

MAKALE

SÜRDÜRÜLEBİLİR SOĞUTMA UYGULAMALARINDA DÜŞÜK GWP'LI ALTERNATİF SOĞUTKANLARIN YAPAY ZEKA İLE SEÇİMİ

Selection of Low GWP Alternative Refrigerants with
Artificial Intelligence in Sustainable Refrigeration Applications

Altay ARBAK, Hasan ACÜL, Deniz YILMAZ, Kadir İSA, Zeynep Gökçen AŞAN

Bu makale, 16-19 Nisan 2025 tarihinde gerçekleştirilen 16. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi (TESKON 2025) kapsamında gerçekleştirilen Soğutma Teknolojileri Sempozyumu'nda sunulmuş ve bildiri kitabında yayınlanmıştır.

HAKEMLER*

A. İbrahim ATILGAN, Dr.
Abdülvahap YİĞİT, Prof. Dr.
Ahmet CAN, Prof. Dr.
Ali GÜNGÖR, Prof. Dr.
Arif HEPBAŞLI, Prof. Dr.
Aytunç EREK, Prof. Dr.
Bedri YÜKSEL, Prof. Dr.
Dilek KUMLUTAŞ, Prof. Dr.
Fırat ÖZDEMİR, Dr. Öğretim Üyesi
Fikret PAZIR, Prof. Dr.
Hüsamettin BULUT, Prof. Dr.
Hüseyin BULGURCU, Doç. Dr.
İlhan Tekin ÖZTÜRK, Prof. Dr.

İsmail KARAÇALI, Prof. Dr.
Kadir İSA, Dr.
M. Barış ÖZERDEM, Prof. Dr.
M. Turhan ÇOBAN, Prof. Dr.
Macit TOKSOY, Prof. Dr.
Mehmet KANOĞLU, Prof. Dr.
Moghtada MOBEDİ, Doç. Dr.
Muhsin KILIÇ, Prof. Dr.
Mustafa ACAR, Prof. Dr.
Olca KINCAY, Prof. Dr.
Orhan BÜYÜKALACA, Prof. Dr.
Özay AKDEMİR, Dr. Öğr. Üyesi.
Özgür SOLMAZ, Dr. Öğr. Üyesi

Ramazan KÖSE, Prof. Dr.
Rasim KARABACAK, Prof. Dr.
Recep YAMANKARADENİZ, Prof. Dr.
Selami KESLER, Prof. Dr.
Serhan KÜÇÜKA, Prof. Dr.
Tuncay YILMAZ, Prof. Dr.
Turan ERKAN
Utku ŞENTÜRK, Doç. Dr.
Y. Onur DEVRES, Prof. Dr.
Yunus ÇERÇİ, Prof. Dr.

**Alfabetik olarak sıralanmıştır.
Makale/Makaleler, kurulda yer alan ve
değerlendirme yapmak üzere seçilen
hakemler tarafından incelenmiştir.*



HAKEMLİ MAKALE ARŞİVİMİZE
ULAŞMAK İÇİN OKUTUNUZ.

BİLİMSEL MAKALE ARŞİVİMİZE
ULAŞMAK İÇİN OKUTUNUZ.



ÖZET

Soğutucu akışkanların minimum çevresel etki ile optimize edilmesi, iklim değişikliğinin ele alınması ve enerji verimliliğinin artırılması için çok önemlidir. Yapay Zekâ (AI), gelişmiş yaşam döngüsü analizi ve karbon ayak izi hesaplamaları yoluyla bu bağlamda dönüştürücü yetenekler sunmaktadır. Bu makale, yaşam döngüsü etkilerini analiz ederek ve modelleyerek soğutucu akışkanların çevresel performansını iyileştirmek için yapay zekadan nasıl yararlanılabileceğini araştırmaktadır. Veri analitiği, tahmine dayalı simülasyonlar, optimizasyon algoritmaları ve gerçek zamanlı izleme dahil olmak üzere yapay zekâ teknolojileri, düşük küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip soğutucu akışkanların tanımlanmasını ve uygulanmasını önemli ölçüde geliştirebilir. Paydaşlar, yapay zekâ odaklı karar destek sistemlerini entegre ederek, çevresel faydaları teknik ve ekonomik hususlarla dengeleyen bilinçli seçimler yapabilirler. Bu çalışma, yapay zekanın yenilenebilir ve düşük GWP'li soğutucu akışkanlara geçişteki kritik rolünü vurgulamakta ve soğutma ve soğutma teknolojilerinde sürdürülebilir uygulamaları destekleme potansiyeline ilişkin içgörüler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Soğutucu akışkanlar, Çevresel etkiler, Yapay zeka, Enerji verimliliği.

ABSTRACT

The optimization of refrigerants with minimal environmental impact is crucial for addressing climate change and enhancing energy efficiency. Artificial Intelligence (AI) offers transformative capabilities in this context through advanced lifecycle analysis and carbon footprint calculations. This paper explores how AI can be leveraged to improve the environmental performance of refrigerants by analyzing and modelling their lifecycle impacts. AI technologies, including data analytics, predictive simulations, optimization algorithms, and real-time monitoring, can significantly enhance the identification and implementation of refrigerants with low global warming potential (GWP). By integrating AI-driven decision support systems, stakeholders can make informed choices that balance environmental benefits with technical and economic considerations. This study highlights the critical role of AI in transitioning to renewable and low-GWP refrigerants, offering insights into its potential to support sustainable practices in refrigeration and cooling technologies.

Key Words: Refrigerants, Environmental impacts, Artificial intelligence, Energy efficiency.

1. GİRİŞ

Küresel ısınma ve iklim değişikliği, çevresel sürdürülebilirlik konularının önemini her geçen gün artırmaktadır. Sanayi, ticaret ve konut sektörlerinde enerji tüketiminin önemli bir kısmı soğutma sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Geleneksel soğutma sistemlerinde kullanılan soğutkanların çoğu yüksek Küresel Isınma Potansiyeline (GWP) sahip olup, atmosfere salındığında sera gazı etkisi yaratarak küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Bu nedenle, düşük GWP'li alternatif soğutkanların kullanımı, sürdürülebilir soğutma uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır.

Ancak, düşük GWP'li soğutkanlar arasında optimum seçimi yapmak hem çevresel hem de sistem performansı açısından birçok faktörün dikkate alınmasını gerektirir. Bu noktada, yapay zeka teknikleri, çoklu kriter değerlendirmesi ve optimizasyon süreçlerinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışmada, sürdürülebilir soğutma uygulamaları için düşük GWP'li alternatif soğutkanların seçiminde yapay zekanın nasıl kullanılabileceği ele alınacaktır.

Düşük GWP'li soğutkanlar üzerine yapılan çalışmalar, genellikle iki ana başlık altında toplanmaktadır: çevresel etkiler ve sistem performansı. Çevresel etkiler açısından, soğutkanların ozon tabakasına zarar verici potansiyeli (ODP) ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) değerlendirilmektedir. Örneğin, HFC (hidroflorokarbon) soğutkanlar düşük ODP'ye sahip olmasına rağmen yüksek GWP'ye sahiptir. Bu durum, soğutma sistemlerinde kullanılacak alternatiflerin belirlenmesinde bir ikilem yaratmaktadır. Düşük GWP'li alternatifler arasında hidrokarbonlar (HC), amonyak (NH₃), karbondioksit (CO₂) ve HFO (hidrofloroolefin) türevleri yer almaktadır. Bu soğutkanlar daha düşük çevresel etkiye sahip olmakla birlikte, yanıcılık, toksisite ve sistem tasarımı gibi teknik zorluklar da barındırmaktadır.

Sistem performansı açısından, soğutkanların termodinamik özellikleri ve enerji verimliliği ön plandadır. Enerji tüketimi, özellikle sıcak iklimlerde, soğutma sistemlerinin toplam çevresel etkisini belirleyen kritik bir faktördür. Literatürde, düşük GWP'li soğutkanların enerji verimliliğini artıran ve çevresel etkiyi azaltan özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, her soğutkanın farklı çalışma şartlarına ve sistem tasarımına göre değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Yapay zeka teknikleri, düşük GWP'li soğutkanların seçimi ve optimizasyonu konusunda giderek daha fazla →

kullanılmaktadır. Özellikle makine öğrenmesi, çoklu kriterli karar verme (MCDM) ve genetik algoritmalar gibi yöntemler, kompleks sistemlerde optimum çözümlerin bulunmasında etkin rol oynamaktadır. Literatürde, bu yöntemlerin soğutkan seçimi, enerji verimliliği optimizasyonu ve sistem performansı analizinde başarıyla uygulandığı görülmektedir. Gelecekte, bu alanda daha fazla veri tabanlı çalışma ve yapay zeka destekli modelleme ile düşük GWP'li soğutkan seçiminde daha kesin ve etkili çözümler üretilmesi beklenmektedir.

İlgili konuda yapılan araştırmalar, düşük GWP'li (Küresel Isınma Potansiyeli düşük) soğutkanların yapay zeka kullanılarak seçimi ve performans analizi üzerine yoğunlaşmaktadır. Örneğin, R1234yf gibi düşük GWP'li soğutkanların, mevcut R134a gibi yüksek GWP'li soğutkanlara alternatif olarak kullanımı araştırılmış ve çevresel etkileri ile termodinamik performansları incelenmiştir. Bu çalışmalarda yapay zeka ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak uygun soğutkan seçimi ve sistem tasarımı yapılmıştır.

Bazı çalışmalarda, R290 (propan) ve çeşitli düşük GWP karışımlarının, R410A gibi yaygın olarak kullanılan soğutkanlara alternatif olarak incelendiği ve bu soğutkanların çevresel ve termodinamik performanslarının değerlendirildiği görülmüştür. Bu çalışmalar genellikle simülasyonlar ve deneysel analizlerle desteklenmektedir.

Örneğin, R290 ve R410A karışımlarının performansı üzerine yapılan sayısal analizlerde, bu karışımların verimliliği ve çevresel etkileri değerlendirilmiş ve sonuçlar geleneksel soğutkanlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu tür çalışmaların çoğunda, yapay zekâ destekli yöntemler kullanılarak en uygun karışım oranlarının belirlenmesi ve sistem optimizasyonu yapılmıştır.

Bu alandaki araştırmalar, düşük GWP'li soğutkanların enerji verimliliği, çevresel etki ve güvenlik gibi kriterler açısından incelenmesi ve gelecekteki soğutma sistemleri için potansiyel alternatiflerin belirlenmesine odaklanmaktadır [1-3].

Bu çalışmada sektörde yoğun olarak kullanılan belli başlı soğutucu gazlar seçilerek, bu gazların termodinamik özellikleri ve kullanım yerlerine bağlı olarak yapay zeka ile seçimi üzerine bir araştırma yapılmıştır.

2. ÇALIŞILAN SOĞUTUCU GAZLARIN ÖZELLİKLERİ

Çalışma için sektör içerisinde yoğun olarak kullanılan soğutucu akışkanlar araştırılmış ve belli başlı gazlar

belirlenmiştir. Seçilen soğutucu gazların özellikleri kısaca şu şekildedir;

R1234yf (2,3,3,3-Tetrafloropropen), otomotiv klima sistemlerinde R134a'ya alternatif olarak tasarlanmış, düşük Küresel Isınma Potansiyeline (GWP) sahip bir soğutucu akışkandır. Yaklaşık 4 olan GWP değeri ile R134a'nın 1430 olan GWP değerine kıyasla önemli ölçüde daha düşük bir çevresel etkiye sahiptir. Sıfır Ozon Tüketme Potansiyeline (ODP) sahip olması nedeniyle ozon tabakasına zarar vermez. Hafif yanıcı bir madde olup A2L sınıfında yer almakta ve düşük yanıcılık özelliği taşımaktadır. Soğutma kapasitesi ve enerji verimliliği açısından R134a ile benzer bir performansa sahiptir. Kimyasal stabilitesi yüksek olup kimyasal bozulmaya karşı dayanıklıdır ve uzun süreli kullanım için uygundur. Çevresel düzenlemeler ve performans avantajları nedeniyle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak benimsenmiştir.

R1234ze(E) (trans-1,3,3,3-Tetrafloropropen), R134a ve diğer yüksek Küresel Isınma Potansiyeline (GWP) sahip soğutucu akışkanların yerine kullanılan düşük GWP'li bir soğutucu akışkandır. Yaklaşık 6 olan GWP değeri ile çevre dostu bir seçenek olup, sıfır Ozon Tüketme Potansiyeline (ODP) sahiptir ve ozon tabakasına zarar vermez. Yanıcı olmayan bir madde olarak A2L sınıfında yer almakta ve düşük yanıcılık özelliği taşımaktadır. Yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği termal kararlılık sayesinde ısı pompaları ve diğer soğutma uygulamaları için uygun bir bileşiktir. Orta sıcaklıkta soğutma, soğutucular ve iklimlendirme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük çevresel etkisi ve geleneksel soğutucu akışkanlara benzer performans özellikleri nedeniyle değerli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

R454B, klima ve ısı pompası uygulamalarında R410A'nın yerine kullanılmak üzere düşük Küresel Isınma Potansiyeline (GWP) sahip bir soğutucu akışkan olarak tasarlanmış olup, R32 ve R1234yf bileşenlerinden oluşan bir karışımdır. Yaklaşık 466 olan GWP değeri ile R410A'nın 2088 olan GWP değerine kıyasla çok daha düşük bir çevresel etkiye sahiptir. Bileşimi, %68,9 R32 ve %31,1 R1234yf içerecek şekilde belirlenmiştir. Güvenlik sınıflandırması A2L olup, düşük toksisiteye sahip ve hafif yanıcı bir madde olarak değerlendirilir. Performans açısından incelendiğinde, R410A ile karşılaştırılabilir enerji verimliliği ve soğutma kapasitesi sunarak çevresel etkiyi azaltmaktadır. Genellikle daha düşük GWP değerine sahip alternatifler için tasarlanmış yeni sistemlerde tercih edilmektedir.



R454C, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde R404A ve R22'ye düşük Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) alternatifi olarak geliştirilmiş, R32 ve R1234yf bileşenlerinden oluşan bir karışım soğutucu akışkandır. Yaklaşık 148 olan GWP değeri ile geleneksel soğutucu akışkanlara kıyasla çevresel etkisi önemli ölçüde düşüktür. Bileşimi %21,5 R32 ve %78,5 R1234yf içerecek şekilde tasarlanmıştır. A2L güvenlik sınıflandırmasına sahip olup düşük toksisite ve hafif yanıcılık özellikleri gösterir. Performans açısından incelendiğinde, R404A ile benzer soğutma kapasitesi ve verimlilik sunarken, daha düşük çevresel etkiye sahiptir. Ticari soğutma sistemlerinde ve küçük ölçekli ısı pompalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

R455A, R404A gibi yüksek Küresel Isınma Potansiyeline (GWP) sahip soğutucu akışkanlara alternatif olarak geliştirilen düşük GWP'li bir soğutucu akışkan karışımıdır. Yaklaşık 148 olan GWP değeri, R404A'nın 3922 olan GWP değerine kıyasla çok daha düşük olup çevresel etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bileşimi, %75,5 R1234yf, %21,5 R32 ve %3 R744 (CO₂) içerecek şekilde belirlenmiştir. A2L güvenlik sınıflandırmasına sahip olup, düşük toksisite ve hafif yanıcılık özellikleri göstermektedir. Ticari dondurucular ve soğutucular gibi düşük ve orta sıcaklıktaki soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Performans açısından, R404A ile benzer verimlilik ve kapasite sunarken, çok daha düşük çevresel etki sağlamaktadır.

R448A, Solstice® N40 olarak da bilinen ve R404A ile R22 gibi yüksek Küresel Isınma Potansiyeline (GWP) sahip soğutucu akışkanların yerine kullanılmak üzere tasarlanmış, ozon tabakasına zarar vermeyen bir soğutucu akışkan karışımıdır. Yaklaşık 1273 olan GWP değeri, R404A'nın 3922 olan GWP değerine kıyasla önemli ölçüde daha düşüktür. Bileşimi R32, R125, R1234yf, R134a ve R1234ze içerecek dengeli bir termodinamik performans sağlamaktadır. A1 güvenlik sınıflandırmasına sahip olup yanıcı değildir ve düşük toksisite özelliği taşımaktadır. Süpermarket sistemleri, soğuk odalar ve nakliye soğutması gibi ticari soğutma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. R404A'ya kıyasla gelişmiş enerji verimliliği ve benzer soğutma kapasitesi sunarak çevresel etkiyi azaltmaya yardımcı olmakta ve mevcut sistemlerin güçlendirilmesi için tercih edilen bir seçenek olmaktadır.

R449A, Opteon™ XP40 olarak da bilinen ve ticari ile endüstriyel soğutma sistemlerinde R404A ve R22'ye alternatif olarak geliştirilmiş düşük Küresel Isınma Potansiyeline (GWP) sahip bir soğutucu akışkan karışımıdır. Yaklaşık 1282 olan GWP değeri, R404A'nın 3922 olan GWP değerine kıyasla önemli ölçüde daha

düşük olup çevresel etkisini azaltmaktadır. Bileşimi R32, R125, R1234yf ve R134a içerecek dengeli bir termodinamik performans sunmaktadır. A1 güvenlik sınıflandırmasına sahip olup yanıcı değildir ve düşük toksisite özelliği taşımaktadır. Süpermarket soğutması, nakliye soğutması ve endüstriyel uygulamalar gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. R404A'ya benzer bir çalışma aralığı sunarak iyi enerji verimliliği ve yüksek soğutma kapasitesi sağlamaktadır.

R452A, modern bir soğutucu akışkandır ve özellikle klima sistemlerinde kullanılmaktadır. Kimyasal yapısı, difluorometan (R32) ve pentafluoropropan (R125) karışımından oluşmakta olup, bu karışım genellikle %65 R32 ve %35 R125 oranında bulunmaktadır. Ozon tahribat potansiyeli 0 olan R452A, ozon tabakasına zarar vermemekte; küresel ısınma potansiyeli ise yaklaşık 1,394 değeriyle, sera gazı etkisinin CO₂'ye göre ölçüsünü yansıtmaktadır. Bu değer, R404A gibi eski soğutuculara göre daha düşük olsa da, CO₂'ye kıyasla hala daha yüksek bir etki göstermektedir. Enerji verimliliği açısından, R452A, R404A'ya yakın performans sergileyerek düşük enerji tüketimi ve yüksek verim sağlamaktadır. Sıvı ve gaz fazında geniş bir operasyonel sıcaklık aralığı sunması, çeşitli uygulamalarda esneklik sağlamaktadır. Yangın tehlikesinin düşük ve toksik etkilerinin sınırlı olması, ancak yine de uygun güvenlik önlemlerinin alınmasının gerekliliği göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle ticari ve endüstriyel soğutma sistemleri, soğutucular ve klima sistemlerinde tercih edilen R452A, ozon tabakasını korumaya katkıda bulunarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olan verimli bir soğutma çözümü sunmaktadır.

R290 (Propan), soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir soğutucu akışkan olup, kimyasal formülü C₃H₈ olan bir hidrokarbondur. Ozon tahribat potansiyeli (ODP) 0 olup, ozon tabakasına zarar vermez. Küresel ısınma potansiyeli (GWP) yaklaşık 3 olup, diğer birçok soğutucu akışkana kıyasla oldukça düşük bir sera gazı etkisine sahiptir. Yüksek enerji verimliliği sağlayarak soğutma sistemlerinde üstün performans göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda sıvı hale gelmesi, soğutma sistemlerinde verimli kullanımını sağlarken, sivilaşma basıncının diğer soğutuculara göre daha yüksek olması nedeniyle sistem tasarımında dikkat edilmesi gerekmektedir. Yanıcı bir gaz olması nedeniyle sızıntılara karşı hassasiyet gösterilmesi, uygun havalandırma ve güvenlik önlemlerinin alınması önemlidir. Ticari ve endüstriyel soğutma sistemleri, küçük ev tipi soğutucular ve bazı klima sistemlerinde kullanılmaktadır. Çevre dostu yapısı ve yüksek enerji verimliliği nedeniyle tercih edilen bir soğutucu akışkan →

olup, yanıcılığı sebebiyle uygun güvenlik tedbirleri gerektirmektedir.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada, yapay zekanın bir alt dalı olan makine öğrenmesi üzerine ağırlıklı çalışılmış ve bu alanın temel prensipleri, uygulama alanları ve yöntemleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Makine öğrenmesi, modern veri analizinde önemli bir yer tutmakta ve yapay zekanın işlevselliğini artıran en kritik araçlardan biri olarak görülmektedir.

Makine öğrenmesi, makinelerin doğrudan programlama olmaksızın verilerden öğrenmesini sağlayan bir yöntemler bütünüdür. Bu alan, büyük veri kümelerini analiz ederek belirli kalıpları öğrenme, bu öğrenimleri genelleme ve gelecekteki verilere uygulanabilir çözümler üretme yeteneğine dayanır. Makine öğrenmesi algoritmaları, sistemlerin adaptasyon yeteneğini artırır ve veriye dayalı karar alma süreçlerini optimize eder. Bu algoritmalar, genellikle denetimli öğrenme (etiketli verilerle çalışma), denetimsiz öğrenme (etiketsiz verilerdeki yapıları keşfetme) ve pekiştirmeli öğrenme (deneme-yanılma yoluyla öğrenme) gibi farklı kategorilere ayrılır.

Soğutma sistemlerinin tasarım, analiz ve arıza tespiti süreçlerinde makine öğrenmesi yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu, sistemlerin performansını artırmak, enerji tüketimini optimize etmek ve operasyonel verimliliği yükseltmek açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Tasarım aşamasında, makine öğrenmesi algoritmaları, geçmiş verilerden ve mevcut mühendislik standartlarından öğrenerek daha verimli sistemlerin oluşturulmasını mümkün kılar. Analiz süreçlerinde, sensörlerden toplanan büyük veri setlerini işleyerek soğutma sistemlerinin enerji tüketimi, yük dengelemesi ve çevresel koşullara uyumu gibi parametreler optimize edilir. Arıza tespiti aşamasında ise, makine öğrenmesi modelleri, sistemdeki anormal davranışları tespit ederek potansiyel arızaları önceden tahmin eder ve bu sayede kesinti süreleri ile bakım maliyetlerini minimize eder. Özellikle, anormal veri noktalarını tespit etmek için kullanılan gözetimsiz öğrenme algoritmaları ve arıza olasılıklarını belirlemek için kullanılan gözetimli öğrenme modelleri, soğutma sistemlerinde etkin bir şekilde uygulanmaktadır.

Çalışmada kullanılmak üzere seçilen gazlar ve özellikleri aşağıdaki tabloda listelenmiştir.

Tablo 1. Seçilmiş soğutucu gazların özellikleri

Soğutucu Gaz	Kaynama Noktası (°C)	Kritik Sıcaklık (°C)	Kritik Basınç (bar)	GWP	ODP	Güvenlik Sınıfı
1234yf	-29,48	94,7	33,82	4	0	A2L
1234ze(E)	-18,97	190,36	36,34	6	0	A2L
454B	-50,9	78,1	52,67	466	0	A2L
454C	-45,55	85,66	43,18	146	0	A2L
455A	-52,02	85,61	46,53	146	0	A2L
448A	-45,9	72,1	37,3	1387	0	A1
449A	-46	80,1	44,1	1397	0	A1
452A	-31	74,9	40,0	2140	0	A1
R290 (Propan)	-42,11	96,74	42,51	3	0	A3

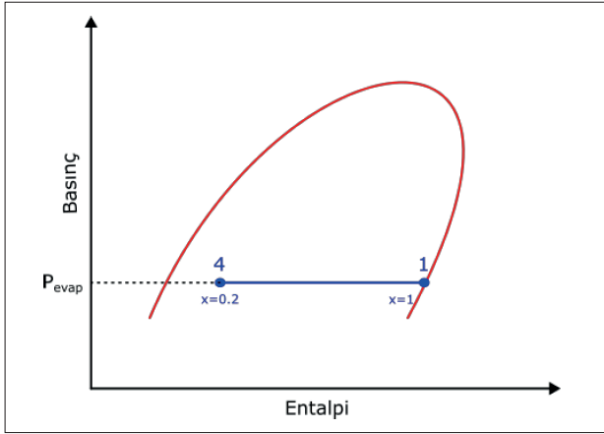
Bu çalışmada, soğutucu akışkan seçimi iki temel kriter gerektirilmektedir: Enerji Analizi ve Çevresel Analiz. Bu iki kriter, sistemin performansını hem termodinamik hem de çevresel etkiler açısından optimize etmeyi amaçlamaktadır. Hesaplamalar yapılırken Python programlama dili kullanılmış ve soğutucu akışkanların termodinamik özellikleri için Refprop kütüphanesinden yararlanılmıştır [4]. Analizler, -40°C ile 0°C arasında gerçekleştirilmiştir.

Enerji Analizi

Enerji analizi kapsamında, farklı soğutucu akışkanların performansı temel termodinamik prensipler çerçevesinde bir evaporatör üzerinden incelenmiştir. Bu analizde, her bir soğutucu akışkan için P-h diyagramı kullanılarak sabit basınç altında buharlaşma olayı değerlendirilmiş ve 4-1 noktaları arasındaki entalpi farkı hesaplanarak sistemin soğutma kapasitesi belirlenmiştir.

Analiz sırasında, farklı buharlaşma sıcaklıkları çığ noktası (dew point) esaslı olarak ele alınmış ve buharlaşma basınçlarının hesaplanmasında kullanılmıştır.

Çığ noktası (dew point) esaslı hesaplamalar, sistemin gerçek çalışma koşullarına daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamakta ve termodinamik analizlerin doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca, soğutucu akışkanın evaporatöre girişinde belirli bir kuruluk derecesi ile girmesi, sistemin performansını doğrudan etkileyen bir faktör olup, bu çalışma kapsamında kuruluk derecesi sabit bir değer olan 0.2 olarak kabul edilmiştir. Bu değer, evaporatör içerisindeki faz değişimini analiz etmek ve akışkanın buharlaşma sürecini modellemek açısından kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 1. P-h diyagramı

Sistemde kullanılan kompresör, sabit hacimsel debi prensibi ile çalışan bir model olup, hesaplamalarda bu prensip temel alınmıştır. Kompresör için hacimsel debi değeri (\dot{V}) 17.1 m³/h olarak belirlenmiş ve bu parametre, sistemin genel soğutma kapasitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Evaporatör çıkışındaki doymuş buharın yoğunluğu (ρ) hesaplandıktan sonra, elde edilen değerler kullanarak soğutucu akışkanın sistemdeki kütleli debisi kg/s cinsinden hesaplanmıştır. Kütleli debi hesaplamaları, sistemin verimli çalışmasını sağlayan önemli bir faktör olup, farklı soğutucu akışkanların performansını karşılaştırmak açısından önemli bir kriterdir.

Bu analiz, farklı soğutucu akışkanların termodinamik performanslarını belirlemek, enerji verimliliklerini karşılaştırmak ve daha düşük çevresel etkiye sahip alternatif akışkanların uygulanabilirliğini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Sonuçlar, alternatif soğutucu akışkanların mevcut

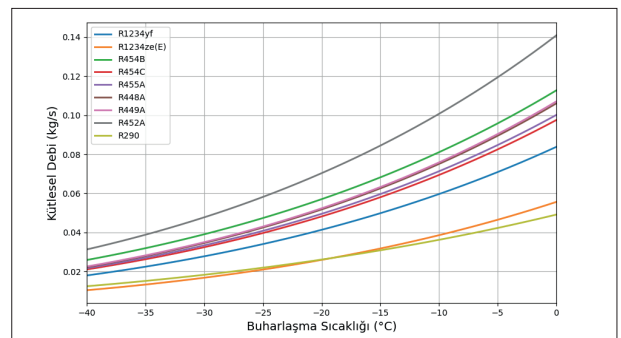
sistemler içerisindeki etkisini değerlendirme ve çevresel etkileri azaltarak sürdürülebilir soğutma çözümleri geliştirme açısından önemli veriler sağlamaktadır.

$$\dot{m}_r = \frac{\rho \times \dot{V}}{3600} \quad (1)$$

Şekil 2'de farklı soğutucu akışkanların kütleli debisinin buharlaşma sıcaklığına bağlı değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, tüm soğutucu akışkanlar için kütleli debinin buharlaşma sıcaklığı arttıkça yükseldiği gözlemlenmektedir. Bu eğilim, artan sıcaklıklarla birlikte akışkanın yoğunluk değişimi ve faz dengesi koşullarının etkisiyle açıklanabilir.

Grafikte dikkat çeken önemli bir nokta, R452A'nın tüm sıcaklık aralıklarında en yüksek kütleli debi değerlerine sahip olmasıdır. Bu durum, akışkanın yoğunluğunun diğer alternatiflere kıyasla daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Buna karşılık, R290 ve R1234ze(E), tüm sıcaklık aralıklarında en düşük kütleli debi değerlerini sergileyen akışkanlardır. Bu eğilim, düşük yoğunluğa sahip akışkanların, sabit hacimsel debi altında daha düşük kütleli debi göstermesiyle ilişkilendirilebilir.

R448A ve R449A akışkanları, geniş sıcaklık aralığında oldukça benzer kütleli debi değerleri göstermekte olup, kimyasal yapıları ve termodinamik özellikleri göz önüne alındığında birbirine alternatif olabilecek akışkanlar arasında değerlendirilebilir. Bu iki akışkan, kütleli debi açısından neredeyse örtüşen eğriler sergilemekte olup, farklı sıcaklık koşullarında benzer performans göstermektedir.



Şekil 2. Soğutucu akışkanların kütleli debi-buharlaşma sıcaklığı grafiği.

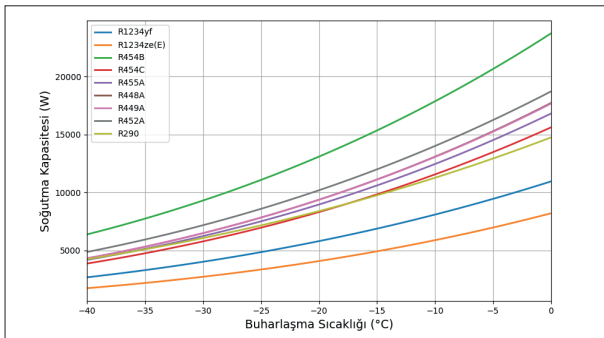
Şekil 3'te, farklı soğutucu akışkanların soğutma kapasitesinin buharlaşma sıcaklığına bağlı değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, tüm soğutucu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı arttıkça soğutma kapasitesinin de yükseldiği gözlemlenmektedir. Bu eğilim, daha yüksek sıcaklıklarda akışkanın entalpi farkının artması ve dolayısıyla daha fazla ısı geçişi ile ilişkilidir.

Soğutma kapasitesi, Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmış olup, kütleli debi ile entalpi farkının çarpımıyla belirlenmektedir.

$$\dot{Q} = \dot{m}_r (h_1 - h_4) \quad (2)$$

Soğutma kapasitesi açısından değerlendirildiğinde, R454B'nin diğer akışkanlara kıyasla en yüksek soğutma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, akışkanın yüksek buharlaşma entalpisi ve yoğunluk özelliklerinden kaynaklanmaktadır. R454B, özellikle yüksek kapasite gerektiren endüstriyel soğutma uygulamalarında avantaj sağlayabilecek bir akışkan olarak değerlendirilebilir.

R1234yf ise en düşük soğutma kapasitesine sahip akışkanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, akışkanın düşük buharlaşma entalpisi ve yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. R1234yf'in özellikle otomotiv sektöründe mobil soğutma uygulamalarında tercih edilmesinin nedeni, düşük çevresel etki ve karbon ayak izine sahip olmasıdır. Ancak, yüksek kapasite gerektiren uygulamalar için daha verimli alternatiflerin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 3. Soğutma kapasitesi-buharlaşma sıcaklığı grafiği

R290 ve R1234ze(E), düşük kütleli debiye sahip olmalarının yanı sıra, soğutma kapasitesi açısından da en düşük değerlere sahip akışkanlar olarak öne çıkmaktadırlar. Bu iki akışkan, özellikle düşük kapasiteli sistemlerde veya doğal soğutucu alternatiflerinin tercih edildiği uygulamalarda kullanılabilir.

Genel olarak, grafik incelendiğinde soğutma kapasitesinin, akışkanın termodinamik özelliklerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Belirli bir soğutucu akışkanın seçiminde sadece kütleli debi değil, aynı zamanda soğutma kapasitesinin de göz önünde bulundurulması gerektiği ortaya çıkmaktadır. R454B gibi yüksek kapasiteli akışkanlar, büyük ölçekli endüstriyel uygulamalar için daha uygun olabilirken, R1234yf ve R290 gibi akışkanlar, daha küçük ölçekli veya çevresel etkileri minimize etmeye yönelik uygulamalarda tercih edilebilir. Bununla birlikte, R448A ve R449A gibi benzer performansa sahip akışkanlar, alternatif seçenekler olarak değerlendirilebilir.

Çevresel Analiz

Toplam Eşdeğer Isınma Etkisi (Total Equivalent Warming Impact - TEWI), bir soğutma veya iklimlendirme sisteminin küresel ısınmaya olan toplam etkisini ölçmek için kullanılan bir yöntemdir [5]. Bu hesaplama, sistemin çalışması sırasında ortaya çıkan sera gazı emisyonlarını ve kullanım ömrü boyunca soğutucu akışkan sızıntılarından kaynaklanan doğrudan emisyonları dikkate alır. Ayrıca, kullanılan elektrik enerjisi üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonlar da TEWI analizine dahil edilir.

TEWI hesaplaması iki ana bileşenden oluşur:

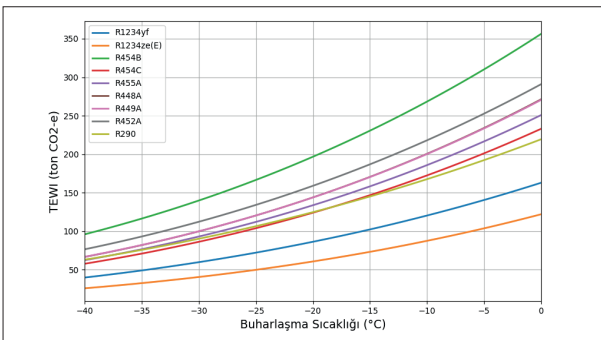
Doğrudan Emisyonlar: Soğutucu akışkanın sızıntı veya sistemin kullanım ömrü sonunda geri kazanılamaması sonucu atmosfere salınması.

Dolaylı Emisyonlar: Sistemin çalışması için gerekli elektrik enerjisinin üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ emisyonları. Bu yöntem, yeni soğutma ve iklimlendirme sistemlerinin çevresel etkilerini tasarım aşamasında değerlendirmek ve farklı teknik çözümler arasından seçim yaparken bilinçli kararlar alınmasını sağlamak için kullanılır. Ayrıca, enerji tüketimini azaltarak küresel ısınma potansiyelini (GWP) düşürmek ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için rehberlik eder. TEWI, özellikle endüstriyel, ticari ve ev tipi uygulamalarda sistem performansının çevresel etkilerini karşılaştırmak için etkili bir araçtır. Eşitlik 3'te TEWI değerinin hesaplama formülü verilmiştir.

$$TEWI = GWP_{100\text{yıl}} \times L_a \times n + GWP_{100\text{yıl}} \times m_r \times (1 - \alpha) + E_a \times n \times \beta \quad (3)$$

Bu denklem, hem doğrudan (soğutucu akışkan kaynaklı) hem de dolaylı (enerji tüketimi kaynaklı) sera gazı emisyonlarını dikkate alarak bir sistemin toplam çevresel etkisini değerlendirmek için kullanılır. Burada L_a , yıllık soğutucu akışkan sızıntı oranını belirlerken n sistemin toplam kullanım ömrünü (yıl cinsinden) gösterir. Sızıntı oranı %4 ve sistem ömrü 15 yıl olarak alınmıştır. Sistemdeki soğutucu akışkan kütlelerini ifade eden m_r değeri kW soğutma kapasitesi başına 0.28 kg alınmıştır. α , soğutucu akışkanın geri kazanım oranını belirtir ve bu çalışmada 0 kabul edilmiştir. Enerji tüketimi ile ilişkili parametrelerden E_a sistemin yıllık enerji tüketimini gösterirken, β ise kullanılan enerjinin eşdeğer karbon emisyon faktörünü ifade eder. β 0.6261 kg CO₂e/kWh olarak alınmıştır [6].

Şekil 4, farklı soğutucu akışkanlar için Toplam Eşdeğer Küresel Isınma Etkisi (TEWI) değerlerinin buharlaşma sıcaklığına bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. TEWI, doğrudan emisyonlar (soğutucu akışkanın atmosfere salınımı) ve dolaylı emisyonlar (sistem çalışırken tüketilen enerjinin sebep olduğu emisyonlar) olmak üzere iki temel bileşenden oluşur. Bu nedenle, bir soğutucu akışkanın çevresel etkisini değerlendirirken yalnızca GWP (Küresel Isınma Potansiyeli) değil, aynı zamanda enerji tüketimi de göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4. TEWI değerleri

Grafikte, tüm soğutucu akışkanlar için TEWI değerlerinin sıcaklık arttıkça yükseldiği net bir şekilde gözlemlenmektedir. Bunun temel sebebi, daha yüksek sıcaklıklarda soğutma sisteminin daha fazla enerji tüketmesi ve dolayısıyla dolaylı emisyonların artmasıdır. Düşük sıcaklıklarda sistemin enerji tüketimi daha düşük olduğundan, TEWI değerleri de nispeten daha düşük seviyelerde seyretmektedir.

R1234yf, tüm sıcaklık aralıklarında en düşük TEWI değerlerine sahip olup, çevresel açıdan en avantajlı seçeneklerden biri olarak görülmektedir. Düşük GWP değerine sahip olması ve enerji tüketiminin görece düşük olması, onu sürdürülebilir bir alternatif haline getirmektedir. R1234ze(E) de benzer şekilde düşük TEWI değerleri sunarak çevre dostu alternatifler arasında yer almaktadır. Ancak enerji tüketimi açısından bazı dezavantajları olabilir.

R454B ve R452A, grafikte en yüksek TEWI değerlerine sahip soğutucu akışkanlar olarak dikkat çekmektedir. Bu akışkanlar, yüksek doğrudan ve dolaylı emisyon seviyeleri nedeniyle çevresel etkileri en fazla olan seçenekler arasındadır. R448A ve R449A, orta seviyelerde bir TEWI değerine sahiptir. Bu iki akışkan, karışım bazlı formülasyonları nedeniyle geniş sıcaklık aralığında stabil performans sergileyebilirler. Ancak, doğrudan emisyonlar açısından değerlendirildiğinde, çevresel etkileri tamamen ihmal edilemez.

R290 (Propan), nispeten düşük TEWI değerleri sunmaktadır. Düşük GWP'si ve iyi enerji verimliliği sayesinde çevresel sürdürülebilirlik açısından iyi bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Ancak, yanıcılık özelliği nedeniyle uygulamalarda özel güvenlik önlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. TEWI değerlerinin azaltılması için iki temel faktör ön plana çıkmaktadır. Birincisi, düşük GWP değerine sahip soğutucu akışkanların kullanılmasıdır. Bu, doğrudan emisyonların azaltılmasını sağlar. İkincisi ise enerji verimliliği yüksek sistemlerin tercih edilmesidir. Daha az enerji tüketen sistemler, dolaylı emisyonları düşürerek TEWI'yi azaltır.

Grafikte görüldüğü gibi R1234yf ve R1234ze(E), düşük TEWI değerleriyle en çevreci alternatifler arasında yer alırken, R454B ve R452A gibi yüksek TEWI değerine sahip soğutucu akışkanlar çevresel etkileri açısından dezavantajlıdır. R290 gibi doğal soğutucu akışkanlar, hem düşük GWP hem de iyi enerji verimliliğiyle sürdürülebilir çözümler sunabilmektedir.

Bu analiz, soğutma sistemlerinde düşük karbon ayak izi hedefleyen uygulamalar için hangi soğutucu akışkanların daha uygun olduğunu belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan ve yüksek enerji verimliliğine sahip sistemlerle birleştirildiğinde, düşük TEWI değerine sahip soğutucu akışkanların kullanımı çevresel açıdan büyük faydalar sağlayacaktır.

Makine Öğrenmesi

Sürdürülebilir soğutma sistemlerinde düşük Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) değerine sahip soğutucu akışkanların seçimini optimize etmek amacıyla makine öğrenmesi tabanlı bir model geliştirilmiştir. Bu model, soğutma kapasitesi, çevresel etki (TEWI) ve güvenlik kriterlerini bir araya getirerek çok kriterli bir karar destek sistemi olarak tasarlanmıştır. Modelin temel amacı, çevresel sürdürülebilirliği artırırken sistem performansını optimize etmek ve güvenlik faktörlerini göz önünde bulundurarak en uygun soğutucu akışkan alternatiflerini sunmaktır.

Modelin eğitilmesi için, her bir soğutucu akışkanın belirli çalışma sıcaklık aralığında (-40°C ile 0°C arasında) soğutma kapasiteleri ve TEWI değerleri önceden hesaplanmıştır. Böylece model, farklı çalışma koşullarında sistem performansını tahmin edebilecek şekilde oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra, ASHRAE 34 standardına göre belirlenen güvenlik sınıfı (A1, A2L, A3) ve yanıcılık skoru (0: yanıcı değil, 1: hafif yanıcı, 3: yüksek yanıcı) gibi güvenlik kriterleri de veri setine entegre edilmiştir. Bu sayede, yalnızca performans ve çevresel etki değil, aynı zamanda işletme güvenliği açısından da uygun seçeneklerin belirlenmesi sağlanmıştır.

Soğutma kapasitesi ve TEWI değerlerini tahmin etmek amacıyla Gradyan Artırma Regresyonu (Gradient Boosting Regresyon XGBoost) algoritması kullanılmıştır. XGBoost, yüksek doğruluk oranı, regülarizasyon teknikleri sayesinde aşırı öğrenmenin önlenmesi ve karmaşık ilişkileri modelleme yeteneği nedeniyle tercih edilmiştir. Bu algoritma, çok büyük veri setleri üzerinde hızlı çalışabilmesi ve eksik verilerle başa çıkabilmesi gibi avantajlara sahip olup, soğutucu akışkan seçiminde güçlü tahminler yapabilmektedir. Modelin girdileri arasında çalışma sıcaklığı, yanıcılık skoru ve güvenlik sınıfı yer alırken, çıktılar normalize edilmiş soğutma kapasitesi ve TEWI değerleridir. Normalize edilen bu değerler, daha sonra gerçek değerlere dönüştürülerek kullanıcıya anlamlı bir karşılaştırma sunulmuştur [7-9].

Çok kriterli optimizasyon sürecinde, NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, aynı anda birden fazla hedef fonksiyon üzerinde optimizasyon yapabilme yeteneğine sahip olup, özellikle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. NSGA-II, soğutma kapasitesini maksimize ederken, TEWI ve yanıcılık riskini minimize etmeyi hedeflemiştir. Böylece, çevresel etki, enerji verimliliği ve güvenlik faktörleri dikkate alınarak optimum çözümler elde edilmiştir. Optimizasyon sürecinde bazı güvenlik kısıtlamaları uygulanmıştır. Örneğin, seçilen soğutucu akışkanın güvenlik sınıfı A3 olmamalı ve yanıcılık

skoru 2'yi aşmamalıdır. Bu kısıtlamalar, yüksek yanıcılığa sahip soğutucu akışkanların seçim dışı bırakılmasıyla güvenli bir sistem tasarımını garanti altına almayı amaçlamaktadır.

Algoritmanın parametreleri arasında 100 bireylik popülasyon, 50 nesil, SBX (Simulated Binary Crossover) çaprazlama ve PM (Polynomial Mutation) mutasyon operatörleri yer almaktadır. Bu parametreler, algoritmanın daha geniş bir çözüm uzayını keşfetmesine ve en uygun çözümleri belirlemesine olanak tanımaktadır [10,11].

Bu yaklaşım, soğutma sistemlerinde enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği artırırken, güvenlik standartlarını da göz önünde bulundurarak optimum bir karar verme süreci sunmaktadır. Özellikle düşük GWP değerine sahip soğutucu akışkanların kullanımı, karbon ayak izini azaltma noktasında kritik bir rol oynamaktadır. Makine öğrenmesi tabanlı bu model, sektördeki mühendislerin ve karar vericilerin en uygun soğutucu akışkanları seçmesine yardımcı olacak güçlü bir araç olarak değerlendirilmelidir.

SONUÇ

Bu çalışma, farklı sıcaklık aralıklarında, yanıcılık seviyeleri ve güvenlik sınıfları dikkate alınarak en uygun soğutucu akışkanın belirlenmesine odaklanmıştır. Geleneksel yöntemlerin ötesine geçerek, yalnızca termodinamik performansı değil, aynı zamanda çevresel etkileri de göz önünde bulunduran kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Soğutucu akışkanların seçiminde, soğutma kapasitesinin yanı sıra toplam eşdeğer ısınma etkisi (Total Equivalent Warming Impact - TEWI) dikkate alınmış ve düşük küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip akışkanlar ön plana çıkarılmıştır. Böylece çevre dostu alternatiflerin belirlenmesi sağlanmıştır.

Elde edilen sayısal sonuçlar, makine öğrenmesi tabanlı bir modelin geliştirilmesi için temel teşkil etmiştir. Bu model, Gradyan Artırma Regresyonu (Gradient Boosting Regresyon XGBoost) algoritması kullanılarak eğitilmiş ve test edilmiştir. XGBoost'un tercih edilme sebebi, karmaşık veri setleri üzerinde yüksek doğruluk sağlayabilmesi ve değişkenler arasındaki ilişkileri etkili bir şekilde öğrenebilmesidir. Eğitim sürecinde, soğutucu akışkanların fiziksel ve çevresel özellikleri veri setine dahil edilerek modelin bu değişkenler arasındaki karmaşık bağlantıları anlaması sağlanmıştır. Bu sayede model, yeni soğutucu akışkan alternatifleri için de güvenilir tahminler üretebilir hale getirilmiştir.

Model, çok kriterli optimizasyon (NSGA-II) algoritması ile desteklenmiş olup, farklı parametreler arasında

optimal dengeyi sağlayan Pareto optimal çözümler sunmaktadır. Özellikle soğutma kapasitesini maksimize ederken, TEWI değerini ve yanıcılık riskini minimize edecek şekilde optimize edilmiştir. Bu süreçte, enerji tüketiminin TEWI üzerinde baskın bir faktör olduğu gözlemlenmiştir. Yani, soğutma kapasitesi yüksek olan akışkanların TEWI değeri de genellikle yüksek çıkmaktadır.

Aşağıdaki tabloda farklı senaryolara göre belirlenen en uygun soğutucu akışkanlar sunulmaktadır.

Tablo 1. Farklı Senaryolar için En İyi Soğutkanlar

Sıcaklık (°C)	Güvenlik Sınıfı	Yanıcılık Durumu	Seçilen Soğutkan
-30	A1	Yanıcı Değil	R449A
-20	A2L	Hafif Yanıcı	R1234ze(E)
-10	A3	Yüksek Yanıcı	R290
-5	A1	Yanıcı Değil	R448A
0	A2L	Hafif Yanıcı	R1234ze(E)

Tabloda seçilen senaryolar için sonuçlar ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Farklı sıcaklık seviyelerinde belirlenen soğutkanlar, güvenlik sınıfları ve yanıcılık durumları dikkate alınarak seçilmiştir.

Düşük sıcaklıklarda (-30 °C ve -5 °C), endüstriyel uygulamalarda güvenliği ön planda tutan ve yanıcı olmayan A1 sınıfı soğutkanlar tercih edilmiştir. Orta sıcaklıklarda (-20 °C ve 0 °C), düşük TEWI değerine sahip olan hafif yanıcı A2L sınıfı soğutkan R1234ze(E) ön plana çıkmıştır. Yüksek yanıcılığa sahip A3 sınıfındaki R290 ise, -10 °C sıcaklık seviyesinde düşük TEWI değeri ve çevresel avantajları nedeniyle öne çıkmıştır. Ancak, yanıcılık riski taşıyan soğutkanların kullanımı sırasında güvenlik önlemlerinin dikkatle planlanması gerekmektedir.

Yapılan analizler sonucunda, yalnızca sıcaklık değişiminin tek başına belirleyici bir faktör olmadığı ve optimum soğutucu akışkan seçiminin birden fazla değişkene bağlı olduğu anlaşılmıştır. Gelecek çalışmalar için, bu modelin daha fazla değişkenle zenginleştirilmesi ve soğutucu akışkan seçimine yönelik yeni parametrelerin (ekonomik maliyet, malzeme uyumluluğu, çalışma basınçları gibi) dahil edilmesi önerilmektedir. Bu adımlar, modelin daha geniş kullanım alanlarına uygulanabilirliğini artırarak endüstride daha bilinçli ve sürdürülebilir seçimlerin yapılmasını sağlayacaktır.

Bu çalışma, farklı senaryolarda en verimli ve çevre dostu soğutucu akışkanların seçilmesine yönelik bir

yaklaşım sunmuştur. Makine öğrenmesi ve çok kriterli optimizasyonun sürdürülebilir soğutma sistemlerinde başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir. Model, endüstriyel paydaşlar için karar verme sürecini hızlandıran ve çevresel etkileri azaltan bir araç olarak öne çıkmaktadır. Gelecek çalışmalarda, veri setinin genişletilmesi, derin öğrenme modellerinin entegrasyonu ve gerçek zamanlı izleme sistemlerinin geliştirilmesi planlanmaktadır. Bu adımlar, modelin genellenebilirliğini ve kullanım alanını daha da artıracaktır. Ayrıca, enerji verimliliği ve maliyet analizi gibi ek faktörler de ilerleyen çalışmalarda detaylı olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] S.R. Padmavathy, M.P. Chockalingam, N. Kamaraj, G. Glivin, V. Thangaraj, B. Moorthy, Performance studies of low GWP refrigerants as environmental alternatives for R134a in low-temperature applications, Environ. Sci. Pollut. Res. 29 (2022) 85945–85954. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15875-2>
- [2] S. Mukhopadhyay, H. Gupta, A. Kumar, A. Arora, Numerical Analysis of Low GWP Blends of R290 as an Alternative to R410A, in: R.M. Singari, P.K. Jain, H. Kumar (Eds.), Adv. Manuf. Technol. Manag., Springer Nature Singapore, Singapore, 2023: pp. 621-629. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9523-0_68
- [3] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, Environment friendly alternatives to halogenated refrigerants-A review, Int. J. Greenh. Gas Control 3 (2009) 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.07.003>
- [4] M. Huber, A. Harvey, E. Lemmon, G. Hardin, I. Bell, M. McLinden, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) Version 10 - SRD 23, (2018). <https://doi.org/10.18434/T4/1502528>
- [5] T.J. Fryer, K. Lee, Methods of Calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI), Aust. Inst. Refrig. Air Cond. Heat. 21 (2012).
- [6] Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü, (n.d.). <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-turkiye-ulusal-elektrik-sebekesi-emisyon-faktoru>
- [7] T. Chen, C. Guestrin, XGBoost: A Scalable Tree Boosting System, (2016). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1603.02754>
- [8] J.H. Friedman, Greedy function approximation: A gradient boosting machine., Ann. Stat. 29 (2001). <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>
- [9] D. Yin, A. Pananjady, M. Lam, D. Papailiopoulos, K. Ramchandran, P. Bartlett, Gradient Diversity: a Key Ingredient for Scalable Distributed Learning, (2017). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1706.05699>
- [10] K. Deb, R.B. Agrawal, Simulated Binary Crossover

for Continuous Search Space, Complex Syst 9 (1995). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18860538> [11] K. Deb, M. Goyal, A combined genetic adaptive search (GeneAS) for engineering design, in: 1996. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18387364> ■

ÖZGEÇMİŞ

Altay ARBAK

1989 İstanbul doğumludur. Lisans eğitimini 2012 yılında İstanbul Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde, yüksek lisans eğitimini 2014 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Isı ve Akışkan Programı'nda tamamlamıştır. Doktorasını 2021 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamlamış olup, 2013-2018 yılları arasında İTÜ Makine Fakültesi Isı Tekniği Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. Halen İstanbul Medeniyet Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Doktor Öğretim Üyesi olarak çalışmalarına devam etmektedir.

Hasan ACÜL

Hasan ACÜL, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği mezunu olup, Gebze Teknik Üniversitesi'nde Bilim ve Teknoloji Stratejileri alanında yüksek lisans yapmıştır. Yeni ürün geliştirme, soğutma, iklimlendirme ve sektörel yazılım konularında uzmanlaşmış, PDMA tarafından verilen NPDP sertifikasına sahiptir. Yönetici olarak yer aldığı CO₂ soğutucu akışkanlı soğutma sistemi projesi İstanbul Sanayi Odası'ndan birincilik ödülü almış, Chiller Performans ve Enerji Verimliliği Simülasyon Yazılımı geliştirme projesiyle de İSİB tarafından ödüllendirilmiştir. İklimsoft firmasının kurucusu olup, mühendislik ve yöneticilik görevlerini sürdürmektedir. Ayrıca TSSF CMAS 1 Yıldız Dalış Eğitmenidir.

Deniz YILMAZ

2000 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2003 yılında Yüksek Mühendis, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2011 yılında Doktor unvanını almıştır. Aynı yıl, İstanbul AREL Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamış, 2012 yılında aynı üniversitede Yrd. Doç. Dr. ve 2021 yılında Doçent olarak atanmıştır. Ayrıca FrigoBlock Soğutma Sistemleri A.Ş. firmasında AR-GE Danışmanlığı yapmaktadır. Termodinamik, İklimlendirme, Soğutma ve Tesisat konularında

çalışmaktadır. Makine Mühendisleri Odası (MMO); Türk Tesisat Mühendisleri Derneği (TTMD); İklimlendirme, Soğutma, Klima İmalatçıları Derneği (İSKİD); Soğutma Sanayi İş İnsanları Derneği (SOSİAD) üyesidir. Aynı zamanda SOSİAD eğitim komisyonu ve yayın kurulu başkanlığı yapmaktadır.

Kadir İSA

1962 yılında İstanbul'da doğmuştur. Haydarpaşa Teknik Lisesi Makine Bölümü'nden mezuniyeti sonrası lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini sırasıyla Gazi, İstanbul ve Sakarya Üniversitelerinin makine eğitimi ve Makine Mühendisliği bölümlerinde tamamlamıştır. YÖK bursu ile 1988-1989 yılları arasında İngiltere ve ABD'de öğretim teknikleri ile iklimlendirme-soğutma alanında teorik ve uygulamalı eğitimler almıştır. Değişik meslek yüksekokullarının iklimlendirme-soğutma programlarında ve makine mühendisliği bölümlerinde iklimlendirme, soğutma, havalandırma ve ısıtma alanlarında öğretim elemanı olarak dersler vermiştir. 2022 yılında Düzce Üniversitesi öğretim üyeliğinden emekli olmuştur. Halen İSKAV, SOSİAD, İSKİD ve ESSİAD'da komisyon üyesi ve İSİB'de danışman olarak faaliyet göstermektedir. İSKİD ile SOSİAD onursal üyesi ve ASHRAE Turkish Chapter kurucu üyesidir.

Zeynep Gökçen AŞAN

2006 yılında Gazi Üniversitesi Uluslararası İlişkiler bölümünden mezun oldu. 2012 yılından bu yana Birleşmiş Milletler ile birlikte çalışarak iklim değişikliği ve çevre konularında projelerin yürütülmesine, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile birlikte ulusal ve uluslararası çalışmalar ve çevre anlaşmaları konusunda Türkiye'ye destek vermiş, florlu sera gazları ve sera gazı emisyonlarına ilişkin düzenleyici çerçeve üzerinde çalışmıştır. Bu görevi sırasında soğutma ve iklimlendirme sektörüyle yakın temasta bulunarak sektör temsilcileriyle birlikte birçok projeye imza attı. Halen Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) Türkiye ekibiyle doğal soğutucu alternatifleri ve doğal bazlı çözümlere odaklanarak ulusal koordinatör olarak çalışmakta ve sürdürülebilir soğutma çözümleri alanında çalışmalarına devam etmektedir.