, S. (2016). Energy storage system and demand response program effects on stochastic energy procurement of large consumers considering renewable generation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(1), 107-114.
28. Ahmed, M.S., Mohamed, A., Homod, R.Z., Shareef, H., Sabry, A.H. & Khalid, K.B. (2015). Smart plug prototype for monitoring electrical appliances in home energy management system. *IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd), IEEE*, 32-36.
29. Balke, E.C., Healy, W.M. & Ullah, T. (2016). An assessment of efficient water heating options for an all-electric single family residence in a mixed-humid climate. *Energy and Buildings*, 133, 371-380.
30. Carrington, C., Warrington, D. & Yak, Y. (1985). Structure of domestic hot water consumption. *International Journal of Energy Research*, 9(1), 65-75.
31. Kar, A. & Al-Dossary, K. (1995). Thermal performances of water heaters in series. *Applied energy*, 52(1), 47-53.
32. Becker, B. & Stogsdill, K. (1990). A domestic hot water use database. *ASHRAE Journal*, 32(9), 21-25.
33. Kar, A.K. & Kar, Ü. (1996). Optimum design and selection of residential storage-type electric water heaters for energy conservation. *Energy Conversion and Management*, 37(9), 1445-1452.
34. Kar, A., Yazıcıoğlu, R. & Yazıcıoğlu, O. (2020). Thermal optimization of partitioned electric water heaters for energy conservation. *Journal of Energy Research and Reviews*, 6(1), 59-73.
35. Ahmed, M.S., Mohamed, A., Homod, R.Z., Shareef, H. & Khalid, K. (2016). Modeling of electric water heater and air conditioner for residential demand response strategy. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(16), 9037-9046.
36. Mabina, P.G. & Mukoma, P. (2019). Energy optimization and management of electric water heaters using direct load control. *The Southern African Energy Efficiency Confederation Conference (SAEEEC)*, Farm Inn, Silver Lakes, Pretoria.
37. Kepplinger, P., Huber, G. & Petrasch, J. (2015). Autonomous optimal control for demand side management with resistive domestic hot water heaters using linear optimization. *Energy and Buildings*, 100, 50-55.
38. Booysen, M., Engelbrecht, J., Ritchie, M., Apperley, M. & Cloete, A. (2019). How much energy can optimal control of domestic water heating save? *Energy for Sustainable Development*, 51, 73-85.
39. Ritchie, M., Engelbrecht, J. & Booysen, M. (2021). A probabilistic hot water usage model and simulator for use in residential energy management. *Energy and Buildings*, 235, 110727.
40. Ritchie, M.J., Engelbrecht, J.A. & Booysen, M.J. (2021). Practically-achievable energy savings with the optimal control of stratified water heaters with predicted usage. *Energies*, 14(7), 1963.
41. Feyzioglu, A. (2012). Development of control strategies and implementation to electrical water heaters for energy conservation. *Thesis for the degree of doctor of philosophy in mechanical engineering*, Marmara University, Turkey.
42. Kondoh, J., Lu, N. & Hammerstrom, D.J. (2011). An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-8.
43. Engelbrecht, J., Ritchie, M.J. & Booysen, M. (2021). Optimal schedule and temperature control of stratified water heaters. *Energy for Sustainable Development*, 62, 67-81.

44. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (1993). ANSI/ASHRAE Standard 90.2-1993: Energy efficient design of low-rise residential buildings. Atlanta, 53-54 (Section 8.9.4, hourly domestic hot water fraction and table 8-4, daily domestic hot water load profile).
45. Bouchelle, M.P., Parker, D.S. & Anello, M.T. (2000). Factors influencing water heating energy use and peak demand in a large scale residential monitoring study (FSEC-CR-1671-00). *Florida Solar Energy Center*, University of Central Florida.
46. Perlman, M. & Mills, B. (1985). Development of residential hot water use patterns. *ASHRAE Transactions*, 91(2A), 657-679.
47. Ahmed, K., Pylsy, P. & Kurnitski, J. (2016). Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings. *Solar Energy*, 137, 516-530.
48. Fuentes, E., Arce, L. & Salom, J. (2018). A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1530-1547.
49. Fahey, P. & Parker, D. (2004). A review of hot water draw profiles used in performance analysis of residential domestic hot water systems. *Florida Solar Energy Center*, 2.
50. Abdi Hejazi, S. (1989). Sizing a storage type water heating system. *ASHRAE Journal*, 31(2), 35-40.
51. Mínguez, J. M. (1987). Water-heaters in series. *International Journal of Energy Research*, 11(1), 145-151.
52. Feyzioğlu, A. & Kar, A.K. (2016). Development of control strategies and implementation to electrical water heaters for energy conservation. *Cybernetics and Information Technologies*, 16(4), 98-112.
53. Kartal, M.A., Ersoy, S. & Atakök, G. (2024). Cooling and multiphase analysis of heated environmentally-friendly R152a (c2h4f2) fluid coming from the production process according to nist indicators. *Applied Sciences*, 14(10), 4143.
54. Kartal, M.A. & Feyzioğlu, A. (2024). Experimental comparison and numerical heat analysis of new designed shell and tube-heat exchanger with designed geometry at different baffle intervals: status of energy efficiency. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 1845-1859.
55. Kartal, M.A. & Feyzioğlu, A. (2024). Numerical analysis of altered parallel flow heat exchanger with promoted geometry at multifarious baffle prolongs. *Energies*, 17, 1676.
56. Kartal, M.A. & Feyzioğlu, A. (2023). Numerical analysis of multipurpose shell-tube-heat exchanger withal stylized geometry at different baffle gaps and various flow rates. *Case Studies in Thermal Engineering*, 52, 103810.
57. Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, Access date: 17.10.2022.
58. Ureden, A. & Ozden, S. (2018). Kurumsal karbon ayak izi nasıl hesaplanır: teorik bir çalışma. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 98-108.
59. Holloway, S., Akai, M., Pipatti, R. & Rypdal, K. (2006). Carbon dioxide transport, injection and geological storage. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2(5), 1-32.
60. The Greenhouse Gas Protocol (2015). World Business Council for Sustainable Development, *World Resources Institute*.
61. Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü (2022). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı*.
62. Saidur, R., Masjuki, H.H., Jamaluddin, M. & Ahmed, S. (2007). Energy and associated greenhouse gas emissions from household appliances in malaysia. *Energy Policy*, 35(3), 1648-1653.