ENERJİ VE ISIL SİSTEMLERDE GÜNCEL TEKNOLOJİLER: PERFORMANS ANALİZİ VE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

EDİTÖR
PROF. DR. HASAN KÖTEN





BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Enerji ve Isıl Sistemlerde Güncel Teknolojiler: Performans Analizi Ve Mühendislik Uygulamaları

Editör: Prof. Dr. HASAN KÖTEN

ISBN: 978-625-5057-97-6

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İÇİNDEKİLER

MERKEZ ALICILI GÜNEŞ KULESİ SİSTEMLERİNİN FARKLI İKLİM KOŞULLARINDA SAM TABANLI PERFORMANS ANALİZİ: BATMAN ÖRNEĞİ 1

HASAN OKTAY, MEHMET ZERRAKKİ IŞIK, RASİM BEHÇET

ISI POMPALARININ ÇEVRESEL PERFORMANSINDA ELEKTRİK ÜRETİM KAYNAĞININ ROLÜ 27

AHMET ÇAĞLAR, ARİF EMRE ÖZGÜR

TAŞIT KLİMA SİSTEMLERİNDE NANOSOĞUTUCU AKIŞKANLARIN PERFORMANS ANALİZİ 47

METİN YILMAZ, CANAN CİMŞİT, ELİF ÖĞÜT

BÖLÜM 1

MERKEZ ALICILI GÜNEŞ KULESİ SİSTEMLERİNİN FARKLI İKLİM KOŞULLARINDA SAM TABANLI PERFORMANS ANALİZİ: BATMAN ÖRNEĞİ

HASAN OKTAY[1]
MEHMET ZERRAKKİ IŞIK[2]
RASİM BEHÇET[3]

Giriş

Enerji ihtiyacının her geçen gün artması ve fosil yakıtlardan kaynaklanan çevresel sorunlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını gerekli hâle getirmektedir. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi, hem elektrik hem de ısı üretimi için değerlendirilebilmesi bakımından önemli bir yere sahiptir. Güneş enerjisinden elektrik üretiminde iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Fotovoltaik (PV)

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-0917-7844
[2]Doç. Dr., Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-9753-6458
[3]Prof. Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-6897-3066

sistemlerde güneş ışınımı doğrudan elektriğe çevrilirken, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemlerinde önce yüksek sıcaklıkta ısıl enerji elde edilmekte ve bu enerji bir güç çevriminde elektrik üretimi için kullanılmaktadır (Behar et al., 2013) (Kalogirou, 2023).

CSP uygulamalarında parabolik oluk, doğrusal Fresnel, parabolik çanak ve merkez alıcılı güneş kuleleri olmak üzere farklı sistemlerden yararlanılmaktadır. Merkez alıcılı sistemin diğerlerinden ayrılan özelliği, güneşi iki eksende takip eden heliostatların ışınımı tek bir alıcı yüzeyinde toplamasıdır. Kule üzerine yerleştirilen bu alıcıda yüksek sıcaklık elde edilebilmekte ve ısının buhar üretiminde kullanılmasıyla Rankine çevrimi çalıştırılabilmektedir. Sisteme bir ısıl depolama ünitesinin eklenmesi hâlinde, gündüz elde edilen enerjiden güneş ışınımının azaldığı saatlerde de yararlanılması mümkündür (Ho & Iverson, 2014).

Bir güneş kulesi santrali temel olarak heliostat alanı, kule, merkezi alıcı, ısı transfer akışkanı, depolama tankları ve buhar güç çevriminden oluşmaktadır. Heliostatların yerleşimi özellikle önemlidir. Aynaların birbirini gölgelemesi, yansıyan ışının başka bir ayna tarafından engellenmesi ve güneş ışınının aynaya geliş açısı, alıcıya ulaşan enerjiyi azaltmaktadır. Dolayısıyla aynı DNI değerinde bile günün farklı saatlerinde alıcıya aktarılan ısıl güç değişebilmektedir. Heliostat alanındaki bu kayıplar, güneş kulesi tasarımlarında dikkate alınan başlıca optik parametrelerdir (Collado & Guallar, 2013).

Alıcı yüzeyine yönlendirilen güneş ışınımı, borular içerisinden geçen ısı transfer akışkanına aktarılmaktadır. Yüzey sıcaklığının yükselmesi faydalı ısı geçişini artırmakla birlikte çevreye olan taşınım ve ışınım kayıplarını da artırabilmektedir. Bu nedenle alıcı veriminin yalnızca yüksek sıcaklık elde edilmesine göre değerlendirilmemesi, özellikle dıştan silindirik alıcılarda gelen

ışınım ile akışkana aktarılan faydalı ısı arasındaki farkın belirlenmesi gerekmektedir (Ho & Iverson, 2014).

Merkez alıcılı santrallerde kullanılan eriyik tuzun önemli avantajlarından biri, ısı transfer akışkanı olarak görev yaparken depolama amacıyla da kullanılabilmesidir. Soğuk tanktan alıcıya gönderilen tuz ısıtıldıktan sonra sıcak tanka alınmakta, ihtiyaç duyulduğunda buhar üretim sistemine verilerek elektrik üretimi sağlanmaktadır. Böylece güneş ışınımının mevcut olmadığı saatlerde bile enerji üretimi devam ettirilebilmektedir (Gil et al., 2010). Uluslararası Enerji Ajansı (UEA), CSP santrallerinde elektrik üretiminin zamanlamasının kontrol edilebilmesi bakımından önemli olduğunu belirtmektedir (International Energy Agency, 2014).

Güneş kulesi santralinin kurulacağı bölgenin belirlenmesinde doğrudan normal ışınım (DNI) temel verilerden biridir. Çünkü heliostat aynalarının alıcıya yönlendirebildiği ışınım, esas olarak bu bileşenden sağlanmaktadır. Bunun yanında bölgenin yalnızca yıllık DNI toplamına bakılarak değerlendirilmesi yeterli olmamakla birlikte, güneş ışınımının hangi saatlerde yüksek olduğu, ortam sıcaklığı, rüzgar koşulları, santralin devreye girme süresi ve yardımcı elektrik tüketimleri de yıllık net üretimi etkilemektedir. (Kesseli et al., 2018). Bu sebeple bölgesel karşılaştırmada ışınım değerleriyle birlikte santralin çalışma sonuçlarının da incelenmesi gerekmektedir (Zhang et al., 2013).

Bu tür yaklaşımların yapılabilmesi için güneş heliostat alanından buhar çevrimine kadar olan tüm bileşenlerin birlikte modellenmesi gerekir. National Renewable Energy Laboratory tarafından geliştirilen System Advisor Model (SAM), meteorolojik verileri kullanarak santralin yıl boyunca elde ettiği enerjiyi hesaplayabilmektedir (National Renewable Energy Laboratory, 2025). SAM ile kullanılan SolarPILOT ise heliostat yerleşiminin oluşturulması ve alanın optik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiştir Eriyik tuzlu güneş kulesi modelinde alıcı, depolama

ve güç çevrimine ait enerji akışları saatlik olarak izlenebilmektedir. (Wagner & Wendelin, 2018).

Dünyadaki güneş kulesi uygulamalarına bakıldığında İspanya'nın Sevilla bölgesi önemli örneklerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bölgenin yüksek güneş kaynağı ve depolamalı santral uygulamaları, karşılaştırmalı performans çalışmalarında kullanılmaları açısından öne çıkmaktadır (Avila-Marin et al., 2013). Türkiye'de ise merkez alıcılı güneş kulesi teknolojisinin uygulama düzeyi, fotovoltaik güneş enerjisi sistemleriyle karşılaştırıldığında oldukça sınırlıdır. Özellikle Mersin ili, güneş kulesi teknolojisinde başlangıçtan ileri uygulamalara yönelik çalışmalar bakımından dikkate değer bir pilot konumdadır (Erdil, 2013). Batman ili, yıllık yaklaşık 2850 saat güneşlenme süresi ve 1600–1650 kWh/m²-yıl düzeyindeki toplam güneş ışınım enerjisiyle Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip illerden biri olarak öne çıkmaktadır (Kayri, 2024). Bu özelliklerine rağmen Batman'ın güneş enerjisi potansiyeli ağırlıklı olarak fotovoltaik sistemler açısından değerlendirilmiş, merkez alıcılı güneş kulelerinin performansında belirleyici olan doğrudan normal ışınım (DNI) ve buna bağlı elektrik üretim kapasitesi yeterince araştırılmamıştır.

Bu çalışmada, Batman'ın Batı Raman bölgesi için SAM modeli kullanılarak eriyik tuzlu merkez alıcılı bir güneş kulesi sistemi modellenmiş, ardından aynı santral konfigürasyonu korunarak Sevilla ve Mersin'in meteorolojik koşulları altında performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmada üç bölgenin DNI değerleri, yıllık net elektrik üretimleri, kapasite faktörleri ve alıcı ısıl verimleri değerlendirilmiştir. Ayrıca saatlik elektrik üretim haritaları ile kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) grafiklerinden yararlanılarak çalışma süreleri incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Modelleme Yaklaşımı

Mevcut çalışmada SAM modelinin içerisinde yer alan CSP Tower Molten Salt modeli seçilerek tasarlanmıştır. Bu modelde heliostatlardan yansıtılan ışınım kule üzerindeki dıştan silindirik alıcıda toplanmaktadır. Alıcı borularından geçen eriyik tuz ısındıktan sonra doğrudan güç çevrimine veya sıcak depolama tankına yönlendirilebilmektedir. Güç çevrimine verilen ısıdan buhar elde edilmekte ve buhar türbini aracılığıyla elektrik üretilmektedir. Heliostat alanının yerleşimi ve optik hesapları SAM'ın SolarPILOT altyapısı ile tanımlanmıştır (Wagner & Wendelin, 2018) (National Renewable Energy Laboratory, 2025).

Santral ilk olarak Batman koşulları için tanımlanmış ve daha sonra Sevilla'nın ve Mersin'in meteorolojik verileri kullanılarak yıllık hesaplamalar yapılmıştır. Bu sırada 615 heliostatın koordinatları, kule yüksekliği, alıcı geometrisi, güç çevrimi ve ısıl depolama kapasitesi sabit bırakılmıştır.

Referans Santralin Teknik Özellikleri

Referans santralin güç çevrimi 6 MWe brüt elektrik gücüne göre düzenlenmiştir. SAM'da kullanılan net anma gücü 5,5479 MWe, tasarım çevrim verimi ise %41,2'dir. Güneş katı 2,4 ve tasarım DNI değeri 950 W/m² seçildiğinde alıcının tasarım ısıl gücü 34,9515 MWt olmaktadır. Isı transferinde %60 $NaNO_3$ ve %40 KNO_3 karışımından oluşan eriyik tuz kullanılmaktadır. Tuzun soğuk tank sıcaklığı 290 °C, sıcak tank sıcaklığı ise 574 °C olarak tanımlanmıştır. İki tanklı depolama ünitesi, güç çevriminin tam yükte çalışmasına eşdeğer 10 saatlik ısıl enerji kapasitesine sahiptir. Modelin diğer temel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

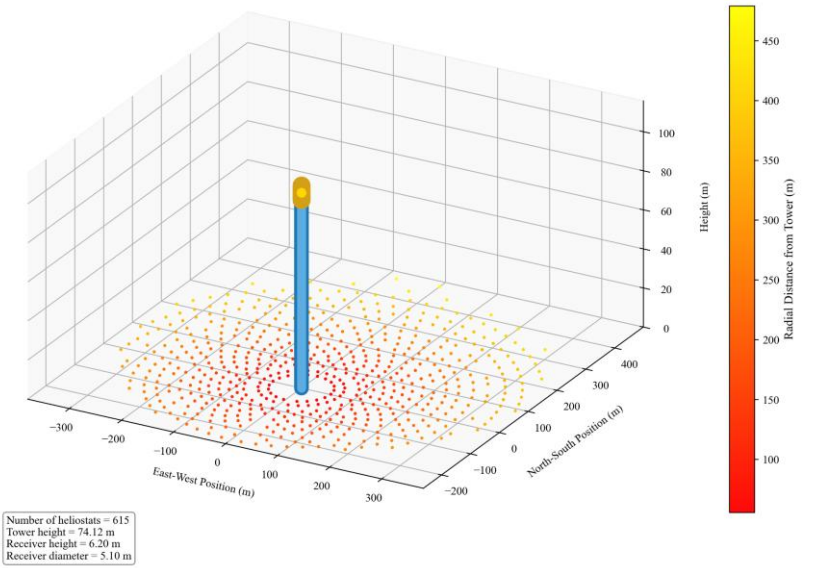
Tablo 1. Referans SAM güneş kulesi sisteminin başlıca tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Model türü	CSP Tower Molten Salt
Brüt güç çevrimi tasarım gücü	6,0 MWe
SAM net anma gücü	5,55 MWe
Tasarım alıcı ısıl gücü	34,95 MWt
Tasarım çevrim verimi	%41,2
Güneş katı	2,4
Tasarım DNI	950 W/m²
Heliostat sayısı	615
Heliostat boyutu	12,2 × 12,2 m
Etkin toplam yansıtıcı alan	88.790,5 m²
Kule yüksekliği	74,12 m
Alıcı yüksekliği / çapı	6,20 m / 5,10 m
Alıcı panel sayısı	24
Tuz sıcaklıkları (soğuk / sıcak)	290 °C / 574 °C
Termal depolama	10 saat, çift tank
Kondenser	Hava soğutmalı

Heliostat Alanı ve Alıcı Geometrisi

Heliostat alanı 12,2 × 12,2 m boyutlarında 615 aynadan oluşmaktadır. Yansıtıcı yüzey oranı dikkate alındığında alanın toplam etkin ayna yüzeyi yaklaşık 88.790,5 m² olarak hesaplanmıştır. SAM dosyasından elde edilen ayna koordinatları kullanılarak oluşturulan üç boyutlu yerleşim Şekil 1'de gösterilmiştir. Kule yüksekliği 74,12 m, alıcı yüksekliği 6,20 m ve alıcı çapı 5,10 m'dir. Şekildeki ayna yerleri modele ait gerçek koordinatlardır. Kule kalınlığı ile düşey eksen görünümü ise geniş heliostat alanı içerisinde kulenin daha rahat seçilebilmesi için şematik olarak düzenlenmiştir.

Şekil 1. Referans SAM santralinde 615 heliostatın 3B yerleşimi



Meteorolojik Veriler ve Karşılaştırma Senaryoları

Meteorolojik karşılaştırma için Batman (Batı Raman; 37,7873° K, 41,0628° D), Sevilla (37,4420° K, 6,2500° B) ve Mersin (36,8657° K, 34,6099° D) bölgelerine ait saatlik güneş ışınımı ve çevre koşullarını içeren veri setlerinden yararlanılmıştır. Batman için oluşturulan referans SAM modelinin fiziksel ve tasarım parametreleri sabit tutularak yalnızca meteorolojik veriler değiştirilmiş ve her bölge için yıllık performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle doğrudan normal ışınımın miktarı ve gün içerisindeki değişiminin net elektrik üretimine nasıl yansıdığı incelenmiştir. Çalışmada santralin yıllık teknik performansı esas alınmış; ilk yatırım, işletme maliyeti ve elektrik üretim maliyetine yönelik bir hesaplama yapılmamıştır.

Performans Ölçütleri

Santralin temel performans ölçütü bir yılda elde edilen net elektrik enerjisidir. SAM sonuçlarında bu değer MWh olarak alınmıştır. Kapasite faktörü ise yıllık net enerjinin santralin yıl boyunca net anma gücünde çalışması durumunda üreteceği enerjiye oranıdır. Hesaplamada $CF = E_{net} / (P_{net} \times 8760) \times 100$ ifadesi kullanılmıştır. Burada E_{net} yıllık net enerji (MWh), P_{net} ise 5,55 MWe olarak alınan net anma gücüdür. Böylece üç bölgenin kapasite faktörleri aynı güç değeri esas alınarak karşılaştırılmıştır (National Renewable Energy Laboratory, 2025).

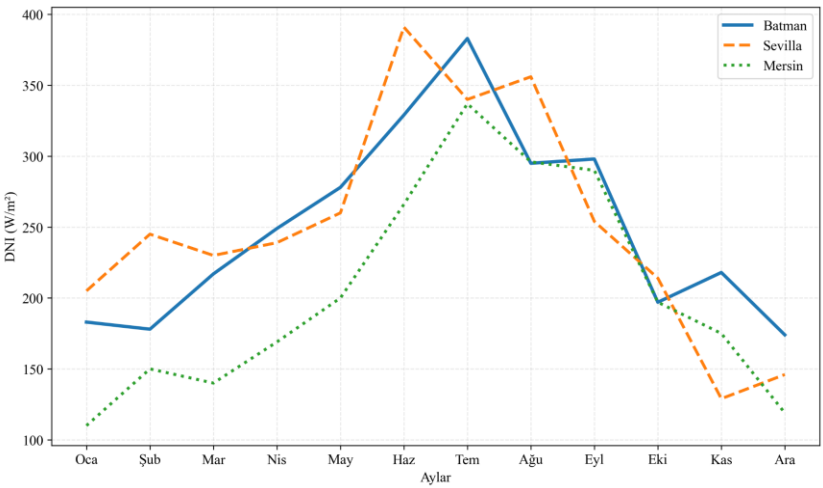
Alıcı için SAM tarafından verilen yıllık ısıl verim değerleri kullanılmıştır. Bu değerler yansıtıcı kayıpların hesaba katıldığı ve katılmadığı iki ayrı durumda incelenmiştir. Saatlik net güç verilerinin değerlendirilmesinde ise histogram ve CDF grafiklerinden yararlanılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Doğrudan Normal Işınımın Lokasyonlara Göre Değişimi

Batman, Sevilla ve Mersin için elde edilen aylık ortalama DNI değerleri Şekil 2'de karşılaştırılmıştır. Üç bölgenin tamamında ışınım miktarı kış aylarında azalmakta, yaz aylarına doğru artmaktadır. Bununla birlikte aylara göre değişim aynı değildir. Sevilla'da yüksek ışınım değerleri özellikle ilkbahar sonu ve yaz başlangıcında görülürken, Batman'da en yüksek değer temmuz ayında elde edilmektedir. Mersin'de ise kış ve ilkbahar aylarının daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Saatlik DNI verileri bir yıl için toplandığında Batman'da 2192,28, Sevilla'da 2320,20 ve Mersin'de 1853,20 kWh/m²-yıl değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 2. Batman, Sevilla ve Mersin için aylık ortalama DNI değişimi



Yıllık DNI toplamı yönünden Sevilla ilk sırada bulunmakta, Batman ikinci ve Mersin üçüncü sırada yer almaktadır. Batman'ın yaz aylarındaki ortalama ışınım değerlerinin Sevilla'ya yaklaşması, iki bölgenin özellikle yüksek ışınımlı dönemde benzer güneş kaynağına sahip olduğunu göstermektedir. Ancak bu sonuç tek başına yıllık elektrik üretim sıralamasını açıklamamaktadır. Çünkü gelen ışınımın hangi saatte kullanılabildiği, heliostatların optik davranışı, depolama tankındaki enerji ve güç çevriminin çalışma durumu, net elektrik üretimini birlikte etkilemektedir.

Yıllık Net Elektrik Üretimi ve Kapasite Faktörü

SAM'dan elde edilen yıllık net elektrik üretimi Batman için 25.720,87 MWh, Sevilla için 25.544,62 MWh ve Mersin için 20.476,91 MWh olmuştur. Batman ile Sevilla arasında 176,25 MWh gibi sınırlı bir fark bulunmaktadır. Bu fark Sevilla üretimine göre yaklaşık %0,69'dur. Batman'da elde edilen elektrik enerjisi Mersin'e göre ise %25,61 daha yüksektir. Her üç hesaplamada aynı santral

parametreleri kullanıldığından, sonuçlardaki değişim meteorolojik koşulların model üzerindeki etkisi bakımından değerlendirilmiştir.

Kapasite faktörü Batman'da %52,924, Sevilla'da %52,561 ve Mersin'de yaklaşık %42,13 olarak hesaplanmıştır. Batman ile Sevilla arasındaki fark 0,36 yüzde puan düzeyindedir. Mersin ile karşılaştırıldığında ise Batman'ın kapasite faktörü yaklaşık 10,79 yüzde puan daha yüksektir. Özellikle dikkat çeken nokta, Sevilla'nın yıllık DNI toplamı daha yüksek olmasına rağmen yıllık net elektrik üretiminde Batman'ın az bir farkla önde bulunmasıdır. Bu nedenle santral performansını yalnızca yıllık ışınım toplamına göre değerlendirmek uygun değildir. Yıllık sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Üç lokasyon için SAM yıllık performans sonuçları

Gösterge	Batman	Sevilla	Mersin
Yıllık DNI (kWh/m²-yıl)	2.192,28	2.320,20	1.853,20
Yıllık net enerji (MWh)	25.720,87	25.544,62	20.476,91
Kapasite faktörü (%)	52,924	52,561	42,13
Alıcı verimi, yansıtıcı kayıplar hariç (–)	0,8958	0,9019	0,8995
Alıcı verimi, yansıtıcı kayıplar dahil (–)	0,8510	0,8568	0,8545
Saatlik net güç P50 (kW)	3.818,76	3.516,68	−31,68

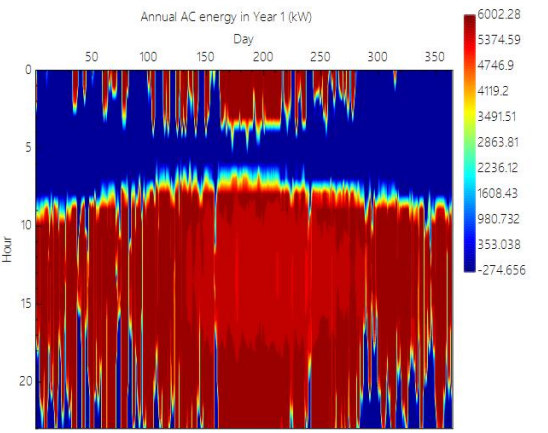
Yıllık Saatlik Elektrik Üretimi Dağılımları

Üç lokasyon için yıllık net elektrik üretiminin gün ve saatlere göre dağılımı Şekil 3–5'te gösterilmiştir. Haritalarda yüksek güç değerlerinin hangi mevsimlerde ve günün hangi saatlerinde oluştuğu izlenebilmektedir. Batman ve Sevilla'da özellikle yaz döneminde yüksek güçte çalışma saatleri artmaktadır. Mersin'de ise kış aylarında yüksek güç elde edilen sürelerin daha sınırlı olduğu görülmektedir. Bazı günlerde güneşin battığı saatlerden sonra da elektrik üretiminin devam etmesi, modelde bulunan 10 saatlik termal enerji depolama sistemiyle ilişkilidir. Bununla birlikte her bir saat

için üretilen gücün yalnızca aynı saatteki DNI değerinden hesaplandığı düşünülmemelidir.

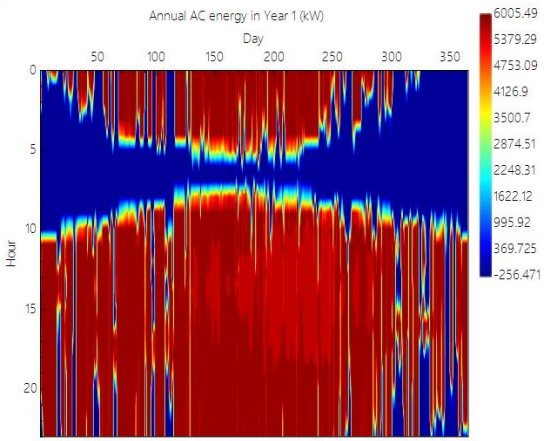
Şekil 3. Batman için yılın günü ve saate göre net elektrik üretimi

Metric	Value
Annual AC energy (year 1)	25,720,872 kWh
Capacity factor (year 1)	52.9%
Annual water usage	5,729 m^3

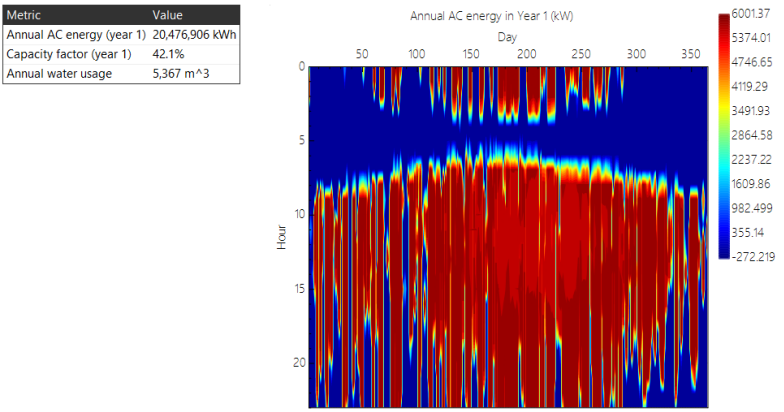


Şekil 4. Sevilla için yılın günü ve saate göre net elektrik üretimi

Metric	Value
Annual AC energy (year 1)	25,544,618 kWh
Capacity factor (year 1)	52.6%
Annual water usage	5,705 m^3



Şekil 5. Mersin için yılın günü ve saate göre net elektrik üretimi



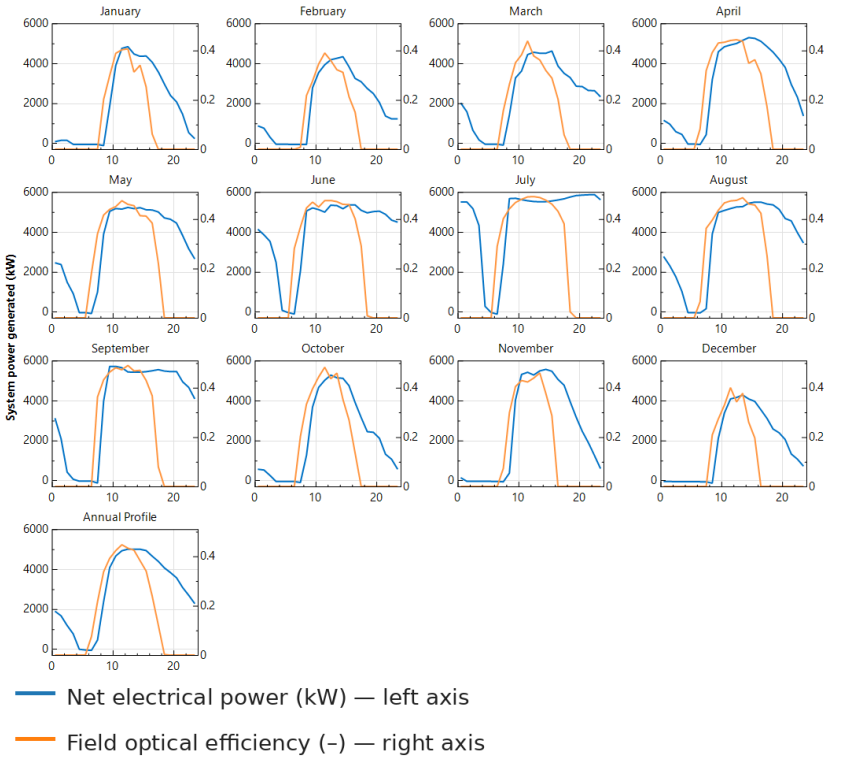
Üretim haritaları ile yıllık toplam elektrik değerleri birlikte incelendiğinde Batman ve Sevilla'nın birbirine yakın kapasite faktörleri daha iyi anlaşılmaktadır. Her iki bölgede de yılın önemli bir bölümünde yüksek güç değerlerine ulaşılabilmektedir. Mersin'de ise düşük ışınımlı aylarda bu süreler azalmaktadır. Burada karşılaştırılan santral her bölgeye özel tasarlanmış bir sistem değildir. Bu nedenle haritalar, kullanılan referans sistemin meteorolojik koşullara verdiği cevabı göstermekte olup her lokasyonda ulaşılabilecek en yüksek üretim değerleri olarak alınmamalıdır.

Ortalama Günlük Güç Profilleri ve Optik Performans

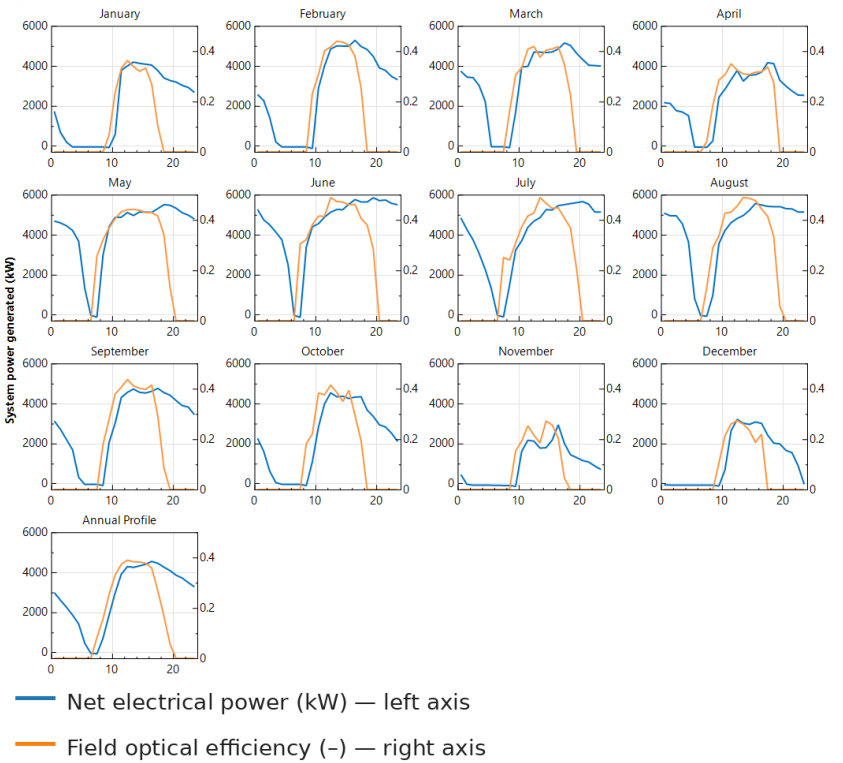
Saatlik elektrik üretiminin değişimi yalnızca güneş ışınımına bağlı değildir. Heliostatların güneşi takip ettiği açıya göre kosinüs kayıpları değişmekte, bazı saatlerde gölgeleme ve bloklama etkisi artmaktadır (Collado & Guallar, 2013). Şekil 6–8'de verilen aylık ortalama günlük profillerde mavi eğriler net elektriksel gücü (kW), turuncu eğriler ise heliostat alanının boyutsuz optik verimini göstermektedir. Optik verim güneşin konumuna bağlı olarak gün içinde değişirken, elektrik üretimi depolama tankları ve güç

çevriminin çalışma durumuna göre farklı saatlere uzayabilmektedir. Bu nedenle iki eğrinin tepe noktalarının tam olarak çakışması beklenmemektedir.

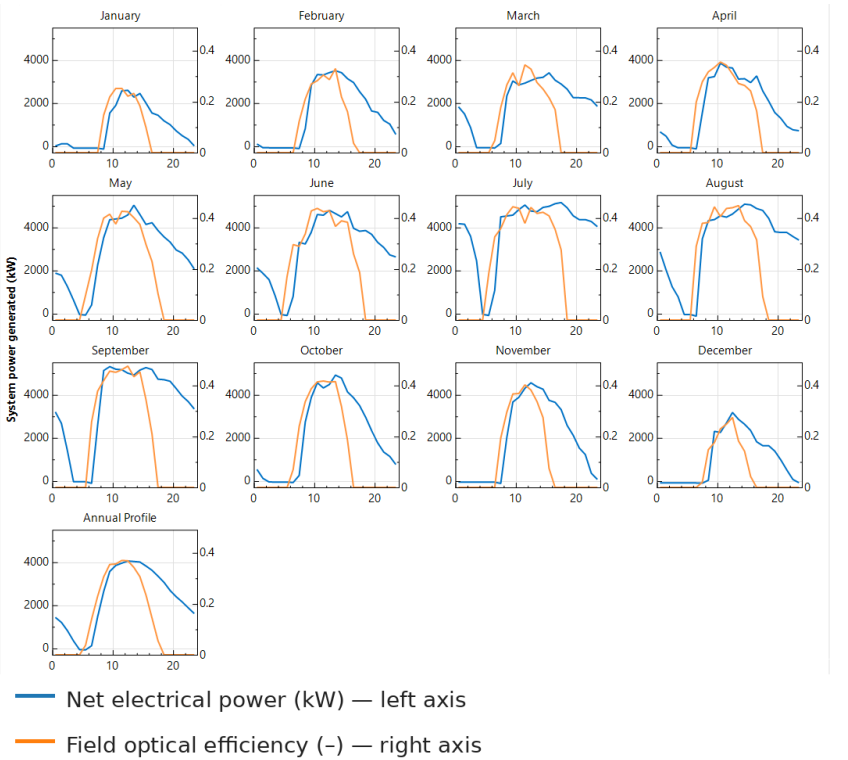
Şekil 6. Batman için aylara göre ortalama günlük net güç ve heliostat alanı optik verim profilleri



Şekil 7. Sevilla için aylara göre ortalama günlük net güç ve heliostat alanı optik verim profilleri



Şekil 8. Mersin için aylara göre ortalama günlük net güç ve heliostat alanı optik verim profilleri

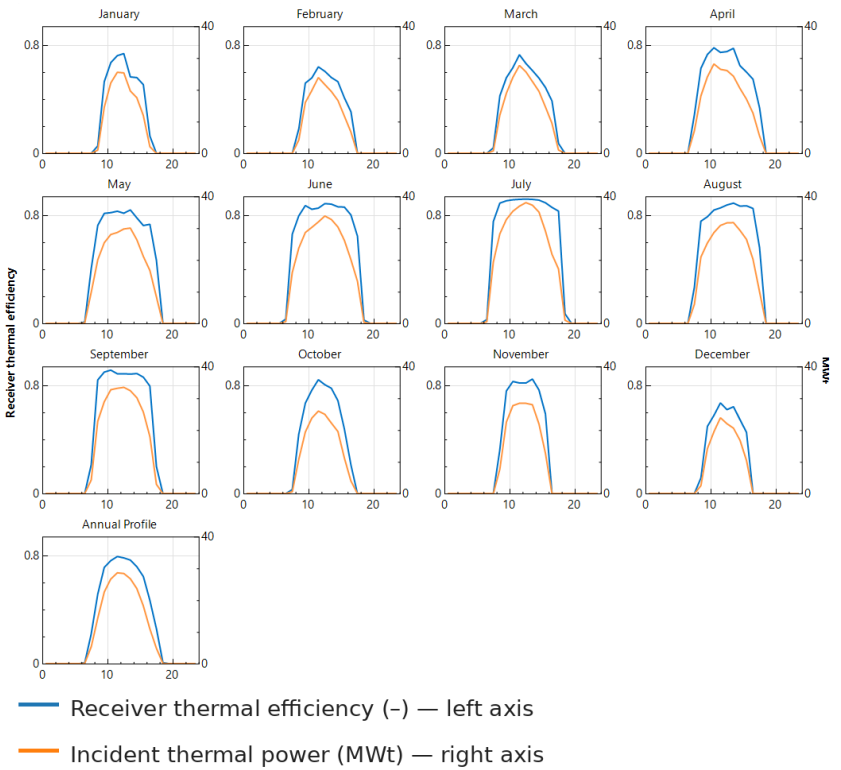


Şekil 6–8 incelendiğinde, özellikle Batman ve Sevilla'da yaz aylarında yüksek güç üretiminin günün daha geniş bir bölümüne yayıldığı görülmektedir. Sabah saatlerinde heliostat alanının optik verimi artmakta, öğle saatleri civarında yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bununla birlikte elektrik gücü akşam saatlerinde de belirli bir süre yüksek kalabilmektedir. Bu farklılık, gündüz alıcıdan elde edilen ısının depolama sistemi aracılığıyla daha sonra buhar çevrimine verilmesiyle ilişkilidir. Mersin'de ise bazı aylarda hem güç seviyesi hem de yüksek güçte çalışma süresi azalmaktadır.

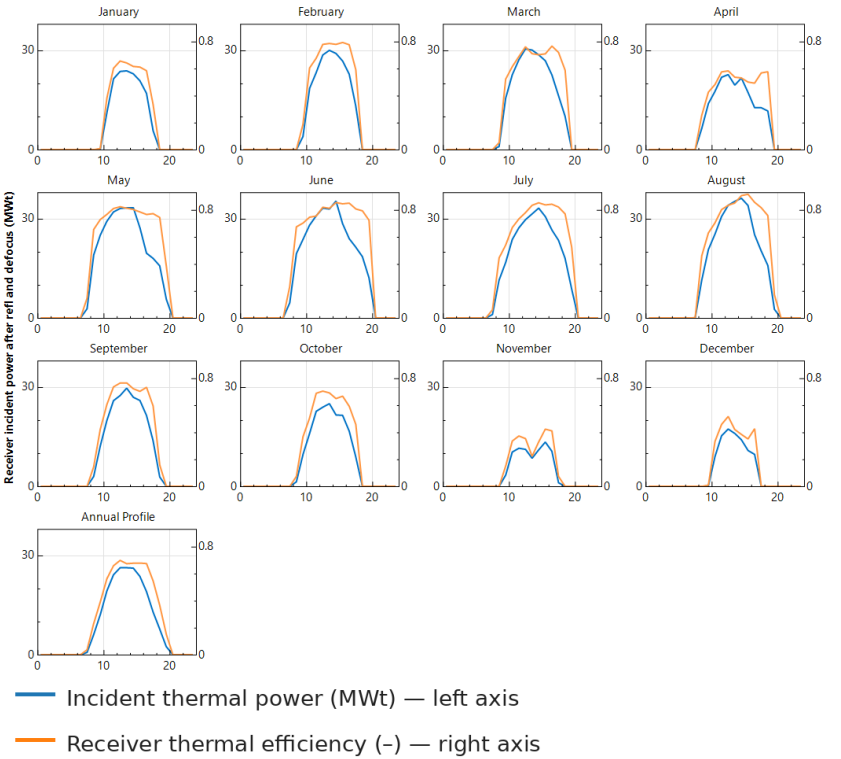
Alıcı Isıl Performansı

Şekil 9–11'de alıcıya gelen ısıl güç ile alıcı ısıl veriminin ortalama günlük değişimleri verilmiştir. Heliostat alanından yansıtılan enerji arttığında alıcıya gelen ısıl güç de yükselmektedir. Buna karşılık alıcı verimi yalnızca gelen güce bağlı değildir. Alıcı yüzeyinden çevreye olan taşınım ve ışınım kayıpları ile eriyik tuza aktarılan faydalı ısı miktarı birlikte etkili olmaktadır (Ho & Iverson, 2014). Özellikle düşük yükte çalışılan saatlerde bu kayıpların gelen enerjiye oranı arttığından ısıl verim değişebilmektedir. Grafiklerde ısıl güç MWt, verim ise boyutsuz olarak değerlendirilmiştir.

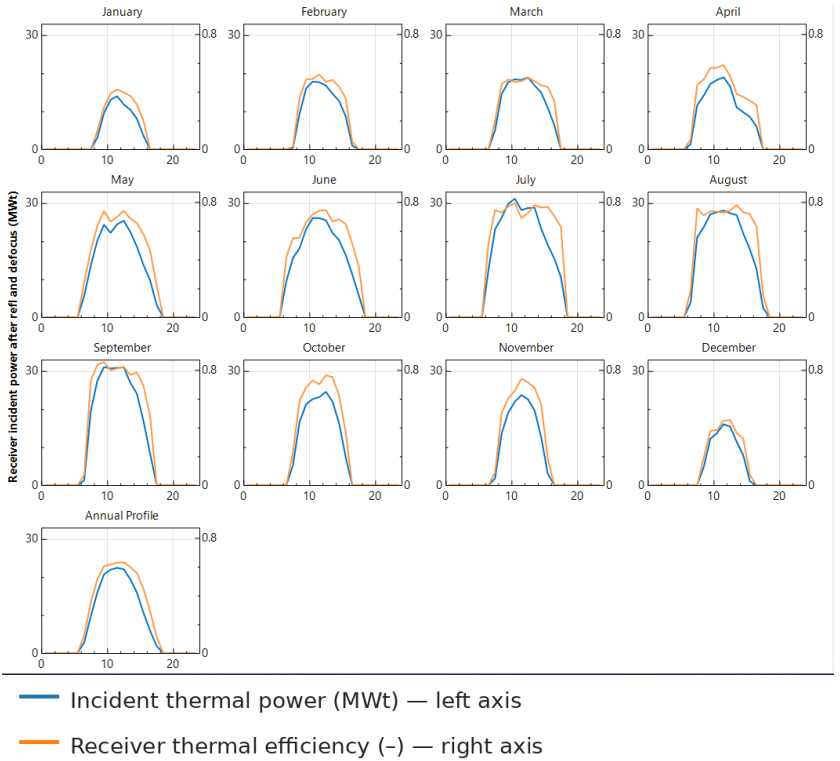
Şekil 9. Batman için alıcıya gelen ısıl güç ve alıcı ısıl veriminin aylık ve günlük profilleri



Şekil 10. Sevilla için alıcıya gelen ısıl güç ve alıcı ısıl veriminin aylık ve günlük profilleri



Şekil 11. Mersin için alıcıya gelen ısıl güç ve alıcı ısıl veriminin aylık ve günlük profilleri

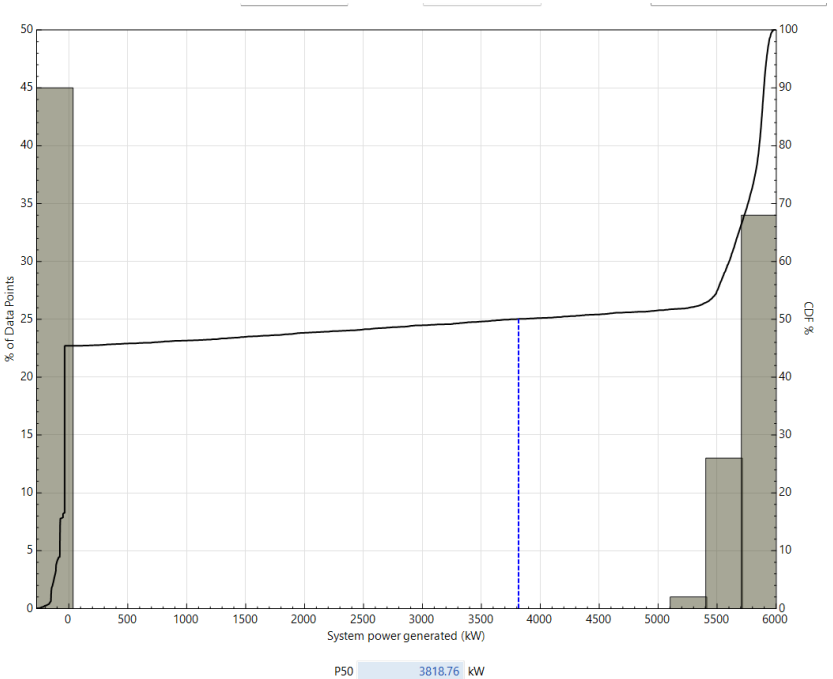


Yıllık alıcı verimi, yansıtıcı kayıpların dikkate alınmadığı durumda Batman için 0,896, Sevilla için 0,902 ve Mersin için 0,899 olarak elde edilmiştir. Yansıtıcı kayıplar hesaba katıldığında bu değerler sırasıyla 0,851, 0,857 ve 0,855 olmaktadır. En yüksek alıcı ısıl verimi Sevilla'da hesaplanmış, ancak üç bölge arasındaki fark oldukça sınırlı kalmıştır. Buna karşılık Mersin'de yıllık net elektrik üretimi Batman ve Sevilla'ya göre belirgin ölçüde daha düşük bulunmuştur. Mersin'de özellikle kış aylarında yağışlı ve kapalı günlerin daha fazla olduğu meteorolojik kayıtlarda belirtilmektedir (Mersin İKTM, 2026). Bu dönemde artan bulutluluğun DNI azaltması, santralin yıllık enerji üretimini olumsuz etkileyebilecek faktörlerden biri olduğu varsayılmaktadır.

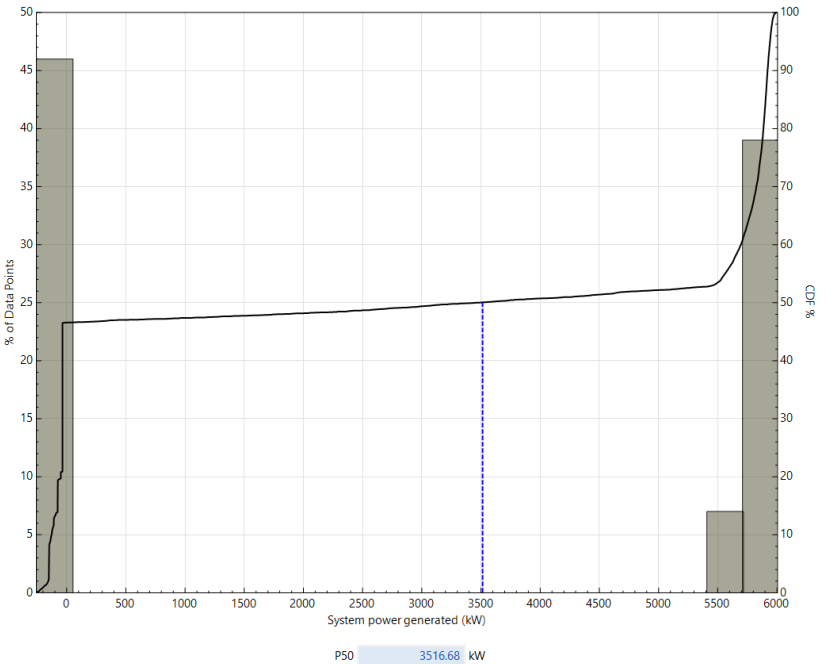
Saatlik Net Güç Dağılımı ve CDF Analizi

Yıllık net elektrik üretimi santralin toplam performansını göstermektedir; ancak sistemin hangi güç aralıklarında ne kadar süre çalıştığını bu değerden belirlemek mümkün değildir. Bu amaçla saatlik net güç sonuçlarının histogramları ve CDF değerleri Şekil 12–14'te verilmiştir. Histogram belirli güç aralıklarının görülme sıklığını, CDF ise net gücün seçilen bir değere eşit veya onun altında olma oranını göstermektedir. Bu grafiklerde P50, 8760 saatlik güç serisinin medyanına karşılık gelmektedir. Dolayısıyla burada yıllık enerji üretimine ait bir belirsizlik tahmini yapılmamıştır.

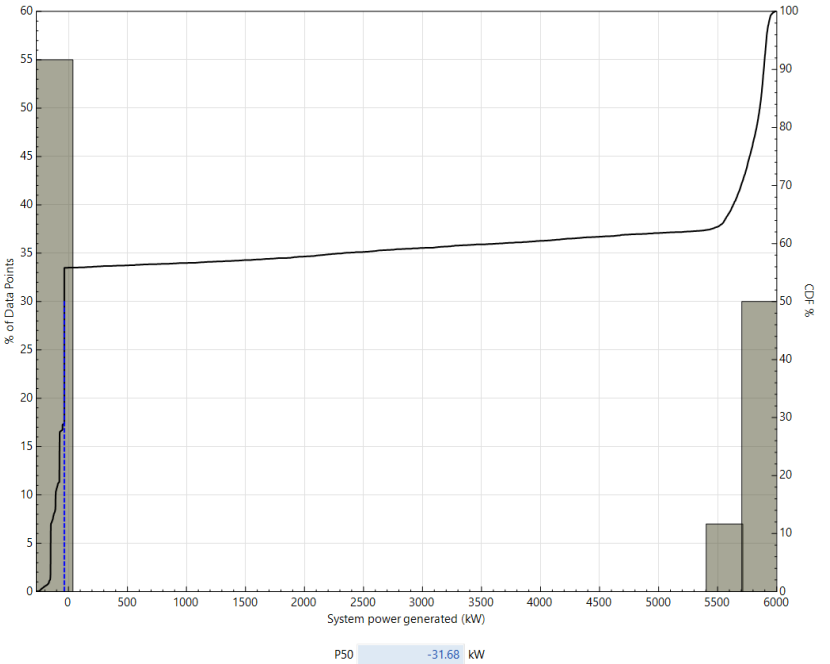
Şekil 12. Batman için saatlik net güç histogramı ve kümülatif dağılım fonksiyonu



Şekil 13. Sevilla için saatlik net güç histogramı ve kümülatif dağılım fonksiyonu



Şekil 14. Mersin için saatlik net güç histogramı ve kümülatif dağılım fonksiyonu



Batman için elde edilen saatlik güç medyanı 3818,76 kW, Sevilla için ise 3516,68 kW'tır. İki değer arasındaki fark yaklaşık 302 kW olup Batman'da saatlik güç dağılımının orta noktasının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu iki bölgede hem üretimin bulunmadığı veya düşük kaldığı saatler hem de santralin yüksek güçte çalıştığı saatler bulunmaktadır. Bu nedenle yıllık toplam enerjilerin birbirine yakın olması, saatlik dağılımların tamamen aynı olduğu anlamına gelmemektedir. CDF sonuçları Batman'ın incelenen modelde biraz daha yüksek bir medyan güç değerine sahip olduğunu göstermiştir.

Mersin için saatlik net güç dağılımının medyan değeri (P50) −31,68 kW olarak hesaplanırken, Batman ve Sevilla için bu değerler sırasıyla 3.818,76 ve 3.516,68 kW olarak belirlenmiştir. Mersin'de

P50 değerinin negatif olması, yıl içerisindeki saatlerin en az yarısında net elektrik üretiminin sıfırın altında veya çok düşük seviyelerde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durumun, güneş ışınımının yetersiz olduğu dönemlerde santralin yardımcı elektrik tüketimleriyle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Buna karşılık yüksek güç üretiminin gerçekleştiği saatlerin katkısıyla Mersin'de yıllık net elektrik üretimi 20.476,91 MWh olarak hesaplanmıştır. CDF sonuçları, Mersin'de düşük üretim seviyelerinde geçen saatlerin Batman ve Sevilla'ya göre daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır.

Batman'ın CSP Uygulamaları Açısından Teknik Potansiyeli

Karşılaştırmanın tamamında Sevilla'nın yıllık DNI toplamı ve yıllık alıcı verimi Batman'dan daha yüksek çıkmıştır. Buna rağmen Batman, net elektrik üretimi ve kapasite faktörü bakımından çok küçük bir farkla ilk sırada yer almıştır. Saatlik güç dağılımında da Batman'ın medyan gücü daha yüksektir. Buna karşılık Mersin'in alıcı verimi diğer bölgelere yakın olmasına rağmen yıllık üretim ve kapasite faktörü daha düşük kalmıştır. Bu sonuçlar, bir güneş kulesi santralinde yalnızca ışınım miktarının veya alıcı veriminin değil, bu enerjinin güç çevriminde ne kadar süre değerlendirilebildiğinin de önemli olduğunu göstermektedir.

Batman'ın sonuçlarının Sevilla'ya yakın olması, bölgenin merkez alıcılı CSP uygulamaları açısından ayrıntılı incelenmesini gerekli kılmaktadır. Mersin ile yapılan karşılaştırma da Türkiye'de yeni santral yerleri belirlenirken farklı bölgelerin güneş kaynağı ve yıllık çalışma koşullarının birlikte araştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ancak bu çalışmanın sonuçları teknik performansla sınırlıdır. Her lokasyon için heliostat alanı yeniden optimize edilmemiş; arazi, yatırım gideri, bakım maliyeti ve elektrik birim maliyeti hesaplanmamıştır. Bu nedenle elimizdeki verilerle

Batman'ın ekonomik olarak kesin biçimde daha avantajlı olduğu sonucuna ulaşamayız (Turchi et al., 2010) (Turchi & Heath, 2013).

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, Batman, Sevilla ve Mersin'in meteorolojik koşullarında merkez alıcılı güneş kulesi sisteminin yıllık performansı SAM yazılımı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yıllık net elektrik üretimi Batman'da 25.720,87 MWh, Sevilla'da 25.544,62 MWh ve Mersin'de 20.476,91 MWh olarak hesaplanırken kapasite faktörleri sırasıyla %52,92, %52,56 ve %42,13 olarak belirlenmiştir. Batman'ın yıllık elektrik üretimi Sevilla'ya yakın, Mersin'e göre ise %25,61 daha yüksek bulunmuştur.

Sevilla'nın yıllık DNI değeri daha yüksek olmasına rağmen Batman'da net elektrik üretiminin az farkla yüksek olması, ışınımın yıl içerisindeki dağılımı ve santralin işletme koşullarının önemini göstermektedir. Alıcı ısıl verimleri üç bölgede birbirine yakın hesaplanırken saatlik güç dağılımları ve CDF analizleri, Batman ile Sevilla'nın benzer üretim performansına sahip olduğunu, Mersin'de ise düşük üretimli saatlerin daha fazla olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak Batman'ın merkez alıcılı güneş kulesi sistemleri açısından önemli bir teknik potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir. Gelecek çalışmalarda meteorolojik verilerin saha ölçümleriyle doğrulanması, heliostat alanının bölgesel koşullara göre yeniden tasarlanması ve sistemin ekonomik açıdan değerlendirilmesi önerilmektedir.

Kaynakça/References

Avila-Marin, A. L., Fernandez-Reche, J., & Tellez, F. M. (2013). Evaluation of the potential of central receiver solar power plants: Configuration, optimization and trends. Applied Energy, 112, 274–288. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.049

Behar, O., Khellaf, A., & Mohammedi, K. (2013). A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23*, 12–39. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.017

Collado, F. J., & Guallar, J. (2013). A review of optimized design layouts for solar power tower plants with campo code. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20*, 142–154. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.076

Erdil, M. (2013, 17 Nisan). İlk yerli güneş kulesi. Hürriyet. Erişim tarihi: 12 Ekim 2026, https://www.hurriyet.com.tr/ekonomi/ilk-yerli-gunes-kulesi-23062082

Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(1), 31–55. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035

Ho, C. K., & Iverson, B. D. (2014). Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29*, 835–846. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.099

International Energy Agency. (2014). *Technology roadmap: Solar thermal electricity*. https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-solar-thermal-electricity-2014

Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: Processes and systems*. Elsevier.

Kayri, İ. (2024). Investigation of near shading losses in photovoltaic systems with PVsyst software. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 12(1), 10–19. https://doi.org/10.17694/bajece.1418426

Kesseli, D., Wagner, M., Guédez, R., & Turchi, C. (2018). *CSP-plant modeling guidelines and compliance of the System Advisor Model (SAM)*: Preprint (NREL/CP-5500-72183). National Renewable Energy Laboratory. https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/72183.pdf

Mehos, M., Price, H., Cable, R., Kearney, D., Kelly, B., Kolb, G., & Morse, F. (2020). *Concentrating solar power best practices study* (NREL/TP-5500-75763). National Renewable Energy Laboratory. https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75763.pdf

Mersin İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (2018). Coğrafya. T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. Erişim tarihi: 12 Ekim 2026, https://mersin.ktb.gov.tr/TR-73151/cografya.html

National Renewable Energy Laboratory. (2025). *SAM help: CSP power tower molten salt (SAM 2025.4.16)*. https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/sam-help-2025-4-16.pdf

Turchi, C. S., & Heath, G. A. (2013). *Molten salt power tower cost model for the System Advisor Model (SAM)* (NREL/TP-

5500-57625). National Renewable Energy Laboratory. https://doi.org/10.2172/1067902

Turchi, C., Mehos, M., Ho, C. K., & Kolb, G. J. (2010). *Current and future costs for parabolic trough and power tower systems in the US market*: Preprint (NREL/CP-5500-49303). National Renewable Energy Laboratory. https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/49303.pdf

Wagner, M. J., & Wendelin, T. (2018). SolarPILOT: A power tower solar field layout and characterization tool. *Solar Energy, 171*, 185–196. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.063

Zhang, H. L., Baeyens, J., Degrève, J., & Cacères, G. (2013). Concentrated solar power plants: Review and design methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22*, 466–481. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.032

BÖLÜM 2

ISI POMPALARININ ÇEVRESEL PERFORMANSINDA ELEKTRİK ÜRETİM KAYNAĞININ ROLÜ

AHMET ÇAĞLAR[1]
ARİF EMRE ÖZGÜR[2]

Giriş

Küresel enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümü binalardaki ısıtma ve sıcak su gereksinimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle fosil yakıtların doğrudan yakılmasına dayanan geleneksel ısıtma sistemlerinin yerine daha verimli ve düşük karbonlu teknolojilerin kullanılması giderek önem kazanmaktadır. Enerjide büyük ölçüde dışa bağımlı olan ülkelerin, binalarda enerji verimliliğinin artırılmasına ve alternatif enerji kaynaklarının etkin kullanımına daha fazla önem vermeleri gerekmektedir. Bu amaçla binaların enerji etkin biçimde tasarlanması ve ısıtma gereksiniminin düşük karbonlu sistemlerle

[1] Doç. Dr, Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-2788-2659
[2] Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-6382-5462

karşılanması, hem enerji tüketiminin hem de çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır [1].

Birçok ülkede ısıtma, nihai enerji tüketiminin yaklaşık yarısını meydana getirirken, binalar bir bütün olarak küresel karbon emisyonlarının kabaca %37'sine neden olmaktadır [2,3]. Amerika Birleşik Devletleri'nde mekân ve su ısıtma, konutlardaki enerji kullanımının sırasıyla %43'ünü ve %19'unu oluşturmakta; konut ısıtması tek başına, konut kaynaklı karbon emisyonlarının üçte birinden fazlasından doğrudan sorumlu bulunmaktadır [4]. Küresel bina ısıtma talebinin yaklaşık %90'ı doğal gaz ve fuel-oil gibi fosil yakıtların yerinde yakılmasıyla karşılandığından, binalarda termal konforun karbondan arındırılması, daha geniş kapsamlı iklim nötrlüğü hedefleri açısından acil bir ön koşul teşkil etmektedir [5].

Yüzyıl ortası karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşmak, geleneksel yanmalı ekipmanlardan elektrikli ısıtma alternatiflerine doğru radikal bir geçişi gerektirmektedir [6]. Hâlihazırda ABD'deki konutların %64'ünde yanmalı yakıtla çalışan cihazlar kullanılmaktadır [7]; benzer şekilde Avrupa ve Asya'daki konut sektörlerinde de fosil yakıtlı kazanlara büyük ölçüde bağımlılık söz konusudur [8]. Fosil yakıtlı kazanlardan başka yakıt türlerine geçiş; karbondioksit, kükürt oksitler ve azot oksitler dahil olmak üzere yerinde yanma kaynaklı emisyonları ortadan kaldırır. Ancak, kapsamlı bir elektrifikasyon süreci bölgesel enerji talebini temelden değiştirmektedir; kontrolsüz ve büyük ölçekli bir yaygınlaştırma, en yüksek talep yüklerini (pik yükleri) önemli ölçüde artırabilir ve üretim ya da iletim kapasitesinde büyük çaplı genişletmeler yapılmasını zorunlu kılabilir [9]. Bu nedenle, fosil yakıtlı sistemler kademeli olarak devreden çıkarılırken dağıtım şebekesi üzerindeki baskıyı sınırlamak amacıyla; yardımcı yakıtlar içeren hibrit yapılandırmalar veya entegre termal ve elektriksel depolama çözümleri gibi esnek stratejilerin uygulanması gerekmektedir [10].

Elektrikli ısı pompaları, hava, toprak veya su gibi çevresel kaynaklardan aldıkları düşük sıcaklıktaki ısıyı elektrik enerjisi yardımıyla daha yüksek sıcaklık seviyesine taşıyarak tükettikleri elektrikten daha fazla faydalı ısı sağlayabilmektedir. Mevsimsel performans katsayılarının yaklaşık 1,5–5,0 arasında değişmesi, maksimum performans katsayısı 1,0 olan elektrikli dirençli ısıtıcılara göre önemli bir termodinamik üstünlük sağlamaktadır [11]. Bu sayede ısıtma amaçlı elektrik talebini dirençli sistemlere kıyasla yaklaşık üçte iki oranında azaltabilen ısı pompaları, doğal gazlı kazan ve kombilere de düşük karbonlu bir alternatif oluşturmaktadır [12]. Özellikle toprak ve su kaynaklı sistemler, kaynak sıcaklıklarının daha kararlı olması nedeniyle hava kaynaklı ısı pompalarına göre daha yüksek mevsimsel performans ve daha düşük yaşam döngüsü etkileri gösterebilmektedir [13]. Düşük karbonlu elektrik üretim sistemleriyle birlikte kullanıldıklarında ise doğal gazlı kazanlara kıyasla birincil enerji tüketimini %60'a, yaşam döngüsü emisyonlarını da %90'a varan oranlarda azaltma potansiyeline sahip olan ısı pompaları, binalarda ısıtmanın karbonsuzlaştırılmasında temel teknolojik çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Bununla birlikte, elektrik tahrikli bir ısı pompasının kullanım noktasında doğrudan yakıt tüketmemesi, sistemin her koşulda düşük karbonlu olduğu anlamına gelmemektedir. Isı pompalarının çevresel etkilerinde işletme aşaması önemli bir paya sahip olduğundan, kompresörün çalışması için tüketilen elektriğin üretim kaynağı sistemin sağlayacağı net çevresel faydayı büyük ölçüde belirlemektedir. Elektriğin ağırlıklı olarak kömür veya doğal gaz gibi fosil yakıtlardan üretilmesi, dolaylı sera gazı emisyonlarını artırarak ısı pompasının geleneksel ısıtma sistemlerine göre avantajını azaltabilmektedir. Buna karşılık, rüzgâr, güneş ve diğer düşük karbonlu kaynaklardan sağlanan elektrik, ısı pompalarının karbon azaltım potansiyelini önemli ölçüde yükseltmektedir. Dolayısıyla ısı

pompalarının çevresel performansı yalnızca cihazın verimiyle değil, kullanılan elektriğin karbon yoğunluğu ve karşılaştırılan referans ısıtma sistemiyle birlikte değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada, elektrik üretim kaynaklarının karbon yoğunluğunun elektrik tahrikli ısı pompalarının çevresel performansı üzerindeki etkisi ele alınmaktadır. Bu amaçla öncelikle ısı pompalarının çalışma ilkesi ile COP ve SCOP gibi temel performans göstergeleri açıklanmakta, ardından fosil yakıtlı ve yenilenebilir elektrik üretim kaynaklarının karbon yoğunlukları değerlendirilmektedir. Daha sonra ısı pompasının elektrik tüketiminden kaynaklanan dolaylı emisyonların, kullanılan elektrik kaynağına ve sistemin mevsimsel performansına bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmektedir. Böylece ısı pompalarının geleneksel ısıtma sistemlerine göre çevresel avantaj sağladığı veya bu avantajın sınırlı kaldığı koşullar genel olarak ortaya konulmakta ve elde edilen değerlendirmeler sunulmaktadır.

2. Isı Pompalarının Çalışma Prensibi ve Performans Göstergeleri

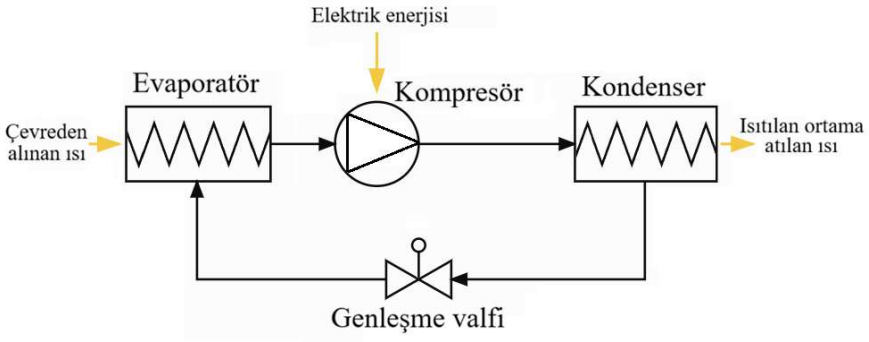
2.1. Isı pompasının çalışma prensibi

Isı pompaları, düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan aldıkları ısıyı elektrik enerjisi kullanarak daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama aktaran sistemlerdir. Buhar sıkıştırmalı bir ısı pompasının temel bileşenleri ile çevrim boyunca gerçekleşen ısı ve enerji akışları Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

Isı pompasının temel (basit) çevrimi evaporatör, kompresör, kondenser ve genleşme valfi olmak üzere dört ana bileşenden oluşur. Evaporatörde soğutucu akışkan; hava, su veya toprak gibi çevresel bir kaynaktan ısı alarak buharlaşır. Buhar hâlindeki akışkanın basıncı ve sıcaklığı, elektrikle çalışan kompresörde yükseltilir. Yüksek sıcaklıktaki soğutucu akışkan, kondenserde ısısını binanın ısıtma sistemine aktarırken yoğuşur. Ardından genleşme valfinden

geçirilerek basıncı ve sıcaklığı düşürülen akışkan evaporatöre geri döner ve çevrim tekrarlanır.

Şekil 1. *Isı pompasının şematik gösterimi*



Isı pompasının sağladığı faydalı ısının tamamı elektrikten elde edilmez; bu ısının önemli bir bölümü çevreden alınır. Bu nedenle sistem, tükettiği elektrik enerjisinden daha fazla miktarda faydalı ısı sağlayabilir.

2.2. Performans göstergeleri COP ve SCOP

Isı pompasının performansı, sağlanan ısının tüketilen elektrik enerjisine oranı olan performans katsayısı (COP) ile ifade edilir:

$$COP = \frac{Q_h}{W_{\text{el}}} \tag{1}$$

Burada Q_h binaya sağlanan faydalı ısıyı, W_{el} ise başta kompresör olmak üzere sistemin tükettiği elektrik enerjisini göstermektedir.

COP, ısı pompasının belirli bir çalışma ve test koşulundaki anlık performansını gösterirken SCOP, değişen dış hava sıcaklıklarını ve ısıtma yüklerini dikkate alarak sistemin bütün ısıtma sezonundaki ortalama performansını ifade etmektedir. SCOP aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$SCOP = \frac{Q_{h,\text{season}}}{W_{\text{el,season}}} \quad (2)$$

Burada $Q_{h,season}$, ısı pompasının ısıtma sezonu boyunca sağladığı toplam faydalı ısıyı; $W_{el,season}$ ise aynı dönemde sistem tarafından tüketilen toplam elektrik enerjisini göstermektedir. EN 14825 standardına dayanan hesaplamalarda SCOP; iklim bölgesi, dış hava sıcaklığı aralıkları, bina ısıtma yükü ve cihazın kısmi yük performansı dikkate alınarak genellikle sıcaklık dilimi (bin) yöntemiyle belirlenmektedir.

COP ve SCOP, ısı pompalarının enerji ve çevresel performanslarının değerlendirilmesinde temel göstergelerdir. Nominal COP yalnızca belirli bir çalışma noktasındaki verimi gösterdiğinden, değişken dış hava sıcaklıklarını, kısmi yükte çalışmayı, dur-kalk kayıplarını ve yardımcı enerji tüketimlerini yeterince yansıtmaz. SCOP ise bütün ısıtma sezonunu temsil ettiği için gerçek enerji tüketiminin, işletme maliyetinin ve elektrik kullanımından kaynaklanan dolaylı karbon emisyonlarının karşılaştırılmasında daha uygun bir göstergedir. SCOP değerinin yükselmesi, aynı miktarda faydalı ısının daha az elektrik tüketilerek sağlandığını ve kullanılan elektriğin karbon yoğunluğu sabit kaldığında daha düşük dolaylı emisyon oluştuğunu göstermektedir.

Isı kaynağı sıcaklığının yüksek ve kararlı, ısıtma sistemine gönderilen akışkan sıcaklığının ise düşük olması durumunda sıcaklık farkı ve kompresörün basınç oranı azalacağından COP ve SCOP değerleri yükselir. Bu nedenle ılıman iklimlerde çalışan, doğru boyutlandırılmış ve yerden ısıtma gibi düşük sıcaklıklı ısı dağıtım sistemleriyle birlikte kullanılan değişken hızlı ısı pompaları genellikle daha yüksek performans gösterir. Buna karşılık düşük dış hava sıcaklığı, yüksek su gidiş sıcaklığı, sık dur-kalk, hatalı boyutlandırma, buzlanma ve defrost işlemleri performansı düşürür. Çok soğuk koşullarda elektrikli yardımcı ısıtıcının devreye girmesi

de toplam elektrik tüketimini artırarak özellikle SCOP değerinin azalmasına neden olur. COP ve SCOP'u etkileyen başlıca parametreler şunlardır:

- Isı kaynağının türü ve sıcaklığı (hava, su veya toprak)
- Dış hava sıcaklığı ve iklim koşulları
- Kondenser çıkış veya ısıtma suyu gidiş sıcaklığı
- Evaporasyon ve yoğuşma sıcaklıkları arasındaki fark
- Kompresörün tipi, verimi ve hız kontrolü
- Sistemin kısmi yük performansı
- Bina ısıtma yükünün mevsimsel değişimi
- Isı dağıtım sisteminin türü ve çalışma sıcaklığı
- Buzlanma ve defrost çevrimleri
- Cihazın dur-kalk sıklığı ve kontrol stratejisi
- Pompa, fan ve kontrol ekipmanlarının yardımcı elektrik tüketimi
- Elektrikli yedek ısıtıcının kullanım süresi
- Isı değiştiricilerinin temizliği ve bakım durumu

3. Elektrik Üretim Kaynaklarının Karbon Yoğunluğu

3.1. Fosil yakıtlı elektrik üretimi

Fosil yakıtlardan elektrik üretiminde başlıca kömür, linyit, doğal gaz ve petrol türevleri kullanılmaktadır. Bu santrallerde yakıtın yanması sonucunda doğrudan karbondioksit açığa çıkarken; yakıtın çıkarılması, işlenmesi ve taşınması sırasında da dolaylı sera gazı emisyonları oluşmaktadır. Elektrik üretiminin karbon yoğunluğu, birim elektrik başına oluşan sera gazı emisyonunu ifade etmekte ve genellikle gCO_2eq/kWh_{el} birimiyle gösterilmektedir. Yaşam döngüsü esaslı değerlendirmelerde, santraldeki doğrudan emisyonların yanı sıra yakıt tedarik zincirinden kaynaklanan emisyonlar da dikkate alınmaktadır.

Kömür ve özellikle düşük ısıl değerli linyit, yüksek karbon içeriği ve görece düşük santral verimi nedeniyle elektrik üretiminde en yüksek karbon yoğunluğuna sahip kaynaklar arasındadır. Türkiye elektrik üretimini inceleyen bir çalışma, kömür kullanımının artmasının ulusal elektrik üretim emisyon faktörünü yükselttiğini; kömürden doğal gaza geçişin ise bu değeri düşürdüğünü belirlemiştir [14]. Doğal gaz kombine çevrim santralleri, daha yüksek elektrik üretim verimleri ve yakıtın daha düşük karbon içeriği sayesinde kömür santrallerinden daha düşük emisyon üretmektedir. Bununla birlikte doğal gazın çıkarılması ve taşınması sırasında meydana gelen metan kaçakları, yaşam döngüsü emisyonlarını artırabilmektedir. Petrol türevleriyle çalışan fuel-oil ve dizel santrallerin karbon yoğunlukları da oldukça yüksektir. Bu santraller, yakıt maliyetleri ve yüksek emisyonları nedeniyle büyük ölçekli sürekli elektrik üretiminden çok, şebekeden bağımsız sistemlerde veya yedek güç uygulamalarında kullanılmaktadır. Fosil yakıtlı santraller arasında doğal gaz çevrim santralleri çevresel açıdan görece daha avantajlı olsa da düşük karbonlu bir elektrik üretim yöntemi olarak değerlendirilmemelidir.

Tablo 1. *Fosil yakıtlı elektrik üretim kaynaklarının yaşam döngüsü karbon yoğunlukları [15]*

Elektrik üretim kaynağı	Yaşam döngüsü karbon yoğunluğu gCO_2eq/kWh_{el}	Genel değerlendirme
Linyit	1100	En yüksek karbon yoğunluğuna sahip
Kömür	1000	Yüksek doğrudan yanma ve yakıt tedarik emisyonu
Petrol türevleri	840	Yüksek emisyonlu; elektrik üretiminde daha sınırlı
Doğal gaz	469	Kömür ve petrole göre düşük, ancak fosil kaynaklı

Tablodaki değerler, farklı üretim teknolojilerini ortak bir sistem sınırı içerisinde karşılaştırabilmek amacıyla IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) tarafından raporlanan yaklaşık yaşam döngüsü medyan değerleridir [3]. Santral verimi, yakıtın özellikleri, madencilik yöntemi, metan kaçakları ve taşıma mesafesi nedeniyle gerçek değerler tesislere ve bölgelere göre değişebilir. Türkiye için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, doğal gazlı santrallerde birim brüt elektrik üretimi başına ortalama 405 gCO_2eq/kWh emisyon bildirmektedir [16]. Ancak bu değer, IPCC yaşam döngüsü değeriyle aynı sistem sınırına sahip olmadığından tabloda doğrudan karşılaştırma amacıyla kullanılmamıştır.

3.2. Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi

Yenilenebilir enerji kaynaklarında elektrik üretimi sırasında fosil yakıt yakılmadığı için doğrudan sera gazı emisyonları oldukça düşüktür. Bununla birlikte santral bileşenlerinin üretimi, ham maddelerin çıkarılması, taşıma, kurulum, bakım ve kullanım ömrü sonu işlemleri belirli miktarda emisyona neden olmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir elektrik üretim teknolojilerinin çevresel performansı değerlendirilirken yalnızca işletme aşaması değil, bütün yaşam döngüsü dikkate alınmalıdır. IPCC verilerine göre güneş, rüzgâr ve hidroelektriğin yaşam döngüsü karbon yoğunlukları fosil yakıtlı elektrik üretiminden belirgin ölçüde düşüktür.

Güneş enerjisi: Güneş fotovoltaik sistemlerinde elektrik üretimi sırasında doğrudan sera gazı emisyonu oluşmamakla birlikte panellerin üretiminde kullanılan enerji, silikon ve diğer malzemelerin işlenmesi, taşıma ve kurulum işlemleri yaşam döngüsü emisyonlarına neden olmaktadır. Karbon yoğunluğu; panel teknolojisine, üretimde kullanılan elektriğin kaynağına, sistem ömrüne ve kurulduğu bölgenin güneşlenme potansiyeline bağlıdır. IPCC verilerinde yaşam döngüsü karbon yoğunluğunun çatı tipi güneş sistemlerinde yaklaşık 41, büyük ölçekli güneş santrallerinde

ise 48 gCO_2eq/kWh düzeyinde olduğu bildirilmektedir. Güneşlenme süresi yüksek bölgelerde aynı panelden daha fazla elektrik üretildiği için birim elektrik başına karbon yoğunluğu genellikle daha düşük olmaktadır.

Rüzgâr enerjisi: Rüzgâr türbinlerinde elektrik üretimi sırasında yakıt tüketimi ve doğrudan karbon emisyonu bulunmamaktadır. Yaşam döngüsü etkileri çoğunlukla türbin kulesi, kanatlar, jeneratör, temel ve bağlantı ekipmanlarının üretimi ile kurulum ve bakım işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Rüzgâr enerjisinin yaşam döngüsü karbon yoğunluğu karaüstü sistemlerde yaklaşık 11, denizüstü sistemlerde ise 12 gCO_2eq/kWh düzeyindedir. Bu değerler, incelenen elektrik üretim yöntemleri arasında en düşük karbon yoğunluklarından bazılarını temsil etmektedir. Bununla birlikte türbinlerin arazi kullanımı, görsel etkileri, gürültü oluşumu ve kuşlar üzerindeki etkileri de çevresel değerlendirmelerde dikkate alınmalıdır.

Hidroelektrik enerji: Hidroelektrik santraller, suyun potansiyel enerjisinden yararlandıkları için işletme sırasında doğrudan fosil yakıt tüketmez ve genellikle düşük karbonlu elektrik üretir. Santral ve baraj inşasında kullanılan beton, çelik ve iş makineleri yaşam döngüsü emisyonlarının başlıca kaynaklarıdır. IPCC tarafından hidroelektrik için yaklaşık 24 gCO_2eq/kWh yaşam döngüsü medyan değeri verilmekle birlikte bu değer santralin türüne ve rezervuar özelliklerine bağlı olarak geniş bir aralıkta değişebilmektedir. Özellikle sıcak iklimlerdeki büyük rezervuarlarda su altında kalan organik maddelerin ayrışması sonucu metan oluşması karbon yoğunluğunu artırabilir. Ayrıca akarsu ekosistemleri, arazi kullanımı ve yerel topluluklar üzerindeki etkiler hidroelektrik projelerin çevresel değerlendirmesinde önem taşımaktadır.

3.3. Elektrik şebekesi karışımı

Gerçek uygulamalarda ısı pompaları genellikle tek bir üretim kaynağından değil, farklı kaynaklardan üretilen elektriğin birlikte aktarıldığı ulusal şebekeden beslenmektedir. Bu nedenle şebeke elektriğinin karbon yoğunluğu; kömür, doğal gaz, güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi kaynakların üretimdeki paylarına ve santral verimlerine bağlı olarak ülkeler ve yıllar arasında değişmektedir. Fosil yakıtların payının yüksek olduğu şebekelerde ısı pompasının dolaylı emisyonları artarken, yenilenebilir enerji payının yükselmesi sistemin çevresel avantajını güçlendirmektedir. Farklı elektrik kaynaklarının genel karbon düzeyleri ve ısı pompası performansı üzerindeki etkileri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. *Elektrik üretim kaynaklarının karbon düzeyi ve ısı pompası performansına etkisi*

Elektrik kaynağı	Genel karbon düzeyi	Isı pompasına etkisi
Kömür/linyit	Çok yüksek	Çevresel avantajı azaltır
Doğal gaz	Orta–yüksek	SCOP'a bağlı avantaj sağlar
Şebeke karışımı	Ülkeye göre değişir	Üretim bileşimine bağlıdır
Güneş	Düşük	Çevresel avantajı artırır
Rüzgâr/hidroelektrik	Çok düşük	En düşük işletme emisyonlarını sağlar

4. Elektrik Kaynağının Isı Pompası Emisyonlarına Etkisi

4.1. Birim faydalı ısı başına emisyon

Elektrik tahrikli bir ısı pompasının işletme sırasında neden olduğu dolaylı sera gazı emisyonları, tükettiği elektrik miktarına ve bu elektriğin karbon yoğunluğuna bağlıdır. Farklı kapasite ve çalışma koşullarındaki sistemlerin ortak bir temelde karşılaştırılabilmesi için emisyonlar, 1 kWh faydalı ısı üretimi esas

alınarak hesaplanabilir. Isı pompasının birim faydalı ısı başına emisyonu aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$EF_{\mathrm{HP}} = \frac{EF_{\mathrm{el}}}{SCOP} \tag{3}$$

Burada EF_{HP}, ısı pompasının birim faydalı ısı başına karbon emisyonunu gCO_2eq/kWh; EF_{el}, kullanılan elektriğin karbon yoğunluğunu gCO_2eq/kWh_{el}; *SCOP* ise ısı pompasının mevsimsel performans katsayısını ifade etmektedir.

Denklem (3), ısı pompasının çevresel performansının elektrik kaynağı ile cihaz veriminin ortak sonucu olduğunu göstermektedir. Aynı elektrik kaynağı kullanıldığında *SCOP*'un yükselmesi, 1 kWh faydalı ısı üretmek için gereken elektrik miktarını ve buna bağlı emisyonları azaltmaktadır. Buna karşılık aynı *SCOP* değerinde daha yüksek karbon yoğunluğuna sahip elektriğin kullanılması, ısı pompasının birim ısı başına emisyonunu artırmaktadır. Örneğin *SCOP* değeri 4 olan bir ısı pompası, 1 kWh faydalı ısı sağlamak için yaklaşık 0,25 kWh elektrik tüketir. Elektriğin karbon yoğunluğu 400 gCO_2eq/kWh olduğunda birim faydalı ısı başına emisyon 100 gCO_2eq/kWh olur.

Binanın yıllık ısıtma ihtiyacı biliniyorsa toplam işletme emisyonu aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$E_{\mathrm{HP}} = \frac{Q_{h,\mathrm{annual}} \times EF_{\mathrm{el}}}{SCOP} \tag{4}$$

Burada $Q_{h,annual}$, binanın yıllık faydalı ısı ihtiyacını göstermektedir. Bu hesaplama temel olarak elektrik tüketiminden kaynaklanan dolaylı emisyonları kapsamaktadır; soğutucu akışkan kaçakları ile cihazın üretim ve kullanım ömrü sonu etkileri ayrıca değerlendirilmelidir.

4.2. Doğal gazlı sistemle karşılaştırma

Konut ölçeğindeki değerlendirmelerde, ısı pompasına alternatif referans sistem olarak yoğuşmalı doğal gazlı kombi kullanılabilir. Kombinin 1 kWh faydalı ısı üretirken neden olduğu emisyon aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$EF_{\text{kombi}} = \frac{EF_{\text{gaz}}}{\eta_{\text{kombi}}} \tag{5}$$

Burada EF_{kombi}, kombinin birim faydalı ısı başına emisyonunu $gCO_2eq/kWh_{ısı}$; EF_{gas}, doğal gazın yakıt enerjisi başına emisyon faktörünü gCO_2eq/kWh_{fuel}; η_{kombi} ise kombinin mevsimsel verimini ifade etmektedir. Kombi verimi azaldıkça aynı miktarda faydalı ısı üretmek için tüketilen doğal gaz ve buna bağlı emisyon artmaktadır. Isı pompasının çevresel açıdan daha avantajlı olması için $EF_{HP}<EF_{kombi}$ koşulunu sağlaması gerekir.

4.3. Kritik SCOP

Kritik *SCOP*, ısı pompasının birim faydalı ısı başına oluşturduğu emisyonun doğal gazlı kombinin emisyonuna eşit olduğu mevsimsel performans değeridir. Bu değer, ısı pompasının çevresel açıdan avantaj sağlaması için ulaşması gereken en düşük performans düzeyini gösterir:

$$SCOP_{\text{kritik}} = \frac{EF_{\text{el}}}{EF_{\text{kombi}}} = \frac{EF_{\text{el}}\,\eta_{\text{kombi}}}{EF_{\text{gaz}}} \tag{6}$$

Eğer:

- $SCOP > SCOP_{kritik}$ ise ısı pompası daha düşük emisyonludur.
- $SCOP = SCOP_{kritik}$ ise emisyonlar eşittir.
- $SCOP < SCOP_{kritik}$ ise kombi daha düşük emisyonludur.

5. Literatür Bulgularının Değerlendirilmesi ve Tartışma

Isı pompalarının çevresel performansı, yalnızca cihazın teknik özellikleri veya nominal performans katsayısı üzerinden değerlendirilemez. Birim faydalı ısı başına oluşan sera gazı emisyonu, ısı pompasının mevsimsel performans katsayısı ile tüketilen elektriğin karbon yoğunluğunun ortak etkisine bağlıdır. Dolayısıyla aynı ısı pompası, farklı elektrik üretim kaynaklarıyla beslendiğinde oldukça farklı çevresel sonuçlar ortaya koyabilir. Yüksek SCOP, faydalı ısı üretimi için gereken elektrik miktarını azaltırken düşük karbon yoğunluğuna sahip elektrik kullanılması, tüketilen her birim elektriğe karşılık oluşan emisyonu sınırlandırmaktadır. En yüksek çevresel fayda, yüksek mevsimsel performans ile düşük karbonlu elektrik üretiminin birlikte sağlandığı koşullarda elde edilmektedir.

Elektriğin güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi yenilenebilir kaynaklardan karşılanması, ısı pompalarının çevresel üstünlüğünü belirgin biçimde artırmaktadır. Bu kaynakların işletme sırasındaki doğrudan emisyonları oldukça düşük olmakla birlikte, kullanılan ekipmanların üretimi, kurulumu, bakımı ve kullanım ömrü sonunda bertaraf edilmesi gibi süreçlerden kaynaklanan yaşam döngüsü emisyonları bulunmaktadır. Buna rağmen yenilenebilir elektriğin yaşam döngüsü karbon yoğunluğu, fosil yakıtlara dayalı elektrik üretimine göre genellikle önemli ölçüde daha düşüktür. Bu nedenle yenilenebilir elektrikle çalışan ısı pompaları, doğal gazlı kombiler ve diğer fosil yakıtlı ısıtma sistemleri karşısında güçlü bir karbon azaltım potansiyeline sahiptir.

Buna karşılık kömür ve linyit ağırlıklı elektrik üretimi, ısı pompasının sağladığı çevresel avantajı azaltabilmektedir. Özellikle düşük dış hava sıcaklığı, yüksek ısıtma suyu sıcaklığı, yetersiz boyutlandırma veya elektrikli yedek ısıtıcı kullanımı gibi nedenlerle SCOP değerinin düşmesi durumunda, yüksek karbon yoğunluğuna sahip elektrik tüketimi birim faydalı ısı başına emisyonu önemli

ölçüde artırmaktadır. Bu koşullarda ısı pompasının doğal gazlı kombiye göre emisyon üstünlüğü sınırlı kalabilir veya tamamen ortadan kalkabilir. Bu nedenle değerlendirmelerde yalnızca ısı pompasının belirli bir çalışma koşulundaki COP değeri değil, bütün ısıtma dönemini temsil eden SCOP değeri esas alınmalıdır. Ayrıca hesaplanan kritik SCOP değeri, belirli bir elektrik kaynağı altında ısı pompasının doğal gazlı sisteme göre çevresel açıdan avantajlı olabilmesi için aşılması gereken sınırı göstermektedir.

Elektrik şebekesinin zaman içinde karbonsuzlaşması, hâlihazırda kullanılan ısı pompalarının çevresel performansını da iyileştiren önemli bir etkendir. Şebekedeki yenilenebilir ve diğer düşük karbonlu üretim kaynaklarının payı arttıkça, cihazda herhangi bir değişiklik yapılmasa bile kullanım kaynaklı dolaylı emisyonlar azalmaktadır. Bu durum, ısı pompalarını uzun vadeli enerji dönüşümü açısından avantajlı hâle getirmektedir. Fosil yakıtlı bir kazanın kullanım süresince yakıtın doğrudan yanmasından kaynaklanan emisyonları büyük ölçüde devam ederken elektrikli ısı pompasının emisyonları, elektrik üretim sistemindeki dönüşüme bağlı olarak zaman içerisinde düşebilir. Bununla birlikte yıllık ortalama şebeke emisyon faktörlerinin, elektrik üretimindeki mevsimsel ve saatlik değişimleri tam olarak yansıtmayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

İklim koşulları da ısı pompası emisyonlarını dolaylı olarak etkilemektedir. Hava kaynaklı ısı pompalarında dış hava sıcaklığı düştükçe evaporasyon sıcaklığı azalmakta, kompresörün basınç oranı ve elektrik tüketimi artmaktadır. Buz çözme işlemleri ile yardımcı ısıtıcıların devreye girmesi de mevsimsel performansı düşürebilmektedir. Ilıman iklimlerde ise dış hava sıcaklıklarının ısıtma dönemi boyunca görece yüksek seyretmesi, hava kaynaklı ısı pompalarının daha yüksek SCOP değerleriyle çalışmasına olanak sağlayabilir. Bu nedenle aynı elektrik üretim yapısı altında, ılıman bölgelerde kullanılan bir ısı pompası soğuk iklimlerde kullanılan

benzer bir sisteme göre daha düşük birim ısı emisyonuna sahip olabilir. Ancak bu üstünlüğün sağlanabilmesi için sistemin bina yüküne uygun boyutlandırılması, düşük sıcaklıklı ısıtma sistemleriyle çalıştırılması ve kontrol stratejisinin doğru belirlenmesi gerekir.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, ısı pompalarının çevresel avantajı ulusal elektrik üretim karışımındaki kömür, doğal gaz, hidroelektrik, rüzgâr ve güneş paylarının zaman içindeki değişimine bağlıdır. Kömür ve doğal gazın elektrik üretimindeki varlığı şebekenin karbon yoğunluğunu artırırken hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerjisinin payındaki artış bu değerin düşmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle Türkiye'deki ısı pompalarının çevresel performansını değerlendirirken yalnızca tek bir elektrik üretim kaynağını esas almak yerine, incelenen yıla ait ulusal şebeke karışımının da dikkate alınması gerekir. Bununla birlikte, elektriğin aynı sahada bulunan fotovoltaik sistemlerden sağlandığı uygulamalar ayrı bir düşük karbonlu senaryo olarak incelenebilir.

6. Sonuç

Isı pompaları, çevreden sağladıkları düşük sıcaklıktaki ısıyı elektrik enerjisi yardımıyla kullanılabilir bir sıcaklık düzeyine yükselterek tükettikleri elektrikten daha fazla faydalı ısı üretebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde binalarda fosil yakıt tüketiminin, birincil enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte, kullanım noktasında doğrudan yakıt yakılmaması, elektrikli ısı pompalarının kendiliğinden sıfır karbonlu olduğu anlamına gelmemektedir. Sistemin gerçek çevresel performansı, cihazın enerji verimliliği ile tüketilen elektriğin üretim biçiminin ortak etkisi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda, ısı pompalarının emisyon performansı değerlendirilirken anlık çalışma koşullarını temsil eden COP değerinin yanı sıra bütün ısıtma dönemindeki

gerçek çalışma şartlarını dikkate alan SCOP değerinin kullanılması daha uygun bir yaklaşımdır. Yüksek SCOP, birim faydalı ısı üretimi için gereken elektrik miktarını azaltırken elektriğin düşük karbon yoğunluğuna sahip olması, tüketilen elektrikten kaynaklanan dolaylı emisyonları sınırlandırmaktadır. Dolayısıyla elektrik kaynağı ve SCOP birbirinden bağımsız değil, birlikte ele alınması gereken iki temel değişkendir. Kritik SCOP değeri ise belirli bir elektrik üretim yapısı altında ısı pompasının doğal gazlı bir sisteme göre çevresel üstünlük sağlayabilmesi için ulaşması gereken performans düzeyinin belirlenmesine imkân vermektedir.

Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik, ısı pompalarının fosil yakıtlı sistemlere göre çevresel avantajını belirgin biçimde artırmaktadır. Buna karşılık, kömür ve linyit ağırlıklı elektrik üretimi ile düşük mevsimsel performansın bir araya gelmesi, sağlanabilecek emisyon azaltımını sınırlayabilmekte ve bazı koşullarda ortadan kaldırabilmektedir. Ayrıca iklim koşulları, ısıtma sisteminin çalışma sıcaklığı, cihazın boyutlandırılması, kontrol yöntemi ve yardımcı ısıtıcı kullanımı gibi etkenler SCOP değerini değiştirerek çevresel performansı dolaylı biçimde etkilemektedir. Bu nedenle ısı pompası uygulamalarının değerlendirilmesinde bölgesel iklim koşullarının ve güncel elektrik üretim karışımının dikkate alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak, ısı pompalarının yaygınlaştırılması binalarda düşük karbonlu ısıtmaya geçiş açısından tek başına yeterli bir çözüm olarak görülmemelidir. Bu teknolojinin sağlayabileceği çevresel faydanın en üst düzeye çıkarılması; yüksek verimli cihazların seçilmesi, sistemlerin uygun biçimde tasarlanması ve işletilmesi, düşük sıcaklıklı ısıtma uygulamalarının geliştirilmesi ve elektrik üretiminin eş zamanlı olarak karbonsuzlaştırılmasıyla mümkündür. Elektrik şebekesinde yenilenebilir kaynakların payı arttıkça mevcut ısı pompalarının kullanım kaynaklı emisyonları da azalacağından, ısı pompaları ile temiz elektrik üretiminin birlikte geliştirilmesi uzun

vadeli enerji ve iklim politikalarının temel unsurlarından biri olmalıdır.

Kaynakça/References

[1] Gazioğlu, A. Enerji etkin bina tasarımında ısıtma enerjisi harcamalarını azaltmaya yönelik bir iyileştirme çalışması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2012.

[2] Gaur, A., Fitiwi, D., & Curtis, J. (2020). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy research and social science, 71*, 101764. https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764

[3] Du, R., Han, H., Yin, G., Wang, S., Zhang, C., & Li, T.-X. (2026). Renewable energy-driven heat pumps integrated with synergistic thermal-electrical energy storage for decarbonizing building heating. *Carbon Neutrality, 5*. https://doi.org/10.1007/s43979-026-00181-y

[4] Walker, I., Less, B., & Casquero-Modrego, N. (2022). Carbon and Energy Cost Impacts of Electrification of Space Heating with Heat Pumps in the US. *Energy and Buildings*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111910

[5] Slorach, P. C., & Stamford, L. (2021). Net zero in the heating sector: Technological options and environmental sustainability from now to 2050. *Energy Conversion and Management, 230*, 113838. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113838

[6] Naumann, G., Schropp, E., & Gaderer, M. (2024). Environmental, economic, and eco-efficiency assessment of residential heating systems for low-rise buildings. Journal of Building Engineering. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111074

[7] Sitaraman, A., Bashir, N., Irwin, D., & Shenoy, P. J. (2023). No Free Lunch: Analyzing the Cost of Deep Decarbonizing Residential Heating Systems. *Proceedings of the 14th International Green and*

Sustainable Computing Conference. https://doi.org/10.1145/3634769.3634799

[8] Roca, J. C., Toleikyte, A., Volt, J., & Carlsson, J. (2024). Alternatives for upgrading from high-temperature to low-temperature heating systems in existing buildings: Challenges and opportunities. *Energy and Buildings*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114798

[9] Waite, M., & Modi, V. (2020). Electricity Load Implications of Space Heating Decarbonization Pathways. *Joule*. https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.11.011

[10] Khastar, M., & Rivers, N. (2026). The role of backup fuel in residential electrification: assessing the environmental, economic, and grid impacts of heat pump backup systems in cold-climate residential. *Energy and Buildings*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.116963

[11] Vonžudaitė, O., Martišauskas, L., Bakas, R., Urbonienė, S., & Urbonas, R. (2023). Optimization of Heat Pump Systems in Buildings by Minimizing Costs and CO2 Emissions. *Applied Sciences*. https://doi.org/10.3390/app13084864

[12] Żelazna, A., & Pawłowski, A. (2025). Review of the Role of Heat Pumps in Decarbonization of the Building Sector. *Energies*. https://doi.org/10.3390/en18133255

[13] Naumann, G., Schropp, E., & Gaderer, M. (2024). Environmental, economic, and eco-efficiency assessment of residential heating systems for low-rise buildings. *Journal of Building Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111074

[14] Dulkadiroğlu, H. (2018). "Türkiye'de Elektrik Üretiminin Sera Gazı Emisyonları Açısından İncelenmesi." *Niğde Ömer Halisdemir*

Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1), 67–74. https://doi.org/10.28948/ngumuh.369948

[15] IPCC (2011). *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press.

[16] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2025). *Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri*.

BÖLÜM 3
TAŞIT KLİMA SİSTEMLERİNDE NANOSOĞUTUCU AKIŞKANLARIN PERFORMANS ANALİZİ

Metin YILMAZ[1], Canan CİMŞİT[2], Elif ÖĞÜT[3]

Giriş

Kloroflorokarbon (CFC) ve hidrokloroflorokarbon (HCFC) soğutucu akışkanlarının ozon tabakasını inceltme potansiyeli (ODP), son yaklaşık 20 yılda hidroflorokarbon (HFC) soğutucu akışkanlarının kullanımının giderek artmasına neden olmuştur. Ozon tabakasını inceltme potansiyelleri bulunmamasına rağmen, birçok HFC soğutucu akışkanının küresel ısınma potansiyeli (GWP) nispeten yüksektir. HFC'ler, altı sera gazı grubundan birini oluşturmakta olup, 1997 yılında kabul edilen Kyoto Protokolü uyarınca bu gazların emisyonlarının azaltılması gerekmektedir. Birçok araştırmacı, geleneksel HFC soğutucu akışkanlarına alternatifler bulmak amacıyla çalışmalar yürütmüştür. Avrupa Birliği'nin F-Gaz düzenlemeleri (842/2006 sayılı Tüzük ve 2006/40/EC sayılı Direktif), florlu sera gazlarının kullanımına kademeli kısıtlamalar getirmiştir. Buna göre, yeni modellerin üretimi 1 Ocak 2011 tarihinde yasaklanmış; küresel ısınma potansiyeli (GWP) 150'den büyük olan florlu sera gazlarını içeren klima sistemlerine sahip yeni modellerin ve yeni araçların üretimi ve piyasaya sunulması ise 1 Ocak 2017 tarihinden itibaren yasaklanmıştır [Daviran et al., 2017]. Otomotiv endüstrisi, yıllar içerisinde kloroflorokarbonlar (CFC'ler) ve hidrokloroflorokarbonlar (HCFC'ler) kullanan klima sistemlerinden uzaklaşarak hidroflorokarbon (HFC) esaslı soğutucu akışkanları kullanmaya başlamıştır. R-12 kullanımının ardından, taşıt klima sistemleri R134a kullanılacak şekilde uyarlanmıştır. Klima sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanların çevre üzerindeki etkilerine ilişkin yürürlükteki yasal düzenlemeler doğrultusunda, CFC grubuna ait R-12 soğutucu akışkanı, HFC grubuna ait R134a ile değiştirilmiştir [Grygierzec ve Werle, 2020]. R134a, taşıt klima sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir soğutucu akışkandır. R134a'nın ozon tabakasını inceltme potansiyeli (ODP) sıfır olmasına rağmen, küresel ısınma potansiyeli (GWP) 1430 gibi yüksek bir değere sahiptir. Avrupa Birliği, 2011 yılında, 2017 yılından itibaren üretilen yeni araçlarda taşıt klima sistemlerinde GWP değeri 150'den büyük olan soğutucu akışkanların kullanımını kısıtlayan bir düzenleme kabul etmiştir. Bu nedenle, alternatif soğutucu akışkanların geliştirilmesi ve uygulanmasına yönelik araştırmalar yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. GWP değeri 150'nin altında olan soğutucu akışkanlar, R134a'nın yerine kullanılabilecek potansiyel alternatifler olarak değerlendirilmektedir. Bu akışkanlar arasında R1234yf, R744, R290, R600a ve R152a bulunmaktadır. Bununla birlikte, hidrokarbonlar (R290, R600a ve R152a) gibi düşük GWP değerine sahip soğutucu akışkanlar, yanıcılık gibi güvenlik endişeleri nedeniyle daha az ilgi görmüştür. R744 (CO_2), ODP değeri 0 ve GWP değeri 1 olan doğal bir alternatif soğutucu akışkandır. Ancak bu akışkanın kullanımı yüksek çalışma basınçları gerektirmektedir. Sistem güvenilirliği kritik önem taşımakta olup, geleneksel klima sistemlerinin teknik özelliklerinde önemli değişiklikler yapılması gerekmektedir. Bu durum, söz konusu çözümün maliyet etkinliğini azaltmaktadır [Cho ve Park, 2016].

[1]Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Umuttepe-Kocaeli
[2] Kocaeli Üniversitesi, Gölcük MYO, Kocaeli, Türkiye
[3]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Umuttepe, Kocaeli, Türkiye

Bu kısıtlamaların bir sonucu olarak, doğal soğutucu akışkanlar soğutma endüstrisi için en uygun çözümlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Klima sistemlerini etkileyen değişiklikler ve yasal düzenlemeler, çevre üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeyde olan soğutucu akışkanların kullanıldığı sistemlerin geliştirilmesini teşvik etmektedir. R134a'ya alternatiflerden biri, hidrofloroolefinler (HFO) grubunda yer alan R1234yf soğutucu akışkanıdır. Bu akışkan, çok sayıda araştırmaya konu olmuştur. Gaurav ve Raj Kumar'a göre, R134a/R1234yf/R1234ze soğutucu akışkanlarından oluşan ve kütlece %40 R134a, %22 R1234yf ve %38 R1234ze içeren karışım, R134a'nın yerine kullanılabilecek alternatiflerden biridir. Bu sonuç, R134a'nın söz konusu karışımla değiştirilmesinin sistem tasarımında herhangi bir değişiklik yapılmadan mümkün olabileceğini göstermektedir. R1234yf, 4 gibi düşük bir küresel ısınma potansiyeli (GWP) ile karakterize edilmektedir. Bu değer, R134a'nın GWP değerinden yaklaşık 350 kat daha düşüktür. R1234yf'nin bir diğer önemli özelliği, atmosferdeki bozunma süresinin yaklaşık 11 gün olmasıdır. Bu süre, bozunma süresi yaklaşık 13 yıl olan R134a'ya kıyasla önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, iki soğutucu akışkanın özellikleri arasındaki farklılıklar nedeniyle, R134a için tasarlanmış klima sistemlerinin yeni soğutucu akışkan kullanılmadan önce yeniden tasarlanması gerektiği belirtilmektedir [Grygierzec ve Werle, 2020]. R134a'nın yerine kullanılmak üzere R1234yf kullanılan soğutma çevriminin geçici rejim tepkisini karşılaştırmalı olarak incelenen çalışma sonucunda, R134a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının dinamik davranışlarının birbirine benzer olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Diğer yapılan çalışmalarda ise taşıt klima sistemlerinde R134a'yı referans alarak R152a, R1234yf ve R1234ze(E) soğutucu akışkanlarını karşılaştırmalı olarak incelenmiş olup, 1234yf'nin performansının, R152a ve R1234ze(E) ile elde edilen performanslarla karşılaştırıldığında, R134a'nın performansına oldukça yakın olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, taşıt klima sistemlerinde R1234yf kullanılan soğutma sisteminin performansını araştırılmış, çalışma sonucunda, R1234yf kullanılan soğutma sisteminin performans katsayısının (COP), R134a kullanılan sisteme kıyasla %4,0 daha düşük olduğu tespit edilmiştir [Alhendal et al.,2020].

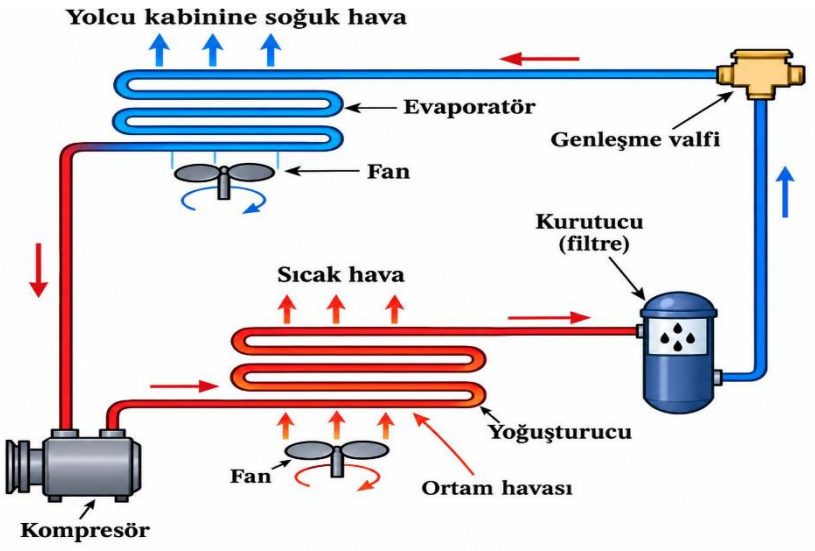
Nanofluidler (nanoakışkanlar), bir temel akışkan ve 1–100 nm boyutlarındaki nanoparçacıklardan oluşan, mühendislik yoluyla geliştirilmiş kolloidal karışımlardır. Yaygın temel akışkanlar arasında su, organik sıvılar (örneğin etilen glikol, trietilen glikol ve soğutucu akışkanlar), yağlar ve yağlayıcılar, biyolojik sıvılar, polimer çözeltileri ve diğer yaygın sıvılar bulunmaktadır. Nanoparçacık olarak yaygın biçimde kullanılan malzemeler arasında kimyasal açıdan kararlı metaller (örneğin altın ve bakır), metal oksitler (örneğin alümina, silika, zirkonya ve titanya), oksit seramikleri (örneğin Al_2O_3 ve CuO), metal karbürler (örneğin SiC), metal nitrürler (örneğin AlN ve SiN), farklı formlardaki karbon malzemeleri (örneğin elmas, grafit, karbon nanotüpler ve fulleren) ile yüzeyleri işlevselleştirilmiş nanoparçacıklar yer almaktadır. Isı transferi amaçlı nanoakışkanlar, ilk olarak ABD'deki Argonne Ulusal Laboratuvarı'ndan Choi [8] tarafından ortaya konulmuştur. Bu tarihten itibaren nanoakışkanların termal özellikleri (özellikle ısıl iletkenlikleri), tek fazlı akış koşullarındaki performansları ve kaynamalı ısı transferi özellikleri üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmalar, nanoakışkanların geleneksel temel akışkanlara kıyasla önemli ölçüde daha iyi ısı transferi özellikleri gösterebildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu alanda çok sayıda patent de yayımlanmıştır [Alawi et al., 2015]. Araştırmacılar tarafından sistem performansını artırmak amacıyla kullanılan yöntemlerden biri nanoteknolojidir. Bu kapsamda, çalışma akışkanına nanoparçacık ilavesinin sağlayabileceği avantajlar üzerinde durulmaktadır. Soğutucu akışkan ile nanoparçacıkların karışımından oluşan akışkanlar nanosoğutucu akışkanlar (nano-refrigerants) olarak adlandırılmaktadır. Bu akışkanlar, daha yüksek ısıl iletkenlik özellikleri sayesinde klima ve soğutma sistemlerinin ısı transferi kapasitesini ve performansını artırma potansiyeline sahiptir [Bibin B.S, Edison Gundabattini, 2023].

Soğutma sistemlerinde nanosoğutucu akışkanların kullanımını inceleyen literatürde pek çok çalışma mevcuttur. R1234yf soğutucu akışkanıyla birlikte kullanılan SiO_2 ve Al_2O_3 nanoyağlayıcılarının taşıt klima sisteminin performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. SiO_2 nanoyağlayıcısı soğutma kapasitesini artırmada, Al_2O_3 nanoyağlayıcısı ise enerji verimliliğini iyileştirmede daha başarılı sonuçlar vermiştir [Sharif et al., 2022]. Başka bir çalışmada, R1234yf soğutucu akışkanının R134a'ya alternatif olarak buhar sıkıştırmalı soğutma sistemindeki performansı enerji ve ekserji analizleriyle incelenmiştir. Saf R1234yf kullanımında, R134a'ya kıyasla kompresör güç tüketiminin %9 arttığı, soğutma kapasitesinin %8 ve EER değerinin %17 azaldığı belirlenmiştir. Bu performans kayıplarını azaltmak amacıyla kompresör yağına Al_2O_3, grafen ve CNT nanoparçacıkları farklı kütlesel oranlarda eklenmiştir. En iyi sonuç, kütlece %0,250 grafen ilavesiyle elde edilmiş; soğutma kapasitesi saf R1234yf'ye göre %24, EER ise %32 artmıştır. Grafen ilavesi ayrıca ikinci yasa verimliliğinde sınırlı bir iyileşme sağlamıştır [Bilen et al., 2022]. Yeni enerji araçlarına ait bir klima sisteminde, farklı çalışma koşulları altında saf R134a soğutucu akışkanının ve %1 Fe_3O_4–R134a nanosoğutucu akışkanının durum parametreleri ile sistem enerji verimliliği incelenmiştir. Sonuçlar, yeni enerji araçlarının klima sisteminde %1 Fe_3O_4–R134a nanosoğutucu akışkanının güvenli ve normal çalışma koşullarında kullanılabildiğini göstermiştir. Soğutucu akışkana %1 Fe_3O_4 nanoparçacığı ilave edilmesiyle, klima sisteminin her bir bileşenindeki akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark artmış; ısı değişim hızı ve performans katsayısı (COP) yükselmiştir [Pang Ve Wang, 2019]. Otomobil klima test düzeneği üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk olarak saf R134a soğutucu akışkanı kullanılarak sistemin termodinamik özellikleri analiz edilmiş, ardından elde edilen sonuçlar CuO katkılı R134a nanosoğutucu akışkanının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Saf R134a ile karşılaştırıldığında, nanosoğutucu akışkanın performans katsayısının (COP) düşük kompresör hızında %17, orta hızda %20 ve 1600 dev/dak değerindeki yüksek kompresör hızında %34 arttığı belirlenmiştir. CuO nanoparçacıklarının R134a'ya ilave edilmesi, deney koşullarında kompresör basma sıcaklığını düşürmüş ve sistemin performans katsayısını artırmıştır [Abdulla et al., 2022]. R134a soğutucu akışkanı ile bakır oksit (CuO) nanoparçacıkları içeren R134a esaslı nanosoğutucu akışkanın performansı, buhar sıkıştırmalı soğutma sistemi üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, saf R134a ile kütlece %1,6 CuO konsantrasyonuna sahip CuO/R134a nanosoğutucu akışkanın performans katsayısı (COP) ve güç tüketimi karşılaştırılmıştır. Nanosoğutucu akışkan, CuO nanoparçacıklarının temel soğutucu akışkan olan R134a içerisinde dağıtılması ve karışımın ultrasonik işlemle hazırlanması yoluyla elde edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, saf R134a kullanımına kıyasla CuO/R134a nanosoğutucu akışkan kullanıldığında COP değerinde %16,66 artış, güç tüketiminde ise %13,79 azalma raporlanmıştır [Ande, 2018].

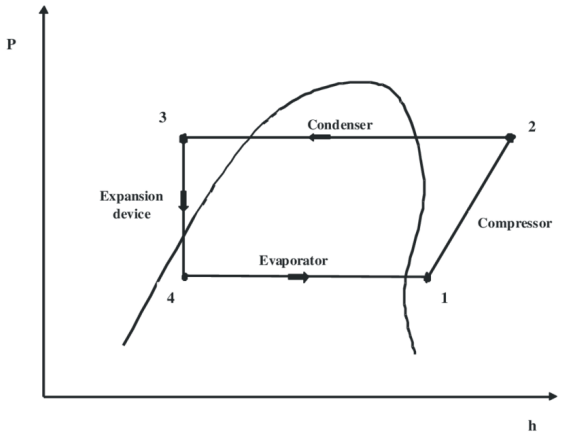
Bu çalışmada nanoparçacıkların doğrudan R1234yf soğutucu akışkan içerisine dağıtılarak nano-akışkan olarak taşıt klima sistemlerinde kullanılarak sistem verimliliği (COP) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada farklı nanoparçacık türleri (CuO, SiO_2, ZnO, Al_2O_3 ve CNT) ve konsantrasyonlarının sistemin enerji performansına etkisi karşılaştırılarak, düşük küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip R1234yf esaslı nanosoğutucu akışkanların enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik potansiyeli araştırılmıştır. Bu doğrultuda, nanoparçacık ilavesiyle soğutucu akışkanın termofiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimlerin çevrim performansına yansımaları değerlendirilmiş ve enerji verimliliğini artırabilecek uygun nanoparçacık türü ile konsantrasyonunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen bulguların, düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanların kullanımını destekleyen ve taşıt klima sistemlerinde enerji verimliliğinin geliştirilmesine yönelik alternatiflerin değerlendirilmesine katkı sağlaması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Taşıt klima sistemleri buhar sıkıştırmalı mekanik soğutma çevrimini göre çalışmakta olup, çevrimi temel olarak bir kompresör, bir kondenser, bir genleşme vanası ve bir evaporatör olmak üzere dört bileşenden oluşur (Şekil 1) (Mohamed vd., 2018). Şekil 2'de gösterilen buhar sıkıştırmalı soğutma çevriminin Basınç-Entalpi Diyagramı görülmektedir.



Şekil 1 . Buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimi



Şekil 2 . Buhar Sıkıştırmalı Soğutma Çevrimi

Bu çalışmada 5 kW soğutma kapasitesine sahip bir buhar sıkıştırmalı taşıt klima sisteminde çalışma akışkanı olarak düşük küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip R1234yf seçilmiş olup, beş farklı nanoparçacıkların ağırlıkça oranları %0,01 ile %0,05'e aralıklarında (CuO, SiO_2, ZnO, Al_2O_3 ve CNT) ilave edilerek nano soğutucu akışkanlar oluşturulmuştur. 40°C sabit kondenser sıcaklığı ve 5°C evaporatör sıcaklığındaki nano soğutucu akışkanların kompresör güç gereksinimi (W_{comp}) ve soğutma performans katsayısı (COP) üzerindeki etkileri teorik olarak analiz edilmiştir.

Çevrimin analizinde kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (1)$$

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (2)$$

$$W_{comp} = m(h_2 - h_1) \quad (3)$$

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (4)$$

$$\rho_{nr} = \omega - \rho_{np} + (1 - \omega)\rho_{pr} \quad (5)$$

Analizde kullanılan nanoparçacıkların özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (Kosmadakis ve Neofytou, 2019, Zawawi et al., 2017, Kedzierski et al., 2017, Devarajan et al., 2018).

Tablo 1. Nanoparçacıkların özellikleri

Nanopartikül	**Termal iletkenlik (W/m.°C)**	**Yoğunluk (kg/m3)**
Al_2O_3	38,7	3970
CuO	33,0	6315
SiO_2	1,4	2220
ZnO	29,0	5600
CNT	2500,0	2100

Nano soğutucu akışkanın yoğunluğu yine Aktaş vd. (2015) tarafından sunulan korelasyon (Denklem 5) yardımıyla hesaplanmıştır. Çalışma süresince saf R1234yf akışkanına ait tüm termofiziksel ve termodinamik referans özellikler COOLPROP 8.0.0 kütüphanesinden elde edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Aynı çalışma koşullarındaki saf R1234yf soğutucu akışkanının kompresör gücü 1,09 (kW) ve COP değeri 4,57 olarak hesaplanmıştır. Tablo 2–6'daki sonuçlar incelendiğinde, nanoparçacıkların ağırlıkça oranlarının artmasıyla tüm nano soğutucu akışkanların COP değerlerinde bir yükseliş meydana geldiği görülmektedir. En yüksek COP değerleri R1234yf+CuO soğutucu akışkanında elde edilirken bunu sırasıyla R1234yf+ZnO ve R1234yf+Al_2O_3 izlemiştir. Buna karşılık, en düşük COP değerleri ise birbirine yakın olarak R1234yf+SiO_2 ve R1234yf+CNT soğutucu akışkanlarından elde edilmiştir. Burada COP artışı elde edilmesinin temel nedeni, nanoparçacık ilavesinin karışımın termofiziksel özelliklerini ve sistemdeki ısı transferi süreçlerini değiştirmesidir. Isı transfer performansındaki iyileşme, kompresörün iş tüketimini azaltarak COP değerlerinin artmasına neden olmaktadır.

Tablo 2. R1234yf+CuO nanosoğutucu akışkanında konsantrasyona bağlı COP değişimi

Soğutucu Akışkan	**R1234yf+CuO**	**R1234yf+CuO**	**R1234yf+CuO**	**R1234yf+CuO**	**R1234yf+CuO**
Nanoparçacıkların ağırlıkça oranı (wt.%)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Kompresör gücü (kW)	1,05	1,01	0,97	0,93	0,89
COP	4,76	4,96	5,17	5,38	5,61
COP artışı (%)	4,13	8,44	12,94	17,64	22,56

Tablo 3. R1234yf+ZnO nanosoğutucu akışkanında konsantrasyona bağlı COP değişimi

Soğutucu Akışkan	**R1234yf+ZnO**	**R1234yf+ZnO**	**R1234yf+ZnO**	**R1234yf+ZnO**	**R1234yf+ZnO**
Nanoparçacıkların ağırlıkça oranı (wt.%)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Kompresör gücü (kW)	1,05	1,02	0,98	0,95	0,91
COP	4,74	4,91	5,09	5,28	5,48
COP artışı (%)	3,65	7,44	11,37	15,47	19,72

Tablo 4.R1234yf+Al_2O_3 nanosoğutucu akışkanında konsantrasyona bağlı COP değişimi

Soğutucu Akışkan	**R1234yf+Al_2O_3**	**R1234yf+Al_2O_3**	**R1234yf+Al_2O_3**	**R1234yf+Al_2O_3**	**R1234yf+Al_2O_3**
Nanoparçacıkların ağırlıkça oranı (wt.%)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Kompresör gücü (kW)	1,07	1,04	1,01	0,99	0,96
COP	4,69	4,81	4,93	5,06	5,19
COP artışı (%)	2,54	5,15	7,83	10,58	13,40

Tablo 5. R1234yf+SiO_2 nanosoğutucu akışkanında konsantrasyona bağlı COP değişimi

Soğutucu Akışkan	**R1234yf+SiO2**	**R1234yf+SiO2**	**R1234yf+SiO2**	**R1234yf+SiO2**	**R1234yf+SiO2**
Nanoparçacıkların ağırlıkça oranı (wt.%)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Kompresör gücü (kW)	1,08	1,06	1,05	1,04	1,02
COP	4,64	4,70	4,76	4,83	4,89
COP artışı (%)	1,35	2,73	4,12	5,53	6,96

Tablo 6. R1234yf+CNT nanosoğutucu akışkanında konsantrasyona bağlı COP değişimi

Soğutucu Akışkan	**R1234yf+CNT**	**R1234yf+CNT**	**R1234yf+CNT**	**R1234yf+CNT**	**R1234yf+CNT**
Nanoparçacıkların ağırlıkça oranı (wt.%)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Kompresör gücü (kW)	1,08	1,07	1,05	1,04	1,03
COP	4,63	4,69	4,75	4,81	4,88
COP artışı (%)	1,29	2,59	3,91	5,25	6,60

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 5 kW soğutma kapasitesine sahip bir taşıt klima sisteminde saf R1234yf soğutucu akışkanı ve bu akışkana beş farklı nanoparçacık (CuO, ZnO, Al_2O_3, SiO_2 ve CNT) ilave edilerek oluşturulan nano soğutucu akışkanları nanoparçacıkların ağırlıkça oranları %0,01 ile %0,05'e aralıklarında teorik analizi yapılmıştır. Nanoparçacıkların ağırlıkça oranının %0,01'den %0,05'e yükseltilmesiyle R1234yf esaslı nano soğutucu akışkanlarda karışımın termofiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimlerin ısı transferi ve çevrim enerji dengesi üzerindeki olumlu etkileri nedeniyle kompresör güç tüketiminin azalması ve COP değerlerinin artması görülmektedir.

Çevresel etkiler ve enerji performansı açısından değerlendirildiğinde, düşük küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip R1234yf soğutucu akışkanının CuO, ZnO ve diğer nanoparçacıklarla zenginleştirilmesi, otomobil klima sistemlerinin enerji verimliliğini artırılması açısından önemli bir araştırma alanıdır. Bu kapsamda nano soğutucuların kullanılmasıyla ısı transfer performansının iyileştirilmesi ve kompresör güç tüketiminin azaltılması, sistemin COP değerini artırarak dolaylı sera gazı emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlayabilir.

Kaynaklar

S. Daviran et al, A comparative study on the performance of HFO-1234yf and HFC-134a as an alternative in automotive air conditioning systems, Applied Thermal Engineering 110 (2017) 1091–1100.

Jan Grygierzec, Sebastian Werle, Critical evaluation of R134a, R1234yf and R744 in passenger car cooling systems, Journal of Power Technologies 100 (3) (2020) 232–239

H. Cho, C. Park, Experimental investigation of performance and exergy analysis of automotive air conditioning systems using refrigerant R1234yf at various compressor speeds, Applied Thermal Engineering 101 (2016) 30–37.

Alhendal et al., Thermal Performance Analysis of Low-GWP Refrigerants in Automotive Air-Conditioning System, (2020).

Alawi et al., Applications of nanorefrigerant and nanolubricants in refrigeration, air-conditioning and heat pump systems: A review, International Communications in Heat and Mass Transfer 68 (2015) 91–97.

Bibin B.S, Edison Gundabattini, Investigation on transport properties, heat transfer characteristics and pressure drop of CuO enhanced R1234yf based refrigerant, Case Studies in Thermal Engineering 49 (2023) 103229.

Sharif, M. Z., Azmi, W. H., Zawawi, N. N. M., & Ghazali, M. F. Comparative air conditioning performance using SiO2 and Al2O3 nanolubricants operating with Hydrofluoroolefin-1234yf refrigerant. *Applied Thermal Engineering*, *205*, (2022) 118053.

Bilen et al., Experimental Investigation of Effects of Nanorefrigerants on Vapor Compression Refrigeration System Using R1234yf Instead of R134a, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi - Journal of Thermal Science and Technology 44:2 (2024) 280-293.

Qiuxing Pang, Xihui Wang, Experimental Study On Heat Transfer Enhancement Of Air-Conditioning System Of New Energy Vehicle, DES-tech Transactions on Environment Energy and Earth Science, 10.12783/dteees/icner2018/28530, (2019).

Abdulla et al., Influence of Evaporator Inlet Air Velocity on the Thermodynamic Properties in an Automotive Air Conditioner International Journal of Vehicle Structures and Systems, Vol. 14 No. 5 (2022).

Ande et al., Experimental Investigation on VCR system using Nanorefrigerant for COP Enhancement, Hemıcal Engıneerıng Transactıons, doı: 10.3303/cet1871162 vol. 71, 2018.

Bentrcia Mohamed, Mohammed Alshitawi and Hanafy Omar. Developmens of alternative systems for automotive air conditioning - A review, Journal of Mechanical Science and Technology 32 (4) (2018) 1857~1867.

Kosmadakis, G.; Neofytou, P. Investigating the effect of nanorefrigerants on a heat pump performance and cost-effectiveness. Therm. Sci. Eng. Prog. (2019) 13, 100371.

Azmi W.H., Mamat R., Redhwan A.A.M., Sharif M.Z., Yusof T.M. Potential Of Nanorefrigerant And Nanolubricant On Energy Saving İn Refrigeration System – A Review. Renew. Sustain. Energy Rev. 69 (2017). 415–428.

Kedzierski, M.A., Brignoli, R., Quine, K.T., Brown, J.S. Viscosity, density, and thermal conductivity of aluminum oxide and zinc oxide nanolubricants. Int. J. Refrig. 74, (2017) 3–11.

Devarajan et al., Thermophysical properties of CNT and CNT/Al_2O_3 hybrid nanofluid, Thermophysical properties of CNT and CNT/Al_2O_3 hybrid nanofluid. Micro & Nano Letters, Volume13, Issue5 (2018).

Aktaş, M., Dalkilic, A. S., Celen, A., Cebi, A., Mahian, O., & Wongwises, S. A theoretical comparative study on nanorefrigerant performance in a single-stage vapor-compression refrigeration cycle. *Advances in Mechanical Engineering*, *7*(1) (2015) 1-12.


BİDGE