



*Araştırma Makalesi / Research Article*

**CO<sub>2</sub> AKIŞKANININ KAYNAMALI AKIŞ REJİMİNDE ISI TRANSFERİ  
KATSAYISININ ÇOKLU REGRESYON YÖNTEMİ İLE  
TAHMİNLENMESİ\***

**PREDICTION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF CO<sub>2</sub> IN FLOW BOILING REGIME  
USING MULTIPLE REGRESSION METHOD**

**Ahmet KORKMAZ<sup>1</sup>**

**Semih ÖZEL<sup>2</sup>**

**Mehmed Rafet ÖZDEMİR<sup>3</sup>**

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1230594>

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author*  
*mehmet.ozdemir@marmara.edu.tr*

*Geliş Tarihi / Received*  
*06.01.2023*

*Kabul Tarihi / Accepted*  
*24.04.2023*

**Öz**

Teknolojinin gelişmesi ile performansı artan ve boyutu küçülen elektronik cihazların yaydıkları ısı artmış olup ihtiyaç duyulan soğutma yükü çok yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu soğutma yükünü karşılayabilmek için kullanılan geleneksel soğutucu akışkanların performansları, iyi olmasına rağmen küresel ısınma katsayıları ve ozon tabakası hasar potansiyel katsayıları yüksektir. Çeşitli uluslararası protokoller ve antlaşmalarla, bu geleneksel soğutucu akışkanların kullanımlarında küresel çapta kısıtlamaya gidilmiştir. Bu nedenle, araştırmacılar alternatif, çevre dostu soğutucu akışkanlar üzerine çalışmalar yapmaya başlamıştır. CO<sub>2</sub> akışkanı zehirli olmaması, küresel ısınma katsayısının 1 olması, ozon tabakası hasar potansiyel katsayısının 0 olması ve kaynamalı akış rejiminde yüksek performans sergilemesi sebebiyle, geleneksel akışkanlara rakip olarak öne çıkmaktadır. Fakat CO<sub>2</sub>'nin diğer akışkanlardan farklı termo-fiziksel özelliklere sahip olması sebebiyle, literatürde CO<sub>2</sub> için kaynamalı akış rejiminde ısı transfer katsayısını yüksek doğruluk oranında veren bir korelasyona rastlanmamıştır. Bu çalışmada, farklı çap borularda, kaynamalı akış rejiminde bulunan CO<sub>2</sub> akışkanı ile yapılmış çalışmalardan alınan 1084 satır veri ile çoklu regresyon modeli ile ısı transfer katsayısı tahmini yapılmıştır. Bu amaçla 26 değişken analiz edilmiş ve aralarındaki korelasyon incelenmiştir. Sonuçlar literatüre dayalı olarak tartışılarak öneriler kısmında sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** CO<sub>2</sub>, çoklu regresyon, ısı transferi, kaynamalı akış, tahmin.

**Abstract**

With the development of technology, the performance of electric devices has increased, and their sizes have been miniaturized. Therefore, the heat emitted by these devices has elevated, and this increased required cooling load rates. Although the cooling performance of conventional refrigerants could meet these cooling load rates, their global warming potential and ozone layer depletion coefficients are high. Accordingly, international protocols and agreements have started to restrict these traditional refrigerants globally. Therefore, researchers have begun to work on alternative, environmentally friendly refrigerants. At this point, CO<sub>2</sub> refrigerant stands out as a competitor to conventional refrigerants due to its non-toxic feature, low global warming potential value (1), zero ozone layer depletion coefficient, and high performance in the flow boiling regime. However, there is no high-accuracy flow boiling heat transfer coefficient in the literature due to the unique thermophysical properties of CO<sub>2</sub>. In the current study, 1084 flow boiling heat transfer coefficient data of CO<sub>2</sub> for pipes having different diameters were taken from the literature studies. The collected flow boiling heat transfer coefficient data were tried to be predicted with the multiple regression model. For this purpose, 26 variables were analyzed and the correlation between them was examined. The results were discussed based on the literature, and suggestions were presented.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>, flow boiling, forecasting, heat transfer, multiple regression.

\*Bu yayın Ahmet KORKMAZ isimli öğrencinin Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (İngilizce) Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.  
ahmet.korkmaz@habas.com.tr, Orcid.org/0000-0002-8930-9316.

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.  
semih.ozel@marmara.edu.tr, Orcid.org/0000-0001-8281-2704.

<sup>3</sup>Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.  
mehmet.ozdemir@marmara.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-3832-9659.

## 1.GİRİŞ

Küresel boyutta teknolojinin gelişmesiyle daha hızlı, daha kompakt ve daha güçlü cihazlar endüstriden ev aletlerine kadar hayatımızda yerini almıştır. Bu yüksek performansa sahip fakat kompakt cihazların birim alana düşen ısı akıları çok daha yüksek mertebelere ulaşmıştır (Al-Zaidi ve ark., 2022, Özdemir, 2016). Bu cihazları soğutmak için geliştirilen sistemlerde kullanılan R-11, R-12, R-123 gibi geleneksel soğutucu akışkanlar (CFC ve HCFC bazlı soğutucu akışkanlar) performans olarak çok iyi sonuçlar vermektedir. Fakat bu gazların ozon tabakasına yüksek zararlı etki potansiyeli (ODP), küresel ısınma katsayıları (GWP) ve atmosferde uzun süre kalmalarından dolayı çeşitli uluslararası antlaşmalarla yasaklanmış ya da kullanımına kısıtlar getirilmiştir (Di Filippo ve ark., 2022). Bu sebeplerden, araştırmacılar düşük ODP ve GWP değerlerine sahip çevre dostu soğutucu akışkanların performanslarını çeşitli koşullar altında araştırılması çalışmalarına başlamışlardır. Literatürde karşılaşılan çeşitli araştırmalar sonucunda, CO2 gibi geçmişte tespit edilen ve halen üzerinde çalışılan gazlardan yararlanma fikri ortaya çıkmıştır. CO2'nin toksik olmamasının ve yüksek performansının yansira GWP değerinin 1 ve ODP değerinin 0 olması, bu gazı geleneksel soğutucu akışkanlarla yarışabilir hale getirmiştir (Bruno ve ark., 2019). Literatürde CO2 üzerine yapılan birçok çalışmanın sonucunda, kaynamalı akış durumunda nükleotit bölgesinde CO2'nin ısı transfer veriminin en yüksek olduğu belirlenmiştir (Jiang ve ark., 2017). Bu çalışmalar sonucunda CO2'nin soğutucu akışkan olarak kullanıldığı verimli soğutma sistemi ürünlerini laboratuvar ölçeğinden prototip ve nihai ürün aşamasına taşımak için kaynamalı akış bölgesinde ısı transfer katsayısı tahmin korelasyonları üzerine çalışmalar yapılmasının önemli olduğu anlaşılmıştır. Bu konuya aşağıda özetlenmiş benzer çalışmalar yapılmış olsa da, gerek CO2'nin benzersiz termo-fiziksel özelliklerinden ötürü gerek verilerin alındığı geometrilerin farklılığından dolayı yüksek doğruluğa sahip ısı transfer katsayısı korelasyonu önerilememiştir. Diğer bir sebep ise, kaynamalı akış bölgesinde kabarcıklı akış, dairesel akış, dalgalı akış gibi farklı akış rejimleri ortaya çıkmakta ve bu akış rejimlerinde sıvı-gaz dengesi farklı olmaktadır. Bahsedilen olgulardan ötürü farklı çalışmalardan elde edilen deneysel veriler, farklı ısı transfer katsayısı trendleri ortaya çıkarmıştır.

Bu kapsamda yapılan çalışmalara bakıldığında, Cheng ve ark. (2008) CO2'nin diğer geleneksel soğutucu akışkanlara nazaran düşük yüzey gerilmesi ve yüksek indirgenmiş basınç özelliklerinden ötürü kaynamalı akışta nükleotit bölgesinin baskın rejim olduğunu belirtmiştir. Bu durum, aynı doyma sıcaklığında dahi CO2'nin daha yüksek ısı transferi katsayısı değerlerine sahip olmasını ve dolayısıyla geleneksel soğutucu akışkanlar için geliştirilen ısı transfer katsayısı tahmin korelasyonlarının CO2 için iyi çalışmamasına sebep olduğu görülmüştür. Bu nedenle Cheng ve ark. (2008) akış rejim haritasına dayalı tüm akış rejimlerini kapsayan 0.6-10 mm arası boru çaplarında, 50-1500 kg/m<sup>2</sup>s kütle akısı aralıklarında, 1.8-46 kW/m<sup>2</sup> ısı akısı aralıklarında ve -28°C ile +25°C doyma sıcaklığı bölgesinde çalışan bir ısı transferi katsayısı korelasyonu önermişlerdir. Çalışmada önerilen korelasyon, literatürden aldıkları 1124 ısı transferi verisi ile karşılaştırmışlar ve verilerin % 71.4'ünü ± % 30 bandında tahmin edebilmişlerdir. Diğer bir çalışmada Oh & Son (2011) yatay 4.57 mm çaplı borularda CO2'nin kaynamalı akış rejiminde ısı transferi katsayısı ve basınç düşüşünü deneysel olarak incelemişlerdir. Yazarlar, verilerini geleneksel soğutucu akışkanlar için geliştirilmiş ısı transfer katsayısı korelasyonları ile karşılaştırmışlar ve çok büyük sapmalar olduğu görülmüştür. Bunun üzerine veriler Cheng ve ark. (2008) tarafından CO2 için geliştirilmiş ısı transferi korelasyonu ile karşılaştırılmış ve %12.64 – %14.68 aralığında sapmaları daha uygun bulmuşlardır. Öte yandan başka bir çalışmada, Fang ve ark. (2013a) farklı araştırma gruplarının CO2 için kaynamalı akış rejiminde yaptığı çalışmalardan 2956 ısı transferi katsayısı verisi toplamış ve literatürdeki 34 ısı transferi katsayısı korelasyonu ile karşılaştırmışlardır. Bu korelasyonlardan 9 tanesi CO2 için geliştirilmiş olmasına karşın, 25 tanesi diğer soğutucu akışkanlar için geliştirilmiştir. Sonuç olarak, Fang (2013b) tarafından CO2 için geliştirilen ısı transfer katsayısı korelasyonunun veri setini maksimum %15.5 sapmayla en iyi tahmini verdiği belirtilmiştir. Yukarıda bahsedilen diğer çalışmaların aksine Cheng ve ark. (2008)

tarafından geliştirilen ısı transfer katsayısı korelasyonunun veri setini %34.2 sapmayla tahmin edebildiği bulunmuştur. Bu çalışmadan çıkabilecek diğer bir önemli bulgu ise bazı korelasyonlar mikro boru çapları için daha iyi sonuç verirken bazı korelasyonlar makro boru çapları için daha iyi sonuç vermektedir. Çok yakın zamanda yapılan bir çalışmada, Parahovnik & Peles (2022) mikro kanallarda yüksek basınç şartları altında CO<sub>2</sub> için kaynamalı akış olgusunu inceledi. Yazarlar, birçok ısı transferi korelasyonunun deneysel verilerini tahmin edemediğini belirtirken, farklı kaynamalı akış rejimlerinde farklı korelasyonların makul sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Yukarıdaki literatür çalışmalarından anlaşıldığı üzere CO<sub>2</sub> için kaynamalı akış prosesinde ısı transferi katsayısını tahmin edebilen tam oturmuş bir korelasyon bulunmamaktadır.

Mühendislik başta olmak üzere çeşitli disiplinlerde tahminleme yöntemleri kullanılmaktadır. Çoklu regresyon modeli bu yöntemlerden en çok kullanılanlardandır. Chen ve ark. (2016) toprak kaynaklı dikey bir ısı değiştirici tasarımı için dokuz tane farklı girdi içeren 3B nümerik bir model geliştirmiştir. Modeli çözerek, bu bağlamda çoklu regresyon yöntemi ile ısı akısını veren bir korelasyon elde ettiler. Geliştirilen korelasyon deneysel verileri başarılı bir şekilde tahmin ettiğini bildirmişlerdir. Li ve ark. (2020) plakalı ısı eşanjörleri için açık literatürde bulunan veriler kullanarak ısı transferi katsayısını çoklu regresyon metodu ile tahmin etmeye çalışmıştır. Geliştirdikleri korelasyon ile verilerin %74.3'ünü  $\pm$  %30 aralığında, %94.9'unu ise  $\pm$  %50 aralığında tahmin edebilmişlerdir. Başka bir çalışmada, Zhang ve ark. (2021) yedi farklı akışkan için yoğunlaşma ısı transferi katsayısını tahmin edebilmek için çoklu regresyon yöntemi ile korelasyon geliştirmişlerdir. Geliştirilen korelasyon deneysel yoğunlaşma ısı transferi katsayı verilerini %8.9 hata payı ile tahmin edebilmiştir.

Yukarıdaki özetlenen örneklerde olduğu gibi, ısı transferi uygulamalarında çoklu regresyon yöntemi yine önceki çalışmalar ışığında belirlenmiş değişkenler ve bunlara bağlı veriler kullanılarak başarı ile uygulanabildiği görülmüştür. Çoklu regresyon modeli kullanılarak yapılan tahminlerin yüksek performans gösterebilmesi için modelde yer alan bağımsız değişkenler arasında kuvvetli bir ilişkinin olmaması tercih edilir (Eygü & Kılınç, 2020). Diğer yapılan çalışmalara bakıldığında kullanılan girdi değişkenlerinin ve bunlara bağlı verilerin sınıflandırılması alternatif şekillerde kullanılmıştır. Diğer çalışmalarda kullanılan değişken sayısının daha az olduğu ve genelde temel değişkenlerin kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca çalışmalarda benzer çalışmalarda farklı sınıflandırmalara göre deneysel veriler analiz edilmiştir. Bu çalışmada, literatürden deneysel olarak elde edilmiş 1084 kaynamalı akış ısı transferi katsayısı verisi çoklu regresyon metodu kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla diğer çalışmalardan farklı olarak 26 girdi değişkene ait 1084 satır veri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmanın ilk kısmında konunun önemi ve konu ile ilgili literatür verilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında bahsedilen problemin çözümü için kullanılacak olan veri seti ile ilgili genel bilgiler ve uygulanacak yöntem sunulmuştur. Çalışmanın üçüncü kısmında kaynamalı akışta CO<sub>2</sub> için elde edilen ısı transfer katsayısı modeli sunulmuş ve tartışılmıştır. Son kısımda ise çalışma sayesinde elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan kaynamalı akış bölgesinde CO<sub>2</sub>'nin ısı transfer katsayısına ait deneysel olarak elde edilmiş 1084 satır veri Tablo 1'de görülebilecek literatür kaynaklarından toplanmıştır. Alınan verilerde boru çapları 0.5 mm ile 11.20 mm, kütle akıları 40 kg/m<sup>2</sup>s ile 1500 kg/m<sup>2</sup>s, doyma sıcaklıkları 245 K ile 288 K ve ısı akıları 0.5 kW/m<sup>2</sup> ile 46 kW/m<sup>2</sup> aralıklarında değişmektedir. Ayrıca alınan veri noktalarında CO<sub>2</sub>'nin termofiziksel özelliklerini ve buna bağlı olarak kullanılan çeşitli boyutsuz sayıları hesaplamak için Span&Wagner (1996), Scalabrin ve ark., (2006), Jianxin ve Yigang (2009), Yun,ve ark., (2005) ve Mistral (2022) kaynaklarından faydalanılmıştır.

CO<sub>2</sub>'nin kaynamalı akış rejiminde oluşan ısı transfer katsayısı (HTC) bu çalışmanın konusudur. Boru içi kaynamalı akışta başta boru çapı, ısı akısı, kütle akısı, doyma sıcaklığı olmak üzere ısı transferi katsayısını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu çalışmada çoklu regresyon modelinde kullanılan girdi verileri olarak Tablo 2'de gösterilen ve literatürde farklı akışkanların kaynamalı akış ısı transferi katsayısı için kullanılan değişkenler analiz edilmiştir. Tablo 2'den görüleceği gibi bu modelde ısı transferi katsayısını etkileyen doğrudan bağımsız değişkenlerin yanında bu bağımsız değişkenlere bağlı olabilen diğer değişkenlerle beraber toplamda 26 değişken dâhil edilmiştir.

Tablo 1. Literatürden Alınan Verilerin Sınıflandırılması ve Kaynakları

Boru iç çapı (mm)	Kütle Akısı (kg/m <sup>2</sup> s)	Doyma Sıcaklığı (K)	Isı Akısı (kW/m <sup>2</sup> )	Buhar kalitesi (-)	Kaynak
7-10.08	80-200	260-223	6-8	0-1	Bansal&Zhao, 2007
3.5-6.10	98-408.6	260-245	5-15	0-1	Park&Hrnjak, 2007
0.6-10	50-1500	245-248	1.8-46	0-1	Cheng ve ark., 2008
6	349	265.20	10.10	0-1	Mastrullo ve ark., 2010
0.5-3	50-600	273-288	5-40	0-1	Oh ve ark., 2011
6	200-350	279.9-287	10-20.2	0-1	Grauso ve ark., 2011
11.20	40-200	258	0.5-10	0-0.8	Kim & Hrnjak, 2012
1.42-4.57	400-800	273-288	7.5-40	0-1	Zhang ve ark., 2012
6.11-11.20	40-200	258-243	1-10	0-1	Dönmez, 2012
1.42-7.72	209-424	263-273	5-20	0-1	Cheng ve ark., 2021

Tablo 2. Girdi Değişkenleri

Girdi Değişkenleri			
Boru iç çapı (D <sub>m</sub> )	Buhar kalitesi (x)	G (kütle akısı)	Q (ısı akısı)
Doyma sıcaklığı (T <sub>s</sub> )	İndirgenmiş basınç (P <sub>r</sub> )	Toplam basınç (P <sub>tot</sub> )	Sıvı viskozite (μ <sub>L</sub> )
Buhar viskozite (μ <sub>v</sub> )	Sıvı özgül ısı (cp <sub>L</sub> )	Buhar özgül ısı (cp <sub>v</sub> )	Buhar özkütle (ρ <sub>v</sub> )
Sıvı ısı iletkenliği (k <sub>L</sub> )	Sıvı özkütle (ρ <sub>L</sub> )	Yüzey gerilimi (σ)	Bond sayısı (Bo)
Buhar ısı iletkenliği (k <sub>v</sub> )	Buhar Pr sayısı (Pr <sub>L</sub> )	Sıvı Weber sayısı (We)	Froude sayısı (Fr)
Martinelli sayısı (X <sub>tt</sub> )	Boşluk oranı (ε)	Buhar Re sayısı (Re <sub>v</sub> )	Sıvı Pr sayısı (Pr <sub>L</sub> )
Buhar Weber sayısı (We)	Islanan yüzey (A)		

Bu çalışmada, çoklu regresyon modeli kullanılarak literatür kaynaklarından taranarak belirlenmiş amaca uygun 26 bağımsız değişkenin birbirleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi ve bağımlı değişkene olan etkilerinin bir hata ölçme metodu olarak ne derece olduğunun gösterilmesi amaçlanmıştır. Çoklu regresyon modeli kullanılarak toplanan veriler ile bağımlı değişkenin davranış biçiminin tahminlenmesi bağımsız değişkenlere bağlı olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Öncesinde bağımsız değişkenlerin arasında ki korelasyon belirlenerek bağımlı değişkene etkisi az olan bağımsız değişkenlerin analizden çıkarılarak sonuçların optimum şekilde elde edilmesi planlanmıştır. Bu analizi yaparken en küçük kareler yöntemi kullanılarak en uygun regresyon katsayıları elde edilir ve bağımlı değişken olan CO<sub>2</sub>'nin kaynamalı rejimdeki ısı transfer katsayısı (HTC) için veriler içinde olmayan şartlardaki değerlerin tahmin edilmesi sağlanır (Arslan & Ertuğrul, 2022). Bahsedilen en uygun regresyon katsayıları en küçük kareler metodunda ortaya çıkan hataların karelerinin toplamının minimum olmasını sağlayan katsayılardır. Böylece, ortaya çıkan hatanın en düşük değere yaklaşabilmesi için verilerin yakınından geçecek en uygun eğri bulunabilir.

N sayıda bağımsız değişken barındıran çoklu regresyon modeli denklem (1)'de gösterilmiştir, (Kayakuş & Terzioğlu, 2021).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

Denklem (1)'de Y bağımlı değişken,  $X_n$  bağımsız değişken,  $\beta_n$  regresyon katsayıları ve  $\varepsilon$  hata terimidir. Kurulan modelin bağımlı değişkeni doğru tahmin edebilme başarısı 0 ile 1 arasında değişen  $R^2$  ifadesi ile belirlenir.  $R^2$  değerinin 1'e yakın olması kurulan modeldeki bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni iyi tahmin ettiğini gösterir. Kurulan modelin performansını ölçmek için bu çalışmada ortalama mutlak hata oranı (MAPE %) metodu kullanılmıştır. MAPE metodu denklem (2)'de gösterilmiştir, (Ayvaz & Kusakci, 2017).

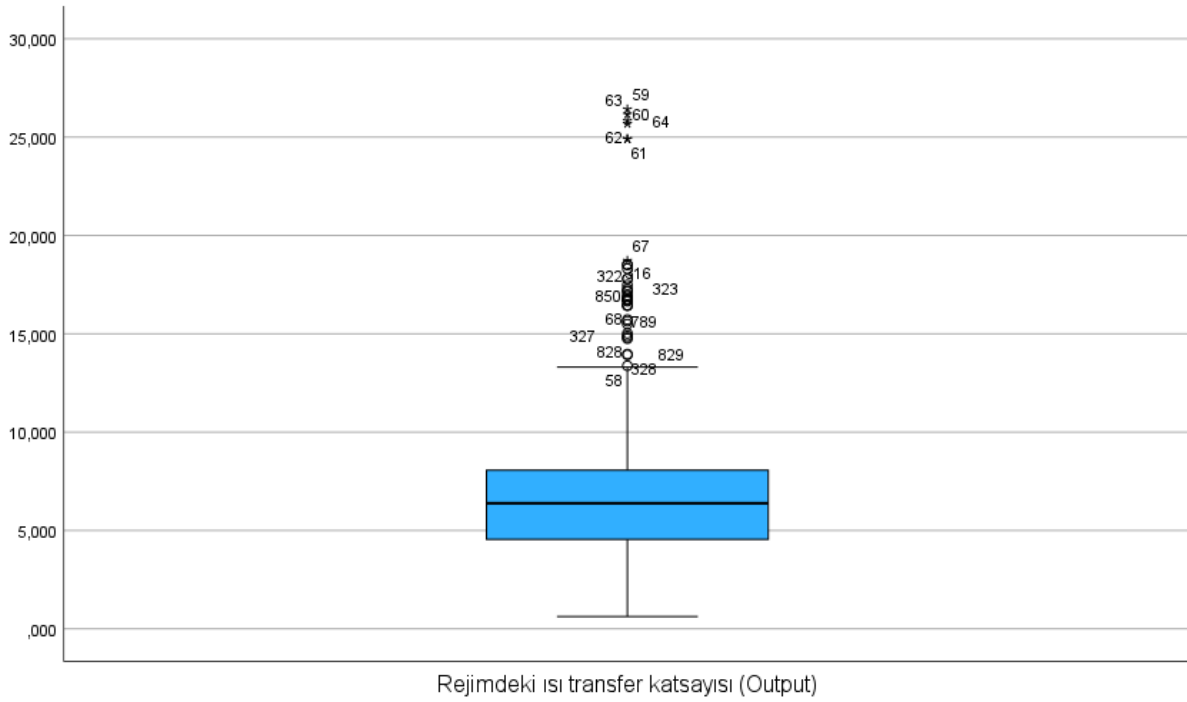
$$MAPE(\%) = 100 \times \frac{\sum_{k=1}^n n \left| \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{y_r} \right|}{n} \quad (2)$$

Denklem (2)'de belirtilen MAPE (%) değerinin %50'den büyük olması durumu modelin kötü tahminde bulunduğunu göstermekle beraber, MAPE (%) değerinin %10'a eşit ve küçük olduğu durumda modelin iyi tahminde bulunabildiğini gösterir, (Kayakuş & Terzioğlu, 2021).

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada çoklu regresyon analizi yöntemi ile tek bağımlı değişken (HTC - CO<sub>2</sub>'nin kaynamalı rejimdeki ısı transfer katsayısı) ve 26 bağımsız değişken (Tablo 2) olarak belirlenmiş ve bu değişkenlere ait 1084 adet veri IBM SPSS v.29 istatistik programı ile incelenmiştir. İlk olarak veriler programa aktarılarak normal dağılım uygunluk analizi yapılmıştır. Bu analizde özellikle bağımlı değişken olan HTC verisinde 59-64 satırlar arasındaki verinin geri kalanına göre outlier yani aykırı olduğu görülmüştür. İlgili verinin SPSS normal dağılım noktasal görüntüsü aşağıda Şekil 1'de verilmiştir. Bunun yansira normal dağılım analizinde çarpıklık (skewness) katsayısı 1.77, basıklık (kurtosis) katsayısı 6.72 sağa ve sola yaslanmış değerleri olarak gözlenmiştir. Genel olarak bu değerlerin en çok -3 ile +3 veya -1.5 ile +1.5 değerleri arasında normal kabul edildiği ifade edilmektedir (Kalayci, 2014), (Tabachnick & Fidell, 2013).

Modeldeki diğer bağımsız veriler de incelendiğinde yukarıda bahsedilen durumun onların üzerinde de etkili olduğu görülmüş ve bunun üzerine modelin regresyon analizi uygunluğunu bozmaması açısından ilgili veriler analizden çıkarılmıştır. Böylece yapılan ikinci normal dağılım uygunluk analizinde skewness katsayısı 1.77 den 1 değerine, kurtosis katsayısı 6.72 den 2.2 değerine düşmüş dolayısı ile regresyon için normal dağılım uygunluğu sağlanmıştır.



Şekil.1 HTC Normal Dağılım Analizi Noktasal Görünümü

Çoklu regresyon analizinin uygulanmasından önce yapılması gereken bir diğer temel analiz de faktör analizidir. Faktör analizi ile kullanılacak değişkenlerin arasındaki uyum test edilerek birbirini çok etkileyen ya da hiç etkilemeyen parametrelerin tespit edilmesi sağlanır. Bu çalışmada toplam 26 bağımsız değişken için faktör analizi yapılmıştır. Buna göre tüm değişkenlerin birbiri arasında ki korelasyon katsayılarının  $-1 < r < +1$  aralığı içerisinde olduğu görülmüştür. Bu aralık içerisinde negatif yönlü ya da pozitif yönlü olarak korelasyon katsayılarının yüksek çoğunluğunun  $r$  değeri yine 0.1 üstü ya da 0.9 altı arasında değişkenlik göstermiştir. Yine üretilen faktör analizi tablosunda değişkenlerin ortak varyansa etkisi incelenmiştir ve değişkenlerin hepsinin 1'e yakın olduğu yani parametreler arasında anlamlı bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan gözlemlenen korelasyon katsayıları arasındaki hata oranları incelenmiş olup 0.05'ten yüksek korelasyon katsayı hata oranı % 37 olarak görülmüştür. Bu değer değişken sayısı ve değişken değerlerindeki uç değerlerin deneysel çalışmalardan dolayı farklılık gösterdiğinden kabul edilebilir değer olan % 50 yi aşmadığı için korelasyonun anlamlı olduğunu belirlenmiştir. Tablo 3'ten görüleceği gibi 1'in üzerinde olan faktör geçerlilik oranlarının % 50 değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre ölçme aracımızın ölçmek istediği amacı gerçekleştirebilecek düzeyde olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 3. Açıklanmış Toplam Varyans

Değişkenler	Toplam	Varyans %	Toplam %
1	14.372	53.231	53.231
2	3.640	13.483	66.713
3	2.979	11.034	77.747
4	2.253	8.343	86.090
5	1.104	4.089	90.179

Regresyon analizi yapmadan önce ayrıca bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olup olmadığı yine IBM SPSS programı kullanılarak ilgili veriler üzerinden bakılmıştır ve sonuç olarak 26 bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasında negatif ya da

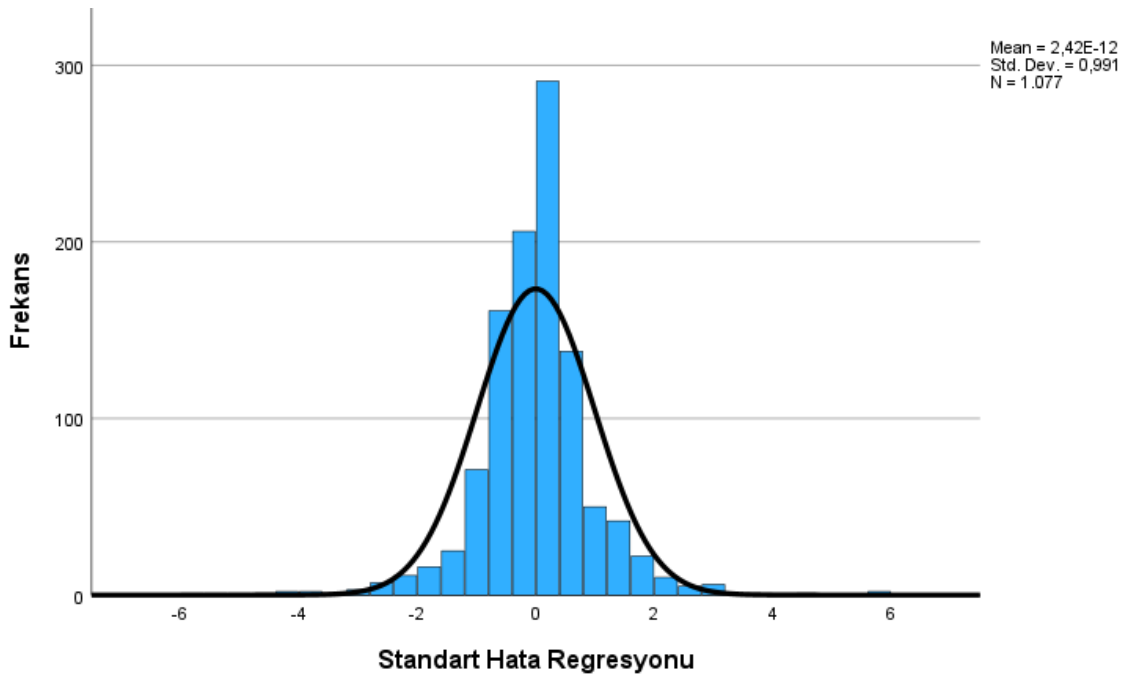
pozitif yönde bir doğrusal ilişki olduğu gözlenmiştir. SPSS programında regresyon analizi koşuturulduğunda çıkan analiz sonuçlarına göre öncelikle uç değerler standart hata değeri -5 ile +5 değeri arasında olduğu görülmektedir. Bu değer genelde -3 ile +3 arasında olması beklenirken bu çalışma kapsamında deneysel verilerin çok fazla olması ve değersel farklılıklardan dolayı yine -5 ile +5 kabul sınırları içerisinde olduğu kabul edilmiştir. İlgili SPSS tablosu aşağıda Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Hata İstatistikleri

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	2.03762	13.95695	6.61861	2.287623	1077
Std. Predicted Value	-2.003	3.208	.000	1.000	1077
Standard Error of Predicted Value	.120	.886	.237	.095	1077
Adjusted Predicted Value	2.05313	13.78087	6.61798	2.286459	1077
Residual	-10.774694	11.015661	.000000	1.856302	1077
Std. Residual	<b>-5.753</b>	<b>5.882</b>	.000	.991	1077
Stud. Residual	-5.869	5.918	.000	1.006	1077
Deleted Residual	-11.214494	11.153771	.000633	1.911441	1077
Stud. Deleted Residual	-5.964	6.016	.000	1.010	1077
Mahal. Distance	3.443	239.660	18.982	21.499	1077
Cook's Distance	<b>.000</b>	<b>.073</b>	.002	.006	1077
Centered Leverage Value	.003	.223	.018	.020	1077

a. Dependent Variable: Rejimdeki ısı transfer katsayısı (Output)

Tablo 4'te gösterilen diğer bir parametre olan Cook's distance oranlarının 1 den küçük olması deneysel verilerin arasındaki uç değerlerin kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir. Regresyon analizinde başka önemli gösterge olan tahminlere ait hataların normal dağılıp dağılmadığı Şekil 2 de grafiksel olarak görülmektedir. Yaygın anlayışa göre regresyon analizinde değişkenlerin normal dağılıma uyması gerektiği gibi bir algı varken bu tür değişken sayısı çok olan çalışmalarda değişkenlerin değil hataların dağılımının normal dağılıma uygunluğu incelenmelidir.



Şekil 2. Tahminlere Ait Hataların Normal Dağılım Grafiği

Regresyon analizi sonucu ortaya çıkan modelde hataların birbirinden bağımsız olup olmadığını modelin özet kısmından anlaşılmaktadır. Tablo 5’te gösterilen model özetine göre Durbin Watson değeri 0.45 olduğu görülmektedir. Hataların bağımsız olup olmadığını söyleyebilmek için bu oranın 1 ile 3 arasında olmasının yeterli olduğu bilinmektedir. Dolayısı ile bu model de hataların birbirinden bağımsız olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 5. Regresyon Modeli Özet Tablosu

	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Adj. R<sup>2</sup></b>	<b>Tahmini Standart Hata</b>	<b>Durbin-Watson</b>
<b>Model</b>	0,777 <sup>a</sup>	0,603	0,596	1,872911	0,454
a. Tahminleyiciler: (Sabit), Islanan yüzey (A), Sıvı Pr sayısı (PrL), Froude sayısı (Fr), Buhar Pr sayısı (PrL), Martinelli sayısı (Xtt), Buhar Re sayısı (Rev), Q (ısı akısı), Bond sayısı (Bo), Buhar kalitesi (x), Sıvı Weber sayısı (We), Yüzey gerilimi ( $\sigma$ ), G (kütle akısı), Boşluk oranı ( $\epsilon$ ), Buhar ısı iletkenliği (kv), Boru iç çapı (Dm), Buhar Weber sayısı (We), Buhar viskozite ( $\mu v$ ), İndirgenmiş basınç (Pr), Sıvı viskozite ( $\mu L$ )					
b. Bağımlı değişken: Rejimdeki ısı transfer katsayısı					

Regresyon analizi sonucunda üretilen önemli verilerden bir diğeri de korelasyon analizidir. Regresyon analizi sonucunda ayrıca aşağıda Tablo 6 olarak gösterilen pearson korelasyonu tablosu üretilmektedir.

Tablo 6. Pearson Korelasyonu

		<b>HTC (Output)</b>
<b>Pearson Correlation</b>	<b>HTC (Output)</b>	1,000
	Boru iç çapı (Dm)	-0,558
	Buhar kalitesi (x)	-0,076
	G (kütle akısı)	0,487
	Q (ısı akısı)	0,601
	Doyma sıcaklığı (Ts)	0,368
	İndirgenmiş basınç (Pr)	0,367
	Toplam basınç (Ptot)	0,367
	Sıvı viskozite ( $\mu L$ )	-0,356
	Buhar viskozite ( $\mu v$ )	0,347
	Sıvı Özgül Isı (cpL)	0,330
	Buhar Özgül Isı (cpv)	0,334
	Sıvı ısı iletkenliği (kL)	-0,277
	Buhar ısı iletkenliği (kv)	0,366
	Sıvı özkütle ( $\rho L$ )	-0,353
	Buhar özkütle ( $\rho v$ )	0,346
	Yüzey gerilimi ( $\sigma$ )	-0,363
	Bond sayısı (Bo)	-0,457
	Sıvı Weber sayısı (We)	0,429
	Buhar Weber sayısı (We)	0,413
	Martinelli sayısı (Xtt)	0,160
	Buhar Re sayısı (Rev)	0,132
	Froude sayısı (Fr)	0,272
	Sıvı Pr sayısı (PrL)	-0,036
	Buhar Pr sayısı (PrL)	0,294
	Boşluk oranı ( $\epsilon$ )	-0,184
	Islanan yüzey (A)	-0,291



Tablo 6’da tüm değişkenlerin bir biri ile olan ilişki değeri gösterilmektedir fakat tablonun büyüklüğünden dolayı çalışma içerisine sadece bağımsız değişken HTC parametresi ile diğer bağımlı değişkenler arasındaki ilişki değerleri gösterilmiştir. Bu tablodan anlaşılacağı gibi korelasyon katsayısı olan “r” değerinin bazıları eksi olarak görünmektedir. Pearson korelasyonunda en iyi anlamlı ilişki değeri olarak 0.7 üzeri olması benimsenmiştir. Bu değer altı zayıf ve bu değer üstü çok güçlü korelasyonu göstermektedir. Dolayısı ile tablodan görüleceği üzere bağımlı değişken ile en güçlü ilişkinin pozitif yönde Q ısı akısı olduğu ve en zayıf korelasyon ilişkisinin de negatif yönde sıvı Pr sayısı olduğu anlaşılmaktadır.

Model ile ilgili genel değerlendirmeyi yapabilmek için tekrar Tablo 5 te gösterilen regresyon modeli özetine bakılmalıdır. Özet tablosunda R katsayısından anlaşılacağı üzere bağımsız değişkenlerin kombinasyonunun bağımlı değişkene olan korelasyonunu 0.777 gibi oldukça yüksek bir değer olarak vermektedir.  $R^2$  değeri ise bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıkladığı varyansı 0.6 olarak göstermektedir. Yine bu değer % 60 seviyelerde olması modelin değişkenler tarafından tahmin edilme oranının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Aynı tabloda yine görüleceği gibi adjusted  $R^2$  değeri de yaklaşık 0.6 dır. Bu da çok sayıda bağımsız değişkenlerin olduğu çoklu regresyon analizi modellerinde göz önüne alınması gereken ve bağımlı değişkende ki değişimi açıklama oranını gösteren bir değerdir. Bu değerlerin yeterli olmadığını düşünüldüğü modellerde ayrıca ANOVA tablosunda bulunan değerlere de bakılabilmektedir.

Yukarıda detayı verilen regresyon analizi sonuçları bağımlı değişken ile bağımsız değişkenlerin arasında ki korelasyonun ne derece ilişki içinde olduğunu göstermiştir. Çalışmanın güvenilirliğini artırabilmek için bağımsız değişkenlerin sayısı yapılan ilk regresyon analizi raporunda bağımlı değişken ile zayıf ilişkisi olanlar çıkartılarak azaltılmış ve regresyon analizi tekrarlanmıştır. İkinci regresyon analizinde tablo 6’da gösterilen 26 bağımsız değişken yerine ilk analiz sonuçlarına göre en başarılı korelasyon ilişkisi gösteren hata oranları düşük 5 bağımsız değişken (Kütle Akısı (G), Isı Akısı (Q), Bond Sayısı (Bo), Boru iç çapı, Buhar Weber Sayısı) seçilmiş (Tablo 7 ve Tablo 8) ve bu değişkenler kullanılarak ikinci bir regresyon analizi yapılmıştır. Bu değişkenlerden ilk analizde bağımlı değişken ile yüksek korelasyon sağlayan Sıvı Weber Sayısı, Bond sayısı ile arasında anlamlı bir ilişki bulunmadığının görülmesinden dolayı son bağımsız değişken listesine alınmamıştır.

Tablo 7. İkinci Regresyon Analizi Değişken Tablosu

İstatistiksel Oranlar	Ortalama	Std. Sapma	N
Rejimdeki ısı transfer katsayısı (Output)	6,62	2,95	1077
Boru iç çapı (Dm)	,0060	,0025	1077
G (kütle akısı)	271,63	199,19	1077
Q (ısı akısı)	12,59	8,04	1077
Bond sayısı (Bo)	635,92	440,94	1077
Buhar Weber sayısı (We)	13029,90	19544,69	1077

Tablo 8. İkinci Regresyon Analizi Değişkenler Arası Korelasyon Tablosu

Bağımlı ve Bağımsız Değişkenler		Rejimdeki ısı transfer katsayısı (Bağımlı Değ.)	Boru iç çapı (Dm)	G (kütle akısı)	Q (ısı akısı)	Bond sayısı (Bo)	Buhar Weber sayısı (We)
Pearson Korelasyonu	Rejimdeki ısı transfer katsayısı (Bağımlı Değ.)	1,000	-,558	,497	,603	-,457	,419
	Boru iç çapı (Dm)	-,558	1,000	-,490	-,467	,858	-,242
	G (kütle akısı)	,497	-,490	1,000	,599	-,292	,913
	Q (ısı akısı)	,603	-,467	,599	1,000	-,220	,622
	Bond sayısı (Bo)	-,457	,858	-,292	-,220	1,000	-,061
	Buhar Weber sayısı (We)	,419	-,242	,913	,622	-,061	1,000

Yapılan ikinci regresyon analizi sonuçlarına göre, değişkenler arası korelasyonların birbirleri ile pozitif ya da negatif yönde orta ve yer yer yüksek düzeylerde (0,4 - 07 arası) güçlü bir ilişki olduğu Tablo 8’de görülmektedir. Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirleri arasında ki zayıf ve zıt yönlü korelasyonlara rağmen tüm değişkenlerin analize katıldığı ilk regresyon analizi korelasyon katsayısının (0,77), birbirleri ile yüksek oranda korelasyon sağlayan değişkenlerin kullanıldığı ikinci regresyon analizi sonucunda belirlenen korelasyon katsayısından az da olsa yine de yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan ikinci regresyon analizi rapor özeti tablo 9’ da verilmiştir.

Yine bu tablodan görüleceği gibi bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıkladığı varyans R<sup>2</sup> değeri ikinci analizde 0.49 olarak hesaplanmıştır. İki regresyon analizi sonucunda bağımsız değişkenlerin birbirleri arasında ki korelasyona göre azaltılması aslında korelasyon katsayısında çok büyük bir değişime yol açmamıştır.

Tablo 9. İkinci Regresyon Analizi Model Özeti

Model	R	R <sup>2</sup>	Adj. R <sup>2</sup>	Tahmini Standart Hata	Durbin-Watson
1	,70 <sup>a</sup>	,49	,48	2,12	,34
a. Tahminleyiciler: (Sabit), Buhar Weber sayısı (We), Bond sayısı (Bo), Q (ısı akısı), Boru iç çapı (Dm), G (kütle akısı)					
b. Bağımlı Değişken: Rejimdeki ısı transfer katsayısı					

### 3.1. Sonuçların Analizi

Bu çalışmada, farklı deneysel çalışmalarla elde edilmiş toplam 1077 veri ile kaynamalı akış rejiminde oluşan ısı transfer katsayısı (HTC) nin tahmin edilmesi amaçlanmış ve bu kapsamda ısı transferi katsayısını etkileyen 26 bağımsız değişken belirlenmiş ve çoklu regresyon analizi yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle regresyon analizinin yapılması için gerekli olan şartların sağlanması amacı ile normal dağılım ve doğrusallık gibi ön testler SPSS programı üzerinden yapılmıştır. Sonrasında yine çoklu regresyon analizinde bir diğer önemli gösterge olan korelasyon analizi yapılmış ve sonuçları bulgular kısmında paylaşılmıştır. Tüm bu değerlendirmeler kapsamında çoklu regresyon analizi 26 değişken kullanılarak SPSS programında yürütülmüş ve analiz sonucunda anlamlı bir regresyon modeli olarak  $F(19, 1057) = 84.48$ ,  $p < 0.001$  ve bağımlı değişkendeki varyansın % 60’ının ( $R^2_{\text{adjusted}} = 0.596$ ) bağımsız değişkenler tarafından açıklanabildiği görülmüştür. Buna göre, örnek olarak Buhar kalitesi (x) değişkeni HTC yi olumlu ve anlamlı olarak tahminlemiştir, Beta = 0.129,  $t(1057) = 1.842$ ,  $p < 0.00$  olarak aşağıdaki tablo 10’da görülen değerler analiz raporunda elde edilmiştir.

Tablo 10. Bağımsız Değişkenlerin Anlamlılık Değerleri

	Standart olmayan katsayılar		Std. Katsayısı	t	Anlamlılık Oranı	
	B	Std. Error	Beta			
Bağımsız Değişkenler	(Sabit)	268.727	26.970		9.964	<.001
	Boru iç çapı (Dm)	930.811	126.940	.795	7.333	<.001
	Buhar kalitesi (x)	1.503	.816	.129	1.842	.066
	G (kütle akısı)	.014	.002	.966	6.529	<.001
	Q (ısı akısı)	.146	.012	.400	11.956	<.001
	İndirgenmiş basınç (Pr)	15.095	12.380	.897	1.219	.223
	Sıvı viskozite ( $\mu$ L)	-.890	.097	-9.825	-9.214	<.001
	Buhar viskozite ( $\mu$ v)	-19.730	2.186	-10.643	-9.028	<.001
	Buhar ısı iletkenliği (kv)	3104735.368	327938.449	4.895	9.467	<.001
	Yüzey gerilimi ( $\sigma$ )	64642.490	9342.395	6.532	6.919	<.001
	Bond sayısı (Bo)	-.006	.001	-.904	-9.730	<.001
	Sıvı Weber sayısı (We)	.000	.000	.539	3.693	<.001
	Buhar Weber sayısı (We)	.000	.000	-.973	-4.218	<.001
	Martinelli sayısı (Xtt)	-.353	.115	-.143	-3.062	.002
	Buhar Re sayısı (Rev)	-1.504	4.634	-.019	-.325	.746
	Froude sayısı (Fr)	-.047	.010	-.258	-4.607	<.001
	Sıvı Pr sayısı (PrL)	6.431E-8	.000	.024	1.056	.291
	Buhar Pr sayısı (PrL)	1.550E-5	.000	1.911	6.822	<.001
	Boşluk oranı ( $\epsilon$ )	-6.318	1.646	-.359	-3.837	<.001
	Islanan yüzey (A)	-19294.483	14132.733	-.054	-1.365	.172

Yukarıdaki tablodan görüleceği şekilde 26 bağımsız değişkenin tamamı olumlu ve anlamlı değerlere sahip olmasa da tüm bağımsız değişkenlerin model içerisinde bağımsız değişkeni belirli oranlarda etkilediği ve buna göre toplamda % 66 hata oranı ile tahminleme yapabildiği belirlenmiştir. Genel olarak bakıldığında IBM SPSS v.29 istatistiksel analiz programı kullanılarak yapılan bu çoklu regresyon analizinin çok sayıda değişken ve veriye rağmen yüksek oranda bir anlamlılık ortaya koyduğu görülmüştür.

Çalışmanın güvenilirliğinin artırılması amacı ile SPSS Regresyon analizi ilk korelasyon raporuna göre nispeten zayıf değişkenler çıkartılarak bağımlı değişken ile korelasyonu en yüksek (0.4 – 0.7 arası) beş değişken seçilerek ikinci bir regresyon analizi yapılmıştır. İkinci analiz sonuçlarında Tablo 8 ve Tablo 9 da görüleceği gibi ilk yapılan regresyon analizine göre korelasyon katsayısı ve açıklanan varyansın daha düşük kaldığı gözlenirse de ilk analize göre belirlenen beş değişkenin bağımlı değişken olan kaynamalı akış rejiminde oluşan ısı transfer katsayısını (HTC) en çok etkileyen ve tahmin edilmesini sağlayan değişkenler olarak gözlenmiştir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

CO<sub>2</sub> gazı, termofiziksel özelliklerinden dolayı diğer konvansiyonel gazlardan farklı davranışlar gösterebilmektedir. CO<sub>2</sub>, yüksek kritik basınç ve düşük kritik sıcaklığa sahip olmasına rağmen doyma sıcaklığı, ısı transfer katsayısı üzerinde (HTC) diğer gazlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Bu özelliklerinden dolayı günümüzde soğutma gazı olarak kısıtlı kullanımı olmasına rağmen genel olarak CO<sub>2</sub>'nin ısı transfer katsayısının çekirdek bölgesinde en iyi performansı gösterdiği iyi bilinmektedir. Bununla birlikte CO<sub>2</sub>'nin iki fazlı akış özelliklerini önemli ölçüde etkileyen CO<sub>2</sub>'nin çok yüksek basınç ve düşük yüzey gerilimleri nedeniyle yatay borulardaki CO<sub>2</sub> buharlaşması için önemli bir kriter olduğu görülmüştür.

Bu çalışma da öncelikle CO<sub>2</sub> gazının ısı transfer katsayısı (HTC) üzerinde direk etkisi bulunan kriterlerin literatür çalışması ile tespiti sağlanmış ve bu kriterlere ait çeşitli kaynaklardan 1071 satır deneysel veri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak günümüzde en çok kullanılan istatistiksel analiz yöntemlerinden regresyon analizi ile önce faktörler arası korelasyonun varlığı ortaya konmuş ve sonrasında en güçlü korelasyonu gösteren değişkenler tespit edilmiştir. CO<sub>2</sub> iki fazlı akış kaynama ısı transfer katsayısı bağımlı değişken olarak analize dahil edilmiş ve literatür araştırması ile tespit edilen 26 kriter bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde bu kadar geniş bir kriter setinin kullanıldığı bir araştırmaya rastlanmamıştır. Regresyon analizi IBM-SPSS programında çalıştırılmış ve program tarafından üretilen raporda hem verilerin analizi hem de değişkenler arası korelasyon incelenmiştir. Veriler içerisinde korelasyonu bozan ve regresyon analiz sonucunu olumsuz yönde etkileyebilecek uç değerler tespit edilerek ayıklanmıştır. İlk regresyon analizinde ortaya çıkan ve bağımlı değişkeni etkileyen kriterler alınarak tekrar ikinci bir analiz yapılmış ve regresyon katsayısı yeniden belirlenmiştir. Böylece CO<sub>2</sub> gazının ısı transfer katsayısı (HTC) yi en çok etkileyen ve tahmin edilme olasılığını artırdığı düşünülen beş kriterin tespit edilmesi sağlanmış ve korelasyon katsayısının ( R ) 0.7 gibi yüksek bir oran olduğu görülmüştür. Yine ilgili tablolardan görüleceği gibi determinasyon katsayısı yani açıklanan varyansın (R<sup>2</sup>) en az yaklaşık yüzde 50 oranında değişkenler arasında ki ilişkinin var olabileceğini göstermiştir.

Bu çalışma sonucunda CO<sub>2</sub>'nin soğutucu akışkan olarak kullanıldığı verimli soğutma sistemi ürünlerinin, laboratuvar ölçeğinden prototip ve nihai ürün aşamasına geçiş için kaynamalı akış bölgesinde ısı transfer katsayısı tahmin korelasyonları üzerine çalışmalar yapılmasının önemli olduğu anlaşılmıştır. Çalışmanın klasik istatistiksel yöntemler dışında yapay sinir ağları, genetik algoritma gibi diğer sezgisel makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak tekrarlanması ile daha başarılı sonuçların alınabileceği düşünülmektedir.

#### Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### Teşekkür

Bu çalışma Marmara Üniversitesi BAP birimi tarafından FYL-2022-10426 kodlu proje tarafından desteklenmiştir.

**KAYNAKÇA**

- Al-Zaidi, A. H., Mahmoud, M. M., & Karayiannis, T. G. (2022). Flow boiling in copper and aluminium microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123101, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123101>.
- Arslan, B., & Ertuğrul, İ. (2022). Çoklu Regresyon, arima ve yapay sinir ağı yöntemleri ile türkiye elektrik piyasasında fiyat tahmin ve analizi. *Journal of Management and Economics Research*, 20(1), 331-353. <http://dx.doi.org/10.11611/yead.988146>.
- Ayvaz, B., & Kusakci, A. O. (2017). Electricity consumption forecasting for Turkey with nonhomogeneous discrete grey model. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(3), 260-267. <http://dx.doi.org/10.1080/15567249.2015.1089337>.
- Bansal, P. K., & Zhao, X. (2007, Mayıs, 28-31). *Flow boiling heat transfer of CO2 at low temperatures-a critical review*. 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Trondheim. Norveç.
- Bruno, F., Belusko, M., & Halawa, E. (2019). CO<sub>2</sub> refrigeration and heat pump systems—a comprehensive review. *Energies*, 12(15), 2959. <https://doi.org/10.3390/en12152959>.
- Chen, S., Mao, J., & Han, X. (2016). Heat transfer analysis of a vertical ground heat exchanger using numerical simulation and multiple regression model. *Energy and Buildings*, 129, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.010>
- Cheng, L., Ribatski, G., & Thome, J. R. (2008). New prediction methods for CO<sub>2</sub> evaporation inside tubes: Part II—An updated general flow boiling heat transfer model based on flow patterns. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(1-2), 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.001>.
- Cheng, L., Xia, G., & Thome, J. R. (2021). Flow boiling heat transfer and two-phase flow phenomena of CO<sub>2</sub> in macro-and micro-channel evaporators: Fundamentals, applications and engineering design. *Applied Thermal Engineering*, 195, 117070. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117070>.
- Di Filippo, R., Bursi, O. S., & Di Maggio, R. (2022). Global warming and ozone depletion potentials caused by emissions from HFC and CFC banks due to structural damage. *Energy and Buildings*, 273, 112385. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112385>.
- Dönmez, N.P. (2012). *In tube evaporation of carbon dioxide with and without oil* [Doktora tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Eygü, H. & Kılınç, A. (2020). Oecd Ülkelerinin Lojistik Performans Endekslerinin Ridge Regresyon Analizi ile Araştırılması. *Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(2), 899-919. <https://doi.org/10.26468/trakyasobed.688737>.
- Fang, X., Zhou, Z., & Li, D. (2013a). Review of correlations of flow boiling heat transfer coefficients for carbon dioxide. *International Journal of Refrigeration*, 36(8), 2017-2039. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.05.015>.

- Fang, X. (2013b). A new correlation of flow boiling heat transfer coefficients for carbon dioxide. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 802-807. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.024>.
- Grauso, S., Mastrullo, R., Mauro, A. W., & Vanoli, G. P. (2011). CO<sub>2</sub> and propane blends: Experiments and assessment of predictive methods for flow boiling in horizontal tubes. *International Journal of Refrigeration*, 34(4), 1028-1039. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.03.001>.
- Jiang, L., Liu, J., Zhang, L., Liu, Q., & Xu, X. (2017). Characteristics of heat transfer for CO<sub>2</sub> flow boiling at low temperature in mini-channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 2120-2129. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.113>.
- Jianxin, P., & Yigang, L. (2009). Estimation of the surface tension of liquid carbon dioxide. *Physics and Chemistry of Liquids*, 47(3), 267-273. <https://doi.org/10.1080/00319100701824389>.
- Kalayci, S. (2014). SPSS uygulamalı çok degiskenli istatistik teknikleri (6. Baski). *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara.
- Kayakuş, M., & Terzioğlu, M. (2021). Yapay sinir ağları ve çoklu doğrusal regresyon kullanarak emeklilik fonu net varlık değerlerinin tahmin edilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 14(1), 95-103. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.742995>.
- Kim, S., & Hrnjak, P. S. (2012, Temmuz, 16-19). *Effect of oil on flow boiling heat transfer and flow patterns of CO<sub>2</sub> in 11.2 mm horizontal smooth and enhanced tube*, International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Indiana. 2519-2528.
- Li, W., Zheng, B., Lv, T., & Ayub, Z. (2020). A modified correlation for flow boiling heat transfer in plate heat exchangers. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 12(6), 6-14. <https://doi.org/10.1115/1.4046786>.
- Mastrullo, R., Mauro, A. W., Rosato, A., & Vanoli, G. P. (2010). Carbon dioxide heat transfer coefficients and pressure drops during flow boiling: Assessment of predictive methods. *International Journal of Refrigeration*, 33(6), 1068-1085. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.04.005>.
- Mistral (2022). Mistral Programs for Refrigeration & Air Conditioning Professionals başlığı ile [https://www.mistralassociates.com/co2\\_temperature\\_pressure\\_enthalpy\\_entropy\\_viscosity.html](https://www.mistralassociates.com/co2_temperature_pressure_enthalpy_entropy_viscosity.html) adresinden 21 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Oh, H. K., & Son, C. H. (2011). Flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics of CO<sub>2</sub> in horizontal tube of 4.57-mm inner diameter. *Applied Thermal Engineering*, 31(2-3), 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.08.026>.
- Oh, J. T., Pamitran, A. S., Choi, K. I., & Hrnjak, P. (2011). Experimental investigation on two-phase flow boiling heat transfer of five refrigerants in horizontal small tubes of 0.5, 1.5 and 3.0 mm inner diameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54(9-10), 2080-2088. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.12.021>.
- Özdemir, M.R. (2016). *Single-phase flow and flow boiling of water in rectangular metallic microchannels* [Doktora tezi]. Brunel University London Graduate School. London.

- Parahovnik, A., & Peles, Y. (2022). High pressure saturated flow boiling of CO<sub>2</sub> at the micro scale. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 122449. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.1224490017-9310>.
- Park, C. Y., & Hrnjak, P. S. (2007). CO<sub>2</sub> and R410A flow boiling heat transfer, pressure drop, and flow pattern at low temperatures in a horizontal smooth tube. *International Journal of Refrigeration*. 30(1), 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.08.007>.
- Scalabrin, G., Marchi, P., Finezzo, F., & Span, R. (2006). A reference multiparameter thermal conductivity equation for carbon dioxide with an optimized functional form. *Journal of Physical and Chemical Reference data*, 35(4), 1549-1575. <https://doi.org/10.1063/1.2213631>.
- Span, R., & Wagner, W. (1996). A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 25(6), 1509-1596. <https://doi.org/10.1063/1.555991>.
- Tabachnick, B.G., Fidell, L.S. (2013). Using multivariate statistics (6th Edn.). *Pearson Education*, Boston.
- Yun, R., Kim, Y., Kim, M.S. (2005). Convective boiling heat transfer characteristics of CO<sub>2</sub> in microchannels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 235–242.
- Zhang, L., Liu, J., Yang, J., & Ge, Q. (2012, Mart, 27-29). *Study of Heat Transfer for CO<sub>2</sub> Flow Boiling in Horizontal Small Diameter Tubes*, IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Şangay.1-4.
- Zhang, J., Elmegaard, B., & Haglind, F. (2021). Condensation heat transfer and pressure drop correlations in plate heat exchangers for heat pump and organic Rankine cycle systems. *Applied Thermal Engineering*. 183, 116231. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116231>.