

## İYM'LI ARAÇ RADYATÖRLERİNDE KULLANILAN FARKLI NANOAKIŞKANLARIN ÇKKV YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Doç. Dr. Aslı ABDULVAHİTOĞLU

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi  
aabdulvahitoglu@atu.edu.tr ORCID ID:0000-0002-3603-6748

Dr. Öğr. Üyesi Adnan ABDULVAHİTOĞLU

Mudanya Üniversitesi  
abdulvahitoglu@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-2659-6709

### ÖZET

Son yıllarda teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler ve değişim, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik, optimizasyon gibi kavramların sanayi ve mühendislik açısından önemini ortaya koymaktadır. Enerji kaynaklarının verimli kullanımı, karbon emisyonlarını azaltma ve küresel ısınma ve iklim değişikliği ile mücadele hedefleri; özellikle sanayinin lokomotifleri olarak ifade edilen otomotiv endüstrisinde yeni tasarım ve malzeme arayışlarını beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda otomotiv endüstrisinde daha çevreci, ekonomik ve yüksek verimli araç geliştirme çalışmaları artarak devam etmektedir. Bu çalışmalardan birisi olan motor verimliliğinin artırılması hususu ilk içten yanmalı motorların (İYM) üretildiği günden bu yana çalışmaların merkezinde yer almaktadır. Elektrikli, hibrit, hidrojenli araç vb araçlarda kullanılan yakıt cinsi ne olursa olsun motor verimliliğini, artırma çalışmaları her alanda devam etmektedir. Bu durum özellikle İYM'li araçlarda güvenilir ve yüksek performanslı ısı yönetim sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Motorda ortaya çıkan yüksek ısının etkili bir şekilde uzaklaştırılması, kullanılan soğutucuların ısı özelliklerine bağlıdır. Yıllardır yaygın olarak kullanılan su ve su-etilen glikol gibi geleneksel karışımlar düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle düşük soğutma performansı göstermektedirler. Bu noktada alternatif soğutucuların geliştirilmesi ve radyatör performanslarının iyileştirilmesine yönelik çalışmaların artarak devam etmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada, İYM'li araçlarda kullanılan farklı nanoakışkanlar kullanılarak oluşturulan soğutucu malzemeler verimlilik, enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik açısından Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Standart Sapma (SD) tümleşik CODAS ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** İYM, Nanoakışkan, SD, CODAS

### 1. GİRİŞ

Günümüzde hızlı teknolojik gelişmelerin meydana getirdiği hızlı değişim ve dönüşüm, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik birçok endüstride olduğu gibi otomotiv sektöründe de ön plana çıkarmaktadır. Küresel ısınma ve iklim değişikliği ile artan çevresel kaygılar, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve emisyon azaltma çalışmaları, üreticileri daha çevreci ve enerji verimliliği yüksek sistemler geliştirmeye zorlamaktadır. Bu noktada araçların ısı yönetim

sistemleri, enerji verimliliğinin artırılması ve motor ömrünün uzatılması vb sebeplerden dolayı araçların genel performansını etkileyen en önemli unsurlardan biridir.

Araçlarda motor verimliliğinin artırılması, yalnızca yakıt tüketiminin azaltılmasına değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkı sağlar. Bu bağlamda İYM’larda çalışması esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklığın etkili bir şekilde kontrol edilmesi ve uzaklaştırılması gerekmektedir. Dolayısıyla, araçların ısı yönetim sistemlerinin güvenilir, kararlı ve yüksek performanslı biçimde çalışması önem taşımaktadır. Motor tarafından üretilen ısının etkin biçimde dağıtılması ve sistemden uzaklaştırılması, doğrudan kullanılan soğutma akışkanlarının ısı özelliklerine bağlıdır. Günümüzde su ve su-etilen glikol karışımları gibi geleneksel soğutucular bu maksatla yaygın olarak kullanılmakta, ancak bu akışkanların düşük ısı iletkenlikleri ısı transferi sürecinin etkinliğini sınırlamaktadır (Sidik vd., 2015; Sidik vd., 2017; Gupta, 2017). Bu husus, özellikle güçlü motorlarda ve zorlu çalışma koşullarında sistem performansının düşmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle, mevcut soğutma performansını artırabilecek alternatif soğutucu akışkanların geliştirilmesi ve incelenmesi araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir (Yıldız, 2024). Söz konusu eğilim, özellikle radyatörlerin ısı verimliliğini artırmaya ve genel sistem performansını optimize etmeye yönelik çalışmaların artmasına neden olmuştur.

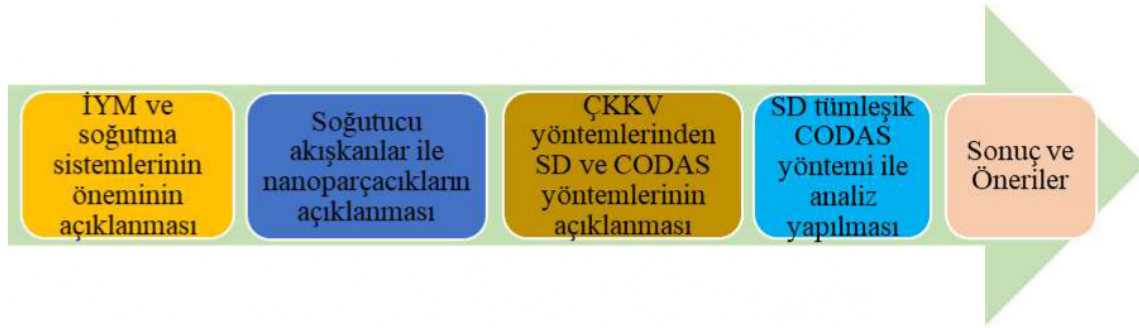
Bu bağlamda, nanoparçacık katkılı akışkanlar, araç soğutma sistemlerinde ısı transfer performansını artırmaya yönelik çalışmalarda öne çıkan araştırma alanlarından biri haline gelmiştir (Soylu, 2018). Nanoakışkanlar, çapları genellikle 100 nm’nin altında olan metalik veya metalik olmayan nanoparçacıkların, tek adımlı veya iki adımlı üretim yöntemleri kullanılarak bir baz sıvı içerisinde homojen biçimde dağıtılmasıyla elde edilmektedir. Bu yöntemle oluşturulan nanoakışkanlar, artırılmış ısı iletkenlik, özgül ısı kapasitesi, viskozite ve yoğunluk gibi gelişmiş termodinamik özellikleri sayesinde, geleneksel soğutuculara kıyasla çok daha verimli bir ısı transferi sağlamaktadır (Sidik vd., 2015). Bu durum nanoakışkanların özellikle motor soğutma sistemlerinde ısı transfer mekanizmalarının optimizasyonu ve enerji kayıplarının azaltılması açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, nanoakışkanların kullanımı, hem daha az hacim kaplayan, daha verimli ve optimize edilmiş soğutma sistemlerinin tasarlanmasına olanak sağlayabilecek hem de yakıt ekonomisine hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilecek yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Nanoakışkan üretiminde yaygın olarak kullanılan partiküller arasında metalik parçacıklar (Cu, Al, Fe, Au, Ag), metal oksitler ( $Al_2O_3$ , CuO,  $Fe_3O_4$ ,  $TiO_2$ , SiC), karbon nanotüpler ve nano damlacıklar yer almaktadır (Li vd., 2009). Bu nanoparçacıklar, temel akışkanın ısı iletkenliğini artırarak sistemin genel soğutma kapasitesine katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla, otomotiv radyatörlerinde kullanılacak nanoakışkan türünün ve konsantrasyonunun doğru seçilmesi, sistem verimliliğini de olumlu yönde etkileyecektir.

Bu bağlamda otomotiv soğutma sistemlerine yönelik çalışmalarda, nanoparçacık katkılı akışkanlar önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Nanoakışkanlar, çapları 100 nm’den küçük olan metalik ya da metalik olmayan parçacıkların, tek veya çift aşamalı yöntemlerle bir baz sıvı içinde homojen bir şekilde dağıtılmasıyla elde edilmektedir. Bu akışkanlar, geleneksel soğutucularla karşılaştırıldığında daha üstün termodinamik özellikler sergileyerek ısı transferinde daha yüksek verimlilik sağlamaktadır (Sidik vd., 2015).

Nanoakışkan sentezinde kullanılan partikül türleri oldukça çeşitlidir. En sık tercih edilen nanoparçacıklar arasında metalikler (Cu, Al, Fe, Au, Ag), metal oksitler ( $Al_2O_3$ , CuO,  $Fe_3O_4$ ,  $TiO_2$ , SiC), karbon nanotüpler ve nano damlacıklar bulunmaktadır (Li vd., 2009).

Ancak nanoakışkanların motor soğutma performansı üzerindeki etkisi, termodinamik özelliklerini belirleyen birçok faktörün varlığı nedeniyle karmaşık bir durum sergilemektedir. Farklı nanoakışkan tiplerinin ve konsantrasyonlarının karşılaştırılmalı bir şekilde analiz edilebilmesi için etkili bir karar destek sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda bu çalışma ile, İYM'li araç radyatörlerinde kullanılan farklı nanoakışkanların performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çeşitli nanoakışkanların ısı performansları, verimlilik düzeyleri ve uygunluk dereceleri çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Böylece, farklı nanoakışkanların termodinamik davranışları objektif ölçütlerle değerlendirilmiş ve otomotiv soğutma sistemleri için optimum akışkan seçiminin belirlenmesine katkı sağlanmıştır. Çalışmanın aşamaları aşağıda Görsel 1.'de gösterilmiştir.



Görsel 1. Çalışmanın aşamaları

## 2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada İYM'li araç radyatörlerin soğutma sistemlerinin verimliliğinin artırılması amacıyla kullanılan nanoparçacıklardan bir kısmı ÇKKV yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

### 2.1. Radyatörler ve Nanoakışkanlar

Radyatör, araç motorunun çalışması sırasında ortaya çıkan fazla ısının uzaklaştırılması sağlayarak, motorun ısı dengesini korumaya çalışan en temel bileşenlerden biridir (Peyghambarzadeh vd., 2013). Bu sistem genellikle su veya su bazlı karışımlar kullanarak ısıyı ortam havasına aktarır. Böylece motorun optimum sıcaklık aralığında çalışmasını sağlayarak hem yakıt verimliliğini hem de sistemin sürdürülebilirliğini sağlar.

Son yıllarda literatürde, motor soğutma sistemlerinin performansını artırmaya yönelik çok sayıda deneysel ve teorik araştırma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda radyatörlerde kullanılan özellikle CuO,  $Al_2O_3$ , ZnO ve  $Al_2O_3-TiO_2$  gibi hibrit nanoparçacıkların, dikkate değer sonuçlar verdiği görülmektedir (Bargal vd., 2020; Louis vd., 2022; Hamza vd., 2024). Bu nanoparçacık katkıları sayesinde, ısı transferi daha etkili bir şekilde gerçekleşmekte ve sistem verimliliği artmaktadır. Özellikle CuO–su esaslı nanoakışkanlar üzerine yapılan araştırmalarda, ısı iletkenlik katsayısında belirgin artışlar ve ısı transfer performansında önemli iyileşmeler

tespit edilmiştir (Ravisankar, 2018; Ravisankar vd., 2015; Hamza vd., 2024; Deriszadeh ve Monte, 2020). Bu sonuçlar, nanoakışkanların yalnızca otomotiv radyatörlerinde değil, aynı zamanda ısı değiştiricilerinde (Kılıç ve Özcan, 2017), mikro kanallı soğutma sistemlerinde (Kalteh ve Abedinzadeh, 2018), elektronik bileşen soğutma uygulamalarında (Al-Rashed vd., 2016) ve iklimlendirme sistemlerinde de etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Genellikle bakır ve alüminyum gibi yüksek ısıl iletkenliğe sahip metallere üretilen radyatörlerde kullanılan nanoakışkanların artırılmış termofiziksel özelliklerinin, motor soğutma sistemlerinin genel verimliliğinde önemli kazanımlar sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, nanoakışkanların radyatör performansına olan etkilerini inceleyen çalışmalar, ısı yönetiminde yeni nesil çözümler sunma potansiyelleri nedeniyle güncel araştırma alanları arasında ön plana çıkmaktadır (Teng ve Yu, 2013). Bu çalışmada da nanoakışkanların aşağıda açıklanan özellikleri kullanılarak karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Bu özellikler (Bahrami ve ark. 2025; Kilic ve Ali 2019, Lee ve ark, 2008; Apmann vs ark, 2022; O' Hanley ve ark, 2012; Hussein ve ark 2016, Vanapalli ve ter Brake, 2013; Nine ve ark, 2014, Ali ve arkadaşları 2021, Referans döşe, 1988, Parsai ve Kumar, 2021)

i. Kinematik Viskozite ( $\nu$ ): Viskozite, bir sıvının akışa karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanır ve nanoakışkanlar için tüm ısı ve akış uygulamalarında önemli bir özelliktir. Daha yüksek viskoziteye sahip nanoakışkanlar, daha yüksek akış direncine ve daha düşük akış hızına yol açar; bu durum aynı zamanda ısı transferinin azalmasına da neden olduğu literatürde belirtilmiştir .

ii. Yoğunluk ( $\rho$ ): Düşük hacim fraksiyonlarında yoğunluk değişimi ihmal edilebilir düzeydedir; bu nedenle literatür ortalamaları kullanılmıştır.

iii. Özgül Isı ( $c_p$ ): Nanoparçacık eklenmesi  $c_p$ 'yi literatürde düşüğü gözlemlenmiştir. Metal nanoparçacık (Cu) için düşüş daha belirgindir.

iv. Isıl İletkenlik ( $k$ ): Temel sıvının hacmine kıyasla çok küçük miktarlarda nanoparçacık eklenmesi bile sıvının ısıl iletkenliğini artırabildiği literatürde belirtilmiştir.

v. Maliyet: kullanılan nanoakışkanların gram maliyeti dolar olarak tespit edilmiştir.

vi. Toksikite (RfD): RfD, çeşitli nanopartiküller için güvenli günlük maruziyet düzeylerini bilimsel temellere dayalı olarak tahmin eden ve kimyasal risk değerlendirmesinde temel bir parametre olarak kullanılan bir ölçüttür. Çevresel düzenlemelerde ve halk sağlığının korunmasında maruziyet sınırlarının belirlenmesi için kritik bir araçtır. Bu nedenle, sağlam toksikolojik ölçütlerin uygulanması etkili risk yönetimi için önem taşır.

vii. Stabilité: Nanoakışkanların stabilitesi ve parçacık dağılımı, performans ve uygulamalarını doğrudan etkiler. Stabilitéyi bozan temel sorun, parçacıkların kümelenmesi (aglomerasyon) olup, dağılım homojenliğini artırmak için optimizasyon gerektirir. Aşağıdaki nanoparçacıklar dilsel ölçek ile değerlendirilmiştir.

- Metal oksitler ( $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $CuO$ ,  $ZnO$ ): Yüksek seviye,
- Metal Cu: oksidasyon + agglomeration : Düşük seviye olarak değerlendirilmiştir.

Bu özellikler kullanılarak değerlendirilen dört çeşit nanoakışkan ve özellikleri aşağıda Çizelge 1.'de gösterilmiştir

Çizelge 1. Nanoakışkanlar ve özellikleri (Bahrami ve ark. 2025; Kilic ve Ali 2019)

Kriter Yönü	max	max	max	max	min	min	min
Nanoakışkan	Stabilite	Özgül Isı cp (J/kg·K)	Toksisite RfD (mg/kg/day)	Isıl iletkenlik k (W/m·K)	Maliyet (\$/g)	Kinematik viskozite	Yoğunluk ρ (kg/m <sup>3</sup> )
Cu-su	Düşük	3594,13	0,01	0,6422	5,00	0,000000902	1157,43
CuO-su	Yüksek	3754,31	0,026	0,6391	0,75	0,000000943	1108,23
TiO2-su	Yüksek	3902,51	0,05	0,6382	0,80	0,000000982	1063,24
Al2O3-su	Yüksek	3931,45	0,006	0,6378	0,70	0,000000989	1055,84

## 2.2. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Yöntemleri

ÇKKV yöntemleri, karar verme sürecinde birden fazla bakış açısının ve karmaşık veri setlerinin dikkate alarak daha sağlıklı kararlar verilmesini sağlamak amacıyla 1960'lı yıllarda geliştirilmiştir (Afshari vd., 2016). Bu yöntemler, çok sayıda ve çoğu zaman birbiriyle çelişen kriterleri sistematik bir biçimde değerlendirerek seçenekler arasında en uygun olanın tespitine yardımcı olur. Özellikle kriter ve seçenek sayısının artmasıyla birlikte karar verme süreci daha karmaşık hale geldiği karar problemlerinde ÇKKV yöntemlerinin kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir (Abdulvahitoğlu vd., 2024). Bu noktada veri setlerinin özelliğine göre subjektif ve objektif yöntemler kullanılmaktadır. Bazı durumlarda da subjektif veri setleri aşağıda Çizelge 2.'de gösterildiği gibi dilsel ölçek kullanılarak objektif hale getirilmekte ve bu şekilde sistematik ve analitik değerlendirmeler yapılabilmektedir.

Çizelge 2. Dilsel ölçek (Cengiz ve Abdulvahitoğlu, 2024)

Değer	Açıklama
1	Çok düşük
3	Düşük
5	Normal
7	Yüksek
9	Çok yüksek

### 2.2.1. Standart Sapma (SD) Yöntemi

ÇKKV problemlerinde karara etki eden parametrelerin önem düzeylerinin doğru biçimde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Objektif veri setlerinin bulunduğu kriter ÇKKV problemlerinde önem dereceleri SD yöntemi kullanılarak belirlenebilir. Bu yöntem, kriterlerin dağılımlarını dikkate alarak, SD değeri yüksek olan kriterlere daha fazla ağırlık verir. Böylece, bu tür kriterler seçenekler arasındaki farkları ayırt etmede daha etkili olur (Diakoulaki et al. 1995).

SD yaklaşımı, parametrelerin önem derecelerini sadece objektif verilere dayanarak değerlendirmeye olanak tanıdığı için ek bir uzmana ihtiyaç duymaz. Ayrıca yöntemin uygulanabilirliği, verilerin sıfır, pozitif veya negatif değerlere sahip olmasından etkilenmez. Bu özellikleri nedeniyle araştırmacılar tarafından SD yöntemi sıklıkla tercih edilmekte ve kullanılmaktadır. Yöntem aşağıda belirtilen dört aşamada uygulanmaktadır (Baydaş ve Pamucar, 2022; Petrović et al., 2023).

Adım 1. Eşitlik (1) ile başlangıç karar matrisi oluşturulur

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2. X karar matrisi Eşitlik (2) vektör normalizasyonu ile normalize edilir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2)$$

Adım 3. Eşitlik (3) ile Nanoakışkanların özelliklerinin Standart Sapma değerleri bulunur.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_{ij})^2}{m}} \quad (3)$$

Adım 4. Eşitlik (4) ile parametrelerin önem dereceleri hesaplanır.

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{i=1}^n \sigma_j} \quad (4)$$

### 2.2.2. Birleştirilebilir Uzaklık Tabanlı Değerlendirme (CODAS) Yöntemi

İngilizce açılımı “Combinative Distance-based Assessment” olan CODAS yöntemi, Keshavarz Ghorabae ve arkadaşları (2016) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde, alternatiflerin birbirlerine göre tercih edilebilirliği hem Öklid hem de Taksicab uzaklık ölçüleri birlikte kullanılarak hesaplanır. CODAS yaklaşımı, negatif ideal çözümden daha uzak olan alternatiflerin daha yüksek tercih edilebilirliğe sahip olduğu varsayımına dayanır (Tuş ve Adalı, 2018). Yöntemin temelinde, öncelikle Öklid uzaklığı hesaplanır. Eğer iki alternatifin Öklid uzaklıkları birbirine eşit çıkarsa, çözümde Taksicab uzaklığı dikkate alınarak nihai tercih belirlenir. Yöntemin aşamaları aşağıda açıklanmıştır (Keshavarz Ghorabae vd., 2016; Çınaroğlu, 2021).

Adım 1. Bu yöntemde de başlangıç karar matrisi Eşitlik (1)'de gösterildiği gibi tesis edilir.

Adım 2. Fayda (max) yönlü kriterler Eşitlik (5) ve maliyet (min) yönlü kriterler Eşitlik (6) kullanılarak X başlangıç matrisi normalize edilir.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{j,max}} \quad (5)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{j,min}}{x_{ij}} \quad (6)$$

Adım 3. Ağırlıklandırılmış normalize matris Eşitlik (7) kullanılarak oluşturulur.

$$r_{ij} = n_{ij} w_j \quad (7)$$

Adım 4. Eşitlik (8) kullanılarak negatif ideal çözüm değerleri bulunur.

$$ns = [ns_j]_{1*m}$$

$$ns_j = \min_i r_{ij} \quad (8)$$

Adım 5. Eşitlik (9) ve (10) ile sırasıyla Öklid ( $E_i$ ) ve Taxicab ( $T_i$ ) uzaklık ölçülerini kullanarak seçeneklerin negatif ideal çözüm noktasına uzaklıkları bulunur.

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - ns_j)^2} \quad (9)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - ns_j| \quad (10)$$

Adım 6. Eşitlik (11) ve (12) kullanılarak Göreceli Değerlendirme Matrisi oluşturulur.

$$R_a = [h_{ik}]_{n*n} \quad (11)$$

$$h_{ik} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) * (T_i - T_k)) \quad (12)$$

Burada kullanılan  $\psi$  değeri karar seçeneklerinin Öklid uzaklık değeri eşitliğinin ifadesi için kullanılan bir eşik fonksiyonudur ve aşağıda belirtildiği şekilde ifade edilir. Burada belirtilen  $\tau$  değeri Taxicab ( $T_i$ ) uzaklığının ne zaman hesaba katılacağını gösterir. Genellikle 0,01 ile 0,05 arasında değişen bu değer yaygın olarak 0,02 olarak kabul edilir (Ghorabae vd., 2016; Badi vd., 2018; Kiracı ve Bakır, 2020).

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } |x| > \tau \\ 0, & \text{eğer } |x| < \tau \end{cases} \quad (13)$$

Adım 7. Eşitlik (14) ile her karar seçeneğinin puanı ( $H_i$ ) hesaplanır. Değerlendirme puanları büyükten küçüğe doğru sıralanarak seçenekler sıralanmış olur.

$$H_i = \sum_{k=1}^n h_{ik} \quad (14)$$

### 3. TARTIŞMA VE BULGULAR

Çizelge 1.'de belirtilen Nanoakışkanların dilsel ölçekle ifade edilen değerleri de sayısallaştırıldıktan sonra ÇKKV hesaplamaları için aşağıda Çizelge3.'te belirtilen X başlangıç matrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 3. X başlangıç karar matrisi

Kriter Yönü	max	max	max	max	min	min	min
Nanoakışkan	Stabilite	Özgül Isı cp (J/kg·K)	Toksosite Rfd (mg/kg/day)	Isıl iletkenlik k (W/m·K)	Maliyet (\$/g)	Kinematik viskozite	Yoğunluk ρ (kg/m <sup>3</sup> )
Cu-su	3	3594,13	0,01	0,6422	5	9,02E-07	1157,43
CuO-su	7	3754,31	0,026	0,6391	0,75	9,43E-07	1108,23
TiO2-su	7	3902,51	0,05	0,6382	0,8	9,82E-07	1063,24
Al2O3-su	7	3931,45	0,006	0,6378	0,7	9,89E-07	1055,84

Öncelikle Çizelge 3'te belirtilen değerler SD yönteminde vektör normalizasyonu ile normalize edilir. Normalize edilmiş matris aşağıda Çizelge 4.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. SD yönteminde normalize edilmiş matris.

Nanoakışkan	Stabilite	Özgül Isı cp (J/kg·K)	Toksosite Rfd (mg/kg/day)	Isıl iletkenlik k (W/m·K)	Maliyet (\$/g)	Kinematik viskozite	Yoğunluk ρ (kg/m <sup>3</sup> )
Cu-su	0,2402	0,4732	0,1738	0,5022	0,9678	0,4724	0,5276
CuO-su	0,5604	0,4943	0,4518	0,4998	0,1452	0,4939	0,5051
TiO2-su	0,5604	0,5138	0,8688	0,4991	0,1548	0,5143	0,4846
Al2O3-su	0,5604	0,5176	0,1043	0,4988	0,1355	0,5180	0,4813

Daha sonra (3) ve (4) numaralı eşitlikler kullanılarak SD değerleri ve parametrelerin ağırlıkları yani önem dereceleri hesaplanmış olup, sonuçlar aşağıda Çizelge 5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Nanoakışkanların özelliklerinin önem dereceleri

Nanoakışkan özellikleri	Stabilite	Özgül Isı cp (J/kg·K)	Toksosite Rfd (mg/kg/day)	Isıl iletkenlik k (W/m·K)	Maliyet (\$/g)	Kinematik viskozite	Yoğunluk ρ (kg/m <sup>3</sup> )
Önem dereceleri (Ağırlıklar)	0,20631	0,17658	0,14641	0,12912	0,13981	0,17420	0,02757

Nanoakışkanların özelliklerinin önem dereceleri hesaplandıktan sonra çalışmanın ikinci aşamasına geçilerek seçenekler yani nanoakışkanlar karşılaştırılır. Bu karşılaştırma CODAS yöntemi ile yapılacak olup başlangıç matrisi aynı Çizelge 3.'te gösterildiği gibidir. CODAS yönteminde (5) ve (8) numaralı eşitlikler kullanılarak başlangıç matrisi normalize edilir. Normalize edilmiş matris aşağıda Çizelge 6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. CODAS yönteminde normalize edilmiş matris.

Nanoakışkan	Stabilite	Özgül Isı cp (J/kg·K)	Toksosite Rfd (mg/kg/day)	Isıl iletkenlik k (W/m·K)	Maliyet (\$/g)	Kinematik viskozite	Yoğunluk ρ (kg/m <sup>3</sup> )
Cu-su	0,42857	0,91420	0,20000	1,00000	0,14000	1,00000	0,91223
CuO-su	1,00000	0,95494	0,52000	0,99517	0,93333	0,95652	0,95273
TiO2-su	1,00000	0,99264	1,00000	0,99377	0,87500	0,91853	0,99304
Al2O3-su	1,00000	1,00000	0,12000	0,99315	1,00000	0,91203	1,00000

Sırasıyla (7)-(14) numaralı eşitliklerde belirtilen CODAS yönteminin diğer adımları uygulandıktan sonra elde edilen sonuçlar aşağıda Çizelge 7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7. CODAS yönteminde sonuçlar

Nanoakışkan	$E_i$	$T_i$	$H_i$	Sıralama
Cu-su	0,088748	0,100565	-2,17274	4
CuO-su	0,80646	1,062236	1,639028	2
TiO2-su	0,759927	1,082983	1,49439	3
Al2O3-su	0,872601	1,080817	1,959332	1

Yapılan işlemler sonucunda en etkili sonucu verecek nanoakışkanlar sırasıyla “Al2O3-su”, “CuO-su” ve “TiO2-su” olarak tespit edilmiştir. Tüm hesaplamalar Microsoft Excel kullanılarak yapılmıştır.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, gelişen teknolojiler ışığında otomotiv soğutma sistemlerinde kullanılan akışkanların ısı performansını iyileştirmeye yönelik yenilikçi yaklaşımlar ele alınmış, bu kapsamda kullanılan nanoakışkanlardan bir kısmı ÇKKV yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Farklı nanoakışkanlar sürdürülebilirlik, özgül ısı, yoğunluk, toksisite, ısı iletkenlik, maliyet, kinematik viskozite özelliklerine göre SD tümleşik CODAS yöntemi ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda nanoakışkanlar etkinliklerine göre “Al2O3-su”, “CuO-su” ve “TiO2-su” şeklinde sıralanmıştır. Bu çalışma ile radyatör soğutmada kullanılan nanoakışkanlar konusunda çalışma yapan araştırmacılara en iyi performans gösterecek nanoakışkanı belirleme konusunda karar desteği verilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma değişik ÇKKV yöntemleri ile yeniden yapılarak sonuçlar doğrulanabilir. Veya karşılaştırma yapılacak nanoakışkan sayısı artırılarak, uzman görüşlerine dayalı ağırlıklandırma yöntemleri ile hem subjektif hem de objektif değerlendirmeler yapılabilir, elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir. Hatta bazı parametre değerleri değiştirilerek duyarlılık analizi yapılabilir.

#### KAYNAKÇA

- Abdulvahitoğlu, A.; Vural, D.; Macit, I. (2024). Selecting Facility Location of Gendarmerie Search and Rescue (GSR) Units; An Analysis of Efficiency in Disaster Response. *Comput. Ind. Eng.* 197, 110639. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110639>.
- Afshari, A.; Vatanparast, M.; Čočalo, D. (2016). Application of Multi Criteria Decision Making to Urban Planning—A Review. *J. Eng. Manag. Compet.* 6, 46–53.
- Ali N, Bahman AM, Aljuwayhel NF, Ebrahim SA, Mukherjee S, Alsayegh A. Carbon-Based Nanofluids and Their Advances towards Heat Transfer Applications—A Review. *Nanomaterials.* 2021; 11(6):1628. <https://doi.org/10.3390/nano11061628>
- Al-Rashed, M. H., Dzido, G., Korpyś, M., Smolka, J., & Wójcik, J. (2016). Investigation on the CPU nanofluid cooling. *Microelectronics Reliability*, 63, 159-165.

- Apmann K, Fulmer R, Scherer B, Good S, Wohld J, Vafaei S. Nanofluid Heat Transfer: Enhancement of the Heat Transfer Coefficient inside Microchannels. *Nanomaterials*. 2022; 12(4):615. <https://doi.org/10.3390/nano12040615>
- Badi, I., & Kridish, M. (2020). Landfill site selection using a novel FUCOM-CODAS model: A case study in Libya. *Scientific African*, 9, e00537, 1-10.
- Bahrami, H.-R., Allahdadi, O., & Saffari, H. (2025). Nanofluids for advanced thermal management: A multi-criteria review of performance, cost, and environmental impacts. *Results in Materials*, 27, 100753. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100753>
- Bargal, M. H. S., Souby, M. M., Abdelkareem, M. A. A., Sayed, M., Tao, Q., Chen, M., ... & Wang, Y. (2020). Experimental investigation of the thermal performance of a radiator using various nanofluids for automotive pemfc applications. *International Journal of Energy Research*, 45(5), 6831-6849. <https://doi.org/10.1002/er.6274>.
- Baydaş, M., & Pamučar, D. (2022). Determining objective characteristics of MCDM methods under uncertainty: an exploration study with financial data. *Mathematics*, 10(7), 1115.
- Cengiz, N. ve Abdulvahitoğlu, A., (2024). Entropy Tümlüşik TOPSIS Tekniği ile Optimum Kayısı Kurutma Yönteminin Belirlenmesi. *Çukurova Tarım Gıda Bil. Der.* 39(2):267-281, doi: 10.36846/CJAIFS.2024.149.
- Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L (1995) Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method. *Comput Oper Res* 22(7):763–770. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(94\)00059-H](https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00059-H)
- Deriszadeh, A. and Monte, F. d. (2020). On heat transfer performance of cooling systems using nanofluid for electric motor applications. *Entropy*, 22(1), 99. <https://doi.org/10.3390/e22010099>
- Gupta, M., Singh, V., Kumar, R., & Said, Z. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638-670.
- Ghorabae, M.K., Zavadskas, E.K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2016). A New combinative distance-based assessment (CODAS) method for multi-criteria decision-making. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 50(3), 25-44.
- Hamza, H. M., Shabbir, A., & Nisar, H. M. T. (2024). Enhancing heat transfer efficiency through nanofluid integration for thermal management system: a numerical investigation. *Key Engineering Materials*, 993, 93-103. <https://doi.org/10.4028/p-lwtox6>.
- Hussien, A.A.; Abdullah, M.Z.; Al-Nimr, M.A. Single-phase heat transfer enhancement in micro/minichannels using nanofluids: Theory and applications. *Appl. Energy* 2016, 164, 733–755.

- Kalteh, M., & Abedinzadeh, S. S. (2018). Numerical investigation of MHD nanofluid forced convection in a microchannel using lattice Boltzmann method. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 42(1), 23-34.
- Kilic, M., Ozcan, O., (2017). Numerical Investigation of Heat Transfer and Fluid-flow of Nanofluids with Impinging Jets, *Proceedings, International Conference on Advances and Innovations in Engineering*, Elazig, Turkey, 2017, pp. 434-440.
- Kilic, M., & Ali, H. M. (2019). Numerical investigation of combined effect of nanofluids and multiple impinging jets on heat transfer. *Thermal Science*, 23(5B), 3165–3173. <https://doi.org/10.2298/TSCII171204094K>
- Kiraci, K., & Bakır, M. (2020). Evaluation of airlines performance using an integrated CRITIC and CODAS methodology: The case of star alliance member airlines. *Studies in Business and Economics*, 15(1), 83-99.
- Lee, J.; Hwang, K.S.; Jang, S.P.; Lee, B.H.; Kim, J.H.; Choi, S.U.S.; Choi, C.J. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2008, 51, 2651–2656.
- Li, Y., Zhou, J. E., Tung, S., Schneider, E., & Xi, S. (2009). A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder technology*, 196(2), 89-101.
- Louis, S. P., Ushak, S., Milián, Y. E., Nemš, M., & Nemš, A. (2022). Application of nanofluids in improving the performance of double-pipe heat exchangers—a critical review. *Materials*, 15(19), 6879. <https://doi.org/10.3390/ma15196879>.
- Nine MdJ., Chung H. , Tanshen MdR., Osman N.A.B.A., Jeong H., Is metal nanofluid reliable as heat carrier? *J. Hazard Mater.* 273 (2014) 183–191, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.055>.
- O’Hanley H, Buongiorno J, McKrell T, Hu LW. Measurement and model validation of nanofluid specific heat capacity with differential scanning calorimetry. *Adv Mechanical Eng.* 2012;4:181079. doi: 10.1155/2012/181079
- Parsai T., Kumar A. , Setting guidelines for co-occurring nanoparticles in water medium, *Sci. Total Environ.* 776 (2021) 145175, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145175>.
- Petrović, N., Živanović, T., and Mihajlović, J. (2023). Evaluating the Annual Operational Efficiency of Passenger and Freight Road Transport in Serbia Through Entropy and TOPSIS Methods. *Journal of Engineering Management and Systems Engineering*, 2(4), 204-211.
- Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Naraki, M., & Vermahmoudi, A. (2013). Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 8-16.
- Ravisankar, R. (2018). Application of nanotechnology to improve the performance of tractor radiator using cu-water nanofluid. *Journal of Thermal Engineering*, 4(4), 2188-2200. <https://doi.org/10.18186/journal-of-thermal-engineering.434036>

- Ravisankar, R., Venkatachalapathy, V., & Alagumurthy, N. (2015). Thermal performance improvement of tractor radiator using cuo/water nanofluid. *Heat Transfer—Asian Research*, 46(1), 61-74. <https://doi.org/10.1002/htj.21198>
- Reference dose (RfD), Description and use in health risk assessments, *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 8 (1988) 471–486, [https://doi.org/10.1016/0273-2300\(88\)90047-5](https://doi.org/10.1016/0273-2300(88)90047-5).
- Sidik, N. A. C., Yazid, M. N. A. W. M., & Mamat, R. (2015). A review on the application of nanofluids in vehicle engine cooling system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 68, 85-90.
- Sidik, N. A. C., Yazid, M. N. A. W. M., & Mamat, R. (2017). Recent advancement of nanofluids in engine cooling system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 137-144.
- Soylu, S. K. (2018). Otomobil radyatöründe TiO<sub>2</sub> esaslı nanoakışkan kullanımının ısı transfer performansı üzerine etkisinin incelenmesi. Akdeniz Üni., Fen Bil.Ens. Doktora Tezi, Antalya.
- Teng, T. P., & Yu, C. C. (2013). Heat dissipation performance of MWCNTs nano-coolant for vehicle. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 22-30.
- Tuş, A., & Adalı, E. A. (2018). Personnel assessment with CODAS and PSI methods. *Alphanumeric Journal*, 6(2), 243-256.
- Vanapalli, S., & ter Brake, H. J. M. (2013). Assessment of thermal conductivity, viscosity and specific heat of nanofluids in single phase laminar internal forced convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 689–693. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.033>
- Yıldız, H. (2024). Ticari araçların yüksek akım güç devreleri için pasif soğutucu tasarımı ve termal performans analizi. Sakarya Üni. Fen Bil.Ens. Y.lisans Tezi, Sakarya.