









Fotovoltaik termal güneş kolektörlü soğutma sisteminin yaşam döngüsü iklim performansı (LCCP) analizi

Life cycle climate performance (LCCP) analysis of photovoltaic thermal solar collector refrigerating system

Burak Aktekeli^{1,*} , Mustafa Aktaş² , Süleyman Erten³ , Melis Öder⁴ ,
Fatma Nur Erdoğmuş⁵ , Yaren Güven⁶ 

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü 06560, Ankara, Türkiye

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Osmaneli Meslek Yüksekokulu, İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Programı, 11500, Bilecik, Türkiye

^{2,6} Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü 06560, Ankara, Türkiye

^{3,4,5} Nurdil Teknik Soğutma A.Ş., Ahi Evran Organize Sanayi Bölgesi, 06935, Ankara, Türkiye

Öz

Günümüzde teknolojik gelişmeler, iklim değişikliği ve nüfus artış hızına bağlı olarak verimli ve sürdürülebilir enerji sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle dünyadaki enerji talebi ile arzı arasındaki boşluğu giderebilmek için alternatif (yenilenebilir) enerji kaynaklarına yönelme, var olan enerjiyi depolama ve enerjiyi verimli bir şekilde kullanma yollarına gidilmektedir. Enerjinin sürekliliği ve güvenilirliği açısından yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanan, enerji verimliliğini arttıran ve fazla-atık olan enerjiyi depolayan teknolojilerin önemi her zamankinden daha fazla artmaktadır. Endüstri uygulamalarındaki yüksek enerji maliyetleri, enerji depolamalı sürdürülebilir güneş enerjili alternatif uygulamalara olan talebin artmasındaki en büyük etkenlerden biridir. Bu çalışmada, sürdürülebilir yeni bir tip fotovoltaik termal güneş kolektörlü soğutma sisteminin tasarlanması ve Yaşam Döngüsü İklim Performansı (LCCP) analizi yapılması hedeflenmiştir. LCCP analizi sonucunda doğrudan emisyonlar 0.81 kgCO_{2e}, dolaylı emisyonlar 119235.5 kgCO_{2e} ve toplam LCCP emisyonu 119236.3 kgCO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Bu sistem sayesinde ısıtma, enerji depolama ve soğutma işleminin birlikte gerçekleştirildiği sürdürülebilir bir sistem tasarlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Isı pompası, PV/T sistem, Isı depolama, Soğutma, LCCP

1 Giriş

Enerji verimliliği son zamanlarda popüler bir konu haline gelmeye başlamış olup dünyada enerji verimliliği alanında çalışılması gereken konulardan biri de soğuk odalardır. Soğuk odalar yüksek oranda enerji tüketmekte ve bu durum enerji maliyetini önemli derecede etkilemektedir. Soğuk odaların bir diğer önemi ise, depolanan gıdaların soğuk zincirin son halkasındaki tüketiciler tarafından satın alınmadan önce bozulmadan sağlıklı bir şekilde muhafaza edilmesidir. Soğuk odaların tasarımı ve performansı, gıdaların güvenli bir şekilde depolanması ve ekonomik

Abstract

Today, there is need for efficient and sustainable energy systems due to technological developments, climate change and population growth. For this reason, in order to eliminate the gap between energy demand and supply in the world, alternative (renewable) energy sources, storage of existing energy and efficient usage of energy are being used. The importance of technologies that utilize renewable energy sources, increase energy efficiency and store excess-waste energy is increasing more than ever in terms of energy continuity and reliability. The high cost of energy in industrial applications is one of the major factors for the growing demand for sustainable solar alternative applications with energy storage. In this study, it is aimed to design a new type of sustainable photovoltaic thermal solar collector refrigerating system and to perform Life Cycle Climate Performance (LCCP) analysis. Result of the LCCP analysis, direct emissions were calculated as 0,81 kgCO_{2e}, indirect emissions as 119235.5 kgCO_{2e} and total LCCP emission as 119236.3 kgCO_{2e}. Thanks to this system, a sustainable system has been designed where heating, energy storage and refrigerating are carried out together.

Keywords: Heat pump, PV/T system, Heat storage, Refrigerating, LCCP

olarak iyileştirilmesi amacıyla yaşam döngüsü iklim performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle enerji tasarruflu, çevre dostu soğutma sistemlerinin geliştirilmesine ve yüksek performans katsayısına (COP) sahip sürdürülebilir soğutma sistemlerine ihtiyaç vardır.

Choi vd. [1], Güney Kore'de soğutma ve ısıtma sistemlerinin yaşam döngüsü iklim performansını değerlendirmişlerdir. Güney Kore'de mevcut sistem alan soğutma için kullanılmakta olup alan ısıtması için gaz kazanı kullanılmaktadır. Ortalama ısıtma saati 5.183, ortalama soğutma saati 3.583 saat olan bu çalışmada alan ısıtması için

gaz kazanı yerine ısı pompası kullanıldığında CO₂ emisyonlarının %11-17 oranında, enerji maliyetinin ise sırasıyla %12.5-24.3 oranında azaltılabileceğini bulmuşlardır. Bu nedenle ısı pompası kullanımının sadece çevre dostu değil, aynı zamanda ekonomik olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkan kullanıldığında şarj miktarı ve emisyonlar azalmaktadır. R32 ya da R290 soğutucu akışkanı kullanılması durumunda toplam CO₂ emisyonlarının azalacağını belirtmişlerdir. Wan vd. [2], bir klima kullanarak 11 şehirde beş farklı soğutucu akışkan için yaşam döngüsü iklim performansı hesaplama sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda R290 en iyi performansa sahipken R410A en kötü performansa sahip soğutucu akışkan olmuştur. R32, R452B ve R466A'nın yaşam döngüsü iklim performansı değerlerinin birbirine yakın olduğunu ve ortam sıcaklığının artmasıyla bu üç soğutucu akışkanın performansının daha da yaklaştığını bulmuşlardır. Sonuç olarak R290, R32, R452B, R466A'nın R410A için uygun alternatifler olduğu sonucuna vararak düşük emisyon faktörlü ülkelerde R290 kullanılmasıyla yaşam döngüsü iklim performansının %60'a kadar azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Wang ve You [3], R134a, R152a, R1234yf, R1234ze(E) ve R290 soğutucu akışkanlarını kullanan bir toprak kaynaklı ısı pompası sistemini farklı iklim bölgelerinde çevresel performansını incelemişlerdir. İnceleme sonucunda R152a ve R1234ze(E)'nin dört farklı iklim bölgesinde de düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanlar olduğunu bulmuşlardır. Soğutucu sızıntısı oranı, yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanlar üzerinde büyük bir etkiye sahipken, soğutucu akışkan şarjı ise en az etkiye sahiptir. Yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip R134a'nın toplam emisyonları üzerinde soğutucu sızıntısı oranının etkisi büyük olurken; R152a, R1234yf, R1234ze(E) ve R290 soğutucu akışkanlarının üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olmuştur. Choi vd. [4], yaptıkları çalışmada buzdolabı döngü seçeneklerini, yalıtım kaynaklarını ve buzdolabı malzemesini araştırarak buzdolaplarının yaşam döngüsü iklim performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmada R134a'dan daha düşük küresel ısınma potansiyeline ve şarj miktarına sahip olan R600a soğutucu akışkanını kullanmışlardır. Seri, baypas ve paralel devre döngüleri gibi ikili evaporatör döngüleri, gelişmiş enerji tüketimleri sayesinde temel döngüden sırasıyla %2.0, %3.8 ve %7.9 daha düşük CO₂ emisyonları yaratmıştır. Seri çevrimin yıllık enerji tüketimi %2.2, baypas çevrimindeki %4.3 ve paralel çevrimdeki ise %8.9 azalmıştır. Buzdolabının yanlarına, arkasına, üstüne, altına ve kapılarına uyguladıkları vakum yalıtım panelleri ile toplam CO₂ emisyonları %7.7; spiral çelik kondenser yerine spiral alüminyum kondenser kullanılmasıyla toplam CO₂ emisyonları %2-2.5 oranında azalmıştır. Akyüz vd. [5], güneş enerjisi kullanılan bir klima sisteminin yaşam döngüsü değerlendirmesini yapmışlardır. Bu amaçla konut iklimlendirmesinde kullanılan klimaların güneş enerjisiyle desteklenmesi durumunda klimaların enerji tüketimini azaltmaya olan etkisini incelemişlerdir. Ağustos ayında Antalya'da güneş enerjisiyle çalışan bir klima sisteminin

performansını geleneksel klima sistemiyle karşılaştırmışlardır. Aynı hacme ve yalıtım özelliklerine sahip iki oda yapmışlardır. Odalardan birinde klima sisteminde güneş enerjisi desteği kullanılmış, diğerinde ise güneş enerjisi kullanılmamıştır. Soğutucu akışkan olarak R410A kullanmışlardır. Soğutucu akışkan, basınç ve sıcaklık sensörlerini ısıtmak için klima sisteminin kompresör girişine güneş enerjisi ile çalışan bir ısıtıcı eklemişlerdir. Kompresörün giriş sıcaklığının artırılması sayesinde enerji tüketimi %8-28 oranında azalmıştır. Ayrıca konut yapılarında yaz dönemi için önerilen sistemden sağlanan enerji tasarrufunun çevresel etkilerini yaşam döngüsü değerlendirmesi ile incelemişler ve enerji tüketimindeki azalmaya bağlı olarak emisyon değerlerinde %7.74 ile %28.27 arasında azalma gözlemlemişlerdir. İlerideki çalışmalarda kompresör giriş sıcaklığının hangi derecelere yükseltilebileceğinin deneysel ve sayısal olarak çalışılması gerektiğini belirtmişlerdir. Yang vd. [6], ev tipi ısı pompalarında R410A yerine kullanılabilecek düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanların yaşam döngüsü iklim performansı değerlendirmesini yapmışlardır. Küresel ısınma potansiyelleri sırasıyla 300, 200 ve 150 olan R32, R32 ve R1234yf'nin ikili karışımları ile; küresel ısınma potansiyeli değerleri sırasıyla 300 ve 200 olan R32 ve R1234ze(E)'yi R410A ile karşılaştırmışlardır. R32/R1234ze(E) ikili karışımı en düşük yaşam döngüsü iklim performansı değerine sahip olmuştur. Küresel ısınma potansiyeli 300 olan R32/R1234yf ve R32/R1234ze(E) karışımlarının ev tipi ısı pompaları için uygun alternatifler olduğu sonucuna varmışlardır.

Wan vd. [7], iklimlendirme sistemlerinin yaşam döngüsü iklim performansını incelemişlerdir. İnceleme sonucunda bazı bilgilere ulaşmışlardır. Yaşam döngüsü iklim performansı hesaplamaları doğrudan ve dolaylı emisyonların toplamı olup, farklı soğutucu akışkanları kıyaslayarak düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanı belirlemek ve tasarımın çevresel performansını optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Doğrudan emisyonlar yıllık soğutucu akışkan sızıntısından, sistemin ömrünün sonundaki soğutucu akışkan salımından, servis süreci ve kazalardan kaynaklı emisyonlardan oluşur. Dolaylı emisyonlar ise klima sisteminin çalışması, malzeme imalatı, soğutucu akışkan üretimi ve sistemin geri dönüşümü sırasındaki enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlardır. Enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının toplam yaşam döngüsü iklim performansı hesaplamalarının %70-80'ini oluşturmaktadır. Soğutucu akışkanın üretim sürecinden kaynaklanan emisyonlar yaşam döngüsü iklim performansının %1-5'ini oluşturmaktadır olup bu değer yıllık enerji tüketimi ve yıllık sızıntıyla kıyaslandığında küçük bir etkidir. Soğutucu akışkan imalatındaki sera gazı emisyonları genelde ihmal edilebilir seviyededir. Li [8], gıda taşımacılığı soğutması için yaşam döngüsü iklim performansı araştırması yapmıştır. R404A soğutucu akışkanı yerine küresel ısınma potansiyeli daha düşük olan R452A soğutucu akışkanının kullanılmasıyla gıda taşıma soğutma sisteminde emisyonların %5-15 oranında azalabileceğini bulmuştur. Ortam sıcaklığı 32°C'den 15.5°C'ye düşürüldüğünde ise emisyonların taze ürün kasasında %60'a,

dondurulmuş ürün kasasında %39'a kadar azalabileceğini hesaplamıştır. Sızıntı oranının %25'ten %10'a düşürülmesi durumunda ise emisyonların taze ürün kasasında %13, dondurulmuş ürün kasasında %4 azalabileceğini belirtmiştir. Wu vd. [9], elektrikli araçlarda R134a'nın yerini alabilecek soğutucu akışkanları incelemişlerdir. Bu kapsamda hem klima hem de ısı pompası işlemlerinden kaynaklanan emisyonları belirlemek için R134a, R1234yf, R152a, R290, R410A, R32 ve R744 için toplam eşdeğer ısınma etkisi yöntemi analizi yapmışlardır. Analiz sonuçlarına göre R744 ve R410A kullanımı, R134a'ya göre sırasıyla %14.6 ve %3.7 daha fazla eşdeğer CO₂ emisyonuna neden olmuştur. R744, daha yüksek enerji tüketimi ve daha yüksek dolaylı emisyonla sonuçlanan çok düşük bir etkinlik katsayısına sahiptir. R410A ise çok yüksek bir küresel ısınma potansiyeli değerine sahiptir. Küresel ısınma etkisi açısından R744 ve R410A soğutucu akışkanlarının R134a'nın yerini almaya uygun alternatifler olmadığı sonucuna varmışlardır. R290, hem soğutma hem de ısıtma modlarında yüksek etkinlik katsayısı nedeniyle tüm soğutucu akışkanlar arasında toplam eşdeğer CO₂ emisyonunu azaltmada en iyi performansı göstermiştir. Ancak tutuşabilirlik riski, otomotiv sistemlerindeki uygulamalar için büyük endişe arz etmektedir. Benzer zorluklar R152a için de mevcut olup R152a ve R1234yf'nin her ikisi de kışın çok düşük ısıtma kapasitesine sahiptir ve bu da elektrikli araçlarda ilave ısıtma gerektirmektedir. Bu durum sistemin enerji verimliliğini azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda maliyetini de önemli ölçüde artıracaktır. R32'nin küresel ısınma potansiyeli değeri R134a'nın yarısı; toplam eşdeğer ısınma etkisi emisyonu ise R134a'dan %11 daha düşüktür. Sonuç olarak, R32'nin elektrikli araç ısı pompası ve iklimlendirme uygulamaları için güvenli, enerji verimli, uygun maliyetli ve çevre dostu bir soğutucu olduğu kanısına varmışlardır. Suerdem vd. [10], çatı tipi klima soğutucu akışkanlarının gösterdikleri performansı ve çevreyi nasıl etkilediklerini araştırmışlardır. Klimanın soğutma kapasitesini ve enerji

tüketimini sayısal olarak analiz etmek için bir çatı tipi klima modellenmiştir. Çalışmada R410A, R22, R454B, R1234yf, R32, R404A soğutucu akışkanlarını kullanmışlardır. Yaşam döngüsü iklim performansı karşılaştırmasından elde ettikleri sonuca göre R1234yf 51,30 kg CO₂-eşdeğer ile en düşük karbon emisyonuna sahip akışkan olmuştur. En yüksek soğutma kapasitesi 154760.34 W ile R454B kullanılan sistemden, en düşük soğutma kapasitesi ise 76949.94 W ile R1234yf kullanılan sistemden elde edilmiştir. En yüksek soğutucu şarj miktarı 40.8 kg ile R1234yf kullanılan sistemde görülürken, minimum soğutucu şarj miktarı 11.22 kg ile R32 kullanılan sistemden elde edilmiştir. En yüksek enerji verimlilik oranı değeri 3.018 ile R454B'de görülürken, en düşük değer 2.257 R22'de görülmüştür. Soğutucu akışkanların analizinde küresel ısınma potansiyeli değeri yüksek olan R404A ve R410A soğutucu akışkanların diğer soğutucu akışkanlara göre daha fazla çevresel etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir.

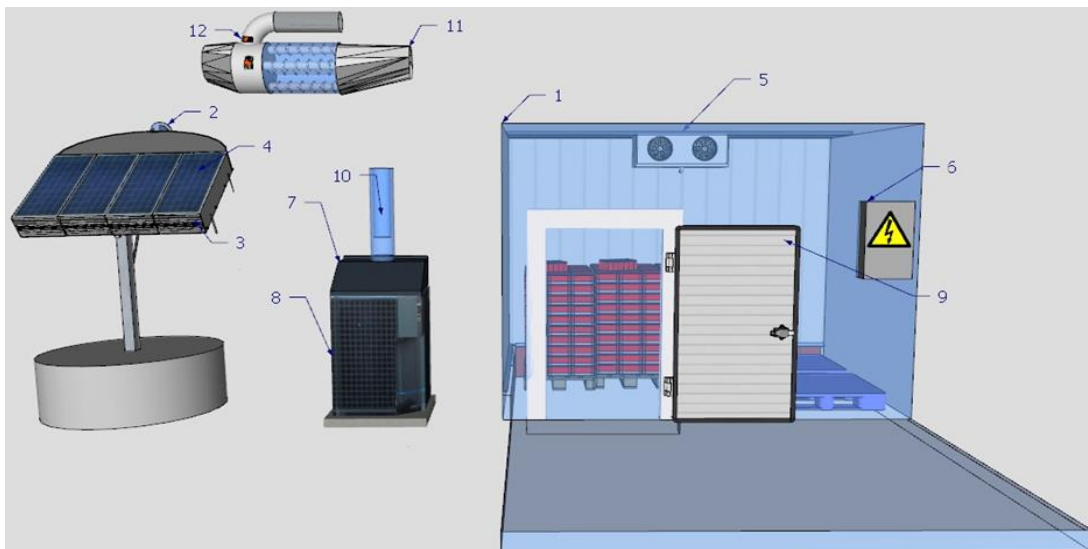
Bu çalışmanın amacı, yüksek COP'ye sahip sürdürülebilir yeni bir tip fotovoltaik termal (PV/T) güneş kolektörlü soğutma sisteminin tasarımının yapılarak analiz edilmesidir. Bu çalışma ile;

- Yeni tip çevre dostu hava soğutmalı PV/T destekli soğutma sistemi tasarımının yapılması,
- Güneş enerjisi sistemi ile bütünleşik soğutma ve ısıtma uygulamasının entegrasyonu,
- Enerji sistemlerinde enerji maliyetlerinin ve küresel ısınmanın etkilerinin azaltılması açısından katkı sağlayacak güneş enerjili yeni bir modelin LCCP analizi ile birlikte ortaya konması,

amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmadaki sistem bileşenleri PV/T sistemi, ısı depolama ünitesi, mikrokanal kondenser ve çift evaporatör kullanılan soğutma sisteminden oluşmaktadır. Sistemin tasarımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



1:Soğuk Oda, 2:PV/T Evaporatör Fan (Sıcak Hava Çıkış), 3:Difüzör Flap (Hava Giriş), 4:PV/T Panel, 5:Evaporatör (Soğuk Oda), 6:Kontrol Panosu, 7:Kondenser, 8:Kompresör, 9:Soğuk Oda Kapısı, 10:Kondenser (Sıcak Hava Çıkış), 11:Isı Depolama Ünitesi, 12:Damper ve Damper Motoru

Şekil 1. Sistem tasarımı

Tablo 1. Sistemde kullanılan ekipmanların özellikleri

Kullanılan Ekipman	Özellikleri
Kondenser Kapasitesi	5 kW
Kondenser Tipi	Mikrokanal Kondenser
Evaporatör (Soğuk Oda) Kapasitesi	3.5 kW
Evaporatör (Soğuk Oda) Tipi	Bakır Borulu Alüminyum Kanatçıklı
Kompresör Gücü	1.5 kW
Kompresör Tipi	Hermetik/Pistonlu/CSCR
Kompresör Deplasman	32.67 cm ³
PV/T Evaporatör Kapasitesi	0.875kW*4 Adet=3.5kW
PV/T Arka Yüzey Kapama / Yalıtımlı Sac Panel	2m ² *4Adet=8m ²
PV/T	1669mm*1002mm*75mm, 600W*4=2400W
Soğuk Oda Hacmi	35m ³
Toplam Fan Gücü	50W*2Adet=100W
Soğutucu Akışkan	R449A
Akümülatör	160Ah*3=480Ah

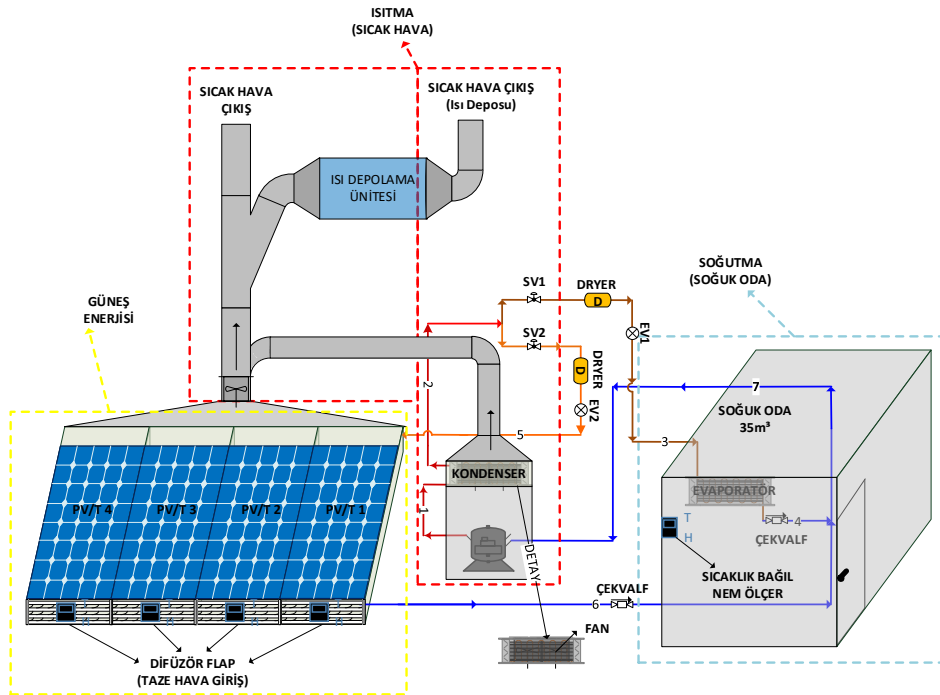
Tasarım çalışmasında, hava kaynaklı PV/T sistemi tasarımı arka yüzeyinde 44 m uzunluğunda yivli bakır borulara sahip evaporatör yapısı bulunmaktadır. PV/T sisteminin arka yüzeyinin yalıtılmış ve sızdırmaz hale getirilmesi de önemlidir. Taze hava, PV/T sisteminin altından akmakta ve bakır borulara temas ederek PV/T sisteminin çıkışındaki mikrokanal yapıdaki kondensere gönderilir. Bu bölümde sistem için gerekli havayı sağlamak amacıyla toplam 100 W gücünde iki adet yüksek verimli fan kullanılmaktadır. Uygulama aşamasında sistemde kullanılacak fanların basınç kaybı ve debi değerlerine göre fan seçimi yapılmalıdır. PV/T'nin arka yüzeyinde akan hava ısınarak ısıtma sistemlerine enerji kaynağı olabilecektir.

Sistemdeki soğuk oda 2°C set değerine ulaştığında, soğutucu akışkan PV/T sisteminin arka yüzeyine konumlandırılmış evaporatöre yönlendirilecektir. Sistemde güç tüketen kompresör ve fanlar için gerekli enerji birbirine seri olarak bağlanmış 4 adet 600 W PV/T panel ve 3 adet 160 Ah akülerden sağlanacaktır. Sistem ekipmanlarında enerji tüketimi olmadığı zaman PV/T panellerden elde edilen

elektrik enerjisine ihtiyaç olduğunda kullanılmak üzere akülerde depolanacaktır. Böylece enerji verimli ve sürdürülebilir bir tasarım çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda kullanılan ekipmanların özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

2.1 Soğutma sistemi detay

Yapılan çalışmada, soğuk oda ve PV/T arka yüzeyine yapıştırılmış çift evaporatörlü sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. PV/T sisteminden elde edilen elektrik ve ısı enerjisi ile ısı pompası sisteminden elde edilen atık ısı sayesinde tasarımı yapılan sistem ekipmanlarının verimli çalışmalarına ve ekipmanların karbon salımının azaltılmasına yönelik yaşam döngüsü iklim performans değeri açısından da çevreci bir tasarım gerçekleştirilmiştir. PV/T sisteminden elde edilecek elektrik enerjisi ile ısı pompası sisteminin enerji ihtiyacı karşılanacaktır. Sistemin ilk önceliği soğuk odanın set edilen sıcaklık değerinde tutulmasını sağlamaktır.



Şekil 2. Isı pompalı enerji depolamalı PV/T sistem şeması

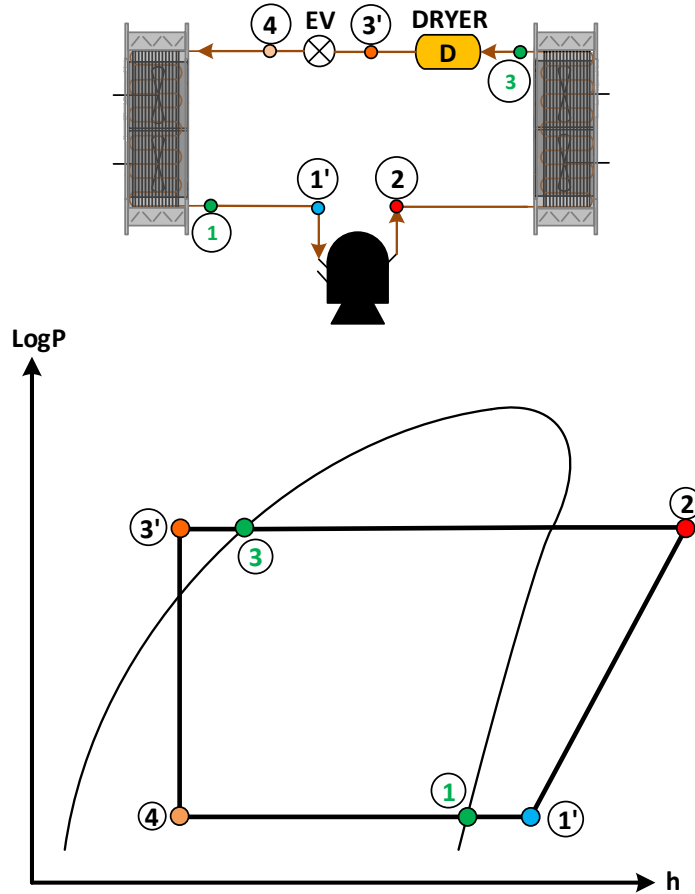
Soğuk oda set edilen sıcaklık değerine ulaştığında bununla beraber akülerin şarj ihtiyacı varsa kompresör kapalı konuma geçerek akülerin doldurulması sağlanacaktır. Böylelikle sistem tasarımı akülerin dolmasına imkan sağlayarak güneş enerjisinin olmadığı saatlerde sistem ekipmanlarının çalışması için gerekli olan enerji ihtiyacı akülerden sağlanmış olacaktır. Sistemde soğuk odanın set değerine gelmesi ve akülerin dolu olması durumunda PV/T evaporatörün devreye girerek PV/T yüzeyinin soğutularak elektriksel verimin artırılması sağlanmış olacaktır. Ayrıca sistemden elde edilen ısı enerjisi gerektiğinde kullanılmak üzere ısı depolama ünitesinde depolanmaktadır. Soğutma sistemi ve sıcak hava akış şeması Şekil 2’de verilmiştir.

Yapılan çalışmada soğutma sisteminin buharlaşma sıcaklığı -10°C , kondenzasyon sıcaklığı $+45^{\circ}\text{C}$, aşırı ısıtma $+8^{\circ}\text{C}$, aşırı soğutma $+5^{\circ}\text{C}$ ve kompresör verimi %75 olarak kabul edilmiştir. Bu şartlar altında soğutma sisteminin

etkinlik katsayısı 2.33 ve II. yasa verimi de %48 olarak hesaplanmıştır. Tüm değerler verilen çalışma koşulları baz alınarak hesaplanmıştır. Bağlantı yerlerinde meydana gelen herhangi bir kütleli debi artışı ya da azalışı dikkate alınmamış olup Şekil 3’te soğutma çevrimine ait logP-h diyagramı, Tablo 2’de ise soğutma sisteminin çalışma parametreleri verilmiştir.

2.2 Sistem enerji şeması

Bu çalışmada 600W’lık 4 adet PV/T sistem birbirine paralel bağlanmıştır. Elektriksel sistemin bir diğer parçası olan akü grubunun da birbirlerine paralel bağlanmak kaydıyla invertöre bağlantısı yapılmıştır. Sistem ekipmanlarının çalışma şartları ve ortam koşullarına göre invertörden elektriksel sistemler için çıkış gerilimi alınarak sistem ekipmanları için gerekli elektriksel çıkış sağlanmıştır. Sistemin elektriksel bağlantısı Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 3. Soğutma çevriminin logP-h diyagramı

Tablo 2. Soğutma sisteminin çalışma parametreleri

Nokta	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Basınç (bar)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kgK)	COP	$\text{COP}_{\text{Carnot}}$	II. yasa verimliliği (%)
1	-10	3.613	393.7	1.746			
1'	-2	3.613	401	1.774			
2	85.8	20.87	461.5	1.822	2.33	4.78	0.48
3	45	20.87	269.2	1.229			
3'	40	20.87	260.6	1.202			
4	-10	3.613	260.6	1.237			

$$COP_{carnot} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (13)$$

$$\eta = \frac{COP}{COP_{carnot}} \quad (14)$$

Yıllık enerji tüketiminin (AEC) standart yıllık enerji tüketimine (SAEC) oranı enerji verimliliği endeksi (EEI) değerini verir [17]:

$$EEI = \frac{AEC}{SAEC} \quad (15)$$

Bu denklemdeki günlük enerji tüketim miktarı aşağıdaki gibi hesaplanır [17]:

$$AEC = E_{günlük} \cdot 365 \quad (16)$$

$$E_{günlük} = [(\dot{W}_{komp} \cdot t_{komp}) + (\dot{W}_f \cdot t_f) + (\dot{W}_{komp} \cdot t_{komp,hg}) + (\dot{W}_{diğer} \cdot t_{diğer})] \quad (17)$$

Denklem (17)'ye göre SAEC aşağıdaki gibi hesaplanır [17]:

$$SAEC = 365 \cdot P \cdot (M + N \cdot Y) \cdot C \quad (18)$$

Denklem (18)'deki SAEC değerini bulmak için M=9.1, N=9.1, C=1.15 ve P=1.1 olarak kabul edilmiştir. Y değeri, soğutma cihazının m² cinsinden toplam alan olarak hesaplanmalıdır [17].

LCCP, cihazın çalışma ömrü boyunca meydana gelen soğutucu akışkan sızıntılarının (doğrudan emisyon) ve cihazın çalışma ömrü boyunca tükettiği elektrik enerjisinin üretim aşamasında meydana gelen CO₂ emisyonlarının (dolaylı emisyon) bir sonucudur.

Çevresel analiz LCCP değerlendirmesine dayanmaktadır. LCCP değeri iki ana parametre değeri ile hesaplanır. Bu parametreler Denklem (19)'da gösterildiği gibi doğrudan ve dolaylı emisyonlardan oluşmaktadır [18].

$$LCCP = \text{Doğrudan Emisyonlar} + \text{Dolaylı Emisyonlar} \quad (19)$$

Doğrudan Emisyonlar (DE), sistemin kullanım ömrü boyunca soğutucu akışkan sızıntısını dikkate alır ve aşağıdaki şekilde hesaplanır [18]:

$$\text{Doğrudan Emisyonlar} = C \times (L \times ALR + EOL) \times (GWP + \text{Adp. GWP}) \quad (20)$$

Burada C, sistemdeki soğutucu akışkan şarj miktarı (kg); L, ekipmanın ortalama ömrü (yıl); ALR, yıllık sızıntı oranı (%); EOL, ömrünü tamamlamış soğutucu akışkan sızıntısı (%); GWP, küresel ısınma potansiyeli (kgCO_{2e}/kg); Adp. GWP, soğutucu akışkanın atmosferik ayrışma ürününün

küresel ısınma potansiyeli değeridir (kgCO_{2e}/kg). Dolaylı emisyonlar sistemin ömür boyu kullanımından oluşur ve aşağıdakileri dikkate alır [18]:

- Elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonlar
- Malzeme üretiminden kaynaklanan emisyonlar
- Soğutucu akışkan üretiminden kaynaklanan emisyonlar
- Ünitinin bertarafından kaynaklanan emisyonlar

Matematiksel olarak, sistemden kaynaklanan Dolaylı Emisyonlar (IE) aşağıdaki gibi ifade edilir [18]:

Dolaylı Emisyonlar

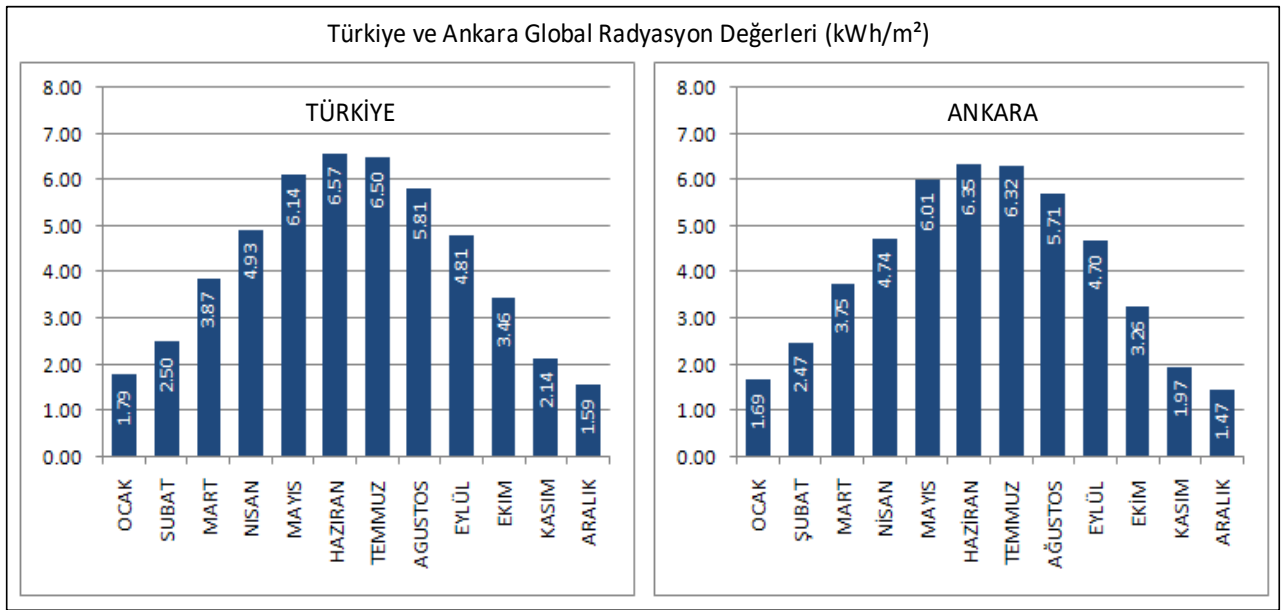
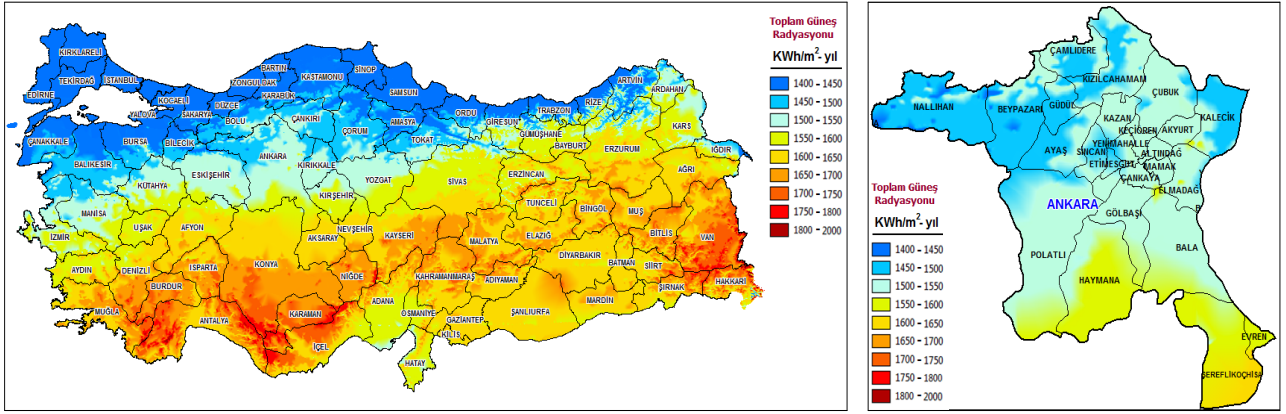
$$= L \times AEC \times EM + \sum (m \times MM) + \sum (mr \times RM) + C \times (1 + L \times ALR) \times RFM + C \times (1 - EOL) \times RFD \quad (21)$$

Burada AEC, yıllık enerji tüketimi (kWh); EM, üretilen CO₂ emisyonu (kgCO_{2e}/kWh); m, soğutucu kütlesi (kg); MM, malzemenin CO₂ üretim emisyonu (kgCO_{2e}/kg); mr, geri dönüştürülmüş malzeme kütlesi (kg); RM, geri dönüştürülmüş malzemenin CO₂ emisyonu (kgCO_{2e}/kg); RFM, soğutucu akışkan üretim emisyonları (kgCO_{2e}/kg); RFD, soğutucu akışkan bertaraf emisyonlarıdır (kgCO_{2e}/kg). Parametrelerin değerleri LCCP kılavuzuna göre alınmıştır [19].

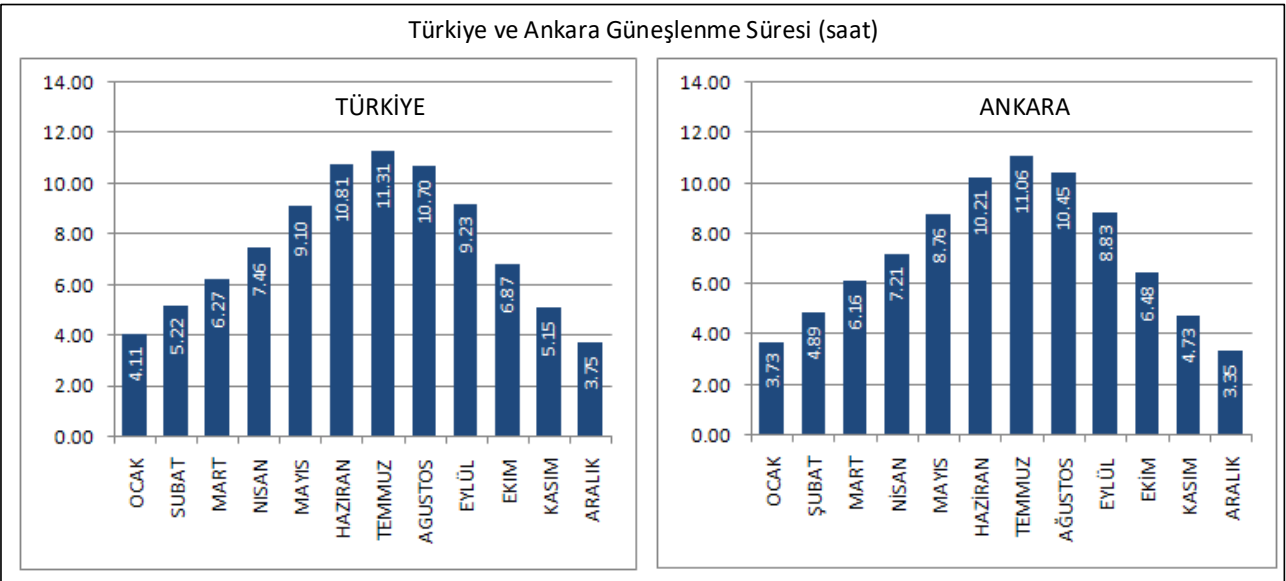
Kullanılan mekanik buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemlerinin LCCP emisyonlarının yaklaşık %80'inden fazlasını dolaylı emisyonlar oluşturur [1]. 2023 yılı Haziran ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; %30.1'i hidroelektrik enerji, %24.2'si doğalgaz, %20.8'i kömür, %11'i rüzgar, %9.7'si güneş, %1.6'sı jeotermal ve %2.6'sı ise diğer kaynaklar şeklindedir [20]. Bu verilere bakıldığında kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların oranının güneş enerjisine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Güneş enerjisi kullanımını teşvik etmek ve fosil yakıt kullanımını azaltmak amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

4 Bulgular

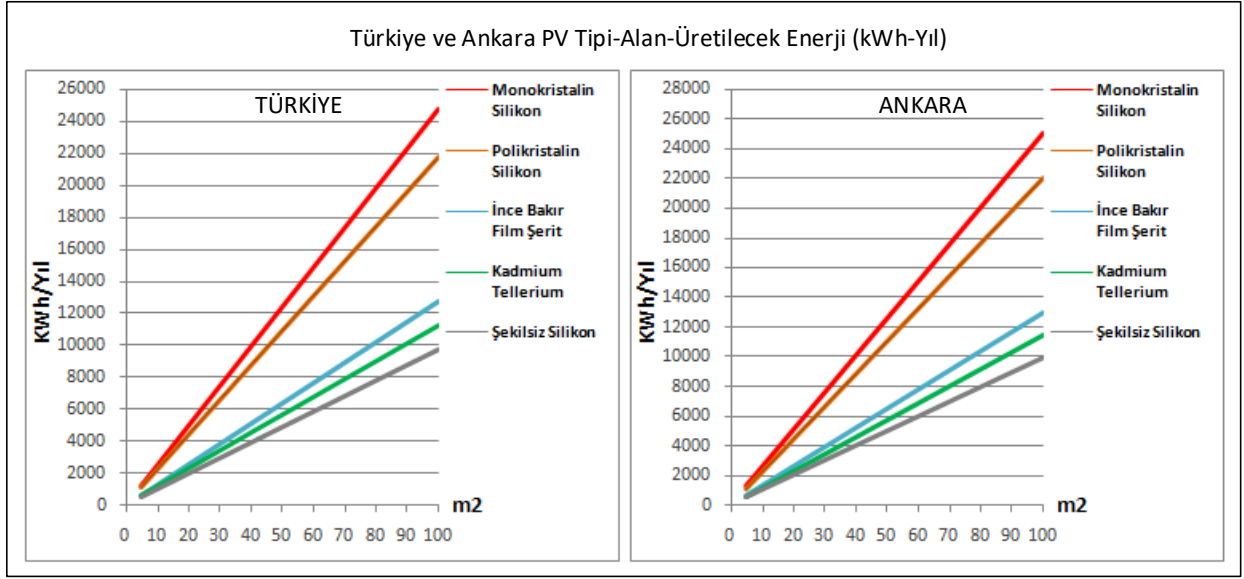
Türkiye Avrupa'ya göre güneşlenme potansiyeli açısından daha elverişlidir. Şekil 5'te Türkiye ve Ankara için güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA) ve güneş radyasyonu dağılımları verilmiştir. Ankara ilinin yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.506 saat ve yıllık ortalama güneş ışınımı 1.389 kWh/m²'dir [21]. Şekil 6'da Türkiye ve Ankara ili için güneşlenme süresi değerleri (saat), Şekil 7'de Türkiye ve Ankara ili için global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) ve Şekil 8'de PV tipi ve alanına göre yıllık üretililecek enerji miktarı (kWh-yıl) verilmektedir. Şekillerde verilen Türkiye'ye ve Ankara'ya ait güneş radyasyonu değerleri, güneşlenme süreleri ve PV türlerine göre üretilen enerji miktarlarına bakıldığında iyi konumda olduğu görülmüştür. Güneş radyasyon değerleri güneyden doğuya gidildikçe ve aylara göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca Temmuz ve Ağustos aylarında güneş radyasyonunda artış gözlemlenmektedir [22].



Şekil 6. Türkiye ve Ankara ili için global radyasyon değerleri (kWh/m²) [23]



Şekil 7. Türkiye ve Ankara ili için güneşlenme süresi değerleri (Saat) [23]



Şekil 8. Türkiye ve Ankara ili için PV tiplerine göre yıllık enerji miktarı (kWh-yıl) [23]

Bu bilgiler ışığında çalışma kapsamında; yeni tip hava soğutmalı yüksek verimli bir PV/T sistemi, yeni tip bütünlük atık ısı depolamalı soğutma sistemi, aynı anda tek bir sistem ile depolama (elektrik ve ısı enerjisi) – soğutma sistemi tasarlanmış ve okuyuculara sunulmuştur.

LCCP sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. R449A soğutucu akışkanı kullanan bir soğuk oda için doğrudan emisyon Denklem (20) kullanılarak 1.362,1 kgCO_{2e}, dolaylı emisyon değeri Denklem (21) kullanılarak 18.401,3 kgCO_{2e}, toplam LCCP emisyon değeri ise Denklem (19) kullanılarak 19.763,4 kgCO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Soğuk oda için (toplam hacmi 35 m³) yıllık salımı gerçekleşen CO₂ miktarı ise m³ başına 564,7 kgCO₂ olarak bulunmuştur.

Tablo 3'teki sonuçlara bakıldığında sürdürülebilir bir sistemin LCCP analizi görülmektedir. PV/T destekli sürdürülebilir sistem ile sıfır emisyonlu güneş enerjisi kaynaklı yeni bir yapı ortaya koyulmuştur. Soğuk odanın yapımında kullanılan panellerin ve aynı zamanda dış ünitenin üretiminden kaynaklı dolaylı emisyonlar enerji verimliliği çalışmaları ile iyileştirilebilir.

Tablo 3. LCCP sonuçları

LCCP Sonuçları	
Soğutucu akışkan	R449A
Toplam yaşam boyu emisyon (kgCO _{2e})	19763.4
Toplam doğrudan emisyon (kgCO _{2e})	1362.1
Adp. GWP (kgCO _{2e})	-
Toplam dolaylı emisyonlar (kgCO _{2e})	18401.3
m ³ başına CO ₂ emisyonu (kgCO _{2e} /m ³)	564.7

Soğutma sistemlerinin toplam emisyonlarının azaltılabilmesi için sadece düşük KIP ve ODP değerlerine sahip soğutucu akışkanlar ve düşük soğutucu akışkan şarj miktarına sahip sistemlerin kullanılması yeterli olmamaktadır. LCCP analizi sonucunda sistemin dolaylı emisyon değerlerinin yüksek olmasındaki en fazla pay sahibi parametrelerinden biri soğutma sisteminin yıllık enerji tüketimidir. Bu emisyonların azaltılabilmesi yenilenebilir

enerji kaynaklarının kullanımı ile mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, gerekli enerjiyi şebekeden bağımsız olarak güneş enerjisinden üreten hibrit yapıdaki soğutma sistemi ile çevreye salınan emisyon miktarı azaltılarak sürdürülebilir bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak kendi enerjisini kendi üreten soğutma sistemlerinin yaygınlaştırılması ayrıca üretilen enerjinin akülerde depolanması, atık ısı kullanımı, hibrit sistem sayesinde panellerin soğutulması verimlerinin artırılması ile sürdürülebilir bir geleceğe katkı sağlayacaktır.

5 Sonuçlar

İlerleyen zamanlarda dünyada enerji talebindeki artışın yanı sıra enerjinin verimli kullanımı ve enerji arzı açısından sıkıntı yaratması beklenen çevresel faktörler de enerjinin kullanımı ve sürdürülebilirliğinde önemli bir etken olacaktır. Dolayısıyla iklimlendirme ve soğutma sistemlerinin tasarımı yapılırken alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasının yanında enerjinin en verimli şekilde kullanılması ve atık ısının depolanarak değerlendirilmesi sistem tasarımlarında ana hedef olmalıdır. Bu kapsamda sistem tasarımında kullanılacak ekipmanların optimum sistem parametrelerinin belirlenmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Fotovoltaik güneş kolektörlü soğutma sisteminde kullanılabilecek ekipmanlar ve soğutucu akışkanın seçiminde, sistemin çalışma yükü ve soğutma etkinlik katsayısı dikkate alınmalıdır.

Literatürde LCCP analizi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yıldız ve Yıldırım [24], R134a'nın LCCP emisyon değerini 21438.32 kgCO₂, R513A'nın LCCP emisyon değerini 21761.14 kgCO₂ olarak bulmuşlardır. Yıldırım vd. [25], R404A'nın LCCP emisyon değerinin 24740 kgCO₂ ile 12370 kgCO₂ arasında değişirken, R454C'nin LCCP emisyon değerinin 24053 kgCO₂ ile 12370 kgCO₂ arasında değiştiğini bulmuşlardır. Yıldız ve Yıldırım [26], yaptıkları başka bir çalışmada R134a, R1234yf ve R513A'nın bir ısı pompasında soğutucu akışkan

olarak kullanılmasını araştırmışlar ve R134a'nın LCCP emisyon değerini 46061 kgCO₂, R513A'nın LCCP emisyon değerini 39412 kgCO₂, R1234yf'nin LCCP emisyon değerini ise 38166 kgCO₂ olarak bulmuşlardır.

Bu tasarımda sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Tasarımın alternatif enerji kaynaklarının ülkemizdeki en yüksek potansiyellerinden biri olan güneş enerjisi ile çalışması ve bununla beraber kontrol sistemlerinin oluşturulması, sistemin sürdürülebilir olmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra sistemden elde edilen atık ısının depolanıp sistem ihtiyaçlarına uygun kullanılması sistemin daha verimli çalışmasını sağlayacaktır.
- PV/T sistemde gerçekleştirilen tasarım sayesinde PV/T optimum çalışma şartlarına yaklaştırılarak sistemin güneşten elde edeceği enerji miktarı arttırılacaktır.
- Soğutma sistemlerinde en önemli önceliklerden bir tanesi sistemin sürekliliğinin sağlanarak soğuk oda depolarında saklanan ürünlerin soğuk zincirlerinin bozulmamasını sağlamaktır. Kendi enerjisini üretebilen ve dış ortam şartlarının ısı pompası sistemi üzerindeki etkilerini ortadan kaldıracak bir tasarım yapılmıştır.
- R449A soğutucu akışkanı kullanan bir soğuk oda için doğrudan emisyon 1.362,1 kgCO_{2e}, dolaylı emisyon değeri 18.401,3 kgCO_{2e}, toplam LCCP emisyon değeri ise 19.763,4 kgCO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Bu sayede büyük oranda CO₂ salımının önüne geçilebilecektir.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla beraber, hibrit çevreci sistemlerin arttırılması ve geleceğe daha temiz bir dünya bırakılması bu çalışmanın temelini oluşturarak tasarımın LCCP analizi de ortaya konmuştur. Soğutma endüstrisinde soğuk odaların yüksek enerji tüketmesinden dolayı enerji tasarruflu sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma sayesinde soğutma endüstrisine yenilenebilir enerji kaynaklı ve enerji depolamalı sürdürülebilir bir soğuk oda tasarımı sunulmuştur.
- LCCP analizi kapsamında R290 soğutucu akışkanı için de hesaplamalar yapılmıştır. Soğuk oda tasarımında doğal soğutucu akışkanlar arasında en yaygın olarak kullanılan R290 soğutucu akışkanının kullanılması durumunda; doğrudan emisyon 0,6 kgCO_{2e}, dolaylı emisyon 18.400,3 kgCO_{2e}, toplam LCCP emisyon değeri ise 18.400,8 kgCO_{2e} olarak hesaplanmıştır. R449A yerine R290 soğutucu akışkanı kullanıldığında %6,9 oranında CO₂ salımının önüne geçileceği öngörülmüştür. Soğuk oda için R290 soğutucu akışkanı kullanılması durumunda da (toplam hacmi 35 m³) yıllık salımı gerçekleşen CO₂ miktarı ise m³ başına 525,7 kgCO₂ olarak bulunmuştur.

Teşekkür

Çalışmaya verdikleri katkılardan dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Proje Kodu: FDK-2022-7868) teşekkür ederiz.

Ayrıca Nurdil Teknik Soğutma A.Ş.'ye de çalışmaya verdikleri katkılardan dolayı teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] S. Choi, J. Oh, Y. Hwang and H. Lee, Life Cycle Climate Performance Evaluation (LCCP) on Cooling and Heating Systems in South Korea, Applied Thermal Engineering, 120, 88-98, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.105>
- [2] H. Wan, T. Cao, Y. Hwang, R. Radermacher and S. Chin, Comprehensive Investigations on Life Cycle Climate Performance of Unitary Air-Conditioners, International Journal of Refrigeration, 129, 332-341, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.-2021.04.033>
- [3] F. Wang and T. You, Comparative Analysis on the Life Cycle Climate Performance of Ground Source Heat Pump Using Alternative Refrigerant, Case Studies in Thermal Engineering, 42, 102761, 2023. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4263765>
- [4] S. Choi, Y. Jung, Y. Kim, H. Lee and Y. Hwang, Environmental Effect Evaluation of Refrigerator Cycle With Life Cycle Climate Performance. International Journal of Refrigeration, 122, 134-146, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.-2020.10.032>
- [5] A. Akyüz, R. Yıldırım, A. Güngör, A. D. Tuncer, Experimental Investigation of a Solar-Assisted Air Conditioning System: Energy and Life Cycle Climate Performance Analysis, Thermal Science and Engineering Progress, 43, 101960, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101960>
- [6] C. Yang, S. Seo, N. Takata, K. Thu and T. Miyazaki, The Life Cycle Climate Performance Evaluation of Low-GWP Refrigerants for Domestic Heat Pumps, International Journal of Refrigeration, 121, 33-42, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.09.-020>
- [7] H. Wan, T. Cao, Y. Hwang, R. Radermacher, S. O. Andersen and S. Chin, A Comprehensive Review of Life Cycle Climate Performance (LCCP) for Air Conditioning Systems, International Journal of Refrigeration, 130, 187-198, 2021. <http://dx.doi.-org/10.1016/j.ijrefrig.2021.06.026>
- [8] G. Li, Comprehensive Investigation of Transport Refrigeration Life Cycle Climate Performance, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 21, 33-49, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.seta.-2017.04.002>
- [9] J. Wu, G. Zhou and M. Wang, A Comprehensive Assessment of Refrigerants for Cabin Heating and Cooling on Electric Vehicles, Applied Thermal Engineering, 174, 115258, 2020. <https://doi.-org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115258>
- [10] K. Suerdem, T. Taner, Ö. Açıkgöz, A. S. Dalkılıç and H. Panchal, Performance of Refrigerants Employed in Rooftop Air-Conditioners, Journal of Building

- Engineering, 70, 106301, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106301>
- [11] M. Sardarabadi, M. Hosseinzadeh, A. Kazemian and M. P. Fard, Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PVT) from energy and exergy viewpoints, Energy, 138, 682-695, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.046>
- [12] Y. A. Çengel ve M. A. Boles, Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla, Güven Kitabevi, İzmir, 2008.
- [13] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley Sons, New York, 303-577, 2003.
- [14] M. Mohanraja, Y. Belyayevb, S. Jayarajc and A. Kaltayev, Research and Developments on Solar Assisted Compression Heat Pump Systems-A Comprehensive Review (Part A: Modeling and Modifications), Renewable and Sustainable Energy Reviews, 83, 90-123, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.022>
- [15] M. Aktaş, M. Koşan, E. Arslan and A. D. Tuncer, Designing a Novel Solar-Assisted Heat Pump System with Modification of A Thermal Energy Storage Unit, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 233, 588-603, 2019. <https://doi.org/10.1177/09576-50919847934>
- [16] M. Aktaş, S. Erten, E. Demirci, E. Kılıç and F. N. Erdoğan, Studies on Increasing Energy Efficiency and Reducing Environmental Impacts in Industrial Cooling Systems with Direct Sales Function, Iksad Publications, Ankara, 49-99, 2021.
- [17] M. Koşan, E. Arslan, S. Erten, F. N. Erdoğan and M. Aktaş, Determination of Defrost Efficiency and Energy Efficiency Index Value Using Different Defrost Methods and Refrigerants: An Experimental Study, Science and Technology for the Built Environment 28, 1012-1023, 2022. <https://doi.org/10.1080/23744731.2022.2076504>
- [18] H. Lee, S. Troch, Y. Hwang and R. Radermacher, LCCP Evaluation on Various Vapor Compression Cycle Options and Low GWP Refrigerants, International Journal of Refrigeration 70, 128-137, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.003>
- [19] International Institute of Refrigeration. Guideline for Life Cycle Climate Performance, International Institute of Refrigeration, 3-25, 2016.
- [20] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, (Erişim Tarihi: 31.07.2023).
- [21] S. Şensoy, Y. Ulupınar, M. Demircan, I. Alan and P. A. Bostan, Modeling Solar Energy Potential in Turkey, BALWOIS 2010, Ohri, Republic of Macedonia, 1-10, 25-29 May 2010.
- [22] S. Şevik, Isı Pompası ve Güneş Kolektörünün Birlikte Kullanıldığı, Isıtma ve Kurutma Amaçlı Sıcak Hava Üretim Sisteminin Tasarımı, İmalatı ve Deneysel İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2011.
- [23] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (Erişim Tarihi: 11.08.2023).
- [24] A. Yıldız ve R. Yıldırım, R134a'ya Alternatif Bir Soğutucu Akışkan (R513A) Kullanan Buhar Sıkıştırma Soğutma Sistemlerinin Enerji ve Çevresel Analizi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8, 1817-1828, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.690197>
- [25] R. Yıldırım, K. Kumaş ve A. Ö. Akyüz, Soğutma Sisteminde R404A Yerine R454C Soğutucu Akışkanın Kullanılmasının İncelenmesi: Enerji ve Çevresel Analizi, Teknik Bilimler Dergisi, 11, 47-51, 2021. <https://doi.org/10.35354/tbed.951070>
- [26] A. Yıldız and R. Yıldırım, Investigation of Using R134a, R1234yf and R513A as Refrigerant in A Heat Pump, International Journal of Environmental Science and Technology, 18, 1201-1210, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02857-z>

