

**T.C.
İZMİR DEMOKRASİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**HAVA KAYNAKLI İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİ İÇİN
TÜRKİYE ÖLÇEĞİNDE VERİMLİLİK ARAŞTIRMASI**

Muhammed ŞULE

**Danışman
Prof. Dr. Can COŞKUN**



İZMİR-2026

Muhammed
ŞULE

HAVA KAYNAKLI İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİ İÇİN TÜRKİYE
ÖLÇEĞİNDE VERİMLİLİK ARAŞTIRMASI

2026

TEZ ONAYI

Muhammed ŞULE tarafından hazırlanan "**Hava Kaynaklı İklimlendirme Sistemleri İçin Türkiye Ölçeğinde Verimlilik Araştırması**"adlı tez çalışması 06/02/2026 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde İzmir Demokrasi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Can COŞKUN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyesi

Dr.Öğr.Üyesi Mustafa Murat YAVUZ
İzmir Demokrasi Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN
Yıldız Teknik Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin İzmir Demokrasi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Muhammed ŞULE



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1.GİRİŞ	1
1.1.Tezin Amacı.....	3
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Isı Pompası Tanımı	5
2.1.1. Hava Kaynaklı Isı Pompası.....	7
2.1.2. Su Kaynaklı Isı Pompası	9
2.1.3. Toprak (Yer) Kaynaklı Isı Pompası	11
2.1.4. Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası (SAHP).....	13
2.1.5. Kademeli Isı Pompası Sistemi	14
2.1.6. İki Kademeli Isı Pompası	15
2.2.COP Tanımı ve Formülü.....	16
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
3.1. Önceki Çalışmalar.....	17
4. MATERYAL VE YÖNTEM	42
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	58
5.1.Araştırma Bulguları	58
5.1.1. Konutlarda Klima Stoku ve Yaygınlık Oranı	58
5.1.2. Soğutulan Alan Büyüklüğü ve Alan Başına Soğutma Gereksinimi	59
5.1.3. Mevsimsel Performans Katsayısı ve Elektrik Kullanımı.....	62
5.1.4. Kurulu Kapasite ve Ortalama Kısmi Yük Oranları	62
5.1.5. Konut Tipi Soğutma Kaynaklı CO ₂ Emisyonları.....	64
5.2. Tartışma	67
5.2.1. Uluslararası Konut Soğutma Modelleri Karşılaştırması.....	67
5.2.2. Küresel Perspektifte Soğutma Enerji Yoğunluğu	68
5.2.3. Pazar Yaygınlığı ve Gelecekteki Büyüme Potansiyeli	69
5.2.4. Net Sıfır Geçiş Açısından Politika Çıkarımları	70

5.2.5. İklim Değişikliğinin Türkiye’de 2050’ye Kadar Konut Tipi Soğutma Talebi ve CO ₂ Emisyonları Üzerindeki Etkileri.....	71
5.2.6. Türkiye’de 2050 Yılına Kadar Nüfus, Konut ve Klima Pazar Büyümesinin Konut Tipi Soğutma Elektrik Tüketimi ve CO ₂ Emisyonlarına Etkileri	74
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	92



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASHP	Hava Kaynaklı Isı Pompası
ASIHP	Entegre Bir Hava Kaynaklı Isı Pompası
CDDH	Soğutma Derece-Saat
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
COP	Performans Katsayısı
COPASHP	Hava Kaynaklı Isı Pompasının Performans Katsayısı
COP_t	Toplam Performans Katsayısı
EAHE	Toprak-Hava Isı Eşanjörü
E_c	Mekansal Soğutma İçin Kullanılan Elektrik Tüketimi
EER	Enerji Verimliliği Oranı
EEV	Elektronik Genleşme Valfi
GSHP	Toprak Kaynaklı Isı Pompası
GWHP	Yeraltı Suyu Isı Pompası
HDDH	Isıtma Derece-Saat
HTHP	Yüksek Sıcaklıklı Isı Pompası
I_c	Soğutma Isı Akısı
PCA	Temel Bileşen Analizi
PCM	Faz Değişim Malzemesi
PLR	Kısmi Yük Oranı
PV	Fotovoltaik Güneş Hücresi
PV/T	Fotovoltaik/Termal kollektör
PV-SAHP	Fotovoltaik Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası
PV-SAHP/HP	Fotovoltaik Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası/Isı Borusu
Q_c	Toplam Soğutma Yüğü
SCOP	Mevsimsel Performans Katsayısı
SEER	Sezonsal Enerji Verimliliği Oranı
SPF	Mevsimsel Performans Faktörü

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Isı pompası çevrimi.....	6
Şekil 2.2. Havadan havaya ısı pompası.....	8
Şekil 2.3. Havadan suya ısı pompası.....	8
Şekil 2.4. Su-su ısı pompasının şeması.....	9
Şekil 2.5. Yeraltı suyu ısı pompasının şeması.....	10
Şekil 2.6. Yüzey suyu kaynaklı ısı pompası sistemleri: (a) açık devre, (b) kapalı devre.....	9
Şekil 2.7. Şematik görünüm: (a) yatay ve (b) dikey ısı değiştiricili toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri.....	12
Şekil 2.8. Doğrudan genleşmeli toprak kaynaklı ısı pompasının şeması.....	13
Şekil 2.9. Doğrudan genleşmeli-güneş destekli ısı pompası sisteminin şeması.....	13
Şekil 2.10. Dolaylı genleşme - güneş enerjili ısı pompası şeması.....	14
Şekil 2.11. Kademeli hava-su ısı pompası sisteminin şeması.....	15
Şekil 2.12. İki aşamalı hava-su ısı pompasının şeması.....	16
Şekil 3.1. Litvanya illerine ait en yüksek ve en düşük sıcaklıklar.....	32
Şekil 3.2. 13 haziran 2019 'a ait saatlik hava sıcaklık değerleri.....	33
Şekil 3.3. Vilnius Litvanya'da ortalama minimum ve maksimum sıcaklıklar.....	33
Şekil 4.1. Yöntemsel iş akışı.....	44
Şekil 4.2. Dış hava sıcaklığına bağlı 1, 2 ve 3 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	49
Şekil 4.3. Dış hava sıcaklığına bağlı 4, 5 ve 6 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	49
Şekil 4.4. Dış hava sıcaklığına bağlı 7, 8 ve 9 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	50
Şekil 4.5. Dış hava sıcaklığına bağlı 10, 11 ve 12 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	50
Şekil 4.6. Dış hava sıcaklığına bağlı 13, 14 ve 15 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	51
Şekil 4.7. Dış hava sıcaklığına bağlı 16, 17 ve 18 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	51
Şekil 4.8. Dış hava sıcaklığına bağlı 19, 20 ve 21 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	52
Şekil 4.9. Dış hava sıcaklığına bağlı 22, 23 ve 24 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	52
Şekil 4.10. Dış hava sıcaklığına bağlı 25, 26 ve 27 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	53
Şekil 4.11. Dış hava sıcaklığına bağlı 28, 29 ve 30 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	53
Şekil 4.12. Dış hava sıcaklığına bağlı 31, 32 ve 33 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	54
Şekil 4.13. Dış hava sıcaklığına bağlı 34, 35 ve 36 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	54
Şekil 4.14. Dış hava sıcaklığına bağlı 37, 38 ve 39 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	55
Şekil 4.15. Dış hava sıcaklığına bağlı 40 ve 41 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	55

Şekil 4.16. Dış hava sıcaklığına bağlı 42, 43 ve 44 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	56
Şekil 4.17. Dış hava sıcaklığına bağlı 45, 46 ve 47 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	56
Şekil 4.18. Dış hava sıcaklığına bağlı 48, 49 ve 50 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları.....	57
Şekil 5.1. Konut başına düşen klima sayısının yüzdelik dağılımı.....	58
Şekil 5.2. Türkiye’de illere göre klimalı konutların öngörülen sayısı.....	59
Şekil 5.3. Türkiye’de il bazında klima sahibi konut başına ortalama soğutulan alan.....	60
Şekil 5.4. Türkiye’de illere göre toplam soğutulan konut alanı.....	60
Şekil 5.5. Türkiye’de il bazında yıllık konut soğutma talebi.....	61
Şekil 5.6. İl bazında konut soğutma enerji yoğunluğunun dağılımı.....	61
Şekil 5.7. Türkiye’de konut tipi klima sistemlerinin il ve ülke genelindeki ortalama kısmi yük oranları	62
Şekil 5.8. Türkiye’de düşük verimli klima sistemleri için yıllık konut soğutma kaynaklı elektrik tüketiminin il bazında dağılımı.....	63
Şekil 5.9. Türkiye’de yüksek verimli klima sistemleri için yıllık konut soğutma kaynaklı elektrik tüketiminin il bazında dağılımı	64
Şekil 5.10. Türkiye’de il bazında konut soğutmasından kaynaklanan potansiyel CO ₂ emisyonlarının mekansal dağılımı.....	65
Şekil 5.11. En yüksek ve en düşük SCOP’a sahip klima sistemleri arasındaki mevsimsel elektrik tüketimindeki il bazındaki farklılıklar.....	66
Şekil 5.12. En düşük ve en yüksek SCOP’lu klima sistemleri altında konut soğutma elektrik talebinin illere göre değişimi.....	67
Şekil 5.13. Küresel ısınmanın etkisiyle Türkiye’de sıcaklık frekans dağılımında meydana gelen değişim.....	72
Şekil 5.14. Mevcut klima stoku için 2050 yılına kadar öngörülen konut soğutma elektrik talebi ve CO ₂ emisyonları.....	74
Şekil 5.15. Alternatif SCOP senaryoları altında 2050 yılı için konut soğutma talebi ve elektrik kullanımına ilişkin projeksiyonlar.....	78

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Litvanya aylara göre ortalama sıcaklıklar (1991-2020 dönemi için).....	33
Tablo 3.2. Litvanya'nın ısıtma ve soğutma derece-saat Verileri.....	34
Tablo 4.1. Anket adımları, toplanan veriler ve çıktıları.....	43
Tablo 4.2. Ünitelere ait a, b ve c katsayıları.....	46
Tablo 4.3. Soğutma sezonu sıcaklık dağılımı ve COP'ye göre bölgeler.....	47
Tablo 4.4. İllere göre en yüksek COP Değerleri sağlayan ısı pompası üniteleri....	48
Tablo 5.1. Türkiye'de konut tipi klima stokunun, satışlarının, değişiminin ve yaygınlık oranının öngörülen gelişimi (2025–2050).....	76

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Can COŞKUN' a, bilgi ve tecrübesi ile lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum sevgili hocam Sayın Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN'a, yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübeleri ile hep destek olan sevgili Hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Murat YAVUZ'a , öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Muhammed ŞULE
İzmir, 2026

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Hava Kaynaklı İklimlendirme Sistemleri İçin Türkiye Ölçeğinde Verimlilik Araştırması

Muhammed ŞULE

İzmir Demokrasi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Can COŞKUN

Konutlarda soğutma özellikle sıcak ve hızla büyüyen kentsel alanlarda elektrik tüketimi ve CO₂ emisyonlarının önemli bir kaynağı haline gelmektedir. Bu araştırma Türkiye’de konut soğutma talebi ve klima verimliliğini il düzeyinde veri odaklı bir analizle ortaya koymakta ve hem ulusal hem de bölgesel enerji planlaması için önemli bilgiler sunmaktadır. Klima sahipliği, soğutulan alan ve mevsimsel elektrik tüketimi gibi hanehalkı anket verileri, yaygın olarak kullanılan cihazların teknik özellikleri ile birleştirilmiştir. Soğutma performansı, 18 °C ile 38 °C arasındaki dış ortam sıcaklıkları için mevsimsel performans katsayısı (SCOP) eğrileri kullanılarak tahmin edilmiştir. Sonuçlar Türkiye’de yıllık toplam konut soğutma talebinin 12,98 TWh_{th} seviyesine ulaştığını ve bunun %64’ten fazlasının yalnızca beş ilde yoğunlaştığını göstermektedir. Bu talep, yıllık 4,30 TWh_e elektrik tüketimine karşılık gelmekte ve ulusal ortalama SCOP değerini 3,02 olarak vermektedir. Konutlarda soğutma, hâlihazırda binalarda toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %13,7’sini oluşturmaktadır. Klima cihazlarının ortalama kısmi yük oranı %46 olarak tahmin edilmekte ve bu da yıllık ortalama yaklaşık 466 saatlik çalışma süresine karşılık gelmektedir. Ortalama kurulu güç yoğunluğu 92,7 W_e/m² olan Türkiye’de toplam konut soğutma kapasitesi 19,9 GW_e olarak hesaplanmıştır. Yüksek verimli (A+++ sınıfı) klimalar, hanehalkı elektrik kullanımını yaklaşık %49 oranında azaltabilir; bu da ulusal ölçekte yıllık yaklaşık 2,10 TWh_e tasarruf potansiyeline denk gelmektedir. Mevcut elektrik karışımı göz önüne alındığında, konutlarda soğutma yıllık yaklaşık 2,57 MtCO₂ emisyonuna yol açmaktadır. Bu bulgular, minimum SCOP standartlarının uygulanması ve yüksek verimli klimaların yaygınlaştırılmasının, gelecekteki soğutma kaynaklı elektrik talebi ve emisyonları sınırlamada son derece maliyet-etkin stratejiler olduğunu göstermektedir. Önerilen yöntem, hızlı kentleşme ve artan soğutma talebi yaşayan diğer sıcak iklimli, orta gelirli ülkelere de uygulanabilir.

Anahtar Kelimeler: Konut Soğutması, İklimlendirme, Enerji Verimliliği, Elektrik Tüketimi, Mevsimsel Performans Katsayısı, Karbon Emisyonları

2026, 92 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Efficiency Evaluation of Air-Source Air Conditioning Systems at the National Scale in Türkiye

Muhammed ŞULE

**İzmir Demokrasi University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Can COŞKUN

Residential cooling is becoming a major contributor to electricity consumption and CO₂ emissions, particularly in warm and fast-growing urban areas. This research presents a province-level, data-driven analysis of residential cooling demand and air-conditioner efficiency in Türkiye, offering insights relevant for both national and regional energy planning. Data from household surveys—including air-conditioner ownership, cooled floor area, and seasonal electricity use—are integrated with technical specifications of commonly used units. Cooling performance is estimated for outdoor temperatures ranging from 18 °C to 38 °C using seasonal coefficient of performance (SCOP) curves. The results indicate that Türkiye's total annual residential cooling demand reaches 12.98 TWh_{th}, with over 64% concentrated in just five provinces. This demand corresponds to electricity consumption of 4.30 TWh_e/year, yielding an average national SCOP of 3.02. Residential cooling already accounts for roughly 13.7% of total electricity consumption in buildings. The average part-load ratio for air conditioners is estimated at 46%, which translates to an annual average operating time of about 466 hours. With an average installed power density of 92.7 W/m², the total residential cooling capacity is calculated at 19.9 GW_e. High-efficiency (A+++ class) air conditioners can cut household electricity use by around 49%, equating to a potential national saving of approximately 2.10 TWh_e/year. Based on the current electricity mix, residential cooling is responsible for roughly 2.57 MtCO₂ emissions annually. These findings highlight that implementing minimum SCOP standards and promoting high-efficiency air conditioners are highly cost-effective approaches to curb future electricity demand and emissions from cooling. The methodology can also be applied to other warm-climate, middle-income countries experiencing rapid urbanization and growing cooling needs.

Keywords: Residential Cooling, Air Conditioning, Energy Efficiency, Electricity Consumption, Seasonal Coefficient of Performance, Carbon Emissions

2026, 92 pages

1. GİRİŞ

İnsanlık var olduğu ilk dönemlerden itibaren yaşam koşullarını daha elverişli hâle getirmek amacıyla bilimsel ve teknolojik gelişmelere yönelmiştir. Bu süreçte insan, çevresinde meydana gelen doğal olayları gözlemlemiş, elde ettiği bilgileri deneysel yöntemlerle analiz ederek ihtiyaçlarına yönelik çözümler üretmiştir. Tarihsel süreç incelendiğinde ortaya çıkan her yeni buluşun insanın doğayı anlama, yorumlama ve kontrol etme isteğinin bir sonucu olduğu görülmektedir. Bu yaklaşım bilim ve teknolojinin sürekli gelişmesini sağlayan temel itici güç olmuştur.

Enerji, insanlık tarihinin her aşamasında toplumların gelişimini doğrudan etkileyen en önemli unsurlardan biri olmuştur. Özellikle sanayi devrimi sonrasında artan üretim ve nüfusla birlikte enerjiye olan talep önemli ölçüde yükselmiş; enerji üretimi, tüketimi ve verimliliği konuları ön plana çıkmıştır. Başlangıçta enerji ihtiyacı büyük ölçüde fosil yakıtlar aracılığıyla karşılanmış olsa da, bu kaynakların sınırlı oluşu ve çevreye verdikleri zararlar zamanla sürdürülebilirlik açısından ciddi sorunlar doğurmuştur. Günümüzde ise artan enerji talebini çevreye duyarlı yöntemlerle karşılayabilecek teknolojilerin geliştirilmesi, bilimsel çalışmaların öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır.

Bu çerçevede ısı pompası teknolojisi, yüksek enerji verimliliği ve çevre dostu yapısıyla dikkat çeken sistemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Isı pompaları, düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan aldıkları ısıyı daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama taşıyabilen sistemlerdir. Çalışma prensiplerinin tersinir olması sayesinde hem ısıtma hem de soğutma amaçlı kullanılabilmesi, bu sistemlerin kullanım alanlarını oldukça genişletmektedir. Günümüzde ısı pompaları; konut uygulamalarından endüstriyel tesislere kadar pek çok farklı alanda tercih edilmektedir.

Isı pompası teknolojisinin temelleri 1940'lı ve 1950'li yıllarda atılmış olup, takip eden yıllarda yapılan bilimsel araştırmalar ve teknolojik ilerlemeler sayesinde sistemlerin performansı önemli ölçüde artırılmıştır. Günümüzde ısı pompaları; mekân ısıtma ve soğutma, kullanım sıcak suyu üretimi ve ön ısıtma gibi pek çok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Toprak, su ve hava gibi doğada serbest halde bulunan

yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanabilmeleri, bu sistemlere yüksek verimlilik ve düşük çevresel etki avantajı kazandırmaktadır.

Isı pompalarının performansı, kullanılan ısı kaynağının sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Isı kaynağının sıcaklığının yüksek ve yıl boyunca daha kararlı olması, sistemin verim katsayısını olumlu yönde etkilemektedir. Bu nedenle farklı iklim ve coğrafi koşullara uygun ısı pompası türlerinin seçimi ve doğru şekilde tasarlanması, enerji verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Geleneksel yakıtlı ısıtma sistemleriyle karşılaştırıldığında ısı pompaları çok daha düşük enerji tüketimi ile çalışmaktadır. Elektrik enerjisiyle işletilmelerine rağmen ürettikleri ısının büyük bir bölümünü çevreden aldıkları için enerji dönüşüm oranları oldukça yüksektir. Ayrıca fosil yakıt kullanmamaları nedeniyle doğrudan zararlı gaz salımı gerçekleştirmezler. Bu özellikleri sayesinde hem işletme maliyetlerinin azaltılmasına hem de çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine katkı sağlarlar.

Kömür, doğalgaz ve fuel-oil gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanımı, atmosfere salınan karbondioksit (CO_2) ve diğer zararlı gazlar nedeniyle küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu durum, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasını ve temiz enerji teknolojilerine geçişi zorunlu kılmaktadır. Isı pompaları, sundukları çevresel ve ekonomik avantajlar sayesinde bu dönüşüm sürecinde önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [1].

Isı pompaları, termodinamiğin temel prensiplerinden yararlanarak ısının kendiliğinden gerçekleşen akış yönünün tersine çalışabilen ve düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı transferi sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerde kullanılan ısı kaynaklarının büyük ölçüde çevresel ve kolay erişilebilir olması, yatırım ve işletme maliyetleri açısından ısı pompalarını diğer enerji dönüşüm teknolojilerine göre daha avantajlı bir konuma getirmektedir. Bununla birlikte, ısı pompalarının çalışması için gerekli enerji girdilerinin yaygın, sürekli ve sürdürülebilir biçimde temin edilebilmesi, bu sistemlerin ısıtma ve soğutma uygulamalarında tercih edilme oranını artırmaktadır. Günümüzde küresel ölçekte yaklaşık 120 milyon ısı pompası sisteminin kullanımda olduğu bilinmektedir ve bu sistemlerin önemli bir bölümü Amerika Birleşik Devletleri ile Japonya'da yer almaktadır. Özellikle ABD

pazarında satışı yapılan ısı pompalarının yaklaşık %60'ının yalnızca yasal düzenlemelerle belirlenen minimum verimlilik sınırlarının biraz üzerinde performans sergilemesi, mevcut teknolojilerin enerji verimliliği bakımından daha da iyileştirilebileceğini göstermektedir [2].

Hava kaynaklı ısı pompaları, ısıtma ve soğutma işlevlerini tek bir sistem üzerinden yerine getirebilen iklimlendirme teknolojileridir. Bu sistemlerin çalışma prensibi, dış ortam havası ile iç mekân arasındaki sıcaklık farkından yararlanarak ısıнын transfer edilmesine dayanmaktadır. Hava kaynaklı ısı pompaları yapısal olarak havadan havaya ve havadan suya olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Havadan havaya tip sistemlerde, iç ünite genellikle duvara monte edilmekte ve ortam havası doğrudan ısıtma ya da soğutma işlemine tabi tutulmaktadır. Ayrıca, tek bir kompresöre birden fazla iç ünitenin bağlanabilmesi sayesinde birden fazla mekânın eş zamanlı olarak iklimlendirilmesi mümkün olmaktadır. Bu tür ısı pompaları çoğunlukla ılıman iklim koşullarına sahip bölgelerde tercih edilmekle birlikte, Güney Avrupa ve Asya ülkelerinde de yaygın bir kullanım alanına sahiptir [3].

1.1. Tezin Amacı

Konutlarda soğutma talebi ve klima teknolojilerinin yaygınlaşması üzerine uluslararası literatür giderek artmasına rağmen, Türkiye'ye özgü ampirik veriler hâlen sınırlı kalmaktadır; özellikle veri çözünürlüğü, teknolojik ayrıntı seviyesi ve politika uygulanabilirliği açısından eksiklikler gözlenmektedir. Mevcut çalışmaların büyük kısmı, hanehalkı düzeyinde elektrik tüketimi veya teknolojiye özgü performans verilerini içermeyen, ulusal düzeyde derlenmiş istatistikler, soğutma derece-gün göstergeleri veya soyut senaryo projeksiyonlarına dayanmaktadır. Bu durum, soğutma talebinin mekânsal dağılımı, mevcut klima stoklarının gerçek kullanım koşullarındaki performansı ve buna bağlı elektrik tüketimi ile emisyon etkilerinin doğru biçimde anlaşılmasını zorlaştırmaktadır.

Bu çalışma, hanehalkı elektrik faturaları, oda bazında soğutulan alan büyüklükleri ve marka/model düzeyinde belirlenen mevsimsel performans katsayısı (Seasonal Coefficient of Performance – SCOP) verilerini kullanarak Türkiye'de konut tipi soğutmaya ilişkin ilk kapsamlı ve veri temelli değerlendirmeyi sunmayı hedeflemektedir. Anket tabanlı mikro verilerin il düzeyinde saatlik dış hava sıcaklığı

profilleriyle birleştirilmesi sayesinde, kısmi yük koşulları, bölgesel iklim farklılıkları ve kullanıcı davranışlarındaki heterojenlik gibi gerçek çalışma koşulları analiz kapsamına dahil edilmektedir. Bu yaklaşım, soğutma talebi, elektrik tüketimi, kurulu kapasite ve CO₂ emisyonlarının hem il ölçeğinde hem de ulusal ölçekte güvenilir şekilde tahmin edilmesine olanak tanımaktadır.

Çalışmanın katkıları üç ana başlıkta öne çıkmaktadır. Birincisi, Türkiye genelinde il düzeyinde enerji yoğunluğu (kWh_{th}/m²) ve mevsimsel verimlilik (SCOP) için ilk ampirik tahminlerin sunulmasıdır. İkincisi, verimlilik odaklı politika araçlarının azaltım potansiyelinin nicel olarak ortaya konulmasıdır; asgari SCOP standartlarının uygulanması hâlinde, ulusal ölçekte soğutmaya bağlı elektrik talebinin %33'e kadar azaltılabileceği gösterilmektedir. Üçüncüsü ise iklim değişikliği projeksiyonlarının analize entegre edilmesiyle 2050 yılına kadar soğutma talebindeki artışın değerlendirilmesi ve elektrik sisteminin güvenilirliğinin korunmasının yanı sıra, Türkiye'nin uzun vadeli karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmasında verimlilik artışlarının kritik rolünün vurgulanmasıdır.

Türkiye'de soğutma sezonunda kullanılan ısı pompalarının arasındaki verimlilik farklarından dolayı elde edilebilecek tasarruflar hakkında kullanıcılar yeterli bilgiye sahip değildir. Isı pompası kullanıcılarını bilinçlendirebilecek çok sayıda kaynak olmadığı düşünüldüğü için bu çalışmada kullanıcıların ısı pompası kullanımından dolayı kaynaklanabilecek elektrik tüketimleri ve kullanımdan dolayı ortaya çıkacak CO₂ emisyonları için bilinçlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada farklı COP değerlerine sahip cihazların arasındaki illere göre elektrik tüketim farkları, illere göre ortaya çıkacak emisyon farklarına yer verilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Isı Pompası Tanımı

Isı pompaları, enerji dönüşüm sürecini bir soğutma çevrimi üzerinden gerçekleştiren ve bu yönüyle buzdolabı ile klima sistemlerinde kullanılan temel prensiplere dayanan ısı transfer ekipmanlarıdır. Bu sistemler, düşük sıcaklık seviyesine sahip bir kaynaktan temin edilen ısı enerjisiyi daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama taşıyarak ısıtma etkisi oluşturur. Söz konusu çalışma mekanizması, esas itibarıyla geleneksel soğutma döngüsünün ters yönde işletilmesi esasına dayanmaktadır. Konutlarda kullanılan ısı pompalarının anma ısı kapasiteleri çoğunlukla 5 kW ile 20 kW aralığında değişim göstermektedir [4].

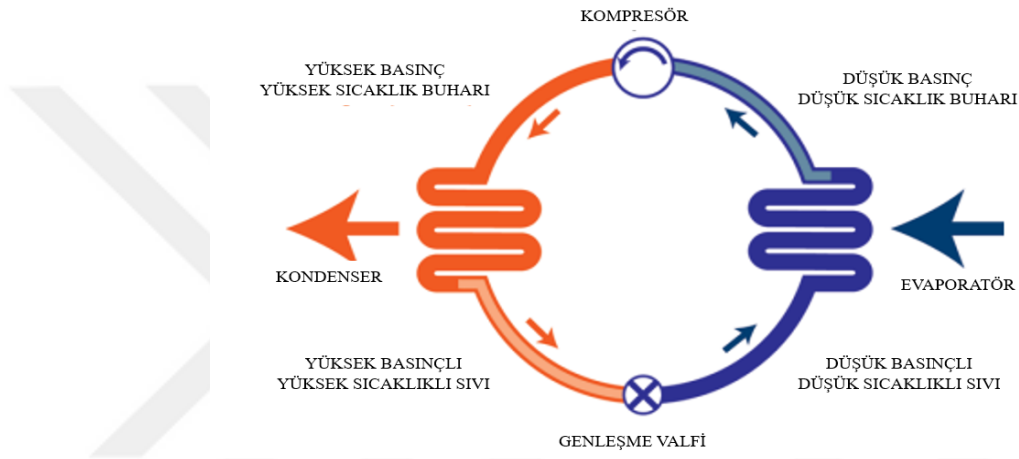
Isı pompaları, çalışma süreçlerini çevrim boyunca faz değişimi gerçekleştirebilen bir soğutucu akışkanın termodinamik davranışları üzerine kurmaktadır. Bu akışkanın karakteristik özelliği, düşük kaynama sıcaklığı sayesinde çevrede bulunan düşük seviyedeki ısı enerjisini dahi alarak buharlaşabilmesidir. Sistem içerisinde basınç seviyesinin kontrollü olarak değiştirilmesiyle birlikte akışkanın kaynama noktası da farklılaşmakta ve bu durum, ısının düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan alınarak daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama taşınmasına olanak sağlamaktadır.

Çevrimin ilk aşamasında soğutucu akışkan, düşük sıcaklık ve düşük basınç koşullarında boru hattı boyunca gaz fazında dolaşır. Isı kazanımı, evaporatör olarak adlandırılan ısı değiştirici içerisinde gerçekleşir. Bu aşamada akışkan, dış hava, toprak veya sıvı bir ortam gibi çevresel kaynaklardan enerji çekerek buharlaşır. Soğutucu akışkanın kaynama sıcaklığının oldukça düşük olması, dış ortam sıcaklığının sıfırın altında olduğu koşullarda dahi buharlaşma sürecinin sürdürülebilmesini mümkün kılmaktadır.

Evaporatörden çıkan akışkan, enerji kazanımı sonucunda sıcaklığı artmış bir gaz hâline gelmiş olsa da, bu sıcaklık doğrudan ısıtma uygulamaları için yeterli seviyede değildir. Bu nedenle akışkan kompresöre yönlendirilir ve burada mekanik enerji yardımıyla sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi sonucunda akışkanın basıncı ve

sıcaklığı belirgin biçimde yükseltilir. Yüksek basınç ve sıcaklık değerlerine ulaşan soğutucu akışkan, kondenser adı verilen ikinci ısı değiştiriciye aktarılır.

Kondenser aşamasında akışkan, sahip olduğu ısı enerjisini hedef ortama aktarırken yoğuşarak sıvı faza geçer ve böylece sisteme faydalı ısı kazandırılmış olur. Yoğuşma sürecini tamamlayan soğutucu akışkan, genleşme valfinden geçirilerek basınç ve sıcaklığı düşürülür. Bu işlemle birlikte akışkan yeniden başlangıç koşullarına yaklaştırılır ve sistem, sürekli olarak tekrarlanan kapalı bir çevrim hâlinde çalışmasını sürdürür.



Şekil 2.1. Isı pompası çevrimi

- Isı pompaları, konut ve ticari binalarda enerji kullanımını optimize ederek işletme giderlerinin azaltılmasına katkı sağlayan yüksek verimli sistemlerdir. Düşük bakım ihtiyacı ve uzun hizmet ömrü, bu sistemleri ekonomik açıdan cazip kılmaktadır. Klasik kazan sistemlerinin yaklaşık 12 yıllık kullanım süresine sahip olması ve her yıl ortalama %2 oranında performans kaybına uğramasıyla karşılaştırıldığında, ısı pompalarının uygun işletme ve periyodik bakım koşullarında 50 yıla varan süre boyunca önemli bir verim düşüşü yaşamadan çalışabildiği ifade edilebilir.
- Güvenlik yönünden ele alındığında, yanma esaslı ısıtma sistemlerinde görülebilen patlama, gaz sızıntısı ve zehirlenme gibi riskler ısı pompalarında bulunmamaktadır. Bu sistemler, çalışma prensipleri gereği çevreye zararlı

emisyonlar üretmez ve arıza durumlarında karbon monoksit gibi insan sağlığını tehdit eden gazların ortaya çıkmasını önler.

- Isı pompalarının öne çıkan avantajları arasında yüksek enerji dönüşüm verimliliği ile birlikte tek bir sistem üzerinden hem ısıtma hem de soğutma ihtiyacını karşılayabilmesi yer almaktadır. Bunun yanı sıra kurulumlarının görece kolay olması, sessiz, temiz ve kokusuz çalışmaları ve tamamen elektrik enerjisi ile işletilmeleri, ısı pompalarını çevre dostu ve sürdürülebilir bir teknoloji haline getirmektedir [5].

Isı pompası bu çalışma kapsamında 5 çeşit olarak tanımlanabilir. Bu ısı pompası çeşitleri aşağıdaki gibidir:

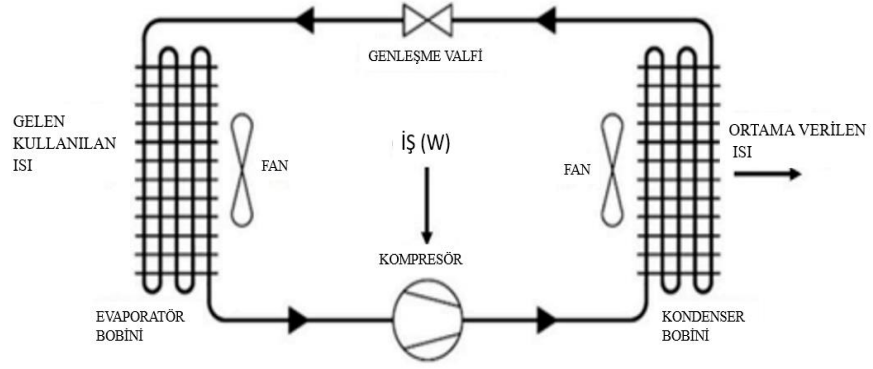
- Hava Kaynaklı Isı Pompası
- Su Kaynaklı Isı Pompası
- Toprak (Jeotermal) Isı Pompası
- Güneş Destekli Isı Pompası
- Kademeli Isı Pompası
- İki Kademeli Isı Pompası

2.1.1. Hava Kaynaklı Isı Pompası

Isıyı havadan çekerek iç ortama hava ya da su olarak aktarmaktadır.

2.1.1.1. Havadan Havaya Isı Pompası

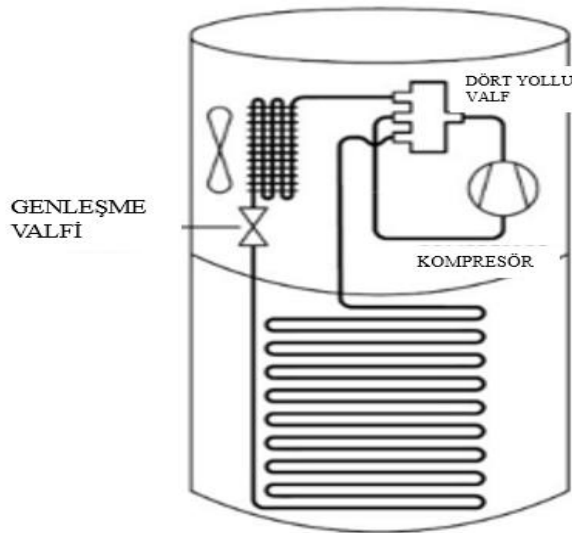
Bu cihazda, çevre havasından ısı kazanımı sağlamak amacıyla buharlaştırıcı fonksiyonunu üstlenen bir ısı eşanjörü serpantini yer almaktadır. Sistemde bulunan ikinci ısı eşanjörü ise yoğuşturucu olarak görev yapmakta ve çevrim sırasında elde edilen ısıнын ortama iletilmesini sağlamaktadır. Mevsimsel çalışma koşullarına bağlı olarak, yaz aylarında soğutma işlemi buharlaştırıcı serpantin üzerinden gerçekleştirilirken, kış aylarında ısıtma amacıyla yoğuşturucu serpantin aktif olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.2. Havadan havaya ısı pompası

2.1.1.2. Havadan Suyu Isı Pompası

Bu sistemlerde temel ısı kaynağı dış ortam havası olup, su ısıyı absorbe eden akışkan olarak görev yapmaktadır. Hava kaynaklı ısı pompaları özellikle konutlarda kullanım sıcak suyu üretiminde yaygın şekilde tercih edilmektedir. Ancak bu sistemlerin performansı, dış hava sıcaklığının düşmesiyle birlikte azalmaktadır. Bunun temel nedeni, kış koşullarında ortam havasının sahip olduğu ısı enerjisinin azalması ve buna bağlı olarak buharlaştırıcının havadan çekebileceği ısı miktarının sınırlandırılmasıdır.



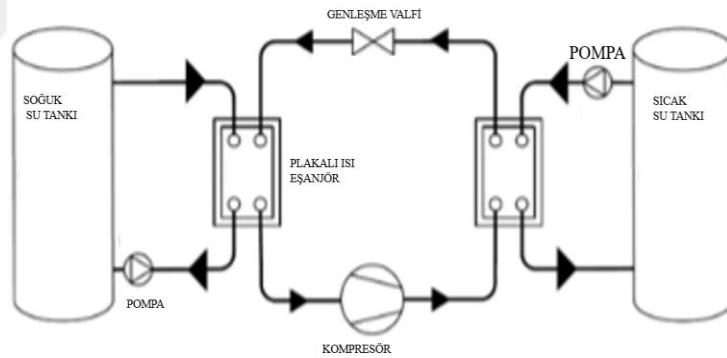
Şekil 2.3. Havadan suya ısı pompası

2.1.2. Su Kaynaklı Isı Pompası

Su havaya göre yoğunluğu daha çoktur. Hacim başına bakıldığında havaya karşın daha fazla enerji içermektedir. Bu ısı pompaları sudan suya ve sudan havaya olmak üzere iki çeşittir.

2.1.2.1. Sudan Suya Isı Pompası

Bu sistemlerde su, hem ısının elde edildiği kaynak hem de ısının aktarıldığı ortam olarak kullanılmaktadır. Suyun termofiziksel özelliklerinin ve ısı iletim yeteneğinin havaya kıyasla daha üstün olması, bu tür ısı pompalarının performans katsayısının (COP) daha yüksek değerlere ulaşmasını mümkün kılmaktadır. Bunun başlıca nedeni, soğutucu akışkanın buharlaştırıcı üniteye sudan daha fazla ısı enerjisi absorbe edebilmesidir. Bununla birlikte, su kaynaklı sistemlerde suyun kirlenme ihtimali ve buna bağlı olarak bakım süreçlerinin daha karmaşık ve maliyetli olması önemli dezavantajlar arasında değerlendirilmektedir.

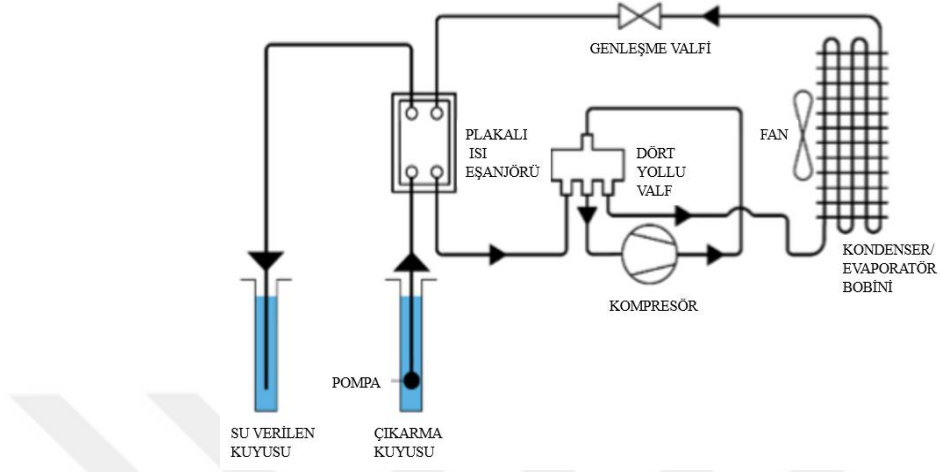


Şekil 2.4. Su-su ısı pompasının şeması

2.1.2.2. Sudan Havaya Isı Pompası

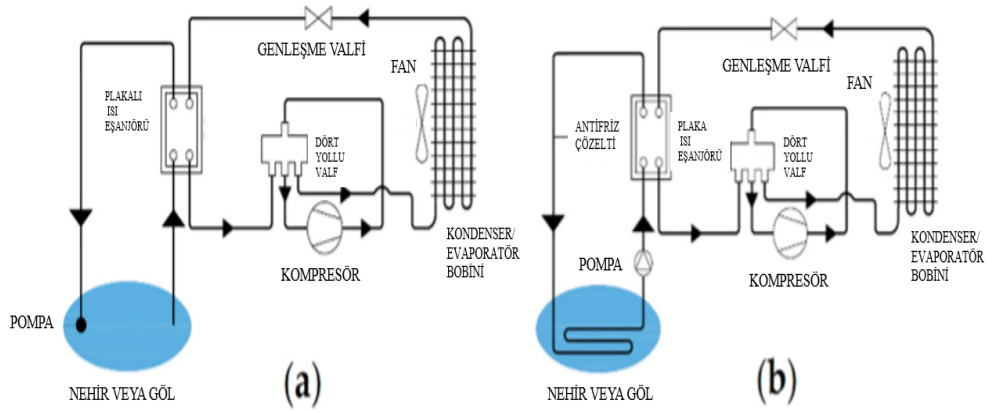
Bu tip ısı pompası uygulamalarında su, sistemin hem ısı kaynağı hem de ısıyı soğurup ileten akışkan olarak kullanılmaktadır. Isıtma ve soğutma işlemleri sırasında elde edilen ısı enerjisi, iç ortama hava aracılığıyla aktarılmaktadır. Isı kaynağı olarak yararlanılan su; yeraltı kuyularından temin edilebildiği gibi göl, nehir ve gölet gibi yüzeysel su kaynaklarından da sağlanabilmektedir. Yeraltı sularının yıl boyunca sıcaklık değerlerinin büyük oranda sabit kalması, bu kaynakların ısı pompası

sistemlerinde daha verimli ve kararlı bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu sistemlerde yeraltı suyu bir kuyudan alınarak ısı alışverişi gerçekleştirildikten sonra, ayrı bir enjeksiyon kuyusu aracılığıyla tekrar yeraltına geri verilmektedir.



Şekil 2.5. Yeraltı suyu ısı pompasının şeması

Yüzey suyu kaynaklı ısı pompası sistemleri, çalışma prensiplerine göre açık çevrimli ve kapalı çevrimli olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Açık çevrim uygulamalarında, göl gibi yüzey suyu rezervuarlarından alınan su, ısı pompasına ait ısı değiştirici içerisinden geçirilerek enerji transferi gerçekleştirilmekte ve işlem sonrasında belirli bir mesafeden tekrar su kaynağına iade edilmektedir. Kapalı çevrim sistemlerde ise yüzey suyunun doğrudan ısı pompası devresine girmesi söz konusu değildir. Bu tür uygulamalarda, yüzey suyu kütlesi içine yerleştirilen ısı eşanjörü serpantini aracılığıyla ısı transferi sağlanır. Serpantin içerisinde dolaşan antifriz katkılı akışkan, yüzey suyu ile ısı etkileşime girerek enerji kazanır veya enerji kaybeder ve ardından ısı pompasına iletilir. Isı pompası, sistemin işletme koşullarına bağlı olarak çevreden ısı çekmekte ya da çevreye ısı vermektedir.



Şekil 2.6. Yüzey suyu kaynaklı ısı pompası sistemleri: (a) açık devre, (b) kapalı devre

2.1.3. Toprak (Yer) Kaynaklı Isı Pompası

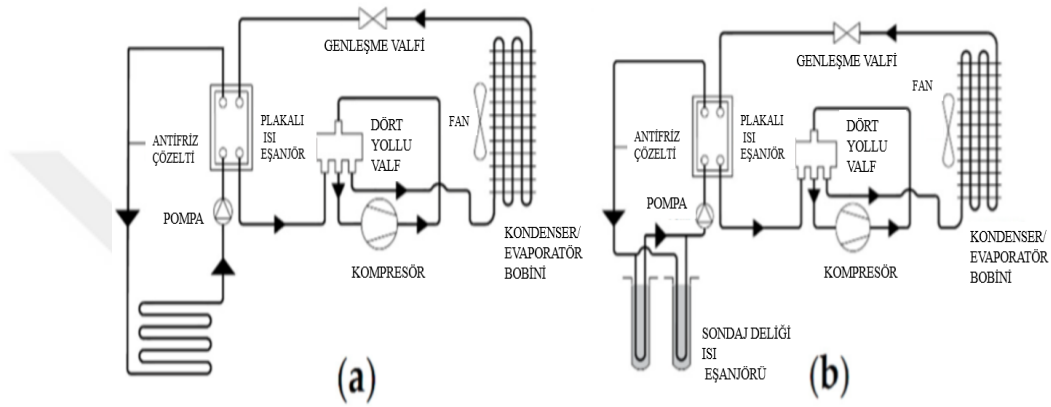
Yer ortamdaki hava sıcaklığına nazaran daha sabit bir sıcaklığa sahiptir. Bu özelliğinden dolayı toprak kaynaklı ısı pompaları ısıtma ve soğutma amacıyla tercih edilmektedir. Bu ısı pompaları çevre dostudur ve bu kullanılan kaynak en verimli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir.

2.1.3.1. Toprak Bağlantılı Isı Pompası

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde toprak, uygulamaya bağlı olarak ısı sağlayıcı veya ısı alıcı bir ortam olarak kullanılmaktadır. Sistem temel olarak toprak ısı eşanjörü ile soğutucu akışkan-su ısı eşanjöründen oluşmaktadır. Toprak ısı eşanjörü içerisinde ikincil akışkan olarak su veya antifriz katkılı çözeltiler dolaştırılmakta, bu akışkan çevredeki zeminle ısı alışverişini gerçekleştirdikten sonra soğutucu akışkan-su ısı eşanjörüne yönlendirilmektedir.

Yatay tip toprak kaynaklı ısı pompası uygulamalarında, genellikle yer seviyesinden yaklaşık 1–2 m derinlikte açılan hendekler içerisinde toprak ısı eşanjörleri yerleştirilmektedir. Bu sistemlerin uygulanabilmesi için yeterli büyüklükte arazi alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Yatay tip sistemler; kurulum süreçlerinin daha basit olması, bakım gereksinimlerinin düşük düzeyde kalması ve ilk yatırım maliyetlerinin dikey sistemlere kıyasla daha ekonomik olması nedeniyle avantajlıdır.

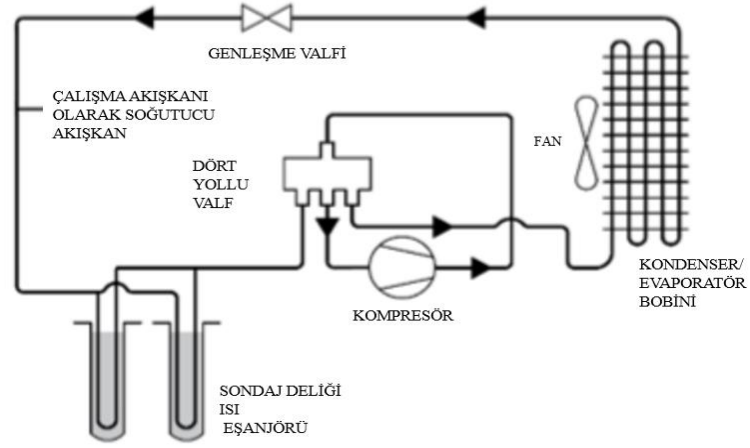
Toprak ısı eşanjörleri dikey konfigürasyonda da uygulanabilmektedir. Özellikle yapılaşmanın yoğun olduğu ve arazi kullanımının kısıtlı olduğu bölgelerde dikey tip toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri daha uygun bir çözüm sunmaktadır. Her ne kadar sondaj kuyusu açılması nedeniyle ilk yatırım maliyeti daha yüksek olsa da, 10 m'nin altındaki zemin tabakalarının yıl boyunca daha kararlı sıcaklık değerlerine sahip olması, dikey sistemlerin yatay sistemlere kıyasla daha yüksek performans ve verimlilik sağlamasına olanak tanımaktadır.



Şekil 2.7. Şematik görünüm: (a) yatay ve (b) dikey ısı değiştiricili toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri

2.1.3.2. Doğrudan Genleşmeli Toprak Kaynaklı Isı Pompası

Bu sistemde soğutucu akışkan, herhangi bir ara akışkan kullanılmaksızın sondaj deliği ısı eşanjörü içerisinde doğrudan dolaştırılmakta ve çevresindeki toprak ile ısı etkileşim sağlamaktadır. Çalışma prensibine göre, mekânın ısıtılması sırasında sondaj deliği ısı eşanjörü buharlaştırıcı işlevi görmekte, soğutma modunda ise yoğuşturucu olarak görev yapmaktadır. Bu özellikleri sayesinde söz konusu ısı pompası sistemi, geleneksel dikey tip toprak kaynaklı ısı pompalarına kıyasla daha düşük kurulum maliyeti sunmakta ve aynı zamanda daha yüksek bir performans sergilemektedir.



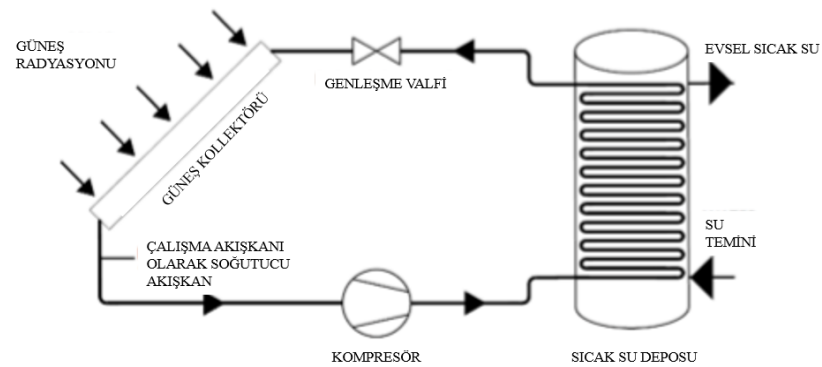
Şekil 2.8. Doğrudan genleşmeli toprak kaynaklı ısı pompasının şeması

2.1.4. Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası (SAHP)

Güneş tek olarak da ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Bunun yanında güneş toprak ve hava ile beraber de kullanılabilen bir kaynaktır bu sistemde. Güneş kollektörü ve buharlaştırıcının bağlantı tarzlarının durumuna göre bu ısı pompası iki çeşide ayrılmaktadır.

2.1.4.1. Doğrudan Genleşmeli Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası

Soğutucu akışkan direkt olarak güneş kollektörüne pompalanır ve güneş enerjisinden ısıyı emer. Bu durum güneş kollektörünün buharlaştırıcı vazifesi yaptığını göstermektedir.

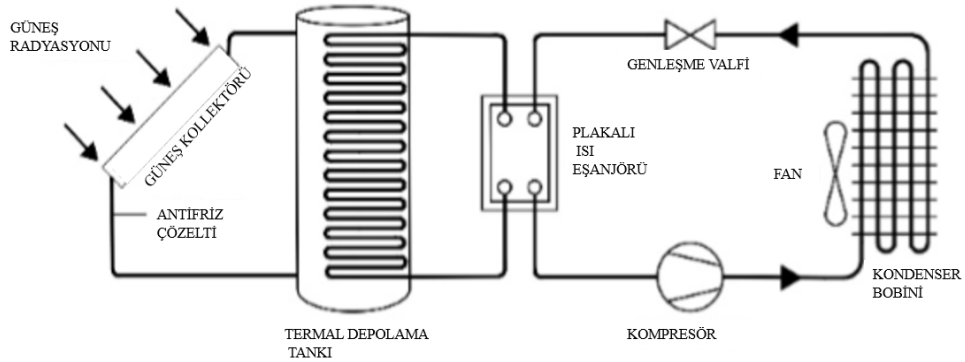


Şekil 2.9. Doğrudan genleşmeli-güneş destekli ısı pompası sisteminin şeması

2.1.4.2. Dolaylı Genleşmeli Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası

Bağlantı tipine bağlı olarak sistemler seri, paralel ve çift kaynaklı olmak üzere üç farklı yapı altında incelenmektedir. Seri konfigürasyonda, güneş enerjisi kollektörleri içerisinde antifrız katkılı bir akışkan dolaştırılmakta ve bu akışkan güneş ışınlamı etkisiyle kazanılan ısıyı absorbe etmektedir. Elde edilen ısı enerji, öncelikle termal depolama tankında biriktirilmekte, ardından plakalı ısı eşanjörü yardımıyla ısı pompasına aktarılmaktadır.

Paralel sistem tasarımında ise güneş kollektörü ile ısı pompası birbirinden bağımsız çalışabilmekte olup, bu sayede sistem elemanlarından herhangi birinin devre dışı kalması durumunda dahi işletme sürekliliği sağlanmaktadır. Çift kaynaklı sistemlerde ise güneş enerjisi ile birlikte ortam havası da ısı kaynağı olarak değerlendirilmekte, bu yaklaşım sistemin verimliliğini ve çalışma esnekliğini artırmaktadır.



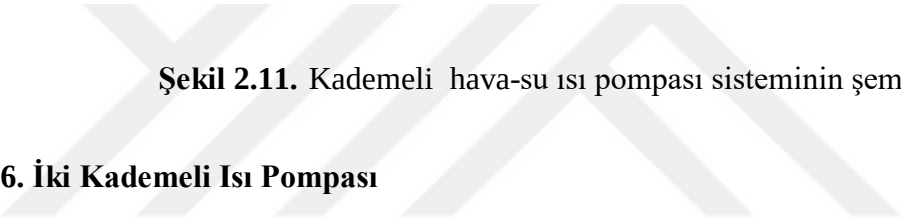
Şekil 2.10. Dolaylı genleşme - güneş enerjili ısı pompası şeması

2.1.5. Kademeli Isı Pompası Sistemi

Sistem, tek kademeli bir ısı eşanjörü aracılığıyla birbirine entegre edilen yüksek kademeli ve düşük kademeli olmak üzere iki ayrı soğutucu akışkan çevriminden oluşmaktadır. Söz konusu kademeli ısı eşanjörü, düşük kademeli çevrimde yoğusturucu (kondansatör) işlevi üstlenirken, yüksek kademeli çevrim açısından buharlaştırıcı görevi görmektedir [6]. Bu sistemde kullanılan plakalı ısı eşanjörü ince metal yüzeyler üst üste gelecek şekilde dizilerek meydana getirilir. İki

Şekil 2.11. Kademeli hava-su ısı pompası sisteminin şem

Kademeli Isı Pompası



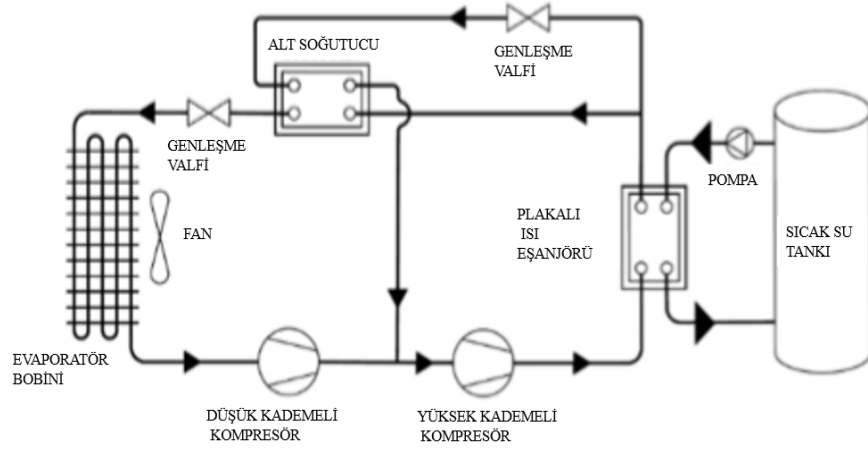
Şekil 2.11. Kademeli hava-su ısı pompası sisteminin şem

6. İki Kademeli Isı Pompası

Şekil 2.11. Kademeli hava-su ısı pompası sisteminin şem

6. İki Kademeli Isı Pompası

Şekil 2.11. Kademeli hava-su ısı pompası sisteminin şeması



Şekil 2.12. İki aşamalı hava-su ısı pompasının şeması

2.2. COP Tanımı ve Formülü

COP, elde edilecek olan faydalı ısıtma ya da soğutmanın tesirinin, bu tesiri elde edebilmek amacıyla ihtiyaç duyulan iş girdisine oranı olarak tanımlanır. Çalışma gereği soğutmaya göre açıklanacak olursa ortamdan uzaklaştırılan ısıнын, bu ısıyı uzaklaştırabilmek için yapılan iş'e oranı olarak da tanımlanabilir.

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'de yar alan Q ifadesi ortamdan uzaklaştırılan ısı miktarını, W ise sisteme yapılan iş girdisini göstermektedir [9].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu literatürde ısı pompalarının performansını etkileyen olaylar ve çözümleri için yapılan deneysel faaliyetlerin yapıldığı çalışmalar yanında bazı ısı pompası türlerinin birbirine göre olan üstünlüklerinin belirtildiği çalışmalar aranmaktadır.

3.1. Önceki Çalışmalar

Sun ve ark. [10] yaptıkları çalışmada, hava kaynaklı ısı pompalarında besleme suyu sıcaklığını kontrol etmeye yönelik bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu kontrol yöntemi sayesinde besleme suyunun ayar değeri dinamik olarak düzenlenmiş, böylece teorik değerden daha yüksek sıcaklıklara ulaşmasının önüne geçilerek performans katsayısındaki (COP) düşüş engellenmiştir. Geliştirilen sistem, değişken su sıcaklığı kontrol yöntemi olarak adlandırılmıştır. Araştırmacılar, bu sistemi Çin'in Pekin kentinde bulunan bir hava kaynaklı ısı pompası üzerinde test etmiş ve ısıtma performansını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen kontrol sistemi sayesinde ısıtma COP değerinin iyileştirildiğini ve konutlarda enerji tüketiminin yaklaşık %34 oranında azaldığını göstermiştir.

Zhang ve ark. [11] güneş ve hava kaynaklarını birlikte kullanan kompozit bir ısı pompası sistemi tasarlayarak, bu sistemi dış ortamın dinamik koşulları altında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada sistemin ısıtma ve soğutma performansı değişken çevresel şartlar altında değerlendirilmiştir. Kış mevsiminde gerçekleştirilen deneylerde, iç mekân sıcaklığı 5,85°C ile 13,99°C arasında değişirken, besleme suyu sıcaklığı 15°C'den 55°C'ye yükseltilmiştir. Bu koşullarda sistemin performans katsayısı (COP) 2,87 ile 3,80 arasında değerler almıştır. Elektrik enerji tüketiminin ise yaklaşık 3,7–4,9 kWh aralığında gerçekleştiği belirlenmiştir. Soğutma modu testlerinde ise iç mekân sıcaklığı 20°C olduğunda, COP değerinin gece saatlerinde yaklaşık 1,7 olduğu gözlemlenmiştir. Testlerin başlangıcındaki ilk 40 dakikalık süreçte güç tüketiminde artış meydana gelirken, bu sürenin ardından tüketimde azalma eğilimi tespit edilmiştir. Genel olarak sistemin ortalama güç tüketimi 530 W olarak ölçülmüştür.

Li ve ark. [12] hava kaynaklı ısı pompalarında serpantin yüzeyinde meydana gelen donmayı önlemeye yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Ortam

ısıtması amacıyla kullanılan hava kaynaklı ısı pompası ünitelerinde, dış serpantin üzerindeki metal yüzey sıcaklığının suyun donma noktasının altına düşmesi ve aynı zamanda hava çığ noktası sıcaklığından daha düşük olması durumunda, serpantin yüzeyinde don oluşumu gözlenmektedir. Bu donma olayı, sistemin performansında belirgin düşüşlere neden olmaktadır. Yapılan gözlemler sonucunda, don oluşumunu önlemek amacıyla buz çözme işleminin gerekli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu buz çözme işleminin belirli periyotlarla gerçekleştirilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda araştırmacılar, zamana dayalı bir buz çözme yöntemi üzerine çalışmışlardır. Geliştirilen yeni buz çözme yönteminin, geleneksel T-T_{buz} yöntemiyle karşılaştırıldığında, hava kaynaklı ısı pompasının performans katsayısı (COP) değerini %27,85 oranında artırdığı tespit edilmiştir.

Li ve ark. [13] gerçekleştirdikleri bir çalışmada, serpantin yüzeyinde meydana gelen donmanın çıkış ısıtma kapasitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, serpantin yüzeyinde oluşan donmanın sistemin çıkış ısıtma kapasitesinde azalmaya yol açtığı belirlenmiştir. Günümüzde bu sorunu önlemeye yönelik kullanılan mevcut yöntemde, bağıl nem etkisi göz ardı edilerek yalnızca dış ortam sıcaklığının dikkate alındığı görülmektedir. Bu durum ise hava kaynaklı ısı pompalarının yetersiz ısıtma kapasitesiyle çalışmasına neden olmaktadır. Söz konusu probleme çözüm bulmak amacıyla, dış ortam sıcaklığı ile bağıl nemin ortak etkisini dikkate alan bir yöntem geliştirilmiştir. Sonuç olarak, bağıl nemin göz ardı edilmesi durumunda, dış hava tasarım sıcaklıklarının bağıl nemin hesaba katıldığı duruma kıyasla daha yüksek değerlere sahip olacağı ve dolayısıyla dış hava tasarım sıcaklığında bir düşüşün beklenebileceği tespit edilmiştir.

Wu ve ark. [14] yapmış oldukları bir çalışmada buzlanmanın hava kaynaklı ısı pompaları üzerindeki performans açısından etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında teknik bakımdan hemen hemen aynı özelliklere sahip ancak sadece donatıldıkları kompresörler bakımından değişken ve sabit frekanslı kompresörlere sahip iki hava kaynaklı ısı pompası arasında kıyaslama yapmışlardır. Değerlendirmeleri sonucunda ısıtma sezonu süresince değişken frekanslı cihazların daha uzun don olmayan süre yaşadıklarını görmüşlerdir. Ve bunun sonucunda da bu cihazların performansının %4 arttığı görülmüştür.

Song ve ark. [15] çalışmalarında genleşme bileşeni olarak kılcal boru kullanılan transkritik CO₂ ısı pompası teknolojisini incelemiştir. Bu kapsamda prototip bir sistem geliştirilmiştir. Dış ortam hava sıcaklığı 30 °C'den 40 °C'ye yükseldiğinde, sistemin soğutma kapasitesi ve performans katsayısının (COP) sırasıyla %22 ve %24 azaldığı; iç ortam sıcaklığının 22 °C'den 32 °C'ye yükselmesi durumunda ise sırasıyla %12 ve %15 arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, farklı gaz soğutucu çıkış sıcaklıklarında elektronik genleşme valfi (EEV) kullanılan transkritik CO₂ ısı pompası ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, kılcal boru kullanılan ısı pompasının, EEV kullanan cihazın COP değerinin %80'inden daha yüksek bir COP sağladığını göstermiştir. Cihaz performansının incelenmesi sonucunda, iç hava sıcaklığına kıyasla dış hava sıcaklığının sistem performansı üzerinde çok daha belirleyici bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Safa ve ark. [16] gerçekleştirdikleri çalışmalarında hava kaynaklı ısı pompası (ASHP) ile toprak kaynaklı ısı pompasını (GSHP) performans açısından karşılaştırmışlardır. Her iki ısı pompası hem ısıtma hem de soğutma modlarında incelenmiştir. Toprak kaynaklı ısı pompası, sabit zemin sıcaklığı sayesinde, hava kaynaklı sisteme kıyasla daha kararlı bir performans sergilemiştir. Soğutma sürecinde her iki sistem, kompresör çevrimleri açısından değerlendirilmiş; değişken kapasiteli bir kompresörün ASHP'nin daha düşük hızlarda daha uzun süre çalışmasına olanak sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Guoyuan ve ark. [17] yapmış oldukları çalışmada, bir hava kaynaklı ısı pompası (ASHP) geliştirmişlerdir. Önerilen prototipte, alt soğutma sistemi içeren tek girişli kaydırmalı bir kompresör kullanılmıştır. Geliştirilen sistem, Pekin'de tüm kış boyunca test edilmiştir ve ASHP'nin -15 °C'ye kadar olan düşük sıcaklıklarda dahi etkin bir şekilde çalışabildiği gözlemlenmiştir. Çalışmalar, söz konusu sistemin enerji verimliliğini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, bu teknolojinin uygulanmasıyla hava kirliliği sorunlarının bir ölçüde azaltılabileceği öngörülmüştür. Sistem, dış ortam sıcaklığının düşmesiyle birlikte ASHP performansındaki azalmaya karşı potansiyel bir çözüm sunmaktadır.

Aresti ve ark. [18] yapmış oldukları çalışmada, ılıman iklim koşullarında yer kaynaklı ve hava kaynaklı ısı pompalarının maliyetlerini karşılaştırmışlardır. Yer

kaynaklı ısı pompasının özellikleri, bir CFD modeli kullanılarak yaklaşık olarak belirlenmiştir. Çalışmada, özel olarak tasarlanmış ve invertör teknolojisine sahip kanallı hava kaynaklı ısı pompasının, enerji tasarrufu sağlama potansiyeli nedeniyle, kesin bir yatırım gerektirmeyen yer kaynaklı ısı pompalarıyla rekabet edebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, yer kaynaklı ısı pompalarının geri ödeme süresinin hava kaynaklı ısı pompalarına göre daha uzun olması, önemli bir dezavantaj olarak değerlendirilmiştir.

Byrne ve ark. [19] yaptıkları çalışmada, yaygın olarak kullanılan tersinir ısı pompalarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek performans sergileyen ve aynı anda hem soğutma hem de ısıtma yapabilen bir hava kaynaklı ısı pompası tasarlamışlardır. Bu tasarım, eş zamanlı olarak sıcak ve soğuk su üretmenin yanı sıra, hava buharlaştırıcısından su buharlaştırıcısına geçişi de mümkün kılmaktadır. Özellikle ortam sıcaklığının düşük olduğu bölgelerde, havadan suya ısı pompalarının performans kaybını önlemek amacıyla önerilmektedir. Bu öneri, hava buharlaştırıcısı ve su buharlaştırıcısı arasında dönüşümlü çalışma sıraları uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan hava kaynaklı tersinir ısı pompaları defrost süreci nedeniyle (ısı üretiminde kesinti ve COP düşüşü) performans kaybına uğrarken, tasarlanan ısı pompası defrost sürecini iki fazlı bir termosifon aracılığıyla gerçekleştirerek performans kaybını minimize etmektedir. Sonuç olarak, söz konusu tasarlanmış ısı pompası, standart tersinir ısı pompalarına kıyasla %16,6 oranında performans artışı göstermiştir.

Xiao ve ark. [20] gerçekleştirdikleri çalışmada, havadan havaya ve havadan suya ısı pompalarının performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçları, havadan havaya ısı pompasının düşük çevre sıcaklıklarında performans düşüşünün, havadan suya ısı pompalarına kıyasla daha sınırlı olduğunu göstermiştir. Bu durum, havadan havaya ısı pompasının düşük ortam sıcaklıklarında ısıtma kapasitesinin, havadan suya ısı pompasına göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Sarbu ve ark. [21] yaptıkları çalışmada, yer kaynaklı ısı pompalarının (GSHP) ısıtma ve soğutma uygulamalarında çevre dostu bir sistem olması nedeniyle CO₂ emisyonlarını azaltabileceğini belirtmişlerdir. Son dönemde, bu sistemlerin bina ısıtma ve soğutmasında kullanımının yıllık bazda %10–12 oranında artış gösterdiği

gözlemlenmiştir. Diğer bir ısı pompası türü olan yeraltı suyu ısı pompaları (GWHP), düşük maliyet avantajına sahip olmasına rağmen, yüksek su akışı ve su kuyularında tortulaşma gibi sorunlar nedeniyle sınırlı ölçüde kullanılmaktadır. Ancak, özel tasarlanmış bir ısı eşanjörü kullanımıyla bu kısıtlamaların giderilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Alshehri ve ark. [22] Suudi Arabistan gibi yüksek sıcaklık değerlerine sahip bir iklim bölgesinde, konvansiyonel klimaların yaz aylarında soğutma amaçlı elektrik tüketiminin toplam elektrik talebinin yaklaşık %70'ini oluşturduğunu belirtmiş ve bu bağlamda, enerji verimliliği açısından daha avantajlı olabilecek ısı pompalarının performansını incelemişlerdir. Çalışmada, özellikle enerji tasarrufu sağlama potansiyeli göz önünde bulundurularak, hava kaynaklı ısı pompaları (ASHP) ve yer kaynaklı ısı pompaları (GSHP) kullanım verimliliği bakımından karşılaştırılmıştır. Bölgedeki ekstrem sıcaklık koşulları (50 °C'ye kadar ulaşan sıcaklıklar) nedeniyle, ASHP sistemlerinin performansının belirgin şekilde düştüğü rapor edilmiştir. Karşılaştırmalı analizler, GSHP sistemlerinin ASHP sistemlerine kıyasla üstün performans sergilediğini ve yıllık COP ile EER değerlerinin GSHP sistemlerinde belirgin şekilde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, GSHP sistemlerinin yıllık enerji tüketiminde ASHP sistemlerine göre yaklaşık %36 oranında azalma sağladığı ve bu durumun, sıcak iklimlerde enerji tasarrufu potansiyeli açısından kayda değer bir avantaj sunduğu vurgulanmıştır.

Guo ve ark. [23] hibrit bir sistemin performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, topraktan havaya ısı eşanjörü teknolojisi kullanılmıştır. EAHE tek başına, çoğu iklim koşulunda iç mekanın termal konfor gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalırken, bir hava kaynaklı ısı pompası ile entegrasyonu, iç mekanın gerekli termal konfor düzeyine ulaşmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, iki sistemin bir araya geldiği hibrit model, enerji tüketimi açısından önemli ölçüde tasarruf potansiyeli sunmaktadır. Söz konusu deneyler, Çin'deki bir bina üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hava değişim oranı saatlik bazda 16,0 olarak belirlendiğinde, EAHE çıkış hava sıcaklığı yaz aylarında maksimum 14,2 °C düşüş, kış aylarında ise maksimum 8,2 °C artış göstermiştir. Ayrıca, EAHE yaz döneminde ortalama 1,95 g/kg nem alma kapasitesi ile hibrit sistemin toplam nem alma kapasitesinin yaklaşık %36,2'sini sağlamış olup, yüksek nem koşullarında daha

yüksek nem alma performansı gözlemlenmiştir. Belirli ortam sıcaklığı ve nem aralıkları dikkate alındığında, bağımsız bir ASHP ile karşılaştırıldığında önerilen hibrit sistem, yaz ve kış aylarında sırasıyla %50,91 ve %16,78 oranında ortalama enerji tasarrufu sağlamaktadır. Benzer şekilde, ASHP'nin performans katsayısında (COPASHP) yaz ve kış için sırasıyla %65,42 ve %11,21 artış gözlemlenirken, hibrit sistemin toplam performans katsayısında (COPT) sırasıyla %145,37 ve %82,63 oranında iyileşme elde edilmiştir.

Ding ve ark. [24] yapmış oldukları çalışmada, hava kaynaklı ısı pompalarının kışın aşırı soğuk ve yazın aşırı sıcak ortamlarda performanslarının belirgin şekilde etkilendiğini ve verimliliklerinin düştüğünü belirtmişlerdir. Bu dezavantajı gidermek amacıyla, araştırmacılar yeni bir model geliştirmişlerdir. Standart hava kaynaklı ısı pompalarının olumsuz koşullarda uzun süre sorunsuz çalışamaması nedeniyle kompresörün zarar görme riski artmaktadır. Önerilen modelde, ek enjeksiyonlu bir scroll kompresör kullanılarak alt soğutma tekniği uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen bu yeni hava kaynaklı ısı pompasının, yazın yüksek sıcaklıklar ve kışın çok düşük sıcaklıklar altında dahi yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Congedo ve ark. [25] gerçekleştirdikleri çalışmada, iklim koşullarının hava kaynaklı ısı pompalarının performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, binalarda en yaygın olarak kullanılan hava kaynaklı ısı pompalarının incelendiği belirtilmiştir. Araştırma, Koppen iklim sınıflandırmasını kapsayan ve yaklaşık 50 yıllık bir dönemi içeren küresel veriler üzerinden yürütülmüştür. Elde edilen bulgular, yılın çok sıcak geçtiği bölgelerde ısı pompalarının saatlik çalışma süresinin artması sonucunda EER ve SEER değerlerinde düşüş meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, sistemin çalışma sıcaklığı sınırlarının aşılması durumunda otomatik olarak kapanacağı ifade edilmiştir.

Ougazzaou ve ark. [26] Fas genelinde hava kaynaklı ve yer kaynaklı ısı pompalarının kapsamlı bir değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, Fas'ın altı farklı şehrinde üç katlı bir binanın saatlik ısıtma ve soğutma verileri dikkate alınarak, her şehir için pik yükler belirlenmiştir. Bu yüklerin enerji tüketimi, yıllık tasarruf potansiyeli, Mevsimsel Performans Faktörü (SPF) ve termal dengesizlik üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmanın ilk gözlemlerinden

biri, sistemlerin iklime bağlı olarak değişen enerji tüketimeidir. Örneğin, Ifrane gibi daha soğuk bölgelerde yer kaynaklı ısı pompaları ısıtma amacıyla daha fazla enerji tüketirken, Marakeş ve Ouarzazate gibi daha sıcak bölgelerde soğutma için daha yüksek enerji gereksinimi göstermiştir. Bununla birlikte, yer kaynaklı ısı pompaları tüm şehirlerde önemli enerji tasarrufları sağlamıştır: Ifrane’de %24,926, Quarnasate’de %33,12 ve Marakeş’te %20,19 oranında tasarruf gözlemlenmiştir. Farklı şehirlerde yapılan Mevsimsel Performans Faktörü analizleri, hem yer altı hem de ortam hava sıcaklıklarının sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, Quarzazate’de yer kaynaklı ısı pompalarının geri ödeme süresinin yaklaşık 9,3 yıl olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Varzazat ve Marakeş’te yer kaynaklı ısı pompalarının sırasıyla %32 ve %29 civarında yıllık potansiyel tasarruf sağlayarak elektrik maliyetlerinde önemli azalışlar oluşturabileceği tespit edilmiştir. Uzun ömürleri ve yüksek verimlilikleri nedeniyle, yer kaynaklı ısı pompaları Fas için hem ısıtma hem de soğutma amaçlı etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, yer kaynaklı ısı pompalarının Fas’ın farklı iklim koşullarına uygun, verimli ve maliyet-etkin bir alternatif olduğunu desteklemektedir.

Omer [27] yapmış olduğu çalışmada yer kaynaklı ve jeotermal ısı pompalarını incelemiştir. Çalışmada, yer tipi veya jeotermal ısı pompalarının, kış aylarında yerin havadan daha sıcak, yaz aylarında ise havadan daha soğuk olması nedeniyle kullanılabileceği vurgulanmıştır. Yer kaynaklı ısı pompalarının sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve birincil enerji tüketiminin düşürülmesine katkı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, yer kaynaklı (GSHP) ısı pompalarının büyük soğutma kulelerine ihtiyaç duymadığı ve işletme maliyetlerinin geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerine kıyasla oldukça düşük olduğu ifade edilmiştir.

Liu [28] gerçekteştirdiği çalışmada toprak kaynaklı, hava kaynaklı ve su kaynaklı ısı pompalarını kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. Çalışmada, ısı pompalarının yenilenebilir enerji kullanımı sayesinde sınırsız bir enerji kaynağından faydalandığı ve bu sistemlerin etkili bir yenilenebilir enerji teknolojisi ürünü olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca, su kaynaklı ısı pompalarının klima sistemlerinde en yüksek enerji verimliliği (COP) değerlerini sergilediği belirtilmiştir. Bu yüksek verimliliğin,

kış aylarında suyun ortam sıcaklığından daha sıcak, yaz aylarında ise ortam sıcaklığından daha soğuk olmasına bağlı olarak ortaya çıktığı ifade edilmiştir.

Ramadan ve ark. [29] yaptıkları çalışmada, ısı pompalarının, düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan yüksek sıcaklıktaki bir kaynağa ısı aktarırken daha az elektrik enerjisi tükettiği için yüksek verimlilik sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca, bu verimliliğin jeotermal ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte kullanıldığında daha da arttığı vurgulanmış ve bu yaklaşımın sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayabileceği ifade edilmiştir. Sonuç olarak, enerji tüketiminde belirgin bir azalma hedefleniyorsa, ısı pompalarının kullanımının uygun bir seçenek olduğu ortaya çıkmıştır.

Wu [30] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, hava kaynaklı ve toprak (yer) kaynaklı ısı pompaları çeşitli parametreler açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, toprak kaynaklı ısı pompalarının daha yüksek verimlilik gösterdiği ve çevre üzerindeki etkilerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yerel iklim koşullarında büyük mevsimsel sıcaklık değişimlerinin yaşandığı bölgelerde, uygun altyapı ve güçlü bir inşaat ekibinin bulunması durumunda, toprak kaynaklı ısı pompalarının özellikle büyük ölçekli bina projelerinde daha avantajlı bir seçenek olacağı ifade edilmiştir. Buna karşın, iklimin ılıman olduğu veya toprak bağlantısının kısıtlı olduğu durumlarda, hava kaynaklı ısı pompalarının tercih edilmesinin daha uygun bir seçenek olacağı sonucuna varılmıştır.

Lin ve ark. [31] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yaz aylarında soğutma ve kış aylarında ısıtma amacıyla kullanılan hava kaynaklı ısı pompalarının performansı incelenmiştir. Araştırmada, hava kirliliği nedeniyle ünitenin dış serpantininde kirlenme meydana gelebileceği ve bunun sistemin genel performansını olumsuz yönde etkileyebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, ortam hava sıcaklığının da hava kaynaklı ısı pompasının çalışma verimini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Bu etkenlerin sistem performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli saha çalışmaları yürütülmüştür. Örneğin, ortam sıcaklığının 30 °C olduğu durumda, dış bobin yüzeyinin kirlenme oranının %0'dan %100'e artması, pompa ünitesinin performans katsayısında (COP) 2,7'den 2,0'a düşüşe neden olmuştur. Benzer şekilde, dış bobin yüzeyinin %60 oranında kirlenmiş olduğu sabit bir durumda, ortam

sıcaklığının 26 °C'den 33 °C'ye yükselmesi COP değerinin 2,6'dan 2,1'e gerilemesine yol açmıştır.

Chen ve ark. [32] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ısı pompaları için bir arıza tespit sistemi tasarlanmıştır. Hava kaynaklı ısı pompalarının, su soğutucu ve ısıtıcı bileşenleri sayesinde küçük konutlardan orta ölçekli binalara kadar farklı yapı tiplerinde kullanılabildiği belirtilmiştir. Ancak, bu sistemlerde yer alan su soğutucu ve ısıtıcı bileşenlerinde meydana gelebilecek arızaların, ünitenin genel performansını önemli ölçüde düşürebileceği ifade edilmiştir. Bu nedenle, söz konusu bileşenlerin çalışma koşullarını izleyebilmek amacıyla bir arıza tespit sistemi geliştirilmiştir. Çalışmada, kondansatörün %20 ve %60 oranlarında kirlenmesi durumlarına ait veriler kullanılarak geliştirilen yöntemin ve sistemin uygulanabilirliği ile arıza tespit edilebilirliği değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Temel Bileşen Analizi (PCA) tabanlı geliştirilen sistemin kondansatör kirlenme arızasını başarıyla tespit edebildiğini göstermiştir. Ayrıca, bu sistemin hava kaynaklı ısı pompalarıyla uyumlu bir şekilde çalışabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Huang ve ark. [33] gerçekleştirdikleri çalışmalarında, yüksek sıcaklıklı ısı pompası (HTHP) ile hava kaynaklı ısı pompasını (ASHP) karşılaştırmışlardır. Çalışmada, HTHP'nin ASHP'ye eşdeğer bir sistem olarak önerilebileceği belirtilmiştir. Araştırmacılar, HTHP'nin ASHP'ye kıyasla performans iyileştirmelerini değerlendirmek amacıyla iki sistem arasında simülasyon temelli bir karşılaştırma gerçekleştirmiştir. Her iki sistem için fizik tabanlı modeller oluşturulmuş; ASHP'nin donma koşullarındaki performansı, geliştirilen yeni bir donma haritası aracılığıyla iyileştirilmiş ve HTHP için rejenerasyon kayıpları dikkate alınmıştır. Bu modeller ve yapılan iyileştirmeler doğrultusunda, Çin'in Nanjing bölgesinde bir ofis binası için saatlik simülasyon analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, HTHP'nin yaz mevsimindeki ortalama enerji verimliliğinin, su soğutmalı yaklaşımı sayesinde ASHP'ye oranla %23,1 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kış mevsiminde ise HTHP, donma riskinin ortadan kalkması ve enerji depolama kapasitesi sayesinde %7,4 oranında bir verimlilik artışı göstermiştir. Her ne kadar HTHP'nin kurulum maliyeti ASHP'ye göre %1,2 daha yüksek olsa da, daha düşük güç tüketimi nedeniyle 10 yıllık bir süre zarfında %9,7 oranında maliyet tasarrufu sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Lee ve ark. [34] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, havadan havaya ısı pompalarında mevsimsel enerji verimliliği oranı (SEER) ile mevsimsel performans katsayısının (SCOP) farklı çalışma koşulları altında optimize edilebilmesi amacıyla bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Model; kompresör frekansı, iç hava akış hızı, dış hava akış hızı, tepe yükü ve kompresör hacmi gibi parametreleri kapsamaktadır. Üç çalışma parametresinin birlikte optimize edilmesi sonucunda elde edilen SCOP ve SEER değerlerinin, yalnızca kompresör frekansının optimize edilmesiyle elde edilen değerlere kıyasla sırasıyla %7,0 ve %21,4 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 8,5'ten büyük SEER değerini sağlayan maksimum tasarım soğutma tepe yükünün 3,7 kW olduğu tespit edilmiştir. Kompresör hacminin temel kompresör hacmine göre sırasıyla %37,2 ve %22,8 oranında artırılması durumunda, SCOP ve SEER değerlerinde sırasıyla %3,8 ve %1,1 oranında bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Blázquez ve ark. [35] iki farklı koşul altında hava kaynaklı ve yer kaynaklı ısı pompalarını karşılaştırmışlardır. Çalışmanın amacı, bu kıyaslamadan hareketle en uygun ısıtma sistemini belirlemektir. İncelenen ilk bölge, jeolojik açıdan ısı pompası kullanımına uygun olmasına rağmen, soğuk iklim koşulları nedeniyle yüksek ısıtma enerjisi gerektirmektedir. İkinci bölge ise ılıman iklim özellikleri nedeniyle ısıtma enerji ihtiyacını önemli ölçüde azaltmakta, ancak toprakla termal etkileşim açısından ideal koşullar sunmamaktadır. İlk bölge için, dış hava koşullarının yüksek enerji gerektirmesi nedeniyle işletme maliyetlerinin artması sebebiyle hava kaynaklı ısı pompası önerilmemiştir. Öte yandan, ılıman iklim koşullarına sahip ikinci bölgede, hem hava kaynaklı hem de yer kaynaklı ısı pompaları ekonomik ve çevresel açıdan benzer performans göstermektedir.

Chua ve ark. [36] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ısı pompalarındaki performans iyileştirme yöntemleri incelenmiştir. Çalışmada, ısı tahrikli bir ejektörün ısı pompasına entegre edilmesinin, sistemin termal verimliliğini %20'nin üzerinde artırdığı rapor edilmiştir. Ayrıca, kompresör sisteminde yapılan optimizasyon ve iyileştirmeler sayesinde elektriksel enerji tüketiminde yaklaşık %80 oranında bir azalma sağlanabileceği vurgulanmıştır. Bu bulgular, ısı pompası teknolojilerinin enerji verimliliğinin artırılması ve operasyonel maliyetlerin düşürülmesi açısından önemli potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Keliang ve ark. [37] çalışmalarında yeni bir ısı pompası sistemi önermişlerdir. Önerilen sistemde, PV/T kollektör, güneş enerjili bir pompa ile entegre edilmiştir. Sistemde, soğutucu akışkanın soğutma etkisi sayesinde PV modülleri daha düşük sıcaklıklarda aktif olarak çalışabilmekte ve bu durum fotovoltaik verimlilikte artışa yol açmaktadır. Çalışma sonucunda, fotovoltaik güneş enerjisi destekli ısı pompası (PV-SAHP) sisteminin, ayrı cihazlardan daha yüksek performans katsayısı (COP) ve fotovoltaik verimlilik sağladığı belirlenmiştir. Deneysel koşullarda PV-SAHP'nin COP değeri 8,4 olarak ölçülmüş ve ortalama COP yaklaşık 6,5 olarak bulunmuştur; ortalama fotovoltaik verimlilik ise yaklaşık %13,4 olarak kaydedilmiştir.

Goh ve ark. [38] ısı pompalarının kurutma teknolojilerinde kullanımını incelemişlerdir. Çalışmalarında, ısı pompası sistemlerinin kurutmada uygulanmasıyla verimlilik açısından çeşitli avantajlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Araştırmada, ısı pompalı kurutucuların gıda ürünlerinde kaliteyi artırmada etkili olduğu; bağıl nem, kurutma sıcaklığı, nem içeriği, kurutma hızı ve süresinin kontrolünü sağlayarak gelişmiş bir kurutma teknolojisi sunduğu vurgulanmıştır. Isı pompalı kurutucular sayesinde gizli ve duyu ısı, egzoz havasından geri kazanılabilmekte; bu durum genel termal performansı artırmakta ve kurutucunun giriş havası şartlarının daha etkin bir şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, elektrik dirençli kurutucularla karşılaştırıldığında, ısı pompalı kurutucular kullanılarak yaklaşık %40 oranında enerji tasarrufu sağlanabildiği belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, fotovoltaik güneş enerjisi destekli ısı pompası/ısı borusu (PV-SAHP/HP) sistemi tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

Fu ve ark. [39] çalışmalarında fotovoltaik güneş enerjisi destekli ısı pompası/ısı borusu (PV-SAHP/HP) sistemini tasarlamış ve üretimini gerçekleştirmişlerdir. Deneyler, Hong Kong'da Kasım ayının ilk haftasında yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar, cihaz güneş enerjisi destekli ısı pompası modunda çalıştırıldığında günlük enerji verimliliğinin %61,1 ile %82,1 arasında değişebileceğini göstermiştir. Güneş radyasyonunun yüksek olduğu durumlarda, günlük COP değeri 4,01'e kadar ulaşabilmektedir. PV-SAHP/HP sistemi, yüksek güneş radyasyonu koşullarında ısı borusu modunda çalıştırıldığında, günlük ortalama sistem enerji verimliliği ve ekserji verimliliği sırasıyla yaklaşık %36,5–38,4 ve %7,4–7,8 olarak belirlenmiştir.

Ning ve ark. [40] çalışmalarında termal depolama teknolojisinin hava kaynaklı ısı pompalarında uygulanmasını incelemişlerdir. Termal enerji depolama, elektrik ve mekan ısıtma ihtiyaçlarının karşılanmasında ve enerji talebindeki dalgalanmaların dengelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç temel termal depolama türü mevcuttur: faz değişimli termal depolama, duyarlı termal depolama ve termokimyasal reaksiyon tabanlı termal depolama. Duyarlı termal depolama, depolama malzemelerinin sıcaklığı değiştikçe ısıyı absorbe eder veya serbest bırakarak enerji depolar. Faz değişimli termal depolama ise, faz değişimi gerçekleşen malzemelerde ısıyı emerek veya serbest bırakarak depolama sağlar. Faz değişim malzemelerinin sıcaklık seviyelerine bağlı olarak bu teknoloji yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık faz değişimli depolama olarak ikiye ayrılabilir. Termokimyasal reaksiyon tabanlı termal depolama ise, enerji depolamak amacıyla geri dönüşümlü kimyasal reaksiyonların kullanımına dayanır. İnceleme sonuçları, faz değişimli termal depolama teknolojisinin, yüksek gizli ısı kapasitesi ve yüksek termal enerji yoğunluğu avantajları nedeniyle hava kaynaklı ısı pompalarında önemli ölçüde kullanıldığını göstermektedir. Isıtma uygulamalarında, faz değişim malzemeleri (PCM'ler) su depolarına ve güneş kolektörlerine entegre edilebilmekte ve yüksek performanslı PCM seçimi, hava kaynaklı ısı pompasının genel performansını artırabilmektedir. Faz değişimli termal depolama sistemleri, ısı ihtiyacının düşük olduğu dönemlerde fazla enerjiyi depolar ve talebin arttığı durumlarda bu enerjiyi serbest bırakır. Faz değişimli termal depolama ile hava kaynaklı ısı pompalarının entegrasyonu, cihazın normal çalışma aralığını genişletmektedir. Özellikle defrost uygulamalarında, faz değişimli termal depolama kullanımı, daha etkin bir defrost etkisi ve artan enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, elektrikli tepe noktası azaltma uygulamalarında, faz değişimli depolama teknolojisi entegre edilerek hava kaynaklı ısı pompaları, artan yerel elektrik talebini karşılamada tepe noktası azaltma ve güç vadisi doldurma işlemlerini etkili bir şekilde gerçekleştirebilmektedir.

Kelly ve ark. [41] hava kaynaklı ısı pompalarının ekonomik ve çevresel performansını inceleyen çalışmalarında, bu teknolojinin petrol tabanlı ısıtma sistemleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini gerçekleştirmişlerdir. Bulgular, İrlanda'daki hane halklarının %60'ının hava kaynaklı ısı pompalarına yatırım yapmasının, yıllık yaklaşık 600 Euro düzeyinde anlamlı maliyet tasarrufu sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, hava kaynaklı ısı pompalarının yalnızca

enerji maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda konutlarda karbon emisyonlarının azaltılmasına da katkı sağladığı belirlenmiştir. Bu durum, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleri bağlamında, hava kaynaklı ısı pompalarının konut ısıtma sistemleri için stratejik bir çözüm olarak değerlendirilmesini desteklemektedir.

Dai ve ark. [42] çalışmalarında, geleneksel hava kaynaklı ısı pompası su ısıtıcısı ile doğrudan genleşmeli güneş enerjili ısı pompası su ısıtıcısını farklı çalışma koşulları altında karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, güneşli açık havalarda doğrudan genleşmeli güneş enerjili ısı pompasının COP değerinin, geleneksel hava kaynaklı ısı pompasına göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu farkın nedeni, güneş enerjisinin ısı pompasının buharlaşma sıcaklığını artırabilmesidir. Öte yandan, güneşsiz ve kapalı günlerde, don oluşumu olmadan her iki ısı pompası türünün COP değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Geceleri ise, güneş enerjili ısı pompasının performansının düşük olmasının, güneş kolektörlü buharlaştırıcının zayıf konveksiyonel ısı transferi ve gece gökyüzüne yönelik radyatif ısı kaybından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Yıllık performans değerlendirmesi sonucunda, güneş enerjili ısı pompası su ısıtıcısı sisteminin ortalama COP değerinin, özellikle kış mevsiminde, geleneksel hava kaynaklı ısı pompasına kıyasla belirgin biçimde daha yüksek olduğu ortaya konmuştur.

Ooka ve ark. [43] çalışmalarında hava kaynaklı ve yer kaynaklı ısı pompalarının ekserjitik performanslarını incelemiştir. Ekserji, meydana gelen entropi sonucu nedeniyle artık faydalı hale getirilemeyen enerji payı çıkarıldıktan sonra geriye kalan ve teorik olarak işe dönüştürülebilecek enerji miktarını ifade eder. Yani ortada belli bir miktarda toplam enerji varsa bu enerjinin Elde edilen bulgular, yer kaynaklı ısı pompalarının, hava kaynaklı ısı pompalarına kıyasla daha düşük ekserji tüketimine sahip olduğunu göstermiştir. Bu durum, yer kaynaklı ısı pompalarında soğuk ekserjinin topraktan temin edilebilmesine karşın, hava kaynaklı ısı pompalarında çevreden yeterli soğuk ekserji alınamamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, yer kaynaklı ısı pompalarında soğutucu akışkan ile toprak veya soğutma suyu arasındaki sıcaklık farkı, hava kaynaklı ısı pompalarındaki soğutucu akışkan ile hava arasındaki sıcaklık farkına göre daha azdır.

Kelly ve ark. [44] çalışmalarında, Birleşik Krallık'ta doğalgazın konut ısıtmasında yaygın olarak kullanıldığını ve ısı pompalarının kullanımının doğalgaza kıyasla geride kaldığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, doğalgaz rezervlerindeki azalma ve gaz fiyatlarındaki artışın ısı pompalarına olan ilgiyi artırdığı vurgulanmıştır. Bu bağlamda, özellikle hava kaynaklı ısı pompalarının konutlarda uygulanabilirliği ve performansını incelemeye yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yıllık bazda yapılan analizler, hava kaynaklı ısı pompalarının yoğuşmalı gaz kazanlı sistemlere göre yaklaşık %12 daha düşük karbon emisyonu ürettiğini, ancak işletme maliyetinin gaz kazanlı sistemlere göre yaklaşık %10 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Öte yandan, doğrudan elektrikli ısıtma sistemleriyle karşılaştırıldığında, hava kaynaklı ısı pompalarının karbon emisyonlarının yaklaşık %55 daha düşük olduğu raporlanmıştır. Bu bulguların Birleşik Krallık'taki enerji fiyatlarına dayalı olduğunu belirtmek önemlidir.

Shen ve ark. [45] çalışmalarında entegre bir hava kaynaklı ısı pompası (ASIHP) modelini incelemişlerdir. Bu entegre ısı pompası, soğutma döneminde yoğuşan atık havayı geri kazanırken, diğer dönemlerde su ısıtması sağlayarak enerji tasarrufu gerçekleştirmektedir. Araştırmada, EnergyPlus simülasyon programı kullanılarak ABD'nin 10 farklı şehrinde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elektrikli su ısıtmalı temel bir ısı pompasıyla karşılaştırıldığında, ASIHP'nin yıllık enerji tasarrufu %47 ile %56 arasında değişmektedir. Ayrıca, ASIHP'nin su ısıtma performansı, gazlı ve elektrikli su ısıtma sistemleriyle kaynak enerji verimliliği açısından kıyaslanmıştır. Sonuçlar, ASIHP'nin Las Vegas, Teksas, Nevada, Houston, Miami (Florida), Phoenix (Arizona) ve Leicester gibi en yüksek soğutma gereksinimine sahip bölgelerde gazlı su ısıtma sistemlerine göre daha verimli olduğunu göstermiştir.

Yongcun ve ark. [46] çalışmalarında, hava kaynaklı ısı pompalarının ısı eşanjörlerinde kış aylarında don oluşumu nedeniyle ısı kapasitesinin azaldığına dikkat çekmişlerdir. Don seviyesi belirli bir eşiğe ulaştığında cihazın performansında düşüş gözlenmektedir. Bu sorunu çözmek amacıyla, buzlanmayı önleyen yeni bir hava kaynaklı ısı pompası tasarımı önermişlerdir. Önerilen sistem, kış mevsiminde buz çözme işlemine gerek kalmadan ısıtma yapabilmektedir. Sistem, ortamdan ısı çekme sürecini iki aşamada gerçekleştirmektedir: Birinci aşamada, ortamdan çekilen ısı

çözeltiye aktarılırken, ikinci aşamada çözelti aracılığıyla buharlaştırıcıya ısı iletilerek buharlaştırıcı yüzeyinde buz oluşumu engellenmektedir. Bu çalışmayı desteklemek amacıyla araştırmacılar teorik bir model geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, önerilen sistem ile kış mevsiminde hava kaynaklı ısı pompalarının performansının daha verimli hale geldiği görülmüştür.

Vocale ve ark. [47] çalışmalarında ters çevrimli buz çözme sürecini dikkate alarak dış ortam hava sıcaklığı ve bağıl nemin hava kaynaklı bir ısı pompası üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmada, buzlanma meydana gelme sürecini ve buzlanma döngü sayısını dış hava koşullarıyla ilişkilendiren bir model geliştirilmiş ve bu modelin analizi gerçekleştirilmiştir. Buzlanmanın enerji tüketimi üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. İncelemeler sonucunda, dış hava koşullarının buzlanma döngü sayısını belirlediği; buna karşın bağıl nemin de buzlanma oluşumunu etkilediği tespit edilmiştir. Özellikle soğuk ve yağışlı hava koşullarında çalışan ısı pompalarının performansının, buzlanmadan önemli ölçüde etkilendiği ve bu durumlarda COP değerinin %20'ye kadar düşebileceği gözlemlenmiştir. Tüm incelenen senaryolar için sezonsal performans katsayısında (SCOP) gözlenen maksimum azalış ise %13'ten azdır.

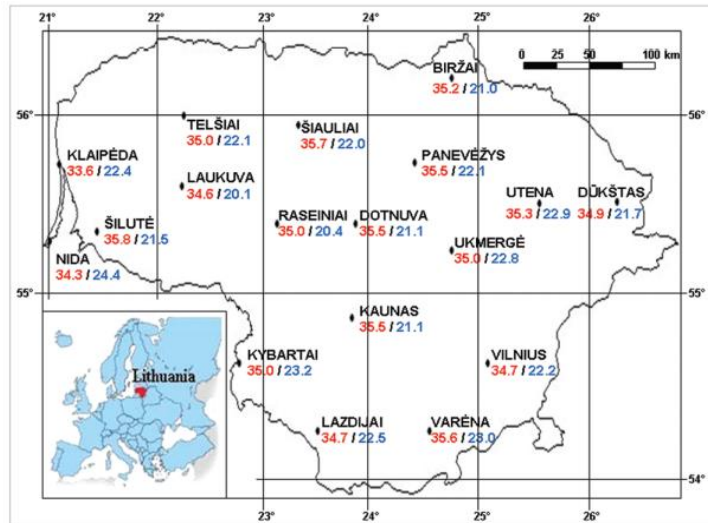
Lazzarin [48] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çift kaynaklı bir ısı pompası sistemi incelenmiştir. Bu sistemler, hava kaynaklı ve toprak kaynaklı ısı pompalarına ilave olarak güneş kolektörleriyle desteklenmektedir. Güneş kolektörleri, yalnızca doğrudan ısıtma amacıyla kullanılabildiği gibi, ısı pompasıyla seri veya çift kaynaklı bir entegrasyon düzeninde de çalıştırılabilmektedir. Seri konfigürasyon tercih edildiğinde, sistemin performans katsayısı (COP) artarken, toplam serbest enerji kullanım oranı genellikle düşmektedir; bu durum, doğrudan güneş ısıısının sisteme sağladığı katkının sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, bu tür sistemlerde hâlen ek yardımcı enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Deng ve ark. [49] Çin'in soğuk iklim koşullarında ısıtma amaçlı kullanılan 32 farklı ısı pompasının enerji performansını incelemişlerdir. Test sonuçları, aşırı yüksek kapasiteli ısı pompası tasarımı ve kurulumunun özellikle kısmi yük koşullarında, tüm ısıtma sezonu boyunca ısı pompasının verimini düşürdüğünü göstermiştir. Ayrıca, geniş ısıtma dağıtım ağlarına sahip tek bir ısı pompası istasyonunun önemli ısı

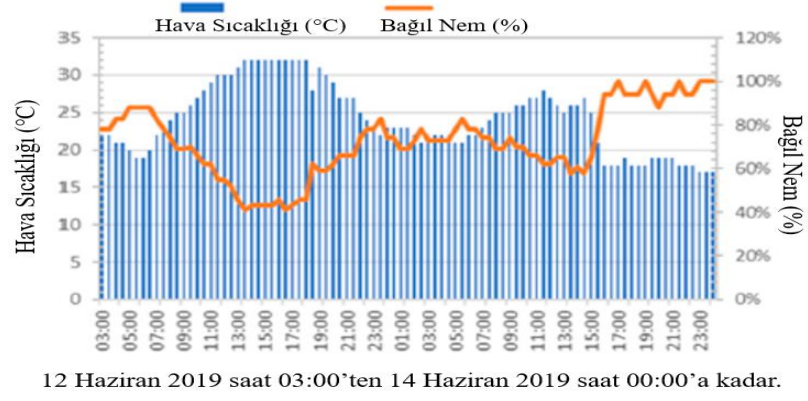
kayıplarına yol açtığı belirlenmiştir. Isı pompası ve sirkülasyon pompası için kullanılan karmaşık kontrol yöntemi, kış döneminde değişen konut ısı talebi ve ısı kaynağı sıcaklık değişimlerine bağlı olarak kararlı bir performans sağlayamamıştır. Bu çalışma, teorik varsayımlara dayanmak yerine, ısıtma sezonu boyunca tüm ısı pompası tabanlı mekan ısıtma sistemlerinin optimize edilmiş tasarımı ve işletiminin, farklı türdeki ısı pompalarının gerçek enerji performansını belirlemede gerekli olduğunu ortaya koymuştur.

Valancius ve ark. [50] yaptıkları çalışmada Litvanya’da çeşitli ısı pompalarını incelemişlerdir. Litvanya’da mekân ısıtması ve kullanım sıcak suyu talebi, toplam enerji tüketimi içinde en büyük payı oluşturmaktadır. 2002 yılından itibaren Litvanya pazarında yer alan ısı pompaları özellikle konutlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar, mevsimsel performans faktörünün yani bir yerin ihtiyaçlarını gidermek için elde edilen toplam faydalı enerjinin, sistemi çalıştırmak için kullanılan toplam elektrik enerjisine oranı (SPF) 1,8 ile 5,6 arasında değiştiğini göstermiştir. Hava kaynaklı ısı pompalarında daha düşük SPF değerleri gözlemlenirken, toprak ve su kaynaklı ısı pompaları daha yüksek verimlilik sunmaktadır. Litvanya’da hava kaynaklı ısı pompalarının SPF değerleri 1,8 ile 3,4 arasında değişirken, yer ve su kaynaklı ısı pompalarında bu değerler 2,5 ile 5,6 aralığında değişmektedir.

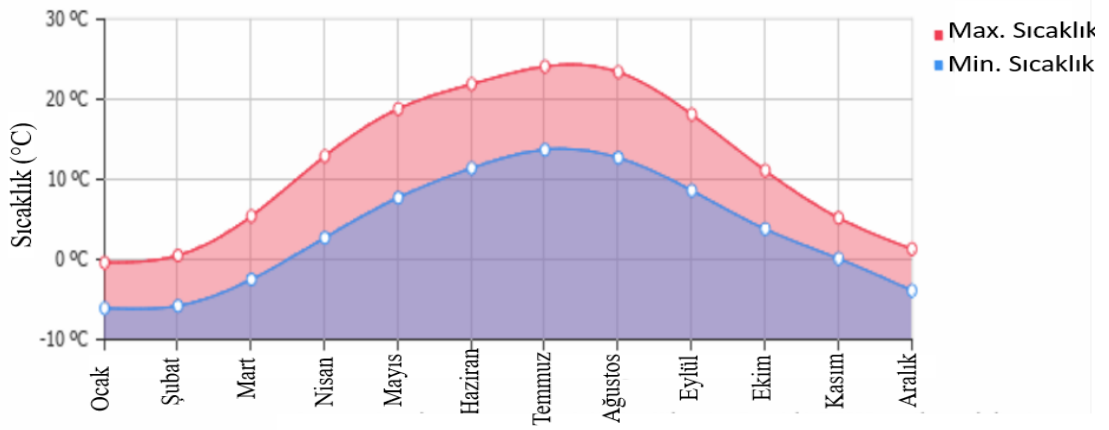
Litvanya’ya ait en düşük en yüksek sıcaklıklar aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.1. Litvanya illerine ait en yüksek ve en düşük sıcaklıklar [51]



Şekil 3.2. 13 Haziran 2019 'a ait saatlik hava sıcaklık değerleri [52]



Şekil 3.3. Vilnius Litvanya'da ortalama minimum ve maksimum sıcaklıklar [53]

Tablo 3.1. Litvanya aylara göre ortalama sıcaklıklar (1991-2020 dönemi için) [54]

Ay	Ortalama Sıcaklık (°C)
OCAK	-2,9
ŞUBAT	-2,5
MART	0,9
NİSAN	7,2
MAYIS	12,5
HAZİRAN	15,9
TEMMUZ	18,3
AĞUSTOS	17,6
EYLÜL	12,8
EKİM	7,3
KASIM	2,6
ARALIK	-1,1
YILLIK	7,4

- Ülkenin yıllık ortalama hava sıcaklığı yaklaşık **7,4 °C** civarındadır (1991-2020 dönemi için standart iklim normlarına göre).
- En sıcak ay Temmuz, en soğuk ay ise Ocaktır.
- İklim tipi olarak “nemli kara iklimi” kategorisine girer; yani yazları ılık-sıcak, kışları soğuk geçer.
- Kış aylarında sıcaklıklar genellikle -3 °C civarındadır ki, bu da donma koşullarının yaygın olabileceğini gösterir.
- Yaz aylarında özellikle Temmuz’da sıcaklık ortalama 18 °C dolayındadır; bu, ılık-sıcak sayılabilir ama tropik ya da çok sıcak yazlar tipik değildir.
- İlkbahar ve sonbahar geçiş dönemlerinde sıcaklık hızla değişebilir: Nisan’da $\sim 7\text{ °C}$, Mayıs’ta $\sim 12\text{--}13\text{ °C}$; Eylül’de $\sim 12\text{--}13\text{ °C}$, Ekim’de $\sim 7\text{ °C}$ civarına düşer.
- Bu dağılım, Litvanya’nın denize kıyısı olması ve kuzeyde yer alması nedeniyle iklimin tam bir karasal modele göre değil, biraz ılımlı etkiler altında olduğunu da gösteriyor [54].

Tablo 3.2. Litvanya’nın ısıtma ve soğutma derece-saat verileri

Bölge/Şehir	Isıtma Derece-gün (min18°C)	Soğutma Derece- Gün (min18°C)	Yaklaşık Yıllık Ortalama Dış Sıcaklık
Vilnius Başkent	4400-4700	50-80	+6 °C
Kaunas	4300-4600	60-90	+6,5°C
Klaipeda(kıyı)	3800-4100	70-100	+7,5°C
Siauliai	4400-4600	40-60	+6°C

Derece-gün kavramı, ısıtma veya soğutma yükünü hesaplamak için kullanılır.

-Isıtma derece-saat (HDDH): Dış sıcaklığın, belirli bir iç referans sıcaklığının (örneğin 18 °C) altına düştüğü her saatte fark kadar toplanır.

-Soğutma derece-saat (CDDH): Dış sıcaklık referans sıcaklığın üstünde olduğunda, fark kadar toplanır [55-59].

Ahn ve ark. [60] çalışmalarında elektrikli araçlarda çift kaynaklı ısı pompası kullanımını incelemişlerdir. Araştırmada, ısı pompası kullanımı ile araçların ısıtma veriminin artırılması hedeflenmiştir. Tek kaynaklı ısı pompalarının düşük dış ortam sıcaklıklarında verimli çalışmaması nedeniyle çift kaynaklı bir yaklaşım benimsenmiştir. Testler üç farklı modda gerçekleştirilmiştir: birinci mod yalnızca hava kaynağı, ikinci mod yalnızca atık ısı kaynağı ve üçüncü mod her iki kaynağın birlikte kullanımınıdır. Sonuçlar, çift kaynaklı kullanımın ısıtma performansında en yüksek

verimi sağladığını göstermiştir. Ayrıca, dış ortam sıcaklığının çok düşük olduğu durumlarda, performansı artırmak amacıyla hava kaynağı ve atık ısı modlarının dönüşümlü olarak kullanılması önerilmiştir.

Mouzeviris ve ark. [61] çalışmalarında, hava-su ısı pompası ile toprak kaynaklı ısı pompasının teknik verilerini dikkate alarak COP ve EER oranlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. İncelenen sonuçlar, invertör kontrollü ısı pompalarının, sabit kapasiteli ısı pompalarına kıyasla genellikle daha yüksek COP ve EER değerleri sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, ısı pompalarının performansı büyük ölçüde sıcaklık değişimlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu bağlamda, COP değerleri ısıtma sisteminde su çıkış sıcaklığı azaldıkça anlamlı bir şekilde artarken, EER değerleri soğutma sisteminde su çıkış sıcaklığı yükseldikçe belirgin bir artış göstermektedir.

Jianhui ve ark. [62] çalışmalarında birden fazla ve birbirine paralel şekilde bağlanmış dış üniteye sahip bir hava kaynaklı ısı pompasını incelemişlerdir. Dış ünitelerin paralel bağlantısı, aynı anda kesintisiz ısıtma ve alternatif defrost sürecinin gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Geliştirilen model ve yapılan deneyler, söz konusu sistemin -10°C dış ortam sıcaklığında dahi defrost sırasında kesintisiz ısıtma sağlayabildiğini göstermiştir. Bu koşullarda cihazın COP değeri ve toplam enerji verimliliği oranı (EER) sırasıyla 2,0 ve 2,32'ye ulaşabilmektedir.

Blumsack ve ark. [63] Pensilvanya, ABD'de bir konutta soğutma, ısıtma ve kullanım sıcak suyu sağlamak amacıyla kullanılan toprak kaynaklı bir ısı pompasının enerji tüketimini, elektrikli sistemler ve elektrikli soğutmalı bir yakıt sobası ile simülasyon temelli olarak karşılaştırmışlardır. DeneySEL gözlemler, toprak kaynaklı ısı pompasının kullanımında, elektrikli sisteme kıyasla soğutma verimliliğinde %43, ısıtma verimliliğinde ise %81 artış sağlandığını göstermiştir. Yakıt sobasına göre ise sıcak su üretimi ve konut ısıtmasında %42 oranında verimlilik artışı kaydedilmiştir. Geri ödeme süresi açısından yapılan değerlendirmeler, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin, yalnızca elektrikli bir sisteme kıyasla yaklaşık dört-beş yıl, hibrit yakıt yağı ve elektrikli sistemlerle karşılaştırıldığında ise yaklaşık üç yıl içinde yatırımını amorti edebileceğini ortaya koymuştur.

Deymi-Dashtebayaz ve ark. [64] İran'ın Meşhed şehrindeki bir veri merkezinde farklı soğutucu akışkanlar kullanılarak çalışan hava kaynaklı ısı pompası (ASHP) ile atık ısı geri kazanım sisteminin fizibilitesini incelemişlerdir. Çalışmada, 416 m² büyüklüğündeki ofiste mekanik soğutma kullanımıyla hem elektrik hem de doğalgaz tüketiminde tasarruf sağlandığı gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, yılda yaklaşık 35.000 m³ doğalgaz tasarrufu elde edilmiş ve atık ısı geri kazanım sistemi aracılığıyla yıllık 20,8 MWh elektrik tasarrufu sağlanmıştır. Önerilen sistemde, veri merkezinin dönüş havası sıcaklığı ve akış hızı arttıkça, ASHP'nin güç tüketimi ve ısıtma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Bununla birlikte, dönüş havası sıcaklığı ve akış hızının, kompresör güç tüketimini artırmaktan çok ısıtma kapasitesini artırmada daha belirgin bir etkisi olduğu ve bunun sonucunda COP değerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, R134a soğutucu akışkanın diğer akışkanlara kıyasla daha üstün performans sergilediği ve COP değerinin 5,15'ten 5,47'ye yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Chesser ve ark. [65] yaptıkları çalışmada İrlanda'daki tamamen yenilenmiş konutlarda gerçekleştirilen bir saha deneyi kapsamında hava kaynaklı ısı pompalarının (ASHP) performansını değerlendirmişlerdir. Analiz sonuçları, denek konutların tamamının yenilenebilir ısı ürettiğini göstermektedir; ancak bu saha performansı, üreticinin laboratuvar testlerinde elde ettiği sonuçlardan farklılık arz etmiştir. Hava kaynaklı ısı pompası tarafından üretilen ısı enerjisi, belirli bir süre boyunca sabit bir COP değerini karşılıyorsa yenilenebilir olarak kabul edilmektedir. Bu yaklaşımın bir örneği olarak mevsimsel performans faktörü (SPF) verilebilir. COP, ısı pompasının o anki ısı verimliliğinin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu çalışmada, hava kaynaklı ısı pompası, üretici firmanın verdiği COP değerleri ile karşılaştırıldığında, ortalama 7 °C dış ortam sıcaklığında %24 ve 2 °C'de %11 daha düşük performans sergilemiştir.

Hiller ve Glicksman [66] yaptıkları çalışmada bir ısı pompasının performansının iyileştirilmesine yönelik bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, kapasite kontrollü bir ısı pompasının performansı ele alınmıştır. Özellikle havadan havaya tipteki ısı pompalarının geleneksel modelleri ile kapasite kontrollü olanları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, kapasite kontrollü ısı pompalarının geleneksel tip ısı pompalarına kıyasla yaklaşık %30'a varan enerji tasarrufu

sağladığını göstermiştir. Düşük ortam sıcaklıklarında ısıtma kapasitesinin artırılabilmesi için daha büyük boyutlu ısı pompalarının kullanılması bir çözüm olarak önerilmektedir. Bu tür büyük ısı pompaları, soğuk iklimlerde, azaltılmış yardımcı elektrik direnç ısısı kullanımıyla, geleneksel boyutlu ısı pompalarına kıyasla yıllık bazda %15–25 oranında enerji tasarrufu sağlayabilir. Ancak, havadan havaya tip ısı pompalarının genellikle klima amacıyla da kullanılması nedeniyle, daha büyük cihazların kullanımı soğutma modunda konforsuzluğa yol açabilmektedir. Ayrıca, daha yüksek hava akışı gerektiren büyük kanallar, cihazların toplam maliyetini artırmaktadır. Bu noktada, kapasite kontrollü ısı pompalarının kullanımı, klima çalışma modunda ortaya çıkan konforsuzluk sorununu giderebilir ve büyük ısı pompalarının COP değerini önemli ölçüde iyileştirebilir. Normalden daha büyük ısı pompalarının sağladığı enerji tasarrufuna ek olarak, kapasite kontrollü ısı pompalarının kullanımı ek olarak %5–15 arasında ek enerji tasarrufu sağlayabilir.

Habeebullah [67] gerçekleştirdiği çalışmada son yıllarda Körfez ülkelerinde içme suyu talebinde meydana gelen artışa dikkat çekmiştir. Bu doğrultuda, tatlı su teminine yönelik alternatif bir yöntem olarak atmosferik havadan su elde edilmesini amaçlayan bir sistem üzerinde durulmuştur. Önerilen yöntemde, nem alma prosesi ile ısı pompası teknolojisi entegre edilmiştir. Geliştirilen sistem, Cidde’de 250 m² alana sahip bir ofise 34 °C sıcaklık ve %71 bağıl nem koşullarında 1,586 m³/s debide hava sağlamaktadır. Hava çıkış sıcaklığının 8 °C’ye düşürülmesiyle yoğunlaşma sürecinin maksimum düzeye ulaşması hedeflenmiş ve bu amaçla iki seri buharlaştırıcı (bakır-bakır kanatlı boru serpantinleri) kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, geliştirilen sistemin hem iklimlendirme hem de içme suyu üretimi gereksinimi bulunan sıcak ve nemli bölgelerde kullanılmaya elverişli olduğu belirlenmiştir. Cidde bölgesinin iklim koşullarında, birleşik ünitenin su üretim kapasitesi ocak ayında 0,618 m³/gün olarak ölçülürken, eylül ayında 2,23 m³/gün değerine ulaşmaktadır. Ayrıca, sistemin özgül enerji tüketimi tatlı suyun her bir litresi için 0,42 kWh olarak hesaplanmıştır.

Kurylo ve Rucinski [68] gerçekleştirdikleri bir çalışmada elektrik motorlu ısı pompaları ile gaz motorlu ısı pompalarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonuçlarına göre, gaz motorlu ısı pompaları 30 kW’ın üzerindeki enerji gereksinimlerinde kullanıldığında, elektrik motorlu ısı pompalarına kıyasla daha rekabetçi bir performans sergilemektedir. Elektrik bağlantı maliyetlerinin yüksek

olduğu bölgelerde gaz motorlu ısı pompalarının kullanımı, ekonomik açıdan daha avantajlı olmaktadır. Yapılan analizler, yalnızca ısıtma ve soğutma yükleri dikkate alındığında, elektrikli ısı pompalarının gaz motorlu ısı pompalarına göre yaklaşık 1,5 kat daha düşük maliyetli olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, analizde gaz motorlarının su soğutması sonucu ortaya çıkan atık ısının yeniden değerlendirilme potansiyeli de dikkate alınmıştır. Gaz motorlu ısı pompalarının kullanım sıcak suyu üretimine uyarlanması durumunda, bu sistemlerin avantajlarının artabileceği belirtilmiştir. Dolayısıyla, gaz motorlu ısı pompalarının atık ısıyı kontrol edebilme özelliği sayesinde, elektrikli ısı pompalarıyla rekabet edebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Konutlarda soğutma ihtiyacı, özellikle sıcak iklime sahip ve hızlı bir şekilde kentleşen ülkelerde, elektrik talebi ve buna bağlı karbon emisyonlarının artışında giderek daha kritik bir etken haline gelmektedir. Mevcut verilere göre, soğutmanın toplam elektrik tüketimindeki payı hâlen sınırlı düzeydedir; örneğin 2022 yılında Avrupa Birliği'nde bu oran yaklaşık %9 olarak kaydedilmiştir. Ancak, artan gelir seviyeleri, hızlanan kentleşme ve aşırı sıcak hava olaylarının daha sık görülmesi gibi faktörler, soğutmaya dünya genelinde en hızlı büyüyen enerji kullanım alanlarından biri hâline getirmektedir. Hanelerin üçte birinden fazlasında klima sistemlerinin bulunması ve bu sistemler aracılığıyla yaklaşık 105.000 km² büyüklüğünde kapalı alanın soğutulması, soğutmaya bağlı enerji talebinin boyutunu net bir şekilde göstermektedir [69].

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yapılan projeksiyonlara göre [70], bina sektöründe mekânsal soğutma şimdiden küresel elektrik tüketiminin yaklaşık %10'unu oluşturmaktadır. Eğer etkin enerji verimliliği önlemleri hayata geçirilmezse, bu tüketimin 2050 yılına kadar üç katına çıkması öngörülmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde klima teknolojilerinin hızla yayılması, elektrik şebekeleri üzerinde ekstra yükler ve pik talep artışları oluşturabilir; bu nedenle, soğutmaya yönelik enerji verimliliği politikaları, karbon nötrlüğü ve net-sıfır emisyon hedefleri açısından kritik öneme sahiptir.

Küresel çapta yapılan araştırmalar, konutlarda soğutma talebindeki artışın bölgeler arasında oldukça farklılık gösterdiğini ve bu artışın büyük ölçüde gelir

seviyeleri ile iklim koşullarına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Isaac ve van Vuuren [71] , konutlarda klima kullanımının yaygınlaşmasına dair hazırladıkları ilk küresel projeksiyonlardan birinde, özellikle Asya, Orta Doğu ve Güney Avrupa’da soğutma talebinin yüzyıl ortalarına kadar 6 ila 10 kat artabileceğini öngörmüştür. Daha güncel analizlerde Davis ve Gertler [72], soğutmanın gelecekteki elektrik talebi artışında başlıca belirleyici faktörlerden biri olacağını doğrulamış ve özellikle hızlı kentleşen, yaşam standartları yükselen orta gelirli ülkelerde bu etkinin daha belirgin olacağını vurgulamıştır.

Ampirik veriler, teknolojik verimlilikteki gelişmelerin soğutma talebindeki artışı önemli ölçüde dengeleyebileceğini göstermektedir. Shah ve arkadaşları [73], mevcut en ileri soğutma teknolojilerinin küresel ölçekte kullanılması durumunda, referans teknolojilere kıyasla soğutmaya bağlı elektrik tüketiminin %45’ten fazla azaltılabileceğini ortaya koymuştur. Benzer biçimde McNeil ve çalışma arkadaşları [74], asgari enerji performans standartları (MEPS) ve etiketleme programlarının, Japonya, Avrupa Birliği ve ABD gibi pazarlarda klima cihazlarının ortalama verimlilik seviyelerini yükseltmede kritik bir rol oynadığını göstermiştir.

Çok sayıda çalışma, konutlarda soğutma davranışlarının bölgesel olarak önemli farklılıklar sergilediğini ve özellikle oda bazlı soğutma ile tüm konutun soğutulmasına dayalı stratejiler arasında belirgin ayrımlar bulunduğunu göstermektedir. Akdeniz ülkeleri ve Doğu Asya’da klima sistemleri genellikle konutların belirli alanlarına yoğunlukla oturma ve yatak odalarına yerleştirilmekte ve bu durum kısmi mekânsal soğutma uygulamalarını yaygınlaştırmaktadır. İtalya [75], İspanya [76], Japonya [77], Türkiye [78] ve kentsel Çin’e ilişkin çalışmalar [79,80], soğutmanın ağırlıklı olarak ortak yaşam alanlarına yönlendirildiğini tutarlı şekilde ortaya koymakta ve bunun hem ekonomik faktörlerle hem de kültürel konfor alışkanlıklarıyla ilişkili olduğunu vurgulamaktadır. Buna karşın Amerika Birleşik Devletleri’nde konut soğutması büyük ölçüde merkezi klima sistemleri aracılığıyla sağlanmakta olup, bu sistemler konutların tamamında homojen bir soğutma sunmaktadır. Sailor ve Muñoz [81], ABD’de klima kullanan hanelerin %85–90’ından fazlasının merkezi sistemlere sahip olduğunu ve bunun oda bazlı sistemlere kıyasla çok daha yüksek soğutma yoğunlukları ve elektrik talebine yol açtığını ortaya koymuştur. Bu farklılıklar, temelde iki soğutma yaklaşımına işaret etmektedir: seçici

soğutma ile orta düzey enerji kullanımı sunan dağıtık, ünite temelli yapılar ve tüm konutun soğutulmasına dayalı, yüksek elektrik tüketimi ile karakterize edilen merkezi sistem odaklı yapılar.

Klima sistemlerinin enerji performansı, kısmi yük koşulları, yardımcı enerji tüketimi ve iklimsel değişkenler dikkate alınarak hesaplanan Mevsimsel Performans Katsayısı (Seasonal Coefficient of Performance – SCOP) ile daha doğru bir şekilde değerlendirilmektedir. Standart test koşullarında elde edilen nominal COP değerlerinin aksine, SCOP konutlardaki gerçek elektrik tüketimini daha doğru biçimde yansıtmaktadır. Öte yandan Mevsimsel Enerji Verimlilik Oranı (Seasonal Energy Efficiency Ratio – SEER), ürün karşılaştırmalarında yaygın olarak kullanılsa da gerçek çalışma koşullarını tam anlamıyla temsil edememektedir. Bu nedenle, SCOP Avrupa’da düzenleyici mevzuat ve enerji etiketlemesinde temel gösterge olarak tercih edilirken, SEER esas olarak ABD’de kullanılmaktadır. SCOP temelli politikalar, teknoloji standartları ile elektrik talebi ve karbonsuzlaşma hedefleri arasında doğrudan bir bağlantı kurarak, enerji tüketiminin, pik yüklerin ve CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Avrupa örneğinde, birçok çalışma Ekotasarım (Ecodesign) ve Enerji Etiketleme çerçevesinde uygulanan SCOP temelli düzenlemelerin önemini vurgulamaktadır. Rosenow ve arkadaşları [82] ile González-Torres ve ekibi [83], enerji etiketleme sistemleri ve asgari enerji performans standartlarının, konut tipi klima cihazlarının ortalama verimliliğini önemli ölçüde artırdığını; ayrıca yaşam döngüsü boyunca elektrik tüketimi ve buna bağlı sera gazı emisyonlarının kayda değer biçimde azaldığını göstermiştir. Avrupa Komisyonu’nun 626/2011 sayılı Yetkilendirilmiş Tüzüğü [84] kapsamında, klima cihazları mevsimsel kullanım koşullarındaki verimliliğe göre SCOP değerleriyle sınıflandırılmaktadır. Bu düzenlemeye göre, en yüksek performansı temsil eden A+++ sınıfı ($SCOP \geq 5,10$) ile temel verimlilik düzeyine karşılık gelen A sınıfı ($3,40 \leq SCOP < 4,00$) arasında enerji verimliliği sınıfları tanımlanmaktadır. SCOP temelli bu etiketleme sistemi, mevsimsel performansın standart ve politika açısından anlamlı bir göstergesini sunarak tüketici tercihlerine yön vermekte, düzenleyici tasarımların temelini oluşturmakta ve yüksek verimli soğutma teknolojilerinin sağlayabileceği elektrik tasarrufu ve karbon azaltım potansiyelinin nicel olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Soğutma enerji yoğunluğu genellikle metrekaare veya hane başına kilovat-saat (kWh) cinsinden ifade edilmektedir iklim koşulları, bina özellikleri ve teknolojik yaygınlık düzeyine bağlı olarak ülkeler arasında belirgin farklılıklar göstermektedir. Güney Avrupa'yı konu alan araştırmalar, konutlarda yıllık ortalama soğutma yoğunluğunun 40–80 kWh_{th}/m² aralığında değiştiğini ortaya koymaktadır [85]. Japonya'da ise klima sistemlerinin yaygın olmasına rağmen sıkı verimlilik standartları ve oda bazlı kullanım alışkanlıkları sayesinde benzer düzeylerde orta yoğunluk değerleri gözlenmektedir. Buna karşılık ABD ve Körfez ülkeleri gibi merkezi soğutma sistemlerinin hâkim olduğu bölgelerde, soğutma enerji yoğunluğu çok daha yüksek olup, yıllık 120–200 kWh_{th}/m² seviyelerini sıkça aşmaktadır [86]. Bu yüksek değerler hem yoğun kullanım alışkanlıklarını hem de yüksek soğutma derece-gün (cooling degree days) sayılarını yansıtmaktadır. Literatür, farklı soğutma rejimlerinin uluslararası ölçekte varlığını doğrulamakta ve Akdeniz ülkeleri ile Doğu Asya'nın, düşük yoğunluklu Avrupa ve yüksek yoğunluklu ABD/Körfez örnekleri arasında orta bir konumda yer aldığını göstermektedir.

Konutlarda soğutmanın iklim üzerindeki etkisi, özellikle karbon yoğun elektrik üretimine sahip ülkelerde giderek daha önemli bir politika konusu olarak ele alınmaktadır. Çeşitli çalışmalar, soğutma kaynaklı emisyonların yaz aylarında bina sektörünün toplam emisyonları içinde kayda değer bir paya ulaşabileceğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) [87], Çin'deki mega kentlerde konut tipi soğutmanın mevsimsel elektrik kaynaklı emisyonların %15–20'sine kadar katkı sağladığını tahmin etmiş; benzer oranların sıcak hava dalgaları sırasında Güney Avrupa ülkelerinde de geçerli olduğu bildirilmiştir.

Emisyonların azaltılmasında verimlilik artışları ve yakıtların karbonsuzlaştırılması iki temel yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, birçok çalışma, özellikle elektrik şebekelerinin hâlen yüksek karbon yoğunluğuna sahip olduğu bölgelerde, verimlilik odaklı politikaların kısa ve orta vadede daha hızlı ve öngörülebilir emisyon düşüşleri sağladığını vurgulamaktadır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Türkiye genelinde konutlarda elektrik tüketimi ve klima kullanımına ilişkin verileri elde etmek amacıyla kapsamlı bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Anket, hanehalklarının gerçek kullanım alışkanlıklarını ve konut özelliklerini yansıtacak şekilde altı temel başlıktan oluşmaktadır:

- **Aylık elektrik tüketimi:** Katılımcılar bir yıllık elektrik faturalarını paylaşmış; böylece yaz ve kış aylarındaki farklılıklar temel alınarak soğutmaya bağlı elektrik tüketimi tahmin edilebilmiştir.
- **Klima sahipliği ve ünite sayısı:** Hanelerdeki klima cihazlarının varlığı ve kurulu ünite sayısı belirlenmiştir.
- **Ünite konumu ve soğutulan alan:** Klima cihazlarının hangi odalarda bulunduğu ve soğutulan kapalı alanın büyüklüğü (m^2) kaydedilmiştir.
- **Ayar sıcaklığı (set noktası):** Kullanıcıların işletim sırasında tercih ettikleri iç ortam sıcaklıkları raporlanmış ve her hane için referans iç sıcaklık değerleri elde edilmiştir.
- **Marka ve model bilgisi:** Katılımcılar klima cihazlarının marka ve modellerini belirtmiş; bu bilgiler doğrultusunda 50 farklı sistem için anlık Performans Katsayısı (Coefficient of Performance – COP) ile dış hava sıcaklığı arasındaki ilişkiyi tanımlayan fonksiyonlar geliştirilmiştir. 2024 yılına ait saatlik dış hava sıcaklığı verileri kullanılarak her hane için saatlik COP değerleri hesaplanmış ve sadece dış hava sıcaklığı referans iç sıcaklığın üzerinde olduğunda dört aylık soğutma dönemi (Haziran–Eylül) baz alınarak mevsimsel COP (SCOP) değerleri türetilmiştir.
- **Konutun yapısal özellikleri:** Konut tipi, kat sayısı, konum ve yalıtım durumu gibi bilgiler toplanmış; birim alan başına soğutma hesaplamalarının doğruluğu çapraz kontrol edilmiştir. Uç değerler belirlenerek veri güvenilirliği sağlanmış ve analiz dışında bırakılmıştır.

Hane halkı düzeyindeki elektrik faturaları kullanılarak, her konut için faydalı soğutma çıktısı Q_c hesaplanmıştır:

$$Q_c = E_c \cdot SCOP \quad (4.1)$$

Burada E_c , mekânsal soğutma için kullanılan elektrik tüketimini, SCOP ise kurulu klima ünitesinin mevsimsel ortalama performans katsayısını temsil etmektedir. Elde edilen soğutma enerjisi, daha sonra koşullandırılmış zemin alanı A_c ile normalize edilerek soğutma enerji yoğunluğu hesaplanmıştır:

$$I_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad (4.2)$$

Hanehalkı düzeyinde hesaplanan bu enerji yoğunlukları, klima yaygınlık oranlarıyla ağırlıklandırılmış ortalamalar kullanılarak birleştirilmiş ve il bazında konut tipi soğutma talebini temsil eden değerler (kWh_{th}/m^2) türetilmiştir. Bu yöntem, hem teknolojiye özgü farklılıkları (model bazlı SCOP değerleri aracılığıyla) hem de kullanıcı davranışlarındaki çeşitliliği (ölçülen elektrik tüketimi ve soğutulan alan büyüklükleri üzerinden) aynı anda yansıtmaktadır. Tablo 4.1, anket tasarımı, her aşamada toplanan veri türlerini ve izleyen modelleme süreci ile il düzeyindeki toplulaştırmada kullanılan değişkenleri özetlemektedir.

Tablo 4.1. Anket adımları, toplanan veriler ve çıktılar

Anket Adımları	Toplanan Veriler	Çıktı / Hesaplama
1	Aylık Elektrik Faturaları	Hane Başına Soğutma Elektrik Tüketimi
2	Klima Sayısı	Hanelerdeki Klima Stoku, İl Bazında Klima Stoku
3	Cihaz Konumu ve Soğutulan Alan	Metrekare Başına Soğutma, İl Ortalaması
4	Hedef Sıcaklık	COP hesaplamaları için referans iç mekan sıcaklığı
5	Marka & Model	Saatlik COP fonksiyonları → Hane Başına Mevsimsel COP
6	Konut Özellikleri	Metrekare Başına Soğutmanın Çapraz Doğrulaması; Aykırı Değerlerin Çıkarılması
Tüm	Klima Modelleri ve Dağılımı	Metrekare Başına ve Toplam Kurulu Soğutma Kapasitesi; Şebeke Yüğü Tahmini
İklim Verileri	Saatlik Dış Hava Sıcaklığı	Saatlik ve Mevsimsel COP; PLR Hesaplaması

İl ve ulusal düzeylerde, klima modellerinin dağılımı ve bunlara karşılık gelen pazar payları kullanılarak, birim koşullandırılmış alan başına kurulu soğutma kapasitesi (kW_e/m^2) hesaplanmıştır. Bu değer, her klima modelinin nominal elektrik

giriş gücünün yaygınlık oranı ile ağırlıklandırılması ve ilgili soğutulan alan büyüklüğüne bölünmesi yoluyla elde edilmiş; il bazında ve ulusal ölçekte ortalama kapasite yoğunlukları türetilmiştir. Elde edilen bu değerler, Türkiye genelindeki toplam konut tipi kurulu soğutma kapasitesinin tahmin edilmesinde kullanılmış olup, mekânsal soğutmaya atfedilen ortalama ve pik elektrik talebinin belirlenmesinde temel bir gösterge niteliği taşımaktadır.

Klima sistemlerinin gerçek iklim koşullarındaki işletim davranışlarını yansıtabilmek için, il düzeyindeki dış hava sıcaklığı dağılımlarına dayalı olarak Ulusal Ortalama Kısmi Yük Oranı (Part-Load Ratio – PLR) hesaplanmıştır. Her sıcaklık aralığı için tasarım soğutma kapasitesine göre yükler belirlenmiş ve buna karşılık gelen kısmi yük çalışma noktaları tanımlanmıştır. PLR, daha sonra tüm sıcaklık aralıkları ve iller genelinde gerçek soğutma çıktısının nominal kapasiteye oranının yüklerle ağırlıklandırılmış ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Anket tabanlı hanehalkı elektrik tüketim verilerinin, marka ve modele özgü Mevsimsel Performans Katsayıları (SCOP) ve kurulu kapasite yoğunlukları ile birleştirilmesi sayesinde, konut tipi soğutma talebi, elektrik tüketimi ve şebeke üzerindeki etkiler mekânsal olarak ayrıntılı biçimde, aşağıdan yukarıya (bottom-up) bir yaklaşımla tahmin edilebilmektedir. Mikro veri toplama ve iklimsel karakterizasyon aşamalarından başlayarak, soğutma yükü modellemesi, il düzeyinde toplulaştırma ve ulusal şebeke ölçeğinde talep tahminine kadar uzanan tüm hesaplama süreci Şekil 4.1’de şematik olarak sunulmaktadır.



Şekil 4.1. Yöntemsel iş akışı

Bu çalışmada, havadan-havaya ısı pompalarının COP değerlerini karşılaştırmak amacıyla piyasada yaygın olarak bulunan 50 farklı ısı pompası ünitesi incelenmiştir. Isı pompası ünitelerinin farklı dış ortam sıcaklıklarındaki EER değerleri, üretici katalogları ve açık kaynaklardan elde edilen veriler kullanılarak belirlenmiştir.

İncelenen 50 adet ısı pompası hava-hava kaynaklı olduğu için dış ortam sıcaklığı performanslarını etkileyen en önemli etkidir. Katalog verilerinde soğutma sezonu için sıcaklık aralıkları 20-38 °C arasındadır. İncelenen ısı pompaları elektrik motoru tahrikli, kompresörden tahrik gücünü alan buhar sıkıştırırmalı cihazlardır. Bu ısı pompası cihazları, değişken yük şartlarında çalışan inverter kontrollü çok sayıda iç üniteye sahiptirler. Kısmi yük verimleri tam yük veriminden daha yüksektir. Bunun temelinde yatan sebebi ise kısmi yükteyken kompresörün daha az basınç oranlarında ve uygun termodinamik şartlarda çalışmasını sürdürmesidir. Basınç oranı azaldığında COP artmaktadır. Aynı kapasite başına ihtiyaç olan kompresörün işinde azalma olmaktadır. Dış hava sıcaklığının azalması durumunda birim elektrik tüketimi başına oluşan soğutmada artış meydana gelir [88].

Katalog verilerinden yararlanılarak, çalışmada daha geniş bir dış ortam sıcaklık aralığı göz önünde bulundurulmuş ve 18–38 °C arasındaki COP değerleri analiz edilmiştir. Her bir ısı pompası ünitesi için, kataloglarda belirtilen dış hava sıcaklığı–COP ilişkisi temel alınarak matematiksel bağıntılar geliştirilmiştir. Modelleme sürecinde, COP ile dış hava sıcaklığı arasındaki ilişkiyi en doğru şekilde temsil eden Hoerl modeli tercih edilmiştir.

$$COP = a \cdot b^T \cdot T^c \quad (4.3)$$

Eşitlik (4.3)'de yer alan a , b ve c model katsayılarını, $T(^{\circ}\text{C})$ ise dış hava sıcaklığını ifade etmektedir.

Modelleme sürecinde kullanılan eşitlik (4.3)'de yer alan a , b ve c katsayıları ısı pompası ünitelerine göre değişiklik göstermektedir. Her bir ısı pompası ünitesi için verilen değerler tablo şeklinde verilmiştir.

Tablo 4.2. Ünitelere ait a, b ve c katsayıları

Ünite Adı	Katsayılar		
	a	b	c
Ünite 50	104,208	0,885	0,237
Ünite 49	13613,82	0,945	-1,816
Ünite 48	15312,2	0,948	-1,876
Ünite 47	31819611,7	1,071	-5,252
Ünite 46	28129242,32	1,044	-5,028
Ünite 45	266,992	0,905	-0,241
Ünite 44	4582,065	0,940	-1,446
Ünite 43	47799,705	0,973	-2,447
Ünite 42	595403,28	0,993	-3,440
Ünite 41	0,013	0,756	4,192
Ünite 40	0,002	0,733	4,975
Ünite 39	1,14E-05	0,685	7,133
Ünite 38	4,443	0,822	1,734
Ünite 37	0,771	0,817	2,300
Ünite 36	29,862	0,880	0,579
Ünite 35	0,006	0,763	4,370
Ünite 34	63,306	0,876	0,394
Ünite 33	0,178	0,813	2,802
Ünite 32	2,130	0,813	2,022
Ünite 31	2,005	0,844	1,770
Ünite 30	0,909	0,798	2,440
Ünite 29	79,873	0,891	0,210
Ünite 28	1,14E-05	0,685	7,133
Ünite 27	0,055	0,809	3,189
Ünite 26	5,139	0,861	1,357
Ünite 25	274,294	0,890	-0,194
Ünite 24	40,478	0,904	0,307
Ünite 23	14,113	0,861	0,996
Ünite 22	0,936	0,811	2,317
Ünite 21	0,025	0,779	3,747
Ünite 20	0,001	0,737	5,103
Ünite 19	0,015	0,765	4,022
Ünite 18	0,000786	0,743	5,177
Ünite 17	1,14E-05	0,685	7,133
Ünite 16	0,002	0,738	4,928
Ünite 15	0,033	0,758	3,885
Ünite 14	0,428	0,784	2,846
Ünite 13	0,223	0,826	2,643
Ünite 12	1338,01	0,935	-1,083
Ünite 11	301,646	0,926	-0,558
Ünite 10	2312,685	0,939	-1,294
Ünite 9	1,496	0,822	2,084
Ünite 8	0,435	0,810	2,567
Ünite 7	0,309	0,828	2,509
Ünite 6	13,749	0,848	1,158
Ünite 5	4,106	0,838	1,622
Ünite 4	0,629	0,831	2,272
Ünite 3	21,631	0,858	0,975
Ünite 2	123,222	0,861	0,390
Ünite 1	11769885,11	1,034	-4,641

SCOP (mevsimsel performans katsayısı) değerleri belli bir değere göre minimum ve maksimum SCOP olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada minimum

SCOP değeri cihaz COP değerinin 4'ün altında olması iken maksimum SCOP değeri ise COP'nin 4'ün üzerinde olması olarak tanımlanmıştır.

Türkiye'de hava-hava kaynaklı ısı pompası soğutması sonucu bulduğumuz COP fonksiyonuna göre sıcaklık değer aralıklarının COP değerlerine göre dağılımı verilmiştir.

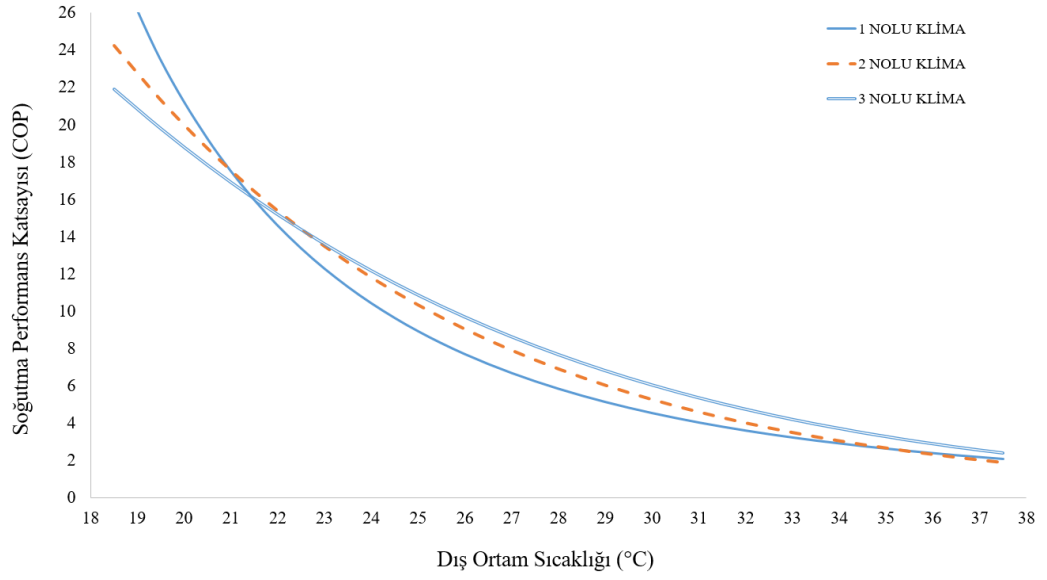
Tablo 4.3. Soğutma sezonu sıcaklık dağılımı ve COP'ye göre bölgeler
[89-93]

	Çok Serin	Ilıman	Orta Sıcak	Sıcak	Çok Sıcak
COP	9.0–10.5	7.5–9.0	6.0–7.5	5.0–6.0	3.5–5.0
Ortalama Sıcaklık	21–24 °C	24–27 °C	27–30 °C	29–32 °C	31–35 °C
Bölgeler	Doğu Karadeniz kıyıları, Batı Karadeniz kıyıları	Marmara kuzeyi, Orta Karadeniz, yüksek rakımlı Doğu Anadolu	İç Anadolu, İç Ege, Doğu Anadolu orta rakım	Ege kıyıları, Akdeniz kıyıları, Güney Marmara sıcak kesimleri	Güneydoğu Anadolu ovaları

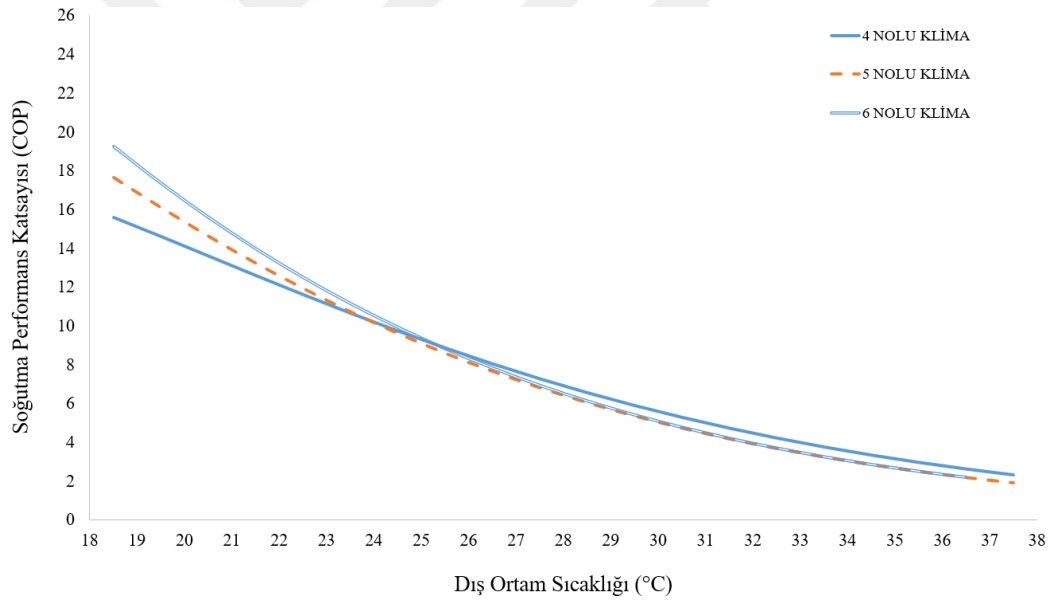
Soğutma sezonunda gerçekleştirilen hava-hava kaynaklı ısı pompası soğutması sonucunda Türkiye'deki şehirler için 4 aylık en yüksek ortalama SCOP değerleri tablo şeklinde aşağıda verilmiştir. İncelediğimiz 50 ısı pompasından en iyi performans sergileyen cihazlardan ünite 3, ünite 24, ünite 45 ve ünite 50 temel alınarak hangi ısı pompası hangi şehrin iklimsel özelliğine daha uygun olacak şekilde yüksek verim gösterecekse o şekilde tabloya yerleştirilmiştir.

Tablo 4.4. İllere göre en yüksek COP değerleri sağlayan ısı pompası üniteleri

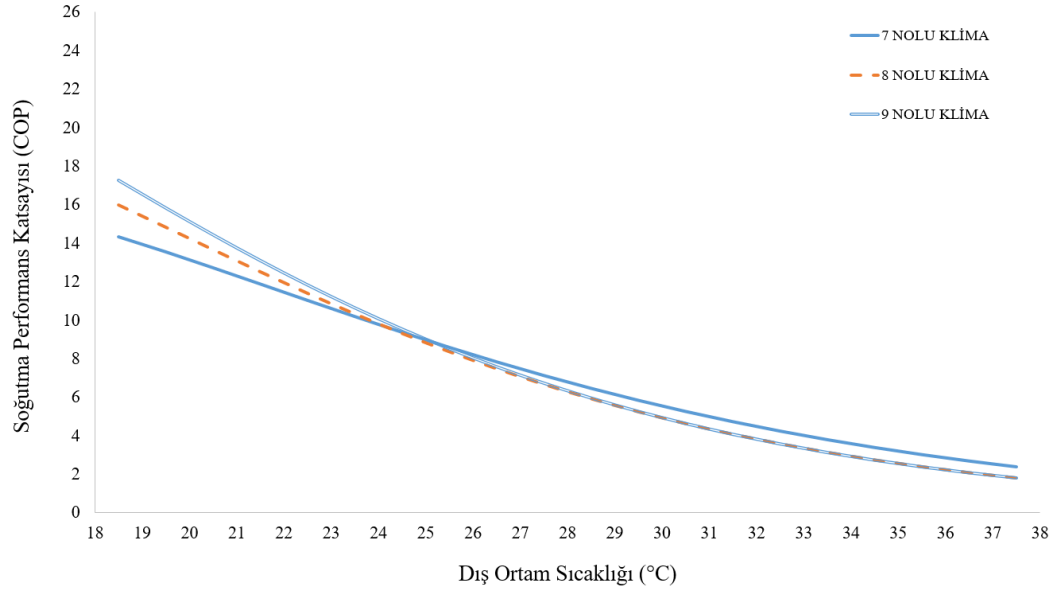
İller	Ünite Adı	İller	Ünite Adı
Ardahan	Ünite 3	Hakkâri	Ünite 24
Zonguldak	Ünite 3	Kayseri	Ünite 50
Sinop	Ünite 3	Uşak	Ünite 50
Giresun	Ünite 3	Aksaray	Ünite 3
Kars	Ünite 3	Kırklareli	Ünite 3
Samsun	Ünite 3	Çankırı	Ünite 50
Rize	Ünite 3	Karaman	Ünite 50
Trabzon	Ünite 3	Balıkesir	Ünite 50
Artvin	Ünite 3	Erzincan	Ünite 3
Ordu	Ünite 3	Amasya	Ünite 3
Erzurum	Ünite 3	Bursa	Ünite 3
Bayburt	Ünite 3	Kırıkkale	Ünite 50
Tekirdağ	Ünite 3	Burdur	Ünite 50
Yozgat	Ünite 50	Edirne	Ünite 3
Van	Ünite 3	Niğde	Ünite 50
Bolu	Ünite 3	Muş	Ünite 50
Bartın	Ünite 3	Iğdır	Ünite 50
Kastamonu	Ünite 3	Hatay	Ünite 50
Karabük	Ünite 3	Mersin	Ünite 50
Yalova	Ünite 3	Muğla	Ünite 50
İstanbul	Ünite 3	Malatya	Ünite 50
Gümüşhane	Ünite 3	Elazığ	Ünite 50
Sivas	Ünite 50	Bingöl	Ünite 50
Nevşehir	Ünite 50	İzmir	Ünite 50
Kütahya	Ünite 50	Denizli	Ünite 50
Düzce	Ünite 3	Tunceli	Ünite 50
Bilecik	Ünite 50	Osmaniye	Ünite 50
Ağrı	Ünite 3	Manisa	Ünite 50
Çorum	Ünite 3	Şırnak	Ünite 24
Afyon	Ünite 50	Antalya	Ünite 50
Sakarya	Ünite 3	Adana	Ünite 50
Eskişehir	Ünite 50	Gaziantep	Ünite 50
Tokat	Ünite 3	Kahramanmaraş	Ünite 50
Kocaeli	Ünite 3	Aydın	Ünite 50
Kırşehir	Ünite 50	Kilis	Ünite 45
Ankara	Ünite 50	Mardin	Ünite 45
Çanakkale	Ünite 50	Siirt	Ünite 45
Bitlis	Ünite 3	Adıyaman	Ünite 45
Isparta	Ünite 50	Diyarbakır	Ünite 45
Konya	Ünite 50	Batman	Ünite 24
		Şanlıurfa	Ünite 24



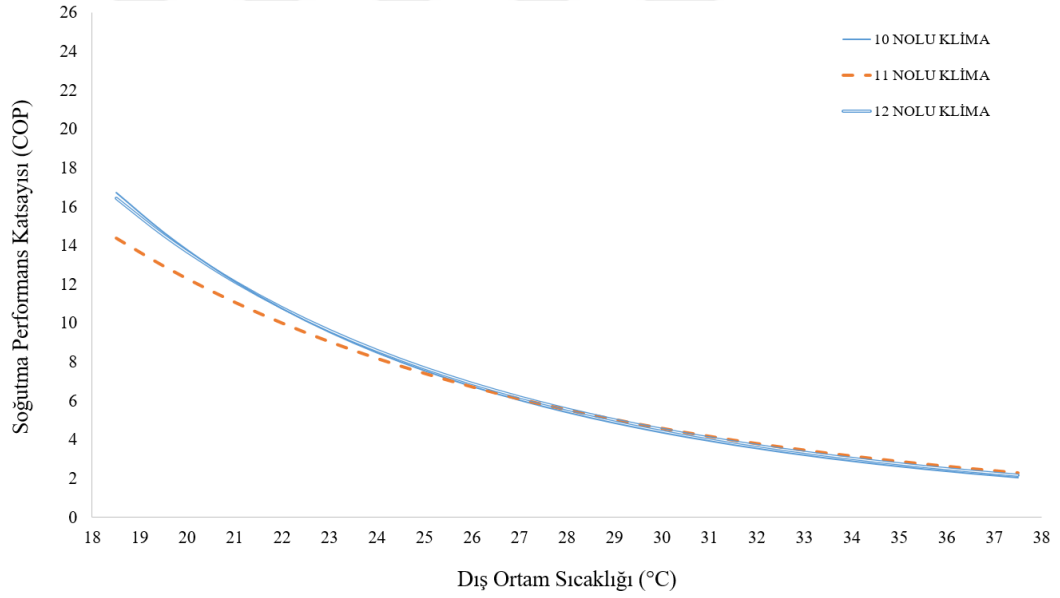
Şekil 4.2. Dış hava sıcaklığına bağlı 1, 2 ve 3 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



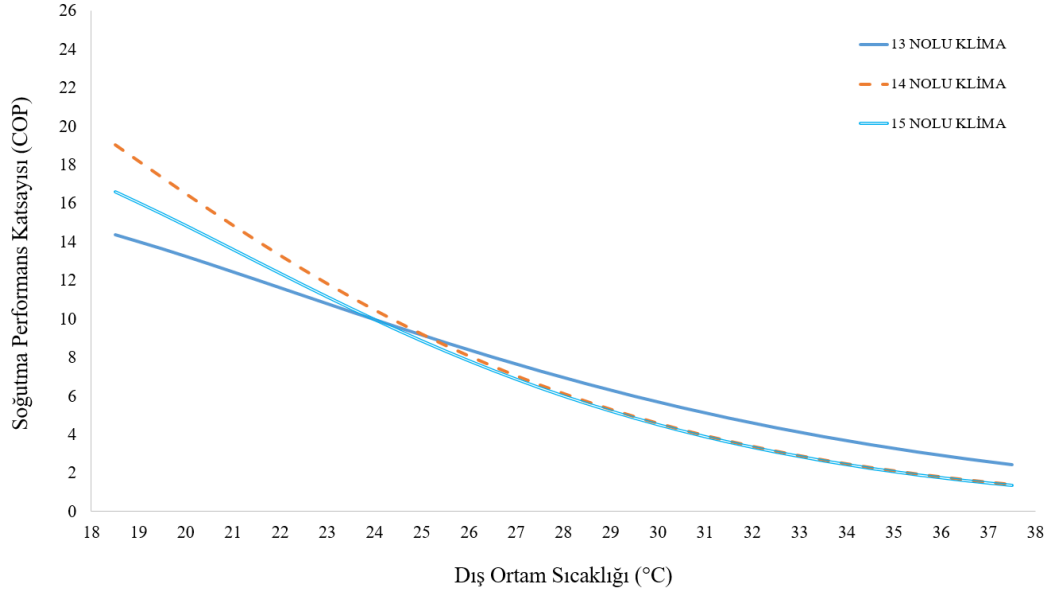
Şekil 4.3. Dış hava sıcaklığına bağlı 4, 5 ve 6 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



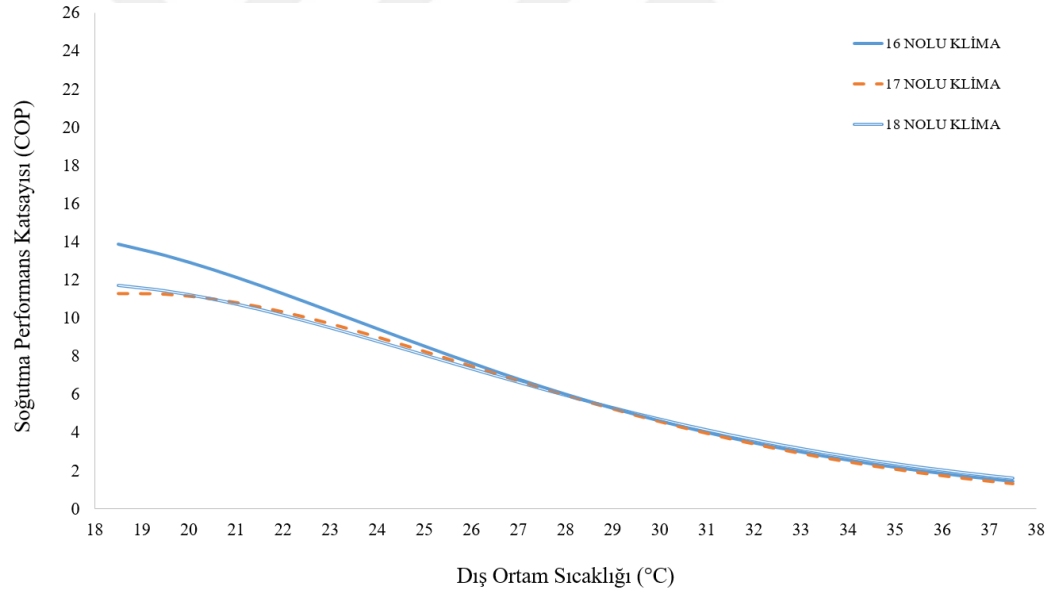
Şekil 4.4. Dış hava sıcaklığına bağlı 7, 8 ve 9 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



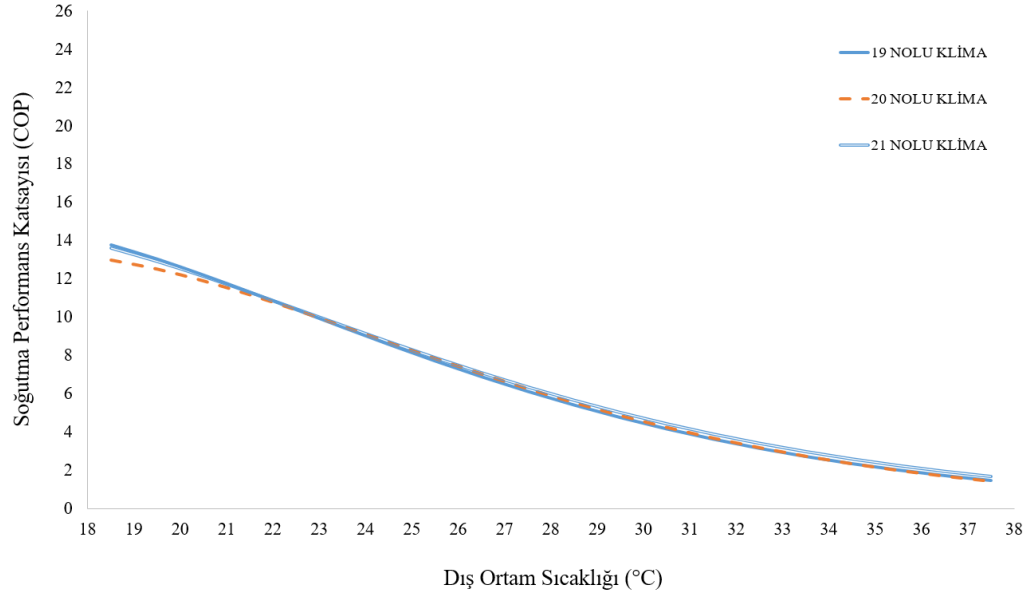
Şekil 4.5. Dış hava sıcaklığına bağlı 10, 11 ve 12 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



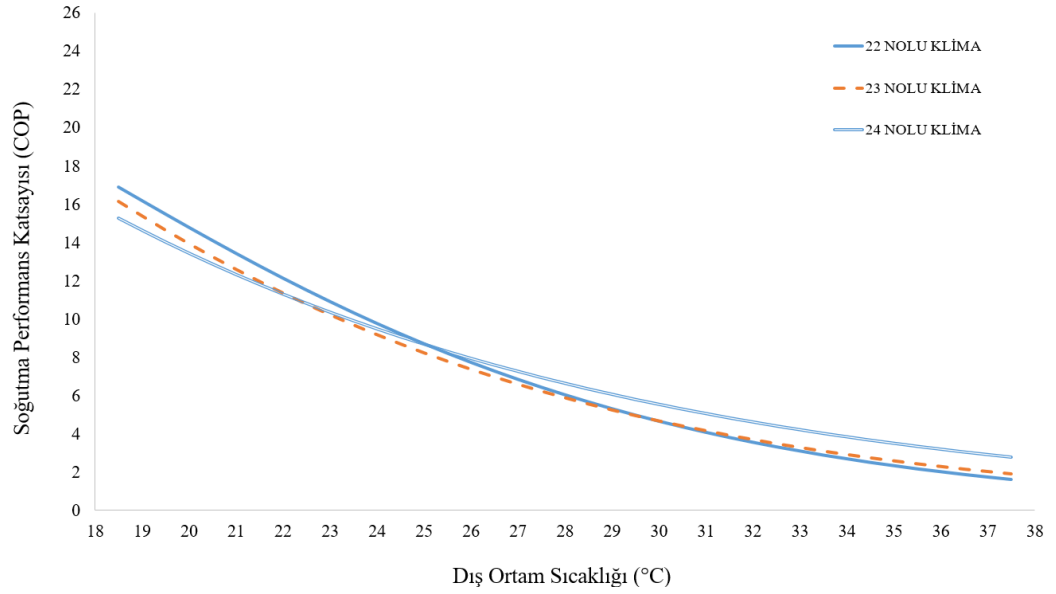
Şekil 4.6. Dış hava sıcaklığına bağlı 13, 14 ve 15 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



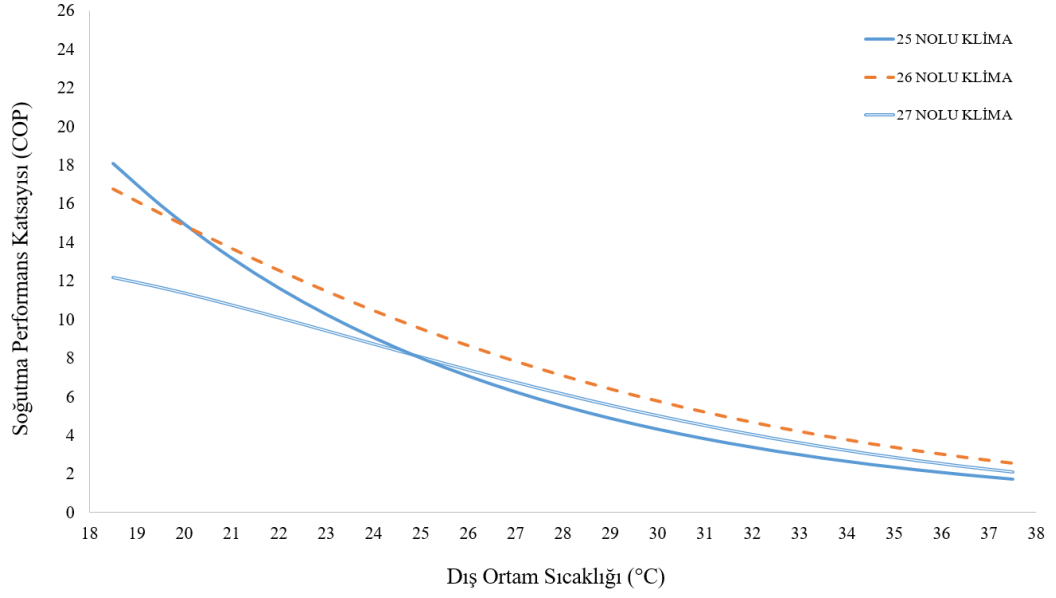
Şekil 4.7. Dış hava sıcaklığına bağlı 16, 17 ve 18 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



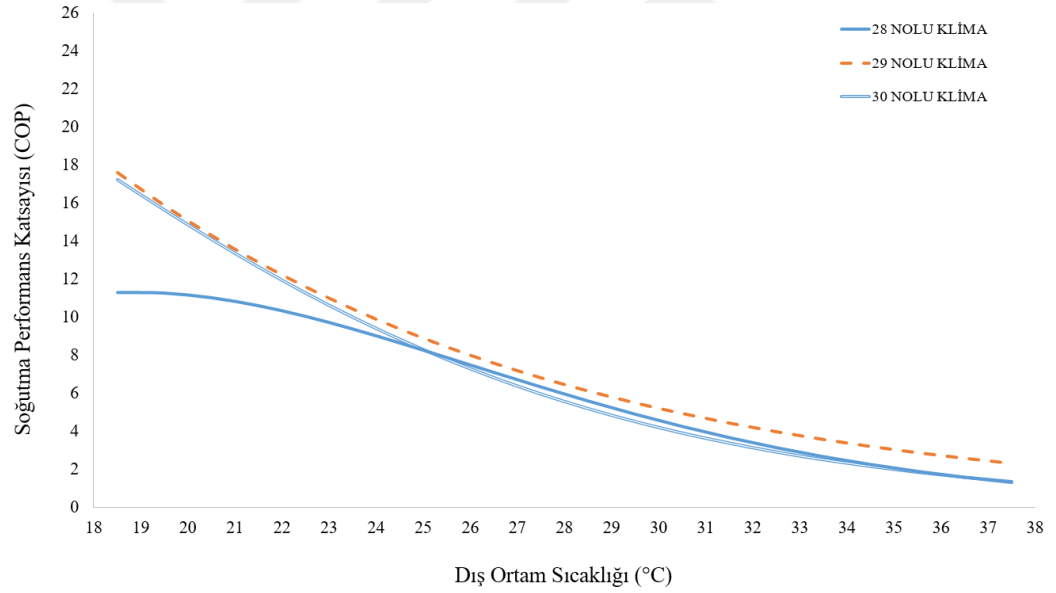
Şekil 4.8. Dış hava sıcaklığına bağlı 19, 20 ve 21 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



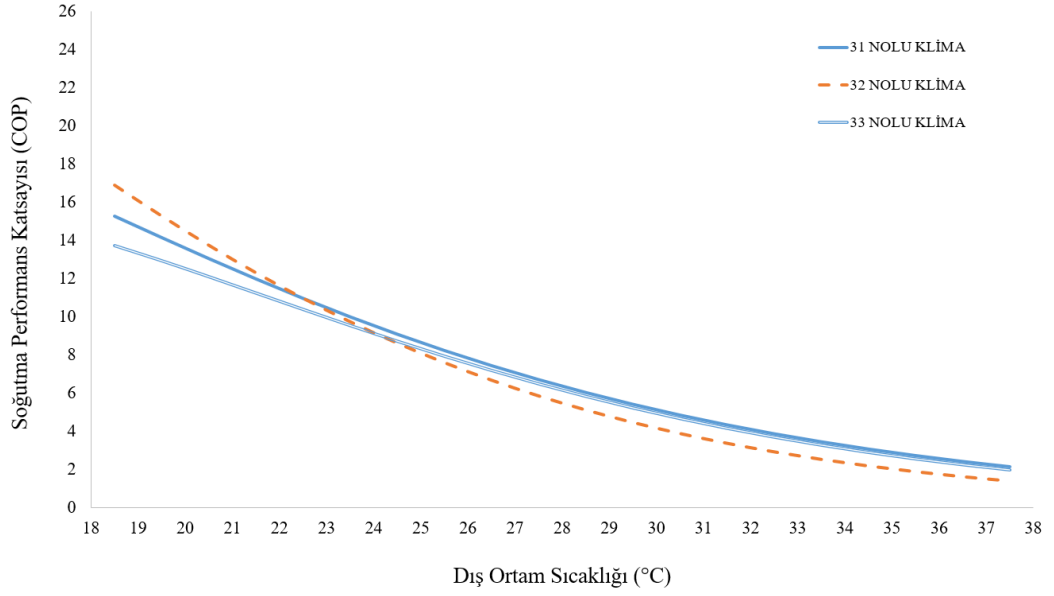
Şekil 4.9. Dış hava sıcaklığına bağlı 22, 23 ve 24 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



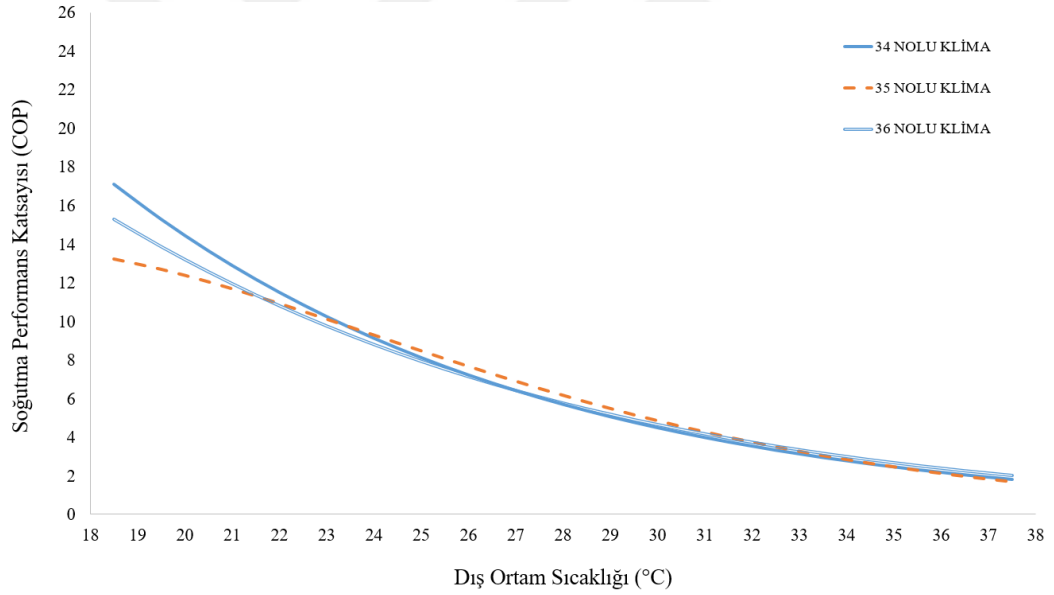
Şekil 4.10. Dış hava sıcaklığına bağlı 25, 26 ve 27 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



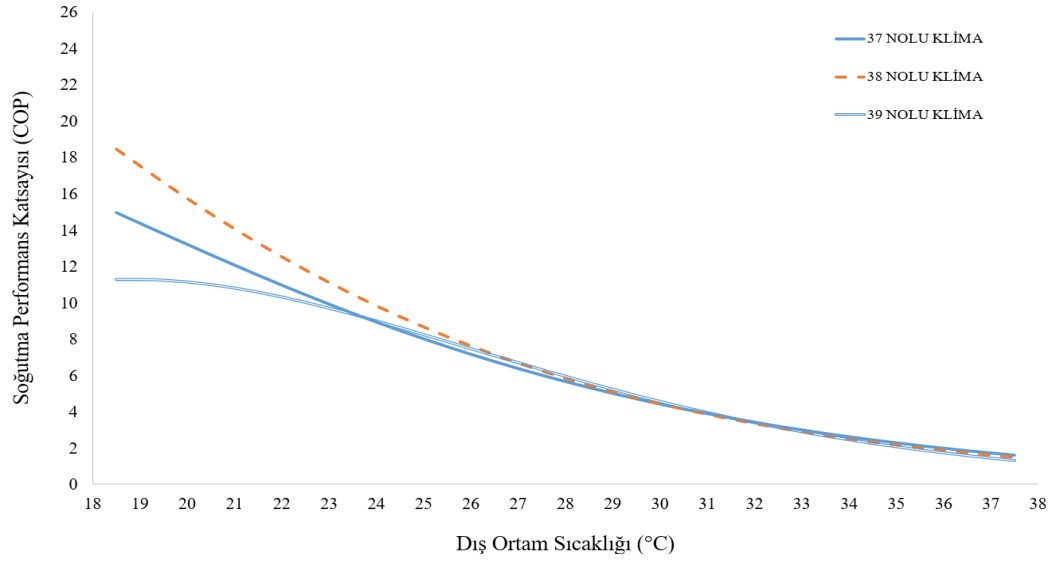
Şekil 4.11. Dış hava sıcaklığına bağlı 28, 29 ve 30 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



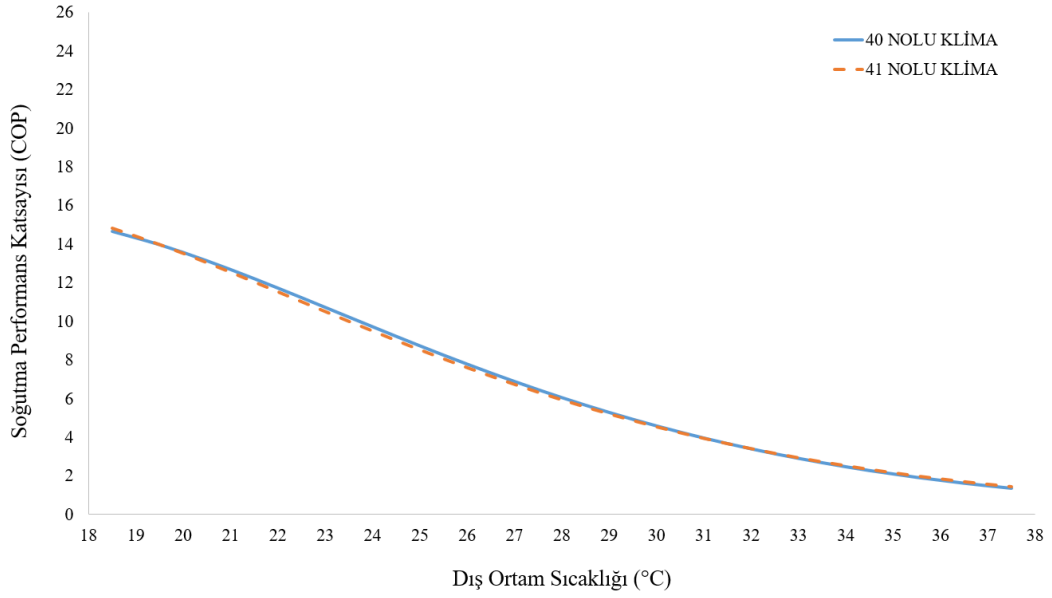
Şekil 4.12. Dış hava sıcaklığına bağlı 31, 32 ve 33 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



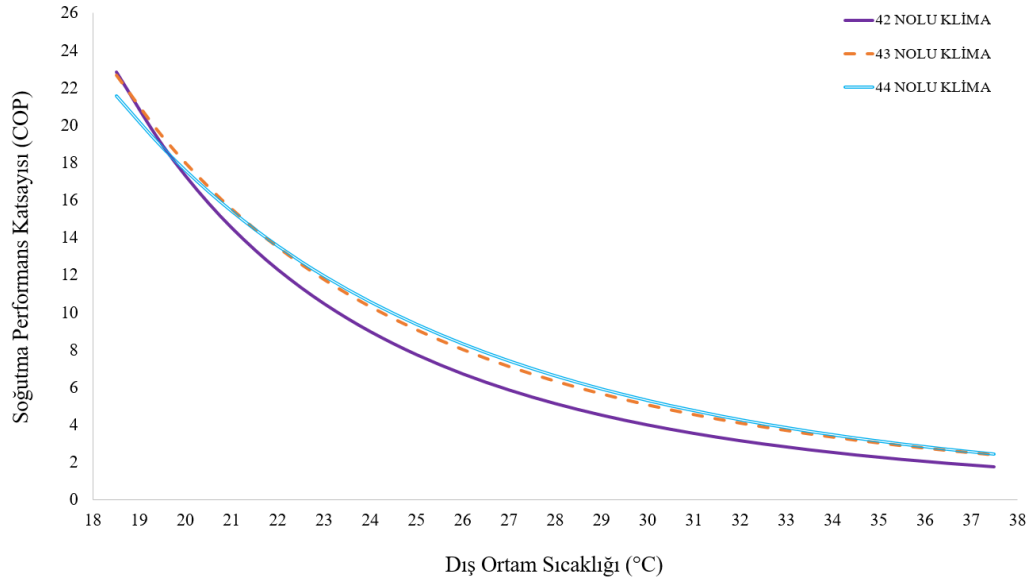
Şekil 4.13. Dış hava sıcaklığına bağlı 34, 35 ve 36 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



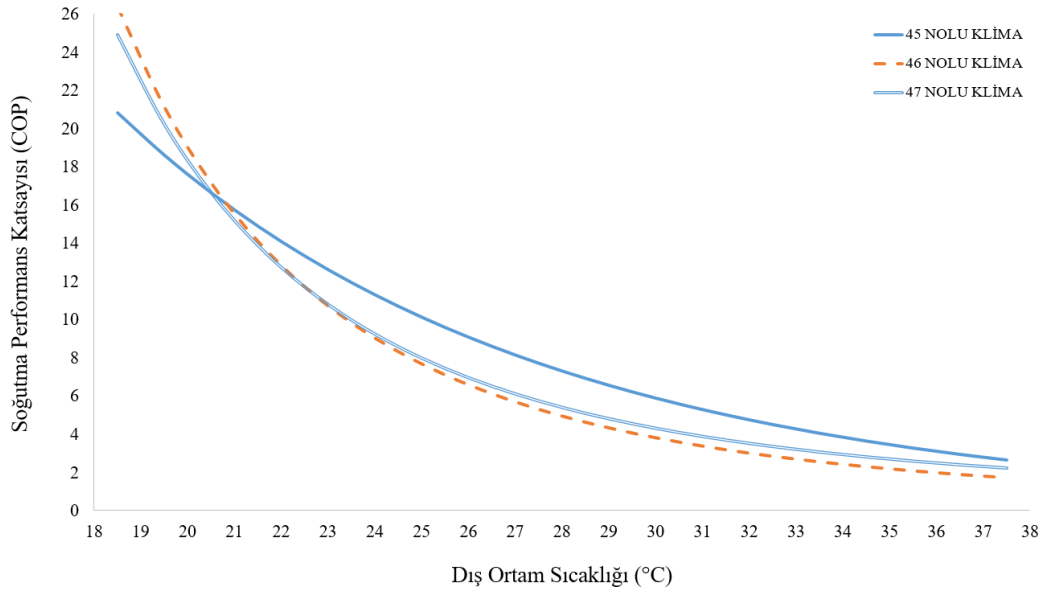
Şekil 4.14. Dış hava sıcaklığına bağlı 37, 38 ve 39 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



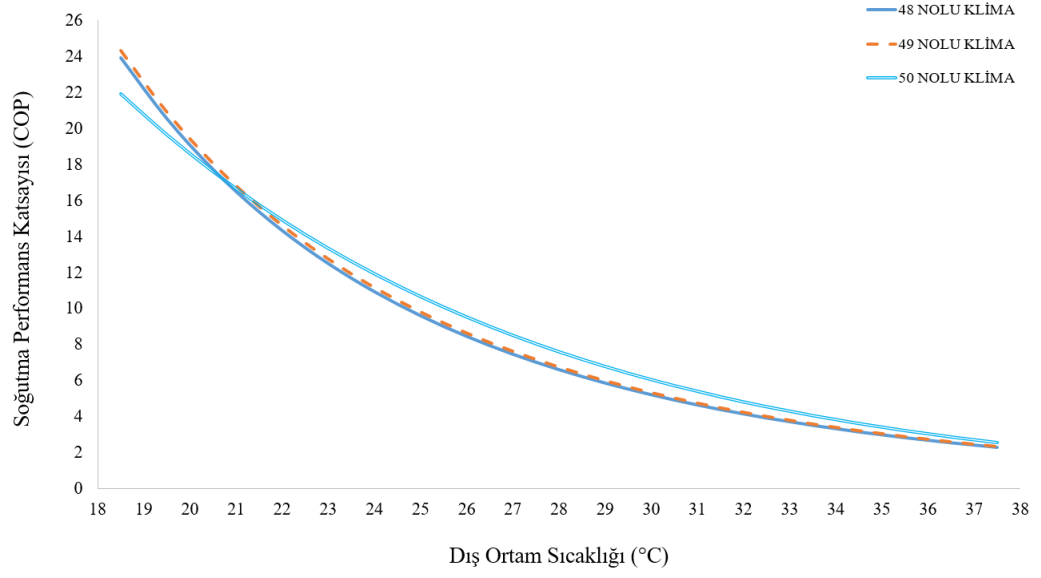
Şekil 4.15. Dış hava sıcaklığına bağlı 40 ve 41 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



Şekil 4.16. Dış hava sıcaklığına bağlı 42, 43 ve 44 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



Şekil 4.17. Dış hava sıcaklığına bağlı 45, 46 ve 47 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları



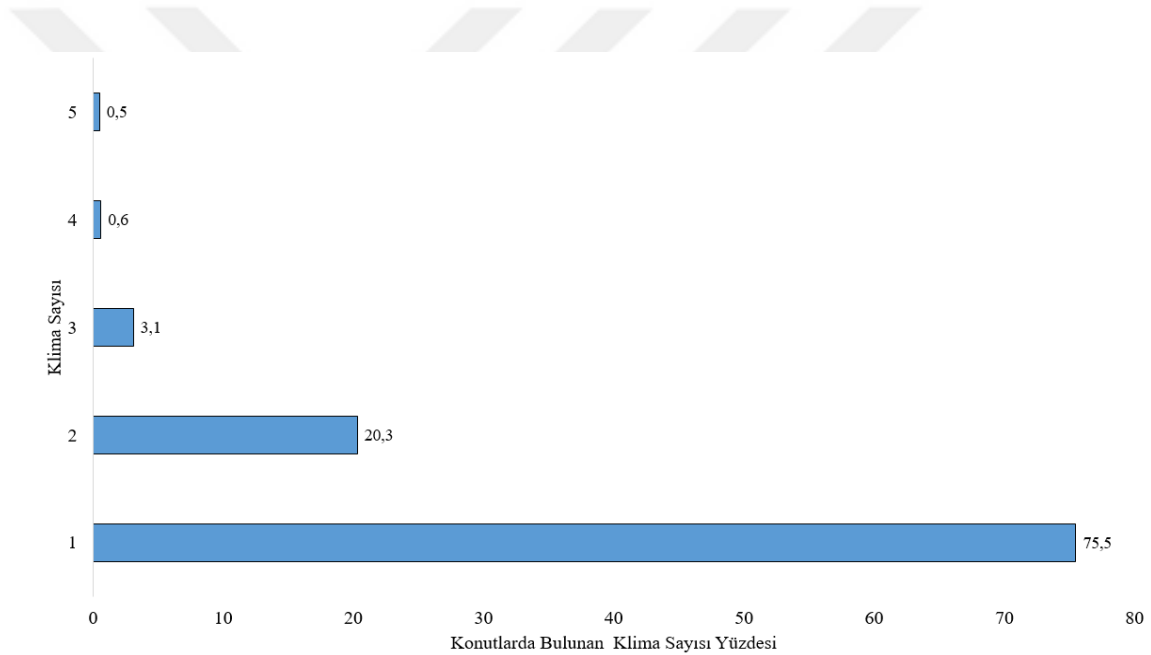
Şekil 4.18. Dış hava sıcaklığına bağlı 48, 49 ve 50 numaralı üniteler için COP değişim fonksiyonları

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Araştırma Bulguları

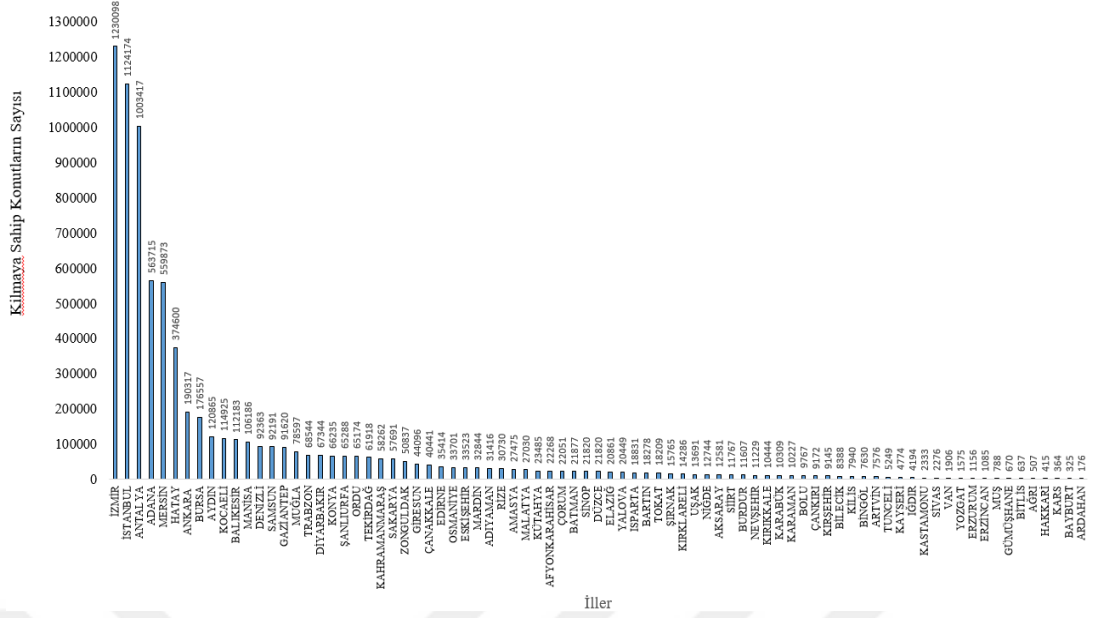
5.1.1. Konutlarda Klima Stoku ve Yaygınlık Oranı

Anket sonuçları, Türkiye’de konut tipi klima kullanımının düzenli bir şekilde arttığını ve tek üniteli sahipliğin hâlen en yaygın durum olduğunu göstermektedir. Klima bulunan konutların yaklaşık %75,5’inde yalnızca bir adet cihaz bulunurken, %24,5’inde iki veya daha fazla klima ünitesi mevcuttur (Şekil 5.1). Bu dağılıma bağlı olarak, klima bulunan haneler için konut başına ortalama klima sayısı 1,303 adet olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.1. Konut başına düşen klima sayısının yüzdelik dağılımı

2024 yılı verilerine göre, Türkiye’deki konutların yaklaşık %24,56’sında klima cihazı bulunmaktadır. Klima bulunan hanelerde konut başına ortalama 1,303 adet cihazın işletildiği göz önüne alındığında, ekipman düzeyindeki etkin yaygınlık oranı yaklaşık %32’ye yükselmektedir. Türkiye’nin büyük ölçüde kentsel yerleşim yapısına sahip olmasıyla uyumlu olarak, mevcut konut tipi klima stoku ülke genelinde yaklaşık her 12,4 kişiye bir ünite düşecek biçimde dağılmaktadır.

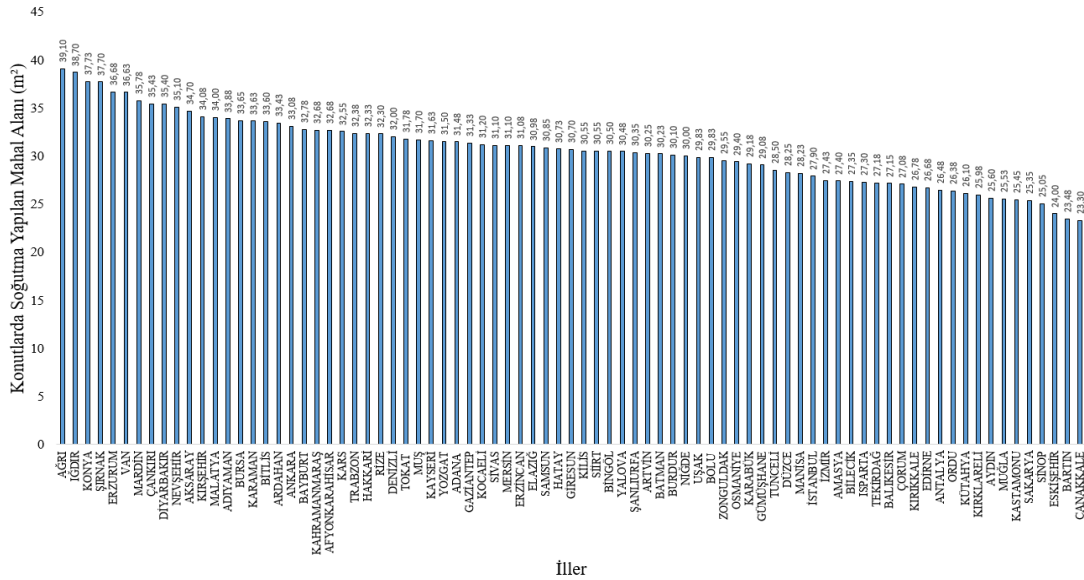


Şekil 5.2. Türkiye’de illere göre klimalı konutların öngörülen sayısı

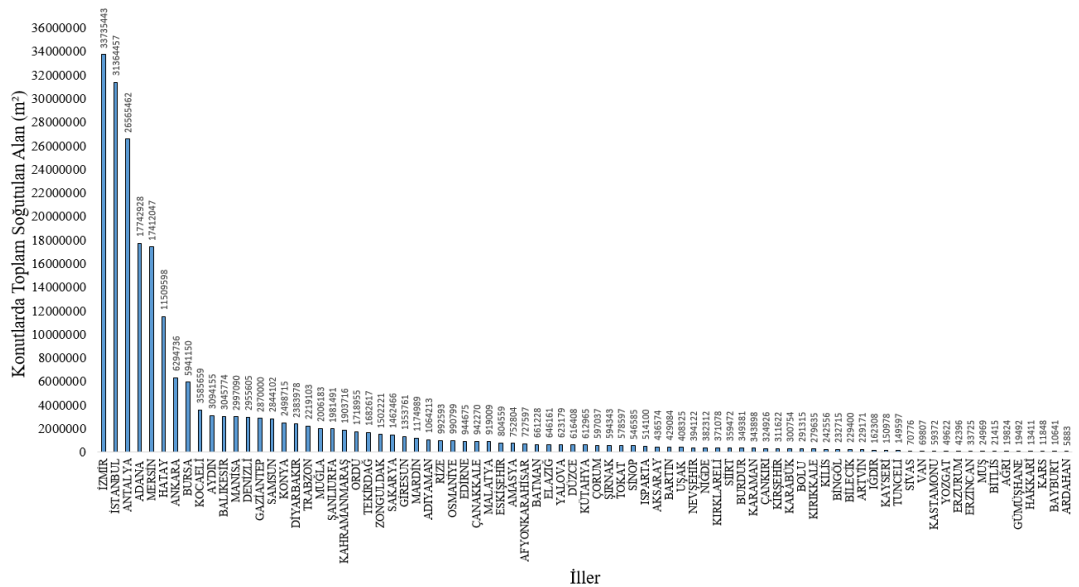
Klima bulunan konutların il bazındaki dağılımı Şekil 5.2’de gösterilmektedir. İzmir, tahmini 1.230.098 adet ünite ile en büyük stok büyüklüğüne sahip il konumundadır. En yüksek paya sahip ilk beş il İzmir, İstanbul, Antalya, Adana ve Mersin toplam konut tipi klima stokunun %60,7’sini oluştururken, ilk on il ulusal toplamın %73,94’ünü temsil etmektedir.

5.1.2. Soğutulan Alan Büyüklüğü ve Alan Başına Soğutma Gereksinimi

Modelleme bulguları, Türkiye’de konutlara ait toplam kapalı alanın yalnızca yaklaşık %5,97’sinin aktif soğutmaya tabi tutulduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, klima bulunan hanelerde dahi konutların büyük bölümünün koşullandırılmadığını ve soğutmanın genellikle sınırlı mekânlarla kısıtlı kaldığını göstermektedir. İl bazında ortalama soğutulan alan büyüklüğü 23,3 m² ile 39,1 m² arasında değişmekte olup (Şekil 5.3), ülke genelinde klima bulunan bir konut için ortalama değer yaklaşık 30,6 m² olarak hesaplanmıştır. İzmir özelinde ise bu büyüklük görece daha düşük seviyede, 27,43 m² civarındadır. Konut başına ortalama 1,303 adet klima ünitesinin bulunduğu dikkate alındığında, ünite başına düşen soğutulan alan yaklaşık 23,5 m² olmaktadır. Bu sonuçlar, Türkiye’de konut tipi klima kullanımının çoğunlukla tüm konutun iklimlendirilmesine değil, belirli yaşam alanlarının soğutulmasına yönelik olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.



Türkiye genelinde iklimlendirilen konut alanının toplam büyüklüğü yaklaşık 214,8 km² olarak hesaplanmış olup, bunun yaklaşık 33,7 km²'lik kısmı İzmir ili sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 5.4). Bu alan büyüklükleri esas alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, ülke çapındaki yıllık konut tipi soğutma gereksinimi yaklaşık 12,98 TWh_{th} düzeyine ulaşmaktadır. İzmir özelinde değerlendirildiğinde ise yıllık toplam soğutma talebinin yaklaşık 2,19 TWh_{th} olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.5).



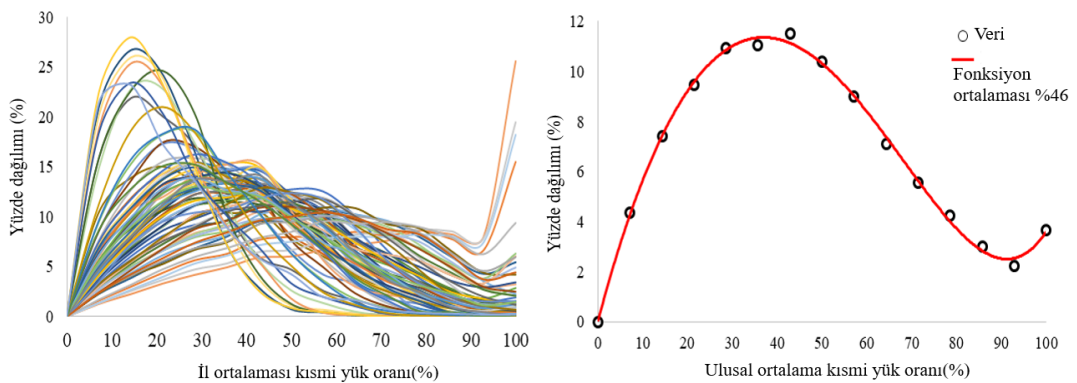
5.1.3. Mevsimsel Performans Katsayısı ve Elektrik Kullanımı

Bu bölümde, Türkiye’deki konut tipi klima sistemlerinin mevsimsel performans katsayısı (SCOP), hane halkı düzeyinde elde edilen marka ve model bilgileri ile saatlik dış hava sıcaklığı verilerinin birleştirilmesi yoluyla analiz edilmektedir. Konutlarda soğutma amacıyla kullanılan toplam yıllık elektrik tüketimi yaklaşık 4.295 GWh_e/yıl olarak hesaplanmış olup, bu değer mevcut klima stokunun ulusal ortalama SCOP’inin 3,02 olduğunu göstermektedir.

Birim alan başına yıllık ortalama elektrik tüketimi 19 kWh_e/m² olarak belirlenirken, hane halkı başına düşen ortalama soğutma elektrik tüketimi yaklaşık 581,8 kWh_e/yıl seviyesindedir. Ulusal ölçekli çalışmalar ve karşılaştırmalar için, mevcut konut tipi klima stokunun performansını temsil eden referans SCOP değeri 3,02 olarak kabul edilmiştir.

5.1.4. Kurulu Kapasite ve Ortalama Kısmi Yük Oranları

Türkiye’de konutlarda gerçekleştirilen mekânsal soğutma faaliyetleri, toplam bina elektrik tüketiminin yaklaşık %13,7’sini oluşturmaktadır. Ortalama kurulu güç yoğunluğu 92,7 W_e/m² olarak dikkate alındığında, ülke genelindeki toplam konut tipi kurulu soğutma kapasitesinin yaklaşık 19,9 GW_e düzeyinde olduğu tahmin edilmektedir. Şekil 5.7, konut tipi klima sistemlerinin il bazındaki dağılımını ve ulusal ölçekte ortalama kısmi yük oranlarını görsel olarak sunmaktadır.



En Düşük COP Değerlerine Sahip Sistemlerin Elektriksel Tüketimi
(kWh/Sezon)

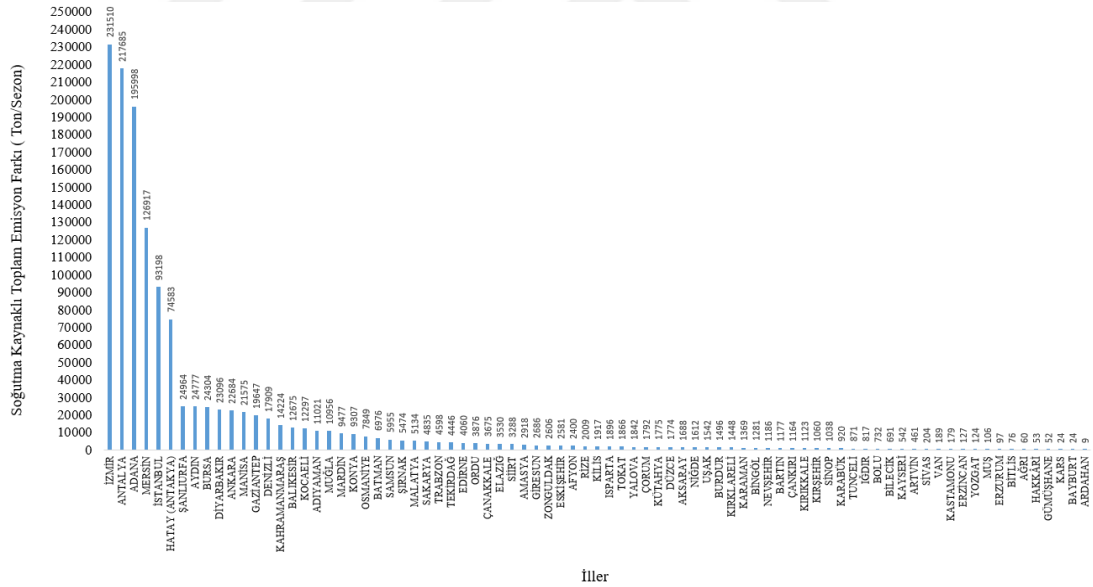
Sistem	Elektriksel Tüketim (kWh/Sezon)
SANLIURFA	1235.04
ADITYAMAN	1078.03
DIYARBAKIR	1055.98
BAKIRLAZAR	1002.44
ŞİRNAK	981.52
ŞİRNAK	956.11
SİRT	832.77
MARDIN	824.35
KAHRAMANMARAŞ	678.37
KİLİS	677.39
OSMANIYE	635.84
ANTALYA	598.09
ŞANLIURFA	596.92
GAZİANTEP	594.63
AYDIN	577.50
MANİSA	559.45
DEZİLİ	520.82
ANTALYA	519.42
GAZİANTEP	507.34
MALATYA	505.52
İZMİR	496.52
ELAZIR	490.02
TUNCELİ	489.21
BİNGÖL	447.86
MİĞLA	366.39
ANTALYA	349.52
BURSA	346.17
MUŞ	343.72
KARAMAN	335.17
AKSARAY	334.63
ŞANLIURFA	326.92
NIĞDE	321.92
HAKKARİ	318.08
GANKIRI	317.21
ANTALYA	298.56
ŞİTLİS	295.47
ERZİNCAN	295.99
EDİRNE	291.61
ŞANLIURFA	289.93
KIRSEHİR	288.93
BALIKESİR	284.06
KAYSERİ	282.71
UŞAK	280.70
KIRSEHİR	279.47
AMASYA	267.99
AFYON	264.78
KOCAELİ	263.72
NUŞEHİR	257.36
KIRSEHİR	257.36
TOKAT	252.39
İSPARTA	250.23
ÇANAKKALE	239.40
ÇANAKKALE	239.40
YALOVA	219.03
SIVAS	218.61
KARABÜK	216.93
ŞANLIURFA	207.73
ERZURUM	207.71
İSTANBUL	201.69
BİLEÇİK	201.31
ÇORUM	199.29
ORDU	198.29
YOZGAT	190.81
GÜMÜŞHANE	190.20
ERZURUM	189.29
KARABÜK	188.19
KUTAHYA	184.19
BOLU	181.45
BATMAN	177.46
TEKİRGAZİ	173.35
KARS	167.35
TRABZON	161.46
RİZE	157.34
BARTIN	156.28
ŞANLIURFA	155.99
GİRESUN	146.50
ARTVIN	146.49
ORDU	143.28
ZONGULDAK	133.29
ARDAHAN	114.38
SİNOP	114.38

63

elektrik talebine karşılık gelen konut tipi soğutma, yaklaşık 2,57 Mt CO₂/yıl emisyon üretmektedir.

İl düzeyinde yapılan analizler, İzmir, Antalya, Adana, İstanbul ve Mersin'in toplam konut tipi soğutma kaynaklı CO₂ emisyonlarının %60'ından fazlasını oluşturduğunu göstermektedir. Bu durum, söz konusu illerin yüksek nüfus yoğunluğu, büyük soğutma yükleri ve yoğun klima kullanımından kaynaklanmaktadır. Yüksek verimlilik senaryosunda ise, ulusal ölçekte 2.096 GWh_e/yıl elektrik tasarrufu sağlanması, yaklaşık 1,31 Mt CO₂/yıl emisyon azalımı anlamına gelmektedir.

Yüksek verimli (COP = 5,9, A+++) ile düşük verimli klima sistemleri arasındaki il bazlı emisyon farkları Şekil 5.10'da sunulmaktadır. En yüksek emisyon azaltım potansiyeli İzmirde'de (231.510 t CO₂/yıl) görülürken, bunu Antalya (217.685 t CO₂/yıl) ve Adana (195.998 t CO₂/yıl) takip etmektedir. Öte yandan, Ardahan'da sezonluk emisyon farkı yalnızca 9 t CO₂/yıl ile en düşük seviyede kaydedilmiştir.



Şekil 5.10. Türkiye’de il bazında konut soğutmasından kaynaklanan potansiyel CO₂ emisyonlarının mekânsal dağılımı

Konutlardaki elektrik tüketimi, klima sistemlerinin mevsimsel performans katsayısı (SCOP) ile belirlenen verimlilik düzeyine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Şekil 5.11, yüksek verimli ve düşük verimli klima üniteleri bulunan

konutlar arasındaki il bazlı elektrik kullanım farklarını ortaya koymakta ve verimlilik iyileştirmelerinin enerji tasarrufu potansiyelini vurgulamaktadır. Şekil 5.11'e göre, yıllık konut başına elektrik tüketiminde en büyük düşüş Şanlıurfa'da kaydedilmiş olup, yüksek SCOP değerine sahip cihazlar ile düşük SCOP cihazlar arasındaki fark 866,5 kWh'a ulaşmaktadır. Buna karşın, en düşük fark yalnızca 59,9 kWh ile Sinop'ta gözlemlenmiştir. Ulusal ölçekte en yüksek tasarruf potansiyeline sahip ilk on il bir arada değerlendirildiğinde, toplam elektrik tasarrufunun %34'ünü oluşturmaktadır; bu da verimlilik kaynaklı enerji tasarrufunun coğrafi olarak belirgin biçimde yoğunlaştığını göstermektedir.

Şekil 5.11. En yüksek ve en düşük SCOP'a sahip klima sistemleri arasındaki mevsimsel elektrik tüketimindeki il bazındaki farklılıklar

farklılıklar Şekil 5.12’de gösterilmiş olup, en yüksek tasarruf potansiyeli Antalya’da (367,7 GWh), ardından İzmir (365,8 GWh) ve Adana (333,4 GWh) illerinde gözlemlenmektedir. Buna karşılık, Türkiye’nin en kalabalık ili olan İstanbul’da olası azalma görece düşük seviyede, 120,6 GWh olarak tahmin edilmektedir. Bu durum, klima verimliliğinde sağlanacak iyileştirmelerin elektrik tasarruf potansiyelini belirleyen temel faktörün yalnızca nüfus büyüklüğü değil; iklim koşulları ve soğutma yoğunluğu olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 5.12. En düşük ve en yüksek SCOP’lu klima sistemleri altında konut soğutma elektrik talebinin illere göre değişimi

5.2.1. Uluslararası Konut Soğutma Modelleri Karşılaştırması

sistemlerinin yaygın kullanımı nedeniyle tüm iç mekânlarda daha eşit bir soğutma sağlamaktadır.

Türkiye’de klima ünitelerinin oturma odalarında yoğunlaşması (%73,5), paylaşılan yaşam alanlarını hedef alan ve hem elektrik maliyetlerini hem de ilk yatırım giderlerini sınırlamayı amaçlayan bir kullanım modeline işaret etmektedir; bu da ülkenin Akdeniz ve Doğu Asya tarzı bir soğutma modelini izlediğini göstermektedir. Bu oda bazlı yaklaşım, Türkiye’nin ABD tarzı tüm evin soğutulmasına dayalı merkezi sistemi benimsemediğini, daha düşük yoğunluklu fakat hızla artan bir talep ile karakterize edilen bir yol izlediğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, Türkiye’de gelecekteki konut soğutma uygulamalarının merkezi sistemler yerine dağıtılmış, ünite bazlı bir yapı altında gelişmesi daha olası görünmektedir.

Politika boyutunda, bu durum teknoloji odaklı verimlilik önlemlerinin minimum COP/SCOP standartları, enerji etiketleme programları ve performans bazlı piyasa düzenlemeleri gibi bina düzeyinde alınan önlemlere kıyasla, konut sektöründe elektrik tüketimi ve CO₂ emisyonlarını azaltmada daha etkili olabileceğini göstermektedir.

5.2.2. Küresel Perspektifte Soğutma Enerji Yoğunluğu

Türkiye’de tahmin edilen ortalama konut soğutma enerji yoğunluğu 60,4 kWh_{th}/m²·yıl olup, bu değer Akdeniz ve sıcak iklim bölgelerinde bildirilen orta düzey soğutma yoğunlukları ile uyumludur; söz konusu bölgelerde talep, hem iklim koşulları hem de klima yaygınlığı tarafından şekillenmektedir. İspanya, İtalya ve Japonya’daki çalışmalar, yöntem farklılıkları ve yapı özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterse de, literatür Güney Avrupa ülkelerinde gelecekteki ısınma senaryoları altında konut tipi soğutma talebinin önemli oranda artacağını ve soğutma enerjisinin giderek önem kazanacağını ortaya koymaktadır.

Buna karşılık, Kuzey ve Batı Avrupa ülkelerinde daha ılıman iklimler ve sınırlı klima kullanımından ötürü soğutma yoğunluğu düşük kalmakta ve elektrik tüketimindeki payı sınırlı olmaktadır. Spektrumun diğer ucunda, tüm konutları soğutan sistemlerin yaygın olduğu ABD ve Körfez ülkeleri, yüksek soğutma derecesi günleri

ve yoğun kullanım nedeniyle çok daha yüksek soğutma enerji yoğunlukları ve hızla artan elektrik talebi göstermektedir.

Bu karşılaştırmalar, Türkiye'nin temel soğutma yoğunluğunun ABD ve Körfez'deki yüksek yoğunlukların yaklaşık yarısı ve çoğu Avrupa ülkesinin ortalamasından yüksek orta düzey, ağırlıklı olarak oda bazlı bir soğutma profiline denk geldiğini göstermektedir. Hedeflenmiş verimlilik önlemleri uygulanmazsa, Türkiye'de konut tipi soğutma talebinin zamanla daha yoğun sistemlere yönelmesi muhtemeldir. Öte yandan, minimum COP/SCOP standartları, enerji etiketleme ve mali teşvikler gibi politika araçları, ülkenin daha ılımlı ve enerji verimli bir soğutma yolunu sürdürmesini sağlayabilir.

5.2.3. Pazar Yaygınlığı ve Gelecekteki Büyüme Potansiyeli

Küresel veriler, kişi başına ortalama 0,042 klima ünitesi ile dünya genelinde düşük bir penetrasyon olduğunu göstermektedir [95]. Türkiye'de kişi başına 0,11 klima ünitesi ile küresel ortalamanın üzerinde bir yaygınlık gözlemlenmekle birlikte, uluslararası ölçekte hâlâ orta seviyede bir penetrasyon söz konusudur. Buna karşılık, ABD, Japonya ve Güney Kore'de kişi başına yaklaşık 1,25 ünite bulunmakta ve bu ülkelerde pazarın neredeyse doygun olduğu görülmektedir [96].

Dünya nüfusunun %70'inden fazlası, kişi başına 0,25'ten az klima ünitesine sahip bölgelerde yaşamakta ve bu durum konut tipi soğutma kullanımında ciddi bir coğrafi eşitsizliği ortaya koymaktadır. Türkiye'de ise hanelerin yaklaşık %25'i en az bir klima ünitesine sahiptir; bu oran, Brezilya ve Meksika gibi gelişmekte olan ekonomilerin üzerindedir (%16 civarı), ancak Japonya (%91), ABD (%90) ve Güney Kore (%86) gibi doygun pazarlara kıyasla oldukça düşüktür.

Bu veriler, Türkiye'nin henüz yüksek penetrasyon aşamasına ulaşmadığını ve konut tipi soğutma talebinde önemli bir büyüme potansiyelinin bulunduğunu göstermektedir. Beklenen bu artış, elektrik talebi ve pik yükler üzerinde baskı oluşturacak, bu nedenle yüksek verimli klima teknolojilerini teşvik eden erken politika müdahaleleri kritik önem taşıyacaktır. Sonuç olarak, Türkiye'nin mevcut penetrasyonu Avrupa ortalamasının üzerinde, ancak ABD ve Doğu Asya'daki yüksek gelirli ülkelerin çok altında olup, ülkeyi ekonomik gelişim, artan sıcaklık etkisi ve

değişen konfor beklentileri ile şekillenen bir geçiş aşamasındaki soğutma yolunda konumlandırmaktadır.

5.2.4. Net Sıfır Geçişi Açısından Politika Çıkarımları

Net sıfır hedefleri perspektifinden bakıldığında, düşük verimli klima cihazlarının kademeli olarak kullanım dışı bırakılması, konut sektöründe maliyet-etkin bir azaltım yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır. Türkiye’deki konut tipi klima stokunun tahmini ortalama SCOP değeri 3,02 olup, mevcut sistemlerin orta düzey verimlilik sunduğunu göstermektedir. Bu durum, düzenleyici ve piyasa temelli müdahaleler aracılığıyla önemli verimlilik kazanımlarının hem teknik hem de ekonomik açıdan mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

SCOP değeri 4’ün altında olan A sınıfı yüksek verimli cihazlara karşılık gelen yeni klima ünitelerinin satışını engelleyen bir düzenleme, konut tipi soğutma stokunun ortalama verimliliğini aşamalı olarak yükseltecektir. Bu tür bir politika, hanelerin mevcut kullanım ve konfor alışkanlıklarını değiştirmeden elektrik tüketiminde ve emisyonlarda kayda değer düşüşler sağlayacaktır. Bu senaryoda birim başına elektrik tüketimi %49’a kadar azalabilir ve ulusal ölçekte yıllık yaklaşık 2,1 TWh tasarruf elde edilebilir. Ayrıca bu verimlilik kazanımları, pik talebin düşmesi, şebeke yatırımlarının azalması, CO₂ emisyonlarının sınırlandırılması, hane elektrik faturalarının düşmesi ve cihaz kalitesinin iyileşmesi gibi ek faydalar da sunacaktır. Bu sonuçlar, SCOP bazlı düzenleyici eşiklerin konut tipi soğutma sektöründe verimlilik iyileştirmelerini kalıcı hâle getirmek ve uzun vadeli karbon azaltım hedefleriyle uyumlu kılmak için güçlü bir araç olduğunu göstermektedir.

Analizler, konut tipi klimalarda sağlanacak verimlilik artışlarının Türkiye’nin Ulusal Katkı Beyanı (NDC) ve 2053 net sıfır hedefleriyle uyumlu olarak önemli ölçüde emisyon azaltımı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Antalya, İzmir ve Adana gibi yüksek talep illerinde, düşük ve yüksek verimli sistemler arasındaki emisyon farkı, sektördeki azaltım potansiyelinin büyüklüğünü net bir şekilde göstermektedir. İklim değişikliği nedeniyle artması öngörülen talep dikkate alındığında, güçlendirilmiş minimum enerji performans standartları, hedef odaklı teşvik mekanizmaları ve bölgesel farklılıkları gözetilen politika araçları, gelecekteki emisyon artışını sınırlamada kritik bir rol oynayacaktır.

Türkiye’de elektrik sübvansiyonlarından yararlanmak için hane halkı tüketiminin yıllık 4.000 kWh sınırını aşmaması gerekmektedir. Bu çalışma, yalnızca konut tipi soğutmanın bile bu sınırın önemli bir bölümünü oluşturduğunu göstermektedir; özellikle sıcak iklim bölgelerinde. Ortalama hane başı yıllık soğutma tüketimi 581,8 kWh_e olup, sübvansiyon sınırının yaklaşık %14,5’ine tekabül etmektedir ve toplam konut elektriği kullanımının yaklaşık %13,7’sini soğutmanın oluşturduğunu göstermektedir. Adıyaman gibi sıcak illerde bu oran yıllık 1.315 kWh_e’ye kadar çıkmakta ve sübvansiyon sınırının %32,9’una ulaşmaktadır. İklim değişikliği altında, haneler hâlâ yalnızca seçili odaları soğutsa bile bu oran 2050’ye kadar %38,5’e yaklaşabilir.

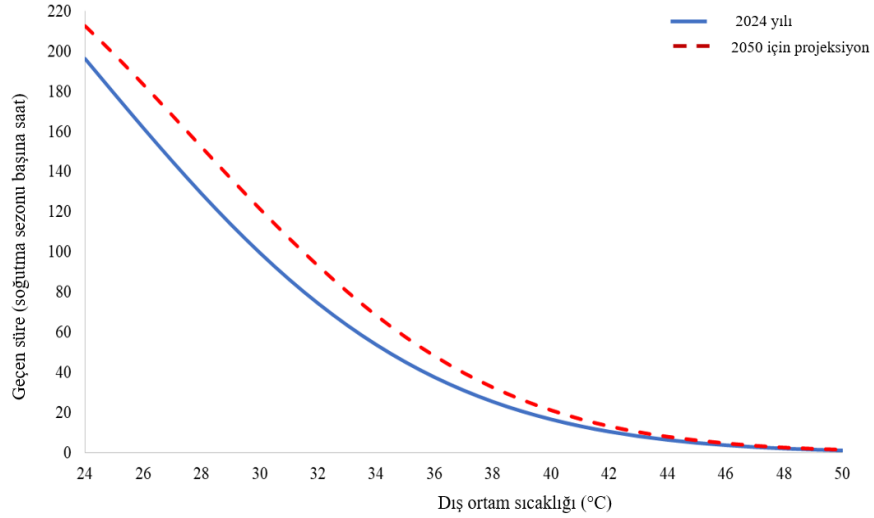
Bu bulgular, mevcut elektrik sübvansiyonlarının iklim değişikliğine karşı artan kırılganlığını ortaya koymakta ve iklime duyarlı, bölgesel farklılıkları gözetken enerji destek politikalarının önemini vurgulamaktadır. Daha geniş açıdan bakıldığında, verimlilik odaklı konut soğutma politikaları, hem pik talebi ve CO₂ emisyonlarını azaltabilir hem de haneleri artan sıcaklık etkilerine karşı koruyarak enerji yoksulluğunu önleyebilir.

5.2.5. İklim Değişikliğinin Türkiye’de 2050’ye Kadar Konut Tipi Soğutma Talebi ve CO₂ Emisyonları Üzerindeki Etkileri

İklim değişikliğinin, özellikle yaz aylarında yüksek sıcaklıklara maruz kalan bölgelerde, konutlarda soğutma ihtiyacını önemli ölçüde artırması beklenmektedir. Artan ortalama sıcaklıklar, ısı dalgalarının sıklık ve süresindeki uzama ile daha uzun soğutma sezonları, klima kullanımına olan elektrik talebini güçlendirecek ve böylece enerji sistemleri üzerinde ek baskı oluşturarak soğutma kaynaklı CO₂ emisyonlarını yükseltecektir. Küresel değerlendirmeler, iklim değişikliği, kentleşme ve gelir artışı gibi faktörlerin etkisiyle konut soğutma talebinin 2050 yılına kadar üç katına çıkabileceğini göstermektedir [72].

Coşkun ve ark. [78] tarafından geliştirilen çerçeve temel alınarak, Türkiye’de 100 yıllık bir dönem için uzun vadeli dış ortam sıcaklık dağılımlarının fonksiyonel temsili üzerinden, 2050 yılı için dış ortam sıcaklık profili yeniden oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, 2024 yılı yaz ortalaması 29,41 °C olan dış ortam sıcaklığının 2050’de 29,63 °C’ye yükseleceğini ve bunun yaklaşık 0,22 °C’lik bir net ısınmaya

karşılık geldiğini göstermektedir. Şekil 5.13'te de görüldüğü üzere, küresel ısınma sıcaklık sıklık dağılımını sağa kaydırmakta ve konut tipi soğutma talebini artıran yüksek sıcaklık koşullarının daha sık yaşanmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.13. Küresel ısınmanın etkisiyle Türkiye’de sıcaklık frekans dağılımında meydana gelen değişim

Bir soğutma set noktası sıcaklığı olarak 24,4 °C alındığında, ortam sıcaklığındaki bu görece sınırlı artış bile konut tipi soğutma talebinde orantısız bir yükselişe neden olmakta olup, 2050 yılı itibarıyla konut soğutma yükünde %24,24 artış olarak öngörülmektedir. Buna paralel olarak, konut tipi klima sistemlerinin yıllık ortalama çalışma süresi 469,5 saatten 558,8 saate çıkmakta ve bu da %19,03’lük bir artışı temsil etmektedir.

Buna ek olarak, konut klimalarının Ulusal Ortalama Kısmi Yük Oranı (NAPLR) %46’dan %48’e yükselmesi beklenmekte ve bu da %4,38’lik göreceli bir artışı göstermektedir. Bu durum, dış ortam sıcaklıklarındaki iklim kaynaklı değişimlerin yalnızca toplam soğutma talebini artırmakla kalmayıp, sistem kullanım desenlerini de kısmi yük rejimlerinde daha uzun süre işletimle değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Geleceğe dönük tahminler açısından, Türkiye’de iklim değişikliği altında konut tipi soğutma dinamiklerini modellemek için NAPLR’da yıllık yaklaşık 0,08’lik lineer artış ve yıllık ortalama 3,57 saatlik işletim süresi artışının makul bir ilk dereceden tahmin sağladığı görülmektedir.

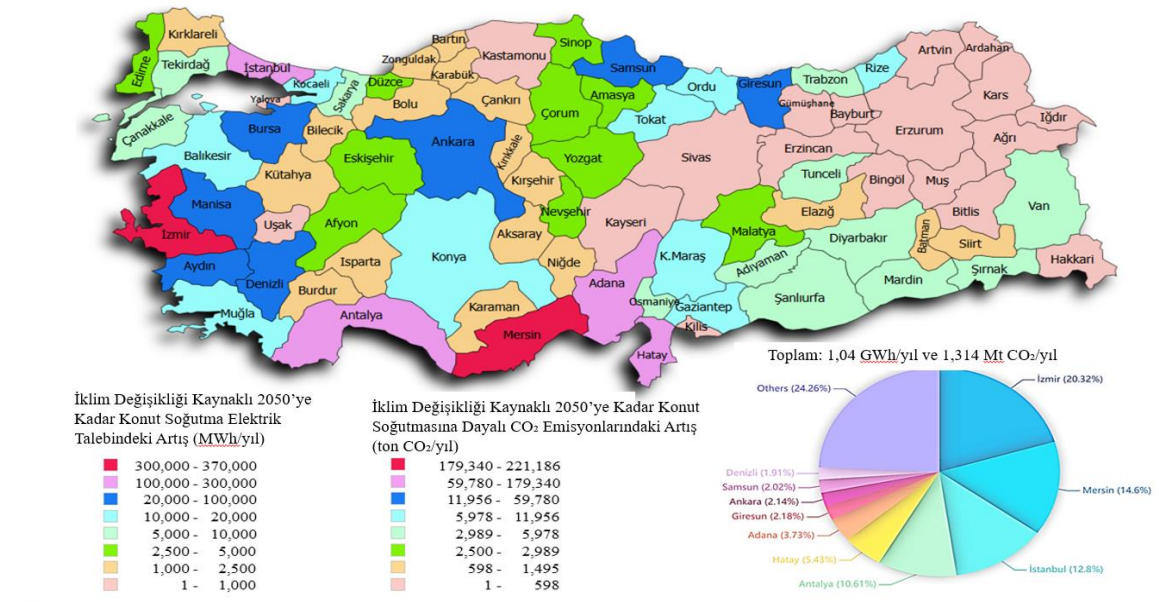
Güncel Türkiye iklim projeksiyonları, özellikle Akdeniz ve Ege bölgelerinde yaz sıcaklıkları ile ısı dalgası sıklığında belirgin bir artışa işaret etmektedir. Halihazırda yüksek soğutma talebine sahip iller İzmir, Antalya ve Adana gibi elektrik tüketimi ve pik yük baskısı açısından daha da yoğun koşullara maruz kalacaktır. Bu projeksiyonlarla uyumlu olarak model, 2024 yılına kıyasla 2050 yılında ulusal konut tipi soğutma elektrik talebinin %24,24 artacağını göstermekte; bu hesaplama mevcut konut stoğu ve klima sahipliğinin sabit olduğu varsayımıyla yapılmıştır (Şekil 5.14).

Sadece iklim senaryosu altında, yani yeni klima üniteleri eklenmediğinde, ulusal soğutma kaynaklı elektrik tüketimi 4.295 GWh_e'den 5.336 GWh_e'ye yükselmekte ve bu durum gelecekteki elektrik sistemi kapasitesi ve güvenilirliği üzerinde önemli bir ek yük yaratmaktadır. Hane düzeyinde, ortalama yıllık soğutma elektriği kullanımı 582 kWh_e'den 2050 yılı itibarıyla yaklaşık 723 kWh_e'ye çıkmaktadır.

Sonuç olarak, soğutma kaynaklı CO₂ emisyonları 2,57 MtCO₂ yıl⁻¹'den yaklaşık 3,19 MtCO₂ yıl⁻¹'ye yükselmekte ve mevcut elektrik üretim karışımı altında 2050 yılına kadar iklim kaynaklı 0,622 MtCO₂ yıl⁻¹'lik bir emisyon artışı öngörülmektedir. Hane bazında ise ortalama soğutma kaynaklı emisyonlar 347,9 kg CO₂ yıl⁻¹'den yaklaşık 432,2 kg CO₂ yıl⁻¹'ye ulaşacaktır.

Konut tipi soğutma talebinin tüm illerde artması beklenmekle birlikte, en yüksek göreceli artış oranları Zonguldak, Ardahan, Giresun, Trabzon, Rize, Samsun, Van, Kars, Sinop ve Yalova'da öngörülmektedir. Bu iller, mevcutta düşük temel soğutma talebine sahip olsalar da, iklim kaynaklı sıcaklık artışları gelecekte orantısız şekilde yüksek yüzdesel büyüme yaratmaktadır.

Mutlak değerler açısından incelendiğinde, konut tipi soğutma elektrik talebindeki en büyük artışların İzmir, Mersin, İstanbul, Antalya ve Hatay'da gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu beş ilin toplam artışı yaklaşık 664 GWh_e yıl⁻¹ olarak hesaplanmakta ve bu değer ulusal toplam artışın yaklaşık %63,8'ine karşılık gelmektedir. Bu durum, gelecekteki talep artışının sınırlı sayıda, yoğun nüfuslu ve sıcak iklimli illerde yoğunlaşacağını ortaya koymaktadır.



Şekil 5.14. Mevcut klima stoku için 2050 yılına kadar öngörülen konut soğutma elektrik talebi ve CO₂ emisyonları

Bu bulgular, verimlilik odaklı politika tedbirleri uygulanmadığı takdirde, Türkiye’de hâlihazırda gözlemlenen ölçülü ve ağırlıklı olarak oda bazlı soğutma deseninin zamanla daha enerji yoğun soğutma rejimlerine evrilebileceğini göstermektedir. Buna karşılık, yüksek verimli klima teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve minimum enerji performans standartlarının güçlendirilmesi, iklim kaynaklı konut soğutma elektrik talebi artışını ve buna bağlı CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde sınırlayabilir. Bu sonuçlar, konut tipi soğutma verimliliğinin uzun vadeli enerji ve iklim politikalarına dahil edilmesinin kritik önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

5.2.6. Türkiye’de 2050 Yılına Kadar Nüfus, Konut ve Klima Pazar Büyümesinin Konut Tipi Soğutma Elektrik Tüketimi ve CO₂ Emisyonlarına Etkileri

2024 itibarıyla yaklaşık 85 milyon olan Türkiye nüfusunun, yüzyıl ortasına kadar 90 milyon civarında dengelenmesi beklenmektedir. Bununla birlikte, bu demografik istikrar görünümü, konut tipi enerji talebinin artmasında daha etkili olan yapısal bir etkeni gizlemektedir: konut stokundaki hızlı artış. Hane halkı büyüklüğünün azalması, kentleşmenin hız kazanması ve yaşam standartlarının yükselmesi, önümüzdeki yıllarda konut sayısında belirgin bir artış yaratacaktır.

Türkiye’de ortalama hane halkı büyüklüğü, 2000’li yılların başında 4’ün üzerindeyken, günümüzde 3,2’nin altına düşmüş olup, 2050’ye kadar yaklaşık 2,4 kişiye gerilemesi öngörülmektedir.

Bu varsayımlar doğrultusunda, 2050 yılı için toplam nüfus 90 milyon ve ortalama hane halkı büyüklüğü 2,4 kişi olarak kabul edilmekte ve böylece ulusal konut stokunun yaklaşık 37,5 milyon konut olacağı öngörülmektedir. Bu değer, mevcut konut stokuna kıyasla önemli bir artışı göstermekte ve uzun vadeli konut tipi soğutma talebinin başlıca yapısal belirleyicilerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Yaklaşık 100 büyük klima perakendecisinin yıllık satış verileri, toplam satışların %60’ının konut sektörüne yönlendirildiğini ve 2024 yılında ülke genelinde hanelere yaklaşık 1,51 milyon adet klima satıldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, eski klimaların yenileriyle değiştirildiği takas programları, konut satışlarının yaklaşık %28’ini oluşturmaktadır. Gelişmiş ülkelerdeki ev aletleri değiştirme modellerine dayalı olarak, klima değişim oranının 2050 yılına kadar kademeli olarak %60’a ulaşması beklenmektedir.

Klima geri dönüşüm firmaları ve teknik servis sağlayıcılarıyla yapılan ayrıntılı görüşmeler sonucunda, konut tipi klima ünitelerinin ortalama işletme ömrü 13,6 yıl olarak tahmin edilmiştir; bu değer üzerinden yıllık değişim oranı hesaplanmaktadır. 2025’te %6,6 olan yıllık stok büyüme oranının, zamanla azalacağı ve olgun piyasalarda görülen seviyelere yaklaşarak 2050’de %2’ye gerileyeceği öngörülmektedir. Yıllık değiştirilen ünite sayısını hesaplamak için kullanılan formül bu aşamada uygulanmaktadır.

$$\text{Değiştirilen Klima Üniteleri} = \text{Stok} \cdot \frac{1}{13.6 \text{ yıl}} \cdot \text{Klima Yenileme Oranı} \quad (5.1)$$

Tablo 5.1’de görüldüğü üzere, Türkiye’de konut tipi klima pazarının 2025–2050 yılları arasında hızlı bir büyüme göstermesi öngörülmektedir. Bu genişleme, hane halkı penetrasyonunun artması, sürekli yeni klima satışları ve mevcut stok yaşlandıkça değişim talebinin payının yükselmesi gibi faktörlerle desteklenmektedir.

Türkiye’de konutlarda soğutma talebi, 2024 itibarıyla yıllık yaklaşık 13 TWh_{th} olarak tahmin edilmekte olup, iklim değişikliği, klima penetrasyonundaki artış ve

konut stokunun büyümesi etkisiyle önümüzdeki dönemde kayda değer bir artış göstermesi beklenmektedir. 2050 yılına gelindiğinde, toplam soğutma talebinin 44,2 TWh_{th}/yıl seviyesine ulaşacağı öngörülmektedir (Şekil 5.15).

Tablo 5.1. Türkiye’de konut tipi klima stokunun, satışlarının, değişiminin ve yaygınlık oranının öngörülen gelişimi (2025–2050)

Yıl	Hane Sayısı	Yıllık Klima Satışları	Klima Yenileme Oranı	Değiştirilen Klima Üniteleri	Klima Stokuna Yeni Eklenenler	Yıllık Stok Artışı	Toplam Klima Stoku	Penetrasyon
	(Milyon)	(Milyon)	(%)	(Milyon)	(Milyon)	(%)	(Milyon)	Hane Başına Klima Sayısı
2024	30.05	1,51	28,0	0,43	1,08		9,62	0,320
2025	30.23	1,71	28,9	0,46	1,25	6,60	10,44	0,345
2026	30.41	1,67	29,9	0,48	1,19	6,22	11,14	0,366
2027	30.59	1,68	30,9	0,51	1,17	5,85	11,83	0,387
2028	30.77	1,68	31,9	0,54	1,14	5,50	12,50	0,406
2029	30.96	1,65	33,0	0,57	1,08	5,16	13,15	0,425
2030	31.14	1,65	34,0	0,60	1,05	4,84	13,78	0,443
2031	31.32	1,64	35,1	0,63	1,01	4,54	14,39	0,459
2032	31.50	1,63	36,2	0,66	0,97	4,26	14,99	0,476
2033	31.69	1,62	37,3	0,70	0,92	3,99	15,57	0,491
2034	31.87	1,61	38,4	0,73	0,88	3,74	16,14	0,506
2035	32.05	1,60	39,5	0,76	0,84	3,51	16,69	0,521
2036	32.23	1,60	40,6	0,80	0,80	3,29	17,23	0,535
2037	32.42	1,59	41,8	0,83	0,76	3,09	17,76	0,548
2038	32.60	1,59	42,9	0,86	0,73	2,90	18,28	0,561
2039	32.78	1,59	44,1	0,90	0,69	2,74	18,79	0,573
2040	32.97	1,58	45,3	0,93	0,65	2,59	19,30	0,585
2041	33.15	1,58	46,5	0,97	0,61	2,45	19,81	0,598
2042	33.34	1,58	47,7	1,00	0,58	2,34	20,31	0,609
2043	33.52	1,58	49,0	1,04	0,54	2,24	20,81	0,621
2044	33.71	1,57	50,2	1,07	0,50	2,16	21,31	0,632
2045	33.89	1,58	51,5	1,11	0,47	2,09	21,81	0,644
2046	34.08	1,58	52,7	1,14	0,44	2,04	22,31	0,655
2047	34.26	1,58	54,0	1,18	0,40	2,01	22,81	0,666
2048	34.45	1,59	55,3	1,22	0,37	2,0	23,31	0,677
2049	34.63	1,60	56,7	1,26	0,34	2,0	23,81	0,688
2050	37.5	1,59	60,0	1,29	0,30	2,0	24,31	0,648

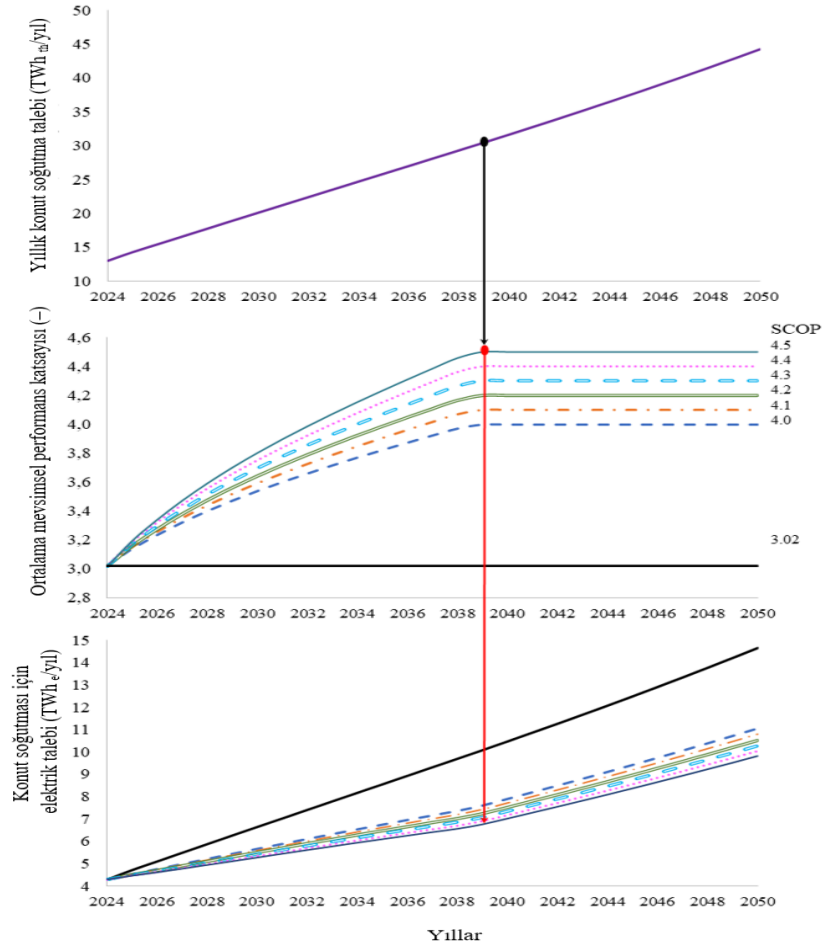
Mevcut pazar eğilimleri sürdürülür ve ortalama SCOP 3,02 seviyesinde kalırsa, önümüzdeki 25 yılda konut soğutma elektriği tüketiminin yaklaşık %340 oranında artması beklenmektedir; bu da yıllık ortalama %6,1 büyüme anlamına gelmektedir. Bu “işin olağan akışı” senaryosunda, klima satışlarına herhangi bir düzenleyici müdahale yapılmazsa, ulusal konut soğutma elektriği talebi 2024’te 4,3 TWh_e/yıl iken 2050’de yaklaşık 14,63 TWh_e/yıl seviyesine yükselebilecektir.

Tüm yeni satılan klimalar için $SCOP \geq 4$ koşulunun getirilmesi durumunda ve mevcut stok öngörülen yenileme oranına göre tamamen değiştirilirse, ulusal ortalama SCOP’un 2039 yılı itibarıyla 4’e ulaşması beklenmektedir. Bu düzenleme ile 2050 yılında konut soğutma elektriği talebi yaklaşık 11,05 TWh_e/yıl ile sınırlı kalacak ve bu durum, herhangi bir kısıtlama uygulanmayan senaryoya kıyasla %24,5’lik bir azalmaya işaret edecektir. SCOP eşiğinin 4,5’e yükseltilmesi durumunda ise azalma %32,9’a ulaşacak, yani tek bir verimlilik temelli satış düzenlemesi ile 2050 yılı itibarıyla elektrik tüketiminde ve CO₂ emisyonlarında yaklaşık üçte birlik bir düşüş sağlanabilecektir.

Şekil 5.15, yıllık konut soğutma elektriği talebi, ulusal ortalama SCOP ve toplam konut soğutma yükünün 2050’ye kadar öngörülen seyrini göstermekte ve artan iklim kaynaklı soğutma ihtiyacı ile verimlilik temelli talep yönetimi arasındaki etkileşimi ortaya koymaktadır.

2025 yılı için Türkiye’nin toplam tepe elektrik talebi yaklaşık 58 GW olarak hesaplanırken, konut tipi klima sistemlerinin kurulu kapasitesi 19,9 GW’a ulaşmaktadır. Ulusal Ortalama Kısmi Yük Oranı (PLR) 0,46 olduğunda, konut soğutmasının sistem tepe talebine katkısı yaklaşık 9,15 GW olmakta ve bu yaz aylarındaki öğle saatlerinde ulusal tepe talebinin %15,8’ine karşılık gelmektedir.

2050 yılına gelindiğinde, klima sahipliğinin artması ve iklim kaynaklı işletme yoğunluğunun yükselmesi ile konut soğutma kapasitesinin 50,32 GW’a ulaşması beklenmektedir. PLR değerinin 0,48’e yükselmesiyle birlikte, bu durum soğutma kaynaklı tepe yükün 24,15 GW’a çıkacağı anlamına gelmekte ve bu değer, günümüz ulusal toplam tepe talebinin neredeyse yarısına tekabül etmektedir.



Şekil 5.15. Alternatif SCOP senaryoları altında 2050 yılı için konut soğutma talebi ve elektrik kullanımına ilişkin projeksiyonlar

TEİAŞ [97] tarafından sağlanan 2030 yılı pik talep projeksiyonları (≈ 73 GW) ve geçmiş yıllardaki yaklaşık %4'lük elektrik talep artış oranı göz önüne alındığında, mevcut eğilimlerin devamı durumunda Türkiye'nin sistem pik yükünün 2050 yılına kadar 150–160 GW seviyelerine ulaşması muhtemeldir. Bu durumda, yalnızca konutlardaki soğutma sistemleri toplam pik talebin yaklaşık %15,6'sını oluşturacaktır. Öte yandan, yeni klima cihazlarının SCOP değerinin 4,5 seviyesine yükseltilmesi, pik soğutma talebini yaklaşık 7,94 GW azaltacak ve 2050 yılı itibarıyla gerekli konut soğutma kurulu kapasitesini 33,77 GW'a düşürecektir.

Bu sonuçlar, iklim değişikliği koşullarında gelecekteki pik elektrik talebinin yönetiminde konut tipi klima verimliliğinin kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, güçlendirilmiş asgari enerji performans standartlarının, elektrik sisteminin güvenilirliğini sağlamak ve Türkiye'nin uzun vadeli karbon azaltımı ile net-

sıfır hedeflerine ulaşmasına katkıda bulunmak için hem maliyet etkin hem de altyapıyı koruyan önemli bir politika aracı olduğunu göstermektedir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Türkiye’de hane halkı düzeyindeki elektrik faturaları ve teknolojiye özgü mevsimsel performans göstergeleri kullanılarak, konutlarda soğutma talebi, elektrik tüketimi ve klima verimliliği üzerine yapılan ülke çapındaki ilk veri odaklı değerlendirmeyi sunmaktadır. Bulgular, konutlarda soğutmanın hanehalkı enerji kullanımının yapısal bir bileşeni hâline geldiğini ortaya koymaktadır; toplam soğutma talebinin yaklaşık 12,98 TWh_{th} ve buna karşılık gelen elektrik tüketiminin 4,30 TWh_e olduğu tahmin edilmektedir. Ulusal ortalama soğutma yoğunluğu 60,4 kWh_{th}/m²·yıl ve temel SCOP değeri 3,02 ile Türkiye, orta düzey enerji yoğunluğu ve ağırlıklı olarak oda bazlı soğutma uygulamaları ile karakterize edilen Akdeniz–Doğu Asya tipi bir soğutma profili içinde yer almaktadır.

Türkiye, henüz ABD veya Körfez ülkelerinde görülen yüksek yoğunluklu ve tüm konutu kapsayan soğutma modeline ulaşmamış olsa da, iklim değişikliği, artan gelirler ve çoğalan klima sahipliği, daha yüksek enerji yoğunluklu soğutma yollarına yönelme riskini artırmaktadır. Müdahale edilmezse, 2050 yılına kadar konutlarda soğutma amaçlı elektrik talebinin %340’tan fazla artması öngörülmekte ve bu durum, elektrik altyapısı, talep yönetimi ve ulusal karbon azaltım hedefleri üzerinde ciddi baskılar yaratacaktır.

Analizler, verimlilik temelli teknoloji politikalarının bu geçiş sürecini yönetmek için en etkili ve sosyal açıdan adil araçlardan biri olduğunu göstermektedir. Yeni satılan klima birimleri için minimum SCOP değerinin 4–4,5 olarak belirlenmesi, hanelerden davranış değişikliği talep etmeden, normal ikame döngüleri aracılığıyla ulusal soğutma stokunun verimliliğini kademeli olarak artıracaktır. $SCOP \geq 4,5$ standardı altında, 2050 yılı itibarıyla konutlarda soğutma amaçlı elektrik talebi ve buna bağlı CO₂ emisyonları yaklaşık üçte bir oranında azaltılabilir; bu, yılda yaklaşık 4,8 TWh_e elektrik tasarrufu ve 2,9 MtCO₂ emisyon önlemesine denk gelmektedir. Bu iyileşmeler ayrıca pik yüklerde düşüş, azalan şebeke genişletme ihtiyacı ve hanehalkı elektrik giderlerinde azalma sağlayacak, bu durum özellikle artan soğutma ihtiyacı ile karşı karşıya olan düşük ve orta gelirli haneler için önemlidir.

Enerji ve iklim etkilerinin ötesinde, bulgular soğutmanın önemli bir sosyal boyutunu da vurgulamaktadır. Sıcak ve düşük gelirli illerde soğutma, hanehalkı elektrik bütçesinin önemli bir bölümünü tüketmekte ve bazı durumlarda elektrik sübvansiyonlarına erişimi zorlaştırmaktadır. İklim değişikliği bu yükü daha da artırabileceğinden, verimsiz soğutma teknolojileri enerji yoksulluğunu tetikleyebilir. Bu nedenle, verimlilik odaklı klima politikaları yalnızca iklim azaltımı için değil, aynı zamanda sosyal koruma ve iklime uyum mekanizması olarak da işlev görmektedir.

Sonuçlar, Türkiye'nin konutlarda soğutma geçişinde kritik bir dönemeçte olduğunu göstermektedir. Güçlü minimum verimlilik standartları, hedefe yönelik teşvikler ve bölgesel farklılaştırılmış destek mekanizmaları enerji politika çerçevesine entegre edildiğinde, Türkiye yüksek emisyonlu soğutma yollarına kilitlenmekten kaçınabilir ve bunun yerine daha adil, iklim dayanıklı ve enerji verimli bir yaklaşımı benimseyebilir. Bu bağlamda, konut soğutma verimliliği, ısınan dünyada iklim azaltımı, enerji sistemi istikrarı ve sosyal refahı birbirine bağlayan merkezi bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Çakır, U., Çomaklı, K., Çomaklı, Ö., & Karşlı, S. (2013). An experimental exergetic comparison of four different heat pump systems working at same conditions: As air to air, air to water, water to water and water to air. *Energy*, 58, 210-219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.014>
- [2] Chen, Y., & Lan, L. (2009). A fault detection technique for air-source heat pump water chiller/heaters. *Energy and Buildings*, 41(8), 881-887. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.03.007>
- [3] Blázquez, C. S., Nieto, I. M., García, J. C., García, P. C., Martín, A. F., & González-Aguilera, D. (2023). Comparative analysis of ground source and air source heat pump systems under different conditions and scenarios. *Energies*, 16(3), 1289. <https://doi.org/10.3390/en16031289>
- [4] Karytsas, S., & Choropanitis, I. (2017). Barriers against and actions towards renewable energy technologies diffusion: A principal component analysis for residential ground source heat pump (GSHP) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 252-271. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.060>
- [5] Gagneja, A., & Pundhir, S. (2016). Heat pumps and its applications. *International Journal of Advances in Chemical Engineering and Biological Sciences*, 3(1), 117-120. <http://dx.doi.org/10.15242/IJACEBS.U0516203>
- [6] Wang, Z., Luther, M. B., Amirkhani, M., Liu, C., & Horan, P. (2021). State of the art on heat pumps for residential buildings. *Buildings*, 11(8), 350. <https://doi.org/10.3390/buildings11080350>
- [7] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [8] Kemp, I. C. (2007). *Pinch Analysis and Process Integration* (2nd ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- [9] Nuclear Power. (n.d.). Coefficient of performance (COP) – Refrigerator, air conditioner. Retrieved February 14, 2026, from <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/heating-and-air-conditioning/coefficient-of-performance-cop-refrigerator-air-conditioner/>
- [10] Sun, Y., Chen, X., Wu, S., Wei, W., Wang, W., & Deng, S. (2022). Performance analysis of air source heat pump space heating system with an adaptive control for supply water temperature. *Applied Thermal Engineering*, 211, 118401. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118401>
- [11] Zhang, F., Cai, J., Ji, J., Han, K., & Ke, W. (2020). Experimental investigation on the heating and cooling performance of a solar air composite heat source heat pump. *Renewable Energy*, 161, 221-229. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.106>

- [12] Li, Z., Wang, W., Sun, Y., Liang, S., Deng, S., Lin, Y., & Wu, X. (2020). A novel defrosting initiating method for air source heat pumps based on the optimal defrosting initiating time point. *Energy and Buildings*, 222, 110064.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110064>
- [13] Li, Z., Wei, W., Wang, W., Sun, Y., Wang, S., Lin, Y., ... & Deng, S. (2023). A method for sizing air source heat pump considering the joint effect of outdoor air temperature and relative humidity. *Journal of Building Engineering*, 65, 105815.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105815>
- [14] Wu, C., Wang, Z., Li, X., Xu, Z., Xu, C., Yang, Y., ... & Wang, Y. (2023). Field experimental research on retarding frosting and improving defrosting performance of air source heat pumps through variable frequency technology. *Journal of Building Engineering*, 64, 105628.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105628>
- [15] Song, Y., Wang, J., Cao, F., Shu, P., & Wang, X. (2017). Experimental investigation on a capillary tube based transcritical CO₂ heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 112, 184-189.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.033>
- [16] Safa, A. A., Fung, A. S., & Kumar, R. (2015). Comparative thermal performances of a ground source heat pump and a variable capacity air source heat pump systems for sustainable houses. *Applied Thermal Engineering*, 81, 279-287.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.039>
- [17] Guoyuan, M., Qinhu, C., & Yi, J. (2003). Experimental investigation of air-source heat pump for cold regions. *International Journal of Refrigeration*, 26(1), 12-18.
[https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(02\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00083-X)
- [18] Christodoulides, P., Aresti, L., & Florides, G. (2019). Air-conditioning of a typical house in moderate climates with ground source heat pumps and cost comparison with air source heat pumps. *Applied Thermal Engineering*, 158, 113772.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113772>
- [19] Byrne, P., Miriel, J., & Lenat, Y. (2011). Experimental study of an air-source heat pump for simultaneous heating and cooling—Part 1: Basic concepts and performance verification. *Applied Energy*, 88(5), 1841-1847.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.009>
- [20] Xiao, B., He, L., Zhang, S., Kong, T., Hu, B., & Wang, R. Z. (2020). Comparison and analysis on air-to-air and air-to-water heat pump heating systems. *Renewable Energy*, 146, 1888-1896.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.033>
- [21] Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 70, 441-454.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>

- [22] Alshehri, F., Beck, S., Ingham, D., Ma, L., & Pourkashanian, M. (2021). Technico-economic modelling of ground and air source heat pumps in a hot and dry climate. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 235(5), 1225-1239.
<https://doi.org/10.1177/0957650920976051>
- [23] Guo, X., Wei, H., He, X., Du, J., & Yang, D. (2022). Experimental evaluation of an earth-to-air heat exchanger and air source heat pump hybrid indoor air conditioning system. *Energy and Buildings*, 256, 111752.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111752>
- [24] Ding, Y., Chai, Q., Ma, G., & Jiang, Y. (2004). Experimental study of an improved air source heat pump. *Energy Conversion and Management*, 45(15-16), 2393-2403.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.11.021>
- [25] Congedo, P. M., Baglivo, C., D'Agostino, D., & Mazzeo, D. (2023). The impact of climate change on air source heat pumps. *Energy Conversion and Management*, 276, 116554.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116554>
- [26] Ougazzou, M., El Maakoul, A., Khay, I., Degiovanni, A., & Bakhouya, M. (2024). Techno-economic and environmental analysis of a ground source heat pump for heating and cooling in Moroccan climate regions. *Energy Conversion and Management*, 304, 118250.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118250>
- [27] Omer, A. M. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(2), 344-371.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>
- [28] Liu, L. (2017, May). Principle and characteristics of heat pump air conditioning system. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1839, No. 1, p. 020031). AIP Publishing LLC.
<https://doi.org/10.1063/1.4982396>
- [29] Assad, M. E. H., AlMallahi, M. N., Ramadan, A., Awad, M. A., Rejeb, O., & AlShabi, M. (2022, February). Geothermal heat pumps: principles and applications. In *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)* (pp. 1-8). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ASET53988.2022.9734907>
- [30] Wu, R. (2009). Energy efficiency technologies—air source heat pump vs. ground source heat pump. *Journal of Sustainable Development*, 2(2), 14-23.
<https://doi.org/10.5539/jsd.v2n2p14>
- [31] Lin, Y., Wang, W., Sun, Y., Liu, J., & Deng, S. (2019). A field study on the effects of outdoor coil fouling at different ambient air temperatures on the operating performances of a space cooling ASHP unit. *Energy and Buildings*, 183, 639-649.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.031>

- [32] Chen, Y., & Lan, L. (2009). A fault detection technique for air-source heat pump water chiller/heaters. *Energy and Buildings*, 41(8), 881-887.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.03.007>
- [33] Huang, S., Zuo, W., Lu, H., Liang, C., & Zhang, X. (2019). Performance comparison of a heating tower heat pump and an air-source heat pump: A comprehensive modeling and simulation study. *Energy conversion and management*, 180, 1039-1054.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.050>
- [34] Lee, S. H., Jeon, Y., Chung, H. J., Cho, W., & Kim, Y. (2018). Simulation-based optimization of heating and cooling seasonal performances of an air-to-air heat pump considering operating and design parameters using genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 144, 362-370.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.078>
- [35] Blázquez, C. S., Nieto, I. M., García, J. C., García, P. C., Martín, A. F., & González-Aguilera, D. (2023). Comparative analysis of ground source and air source heat pump systems under different conditions and scenarios. *Energies*, 16(3), 1289.
<https://doi.org/10.3390/en16031289>
- [36] Chua, K. J., Chou, S. K., & Yang, W. M. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, 87(12), 3611-3624.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.014>
- [37] Ji, J., Liu, K., Chow, T. T., Pei, G., He, W., & He, H. (2008). Performance analysis of a photovoltaic heat pump. *Applied Energy*, 85(8), 680-693.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.01.003>
- [38] Goh, L. J., Othman, M. Y., Mat, S., Ruslan, H., & Sopian, K. (2011). Review of heat pump systems for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4788-4796.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.072>
- [39] Fu, H. D., Pei, G., Ji, J., Long, H., Zhang, T., & Chow, T. T. (2012). Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat-pump/heat-pipe system. *Applied Thermal Engineering*, 40, 343-350.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.036>
- [40] Ning, Z., Zhang, X., Ji, J., Shi, Y., & Du, F. (2023). Research progress of phase change thermal storage technology in air-source heat pump. *Journal of Energy Storage*, 64, 107114.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107114>
- [41] 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.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.016>

- [42] Sun, X., Dai, Y., Novakovic, V., Wu, J., & Wang, R. (2015). Performance comparison of direct expansion solar-assisted heat pump and conventional air source heat pump for domestic hot water. *Energy Procedia*, 70, 394-401.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.140>
- [43] Li, R., Ooka, R., & Shukuya, M. (2014). Theoretical analysis on ground source heat pump and air source heat pump systems by the concepts of cool and warm exergy. *Energy and Buildings*, 75, 447-455.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.019>
- [44] Kelly, N. J., & Cockroft, J. (2011). Analysis of retrofit air source heat pump performance: Results from detailed simulations and comparison to field trial data. *Energy and Buildings*, 43(1), 239-245.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.018>
- [45] Shen, B., New, J., & Baxter, V. (2017). Air source integrated heat pump simulation model for EnergyPlus. *Energy and Buildings*, 156, 197-206.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.064>
- [46] Yongcun, L., Guangming, C., Liming, T., & Lihua, L. (2011). Analysis on performance of a novel frost-free air-source heat pump system. *Building and environment*, 46(10), 2052-2059.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.018>
- [47] Vocale, P., Morini, G. L., & Spiga, M. (2014). Influence of outdoor air conditions on the air source heat pumps performance. *Energy Procedia*, 45, 653-662.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.070>
- [48] Lazzarin, R. M. (2012). Dual source heat pump systems: operation and performance. *Energy and Buildings*, 52, 77-85.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.026>
- [49] Deng, J., Wei, Q., Liang, M., He, S., & Zhang, H. (2019). Does heat pumps perform energy efficiently as we expected: Field tests and evaluations on various kinds of heat pump systems for space heating. *Energy and Buildings*, 182, 172-186.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.014>
- [50] Valancius, R., Singh, R. M., Jurelionis, A., & Vaiciunas, J. (2019). A review of heat pump systems and applications in cold climates: Evidence from Lithuania. *Energies*, 12 (22): 4331.
<https://doi.org/10.3390/en12224331>
- [51] Kažys, J., Stankūnavičius, G., Rimkus, E., Bukantis, A., & Valiukas, D. (2011). Long-range alternation of extreme high day and night temperatures in Lithuania. *Baltica*, 24(2), 71-82.

- [52] Dailidienė, I., Servaitė, I., Dailidė, R., Vasiliauskienė, E., Rapolienė, L., Povilanskas, R., & Valiukas, D. (2023). Increasing trends of heat waves and tropical nights in coastal regions (the case study of Lithuania seaside cities). *Sustainability*, 15(19), 14281.
<https://doi.org/10.3390/su151914281>
- [53] Weather and Climate. (2023). Average min and max temperatures in Vilnius, Lithuania. Retrieved from <https://weather-and-climate.com/average-monthly-temperatures,vilnius,lithuania>
- [54] Lithuanian Hydrometeorological Service. (n.d.). Standard climate normals (1991–2020) [Data set]. Retrieved November 5, 2025, from <https://www.meteo.lt/en/climate/lithuanian-climate/standard-climate-normals>
- [55] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). *ASHRAE handbook—fundamentals: Climate design data (2021 update)*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- [56] Copernicus Climate Change Service. (2021). ERA5: Hourly data on single levels from 1940 to present [Data set]. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu>
- [57] European Climate Assessment & Dataset (ECA&D). (2020). Daily temperature and precipitation data for Europe [data set]. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). Retrieved from <https://www.ecad.eu>
- [58] U.S. Department of Energy. (2020). EnergyPlus weather data (EPW files): Typical Meteorological Year (TMY) climate data [Data set]. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Retrieved from <https://energyplus.net/weather>
- [59] Eurostat. (2022). Cooling and heating degree days by NUTS 2 regions – annual data [Data set]. European Commission. Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [60] Ahn, J. H., Kang, H., Lee, H. S., Jung, H. W., Baek, C., & Kim, Y. (2014). Heating performance characteristics of a dual source heat pump using air and waste heat in electric vehicles. *Applied Energy*, 119, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.065>
- [61] Mouzeviris, G. A., & Papakostas, K. T. (2021). Comparative analysis of air-to-water and ground source heat pumps performances. *International Journal of Sustainable Energy*, 40(1), 69-84.
<https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1794864>
- [62] Jianhui, N., Guoyuan, M., & Shuxue, X. (2020). Experimental study on the performance of air source heat pump system with multiple parallel outdoor units. *International Journal of Energy Research*, 44(4), 2819-2832.
<https://doi.org/10.1002/er.5098>

- [63] Blumsack, S., Brownson, J., & Witmer, L. (2009, January). Efficiency, economic and environmental assessment of ground source heat pumps in central Pennsylvania. In 2009 42nd Hawaii International Conference on System Sciences (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2009.179>
- [64] Deymi-Dashtebayaz, M., & Valipour-Namanlo, S. (2019). Thermoeconomic and environmental feasibility of waste heat recovery of a data center using air source heat pump. *Journal of Cleaner Production*, 219, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.061>
- [65] Chesser, M., Lyons, P., O'Reilly, P., & Carroll, P. (2021). Air source heat pump in-situ performance. *Energy and Buildings*, 251, 111365. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111365>
- [66] Hiller, C. C., & Glicksman, L. R. (1976). Improving heat pump performance via compressor capacity control: analysis and test. MIT Energy Lab. Retrieved from <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/27257>
- [67] Habeebullah, B. A. (2010). Performance analysis of a combined heat pump-dehumidifying system. *JKAU Eng Sci*, 21(1), 97-114. DOI 10.4197 / Eng. 21-1.6
- [68] Kuryło, K., & Ruciński, A. (2019). A comparative study on electric and gas engine heat pump. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 137, p. 01050). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913701050>
- [69] International Energy Agency. (2023). Space cooling. IEA. <https://www.iea.org/reports/space-cooling-2>
- [70] International Energy Agency. (2022). Cooling. In *World Energy Outlook 2022*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [71] Isaac, M., & van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37(2), 507–521. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051>
- [72] Davis, L. W., & Gertler, P. J. (2015). Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 5962-5967. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423558112>
- [73] Shah, N., Wei, M., Letschert, V., & Phadke, A. (2015). Benefits of leapfrogging to Superefficiency and low global warming potential refrigerants in air conditioning. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1235571>

- [74] McNeil, M. A., Letschert, V. E., de la Rue du Can, S., & Ke, J. (2013). Bottom–Up Energy Analysis System (BUENAS)—an international appliance efficiency policy tool. *Energy Efficiency*, 6(2), 191-217.
<https://doi.org/10.1007/s12053-012-9182-6>
- [75] Mancini, F., & Lo Basso, G. (2020). How climate change affects the building energy consumptions due to cooling, heating, and electricity demands of Italian residential sector. *Energies*, 13(2), 410.
<https://doi.org/10.3390/en13020410>
- [76] Domínguez-Amarillo, S., Fernández-Agüera, J., Sendra, J. J., & Roaf, S. (2018). Rethinking User Behaviour Comfort Patterns in the South of Spain—What Users Really Do. *Sustainability*, 10(12), 4448.
<https://doi.org/10.3390/su10124448>
- [77] Yoshida, K., Rijal, H. B., Bogaki, K., Mikami, A., & Abe, H. (2021). Field study on energy-saving behaviour and patterns of air-conditioning use in a condominium. *Energies*, 14(24), 8572.
<https://doi.org/10.3390/en14248572>
- [78] Coskun, C., Erturk, M., Arcaklioğlu, E., Balci, K., Oktay, Z. (2021). The climate change impact projections on seasonal residential sector CO₂ emissions and energy demand forecasting for Turkish provinces. *International Journal of Global Warming*, 26(3), 281–306.
<https://doi.org/10.1504/IJGW.2021.116710>
- [79] Zhu, M., Huang, Y., Wang, S.-N., Zheng, X., Wei, C. (2023). Characteristics and patterns of residential energy consumption for space cooling in China: Evidence from appliance-level data. *Energy*, 265, 126395.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126395>
- [80] Chen, X., Hu, Y. (2023). The Influence of Residential Behavior on Dwelling Energy Consumption and Comfort in Hot-Summer and Cold-Winter Zone of China—Taking Shanghai as an Example. *Sustainability*, 15(18), 13686.
<https://doi.org/10.3390/su151813686>
- [81] Sailor, D. J., Muñoz, J. R. (1997). Sensitivity of electricity and natural gas consumption to climate in the U.S.A.: Methodology and results for eight states. *Energy*, 22(10), 987–998.
[https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00034-0)
- [82] Rosenow, J., Cowart, R., Bayer, E., Fabbri, M. (2017). Assessing the European Union’s energy efficiency policy: Will the winter package deliver on “Efficiency First”? *Energy Research & Social Science*, 26, 72–79.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.01.022>
- [83] González-Torres, M., Bertoldi, P., Castellazzi, L., & Pérez-Lombard, L. (2023). Review of EU product energy efficiency policies: What have we achieved in 40 years? *Journal of Cleaner Production*, 421, 138442.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138442>

- [84] European Commission. (2011). Commission Delegated Regulation (EU) No 626/2011 of 4 May 2011 on energy labelling of air conditioners. Official Journal of the European Union, L178, 1–72. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2011/626/oj/eng
- [85] Jakubcionis, M., Carlsson, J. (2017). Estimation of European Union residential sector space cooling potential. Energy Policy, 101, 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.047>
- [86] Alosan MA, Aldali KM. Courtyard design for energy efficiency and thermal comfort: machine learning insights across hot and warm climates. Sci Rep. 2025 Dec 11;15(1):43660. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32297-z>
- [87] International Energy Agency. (2019). The future of cooling in China: Delivering on action plans for sustainable air conditioning. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling-in-china>
- [88] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Thermodynamics: An engineering approach (8th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- [89] ASHRAE. (2021). ASHRAE handbook—fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [90] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2023). Türkiye uzun yıllar sıcaklık ortalamaları ve iklim verileri. Ankara: T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- [91] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). Thermodynamics: An engineering approach (9th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- [92] Hoshina, M., & Okuda, K. (2014). Theoretical and numerical analysis of a heat pump model utilizing Dufour effect. arXiv preprint arXiv:1403.6255.
- [93] European Heat Pump Association. (2022). Heat pump technology and performance trends. Brussels: EHPA.
- [94] Coskun, C. (2019). A time-varying carbon intensity approach for demand-side management strategies with respect to CO₂ emission reduction in the electricity grid. International Journal of Global Warming, 18(1), 3–23. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2019.101768>
- [95] IndexBox. (2025, November 17). Europe’s air conditioning market to reach 106 million units and \$102 billion by 2035. IndexBox Market Intelligence. <https://www.indexbox.io/blog/air-conditioning-machine-europe-market-overview-2024-3/>
- [96] Mobius Market Research. (2024). Crossing the air conditioning gap: And how a policy shift that aligns with the hierarchy of energy needs affects demand growth in developing markets. Mobius Market Research. <https://research.mobiusriskgroup.com/p/crossing-the-air-conditioning-gap>

[97] Turkish Electricity Transmission Corporation (TEİAŞ). (2020). 5- and 10-year (2025–2030) regional connectable capacity report. <https://www.teias.gov.tr/duyurular/elektrik-piyasasi-kanununun-23-maddesi-kapsamindaki-5-ve-10-yillik-2025-2030-bolgesel-baglanabilir-kapasite-raporu>

