

Dalgalı Bir Yüzeye Çarpan Dairesel ve Halkasal Jetin Isı Transfer Analizi

Selma AKÇAY^{1*}, Metehan AVCI², Hüseyin Can TANRISEVSİN³

^{1,2,3}Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı

¹<https://orcid.org/0000-0003-2654-0702>

²<https://orcid.org/0009-0001-3204-3385>

³<https://orcid.org/0009-0005-8439-9737>

*Sorumlu yazar: selmaakcay@karatekin.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 24.01.2025

Kabul tarihi: 02.05.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar kelimeler:

Dalgalı hedef yüzey

Dairesel jet

Halkasal jet

Isı transferi

ÖZ

Bu çalışma, dalgalı bir hedef yüzey üzerine eş zamanlı çarpan dairesel ve halkasal jetin yüzey soğutma performansını sayısal olarak analiz etmektedir. Sayısal çalışma, ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak RNG k-ε türbülans modeli ile gerçekleştirilmiştir. Jet-hedef yüzey arasındaki mesafesi $H/D=2$ olarak sabit tutulmuştur. Dairesel ve halkasal jetin farklı Reynolds sayılarında ($4000 \leq Re \leq 12000$) kombinasyonları ile hedef yüzey üzerindeki ısı transferi hesaplanmıştır. Ayrıca çalışma, sadece dairesel jetin ve sadece halkasal jetin aktif olduğu durumlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, farklı Reynolds sayılarında elde edilen hız ve sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Elde edilen bulgular, dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı hedef yüzeye çarpmasının sadece dairesel ve sadece halkasal jete göre daha yüksek ısı transferi sağladığını göstermiştir. Dairesel jet Reynolds sayısı $Re_{iç}=12000$ ve halkasal jet Reynolds sayısı $Re_{dış}=4000$ kombinasyonu için dairesel jete göre ısı transferinin 2,49 oranında, halkasal jete göre ise 1,53 oranında iyileştiği gözlenmiştir. Sonuçlar, eş zamanlı çarpan dairesel ve halkasal jetin dalgalı bir yüzeyin soğutulmasında önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Heat Transfer Analysis of Circular and Annular Jet Impinging on a Wavy Surface

Research Article

Article History:

Received: 24.01.2025

Accepted: 02.05.2025

Available online: 12.09.2025

Keywords:

Wavy target surface

Circular jet

Annular jet

Heat transfer

ABSTRACT

This study numerically analyzes the surface cooling performance of circular and annular jets simultaneously impinging on a wavy target surface. The numerical study was carried out with RNG k-ε turbulence model by the ANSYS Fluent software. The jet-target surface distance was kept constant as $H/D=2$. The heat transfer on the target surface was calculated with the combinations of circular and annular jets at different Reynolds numbers ($4000 \leq Re \leq 12000$). In addition, the study was compared with the cases where only the circular jet and only the annular jet were active. As a result of the study, the velocity and temperature distributions obtained at different Reynolds numbers were presented. The findings showed that the simultaneous impingement of the circular and annular jets on the target surface provided higher heat transfer compared to only the circular and only the annular jets. For the combination of circular jet Reynolds number $Re_{in}=12000$ and annular jet Reynolds number $Re_{out}=4000$, it was observed that the heat transfer was improved by 2.49 compared to the circular jet and by 1.53 compared to the annular jet. The results show that the simultaneously

Giriş

Çarpan jetler, pek çok alanda ısıtma, kurutma ve soğutma gibi proseslerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çarpan jetler, özellikle elektronik devre elemanlarının ve gaz türbini kanatlarının soğutulmasında, gıdaların kurutulmasında, metallerin tavlansında, tekstil, kimya, cam ve kâğıt gibi pek çok sektörde ısı transferini artırmada önemli bir potansiyele sahiptir (Celik ve Turgut, 2012; Kalifa ve ark., 2016; Ün ve ark., 2024).

Çarpan jetler, bir kanal ya da lüleden geçen yüksek hızlı akışkanın hedef yüzey üzerine çarpması ile elde edilir. Hedef yüzey üzerine çarpan jetler, yüzey üzerindeki ısı sınır tabakayı incelterek ya da yok ederek ısı transferine olan direnci düşürme esasına göre çalışır (Akdağ ve ark., 2023). Sürekli çarpan jetler, pek çok deneysel ve sayısal çalışmaların ilgi odağı haline gelmiştir. Bu çalışmalarda, jet geometrisi, jet-hedef yüzey arası mesafe, jet hızı, hedef yüzeyin geometrisi, jet akışkanının özellikleri, hedef yüzeyin sıcaklığı, akış rejimi gibi pek çok parametre incelenmiş ve hedef yüzeyden olan ısı transferinin bu parametrelere bağlı olarak önemli derecede değiştiği bildirilmiştir (Yasaswy ve ark., 2014; Akdağ ve ark., 2024a; Akdağ ve ark., 2024b).

İlk önceki çalışmalarda jet geometrisi dairesel olarak düşünülmüş ve dairesel jetlerin hedef yüzey üzerindeki ısı transfer karakteristikleri incelenmiştir (Frosella ve ark. 2018; Chitsazan ve ark., 2021; Ekkad ve Singh, 2021). Sonraki çalışmalarda farklı jet geometrilerinin ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Deneysel bir çalışmada, Yasaswy ve ark. (2014) kare geometriye sahip bir jetin ısı transferine etkisini farklı jet hızlarında ($6000 \leq Re \leq 12000$) ve farklı jet-hedef yüzey mesafelerinde araştırmışlar ve hedef yüzey üzerindeki ısı transferinin jet parametrelerine bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Lee ve Lee (2000) deneysel çalışmalarında elips geometriye sahip çarpan jetlerin, farklı en boy oranlarının ısı transferine etkilerini dairesel jetler ile karşılaştırarak incelemişlerdir. Jet-hedef yüzey mesafesi $L/D > 6$ durumunda elips geometriye sahip jetlerin dairesel jetlere göre daha düşük ısı transferi sağladığını bildirmişlerdir. Kılıç ve Başkaya (2017) silindir, kare ve üçgen şeklinde akış yönlendiricileri kullanarak $8000 \leq Re \leq 43000$ aralığındaki Reynolds sayıları için hedef yüzeyin soğutma performansını incelemişler ve akış yönlendiriciler arasında, üçgen akış yönlendiricileri ile daha yüksek ısı transferi elde edildiğini bulmuşlardır. Alnak ve Karabulut (2019) gıdaların kurutulması üzerine yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmalarında, farklı lüle geometrilerinin

etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda jet geometrisine bağlı olarak kurutma karakteristiklerinin değiştiğini ve en yüksek kurutmanın durgunluk noktasında meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Dairesel jetlerin hedef yüzey üzerinde durgunluk noktasında daha etkili olması ve duvar jet bölgesinde jetin etkisinin azalması nedeniyle daha sonraki çalışmalarda halkasal jetlerin yüzeyi soğutmadaki etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalarda, halkasal jetlerin, dairesele jetlere göre daha yüksek ısı transferi sağladığı kanıtlanmıştır (Philippov ve ark., 2021; Ün ve ark., 2024). Markal (2018) yaptığı çalışmada eş eksenli halkasal çarpan jet ile dairesele çarpan jetin ısı transferini karşılaştırmış ve halkasal jetlerin dairesele jetlere göre ısı transferini iyileştirdiğini tespit etmiştir. Çelik (2006) yaptığı çalışmada eş eksenli halkasal lülenin dairesele lüleye göre daha yüksek ısı transferi sağladığını bildirmiştir. Kalinina ve ark. (2015) deneysel çalışmalarda, halkasal çarpan jetin ısı transferinin dairesele jete göre daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Sayısal bir çalışmada, Zhong ve ark. (2022) farklı jet geometrileri kullanarak halkasal jetlerin 0.5, 2 ve 4 olmak üzere üç farklı jet-hedef yüzey arası mesafelerde ve farklı jet Reynolds sayılarında ($5000 \leq Re \leq 40000$) ısı transferini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, jet Reynolds sayısı ile Nusselt sayısı arasında bir bağıntı önermişlerdir. Markal ve Aydın (2018) farklı jet-hedef yüzey mesafelerinde eş eksenli ikili halkasal jetin, tek halkasal jete göre ısı transferini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, jet hedef yüzey arasındaki mesafe arttıkça ısı transferinin azaldığını ve ikili halkasal jetin tek halkasal jete göre hedef yüzey üzerinde daha homojen bir ısı transferi sağladığını bildirmişlerdir. Terekhov ve ark. (2018) farklı jet hızlarında ($12000 \leq Re \leq 36000$) ve üç farklı jet-hedef yüzey mesafeleri ($H/D=2, 4, 6$) için halkasal jetin iç ve dış çaplarını değiştirerek ısı transferini incelemişler ve $H/D=2$ için ısı transferinin %70 oranında arttığını bulmuşlardır. Afroz ve Sharif (2018) sayısal çalışmalarda, farklı jet hızlarında ve jet-hedef yüzey arasındaki mesafelerde halkasal çarpan jetin soğutma performansını araştırmışlar ve çalışılan tüm jet hızlarında, jet-hedef yüzey arasındaki mesafenin azalması ile daha yüksek ısı transferinin sağlandığını bildirmişlerdir. Dutta ve Chattopadhyay (2021) çalışmalarının sonucunda, farklı jet hızları için halkasal çarpan jetlerin $H/D=2$ durumunda jet hızının artması ile çarpma bölgesindeki ısı transferinin de arttığını bildirmişlerdir. Fenot ve ark. (2021) halkasal çarpan jetlerin iç ve dış çap oranlarının ısı transferine etkilerini araştırmışlar ve jetin iç çapının dış çapa oranının artması ile daha yüksek ısı transferi elde edildiğini bildirmişlerdir. Ün ve ark. (2024) düz bir yüzeye çarpan eş eksenli halkasal ve dairesele jetin ısı transferini farklı jet Reynolds sayıları ve jet-hedef yüzey arası mesafeler için sayısal olarak incelemişlerdir. Jet hızının artması ve jet-hedef yüzey arasındaki mesafenin azalması ile hedef yüzeyden olan ısı transferinin iyileştiğini göstermişlerdir.

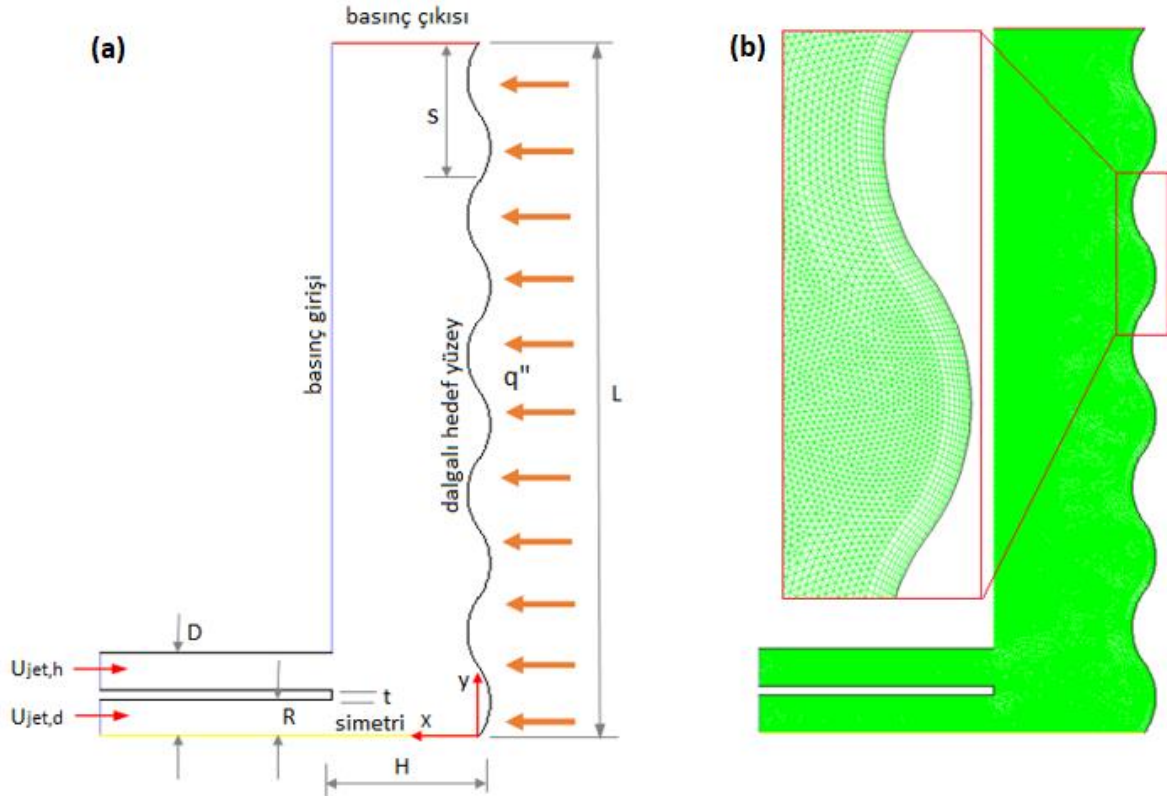
Son yıllarda, bazı araştırmacılar çarpan jet uygulamalarında hedef yüzeyin geometrisi üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmalarda, düz bir hedef yüzey yerine genellikle içbükey veya dışbükey eğrisel yüzey geometrilerinin soğutma performansı araştırılmıştır. Baghel ve ark. (2021) eğrisel yüzeylerde serbest çarpan su jetinin etkisini deneysel olarak incelemişler ve ısı transferinin, eğriliğin çapına ve Reynolds sayısına bağlı olarak değiştiğini bildirmişlerdir. Dhruw ve ark. (2025) iki farklı eğrilik yarıçapı için iç bükey bir yüzeye çarpan dairesel jetin ısı transfer karakteristiğini $10000 \leq Re \leq 75000$ aralığındaki Reynolds sayılarında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yüzeyin eğriliğinin jet akışını kısıtladığını ve ısı transferini azalttığını bildirmişler ve Nusselt sayısı için yeni bir korelasyon önermişlerdir. Selimefendigil ve Oztop (2025) piezoelektrik enerji toplayıcısı kullanarak kısmen elastik bir hedef yüzey üzerinde türbülanslı çoklu çarpan jetin hem eğimli hem düz yüzeyler için soğutma davranışını sonlu eleman metodu ile araştırmışlardır. Çalışmalarında, jet Reynolds sayısının, jet-hedef yüzey arası mesafenin ve jetler arası mesafenin etkilerini dikkate almışlardır. Çalışmaların sonucunda, test edilen en yüksek Reynolds sayısında ($Re=30000$) ısı transferinin eğimli yüzey için 5,89 kat, düz yüzey için 4,3 kat iyileştiğini bildirmişlerdir ve ayrıca ortalama ısı transferi için bir korelasyon geliştirmişlerdir. Hashiehbafe ve ark. (2025) deneysel çalışmalarında yarı silindirik dışbükey bir yüzeye çarpan eksenel simetrik türbülanslı jetlerin soğutma performansını araştırmışlardır. Çalışmalarında Reynolds sayısını ($Re=30000$) sabit tutarak yüzey eğriliğinin ve jet-hedef yüzey arasındaki mesafenin etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak jet-hedef yüzey mesafesinin nozul çapına oranı arttıkça dışbükey yüzeyin eğriliği tarafından jet akışının sürüklendiğini tespit etmişler ve jetin durgunluk noktasından olan mesafesi azaldıkça baskın girdap yapılarının eşit dağılım gösterdiğini bulmuşlardır.

Yukarıdaki literatür çalışmasından anlaşıldığı gibi bugüne kadar halkasal ve dairesel jetler üzerinde yapılan çalışmalarda, jet geometrisi, jet-hedef yüzey arasındaki mesafe, jet hızı gibi farklı parametreler kullanılarak ısı transferi davranışı araştırılmıştır. Araştırılan eğrisel hedef yüzeyin geometrisi ise içbükey ya da dışbükey geometriden oluşmaktadır. Önceki çalışmalarda, halkasal ve dairesel jetlerin eş zamanlı olarak farklı Reynolds sayılarının kombinasyonunda sinüzoidal dalgalı bir yüzeydeki soğutma performansının incelenmediği görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, sabit bir jet-hedef yüzey mesafesi ($H/D=2$) için farklı jet Reynolds sayısı ($4000 \leq Re \leq 12000$) kombinasyonlarında halkasal ve dairesel jetin eş zamanlı olarak dalgalı bir yüzey üzerine çarpması sonucunda ısı transferi sayısal olarak araştırılmıştır.

Sayısal Çalışma

Sayısal Model

Sayısal modelin iki boyutlu geometrisi ve sınır şartları Şekil 1a’da gösterilmiştir. Dairesel jetin yarıçapı R 8mm’dir. Halkasal jetin hidrolik çapı (D_h) ise dairesel jetin çapına eşittir. Hedef yüzey, sinüsoidal dalgalı bakır bir levhadır. Hedef yüzey üzerine 1200W/m^2 sabit bir ısı akısı uygulanmıştır. Jet ve hedef yüzey arasındaki boyutsuz mesafe (H/D) 2 olarak sabit tutulmuştur. Sayısal modele ait diğer geometrik özellikler Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. a) Sayısal modelin 2d geometrisi ve sınır şartları, b) Çözüm alanının ağ yapısı

Tablo 1. Sayısal modele ait geometrik parametreler

Geometrik parametreler	Sayısal değeri
Dairesel jetin yarıçapı R	8mm
Halkasal jetin hidrolik çapı (D_h)	16mm
Hedef yüzeyin dalga boyu (s)	30mm
Hedef yüzeyin dalga genliği	5mm
Hedef yüzeyin toplam uzunluğu ($2L$)	300mm
Dairesel jet ile halkasal jet arasında et kalınlığı (t)	2mm
Jet ve hedef yüzey arasındaki boyutsuz mesafe (H/D)	2
Hedef yüzey üzerine uygulanan ısı akısı (q'')	1200W/m^2

Matematiksel Model

Çalışmada iş yapan akışkan havadır. İdeal gaz olarak kabul edilen hava, sıkıştırılmaz ve Newtoniyen özelliktedir. Jet akışı, türbülanslı akış rejiminde sürekli şartlarında akmaktadır. Akışkan özelliklerinin sıcaklık ve basınçla değişmediği kabul edilmiştir. Yerçekimi gibi gövde kuvvetler ve ışınlama ısı transferi dikkate alınmamıştır. Bu varsayımlar altında korunum denklemleri aşağıda verilmiştir (Eşitlik 1-3):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_i T)}{\partial x_i} \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u'_i T'} \right) \quad (3)$$

Burada u_i ve u_j sırasıyla x ve y yönündeki hız bileşenleridir. Sıcaklık T ve dinamik basınç p ile gösterilmiştir. Formüldeki $\overline{u'_i u'_j}$ ve $\overline{u'_i T'}$ ifadeleri zaman ortalamalı türbülans gerilmelerini ifade etmektedir. C_p , ρ ve k sırasıyla akışanın özgül ısısı, yoğunluğu ve ısıl iletkenliğini temsil etmektedir.

RNG k- ϵ türbülans modeli için türbülans kinetik enerji parametresi (k) ve türbülans yayılım parametresine (ϵ) ait eşitlikler aşağıda verilmiştir (Eşitlik 4-7):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + \rho \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

Burada

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{SK}{\epsilon} \quad \text{ve} \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (7)$$

Çalışmada, halkasal jet Reynolds sayısı $Re_{dış}$ olarak, dairesel jet Reynolds sayısı $Re_{iç}$ olarak tanımlanmıştır. Halkasal jet Reynolds sayısı $4000 \leq Re_{dış} \leq 12000$ aralığında ve dairesel jet Reynolds sayısı $4000 \leq Re_{iç} \leq 12000$ aralığında değiştirilmiştir.

Halkasal jet Reynolds sayısı, $Re_{dış}$ Eşitlik 8 ile hesaplanmıştır:

$$Re_{dış} = \frac{\rho U_{jet,h} D_h}{\mu} \quad (8)$$

Dairesel jet Reynolds sayısı, $Re_{iç}$ Eşitlik 9 ile hesaplanmıştır:

$$Re_{iç} = \frac{\rho U_{jet,d} D_h}{\mu} \quad (9)$$

Burada $U_{jet,h}$ halkasal jetin hızını, $U_{jet,d}$ dairesel jetin hızını, D_h hidrolik jet çapını, ρ akışkanın yoğunluğunu, μ ise akışkanın viskozitesini göstermektedir.

Ortalama Nusselt sayısı Eşitlik 10 ile elde edilmiştir:

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (10)$$

Burada k ısı iletkenliği, h ise ısı taşınım katsayısını temsil etmektedir

Isı taşınım katsayısı h , Eşitlik 11 ile hesaplanmıştır:

$$h = \frac{q''}{\Delta T} \quad (11)$$

Burada q'' dalgali hedef yüzeye uygulanan sabit ısı akısını ifade etmektedir.

$$\Delta T = (T_s - T_\infty) \quad (12)$$

Burada ΔT ise hedef yüzeyin sıcaklığı (T_s) ve ortam sıcaklığı (T_∞) arasındaki farkı göstermektedir.

Hedef yüzeyin soğutma performansını belirlemek için relatif Nusselt sayısı tanımlanmıştır. Dairesel jetin referans olarak alınması halinde relatif Nusselt sayısı ($Nu_{rel,d}$) Eşitlik 13 ile elde edilmiştir:

$$Nu_{rel,d} = \frac{Nu}{Nu_d} \quad (13)$$

Halkasal jetin referans olarak alınması halinde relatif Nusselt sayısı ($Nu_{rel,h}$) ise Eşitlik 14 ile hesaplanmıştır:

$$Nu_{rel,h} = \frac{Nu}{Nu_h} \quad (14)$$

Burada Nu_d ve Nu_h sırasıyla dairesel jet ve halkasal jet için elde edilen Nusselt sayılarını temsil etmektedir.

Sayısal Yöntem

Sayısal çalışma, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı ANSYS Fluent programı yardımıyla çözülmüştür. Çözüm alanı Gambit yazılımı ile hücrelere bölünmüştür. Hedef yüzey üzerindeki sınır tabakayı yakalamak ve $y^+ < 1$ değerini sağlamak amacıyla dalgali hedef yüzey üzerine yapılandırılmış sınır tabaka ağ yapısı uygulanmış ve diğer çözüm alanında yapılandırılmamış üçgen elemanlar kullanılmıştır. Çözüm alanının ağ yapısı ve detayı Şekil

1b’de gösterilmiştir. Çalışmada, çözümlerin ağ yapısından etkilenmediği eleman sayısını tespit etmek için ağ bağımsızlık testi uygulanmıştır. Bu amaçla, dairesel jet için $Re=12000$ ’de farklı eleman sayılarında Nusselt sayıları hesaplanmıştır. 79572 eleman sayısından sonra Nusselt sayısındaki değişimin çok küçük (%1) olması nedeniyle çözümlerde 79572 eleman sayısının yeterli olduğu düşünülmüştür. Ağ bağımsızlık testi için farklı eleman sayıları ile Nusselt sayısının değişimi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Ağ bağımsızlık testi (Dairesel jet, $Re=12000$).

Eleman sayısı	Nusselt sayısı	Fark, %
38724	202,82	-
51622	207,61	2,4
79572	209,58	1
121854	209,93	0,17

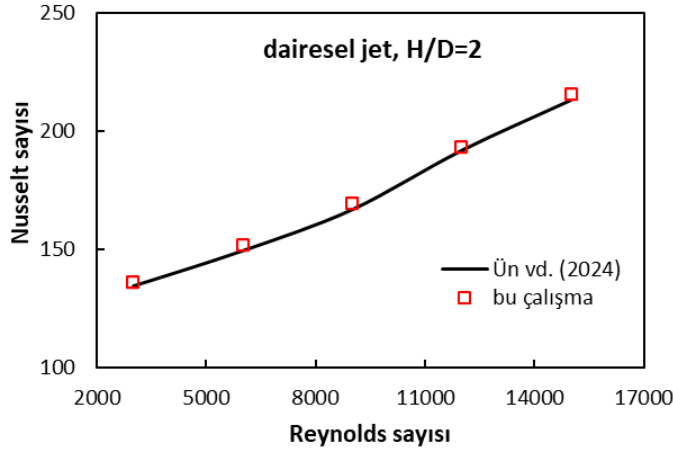
Sayısal çalışmada, taşınım terimlerinin ayrıklaştırılmasında ikinci dereceden ileri fark şeması kullanılmıştır. Hız ile basınç arasındaki bağıntı için SIMPLE algoritması tercih edilmiştir. Viskoz model olarak RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modelinin halkasal çarpan jetlerde başarılı sonuçlar verdiği ve hızlı yakınsamaya neden olduğu bildirilmiştir (Afroz ve Sharif, 2018; Ün ve ark., 2024). Bu nedenle çözümlerde viskoz model olarak RNG k- ϵ türbülans modeli tercih edilmiştir. Yakınsama kriteri olarak enerji eşitliğinde 10^{-7} , diğer eşitliklerde 10^{-5} kabul edilmiş ve çözümlerin bu değerlerde yakınsadığı görülmüştür.

Sınır Şartlar ve Çözümlerin Doğrulanması

Çözümlere başlamadan önce sayısal modele bazı sınır şartlar tariflenmiştir. Jet akışının olduğu lüle girişinde, halkasal jet ve dairesel jet için sırasıyla $U_{jet, h}$ ve $U_{jet, d}$ olmak üzere hız giriş sınır şartı tariflenmiştir. Akışkan lüleye $T_{\infty}=300K$ ortam sıcaklığında girmektedir. Dalgalı hedef yüzey üzerine $1200W/m^2$ üniform sabit bir ısı akısı uygulanmıştır. Hedef yüzeyin karşısındaki yüzeylere basınç girişi sınır şartı, duvar jet bölgesi çıkışındaki yüzeylere ise basınç çıkışı sınır şartı uygulanmıştır. Diğer yüzeylere duvar sınır şartı girilmiştir. Tüm yüzeyler, kaymaz sınır şartlarına sahiptir. Çözüm zamanını düşürmek için dairesel jetin ekseni simetri sınır şartı olarak tariflenmiş ve çözüm alanının yarısı için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sayısal modele uygulanan sınır şartlar Şekil 1a’da gösterilmiştir.

Sayısal çözümlerin doğruluğunu belirlemek için elde edilen sonuçlar, önceki çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Doğrulama için Ün ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışma

referans alınmış ve aynı hidrolik çapa sahip dairesel bir jetin düz bir hedef yüzey üzerinde elde edilen Nusselt sayıları ile bu çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki çalışma sonuçları Şekil 2’de gösterilmiştir.



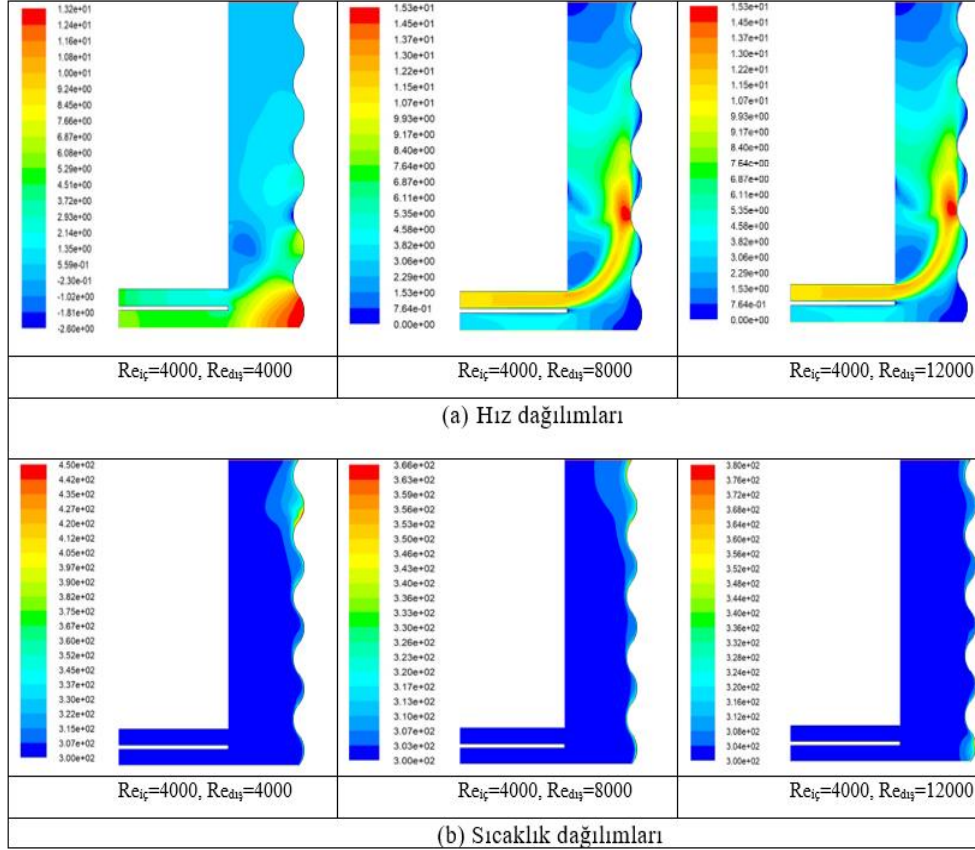
Şekil 2. Sayısal çözümlerin doğrulanması (Ün ve ark., 2024).

Tartışma ve Sonuçlar

Önceki çalışmalarda, jet-hedef yüzey arası boyutsuz mesafenin azalması ile ısı transferinin iyileştiği, özellikle bu mesafenin 2 olduğu durumda en iyi soğutma performansının sağlandığının bildirilmesi üzerine, bu çalışmada jet-hedef yüzey arası boyutsuz mesafe $H/D=2$ olarak sabit tutulmuştur (Terekhov ve ark. 2018; Ün ve ark. 2024). Halkasal ve dairesel jet Reynolds sayılarının $4000 \leq Re \leq 12000$ aralığındaki farklı kombinasyonlarında dalgalı hedef yüzey üzerine çarpması sonucunda, yüzeydeki soğutma performansı incelenmiştir. Jet Reynolds sayısının bu aralıkta seçilmesinin nedeni çözümlerin doğrulanmasında referans alınan çalışmaya (Ün ve ark. 2024) bağlı kalmak ve türbülanslı akış şartlarında ısı transferinin daha fazla iyileşmesidir. Farklı Reynolds sayılarının kombinasyonlarında yüzey üzerindeki akış ve ısı transfer davranışını gözlemlemek amacıyla değişen $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ için hız ve sıcaklık kontur görüntüleri elde edilmiş ve tartışılmıştır.

Şekil 3’te $Re_{iç}=4000$ sabit dairesel jet Reynolds sayısı için farklı $Re_{dış}$ halkasal jet Reynolds sayısı kombinasyonlarının hız görüntüleri (a) ve sıcaklık görüntüleri (b) sunulmuştur. Şekil 3a’dan $Re_{dış}$ arttıkça jetin dalgalı yüzey üzerine daha iyi yayıldığı gözlenmiştir. Bu durum jetin levha yüzeyi boyunca etkili olmasına neden olmuştur. $Re_{iç}=4000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonunda dalgalı yüzeyin sıcaklık gradyanının levha sonuna doğru arttığı görülmektedir (Şekil 3b). Artan $Re_{dış}$ değerlerinde jetin tüm levha üzerinde etkili olmasından dolayı tüm yüzey boyunca sıcaklık gradyanı azalmıştır. Dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı olarak yüzeye çarpması yüzey üzerinde oluşan ısıl sınır tabakayı bozarak ısıl direncin

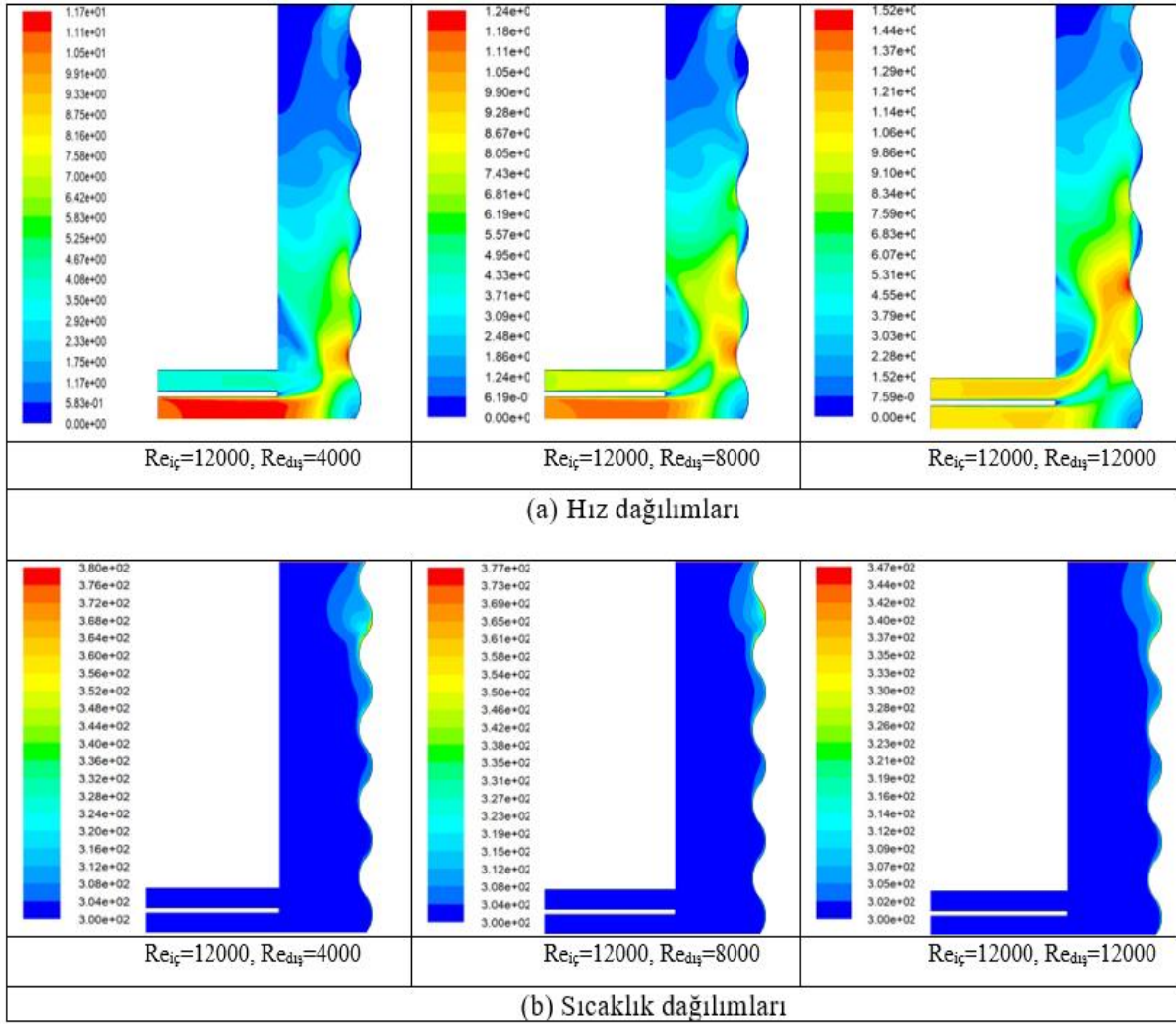
azalmasına neden olmaktadır. Bu durum yüzey üzerinde meydana gelen ısı transferini artıracaktır. $Re_{iç}=4000$ ve $Re_{dış}=12000$ kombinasyonunda jetin hedef yüzeye çarptığı durgunluk noktasında sıcaklık artışı gözlenmiştir. Bunun nedeni dairesel jet Reynolds sayısının halkasal jet Reynolds sayısından oldukça düşük ($Re_{iç}=4000 \leq Re_{dış}=12000$) olmasıdır.



Şekil 3. Sabit dairesel jet Reynolds sayısında ($Re_{iç}=4000$) farklı $Re_{dış}$ için, a) hız dağılımları, b) sıcaklık dağılımları.

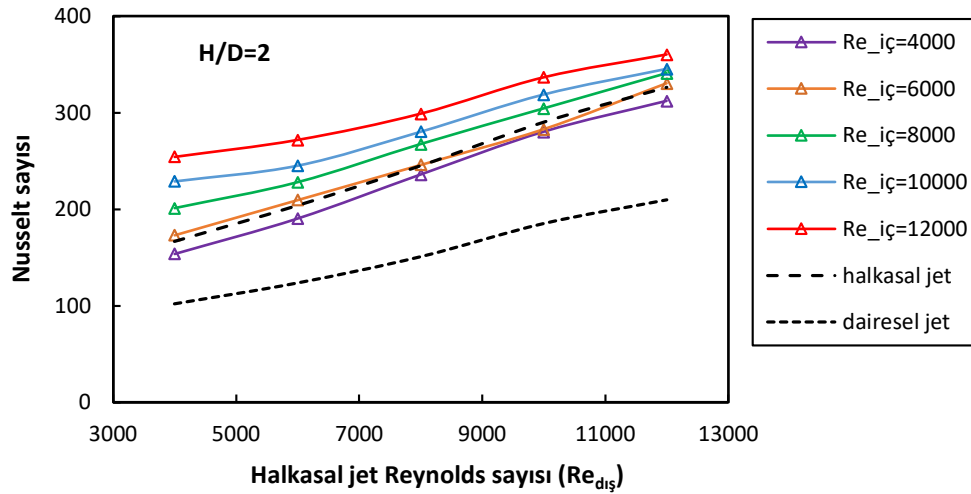
Şekil 4'te sabit dairesel jet Reynolds sayısı ($Re_{iç}=12000$) için farklı halkasal jet Reynolds sayısı ($Re_{dış}$) kombinasyonlarının hız dağılımları (a) ve sıcaklık dağılımları (b) verilmiştir. $Re_{iç}$ değerinin yüksek olması, levhanın durgunluk noktasında oluşan hız sınır tabakasının bozulmasına neden olmaktadır. Dairesel jetin bu bölgeye daha iyi nüfuz etmesinden dolayı jetin durgunluk noktasında daha etkili olduğu söylenebilir. Artan $Re_{dış}$ değerlerinde, jetin hedef yüzey üzerinde duvar jet bölgesinden daha ileri gittiği görülmektedir (Şekil 4a). Şekil 4b'de, $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=12000$ kombinasyonunda dalgalı yüzeyin sıcaklığının $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonundan daha düşük olduğu gözlenmiştir. Hem dairesel jet hem de halkasal jet Reynolds sayısında artış yüzey sıcaklığını kayda değer şekilde düşürmektedir. Yüksek jet hızları, dairesel jetin hedef yüzey üzerindeki durgunluk noktasında, halkasal jetin ise duvar jet bölgesi boyunca etkili olmasına neden olur ve bu durum tüm yüzeyin soğutma performansını olumlu yönde etkileyecektir. Düşük halkasal jet hızlarında jetin, durgunluk

bölgesi etrafında daha etkili olduğu ve levhanın dış kısımlarına ulaşmadığı gözlenmiştir.



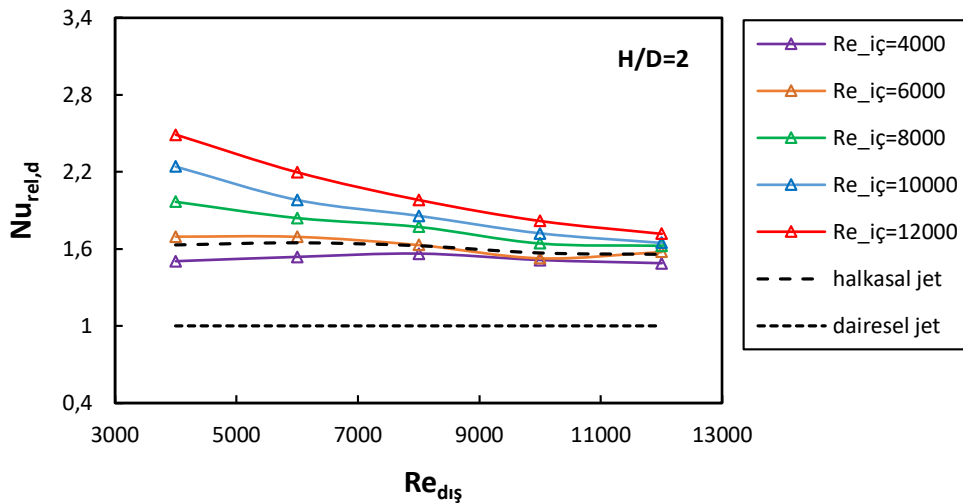
Şekil 4. Sabit dairesel jet Reynolds sayısında ($Re_{ç}=12000$) farklı $Re_{dış}$ için, a) hız dağılımları, b) sıcaklık dağılımları.

Şekil 5'te sabit jet-hedef yüzey mesafesi ($H/D=2$) için farklı $Re_{ç}$ ve $Re_{dış}$ kombinasyonlarında Nusselt sayısının değişimini göstermektedir. Ayrıca sonuçlar sadece dairesel ve sadece halkasal jet akışı ile karşılaştırılmıştır. $Re_{ç}$ ve $Re_{dış}$ değerlerinin her ikisinin de artması Nusselt sayısını artırmıştır. Tüm kombinasyonlarda elde edilen Nusselt sayıları dairesel jet akışında elde edilen Nusselt sayısından oldukça yüksek bulunmuştur. $Re_{ç}=4000$ ve $Re_{ç}=6000$ değerleri hariç diğer kombinasyonlarda elde edilen Nusselt sayılarının halkasal jet akışından yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca $Re_{dış}$ değerlerinin artması ile elde edilen Nusselt sayılarının birbirine yaklaştığı gözlenmiştir. En yüksek ısı transferi, $Re_{ç}=12000$ ve $Re_{dış}=12000$ kombinasyonunda $Nu=360,19$ olarak elde edilmiştir.



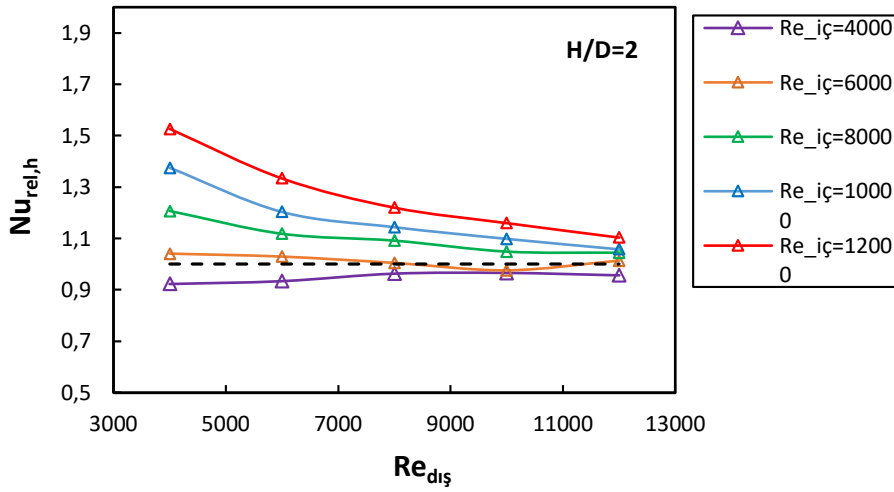
Şekil 5. Farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ ile Nusselt sayısının değişimi

Şekil 6'da $H/D=2$ jet-hedef yüzey mesafesinde, farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ kombinasyonlarında hedef yüzeyden ısı transferinin dairesel jete göre iyileşmesini ifade eden relatif Nusselt sayısının ($Nu_{rel,d}$) değişimini göstermektedir. Dairesel jet referans olarak alınmış ve değeri 1 olarak gösterilmiştir. Bütün jet akışlarında elde edilen $Nu_{rel,d}$ değerlerinin, referans değer (dairesel jet akışı) üzerinde olduğu tespit edilmiştir. $Re_{iç}$ değerleri arttıkça $Nu_{rel,d}$ değerleri de artmaktadır. Artan $Re_{dış}$ değerlerinde $Nu_{rel,d}$ değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Bunun nedeni artan jet Reynolds sayısında dairesel jetin ısı transferinin de artmasından kaynaklanmaktadır. Dairesel jete göre en yüksek iyileşme oranı ($Nu_{rel,d}$), $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonunda 2,49 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. Farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ ile relatif Nusselt sayısının değişimi (dairesel jet referans alındığında).

Şekil 7, $H/D=2$ sabit değerinde farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ kombinasyonlarında ısı transferinin halkasal jete göre iyileşmesini ifade eden relatif Nusselt sayısının ($Nu_{rel,h}$) değişimini vermektedir. Halkasal jet referans olarak alınmıştır. Düşük dairesel jet Reynolds sayısı ($Re_{iç}=4000$) hariç, diğer jet kombinasyonlarında elde edilen $Nu_{rel,h}$ değerleri referans değer üzerinde. $Re_{iç}$ değerleri arttıkça $Nu_{rel,h}$ değerlerinin de arttığı görülmektedir. $Re_{dış}$ değerlerinin artması ile $Nu_{rel,h}$ değerleri azalma eğilimindedir. Artan jet Reynolds sayısında halkasal jetin Nusselt sayısının artması iyileşme oranını düşürmektedir. Halkasal jete göre en yüksek iyileşme oranı ($Nu_{rel,h}$), $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonunda 1,53 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. Farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ ile relatif Nusselt sayısının değişimi (halkasal jet referans alındığında).

Çalışma sonuçları, Ün ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 3). Aynı Reynolds sayısı kombinasyonunda, Ün ve ark. (2024) düz yüzeyde Nusselt sayısını $Nu=348,5$ elde ederken bu çalışmada sinüzoidal dalgalı yüzeyde Nusselt sayısı $Nu=360,19$ olarak bulunmuştur. Bu durum, dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı dalgalı bir hedef yüzeye çarpması, düz yüzeylere göre daha fazla ısı transferi artışına neden olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Çalışma sonuçlarının önceki çalışmalarla karşılaştırılması

	$Re_{iç}$	$Re_{dış}$	Hedef yüzey geometrisi	H/D	Nu
Ün ve ark. (2024)	12000	12000	Düz yüzey	2	348,50
Bu çalışma	12000	12000	Sinüzoidal dalgalı yüzey	2	360,19

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, sadece halkasal ve sadece dairesel jet akışına göre sürekli eş zamanlı çarpan dairesel ve halkasal jetlerin farklı kombinasyonlarının dalgali yüzeyin soğutma performansını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu yöntem, hedef yüzeyin düz olmadığı ticari ve endüstriyel pek çok uygulamalarda (ısıtma, soğutma, kurutma prosesleri ve türbin kanadının soğutulması vb.) yüzeyden ısı transferinin iyileştirilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç

Bu sayısal çalışma, halkasal ve dairesel jetin farklı Reynolds sayısı kombinasyonlarında, sabit ısı akışına sahip dalgali bir yüzeye çarpması sonucu, hedef yüzeyden olan ısı transferini incelemiştir. Dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı sinüzoidal dalgali bir yüzeye farklı hız kombinasyonlarında çarpması ile hedef yüzeyin soğutulması bu çalışmanın özgünlüğüdür. Analizlerde, jet-hedef yüzey arasındaki boyutsuz mesafe $H/D=2$ olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca çalışma sadece halkasal ve sadece dairesel çarpan jet akışı ile karşılaştırılmıştır. Farklı jet Reynolds sayılarının kombinasyonlarında hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir. Çalışmanın önemli bulguları aşağıda özetlenmiştir:

- Halkasal çarpan jet akışında, dairesel çarpan jete göre daha yüksek Nusselt sayısı elde edilmiştir. Halkasal ve dairesel jetin farklı Reynolds sayılarının kombinasyonunda eş zamanlı dalgali hedef yüzeye çarpması, sadece dairesel ve sadece halkasal jet çarpmasına göre daha yüksek ısı transferi sağlamıştır.
- Halkasal jet ve dairesel jetin eş zamanlı ve sürekli olarak dalgali yüzeye çarpması tüm levha boyunca ısı transferinin iyileşmesine neden olmuştur.
- Dairesel jet, çarpma bölgesinde, halkasal ise jet duvar jet bölgesinde etkili olurken, halkasal ve dairesel jetin eş zamanlı olarak hedef yüzeye çarpması tüm levha yüzeyinde etkili olduğu görülmüştür.
- Dairesel jet ve halkasal jetin özellikle yüksek Reynolds sayılarında kombinasyonu dalgali hedef yüzeyin soğutma performansını önemli derecede artırmıştır.
- En yüksek Nusselt sayısı, $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=12000$ kombinasyonunda $Nu=360,19$ olarak elde edilmiştir.
- $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonunda dalgali hedef yüzey üzerindeki ısı transferi dairesel jete göre 2,49 kat iyileşmiştir.
- $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=4000$ kombinasyonunda, halkasal jete göre hedef yüzeyin ısı transferinin 1,53 kat arttığı tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209A 2023 yılı 2. dönem kapsamında 1919B012318148 numaralı başvuru ile destek almaya hak kazanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Selma Akçay: Metodoloji, veri analizi, kavramsallaştırma, yazma, danışmanlık; Metehan Avcı: Sayısal çözümler, görüntüleme; Hüseyin Can Tanrısevsin: Sayısal çözümler, görüntüleme konularında katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Afroz F, Sharif MAR., 2018. Numerical study of turbulent annular impinging jet flow and heat transfer from a flat surface. *Applied Thermal Engineering*, 138: 154-172.

Akdağ Ü, Akçay S, Karabayır ML., 2023. Experimental investigation of the heat transfer characteristics of a pulsating impinging jet on a flat surface. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(2): 889-899.

Akdağ U, Akçay S, Kilic M, Gungor B., 2024b. Flow and heat transfer analysis of submerged multiple synthetic jet impingement in a square channel with forced-flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 159: 108103

Akdağ U, Akçay S, Un N, Danismaz M., 2024a. Experimental investigation of the heat transfer characteristics of a synthetic annular jet impingement on a flat surface. *Experimental Heat Transfer*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/08916152.2024.2356165>

Alnak DE, Karabulut K., 2019. Hava jeti çarpmalı kurutma için farklı dairesel nemli nesne geometrilerinin ısı ve kütle transferi üzerindeki etkisinin araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(1): 51-62.

Baghel K, Sridharan A, Murallidharan JS., 2021. Heat transfer characteristics of free surface water jet impingement on a curved surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 164: 120487.

Çelik N., 2006. Optimum lüle şeklinin çarpan jet üzerinde etkilerinin incelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 267s, Elâzığ.

Celik N, Turgut E., 2012. Design analysis of an experimental jet impingement study by using Taguchi method. *Heat Mass Transfer*, 48: 1407–1413.

Chitsazan A, Klepp G, Glasmacher B., 2021. Review of jet impingement heat and mass transfer for industrial application, *Heat Transfer Research*, 52(9): 61-91.

Dhruw L, Ansari S, Kothadia HB, Jangir A, Gupta G., 2025. Jet Impingement on circular curved surfaces: local heat transfer analysis and correlation development, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Published Online: 3 Jan 2025 <https://doi.org/10.2514/1.T7078>

Dutta P, Chattopadhyay H., 2021. Numerical analysis of transport phenomena under turbulent annular impinging jet. *Computational Thermal Sciences*, 13(2): 1-19.

Ekkad SV, Singh P., 2021. A modern review on jet impingement heat transfer methods. *The American Society of Mechanical Engineers Journal of Heat and Mass Transfer*, 143(6): 064001.

Fenot M, Dorignac E, Lantier R., 2021. Heat transfer and flow structure of a hot annular impinging jet. *International Journal of Thermal Sciences*, 170: 107091.

Frosella T, Frippa M, Gutmarkb E., 2018. Dynamics of the impingement region of a circular turbulent jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 91: 399-409.

Hashiehbaf A, Romano G, Agrawal A., 2025. Experimental investigation on axisymmetric turbulent jets impinging on a convex surface using particle image velocimetry. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, doi: 10.1615/JFlowVisImageProc.2024054727

Kalifa RB, Habli S, Said NM, Bournot H, Palec GL., 2016. Parametric analysis of a round jet impingement on a heated plate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 57: 11–23.

Kalinina SV, Terekhov VI, Sharov KA., 2015. Special features of flow in an annular jet impinging on a barrier. *Fluid Dynamics*, 50(5): 665–671.

Kılıç M, Başkaya Ş., 2017. Farklı geometride akış yönlendiriciler ve çarpan jet kullanarak yüksek ısı akımlı bir yüzeyden olan ısı transferinin iyileştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3): 693-707.

Lee J, Lee SJ., 2000. The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43: 555-575.

Markal B, Aydın O., 2018. Experimental investigation of coaxial impinging air jets. *Applied Thermal Engineering*, 141: 1120-1130.

Markal B., 2018. Experimental investigation of heat transfer characteristics and wall pressure distribution of swirling coaxial confined impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124: 517-532.

Philippov MV, Chokhar IA, Terekhov VV, Terekhov VI, Baranov IN., 2021. Experimental investigation of heat and mass transfer of an annular impinging jet. *Journal of Physics*, 2039: 012028.

Selimefendigil F, Oztop HF., 2025. Energy harvesting and forced convective heat transfer features of multiple slot jet impingement cooling of partly elastic flat and curved surfaces having double piezo-energy harvesters. *Heliyon*, 11(8): e43052.

Terekhov VI, Kalinina SV, Sharov KA., 2018. Convective heat transfer at annular jet impingement on a flat blockage. *High Temperature*, 56: 217-222.

Ün N, Akçay S, Akdağ U., 2024. Düz yüzeye çarpan eş eksenli halkasal ve dairesel jetin ısı transfer karakteristiklerinin sayısal analizi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 40(1): 56-67.

Yasaswy NS, Saroj S, Hindasageri V, Prabhu SV., 2014. Local heat transfer distribution of an impinging air jet through a crossflow. *International Journal of Thermal Sciences*, 79: 250-259.

Zhong Y, Zhou C, Shi Y., 2022. Effect of the nozzle geometry on flow field and heat transfer in annular jet impingement. *Energies*, 15: 4271.

Kalıpcılık Sektöründe Tedarikçi Değerlendirme ve Seçimi İçin Çok Kriterli Karar Destek Modeli

Adnan ABDULVAHİTOĞLU^{1*}, Sercan ARICI²

¹Mudanya Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bursa

²Kalıp Mühendislik Uzmanı Coşkunöz Metal Form, Bursa

¹<https://orcid.org/0000-0002-2659-6709>

²<https://orcid.org/0009-0002-9001-7596>

*Sorumlu yazar: abdulvahitoglu@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 29.03.2025

Kabul tarihi:19.05.2025

Online Yayınlanma:12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Otomotiv sektörü

Kalıp üretimi

Tedarikçi seçimi

Karar destek sistemi

Çok kriterli karar verme

ÖZ

Kalıp imalat süreci, nihai parçanın müşteri standartları ve beklentilerine uygun olarak başarılı bir şekilde üretilmesi ve seri üretime geçişin etkin bir biçimde sağlanması açısından uzun ve kritik bir süreçtir. Bu sürecin başarısında tedarikçi seçimi önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, kalıp üretim aşamalarında gerçekleştirilen faaliyetler, bu faaliyetlerin süreç içerisindeki önemi, üretim sürecine etkileri ve tedarikçilerin bu aşamalarındaki yeri ele alınmaktadır. Ayrıca, tedarikçi seçiminin önemi vurgulanarak, karar destek sistemleri (KDS) kullanımıyla en uygun tedarikçilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, değerlendirme sürecine temel teşkil eden veriler, işletmenin tedarikçi ağı içinde yer alan tüm tedarikçilerin geçmiş performansları ve kapasiteleri doğrultusunda ekip tarafından yapılan puanlamalarla belirlenmiştir. Ardından, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılarak karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiş ve tedarikçi seçiminde karar destek mekanizmasının oluşturulmasına yönelik bir model önerilmiştir. Bu model çerçevesinde, kalıp üretim süreçlerindeki zaman, maliyet ve teknik gereklilikler gibi faktörler bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilerek, en uygun niteliklere sahip tedarikçilerin belirlenmesi ve süreç verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.

A Multi-Criteria Decision Support Model for Supplier Evaluation and Selection in the Die Industry

Research Article

Article History:

Received: 29.03.2025

Accepted: 19.05.2025

Available online:12.09.2025

Keywords:

Automotive industry

Die manufacturing

Supplier selection

Decision support system

Multi-criteria decision making

ABSTRACT

The die manufacturing process is a lengthy and critical phase in ensuring the successful production of the final part in compliance with customer standards and expectations, as well as facilitating a seamless transition to mass production. Supplier selection plays a crucial role in the success of this process. This study examines the activities carried out during the die manufacturing stages, their significance within the process, their impact on production, and the role of suppliers at each stage. Furthermore, it underscores the importance of supplier selection and aims to identify the most suitable suppliers using decision support systems (DSS). In this context, the evaluation process is based on data derived from supplier performance and capacity assessments, which are conducted through a scoring system by the team. Subsequently, a comparative analysis is performed using Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods, leading to the development of a model for establishing a decision support mechanism in supplier selection. Within this framework, factors such as time, cost, and technical requirements in die manufacturing processes are assessed through a holistic approach to enhance supplier selection and improve overall process efficiency.

To Cite: Abdulvahitoğlu A, Arıcı S., 2025. Kalıpcılık sektöründe tedarikçi değerlendirme ve seçimi için bir çok kriterli karar destek modeli. Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(2): 246-265.

1. Giriş

Otomotiv endüstrisi, sanayileşmiş ülkelerin ekonomilerinde merkezi bir rol oynamakta olup, demir-çelik, petrokimya, lastik ve yan sanayi gibi pek çok sektörle doğrudan bağlantılıdır. Bunun yanı sıra, turizm, altyapı, inşaat, tarım ve ulaştırma gibi çeşitli alanlardaki motorlu araç ihtiyacını karşılayarak ekonomik yapının temel unsurlarından biri haline gelmiştir. Sektörde yaşanan dönüşümler, ekonomik dengenin önemli ölçüde etkilenmesine neden olmaktadır. Son yıllarda artan küresel rekabet ve pazar yapısındaki değişimler sonucunda, şirketler arası birleşmeler ve satın almalar giderek yaygınlaşmakta, otomotiv endüstrisi gelişmekte olan teknolojiye paralel olarak sürekli bir değişim ve dönüşüm geçirmektedir.

Kompleks bir ekosisteme ve organizasyon yapısına sahip olan otomotiv endüstrisi değişik sektörlerin eşgüdüm halinde çalışmasından oluşmaktadır. Sadece otomotiv üretimi değil, hammadde tedarikinden yedek parça üretimine, lojistikten enerji kaynaklarına, finanstan sigortacılığa geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Gelişmiş ülkelerin ekonomik kalkınmalarının temel bileşenlerinden biri olan otomotiv endüstrisi ve alt sektörleri gelişmekte olan ülkeler için lokomotif sektör olarak öne çıkmaktadır (Altuntaş, 2021). Hızla değişen ve gelişen dünyada özellikle otomotiv endüstrisinde küresel rekabetin artmasıyla, işletmeler, süreçlerini optimize etmek ve kayıpları asgariye indirmek için yalın üretim, tam zamanlı üretim, tersine mühendislik, esnek üretim ve kalite gibi yaklaşımları uygulamaktadır. Böylece kaliteyi arttırıp ve maliyetler minimize edilebilerek sürdürülebilir bir üretim hedeflenmektedir.

Otomotiv üretiminin aşamalarından biri olan kalıp geliştirme, ürün geliştirme sürecinin en kritik unsurlarından biridir. Kalıp tasarımı ve üretimi, sektörde "kalıpcılık" olarak adlandırılan ve üretim süreçlerinin en temel, karmaşık ve maliyetli aşamalarından biridir. Bu süreçte meydana gelen hata ve gecikmeler, nihai üretim maliyetini artırarak teslim süresini olumsuz yönde etkilemektedir. Teknolojik gelişmelerin sağladığı kalıp tasarımındaki iyileştirmeler, tasarım, üretim ve temin sürelerini azaltmakla birlikte, kalıp üretiminde algoritmik olarak tanımlanamayan pek çok işlemin varlığı, yüksek teknoloji ve uzman sistemlerin kullanımını da zorunlu hale getirmektedir. Bu durum, işletmelerin zaman zaman standart dışı süreçler uygulamasına yol açmaktadır (Sabah, 2010).

Bu bağlamda birçok işletme, kalıp tasarımı ve üretiminde farklı tedarikçilere başvurmak zorunda kalır. Bu süreçte kârlılık, esneklik ve maliyet etkinliği, tedarik zinciri yönetimi ve tedarikçi seçiminde kritik bir rol oynayarak firmaların rekabet gücünü belirleyen temel unsurlar arasında yer alır. Tedarikçi seçimi, işletmelerin ürün kalitesini arttırmada ve teslimat performansını iyileştirmede doğrudan etkili bir faktördür (Hendiani ve Bagherpour,

2019). Bu nedenle maliyet, kalite ve zamanında teslimat gibi temel başarı ölçütleri, kalıpcılık sektöründe tedarikçi seçimini ön plana çıkarmaktadır (Jermsittiparsert ve ark., 2021). Özellikle küresel krizler ve ekonomideki dalgalanmalar, firmaları sürdürülebilir tedarik zincirlerini güçlendirme ve iyileştirme stratejileri doğrultusunda optimum tedarikçi seçimine yönlendirmektedir.

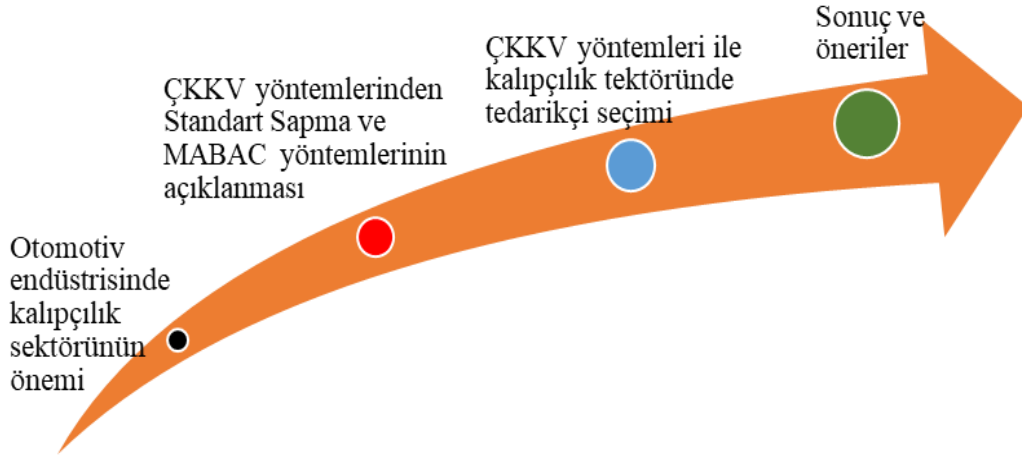
Bu bağlamda, tedarik zincirinin sürdürülebilirliği, işletmelerin temel performans ölçütlerinden biri haline gelmiştir (Luthra, 2017). Tedarik zincirinde yer alan tedarikçiler, üretimde sürekliliği sağlayarak ürünün kalitesi, maliyeti ve zamanında teslimine doğrudan etki ederler (Güleş ve ark., 2014). Bu nedenle, firmalar uzun vadeli ve stratejik tedarikçi seçim politikaları benimseyerek rekabet avantajlarını artırmayı hedefler (Filiz, 2023).

Firmalar, tedarikçi seçiminde belirli kriterleri göz önünde bulundurarak değerlendirme yapmakta ve kendileri için en uygun alternatif tedarikçiyi seçmektedir. Tedarikçi seçimi, genellikle birbiriyle çelişen çeşitli kriterlerin dikkate alındığı çok kriterli bir karar verme sürecidir (Jermsittiparsert ve ark., 2021). Doğru tedarikçilerle iş birliği yapmak, işletmelerin maliyetlerini azaltırken rekabet gücünü artırmaktadır. Çeşitli sektörlerde, ürünlerin hammadde ve parça maliyetleri, toplam üretim maliyetinin %70'ine kadar ulaşabilmektedir (Ghodsypour ve O'Brien, 1998). Bu nedenle, etkin bir tedarikçi seçimi, işletmelerin maliyet yönetimi ve rekabet avantajı sağlamasında kritik bir stratejik unsur olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde tedarikçi seçimi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlar; otellerin tedarikçi seçiminde ÇKKV yöntemlerinin kullanımı (Solunoğlu ve Solunoğlu, 2024), Bulanık ÇKKV yöntemleri ile tedarikçi seçimi (Ülker ve Özçelik, 2024), gıda sektöründe tedarikçi seçimi (Öztürk ve Tekin, 2021), bulanık ÇKKV ile sürdürülebilir tedarikçi seçimi (Nebati, 2024), bulanık ÇKKV ile traktör fabrikasında tedarikçi seçimi (Çağıl ve Çelik, 2021), stratejik tedarikçi seçimi için bir model önerisi (Sarkis ve Talluri, 2022), tedarikçi seçimini destekleyen modeller (De Boer ve ark., 2001), tedarikçi seçim sürecinin analizi (Verma ve Pullman, 1998), savunma sanayinde tedarikçi seçimi (Akman ve ark., 2021), tedarikçi seçiminin ÇKKV yöntemleri ile karşılaştırmalı analizi (Esmaray ve Özveri, 2023) vb. çalışmalardan oluşmaktadır. Ancak otomotiv endüstrisinin temel taşlarından biri olan kalıpcılık sektöründeki tedarikçilerin seçimine yönelik bir çalışma tespit edilememiştir.

Bu kapsamda üreticilerin proje ihtiyaçları doğrultusunda doğru tedarikçi seçimini desteklemek amacıyla, tüm seçim kriterlerini içeren kapsamlı bir KDS kurulmuştur. Bu şekilde geçmiş verilerden faydalanarak tedarikçi seçiminde hata oranını düşürmek ve süreci hızlandırmak için, kalıpcılık sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın çokuluslu tedarikçilerinin karşılaştırmalı analizlerinin yapılarak optimum kararın verilmesinin

hedeflendiği bir model önerilmiştir. ÇKKV yöntemlerinin kullanıldığı bu çalışmanın aşamaları aşağıda Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın aşamaları

2. Materyal ve Metot

Otomotiv endüstrisinin temel aşamalarından biri olan kalıpcılık sektöründe tedarikçi seçimi, proje planlaması ve kârlılık üzerinde doğrudan etkilidir. Kalıp üretim sürecindeki hata ve kayıplar, proje hedeflerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, optimum tedarikçi seçim sürecini destekleyecek bir KDS’ne ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, kalıpcılık sektöründe tedarikçi seçim sürecinde alternatifler ÇKKV yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilerek, firmaların daha verimli ve etkili kararlar almasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu sistem, şirketlerin verimliliğini artırırken, alt sıralarda yer alan tedarikçilere geri bildirim vererek performanslarını iyileştirmelerine olanak tanıyacaktır.

2.1. Otomobil Endüstrisinde Kalıpcılık Sektörü

1769’da Fransız mühendis Nicolas Joseph Cugnot ilk defa, buhar motoru ile çalışan ve kendi kendine hareket eden bir araç geliştirmiştir. Şekil 2’de bir tasviri gösterilen askeri amaçlı bu traktör, Fransız ordusu tarafından topların taşınmasında kullanılmış, ancak her 15 dakikada bir durup buhar kazanının yeniden beslenip ateşlenmesi gerektiğinden beklenen verim elde edilememiştir. Buharla çalışan kara taşıtı için ilk patent 1789 yılında ABD’de Oliver Evans’a verilmiştir. 1832-1839 yılları arasında İskoçyalı Robert Anderson, şarj edilebilir pillerle çalışan ilk elektrikli aracı (EA) icat etmiştir. 1876’da Nicolaus August Otto’nun gazla çalışan motorları geliştirmesi, içten yanmalı motorlu (İYM) araçların önünü açmış, Karl Benz’in dört tekerlekli İYM’li aracı üretmesiyle, otomotiv endüstrisi önemli bir ivme kazanmıştır (Bellis, 2025).



Şekil 2. Nicolas Joseph Cugnot'nun buharlı arabasının 1771 yılında bir taş duvara çarpmasını tasvir eden eski bir gravür (Bellis, 2025).

Otomotiv sektörü 1891’de Panhard-Levassor ve Peugeot ile seri üretime başlarken, birçok girişimcinin İYM’lu araç üretime yönelmesiyle hız kazanmıştır. 20. yüzyılın başlarında dünya otomobil üretiminin %48,77’sini gerçekleştiren Fransa, küresel otomobil üretiminde lider konumdayken, Ford’un üretim bandı sistemini geliştirmesiyle otomotiv endüstrisinde dönüşüm yaşanmış, liderlik ABD’ye geçmiştir. 1908’de üretilen Ford Model T, 1927’ye kadar 15.465.868 adet satılarak en çok satılan otomobil olmuştur (Puiboube, 2000).

Otomobil üretimi, İYM’ların kullanımıyla hızla artarak öncelikle gelişmiş ülkelerin temel ulaşım aracı haline gelmiştir. 1907’de dünya genelinde 250.000 olan otomobil sayısı, 1914’te 500.000’e, 1975’te ise 300 milyona ulaşmıştır. 2023 yılı itibarıyla ise yıllık küresel otomobil üretimi 70 milyonu aşmış olup, ilk 20 üretici ülke Tablo 1’de gösterilmektedir (OICA, 2024).

Tablo 1. Dünya otomobil üretimi (Milyon adet) (OICA, 2024)

S. Nu.	Ülke	Otomotiv	Ticari araç	Toplam	S. Nu.	Ülke	Otomotiv	Ticari araç	Toplam
1	Çin	26,1	4	30,2	11	Kanada	0,38	1,2	1,6
2	ABD	1,7	8,9	10,6	12	Fransa	1	0,48	1,5
3	Japonya	7,8	1,2	9	13	Türkiye	0,95	0,52	1,5
4	Hindistan	4,8	1,1	5,9	14	Çekya	1,4	0,07	1,4
5	G. Kore	3,9	0,34	4,2	15	Endonezya	1,2	0,22	1,4
6	Almanya	4,1	0	4,1	16	Slovakya	1,1	0	1,1
7	Meksika	0,9	3,1	4	17	İngiltere	0,91	0,12	1
8	İspanya	1,9	0,55	2,5	18	İtalya	0,54	0,34	0,88
9	Brezilya	1,8	0,54	2,3	19	Malezya	0,73	0,05	0,78
10	Tayland	0,58	1,3	1,8	20	Rusya	0,53	0,2	0,73

Günümüzde dünyanın en büyük 13. otomotiv üreticisi konumunda olan Türkiye’de, otomotiv sanayisinin temelleri 1950’li yıllarda atılmıştır. 1954’te ordu için jip ve kamyonet montajı gerçekleştirilmiş, 1966’da ise Türkiye’nin ilk yerli otomobil markası olan ANADOL’un üretimine başlanmıştır. 1966-1982 yılları arasında 87.000 adet ANADOL üretilirken, 1970’lerden itibaren Tofaş ve Oyak-Renault gibi firmalar, İtalyan ve Fransız lisanslarıyla üretime yönelmişlerdir. Türkiye, ilerleyen yıllarda küresel otomotiv sektörüne entegre olarak üretim kapasitesini artırmış ve sanayinin önemli aktörlerinden biri haline gelmiştir. Sürekli gelişim gösteren Türkiye otomotiv endüstrisi, otomotiv ve yan sanayi ile birlikte ülke sanayisinin lokomotif konumuna ulaşmıştır. Bu büyümeye paralel olarak, 1970’li yıllardan itibaren ticari anlamda faaliyet göstermeye başlayan otomotiv yan sanayisine bağlı kalıp firmaları da sürekli gelişmiş, uluslararası düzeyde faaliyetlerini genişletmiş ve tedarik süreçlerinde farklı tedarikçiler ile çalışmaya başlamışlardır (Arıcı, 2025).

İletişim ve bilgi teknolojilerindeki gelişmeler, uluslararası ekonomik iş birlikleri, yabancı yatırımlar ve çok uluslu şirketlerin artışı, küresel tedarik zincirlerini eşgüdüm içinde çalışmasını bir zaruret haline getirmiştir. Bu süreç, üretim, satış ve hizmet ağlarının genişlemesini sağlarken, serbest ticaret anlaşmalarının yaygınlaşmasına da katkıda bulunmuştur. Kalıp üretimi yapan firmalar da bu dönüşüme uyum sağlayarak sadece bulundukları ülkelerde değil uluslararası pazarlarda da yer almaya başlamıştır.

Ancak sektördeki bu küreselleşme, işletmelere bazı fırsatlar sunarken birtakım riskleri de beraberinde getirmektedir. Tedarikçi performansının işletme faaliyetlerine doğrudan etkisi, uyumsuz tedarikçilerin yaptırımlar, mali cezalar ve müşteri güven kaybı gibi sorunlara yol açmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, tedarikçi seçimi, tedarik zinciri performansını doğrudan etkileyen en kritik süreç haline gelmiştir (Çalık, 2022). Doğru tedarikçi seçimi, işletmelerin ürünlerini uygun maliyetle, istenilen miktarda ve zamanında sunmasını sağlayarak, tedarik zinciri yönetimi açısından stratejik bir karar niteliği taşımalarına neden olmaktadır (Moheb-Alizadeh ve ark., 2017).

Bu çalışmada otomotiv endüstrisi kalıpcılık sektöründe Bursa ilinde faaliyet gösteren bir işletmenin proje mühendisleri ile görüşülerek tedarikçilerinin değerlendirilmesinde kullanılacak kriterler aşağıda Tablo 2’de gösterildiği şekilde belirlenmiştir.

Tablo 2. Tedarikçi seçimine etki eden kriterler ve kodları

Kodu	Tedarikçi Seçimine Etki Eden Kriterler
K1	Simülasyon Program Kullanma Yetkinliği
K2	Simülasyon Analiz Yetkinliği
K3	Kalıp Tasarım Yapma Yetkinliği
K4	Kalıp Tasarım Analiz Yetkinliği
K5	Dokümantasyon Kullanma Yetkinliği
K6	Talaşlı İmalat Makine Parkuru
K7	Pres Parkuru
K8	Pres Tipi
K9	CMM Yetkinliği
K10	Geometri Analiz Yetkinliği
K11	Kalıpcı Yetkinliği
K12	Mühendislik Yetkinliği
K13	Planlama Takibi
K14	Kalıp Aksiyonlarında Proaktivite
K15	Geometri Çalışmalarında Proaktivite
K16	Problem Çözme Yetkinliği
K17	Fiyat ortalaması
K18	Güvenilirlik

Tedarikçilerin risk yönetimi ve belirsizlikleri kontrol etme yetkinlikleri, tedarik zincirinin dayanıklılığını artırmada önemli rol oynamaktadır. Artan küresel rekabet ortamında tedarikçi seçimi, nicel ve nitel çoklu kriterlerin dikkate alındığı, karmaşık bir karar sürecidir. Bu yüzden, otomotiv endüstrisinde faaliyet gösteren kalıpcılık sektöründe tedarikçi seçim sürecinde uygulanan ÇKKV yaklaşımları literatürde sıklıkla ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2. Karar Destek Sistemleri (KDS)

KDS'leri, yöneticilerin veya bireylerin karmaşık problemler karşısında daha etkili ve bilinçli kararlar almasını sağlamak için tasarlanmış bilgi sistemleridir. Bu sistemler, veri analizi, modelleme, benzetim ve kullanıcı ara yüzü gibi bileşenlerden oluşarak, karar alma süreçlerini kolaylaştırır ve destekler. Bu çalışmada tedarikçi sürecine karar desteği sağlamak amacıyla ÇKKV yöntemlerinden Standart Sapma (SD) ve MABAC yöntemleri kullanılmıştır.

Karar alma sürecinde, alternatifler ve bu alternatiflerin seçiminde etkili olan unsurların sayısı büyük bir öneme sahiptir. Alternatiflerin ve etkileyen faktörlerin çoğalması, süreci daha karmaşık hale getirdiğinden, en iyi çözümlere ulaşmak ve en doğru kararları verebilmek için ÇKKV yöntemlerine gereksinim duyulmaktadır. Literatürde 200'e yakın ÇKKV yöntemi

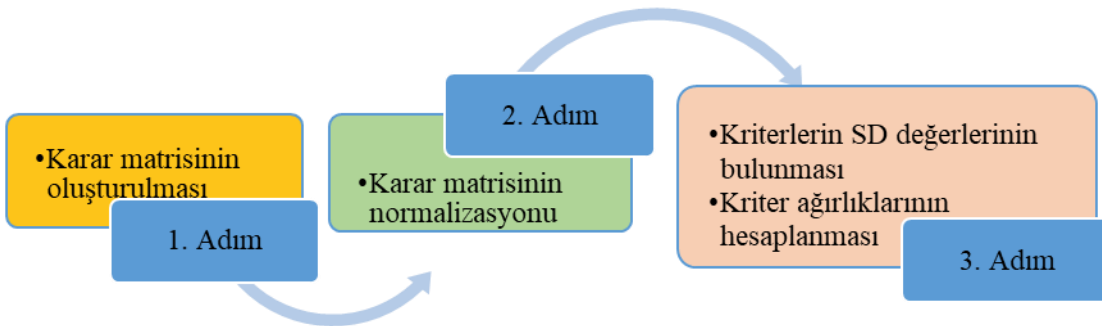
bulunmaktadır (Abdulahitoğlu ve ark., 2024a). ÇKKV yöntemlerinde işlemler genel olarak Şekil 3.'te gösterilen adımlar izlenerek yapılır.



Şekil 3. Çok Kriterli Karar Verme süreci (Abdulahitoğlu ve ark., 2024b)

2.2.1. Standart Sapma (SD) Yöntemi

SD yöntemi, ÇKKV problemlerinde kriter ağırlıklarını objektif olarak belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (Petrović ve ark., 2023). Faktörlerin objektif verilerden oluşması, değerlendirme için ayrıca bir uzmana ihtiyaç duyulmaması ve verilerin pozitif, negatif veya sıfır değerine sahip olması durumundan etkilenmeden hesaplama yapılabilmesinden dolayı araştırmacılarca sıklıkla ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin aşamaları Şekil 4'te gösterilmiştir (Abdulahitoğlu ve Abdulvahitoğlu, 2023).



Şekil 4. SD yönteminin aşamaları (Abdulahitoğlu ve Abdulvahitoğlu, 2023)

Literatürde kriter ağırlıklarını belirlemek için geliştirilen yöntemler üç ana kategoriye ayrılmaktadır: subjektif, objektif ve bütünsel yöntemler. Subjektif yöntemlerde, kriter ağırlıkları karar vericilerin tercihlerine ve değerlendirmelerine göre belirlenirken; objektif yöntemlerde ağırlıklandırma, yalnızca karar matrisi elemanlarına dayanarak, karar vericilerin müdahalesine gerek kalmadan yapılır. Bütünsel yöntemlerde ise her iki faktör, yani karar vericilerin tercihi ve karar matrisi verileri, birlikte kullanılarak ağırlıklandırma yapılır (Wang ve Luo, 2010). Objektif ağırlıklandırma yöntemlerinde, kriter ağırlıklarını belirlemek için genellikle karar matrisi elemanlarından yararlanılır. Bu yöntemlerde, ağırlıkların

belirlenmesinde, her bir kritere ait alternatiflerin performanslarındaki varyasyonlar kullanılır (Keshavarz-Ghorabae ve ark., 2021).

Bu farklılıklar, her yöntemin aynı veri kümesinde bile farklı ağırlıklar üretmesine yol açar. Bazı yöntemler, kriter değerleri arasındaki sapmaları dikkate alırken diğerleri ise bireysel kriterlerin önemine odaklanır. Kriterler arasında çelişki olduğunda, yöntemler farklı sonuçlar verebilir. Bazı yöntemler daha hassas hesaplamalar yaparken, diğerleri genel eğilimleri dikkate alır. Örneğin, AHP'deki ikili karşılaştırma matrisindeki küçük değişiklikler bile sonuçları ciddi şekilde etkileyebilir. SWARA yöntemindeki uzman görüşlerinin farklılıkları sonucu değiştirebilir. Bu nedenle bu çalışmada veriler tamamen objektif verilere dayalı olduğu için objektif verilerin değerlendirmesine daha duyarlı olan SD yöntemi tercih edilmiştir.

SD yöntemi genel olarak 3 temel adımda uygulanır. Bunlar (Ünal, 2019; Koşaroğlu, 2020);

Adım 1. Karar matrisinin oluşturulması: Eşitlik (1) kullanılarak bir başlangıç matrisi oluşturulur.

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

Adım 2. Karar matrisinin normalize edilmesi: X Karar matrisi Eşitlik (2)'de gösterilen vektör normalizasyonu yöntemi ile normalize edilir.

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

Adım 3. Kriterlerinin SD değerlerinin ve ağırlıklarının bulunması: Eşitlik (3) ile kriterlerinin SD değerleri, formül (4) ile de kriterlerinin önem düzeyleri tespit edilir.

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

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

2.2.2. MABAC Yöntemi

MABAC (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison), ÇKKV yöntemlerinden biridir. Pamučar ve Ćirović (2015) tarafından 2015 yılında geliştirilen MABAC yöntemi, karar alternatiflerinin kriter fonksiyonlarının sınır yakınlık alanına uzaklıklarını dikkate alarak değerlendirme esasına dayalıdır. MABAC yöntemi (4)-(12) numaralı eşitlikler kullanılarak uygulanır (Pamućar ve Ćirović, 2015; Stojanović ve Puška, 2021). Yöntemin aşamaları aşağıda Şekil 5'te gösterilmiştir.

Bu çalışmada seçeneklerin sıralanması işlemlerinde; hesaplamalar basit, kolay ve uygulanabilir olduğu, negatif, sıfır ve pozitif değerlendirmelere imkan verdiği, alternatifleri sadece ideal çözüme olan uzaklıklarına göre değil, sınır yaklaşım alanına göre konumunu değerlendirerek daha dengeli ve duyarlı bir sıralama sağladığı ve negatif değer içerse bile yöntemin uygulanabilirliği bozulmadığı için son zamanlarda oluşturulmuş oldukça yeni bir yöntem olan MABAC yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 5. MABAC yönteminin adımları (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Adım 1. Karar matrisini oluşturma. Problem ortaya konduktan sonra probleme ait alternatifler ve kriterlerden Eşitlik (5) kullanılarak oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \ddots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Adım 2. Karar matrisinin normalizasyonu: Fayda yönlü kriterler için (6) numaralı maliyet tipi kriterler için ise (7) numaralı Eşitlikler kullanılır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (6)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\max}}{x_j^{\min} - x_j^{\max}} \quad (7)$$

Adım 3. Ağırlıklı normalizasyon matrisinin hesaplanması: Her bir kriter için SD yöntemi ile belirlenen ağırlıklar kullanılarak normalleştirilmiş değerler Eşitlik (8)'de gösterildiği gibi ağırlıklandırılır.

$$V_{ij} = W_j * (1 + r_{ij}) \quad (8)$$

Adım 4. Sınır yakınlık matrisinin elde edilmesi. (9) ve (10) numaralı Eşitlikler ile sınır yakınlık alan matrisi (G) elde edilir.

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^m V_{ij} \right)^{1/m} \quad (9)$$

$$G = [g_i]_{1 \times n} \quad (10)$$

Adım 5. Alternatiflerin sınır yakınlık değerlerine uzaklıklarının bulunması. (11) ve (12) numaralı Eşitlikler ile hesaplanır.

$$Q = (v_i - G) = \begin{bmatrix} v_{11} - g_1 & v_{12} - g_2 & \dots & v_{1n} - g_n \\ v_{21} - g_1 & v_{22} - g_2 & \dots & v_{2n} - g_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} - g_1 & v_{m2} - g_2 & \dots & v_{mn} - g_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1m} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \dots & q_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A_i \in \begin{cases} G^+ & \text{eğer } q_{ij} > 0 \\ G & \text{eğer } q_{ij} = 0 \\ G^- & \text{eğer } q_{ij} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Adım 6. Alternatiflerin sıralanması. X karar matrisinde belirtilen alternatifler Eşitlik (13) ile hesaplandıktan sonra büyüktten küçüğe doğru sıralanır

$$S_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} \quad (13)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Otomotiv sektöründe kalıp imalatı, en fazla bütçe ayrılan ve proje zaman planında en uzun süren süreçlerden biridir. Kalıp maliyetleri, proje bütçesinin %10 ila %30'unu oluşturabilmekte, özellikle büyük kalıplar yüksek maliyetlere yol açmaktadır. Bu nedenle, tedarikçi seçimi kritik bir karar süreci olup, teknik yetkinlik ve fiyatlandırma dengesi dikkate alınarak yapılmalıdır. Bu çalışmada, tedarikçiler küçük, orta ve büyük kalıp imalatı kapasitelerine göre sınıflandırılarak bir KDS oluşturulmuştur. İlk tedarikçi seçimi kadar, tedarikçinin proje ilerledikçe gösterdiği performans da büyük önem taşımaktadır. Yanlış bir seçim veya süreçte ortaya çıkabilecek aksaklıklar, proje maliyetleri ve zaman planı açısından ciddi riskler doğurabilir.

Bu çalışmada, Bursa'da faaliyet gösteren bir kalıpcılık firmasının tedarikçi seçiminde en çok çalıştığı büyük ölçekli tedarikçilerinden 23 tanesi incelenmiştir. Gizlilik nedeniyle tedarikçi isimleri T1, T2..., şeklinde kodlanarak Tablo 3.'te gösterilmiştir. İşletmenin tedarikçi seçiminde karar desteğinin sağlamasının hedeflendiği bu çalışmada tedarikçiler, işletmenin proje mühendisleri tarafından belirlenen 18 kritere göre 100 puan üzerinden, son üç projedeki performansları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Değerlendirilen bu tedarikçiler, minimum 3 metre ebatlarında kalıp üretebilen ve araç gövde parçalarının tamamını yapabilecek kapasiteye sahip firmalardan oluşmaktadır. Tedarikçilerinin değerlendirilmesine esas başlangıç matrisi aşağıda Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Kalıp sektöründe faaliyet gösteren tedarikçiler

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18
T1	100	100	100	90	90	100	100	100	100	80	80	100	80	80	80	100	5	100
T2	100	80	100	80	90	100	100	100	100	95	75	90	90	90	90	90	90	10
T3	100	90	100	80	90	100	100	100	100	90	75	90	90	80	80	90	86	10
T4	100	100	100	100	90	100	100	100	100	95	90	100	90	95	80	100	90	25
T5	100	70	100	90	90	100	100	100	100	95	90	90	90	95	95	90	70	25
T6	100	95	100	95	80	100	100	100	100	95	85	100	90	95	95	90	20	80
T7	100	95	100	90	80	100	100	100	100	90	80	100	90	80	60	70	20	80
T8	100	80	100	97	80	100	100	88	100	95	90	90	90	85	85	90	70	20
T9	100	90	100	95	80	100	100	80	100	95	70	90	90	80	80	90	50	20
T10	100	80	100	95	70	100	100	70	100	80	70	90	90	80	80	90	30	55
T11	100	80	100	85	70	100	100	100	100	75	70	90	90	80	80	80	30	35
T12	50	90	100	90	80	100	100	88	100	95	95	95	90	90	90	90	30	15
T13	100	80	100	85	90	100	100	88	100	38	60	95	70	80	50	50	90	35
T14	100	90	100	90	80	100	100	100	100	90	95	95	90	80	80	90	2	90
T15	100	85	10	90	70	100	100	100	100	85	89	100	90	80	80	85	30	70
T16	50	50	50	75	65	100	100	100	100	80	85	70	70	80	80	70	60	20
T17	100	75	100	70	60	80	100	100	100	75	50	90	80	85	85	85	75	20
T18	100	75	100	75	70	75	100	100	100	75	50	80	75	80	80	80	50	20
T19	50	50	50	88	90	65	100	28	0	55	45	50	90	85	85	75	90	20
T20	100	70	100	85	50	80	100	25	100	60	50	50	75	85	85	76	70	20
T21	100	90	100	75	70	80	100	50	100	75	80	60	90	80	80	80	70	15
T22	100	80	100	90	70	70	100	60	100	75	78	90	90	87	87	90	30	60
T23	100	90	100	90	60	80	100	100	100	85	85	90	90	90	90	90	10	80

Tablo 3.'de puanlanan tedarikçilerin SD yöntemi ile kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda başlangıç matrisi vektör normalizasyonu yöntemi ile normalize edilmiştir. Normalize edilmiş matris aşağıda Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. SD yönteminde normalize edilmiş matris

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18
T1	0,22	0,25	0,22	0,21	0,24	0,22	0,21	0,23	0,21	0,20	0,22	0,24	0,19	0,20	0,20	0,25	0,02	0,42
T2	0,22	0,20	0,22	0,19	0,24	0,22	0,21	0,23	0,21	0,24	0,20	0,21	0,22	0,22	0,23	0,22	0,32	0,04
T3	0,22	0,23	0,22	0,19	0,24	0,22	0,21	0,23	0,21	0,23	0,20	0,21	0,22	0,20	0,20	0,22	0,31	0,04
T4	0,22	0,25	0,22	0,24	0,24	0,22	0,21	0,23	0,21	0,24	0,24	0,24	0,22	0,23	0,20	0,25	0,32	0,11
T5	0,22	0,18	0,22	0,21	0,24	0,22	0,21	0,23	0,21	0,24	0,24	0,21	0,22	0,23	0,24	0,22	0,25	0,11
T6	0,22	0,24	0,22	0,23	0,22	0,22	0,21	0,23	0,21	0,24	0,23	0,24	0,22	0,23	0,24	0,22	0,07	0,34
T7	0,22	0,24	0,22	0,21	0,22	0,22	0,21	0,23	0,21	0,23	0,22	0,24	0,22	0,20	0,15	0,17	0,07	0,34
T8	0,22	0,20	0,22	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,24	0,24	0,21	0,22	0,21	0,22	0,22	0,25	0,08
T9	0,22	0,23	0,22	0,23	0,22	0,22	0,21	0,19	0,21	0,24	0,19	0,21	0,22	0,20	0,20	0,22	0,18	0,08
T10	0,22	0,20	0,22	0,23	0,19	0,22	0,21	0,16	0,21	0,20	0,19	0,21	0,22	0,20	0,20	0,22	0,11	0,23
T11	0,22	0,20	0,22	0,20	0,19	0,22	0,21	0,23	0,21	0,19	0,19	0,21	0,22	0,20	0,20	0,20	0,11	0,15
T12	0,11	0,23	0,22	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,24	0,26	0,23	0,22	0,22	0,23	0,22	0,11	0,06
T13	0,22	0,20	0,22	0,20	0,24	0,22	0,21	0,21	0,21	0,10	0,16	0,23	0,17	0,20	0,13	0,12	0,32	0,15
T14	0,22	0,23	0,22	0,21	0,22	0,22	0,21	0,23	0,21	0,23	0,26	0,23	0,22	0,20	0,20	0,22	0,01	0,38
T15	0,22	0,21	0,02	0,21	0,19	0,22	0,21	0,23	0,21	0,21	0,24	0,24	0,22	0,20	0,20	0,21	0,11	0,30
T16	0,11	0,13	0,11	0,18	0,17	0,22	0,21	0,23	0,21	0,20	0,23	0,17	0,17	0,20	0,20	0,17	0,21	0,08
T17	0,22	0,19	0,22	0,17	0,16	0,18	0,21	0,23	0,21	0,19	0,14	0,21	0,19	0,21	0,22	0,21	0,27	0,08
T18	0,22	0,19	0,22	0,18	0,19	0,17	0,21	0,23	0,21	0,19	0,14	0,19	0,18	0,20	0,20	0,20	0,18	0,08
T19	0,11	0,13	0,11	0,21	0,24	0,15	0,21	0,07	0,00	0,14	0,12	0,12	0,22	0,21	0,22	0,18	0,32	0,08
T20	0,22	0,18	0,22	0,20	0,13	0,18	0,21	0,06	0,21	0,15	0,14	0,12	0,18	0,21	0,22	0,19	0,25	0,08
T21	0,22	0,23	0,22	0,18	0,19	0,18	0,21	0,12	0,21	0,19	0,22	0,14	0,22	0,20	0,20	0,20	0,25	0,06
T22	0,22	0,20	0,22	0,21	0,19	0,16	0,21	0,14	0,21	0,19	0,21	0,21	0,22	0,21	0,22	0,22	0,11	0,25
T23	0,22	0,23	0,22	0,21	0,16	0,18	0,21	0,23	0,21	0,21	0,23	0,21	0,22	0,22	0,23	0,22	0,04	0,34

SD yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda tedarikçi performans kriterlerinin ağırlıkları aşağıda Tablo 5’te gösterildiği gibi ortaya çıkmıştır. Sırasıyla “Güvenilirlik”, “Fiyat ortalaması” ve “Pres Tipi” kriterlerinin en önemli kriterler olarak tedarikçi seçiminde rol aldığı tespit edilmiştir.

Tablo 5. Tedarikçi performans kriterleri ve ağırlıkları

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18
Ağırlık	0,05148	0,04520	0,06885	0,02510	0,04449	0,03668	0,00000	0,07537	0,06054	0,04976	0,05662	0,04833	0,02323	0,01870	0,03461	0,03662	0,15107	0,17334

Tedarikçilerin performans kriterlerinin ağırlıkları hesaplandıktan sonra bu tedarikçiler MABAC yöntemi ile sıralanmıştır. MABAC yöntemi ile oluşturulan normalize edilmiş matris Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6. MABAC yöntemiyle normalize edilmiş matris

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18
T1	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,74	0,70	1,00	0,50	0,00	0,67	1,00	0,03	1,00
T2	1,00	0,60	1,00	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60	0,80	1,00	0,67	0,89	0,80	1,00	0,00
T3	1,00	0,80	1,00	0,33	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	0,91	0,60	0,80	1,00	0,00	0,67	0,80	0,95	0,00
T4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00	0,17
T5	1,00	0,40	1,00	0,67	1,00	1,00	4,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,80	1,00	1,00	1,00	0,80	0,77	0,17
T6	1,00	0,90	1,00	0,83	0,75	1,00	5,00	1,00	1,00	1,00	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,20	0,78
T7	1,00	0,90	1,00	0,67	0,75	1,00	6,00	1,00	1,00	0,91	0,70	1,00	1,00	0,00	0,22	0,40	0,20	0,78
T8	1,00	0,60	1,00	0,90	0,75	1,00	7,00	0,84	1,00	1,00	0,90	0,80	1,00	0,33	0,78	0,80	0,77	0,11
T9	1,00	0,80	1,00	0,83	0,75	1,00	8,00	0,73	1,00	1,00	0,50	0,80	1,00	0,00	0,67	0,80	0,55	0,11
T10	1,00	0,60	1,00	0,83	0,50	1,00	9,00	0,60	1,00	0,74	0,50	0,80	1,00	0,00	0,67	0,80	0,32	0,50
T11	1,00	0,60	1,00	0,50	0,50	1,00	10,00	1,00	1,00	0,65	0,50	0,80	1,00	0,00	0,67	0,60	0,32	0,28
T12	0,00	0,80	1,00	0,67	0,75	1,00	11,00	0,84	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	0,67	0,89	0,80	0,32	0,06
T13	1,00	0,60	1,00	0,50	1,00	1,00	12,00	0,84	1,00	0,00	0,30	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,28
T14	1,00	0,80	1,00	0,67	0,75	1,00	13,00	1,00	1,00	0,91	1,00	0,90	1,00	0,00	0,67	0,80	0,00	0,89
T15	1,00	0,70	0,80	0,67	0,50	1,00	14,00	1,00	1,00	0,82	0,88	1,00	1,00	0,00	0,67	0,70	0,32	0,67
T16	0,00	0,00	0,00	0,17	0,38	1,00	15,00	1,00	1,00	0,74	0,80	0,40	0,00	0,00	0,67	0,40	0,66	0,11
T17	1,00	0,50	1,00	0,00	0,25	0,43	16,00	1,00	1,00	0,65	0,10	0,80	0,50	0,33	0,78	0,70	0,83	0,11
T18	1,00	0,50	1,00	0,17	0,50	0,29	17,00	1,00	1,00	0,65	0,10	0,60	0,25	0,00	0,67	0,60	0,55	0,11
T19	0,00	0,00	0,00	0,60	1,00	0,00	18,00	0,04	0,00	0,30	0,00	0,00	1,00	0,33	0,78	0,50	1,00	0,11
T20	1,00	0,40	1,00	0,50	0,00	0,43	19,00	0,00	1,00	0,39	0,10	0,00	0,25	0,33	0,78	0,52	0,77	0,11
T21	1,00	0,80	1,00	0,17	0,50	0,43	20,00	0,33	1,00	0,65	0,70	0,20	1,00	0,00	0,67	0,60	0,77	0,06
T22	1,00	0,60	1,00	0,67	0,50	0,14	21,00	0,47	1,00	0,65	0,66	0,80	1,00	0,47	0,82	0,80	0,32	0,56
T23	1,00	0,80	1,00	0,67	0,25	0,43	22,00	1,00	1,00	0,82	0,80	0,80	1,00	0,67	0,89	0,80	0,09	0,78

MABAC yönteminin diğer aşamalarında belirtilen işlemler (8)-(13) numaralı formüller ile gerçekleştirildikten sonra her bir tedarikçinin aldığı puan ve sıralaması aşağıda Tablo 7’de gösterildiği gibi ortaya çıkmıştır. Sırasıyla 4, 6 ve 1 numaralı tedarikçiler en uygun üç tedarikçi olarak belirlenmiştir. İşlemler yazarlar tarafından Microsoft Excel kullanılarak yapılmıştır.

Literatür taramada, benzer tedarikçi seçim çalışmalarında kalite, teslimat, maliyet ve performans gibi temel unsurların ön planda olduğu ve toplamda 14 farklı kriterin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise proje mühendisleri, tedarikçileri teorik değerlendirme esaslarına göre değil, doğrudan sahada karşılaştıkları gerçek uygulamaya dayalı bizzat kendilerinin belirlediği 18 farklı kriter ile değerlendirme yapılmıştır. Önceki çalışmalarda, kaliteli malzeme kullanımı ve yüksek ürün kalitesinin, müşteri memnuniyetini artırarak marka itibarını koruyan önemli faktörler olduğunu vurgulanmaktadır. Bu nedenle, tedarikçi

seçiminde kaliteye odaklanmak bir gerekliliktir. Bu çalışmada ise kalite, çeşitli yetkinlikler başlıkları altında değerlendirilmiştir.

Tablo 7. Tedarikçilerin MABAC puanı ve sıralaması

Tedarikçi	Puan	Sıralama	Tedarikçi	Puan	Sıralama
T4	0,104016	1	T22	-0,10454	13
T6	0,0685	2	T13	-0,10961	14
T1	0,039442	3	T12	-0,11535	15
T5	0,028743	4	T11	-0,11573	16
T14	0,020043	5	T15	-0,11996	17
T2	0,007796	6	T17	-0,13704	18
T7	-0,00598	7	T21	-0,17379	19
T8	-0,00933	8	T18	-0,19911	20
T3	-0,01455	9	T16	-0,28302	21
T23	-0,02905	10	T20	-0,28825	22
T9	-0,07707	11	T19	-0,4119	23
T10	-0,0873	12			

Tedarikçilerin güvenilirliği ve zamanında teslimatları, üretim süreçlerinin verimli planlanmasını ve müşteri taleplerinin eksiksiz karşılanmasını sağlamaktadır. Bu doğrultuda, tedarikçilerle sürekli iletişim halinde olunması ve beklentilerin net bir şekilde iletilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada güvenilirlik, tedarikçilerin sahip olması gereken en temel özellik olarak belirlenmiştir.

Maliyet, tedarikçi seçiminde önemli bir diğer faktör olmakla birlikte, yalnızca düşük fiyat odaklı bir yaklaşım yerine rekabetçi fiyatlandırma ve değer odaklı bir teklif sunulmasını gerektirmektedir. Düşük maliyetin, kalite ve hizmet düzeyinde bir düşüşe yol amaması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, maliyet kriteri bu çalışmada "fiyat ortalaması" başlığı altında ele alınmış ve en önemli ikinci kriter olarak belirlenmiştir. nc en önemli kriter olarak tedarikçilerin üretimde kullandıkları pres tipi olarak ortaya çıkmıştır. Başta bu kriterler olmak üzere 18 kriterinin ağırlıklarının temel alındığı analiz sonucunda sırasıyla 4, 6 ve 1 numaralı tedarikçiler en uygun  tedarikçi olarak belirlenmiştir.

4. Sonuç

Küreselleşme, insanları, toplumları ve ekonomileri birçok yönden etkilemekte; teknolojik gelişmeler, ekonomik entegrasyon, g, yeni medya, kültürel değişim, çevresel ve politik etkiler gibi unsurlar küresel dönüşüm sürecini hızlandırmaktadır. Bu bağlamda değişen piyasa koşullarında rekabet gücünü korumak isteyen şirketler, yalnızca krlılığı değil, toplumsal ve çevresel sürdürülebilirliği de gözetten stratejiler geliştirmektedir. Bu yüzden bu çalışmada son yıllarda önemi artan sürdürülebilir tedarikçi seçimi ele alınmıştır.

Türkiye’de 2024 yılı itibarıyla otomotiv sektörünün ihracatı, bir önceki yıla göre %6,3 artarak 37,2 milyar dolara ulaşmış, Türkiye’nin toplam ihracatındaki payı %17,3 olarak gerçekleşmiştir. Son 19 yılda 18 kez ihracat lideri olan sektör, ekonomik büyümeye önemli katkılar sağlamaktadır (Şan, 2025). Türk otomotiv endüstrisinin ekonomik ve ticari açılardan dünya ölçeğinde daha iyi bir konuma gelebilmesinde etkili olan hususlardan biridir. Üretimde ve kalitede sürdürülebilir bir gelişim içerisinde kalıpcılık sektörü önemli bir yer tutmaktadır. Otomotiv endüstrisinde kalıp imalatı, projelerin en yüksek bütçeye sahip ve en uzun süren aşamalarından biridir. Hem tedarikçiler hem de müşteriler için kritik bir süreç olan kalıp imalatında, etkin iletişim ve proje yönetimi, hata oranlarını minimize ederek firmaların sürdürülebilir gelişimine katkı sağlamaktadır

Bu çalışmada, kalıp imalatı sektöründe tedarikçi seçim süreci detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu sürecin projelerin maliyet ve zaman planlaması üzerindeki kritik etkileri ortaya konulmuştur. Çalışma, tedarikçi seçiminin sadece fiyat ve teknik yeterlilik gibi temel kriterlere dayanmakla kalmayıp, aynı zamanda tedarikçilerin proje süresindeki performansının da önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Bu doğrultuda, geliştirilen KDS, tedarikçi seçiminde objektif bir yaklaşım benimsenmesini sağlamakta ve sektördeki firmaların daha verimli seçimler yapmalarına olanak tanımaktadır. Bu bulgular, otomotiv sektöründeki kalıp imalatı süreçlerinin daha verimli yönetilebilmesi için tedarikçi seçim kararlarının kritik bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda kalıpcılık sektöründe öncü firmalardan birinin tedarikçilerinin belirlenmesinde etkili olan faktörler ortaya konarak, çok faktörlü bir değerlendirme yapılması amaçlanmıştır. Ancak tedarikçilerin çok fazla olması ve değişik ebat ve zaman gerektiren alanlarda faaliyet göstermeleri nedeniyle sadece benzer, kapasite ve diğer özelliklere sahip 23 tedarikçi karşılaştırılarak en uygun tedarikçiler belirlenmiştir.

İlerleyen çalışmalarda, işletmeler tedarikçilerle güçlü iş birlikleri geliştirerek ortak sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda değerlendirme kriterlerini genişletebilir. Belirsizliğin hakim olduğu bu süreçte, alternatiflerin sıralaması bulanık küme yöntemleriyle analiz edilebilir. Çeşitli metodolojiler uygulanarak elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak incelenebilir. İşletmede değişik departmanlarda görevli proje çalışmalarında yer alan uzman ve yöneticilerin katılımı ile tedarikçilerin sınıflandırması yeniden yapılabilir ve bu tedarikçilerin değerlendirmesine esas kriter sayıları yeniden düzenlenerek çalışma daha geniş kapsamlı yapılabilir. Ayrıca farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak tedarikçilerin değerlendirmesi yeniden yapılarak sonuçlar karşılaştırılabilir. Hatta değerlendirmeye esas parametreler bazıları değerlendirmeden çıkarılarak yapılan analizler ile kullanılan bu

kriterlerin çalışmaya dahil edilip edilmemesinin sonuca etkisi tespit edilerek duyarlılık analizi yapılabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler

Kaynaklar

Abdulahitoğlu A, Vural D, Macit İ., 2024a. Selecting facility location of gendarmerie search and rescue (GSR) units; An analysis of efficiency in disaster response. Computers & Industrial Engineering, 197: 110639.

Abdulahitoğlu A, Abdulahitoğlu A, Cengiz N., 2024b. A comprehensive analysis of apricot drying methods via multi-criteria decision making techniques. Journal of Food Process Engineering, 47: e14759.

Abdulahitoğlu A, Abdulahitoğlu A., 2023. Hibrit elektrikli araçlar, fişe takılabilir hibrit elektrikli araçlar ve tamamen elektrikli araçların swot analizi ile karşılaştırılması. ISARC 6. International Hasankeyf Scientific Research and Innovation Congress, 18-19 November 2023, Batman, Türkiye.

Akman G, Pamuk KC, Karabıçak Ç., 2021. Yeni ürün geliştirme sürecinde bulanık AHP & ORESTE bütünleşik yöntemi ile tedarikçi seçimi: Savunma sanayisinde bir uygulama. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(2): 788-807.

Altuntaş SC., 2021. Türkiye otomotiv endüstrisinin açıklanmış karşılaştırmalı üstünlük modeli açısından rekabet analizi. Gümrük ve Ticaret Dergisi, 8(25): 36-49.

Arıcı S., 2025. Kalıpcılık sektöründe tedarikçilerin seçilmesine yönelik bir karar destek sistemi. Mudanya Üniversitesi Endüstri Müh. ABD Yayınlanmamış Tezsiz Yüksek lisans Projesi, Bursa.

Bellis M., 2025. The history of the automobile. <https://archive.md/20120709231042>. ERT: 15 Mart 2025.

Çağl G, Çelik F., 2021. Bulanık çok kriterli karar verme teknikleri ile tedarikçi seçimi; Bir traktör fabrikası örneği. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 23(68): 607-619.

Çalık A., 2022. Bulanık AHP-Bulanık ARAS yöntemlerine dayalı dayanıklı tedarikçi seçimi. İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 9(2): 275-296.

De Boer L, Labro E, Morlacchi P., 2001. A review of methods supporting supplier selection. *European Journal of Purchasing and Supply Management*, 7(2): 75-89.

Esmeray M, Özveri O., 2023. Tedarikçi seçiminde farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 18(72): 587-602.

Filiz AÇ., 2023. Tekstil sektöründe sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi kriterlerinin ve tedarikçi seçim probleminin analitik hiyerarşi süreci yöntemiyle analizi. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 15(1): 640-658.

Ghodsypour SH, O'Brien C., 1998. A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming. *International Journal of Production Economics*, 56: 199-212.

Hendiani S, Bagherpour M., 2019. Development of sustainability index using z-numbers: A new possibilistic hierarchical model in the context of z-information. *Environment, Development and Sustainability*, 22: 6077-6109.

Jermisittiparsert K, Zaharb M, Sumarnic S, Voronkovad OY, Bakhvalove SY, Akhmadeevf RZ., 2021. Selection of sustainable suppliers in the oil and gas industry using fuzzy multi-criteria decisionmaking methods. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(4): 1-9.

Keshavarz-Ghorabae M, Amiri M, Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J., 2021. Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MEREC). *Symmetry*, 13(4): 525.

Koşaroğlu ŞM., 2020. Bist'te işlem gören bankaların performanslarının SD ve EDAS yöntemleriyle değerlendirilmesi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 5(3): 406-417.

Kumar A, Jain V, Kumar S., 2014. A comprehensive environment friendly approach for supplier selection, *Omega*, 42: 109–123.

Kürşat Güleş H, Çağlıyan V, Şener T., 2014. Hazır giyim sektöründe analitik hiyerarşi prosesi yöntemine dayalı tedarikçi seçimi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 31(1): 159-170.

Lutra S, Govindan K, Kannan D, Mangla SK, Garg CP., 2017. An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 140: 1686-1698.

Moheb-Alizadeh H, Mahmoudi M, Bagheri R., 2017. Supplier selection and order allocation using a stochastic multi-objective programming model and genetic algorithm. *International Journal of Integrated Supply Management*, 11(4): 291–315.

Nebati EE., 2024. Sürdürülebilir tedarikçi seçimi: Küresel bulanık AHP tabanlı CODAS yaklaşımı. Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 19(1): 54-67.

OICA, International Organization of Motor Vehicle Manufacturers., 2024. Car production by country. <https://worldpopulationreview.com/country-rankings>. ERT: 12 Mart 2025.

Öztürk D, Tekin M., 2021. Hammadde tedarikçi seçiminde AHP-TOPSIS yöntemlerinin kullanılması ve gıda sektöründe bir uygulama. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 25(2): 411-432.

Pamuçar D, Ćirović G., 2015. The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison (MABAC). Expert Systems with Applications, 42(6): 3016-3028.

Petrović N, Živanović T, 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.

Puiboube D., 2000. Un siècle d'automobile en France. Paris: ETAI. P: 28.

Solunoğlu S, Solunoğlu A., 2024. Tedarikçi seçim süreçlerinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılması; Otel işletmesinde bir uygulama. Tourism and Recreation, 6(2): 230-234.

Stojanović I, Puška A., 2021. Logistics performances of gulf cooperation council's countries in global supply chains. decision making: Applications in Management and Engineering, 4(1): 174-193.

Sabah C., 2010. Otomotiv endüstrisi kalıpcılığında kalıp tasarımı otomasyonu. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bursa.

Sarkis J, Talluri S., 2002. A model for strategic supplier selection. Journal of Supply Chain Management, 38(4): 18-28.

Şan C., 2025. Türkiye otomotiv sektörü 2024'ü 37 milyar dolar ihracatla kapattı. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi>, ERT: 18 Mart 2025.

Ülker B, Özçelik TO., 2024. Bulanık ÇKKV teknikleri ile sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi ve tedarikçi seçimi. Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitim Dergisi., 3(1): 1-18.

Ünal EA., 2019. Özel sermayeli ticari bankalarının finansal performansının SD ve WASPAS yöntemleri ile ölçülmesi. Ekonomi Politika ve Finans Araştırmaları Dergisi, 4(3): 384-400.

Verma R, Pullman ME., 1998. An analysis of the supplier selection process. Omega, 26(6): 739-750.

Vikipedi., 2025. Otomobilin tarihi. https://tr.wikipedia.org/wiki/Otomobilin_tarih
ERT:12 Ocak 2025.

Wang YM, Luo Y., 2010. Integration of correlations with standard deviations for determining attribute weights in multiple attribute decision making. Mathematical and Computer Modelling Volume, 51(1–2): 1-12.

.

Endüstri 4.0 Bileşenlerinin Döngüsel Ekonomi Üzerindeki Rolü: Regresyon Analizine Dayalı Ampirik Bir Çalışma

Kübra TÜMAY ATEŞ^{1*}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0002-3337-7969>

*Sorumlu yazar: ktumay@cu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 02.05.2025

Kabul tarihi: 13.07.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Endüstri 4.0

Döngüsel ekonomi

Sürdürülebilir üretim

Regresyon analizi

Dijital dönüşüm

ÖZ

Bu çalışma, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi uygulamaları arasındaki ilişkiyi bir regresyon modeli aracılığıyla incelemeyi amaçlamaktadır. Endüstri 4.0'ın ileri teknolojiler ve dijitalleşme yoluyla üretim süreçlerini optimize etme potansiyeli, döngüsel ekonomi prensipleriyle birleşerek kaynak verimliliğini artırmak ve atıkları azaltmak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Çalışma, Endüstri 4.0'ın uygulamalarının döngüsel ekonomi ilkeleriyle nasıl entegre olduğunu ve bu entegrasyonun ekonomik, çevresel ve operasyonel sonuçlar üzerindeki etkilerini analiz etmek için nicel bir regresyon modeli kullanılmıştır. Araştırma kapsamında oluşturulan modelde, döngüsel ekonomi performansı bağımlı değişken olarak belirlenmiş; IoT kullanımı, robotik otomasyon, dijital üretim ise bağımsız değişkenler olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen regresyon modeline göre, dijital üretim süreci, geri dönüşüm oranlarını artırma yönünde en etkili değişken olup, bu etkinin hem istatistiksel olarak anlamlı hem de pozitif yönde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılmasında nasıl bir rol oynadığını ortaya koyarak, sürdürülebilir üretim sistemlerinin tasarlanmasında yol haritası sunabilecektir.

The Role of Industry 4.0 Components on the Circular Economy: An Empirical Study Based on Regression Analysis

Research Article

Article History:

Received: 02.05.2025

Accepted: 13.07.2025

Available online: 12.09.2025

Keywords:

Industry 4.0

Circular economy

Sustainable production

Regression analysis

Digital transformation

ABSTRACT

This study aims to examine the relationship between Industry 4.0 and circular economy practices through a regression model. The potential of Industry 4.0 to optimize manufacturing processes through advanced technologies and digitalization, when combined with circular economy principles, offers significant opportunities to enhance resource efficiency and reduce waste. The study employs a quantitative regression model to analyze how the applications of Industry 4.0 are integrated with circular economy principles and the impact of this integration on economic, environmental, and operational outcomes. In the model developed for the research, circular economy performance is defined as the dependent variable, while the usage of IoT, robotic automation, and digital manufacturing are considered as independent variables. According to the obtained regression model, digital manufacturing emerges as the most effective variable in increasing recycling rates, with this effect being both statistically significant and positively correlated. The results highlight the role of Industry 4.0 technologies in achieving the objectives of circular economy, potentially providing a roadmap for the design of sustainable production systems.

Giriş

Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi, günümüz iş dünyasında önemli dönüşümleri temsil eden iki kritik kavramdır. Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde dijitalleşme, otomasyon, yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT), robotik ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu ile karakterizedir. Bu teknolojiler, üretim verimliliğini artırmanın yanı sıra, kaynak kullanımını optimize etmeye, süreçleri daha esnek hale getirmeye ve sürdürülebilirliği desteklemeye yönelik önemli fırsatlar sunmaktadır. Endüstri 4.0'ın, şirketlere daha az kaynak kullanarak daha fazla değer üretme imkânı sağladığı, dolayısıyla çevresel etkileri azaltmaya yardımcı olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte, Endüstri 4.0'ın sadece ekonomik verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği destekleyen döngüsel ekonomi modelleriyle uyumlu olduğu da giderek daha fazla vurgulanmaktadır.

Döngüsel ekonomi, geleneksel doğrusal ekonomik modelin aksine, ürünlerin ömrü boyunca kaynakların verimli kullanılmasını, atıkların en aza indirilmesini ve geri dönüşüm ile yeniden kullanımın teşvik edilmesini amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu model, çevresel etkileri azaltırken aynı zamanda ekonomik fayda sağlamayı hedefler. Endüstri 4.0'ın sunduğu yenilikçi çözümler, döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanmasını kolaylaştırarak, üretim süreçlerinde daha fazla geri dönüşüm, yeniden kullanım ve verimlilik sağlanmasına olanak tanımaktadır. Özellikle akıllı fabrikalar, veri analitiği ve sensör tabanlı izleme sistemleri gibi Endüstri 4.0 uygulamaları, döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılmasında kritik bir rol oynayabilir.

Ancak, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişkinin nasıl işlediği ve bu ilişkiyi etkileyen faktörlerin neler olduğu konusunda henüz net bir anlayış bulunmamaktadır. Bu noktada, şirket büyüklüğü gibi faktörlerin bu ilişkiyi nasıl şekillendirdiği önemlidir. Küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) ile büyük şirketlerin, Endüstri 4.0 teknolojilerini benimseme ve döngüsel ekonomi uygulamalarını hayata geçirme süreçlerinde farklı stratejiler ve sonuçlar izleyebileceği öngörülebilir. Dolayısıyla, şirket büyüklüğünün bu iki kavram arasındaki etkileşimdeki rolünü anlamak, hem teorik hem de pratik açıdan önemli bir araştırma konusudur.

Döngüsel ekonomi endeksi; kaynak verimliliği, atık minimizasyonu ve sürdürülebilir üretim-tüketim sistemlerine geçiş düzeyini ölçen kompozit bir performans göstergesidir. Endeksin belirlenmesinde etkili olabilecek faktörler ekonomik, teknolojik, çevresel ve kurumsal değişkenleri içermektedir. Günümüzde işletmelerin sürdürülebilirlik odaklı stratejileri doğrultusunda çevresel performanslarını iyileştirmeye yönelik çabalar kritik önem

kazanmıştır. Bu kapsamda, döngüsel ekonomi uygulamaları kaynak kullanımının optimizasyonu ve atık oluşumunun azaltılmasında belirleyici rol oynamaktadır.

Endüstri 4.0 teknolojileri; üretim hatlarında otomasyon, gerçek zamanlı veri toplama ve analitiği, yapay zekâ destekli karar sistemleri ve akıllı üretim çözümleri aracılığıyla çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada kurulan modelde, döngüsel ekonomi endeksi bağımlı değişken olarak yapılandırılmış; bağımsız değişkenler ise döngüsel ekonomi uygulama seviyesi, IoT entegrasyonu, robotik otomasyon ve dijital üretim teknolojileri olarak tanımlanmıştır. Bu değişkenlerin geri dönüşüm oranı üzerindeki etkileri, çoklu doğrusal regresyon analizi yöntemi ile kantitatif olarak analiz edilmiştir.

Çalışmanın temel amacı, Endüstri 4.0 bileşenlerinin döngüsel ekonomi perspektifiyle işletmelerin geri dönüşüm performansına etkilerini istatistiksel olarak ortaya koymaktır. Çoklu regresyon modeli aracılığıyla bağımsız değişkenlerin varyans açıklayıcılık düzeyleri değerlendirilmiş, katsayıların istatistiksel anlamlılıkları ve modelin genel uyum iyiliği test edilmiştir. Bu sayede, üretim sektöründe dijital dönüşüm uygulamalarının çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkısı nesnel veriler üzerinden ampirik olarak ortaya konulmuştur.

Özellikle döngüsel ekonomi performansı, araştırmanın ana odak değişkeni olarak belirlenmiş ve bu değişkenin Endüstri 4.0 bileşenleriyle ilişkisi, daha önce yapılmamış bir şekilde nicel bir regresyon modeli aracılığıyla incelenmiştir. Bağımsız değişkenler olarak IoT kullanımı, robotik otomasyon ve dijital üretim gibi Endüstri 4.0'ın temel unsurları dikkate alınmıştır. Bu bağlamda, çalışmada ele alınan değişkenler, daha önceki literatürde aynı anda analiz edilmemiş ve bu unsurlar arasındaki ilişkiler sistematik bir biçimde incelenmemiştir. Çalışmanın bir diğer önemli özelliği ise, kullanılan verilerin gerçek dünya koşullarından alınmış olmasıdır. Bu sayede, teorik modellere dayalı öngörülerin ötesine geçilerek, Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi üzerindeki somut etkileri daha belirgin bir şekilde ortaya konmuştur. Bu nedenle, çalışmanın bulguları, literatürdeki önceki araştırmalarla karşılaştırıldığında daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar sunmakta, böylece teorik bilgilerden ziyade pratik bir bakış açısı geliştirmektedir.

Önceki Çalışmalar

Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi, özellikle sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerine ulaşmada önemli rol oynayan iki kavramdır. Bu kavramlar arasındaki ilişkiyi anlamak, şirketlerin üretim süreçlerini iyileştirmeleri, kaynakları daha verimli kullanmaları ve çevresel etkilerini azaltmaları açısından kritik öneme sahiptir.

Endüstri 4.0, dijitalleşme ve otomasyon teknolojileri kullanarak üretim süreçlerini daha verimli ve esnek hale getiren bir dizi teknolojiyi ifade etmektedir. Bu teknolojiler, özellikle büyük veri, IoT (Nesnelerin İnterneti), yapay zeka, robotik sistemler ve 3D yazıcıları içerir (Hermann ve ark., 2016). Bu uygulamalar, kaynakları daha verimli kullanmak, üretim süreçlerini hızlandırmak ve atıkları minimize etmek için güçlü araçlar sunmaktadır. Endüstri 4.0'ın, döngüsel ekonomi ile entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirliği artırmaya yönelik yeni fırsatlar sunmaktadır (Xu ve ark., 2018).

Döngüsel ekonomi, ürünlerin ömrünü uzatarak, atıkları minimize ederek ve geri dönüşümü teşvik ederek doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını hedefleyen bir ekonomik modeldir. Endüstri 4.0 teknolojileri, döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanmasında önemli bir rol oynayabilir. Akıllı fabrikalar, veri analitiği, IoT ve sensör teknolojileri, ürünlerin yeniden kullanımını ve geri dönüşümünü daha verimli hale getirebilir (Lacy ve Rutqvist, 2016; Geissdoerfer ve ark., 2017).

Endüstri 4.0, döngüsel ekonomi uygulamaları için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinde daha fazla geri dönüşüm, yeniden kullanım ve kaynak verimliliği sağlamak için kullanılabilir. Özellikle veri toplama, sensör tabanlı sistemler ve akıllı üretim sistemleri, atık yönetimini iyileştirerek, döngüsel ekonomi hedeflerine katkıda bulunabilir (Bocken ve ark., 2016). Ayrıca, 3D yazıcılar gibi teknolojiler, ürünlerin tamirini ve yeniden kullanılmasını kolaylaştırarak döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir şekilde çalışabilir denmiştir (Gebhardt ve Kuehn, 2019).

Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkisi, şirketin büyüklüğüne göre değişkenlik gösterebilir. Büyük şirketler, bu teknolojileri daha kolay bir şekilde entegre edebilirken, küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) sınırlı kaynaklar ve bütçeler nedeniyle bu teknolojilere adapte olmakta zorlanabilirler. Bununla birlikte, KOBİ'ler, Endüstri 4.0 teknolojilerini daha uygun maliyetlerle uygulayarak döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşma fırsatlarına sahip olabilmektedir. (Bauer ve Thiel, 2015; Lewandowski, 2016). KOBİ'lerin Endüstri 4.0 teknolojilerini benimseme oranı genellikle daha düşüktür, ancak bu işletmeler için bu teknolojiler, döngüsel ekonomi stratejilerini daha düşük maliyetlerle gerçekleştirme fırsatı sunabilmektedir. KOBİ'ler, bu teknolojilerden faydalanarak kaynak kullanımını daha verimli hale getirebilir, atıkları azaltabilir ve sürdürülebilir üretim uygulamaları geliştirebilmektedir (Pereira ve ark., 2020).

Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi uygulamaları üzerindeki etkisi, özellikle veri analitiği, IoT ve sensörler gibi teknolojilerle daha verimli hale gelmiştir. Bu teknolojiler, döngüsel ekonomi ilkelerinin daha etkin uygulanabilmesini sağlar ve sürdürülebilir üretim

süreçlerinin tasarımına katkıda bulunur. Akıllı üretim sistemleri, kaynakları daha verimli kullanmaya ve atıkları minimize etmeye yönelik önemli fırsatlar sunmaktadır (Xu ve Yu, 2019). Endüstri 4.0 teknolojilerinin Avrupa'daki KOBİ'lerde döngüsel ekonomi uygulamalarını nasıl desteklediğini araştıran bir çalışma, dijital dönüşümün yeşil dönüşümle uyumlu olduğunu ve çevresel stratejilerin güçlendirilmesinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur (Findik ve ark., 2023). Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın döngüsel ekonomi uygulamalarıyla entegrasyonunun sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır. Türkiye'deki ihracatçı sanayiciler için Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi uygulamalarını ölçen bir ölçek geliştirmiştir. Çalışma, "sürdürülebilir lojistik", "akıllı üretim operasyonları" ve "dönüşümün önündeki engeller" gibi alt boyutlarla döngüsel ekonomi uygulamalarının etkilerini incelemektedir. Elde edilen bulgular, Endüstri 4.0'ın döngüsel ekonomi stratejilerini daha verimli ve ölçeklenebilir hale getirdiğini göstermektedir (Karakadılar, 2023). Asansör sektöründe Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi ile entegrasyonunu ele almıştır. Bu çalışmada, her iki yaklaşımın sürdürülebilir işletme performansına olan katkıları analiz edilmiştir. Sonuçlar, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi uygulamalarını daha verimli hale getirdiğini ve işletmelerin çevresel ayak izlerini azaltarak ekonomik fayda sağladığını ortaya koymuştur (Köksal, 2024).

Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişki, günümüzde hala tam olarak anlaşılmamış bir konudur. Çeşitli araştırmalar, bu iki kavramın birbirini nasıl tamamladığına dair önemli bulgular sunmuş olsa da, şirketlerin büyüklüğü, sektörü ve coğrafi konumu gibi faktörlerin bu ilişkideki rolünü daha derinlemesine inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Bu alandaki daha fazla araştırma, Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi hedeflerine nasıl daha iyi hizmet edebileceğini ve şirketlerin bu hedeflere ulaşmasını nasıl kolaylaştırabileceğini anlamamıza yardımcı olacaktır (Stahel, 2016).

Materyal ve Metot

Döngüsel ekonomi ile Endüstri 4.0 arasındaki ilişkiyi çoklu regresyon analizi kullanarak matematiksel olarak çözmek için, öncelikle değişkenler arasındaki ilişki modellenmiştir. Çoklu regresyon analizi, bir bağımlı değişkenin (döngüsel ekonomi göstergesi) birden fazla bağımsız değişken (Endüstri 4.0 bileşenleri) tarafından nasıl etkilendiğini anlamaya olanak tanır.

Regresyon analizi iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi incelemeye yarayan istatistiksel bir tekniktir. k kategorik değeri temsil eden çok katmanlı bir değişken olarak tanımlanırken, $(k-1)$ değişkenleri çok yönlü değişken tarafından temsil edilen grupları temsil etmektedir. Doğrusal regresyon, iki değişken arasındaki ilişkiye dayanarak birinin değerini

diğerinden tahmin etmeyi sağlayan bir model oluşturmayı içermektedir. Denklem 1’de lineer regresyonun basit doğrusal denklemi verilmiştir. (Cohen ve ark., 2003; Darlington ve Hayes, 2017).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + E \quad (1)$$

Değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğunda, R^2 değerinin 1’e yaklaşması; bağımlı değişkendeki değişimin büyük bir kısmının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını gösterir. R^2 , 0 ile 1 arasında bir değer alır ve modele dâhil edilen değişkenlerin açıklayıcılık gücünü gösterir. Denklemde SST (Toplam Kareler Toplamı), bağımlı değişkenin modelden bağımsız olarak ne kadar değişkenlik gösterdiğini ifade ederken SSE (Hata Kareler Toplamı), modelin açıklayamadığı kısmı göstermektedir (Denklem 2). (Kutner ve ark., 2024).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2)$$

şirket Büyüklüğünü İçeren Geliştirilmiş Model

Ayrıca şirket büyüklüğünün, Endüstri 4.0 uygulamaları ve döngüsel ekonomi arasındaki ilişkiyi etkileyebileceği göz önünde bulundurulduğunda, büyüklük değişkeni (Z) modele dahil edilmiştir. Bu durumda, şirket büyüklüğünün etkisini;

1.Temel Model

Araştırmada, çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılarak, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkisi istatistiksel olarak modellenmiştir. Endüstri 4.0’ın döngüsel ekonomi performansı üzerindeki etkisini incelemek için oluşturulan temel regresyon modeli Denklem 3’deki gibi ifade edilebilir:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + E_i \quad (3)$$

Burada:

y_i : i. şirketi için döngüsel ekonomi

x_i : i. şirketi için Endüstri 4.0 uygulamaları

β_0 : Sabit terim (kesim noktası)

β_1 : Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi üzerindeki etkisini ölçen katsayı

E_i : Hata terimi

2. Model Kurulumu

Çoklu regresyon modelinde, döngüsel ekonomi ile ilgili bağımlı değişken döngüsel ekonomi endeksi olarak seçilmiştir. Endüstri 4.0'ın çeşitli bağımsız değişkenleri arasından ise sıklıkla kullanılan IoT kullanımı, robotik otomasyon, dijital üretim üzerinden analiz yapılmıştır.

Çoklu regresyon modeli Denklem (4)'deki gibi ifade edilmiştir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \epsilon \quad (4)$$

Burada:

Y = Bağımlı değişken (döngüsel ekonomi endeksi)

β_0 = Sabit terim

X_1, X_2, X_3 = Bağımsız değişkenler (IoT kullanımı, robotik otomasyon, dijital üretim),

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = Her bir bağımsız değişkenin regresyon katsayıları

ϵ = Hata terimi

kontrol eden regresyon modeli Denklem 5'deki gibi yazılabilir:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 Z_i + E_i \quad (5)$$

Burada:

Z_i : i. şirket için şirket büyüklüğü

β_2 : Şirket büyüklüğünün döngüsel ekonomi üzerindeki etkisini ölçen katsayı

Bu model ile de ayrıca, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi hedeflerine katkısını ve şirket büyüklüğünün bu ilişkiyi nasıl şekillendirdiğini anlamaya yardımcı olmak amaçlanmıştır. β_1 katsayısı, Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi performansı üzerindeki doğrudan etkisini temsil ederken, β_2 katsayısı şirket büyüklüğünün bu ilişki üzerindeki dolaylı etkisini gösterecektir. Ekstra sunulan bu model ile elde edilen sonuçlar, şirket büyüklüğünün Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi performansı üzerindeki etkisini nasıl değiştirdiğini, küçük ve büyük şirketler arasındaki farklılıkları ortaya koyabilir.

3. Veri Toplama ve Analiz

Döngüsel ekonomi uygulamalarını ölçmeye yönelik nicel analizlerde kullanılacak veriler, çeşitli ulusal ve uluslararası kaynaklardan temin edilmiştir. Ulusal düzeyde Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Uluslararası düzeyde ise Dünya Bankası'nın sürdürülebilirlik verileri gibi bağımsız ve denetimli veri sağlayıcılarının yayınladığı istatistikler kullanılmıştır. Toplam 230 veri SPSS paket program ile analizler edilmiştir.

Döngüsel ekonomi endeksi (Y): Yıllık geri dönüşüm oranları, ton bazında.

IoT kullanımı (X_1): Fabrikalarda IoT cihazlarının kullanım oranı (% olarak).

Robotik otomasyon (X_2): Robotik otomasyon kullanılan üretim süreçlerinin oranı (% olarak).

Dijital üretim (X_3): Dijital üretim süreçlerinin kullanıldığı oran (% olarak).

Belirlenen bağımsız değişkenlerle çoklu regresyon analizi gerçekleştirilerek regresyon katsayıları hesaplanmıştır.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, Endüstri 4.0 teknolojilerinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yapılan regresyon analizinin bulgularına dayanarak, çeşitli önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Analiz, her bir teknolojinin döngüsel ekonomi hedeflerine katkı sağlama derecesini farklı şekillerde değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle IoT (Nesnelerin İnterneti) ve dijital üretimin döngüsel ekonomi süreçlerindeki rolünü vurgulamakta, robotik otomasyonun etkisini ise daha sınırlı bir şekilde ele almaktadır.

Regresyon analizi sonucunda elde edilen modelin çıktıları Denklem 6'ya göre değerlendirilmiştir.

$$\text{Döngüsel ekonomi endeksi (Yi)} = 10 + 0.3 (\text{IoT Kullanımı}) + 0.2 (\text{Robotik Otomasyon}) + 0.4 (\text{Dijital Üretim}) \quad (6)$$

β_0 (Sabit Terim) =10, IoT, robotik otomasyon ve dijital üretim sıfır olduğu durumda geri dönüşüm oranı 10'dur.

$\beta_1=0.3$: IoT kullanımının her bir birim artışı, geri dönüşüm oranını 0.3 artırmaktadır.

$\beta_2=0.2$: Robotik otomasyonun her bir birim artışı, geri dönüşüm oranını 0.2 artırmaktadır.

$\beta_3=0.4$: Dijital üretim süreçlerinin her bir birim artışı, geri dönüşüm oranını 0.4 artırmaktadır.

Aynı zamanda hesaplanan $R^2 = 0.70$ olarak bulunmuştur. Bu değer; elde edilen modelin değişkenleri (IoT kullanımı, Robotik Otomasyon ve Dijital Üretim) döngüsel ekonomi endeksindeki varyansın %70'ini açıkladığını ifade etmektedir. R^2 'nin 0.70 olması, bağımsız değişkenler ile döngüsel ekonomi uygulamaları arasında güçlü bir ilişki olduğunu, modelin veriye yüksek derecede uyum sağladığını ve tahmin kapasitesinin tatmin edici düzeyde olduğunu göstermektedir.

Tablo 1, modelden elde edilen regresyon katsayılarını, bu katsayıların anlamlılık düzeylerini ve ilişkilerin yönünü göstermektedir.

Tablo 1. Modelden elde edilen regresyon katsayıları

Değişken	Katsayı (β_i)	p-değeri	R ²
IoT Kullanımı	0,30	0,003	0,70
Robotik Otomasyon	0,20	0,15	
Dijital Üretim Süreci	0,40	0,02	

Çalışmada, IoT kullanımı değişkeni $p < 0.05$ ve $\beta_1 = 0.30$ olarak elde edilerek döngüsel ekonomi üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, IoT'nin döngüsel süreçlerdeki etkinliğini artırmada önemli bir araç olduğunu göstermektedir. IoT, üretim süreçlerinin her aşamasında veri toplama ve analiz yapma kapasitesine sahip olduğu için, döngüsel ekonomi ilkelerini uygulamada kilit rol oynamaktadır. Özellikle, IoT'nin karar destek sistemleri ve süreç optimizasyonu yoluyla kaynak verimliliği sağlayarak, atıkların ve enerji tüketiminin azaltılmasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, IoT'nin yalnızca üretim süreçlerini iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda tedarik zinciri boyunca atıkların yönetilmesinde de etkin bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir. Bu bulgu, IoT'nin döngüsel ekonomi çerçevesinde daha geniş bir etki alanına sahip olduğunu ortaya koymakta ve literatürde bu teknolojinin potansiyelinin henüz tam olarak keşfedilmediğine işaret etmektedir.

Dijital üretim sürecinin döngüsel ekonomi üzerindeki etkisinin en güçlü olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizde dijital üretim değişkeninin döngüsel ekonomi performansı üzerinde hem istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.05$) hem de pozitif yönde güçlü bir etkisi olduğu bulunmuştur. Dijital üretim, özellikle 3D baskı, eklemeli üretim ve dijital ikizler gibi ileri üretim teknolojilerinin kullanımıyla kaynak tüketimini azaltma ve malzeme israfını minimize etme noktasında büyük bir potansiyele sahiptir. Bu tür teknolojiler, üretim süreçlerini daha esnek hale getirir, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımını artırır ve daha verimli ürün tasarımlarına olanak tanır. Ayrıca, dijital üretim, daha az enerji tüketimi ile daha hızlı üretim süreçleri sunarak çevresel etkiyi azaltabilmektedir. Bu durum, Endüstri 4.0'ın dijital üretim uygulamalarının döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmada nasıl güçlü bir araç olduğunu gözler önüne sermektedir. Dijital üretimin bu güçlü etkisi, sürdürülebilir üretim sistemlerinin tasarımında gelecekteki çalışmalar için önemli bir rehber olabilecek niteliktedir.

Diğer yandan, robotik otomasyonun döngüsel ekonomi performansı üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0.05$). Bu sonuç, robotik otomasyonun, diğer Endüstri 4.0 teknolojileriyle kıyaslandığında, döngüsel ekonomi üzerinde doğrudan ve güçlü bir etki yaratmadığını göstermektedir. Ancak, robotik otomasyonun faydaları, yalnızca

verimlilik artışı ve maliyet düşüşü ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda süreçlerdeki hataları azaltarak kaliteyi artırmak gibi dolaylı etkiler de yaratmaktadır. Dolayısıyla, robotik otomasyonun döngüsel ekonomi bağlamındaki etkisi, daha çok dolaylı olabilir veya bu teknolojinin etkinliğini artıran diğer unsurlarla, örneğin IoT veya dijital üretimle entegrasyonu gerektirebilir. Bu bulgu, robotik otomasyonun yalnızca kendi başına döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşılmasında yeterli olmadığını, ancak diğer ileri teknolojilerle birleşerek daha büyük bir etki yaratabileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, robotik otomasyonun spesifik uygulama alanlarında, özellikle üretim süreçlerinde yerinde atık azaltma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm uygulamaları için büyük bir potansiyel taşıdığı unutulmamalıdır.

Bu çalışmanın bulguları, Endüstri 4.0 teknolojilerinin, özellikle IoT ve dijital üretim uygulamalarının, döngüsel ekonomi çerçevesinde sürdürülebilir üretim süreçlerinin tasarlanmasında kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır. IoT ve dijital üretim, döngüsel ekonomi ilkelerinin uygulanmasında önemli fırsatlar sunmakta, kaynak verimliliğini artırmakta ve atıkların azaltılmasında etkin çözümler üretmektedir. Bu iki teknoloji, endüstriyel dönüşüm sürecinde döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmak için anahtar bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Dijital üretim süreçlerinin doğası gereği daha az malzeme ve enerji tüketimi sağladığı göz önünde bulundurulduğunda, bu teknolojilerin döngüsel ekonomiye olan katkısının oldukça güçlü olduğu söylenebilir. Ancak, robotik otomasyonun bu bağlamda doğrudan bir katkı sağlamadığı, bunun yerine daha dolaylı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Gelecekteki araştırmalar, robotik otomasyonun döngüsel ekonomi üzerindeki potansiyel etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde incelemeli ve özellikle bu teknolojinin diğer Endüstri 4.0 bileşenleriyle entegrasyonunun nasıl döngüsel süreçlere katkı sağladığını araştırmalıdır. Ayrıca, farklı sektörlerde ve üretim süreçlerinde Endüstri 4.0 uygulamalarının döngüsel ekonomi üzerindeki etkilerini karşılaştıran çoklu vaka çalışmaları yapılması, bu alandaki bilgi birikimini artırabilir. Sonuç olarak, bu çalışma, Endüstri 4.0'ın döngüsel ekonomi uygulamalarına olan katkılarını ortaya koyarak, sürdürülebilir üretim sistemlerine geçiş için bir temel oluşturabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

Bauer JM, Thiel G., 2015. Barriers to the adoption of Industry 4.0 technologies in SMEs. Proceedings of the 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 1057–1064.

Bocken NMP, Short SW, Rana P, Evans S., 2016. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. Journal of Cleaner Production, 65: 42–56.

Bocken NMP, Short SW., 2017. Business models for a circular economy: Opportunities and challenges. Journal of Cleaner Production, 140: 57–65.

Cohen J., Cohen P., West SG., Aiken LS., 2003. Applied multiple regression/correlation Analysis for the Behavioral Sciences. 3rd ed. Routledge, New York.

Cucchiella F, Gastaldi M., 2018. Industry 4.0 and circular economy: Opportunities for Sustainable Business Development. Sustainability, 10(10): 3821.

Eurostat., 2024. Statistics explained: Circular economy and digital economy. <https://ec.europa.eu/eurostat>. Alınma tarihi: 22.04.2025.

Findik D, Tirgil A, Ozbugday FC., 2023. Industry 4.0 as an enabler of circular economy practices: Evidence from European SMEs. Journal of Cleaner Production, 377: 137281.

Gebhardt A, Kuehn S., 2019. 3D Printing: A new business model for the circular economy. Proceedings of the 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 1057–1064.

Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken NMP, Hultink EJ., 2017. The circular economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143: 757–768.

Hermann M, Pentek T, Otto B., 2016. Design principles for industrie 4.0 scenarios: A literature review. Working paper. Technische Universität Dortmund.

Karakadılar İS., 2023. Türkiye’deki ihracatçı sanayicilerin Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi uygulamalarına yönelik bir ölçek geliştirme çalışması. İktisadi İdari ve Siyasal Araştırmalar Dergisi, 8(2): 104-121.

Köksal M., 2024. Endüstri 4.0 teknolojileri ve döngüsel ekonominin sürdürülebilir işletme performansına etkisi: Asansör sektöründe uygulama. Verimlilik Dergisi, 73(2): 78-92.

Kutner MH, Nachtsheim CJ, Neter J., 2004. Applied linear regression models. Technometrics, 26(4).

Lacy P, Rutqvist J., 2016. Waste to wealth: The Circular Economy Advantage. Palgrave Macmillan.

Lewandowski M., 2016. Designing the business models for circular economy- Towards the conceptual framework. Sustainability, 8(1): 43.

Pereira AF, Silva DF, Lima CF., 2020. Circular economy and industry 4.0: Opportunities and Challenges. *Sustainability*, 12(1): 1–18.

Stahel WR., 2016. *The circular economy: A User's Guide*. Routledge.

Statista., 2024. Industry 4.0 and circular economy statistics. <https://www.statista.com>.
Alınma tarihi: 22.04.2025.

Xu LD, He W, Li S., 2018. Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4): 2233–2243.

Xu X, Yu S., 2019. Smart manufacturing and circular economy: A systematic review. *Journal of Manufacturing Processes*, 41: 1–12.

Kesirli İntegro-Diferansiyel Denklemler için Picard'ın Üç Adımlı İterasyonu Algoritması ile Yakınsaklık ve Veri Bağıllığı

Lale CONA^{1*}

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Matematik Mühendisliği, Gümüşhane, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0002-2744-1960>

*Sorumlu yazar: lalecona@gumushane.edu.tr

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi:29.04.2025

Kabul tarihi:14.07.2025

Online Yayınlanma:12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Veri bağıllığı

Kesir mertbe diferansiyel denklem

Sabit nokta teorisi

Picard'ın üç adımlı iterasyonu

Tam sayı olmayan mertebeden türev ve integralleri içeren kesirli hesaplama, bilim ve mühendislikte gerçek dünya problemlerini modellemede yaygın olarak kullanılır. Bu çalışma, Picard'ın üç adımlı iterasyon algoritmasını kullanarak kesirli integro-diferansiyel denklemleri çözmeye odaklanmaktadır. Picard'ın üç adımlı iterasyon algoritmasını çözümlere yaklaşmak için uyguluyoruz ve güçlü bir şekilde yakınsadığını gösteriyoruz. Ayrıca, çözümün veri bağımlılığını da araştırıyoruz. Bu nedenle, Riemann-Liouville kesirli integro-diferansiyel denkleminin çözümüne yaklaşmak ve veri bağımlılığı için yeni sonuçlar sunuyoruz.

Convergence and Data Dependence for Fractional Integro-Differential Equations with Picard's Three-Step Iteration Algorithm

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 29.04.2025

Accepted: 14.07.2025

Available online:12.09.2025

Keywords:

Data dependency

Fractional order differential equation

Fixed point theory

Picard's three-step iteration

Fractional calculus, which involves derivatives and integrals of non-integer order, is widely used in modeling real-world problems in science and engineering. This study focuses on solving fractional integro-differential equations using Picard's three-step iteration algorithm. We apply the Picard's three-step iteration algorithm to approximate solutions and show that it converges strongly. We also investigate the data dependence of the solution. Therefore, we present new results for approximating the solution of the Riemann-Liouville fractional integro-differential equation and for data dependence.

To Cite: Cona L., 2025. Kesirli integro-diferansiyel denklemler için Picard'ın üç adımlı iterasyon algoritması ile yakınsaklık ve veri bağıllığı. Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(2): 278-293.

Giriş

Kesirli analiz, gerçel ya da karmaşık mertebeden türev ve integralleri inceleyen bir matematik dalıdır. Tam sayı olmayan türevler içeren diferansiyel denklemler, pek çok fiziksel olgunun matematiksel modellemesinde temel rol oynar. Dolayısıyla kesirli hesaplama, yalnızca matematiksel açıdan değil; fizik, mühendislik, biyoloji ve finans gibi disiplinler için de

vazgeçilmezdir (Samko ve ark., 1993; Podlubny, 1999; Petras, 2011; Ashyralyev, 2009; 2013a; Ashyralyev ve ark., 2014). Kesirli hesaplamanın öne çıkan bir özelliği, çeşitli kesirli operatörlerin farklı dinamikleri daha gerçekçi biçimde modelleyebilmesidir. Uygulamaya için en iyi operatörün seçilmesi gereksinimi, yeni kesirli operatörlerin geliştirilmesine ve model doğruluğunun sürekli artmasına neden olmuştur (Ashyralyev, 2013b; Baleanu ve ark., 2013; Caputo ve Fabrizio, 2015; Atangana ve Baleanu, 2016; Yang ve ark., 2016).

Öte yandan, sabit nokta teorisi, özellikle diferansiyel, integral ve kısmi diferansiyel denklemleri çözmede, doğrusal olmayan analizdeki en güçlü araçlardan biridir. Çok sayıda matematiksel uygulamada temel bir rol oynar. Sabit nokta teoremleri, özellikle başlangıç değer ve sınır değer problemlerinde, kesirli diferansiyel denklemler için çözümlerin varlığı ve tekliği konusunda önemli bir yöntemdir. Ancak, bu denklemler için kesin analitik çözümler elde etmek genellikle zordur. Kesirli diferansiyel denklemleri çözmek için sayısal ve yaklaşık yöntemler üzerinde kapsamlı araştırmalar yürütülmüştür (Baleanu ve ark. 2013; Abbas ve ark. 2022; Cona ve Bal, 2023; Okeke ve ark. 2023; Zivlaei ve Mingarelli, 2024).

Sabit nokta teorisindeki gelişmelere paralel olarak, çok sayıda daralma tipi dönüşüm ortaya kondu. Lipschitzian dönüşümü, daralma dönüşümler, genişlemeyen dönüşümler, sözde daralma dönüşümü, yarı daralma ve zayıf daralma dönüşümü bunlardan bazılarıdır (Banach, 1922; Ishikawa, 1974; Weng, 1991; Gürsoy, 2016; Karakaya ve ark., 2017). Ayrıca, bir çok iterasyon yöntemleri geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır. En dikkat çekici iterasyon yöntemlerinden bazıları Mann iterasyon yöntemi (Mann, 1953), Krasnosel'skii iterasyon yöntemi (Krasnosel'skii, 1955), Kirk iterasyon yöntemi (Kirk, 1971), Ishikawa iterasyon yöntemi (Ishikawa, 1974), Noor iterasyon yöntemi (Noor, 2000), S iterasyon yöntemi (Atalan ve ark., 2021), üç adımlı iterasyon yöntemi (Karakaya ve ark., 2017) ve yakın zamanda tanımlanan Picard'ın üç adımlı iterasyon yöntemi (Ali ve ark., 2021). Bu yöntemlere ek olarak, bu yaklaşımları birleştiren hibrit iterasyon yöntemlerinin oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bu hibrit yöntemlerden bazıları Kirk-Noor iterasyon yöntemi, Kirk-Ishikawa iterasyon yöntemi Kirk-Mann iterasyon yöntemi, Picard-Mann iterasyon yöntemi, Mann-Picard iterasyon yöntemi, Kirk-MP iterasyon yöntemidir (Rhoades ve Soltuz, 2004; Phuengrattana ve Suantai, 2011; Khan, 2013; Peter ve ark., 2018).

Ayrıca, belirli bir dönüşüm kullanılarak oluşturulan bir iterasyon yönteminde, yaklaşım operatörü olarak bilinen alternatif bir dönüşüm de uygulanabilir. Yaklaşım operatörünün sabit noktası orijinal dönüşümün sabit noktasından farklı olduğundan, ikisi arasında tutarsızlıklar ortaya çıkabilir. Literatürde kapsamlı bir şekilde incelenen veri bağımlılığı kavramı, bu farkın kapsamını

ve nasıl ölçülebileceğini ele alır (Oyedepo ve ark., 2019; Peter, 2020; Adebisi ve ark., 2021; Uwaheren ve ark., 2021; Atalan ve Maldar, 2023; Cona ve Şengul, 2023, 2024; Cona, 2024).

Çalışmanın genel yapısı şu şekildedir: Çalışma üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk olarak literatür hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ön bilgilerde çalışmamız için önemli olan temel kavramlar sunulmuştur. Bulgularda ise A bir sabit ve $f \in (C[0, A] \times \mathbb{R}, \mathbb{R})$ olmak üzere integro-diferansiyel denklem için aşağıdaki başlangıç değer problemi göz önüne alınacaktır

$$\begin{cases} \frac{d^2 u(s)}{ds^2} + I_{a^+}^\alpha u(s) = f(s, u(s), u'(s)), \\ 0 < s < A, \quad 0 < \alpha < 1, \\ u(s) = 0, \quad u'(s) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

İlk olarak, (1) başlangıç değer problemlerinin çözümüne, Ali ve diğerleri tarafından tanıtılan (Ali ve ark., 2021) Picard'ın üç adımlı algoritmasını kullanarak yaklaşılmıştır. Daha sonra, dikkate alınan denklemlerin veri bağımlılığı elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen bulgular için sayısal örnek verilmiştir. Çalışma son olarak bulgularımız ve potansiyel gelecekteki araştırma yönlerinin tartışılmasıyla sonlanmaktadır.

Ön Bilgiler

Çalışma boyunca kullanılan bazı temel tanımları ve ön bilgileri sunuyoruz.

Tanım 2.1. $u(t) \in C([a, b])$ ve $a < t < b$, $\alpha \in (0, \infty)$ olsun. α . mertebeden Riemann-Liouville kesirli integrali $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$, ($\alpha > 0$) olmak üzere

$$I_{a^+}^\alpha u(t) := \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^t \frac{u(s)}{(t-s)^{1-\alpha}} ds,$$

olarak tanımlıdır.

$\alpha \in (0, 1)$ için α . mertebeden Riemann-Liouville kesirli türevi ise

$$D_{a^+}^\alpha u(t) := \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_a^t \frac{u(s)}{(t-s)^\alpha} ds,$$

olarak tanımlıdır (Samko ve ark., 1993).

Tanım 2.2. $[a, b]$ kapalı aralığı üzerinde $d: C^{(1)}[a, b] \rightarrow C^{(1)}[a, b]$,

$$d(u, v) = \max_{s \in [0, A]} |u(s) - v(s)| + \max_{s \in [0, A]} |u'(s) - v'(s)|,$$

olarak tanımlı d bir metriktir. Aynı zamanda $C^{(1)}[a, b] = (C^{(1)}[a, b], d)$ bir tam metrik uzaydır (Kreyszig, 1978).

Tanım 2.3. (E, d) bir metrik uzay ve $T: E \rightarrow E$ bir dönüşüm olsun. Eğer her $u, v \in E$ için $d(Tu, Tv) \leq Ld(u, v)$ olacak şekilde bir $L > 0$ sayısı varsa T dönüşümüne bir Lipschitzian dönüşümü denir (Berinde, 2007).

Tanım 2.4. (E, d) bir metrik uzay ve $T: E \rightarrow E$ bir Lipschitzian dönüşüm olsun. Eğer her $u, v \in E$ için $d(Tu, Tv) \leq \lambda d(u, v)$ olacak şekilde bir $\lambda \in (0, 1)$ sayısı varsa T dönüşümüne bir daralma dönüşümü denir. λ ya ise daralma oranı adı verilir (Berinde, 2007).

Bu tanım E nin normlu uzay olması durumunda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir: $\lambda \in (0, 1)$ olmak üzere

$$\|Tu - Tv\| \leq \lambda \|u - v\|,$$

ise T dönüşümüne E normlu uzayında bir daralma dönüşümü denir (Berinde, 2007).

Şimdi Banach sabit nokta teoremini ifade edelim (Banach, 1922).

Teorem 2.1. Eğer (E, d) bir tam metrik uzay ve $T: E \rightarrow E$ bir daralma dönüşümü ise,

- i) T nin yalnızca bir sabit noktası $u \in E$ vardır.
- ii) Bir $u_0 \in E$ için $(T^n u_0)$ iterasyon dizisi (yani her $n \in \mathbb{N}$ için $u_n = Tu_{n-1}$ olarak tanımlı (u_n) iterasyon dizisi) T nin bir tek sabit noktasına yakınsar.

Çalışmamızda Picard'ın üç adımlı iterasyon algoritmasını kullanmamızın sebebi, bu algoritmanın Picard, Mann, Ishikawa, Noor, Picard-S, SP, S, CR, M* gibi birçok iterasyon algoritmasından daha hızlı olduğunun kanıtlanmış olmasıdır. Şimdi bu algoritmanın tanımını ifade edelim (Ali ve ark., 2021).

Tanım 2.5. E bir metrik uzay veya Banach uzay, $T: E \rightarrow E$ bir operator olsun. Tahmini başlangıç noktası $u_0 \in E$ ve $n \in \mathbb{Z}^+$ için

$$\begin{cases} u_{n+1} = Tv_n \\ v_n = Tw_n \\ w_n = Tu_n \end{cases} \quad (2)$$

olarak tanımlı iterasyon, Picard'ın üç adımlı iterasyon yöntemi olarak adlandırılır.

Teorem 2.2. f fonksiyonu $D = \{(s, u, v): s \in [0, A]\} \subseteq \mathbb{R}^3$ kümesi üzerinde tanımlı sürekli ve sınırlı bir fonksiyon olsun. (Burada f sınırlı ise her $s \in D$ için $|f(s, u, v)| \leq k$ olacak şekilde $k > 0$ sayısı mevcuttur.) Ayrıca, f fonksiyonu D üzerinde ikinci ve üçüncü argümanlara göre Lipschitz koşulunu sağlasın. Yani, keyfi $(s, u, z), (s, v, w) \in D$ için

$$|f(s, u, z) - f(s, v, w)| \leq L(|u - v| + |z - w|). \quad (3)$$

olacak şekilde pozitif bir L sabiti vardır. Kabul edelim ki $h(\alpha, A, L) = \frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} + L \frac{A^2}{2}$ olmak üzere

$$h(\alpha, A, L) < 1, \quad (4)$$

olsun. Bu taktirde (1) başlangıç değer probleminin bir tek $u \in C^{(1)}[0, A]$ çözümü vardır (Cona

ve Bal, 2023).

Tanım 2.6. $T_1, T_2: K \rightarrow K$ bir operator. Eğer her $u \in K$ için $\|T_1 u - T_2 v\| \leq \varepsilon$ olacak şekilde $\varepsilon > 0$ sabiti varsa bu taktirde T_2 operatörüne T_1 operatörünün yaklaşım operatörü adı verilir (Şoltuz ve Grosan, 2008).

Lemma 2.1. $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ negatif olmayan reel sayıların bir dizisi olsun. Ayrıca, $\mu_n \in (0,1)$, $\sum_{n=0}^{\infty} \mu_n = \infty$ ve $\gamma_n \geq 0$ olsun. Her $n \geq n_0$ için $n_0 \in \mathbb{N}$ vardır öyleki

$$a_{n+1} \leq (1 - \mu_n)a_n + \mu_n \gamma_n ,$$

eşitsizliği sağlanır. Bu taktirde, aşağıdaki eşitsizlikte doğrudur:

$$0 \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \gamma_n ,$$

(Şoltuz ve Grosan, 2008).

Bulgular

Teorem 3.1. $T: (C^{(1)}[0, A], \|\cdot\|) \rightarrow (C^{(1)}[0, A], \|\cdot\|)$ bir operatör olsun. Bu durumda, Denklem (1) ile verilen integro-differansiyel denkleminin bir tek $u^* \in C[0, A]$ çözümü vardır ve Denklem (2) ile verilen iterasyon algoritmasından elde edilen $\{u_n\}_{n=0}^{\infty}$ dizisi bu u^* çözümüne yakınsar.

İspat. (1) integro-diferansiyel denklemin her iki tarafının integrali alınırsa,

$$u(s) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r f(q, u(q), u'(q)) dq dr , \quad (5)$$

denklemini elde ederiz. $T: C^{(1)}[0, A] \rightarrow C^{(1)}[0, A]$ operatörü, (5) integral denklemine denk olarak f, D dikdörtgensel bölgesi üzerinde sürekli bir fonksiyon olmak üzere $u = Tu$ olduğundan

$$Tu(s) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r f(q, u(q), u'(q)) dq dr \quad (6)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem (2) ile verilen ve $T: C^{(1)}[0, A] \rightarrow C^{(1)}[0, A]$ operatörü ile oluşturulan iterasyon algoritmasından elde edilen $\{u_n\}_{n=0}^{\infty}$ dizisini göz önüne alalım. $n \rightarrow \infty$ için $u_n \rightarrow u_*$ olduğu gösterilecektir. Teorem 2.2 ve Denklem (2) kullanılarak gerekli düzenlemeler yapıldığında

$$\begin{aligned} |u_{n+1}(t) - u_*(t)| &= |Tv_n(t) - Tu_*(t)| \\ &= \left| -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} v_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r f(q, v_n(q), v'_n(q)) dq dr \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u_*(t) dt \right) dq dr - \int_0^s \int_0^r f(q, u_*(q), u'_*(q)) dq dr \right| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \int_0^q (q-t)^{\alpha-1} |v_n(t) - u_*(t)| dt dq dr \\
&\quad + \int_0^s \int_0^r |f(q, v_n(q), v'_n(q)) - f(q, u_*(q), u'_*(q))| dq dr \\
&\leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \|v_n - u^*\|_\infty \int_0^s \int_0^r \int_0^q (q-t)^{\alpha-1} dt dq dr \\
&\quad + \int_0^s \int_0^r L(|v_n(q) - u_*(q)| + |v'_n(q) - u'_*(q)|) dq dr \\
&\leq \left(\frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} + L \frac{A^2}{2} \right) \|v_n - u^*\|
\end{aligned}$$

olur. $h(\alpha, A, L) = \frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} + L \frac{A^2}{2}$ olduğundan,

$$\|u_{n+1} - u_*\| \leq h \|v_n - u_*\|, \quad (7)$$

eşitsizliği elde edilir. Gerekli hesaplamalar yapılarak aşağıdaki (8) ve (9) eşitsizlikleri elde edilir.

$$\begin{aligned}
|v_n(t) - u_*(t)| &= |Tw_n - Tu_*(t)| \\
&= \left| -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} w_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r f(q, w_n(q), w'_n(q)) dq dr \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u_*(t) dt \right) dq dr - \int_0^s \int_0^r f(q, u_*(q), u'_*(q)) dq dr \right| \\
&\leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \left| \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} (w_n(t) - u_*(t)) dt \right) dq dr \right| \\
&\quad + \left| \int_0^s \int_0^r [f(q, w_n(q), w'_n(q)) - f(q, u_*(q), u'_*(q))] dq dr \right| \\
&\leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \|w_n - u^*\|_\infty \left| \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} dt \right) dq dr \right| \\
&\quad + \left| \int_0^s \int_0^r L(|w_n(q) - u_*(q)| + |w'_n(q) - u'_*(q)|) dq dr \right| \\
&\leq \left(\frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} + L \frac{A^2}{2} \right) \|w_n - u^*\| \\
&\quad \|v_n - u_*\| \leq h \|w_n - u_*\|. \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
|w_n(t) - u_*(t)| &= |Tu_n(t) - Tu_*(t)| \\
&= \left| -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r f(q, u_n(q), u'_n(q)) dq dr \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u_*(t) dt \right) dq dr - \int_0^s \int_0^r f(q, u_*(q), u'_*(q)) dq dr \right| \\
&\leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \int_0^q \|u_n - u_*\| dt dq dr + \int_0^s \int_0^r \|f(q, u_n, u'_n) - f(q, u_*, u'_*)\| dq dr \\
&= \left(\frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} + L \frac{A^2}{2} \right) \|u_n - u_*\| \\
&= h \|u_n - u_*\|
\end{aligned}$$

$$\|w_n - u_*\| \leq h \|u_n - u_*\|. \quad (9)$$

(8) ve (9) eşitsizlikleri (7) eşitsizliğinde yazılırsa aşağıdaki eşitsizlik elde edilir

$$\|u_{n+1} - u_*\| \leq h^2 \|u_n - u_*\|$$

$$\|u_n - u_*\| \leq h^2 \|u_{n-1} - u_*\|$$

⋮

$$\|u_1 - u_*\| \leq h^2 \|u_0 - u_*\|.$$

Son eşitsizliğe tümevarım uygulayarak aşağıdaki eşitsizliği elde ederiz

$$\|u_{n+1} - u_*\| \leq h^{2(n+1)} \|u_0 - u_*\|. \quad (10)$$

(10) eşitsizliğinde $n \rightarrow \infty$ iken limit alınır, $h < 1$ olduğundan

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|u_n - u_*\| = 0$$

elde edilir.

Şimdi, Denklem (1) ile verilen integro-diferansiyel denklemin çözümünün veri bağımlılığını Denklem (2) ile verilen iterasyon algoritmasını kullanarak inceleyelim. Bu nedenle, aşağıdaki ikinci başlangıç değer problemini göz önüne alalım.

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varphi(s)}{ds^2} + I_{a^+}^\alpha \varphi(s) = g(s, x(s), x'(s)), \\ 0 < s < A, \quad 0 < \alpha < 1, \\ \varphi(s) = 0, \quad \varphi'(s) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

(11) integro-diferansiyel denklemin her iki tarafının integrali alınır,

$$\varphi(t) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} x(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r g(q, x(q), x'(q)) dq dr \quad (12)$$

elde edilir. $S: C^{(1)}[0, A] \rightarrow C^{(1)}[0, A]$ operatörü, (12) integral denklemine denk olarak g, D dikdörtgensel bölgesi üzerinde sürekli bir fonksiyon olmak üzere $x = Sx$ olduğundan

$$Sx(t) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} x(t) dt \right) dq dr + \int_0^S \int_0^r g(q, x(q), x'(q)) dq dr \quad (13)$$

olarak ifade edilebilir.

Denklem (2) de verilen iterasyon algoritması sırasıyla (6) ve (13) operatörleri ile yeniden oluşturulursa, aşağıdaki iterasyon algoritmaları yazılabilir.

$$\begin{cases} u_{n+1}(t) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} v_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^S \int_0^r f(q, v_n(q), v'_n(q)) dq dr \\ v_n(t) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} w_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^S \int_0^r f(q, w_n(q), w'_n(q)) dq dr \\ w_n(t) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^S \int_0^r f(q, u_n(q), u'_n(q)) dq dr \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \varphi_{n+1}(t) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} \psi_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^S \int_0^r g(q, \psi_n(q), \psi'_n(q)) dq dr \\ \psi_n(t) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} \phi_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^S \int_0^r g(q, \phi_n(q), \phi'_n(q)) dq dr \\ \phi_n(t) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} \varphi_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^S \int_0^r g(q, \varphi_n(q), \varphi'_n(q)) dq dr \end{cases} \quad (15)$$

Teorem 3.2. Denklem (14) ten elde edilen $\{u_n\}_{n=0}^\infty$ dizisini ve Denklem (15) ten elde edilen $\{\varphi_n\}_{n=0}^\infty$ dizisini göz önüne alalım. (5) ve (12) integral denklemlerinin çözümlerinin sırasıyla u_* ve p olduğunu ve Teorem 3.1'in koşullarının sağlandığını varsayalım. Ayrıca,

i) Her $q \in [0, A]$ için $\|f(q, u_n(q), u'_n(q)) - g(q, \varphi_n(q), \varphi'_n(q))\| \leq \varepsilon_1$ olacak şekilde ε_1 sabit vardır.

ii) $M = \frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} < 1$

koşulları sağlansın. Eğer $n \rightarrow \infty$ iken $u_n \rightarrow u_*$ ve $\varphi_n \rightarrow p$ ise bu takdirde,

$$\|u_* - p\| \leq \frac{3A^2 \varepsilon_1}{2(1-M)},$$

eşitsizliği sağlanır.

İspat. Teorem 3.2'nin hipotezleriyle aşağıdaki (16), (17) ve (18) eşitsizlikleri elde edilir.

$$\|u_{n+1} - \varphi_{n+1}\| = \|Tv_n - S\psi_n\|$$

$$\begin{aligned} &= \left\| -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} v_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^S \int_0^r f(q, v_n(q), v'_n(q)) dq dr \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} \psi_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^S \int_0^r g(q, \psi_n(q), \psi'_n(q)) dq dr \right\| \\ &\leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^S \int_0^r \int_0^q (q-t)^{\alpha-1} \|v_n - \psi_n\| dt dq dr \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_0^s \int_0^r \|f(q, v_n(q), v'_n(q)) - g(q, \psi_n(q), \psi'_n(q))\| dq dr \\
& \leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \|v_n - \psi_n\| \int_0^s \int_0^r \int_0^q (q-t)^{\alpha-1} dt dq dr + \int_0^s \int_0^r \varepsilon_1 dq dr \\
& = \frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} \|v_n - \psi_n\| + \varepsilon_1 \frac{A^2}{2} \\
& \|u_{n+1} - \varphi_{n+1}\| \leq M \|v_n - \psi_n\| + \frac{A^2}{2} \varepsilon_1, \tag{16}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \|v_{n+1} - \psi_{n+1}\| = \|Tw_n - S\phi_n\| \\
& + \left\| -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} w_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r f(q, w_n(q), w'_n(q)) dq dr \right. \\
& \left. - \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} \phi_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r g(q, \phi_n(q), \phi'_n(q)) dq dr \right\| \\
& = \|w_n - \phi_n\| \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \int_0^q (q-t)^{\alpha-1} dt dq dr \\
& + \int_0^s \int_0^r \|f(q, w_n(q), w'_n(q)) - g(q, \phi_n(q), \phi'_n(q))\| dq dr \\
& = \frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} \|w_n - \phi_n\| + \varepsilon_1 \frac{A^2}{2} \\
& \|v_{n+1} - \psi_{n+1}\| \leq M \|w_n - \phi_n\| + \varepsilon_1 \frac{A^2}{2}, \tag{17}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \|w_n - \phi_n\| = \|Tu_n - S\varphi_n\| \\
& \leq \left\| -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r f(q, u_n(q), u'_n(q)) dq dr \right. \\
& \left. - \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} \varphi_n(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r g(q, \varphi_n(q), \varphi'_n(q)) dq dr \right\| \\
& \leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \int_0^q (q-t)^{\alpha-1} \|u_n - \varphi_n\| dt dq dr \\
& + \int_0^s \int_0^r \|f(q, u_n(q), u'_n(q)) - g(q, \varphi_n(q), \varphi'_n(q))\| dq dr
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \|u_n - \varphi_n\| \int_0^s \int_0^r \int_0^q (q-t)^{\alpha-1} dt dq dr + \int_0^s \int_0^r \varepsilon_1 dq dr \\
&= \frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} \|u_n - \varphi_n\| + \varepsilon_1 \frac{A^2}{2} \\
&\|w_n - \phi_n\| \leq M \|u_n - \varphi_n\| + \frac{A^2}{2} \varepsilon_1 .
\end{aligned} \tag{18}$$

Şu halde, (18) eşitsizliği (17) eşitsizliğine yazılır ve $M < 1$ kullanılırsa, aşağıdaki eşitsizlik bulunur

$$\begin{aligned}
\|v_n - \psi_n\| &\leq M \left(M \|u_n - \varphi_n\| + \frac{A^2}{2} \varepsilon_1 \right) + \varepsilon_1 \frac{A^2}{2} . \\
&\leq M^2 \|u_n - \varphi_n\| + M \frac{A^2}{2} \varepsilon_1 + \varepsilon_1 \frac{A^2}{2} \\
&\leq M^2 \|u_n - \varphi_n\| + (M+1) \frac{A^2}{2} \varepsilon_1
\end{aligned} \tag{19}$$

Eğer (19) eşitsizliği (16) eşitsizliğinde yazılırsa,

$$\begin{aligned}
\|u_{n+1} - \varphi_{n+1}\| &\leq M \left(M^2 \|u_n - \varphi_n\| + (M+1) \frac{A^2}{2} \varepsilon_1 \right) + \frac{A^2}{2} \varepsilon_1 \\
&= M^3 \|u_n - \varphi_n\| + M(M+1) \frac{A^2}{2} \varepsilon_1 + \frac{A^2}{2} \varepsilon_1 \\
&\leq M^3 \|u_n - \varphi_n\| + (M^2 + M + 1) \frac{A^2}{2} \varepsilon_1 \\
&\leq M \|u_n - \varphi_n\| + (M^2 + M + 1) \frac{A^2}{2} \varepsilon_1 \\
&\leq [1 - (1-M)] \|u_n - \varphi_n\| + \frac{3A^2}{2} \varepsilon_1 \\
&\leq [1 - (1-M)] \|u_n - \varphi_n\| + (1-M) \frac{3A^2}{2(1-M)} \varepsilon_1 \\
\|u_{n+1} - \varphi_{n+1}\| &\leq [1 - (1-M)] \|u_n - \varphi_n\| + (1-M) \frac{3A^2 \varepsilon_1}{2(1-M)} ,
\end{aligned} \tag{20}$$

bulunur. Son eşitsizlikte,

$$\begin{aligned}
a_n &= \|u_n - \varphi_n\| , \\
\mu_n &= (1-M) \in (0,1) , \\
\gamma_n &= \frac{3A^2 \varepsilon_1}{2(1-M)} \geq 0 .
\end{aligned}$$

olarak alınırsa Lemma 2.1'in koşulları sağlanır. Böylece,

$$0 \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \|u_n - \varphi_n\| \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{3A^2 \varepsilon_1}{2(1-M)}$$

olur. $n \rightarrow \infty$ için $u_n \rightarrow u_*$ ve $\varphi_n \rightarrow p$ olduğundan

$$\|u_* - p\| \leq \frac{3A^2\varepsilon_1}{2(1-M)},$$

eşitsizliği elde edilir.

Örnek 3.1: İlk olarak aşağıda verilen başlangıç değer probemini gözönüne alalım:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u(s)}{ds^2} + I_{0+}^{\frac{1}{2}} u(s) = \frac{\cos(s)}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{3} u(s) + u'(s), \\ 0 < s < 1, \\ u(0) = 0, \quad u'(0) = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Burada (21) başlangıç değer problemi için

$$T: (C^{(1)}[0,1], \|\cdot\|) \rightarrow (C^{(1)}[0,1], \|\cdot\|)$$

$$Tu(s) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r \left(\frac{\cos(s)}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{3} u(s) + u'(s) \right) dq dr$$

operatörünü ifade edelim. $L = \frac{1}{3}, \alpha = \frac{1}{2}, A = 1$ olup

$$\begin{aligned} h(\alpha, A, L) &= \frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma(\alpha+3)} + L \frac{A^2}{2} \\ &= \frac{1^{\frac{1}{2}+2}}{\Gamma\left(\frac{1}{2}+3\right)} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1^2}{2} \\ &= \frac{1}{\Gamma\left(\frac{7}{2}\right)} + \frac{1}{6} \\ &= \frac{1}{3,323} + \frac{1}{6} \cong 0,46 < 1 \end{aligned}$$

dir. Böylece, Teorem 2.2 den (21) başlangıç değer probleminin çözümü var ve tektir.

Öte yandan,

$$\begin{cases} \frac{d^2 u(s)}{ds^2} + I_{0+}^{\frac{1}{2}} u(s) = \frac{\sin(s)}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{3} u(s) + u'(s), \\ 0 < s < 1, \\ u(0) = 0, \quad u'(0) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

başlangıç değer probemini gözönüne alalım. Burada (22) başlangıç değer problemi aşağıdaki gibi operatör ile ifade edilebilir.

$$S: (C^{(1)}[0,1], \|\cdot\|) \rightarrow (C^{(1)}[0,1], \|\cdot\|)$$

$$Su(s) = -\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^s \int_0^r \left(\int_0^q (q-t)^{\alpha-1} u(t) dt \right) dq dr + \int_0^s \int_0^r \left(\frac{\cos(s)}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{3} u(s) + u'(s) \right) dq dr$$

Bu taktirde, $L = \frac{1}{3}, \alpha = \frac{1}{2}, A = 1$ olup $h(\alpha, A, L) < 1$ dir. Dolayısıyla, Teorem 2.2 den (22) başlangıç değeri probleminin çözümü var ve tektir.

Şu halde,

$$\|f(q, u_n(q), u'_n(q)) - g(q, u_n(q), u'_n(q))\| = \left| \frac{\cos(s)}{\sqrt{\pi}} - \frac{\sin(s)}{\sqrt{\pi}} \right| \leq 0,169 = \varepsilon_1$$

$$M = \frac{A^{\alpha+2}}{\Gamma\left(\frac{1}{2} + 3\right)} = \frac{1}{3,323} = 0,3 < 1$$

olup

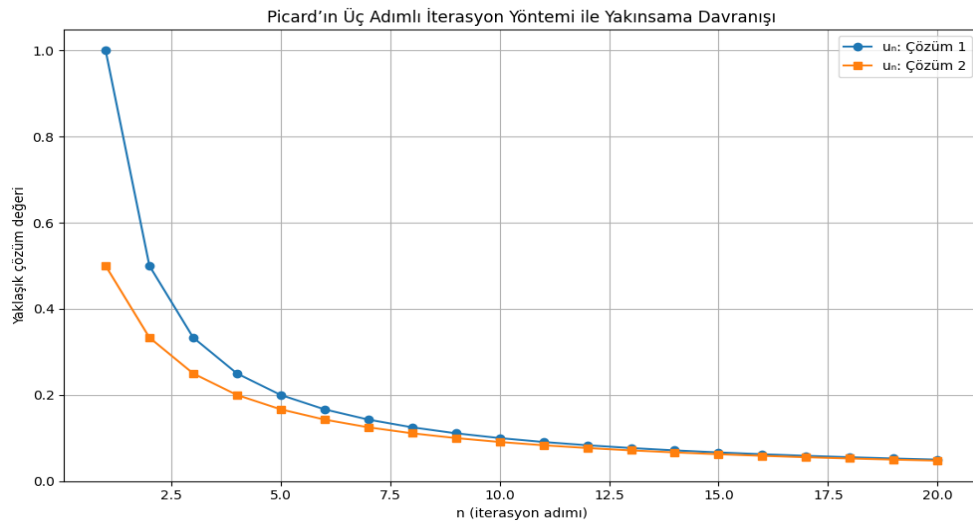
$$\|u_* - p\| \leq \frac{3A^2\varepsilon_1}{2(1-M)} \leq \frac{3 \cdot (0,169)}{1,4} \cong 0,362$$

elde edilir.

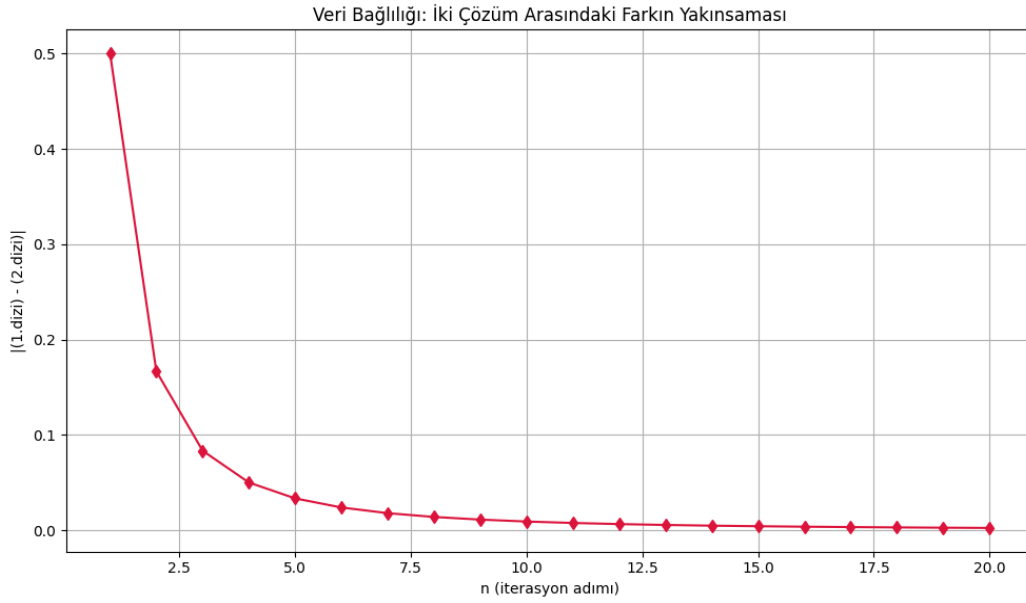
Aşağıda sunulan grafikler, Picard'ın üç adımlı iterasyon algoritmasının yakınsaklık ve veri bağımlılığı özelliklerini görsel olarak ortaya koymaktadır.

◆ Birinci grafik, (21) ve (22) ile verilen başlangıç değeri problemleri için elde edilen yaklaşık çözümlerin karşılaştırmalı yakınsaklığını göstermektedir. Bu grafik, iterasyon yönteminin her iki denklem için de hızlı ve istikrarlı bir biçimde çözüme yaklaştığını doğrulamaktadır (Şekil 1).

◆ İkinci grafik ise veri bağımlılığına odaklanmaktadır. Bu grafikte, (21) ve (22) denklemleri çok yakın başlangıç verilerine sahip olmasına rağmen, iterasyon sonucunda elde edilen çözümler arasındaki farkın nasıl davrandığı analiz edilmektedir. Yani çözümün başlangıç verilerine duyarlılığını (veri bağımlılığı özelliğini) gözlemlemeyi mümkün kılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 1. Başlangıç değeri problemleri için elde edilen yaklaşık çözümlerin karşılaştırmalı yakınsaklığı



Şekil 2. Veri bağımlılığı

Sonuç

Bu çalışmada, kesirli integro-diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümleri, Picard'ın üç adımlı iterasyon yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Literatürde sıkça karşılaşılan yöntemlere kıyasla, Picard'ın üç adımlı iterasyon yönteminin daha hızlı yakınsama sağladığı ve güçlü yakınsaklık özellikleri taşıdığı bilinmektedir. Bulgular, sabit nokta kuramı çerçevesinde geliştirilen bu yöntemin kesirli diferansiyel denklemlerin çözümünde etkin ve güvenilir bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Yani, yöntemin sabit nokta teorisi çerçevesinde hem teorik hem de sayısal olarak uygulanabilirliğini doğrulamaktadır. Bu yaklaşım, kesirli diferansiyel denklemlerin çözümünde etkili bir alternatif sunmakta ve gelecekteki çalışmalara ışık tutmaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Katkı Beyanı Özeti

Yazar, makalenin tamamı için tek başına sorumluluk beyan eder.

Teşekkür

Bu makaleye yorum ve önerileriyle katkıda bulunan hakemlere teşekkür etmek istiyorum.

Kaynaklar

- Abbas M, Asghar MW, De la Sen M., 2022. Approximation of the solution of delay fractional differential equation using AA-iterative scheme. *Mathematics*, 10: 273.
- Ali F, Ali J, Rodriguez-Lopez R., 2021. Approximation of fixed points and the solution of a nonlinear integral equation. *Nonlinear Functional Analysis and Applications*, 26(5): 869-885.
- Ashyralyev A., 2009. A note on fractional derivatives and fractional powers of operators. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 357: 232-236.
- Ashyralyev A., 2013a. Well-posedness of fractional parabolic equations. *Boundary Value Problems*, 31: 1-18.
- Ashyralyev A., 2013b. Computational mathematics textbook. Shymkent.
- Ashyralyev A, Emirov N, Cakir Z., 2014. Well-posedness of fractional parabolic differential and difference equations with Dirchlet-Neumann condition. *Electronic Journal of Differential Equations*, 97: 1-17.
- Atangana A, Baleanu D., 2016. New fractional derivative with non-local and non-singular kernel. *Thermal Science*, 20(2): 757-763.
- Atalan Y, Gürsoy F, Khan AR., 2021. Convergence of S-iterative method to a solution of Fredholm integral equation and data dependency. *Facta Universitiy*, 4(36): 685-694.
- Atalan Y, Maldar S., 2023. A new note on convergence and data dependence concept for a Volterra integral equation by fixed point iterative algorithm. *Journal of Mathematical Extension*, 17(2): 1-18.
- Adebisi AF, Ojurongbe TA, Okunlola KA, Peter OJ., 2021. Application of Chebyshev polynomial basis function on the solution of Volterra integro-diferential equations using Galerkin method. *Mathematics and Computational Sciences*, 2(1): 41-51.
- Banach S., 1922. Sur les opérations dans les ensembles abstraits et leur application aux équations intégrales. *Fundamenta Mathematicae*, 3(1): 133-181.
- Berinde V., 2007. Iterative approximation of fixed points. Springer, Berlin.
- Baleanu D, Garra R, Petras I., 2013. A fractional variational approach to the fractional Basset-type equation. *Reports on Mathematical Physics*, 72(1): 57-64.
- Caputo M, Fabrizio M., 2015. A new definition of fractional derivative without singular kernel. *Progress Fractional Differentiation and Applications*, 1(2): 73-85.
- Cona L, Şengul K., 2023. On data dependency and solutions of nonlinear Fredholm integral equations with the three-step iteration method. *Ikonion Journal of Mathematics*, 5: 53–64.
- Cona L, Şengul K., 2024. Solutions of linear Fredholm integral equations with the three-step iteration method. *Sigma Journal of Engineering and Natural Science*, 42: 245–251.

Cona L., 2024. Convergence and data dependence results of the nonlinear Volterra integral equation by the Picard's three step iteration. *AIMS Mathematics*, 9(7): 18048-18063.

Cona L, Bal E., 2023. On existence and uniqueness of some fractional order integro-differential equation. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 16(2): 297–310.

Gürsoy F., 2016. A Picard-S iterative method for approximating fixed point of weak-contraction mappings. *Filomat*, 30(10): 2829-2845.

Ishikawa S., 1974. Fixed points by a new iteration method. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 44(1): 147-150.

Karakaya V, Atalan Y, Doğan K, Bouzara NEH., 2017. Some fixed point results for a new three steps iteration process in Banach spaces. *Fixed Point Theory*, 18(2): 625-640.

Krasnosel'skii MA., 1955. Two comments on the method of successive approximations. *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*, 10(1): 123-127.

Kirk WA., 1971. On successive approximations for nonexpansive mappings in Banach spaces. *Glasgow Mathematical Journal*, 12(1): 6-9.

Khan SH., 2013. A Picard-Mann hybrid iterative process. *Fixed Point Theory and Applications*, 69: 1-10.

Kreyszig E., 1978. *Introductory functional analysis with applications*. John Willey & Sons, New York.

Mann WR., 1953. Mean value methods in iteration. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 4(3): 506-510.

Noor MA., 2000. New approximation schemes for general variational inequalities. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 251(1): 217-229.

Okeke GA, Udo AV, Alqahtani RT, Alharthi NH., 2023. A faster iterative scheme for solving nonlinear fractional differential equations of the Caputo type. *AIMS Mathematics*, 8(12): 28488–28516.

Oyedepo T, Uwaheren OA, Okperhie EP., 2019. Solution of fractional integro-differential equation using modified homotopy perturbation technique and constructed orthogonal polynomials as basis functions. *ATBU Journal of Science, Technology and Education*, 7(3):157-164.

Petras I., 2011. *Fractional-order nonlinear systems modeling, Analysis and Simulation*. Springer, New York.

Podlubny I., 1999. *Fractional differential equations: An introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications*. Academic Press, New York.

Phuengrattana W, Suantai S., 2011. On the rate of convergence of Mann, Ishikawa, Noor and SP-iterations for continuous functions on an arbitrary interval. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 235(9): 3006-3014.

Peter OJ, Adebisi AF, Oguntolu FA, Bitrus S, Akpan CE., 2018. Multi-step homotopy analysis method for solving Malaria model. *Malaysian Journal of Applied Sciences*, 3(2): 34-45.

Peter OJ., 2020. Transmission dynamics of fractional order Brucellosis model using Caputo-Fabrizio operator. *International Journal of Differential Equations*, 2020, Article ID 2791380, 11 pages.

Rhoades BE, Soltuz SM., 2004. The equivalence between Mann-Ishikawa iterations and multistep iteration. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 58(1-2): 219-228.

Samko SG, Kilbas AA, Marichev OI., 1993. *Fractional integrals and derivatives*. Gordon & Breach, Yverdon.

Şoltuz ŞM, Grosan T., 2008. Data dependence for Ishikawa iteration when dealing with contractive-like operators. *Fixed Point Theory and Applications*, 2008(1): 1-7.

Uwaheren OA, Adebisi AF, Olotu OT, Etuk MO, Peter OJ., 2021. Legendre Galerkin method for solving fractional integro-differential equations of Fredholm type. *The Aligarh Bulletin of Mathematics*, 40(1): 15-27.

Weng X., 1991. Fixed point iteration for local strictly pseudo-contractive mapping. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 113(3): 727-731.

Yang XJ, Sirivasta HM, Machado JAT., 2016. A new fractional derivatives without singular kernel: application to the modelling of the steady heat flow. *Thermal Science*, 20: 753-756.

Zivlari LG, Mingarelli AB., 2024. Existence and uniqueness of some unconventional fractional Sturm-Liouville equations, *Fractal and Fractional*, 8, 148.

Essential Oil Characterization of *Paeonia arietina* G. Anderson (*Paeoniaceae*)

Azize DEMİRPOLAT^{1*}

¹Department of Crop and Animal Production, Vocational School of Food, Agriculture and Livestock, Bingöl University, Bingöl, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0001-7192-185X>

*Corresponding author: ademirpolat@bingol.edu.tr

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 14.04.2025

Accepted: 20.07.2025

Available online: 12.09.2025

Keywords:

Paeonia arietina

Essential oil

GC-MS

Methyl salicylate

Pharmaceutical potential

This study was conducted to determine the essential oil composition of *Paeonia arietina* G. Anderson. Plant samples were collected from the sloped areas near Dikme Village in Bingöl Province, and the essential oil was obtained through hydrodistillation. The resulting oil was analyzed using GC-MS, revealing 30 compounds comprising 82.70% of the total composition. The major constituent was methyl salicylate (27.34%), followed by palmitic acid (14.73%) and salicylaldehyde (10.0%). Additionally, biologically active compounds such as thymol (3.20%), stearic acid (6.82%), trans-myrtanal (2.20%), and α -methyl cinnamaldehyde (2.30%) were identified. Given the known antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory properties of these constituents, the essential oil of *P. arietina* appears to have promising pharmacological and therapeutic potential. This research aims to contribute to the phytotherapeutic evaluation of this species.

Paeonia arietina G.Anderson (*Paeoniaceae*) Bitkisinin Uçucu Yağ Karakterizasyonu

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 14.04.2025

Kabul tarihi: 20.07.2025

Online Yayınlanma:12.09.2025

Anahtar kelimeler:

Paeonia arietina

Uçucu yağ

GC-MS

Metil salisilat

Farmasötik potansiyel

Bu çalışma, *Paeonia arietina* G. Anderson türünün uçucu yağ bileşimini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bitki örneği, Bingöl İli Dikme Köyü yakınlarındaki yamaçlık alanlardan toplanmış ve su distilasyonu yöntemiyle uçucu yağı elde edilmiştir. Elde edilen yağ, GC-MS cihazı kullanılarak analiz edilmiş ve toplam %82,70 oranında 30 bileşik tespit edilmiştir. Majör bileşik %27,34 oranında metil salisilat olup, bunu palmitik asit (%14,73) ve salisilaldehit (%10,0) takip etmiştir. Ayrıca timol (%3,20), stearik asit (%6,82), trans-myrtanal (%2,20) ve α -metil sinnamealdehit (%2,30) gibi biyolojik olarak aktif bileşenler de tanımlanmıştır. Bu bileşiklerin antimikrobiyal, antioksidan ve antienflamatuar özellikleriyle bilindiği göz önüne alındığında, *P. arietina*'nın uçucu yağının farmakolojik ve terapötik potansiyel taşıdığı sonucuna varılmıştır. Çalışma, bu türün fitoterapötik açıdan değerlendirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

To Cite: Demirpolat A., 2025. Essential oil characterization of *Paeonia arietina* G. Anderson (*Paeoniaceae*). Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(2): 294-302.

Introduction

Paeonia arietina, a member of the Paeoniaceae family, is a plant species known for its showy flowers. This species is naturally distributed in mountainous regions of the Caucasus and the northeastern parts of Turkey (Davis, 1982).

Morphological studies have shown that *P. arietina* is generally a perennial herb with stem heights ranging from 50 to 80 cm (Davis, 1982). Its flowers are typically large and ornamental, reaching diameters of up to 8–10 cm, which also makes the plant a popular choice for ornamental horticulture (Hong, 2010).

Paeonia species gained great popularity and became widespread across Europe and North America, prompting extensive cross-breeding efforts during the 19th century. This surge in breeding activity contributed significantly to the emergence of numerous new cultivars, ultimately paving the way for the industrial development of *Paeonia*. Ecological assessments indicate that *P. arietina* prefers temperate climatic conditions and thrives in semi-shaded or fully shaded environments (Hong, 2020; Yang et al., 2020).

Studies on the population dynamics and conservation of the species emphasize that habitat loss and overharvesting pose significant threats to natural populations of *P. arietina* (Red Data Book of Turkish Plants, 2000). Accordingly, it is of utmost importance to implement strategies for conservation and protection of its natural habitats.

Paeonia species are known to contain tannins, essential oils, and alkaloids. Traditionally, they have been used for their sedative properties in the treatment of epileptic seizures and cough. Notably, peony has been reported to alleviate symptoms of endometriosis, polycystic ovary syndrome, menopause, and night sweats, as well as in the treatment of eczema, psoriasis, herpes, acne, and epilepsy. It is also suggested to regulate capillary permeability. The roots and flowers of the plant have been used as anti-inflammatory, antimicrobial, blood-purifying agents, and remedies for heart, stomach, and intestinal ailments (Zeybek, 1994; Dindaroğlu, 2014; Tarhan, 2016).

In a recent study, the essential oil of *Paeonia emodi* Royle roots collected from the Western Himalayas was analyzed using GC-FID, GC-MS, and NMR techniques. Twenty-four compounds, accounting for 97.4% of the oil, were identified, with salicylaldehyde (85.5%) being the main component. This represents the first detailed study on the root essential oil composition of *P. emodi* (Verma et al., 2015). In another study, the composition and antioxidant activities of essential oils obtained from the purple, red, and yellow flowers of *Paeonia delavayi* Franch. were investigated. GC-MS analysis identified 194 different compounds, and the antioxidant activities were found to vary depending on the flower color. While the essential oils

from purple and red petals showed similar profiles, the oil from yellow petals was distinctly different. The study suggested that *P. delavayi* could be considered a potential source of natural antioxidants and essential oils (Yu et al., 2022).

In recent years, scientific research on essential oils has increased considerably due to growing interest in their antimicrobial, antioxidant, and pharmaceutical potentials (Sancar et al., 2024; İnci et al., 2025; Sancar, 2025). Consequently, *Paeonia arietina* stands out as a remarkable plant in terms of both its biological attributes and ecological preferences. This study aims to determine the essential oil composition of *P. arietina*. The findings obtained will provide baseline data for future phytotherapeutic and economic utilization studies of this species and related taxa.

Materials and Methods

Plant Specimen

A plant specimen of *Paeonia arietina* G. Anderson was collected on 11 June 2023 from the hillside areas of Bingöl (Dikme) in Eastern Türkiye at an altitude of 1750–1800 m. The specimen was dried according to standard herbarium procedures and identified using the *Flora of Türkiye*. It was subsequently deposited in the herbarium of the Department of Plant and Animal Production at Bingöl University under accession number AD 3456. The general appearance of the plant is shown in Figure 1.

Essential Oil Extraction

The essential oil was extracted from 100 g of dried plant material by hydrodistillation using a Clevenger apparatus. The plant material was cut into small pieces and placed in a distillation flask with water. As the water boiled, the volatile oils were entrained by the steam and condensed on a cooling surface. The condensate separated into layers due to density differences, thus enabling the collection of the essential oil. The obtained oil was then transferred to glass vials for storage.

Essential Oil Analysis

Gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS) was used to determine the composition of the essential oil, and analysis was performed on a Shimadzu GCMS-QP2010 system equipped with a Restek RTX®-5MS capillary column (30 m×0.25 mm, 0.25 µm film thickness) and an AOC-20 i/AOC-20s auto-sampler. The injection volume was 1 µL (split ratio 1:20), and helium was used as the carrier gas. The injector, detector, and interface temperatures

were set at 250°C, 220°C, and 250°C, respectively. Identification of the essential oil components was achieved by comparing their mass spectra with those in the NIST and Wiley mass spectral libraries. The results of the analysis are presented in Table 1.



Figure 1. General appearance of *P. arietina*

Table 1. Essential oil components of *P. arietina*

NO	Compound	RRI	<i>Paeonia arietina</i> (%)
1.	N-t-Butyl 3-pyrrolidinone	983	0.22
2.	2-Pentyl furan	992	0.10
3.	Undecane, 4,6-dimethyl-	1148	0.48
4.	Dihydroachillene	1134	0.10
5.	(E)-2-Nonenal	1152	0.10
6.	cis-Myrtanal	1175	1.0
7.	gamma-Nonalactone	1258	0.36
8.	trans-Myrtanal	1185	2.20
9.	Palmitic acid	1968	14.73
10.	Isopropyl palmitate	1985	1.63
11.	Nopinone	1992	2.20
12.	Stearic acid	2165	6.82
13.	Isopropyl stearate	2180	0.66

14.	Methyl benzoate	1036	0.10
15.	Myrtanal	1190	1.20
16.	Salicylaldehyde	1085	10.0
17.	α -Methyl cinnamaldehyde	1265	2.30
18.	Phellandral	1275	0.50
19.	Methyl salicylate	1198	27.34
20.	Erucic acid	2250	2.76
21.	Myrtenol	1250	0.20
22.	Perilla aldehyde	1260	0.60
23.	Ethyl salicylate	1285	0.10
24.	cis-Myrtanol	1175	1.50
25.	trans-Myrtanol	1185	0.70
26.	2-Ethyl hexanoic acid	1150	0.10
27.	Perilla alcohol	1180	0.30
28.	Thymol	1290	3.20
29.	Carvacrol	1298	1.10
30.	1-Hexadecanol	1850	0.10
TOTAL			82.70

RRI: Relative Retention Index

Results and Discussion

In this study, the essential oil composition of *Paeonia arietina* was evaluated by GC–MS analysis, which identified 30 compounds accounting for 82.70% of the total oil content. The oil yield from the plant material was 2.1%. The essential oil was characterized by the presence of salicylate derivatives, fatty acids, and terpenoids. The major compound was methyl salicylate (27.34%), followed by palmitic acid (14.73%) and salicylaldehyde (10.00%). Other prominent constituents included stearic acid (6.82%) and thymol (3.20%).

The high content of salicylate derivatives, such as methyl salicylate (the methyl ester of salicylic acid) and salicylaldehyde (2-hydroxybenzaldehyde), indicates that this class of compounds is predominant in the essential oil of *P. arietina*. These aromatic compounds are known to be involved in plant defense and communication mechanisms (Janes and Kreft, 2008).

In our study, methyl salicylate was identified as the major constituent in the essential oil of *P. arietina* with a proportion of 27.34%, whereas in the study conducted by Orhan et al. (2010), this compound was found at a higher concentration of 52.2%. The cis-myrtanal compound was detected at a rate of 16.7% by Orhan et al. (2010), whereas in our study, cis-myrtanal was present at a significantly lower concentration of 1.0%. Common components such as methyl salicylate, salicylaldehyde, trans-myrtanal, palmitic acid, and thymol were identified in both studies. Among these, methyl salicylate and salicylaldehyde were major constituents in both analyses.

Saturated long-chain fatty acids such as palmitic acid (C16:0) and stearic acid (C18:0) made up approximately 21.5% of the total composition. The presence of these compounds, which are typically non-volatile, in the essential oil may be attributed to the high temperatures employed during GC–MS analysis. Although not typically associated with aroma, these fatty acids may influence the stability and biological properties of the oil.

In the present study, methyl salicylate was the major compound in the essential oil of *P. arietina*. This compound is also found in essential oils known as “wintergreen oil” and is recognized for its analgesic, anti-inflammatory, and rubefacient (blood flow-enhancing) properties. It has anti-inflammatory activity and is commonly used in oral care products and aromatherapy. Ivanova et al. (2002) also reported significant amounts of methyl salicylate in the root essential oils of *P. tenuifolia* and *P. peregrina*.

cis-Myrtanal is a compound that occurs in rare but notable quantities in the essential oils of certain aromatic plants. Although studies on its biological activity are limited, its aldehyde structure makes it a compound of interest in aromatherapy, and it is believed to possess antimicrobial potential (Al Abbasy et al., 2015).

Salicylaldehyde is both an aromatic and biologically active compound, known for its antiseptic, antioxidant, and aromatic properties. Several studies have demonstrated its antioxidant and antimicrobial effects (Lee et al., 2003).

A study conducted in Greece analyzed the root essential oils of *P. clusii* subsp. *clusii*, *P. mascula* subsp. *helenica*, and *P. parnassica* using GC-MS. Among the 12 volatile components identified, salicylaldehyde, paeonol, methyl salicylate, and benzoic acid were found to be the major constituents. Extracts from these species were tested against *Staphylococcus aureus*, *S. epidermidis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterobacter cloacae*, *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli*, *Candida albicans*, *C. tropicalis*, and *C. glabrata* strains. The results revealed high antifungal activity, particularly against pathogenic fungi (Papandreou et al., 2002).

Although terpenoids were found in smaller proportions, they are biologically significant. Thymol (3.20%), a monoterpene phenol, is widely recognized for its aromatic scent and well-documented antiseptic properties (Masyita et al., 2022). It exhibits broad-spectrum antimicrobial and antifungal activity and is likely to contribute to the antimicrobial activity of *P. arietina* essential oil (Orhan et al., 2010). Additionally, bicyclic monoterpene aldehydes such as trans-myrtanal (2.20%), though present in minor amounts, are of interest due to their antioxidant and antitumor potential (Masyita et al., 2024). These compounds may enhance the oil's biological activity through synergistic interactions with salicylate derivatives.

Conclusion

In conclusion, the essential oil of *P. arietina* exhibits an unusual chemical profile dominated by methyl salicylate, fatty acids, and other aromatic components. This composition reveals the biological basis underlying the plant's traditional uses and highlights *P. arietina* as a natural resource that warrants further pharmacological evaluation. In particular, the high content of methyl salicylate and thymol indicates analgesic and antiseptic potential, respectively, while compounds such as salicylaldehyde and trans-myrtanal support the oil's antimicrobial and antioxidant capacities. These findings support the potential of *P. arietina* as a natural source of compounds for the development of pharmaceutical or functional products.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Author contributions

Author solely responsible for the entire work.

References

- Al Abbasy DW, Pathare N, Al-Sabahi JN, Khan SA., 2015. Chemical composition and antibacterial activity of essential oil isolated from *Omani basil* (*Ocimum basilicum* Linn.). Asian Pacific Journal of Tropical Disease, 5(8): 645-649.
- Dindaroğlu T., 2014. Şakayık bitkisinin (*Paeonia mascula*) bazı ekstrem yetiştirme ortamı özellikleri. III. Uluslararası Odun Dışı Orman Sempozyumu. 8-10 Mayıs 2014. s: 968-973.
- Hong DY., 2010. Peonies of the world. Taxonomy and phytogeography. Kew Pub: Royal Botanic Gardens, 221-225.

Ivanova A, Delcheva I, Tsvetkova I, Kujumgiev A, Kostov I., 2002. GC-MS analysis and antimicrobial activity of acidic fractions obtained from *Paeonia peregrina* and *Paeonia tenuifolia* roots. Zeitschrift Naturforsch, 57: 624–628.

İnci Ş, Yılmaz Sancar P, Demirpolat A, Kırbağ S., 2025. Chemical compositions of essential oils, antimicrobial effect and antioxidant activity studies of *Hyoscyamus niger* L. from Türkiye. International Journal of Secondary Metabolite, 12(1): 135-145.

Janeš D, Kreft S., 2008. Salicylaldehyde is a characteristic aroma component of buckwheat groats. Food Chemistry, 109(2): 293-298.

Lee SE, Hwang HJ, Ha JS, Jeong HS, Kim JH., 2003. Screening of medicinal plant extracts for antioxidant activity. Life Sciences, 73(2): 167-179.

Masyita A, Mustika Sari R, Dwi Astuti A, Yasir B, Rahma Rumata N, Emran TB, Nainu F, Simal-Gandara J., 2022. Terpenes and terpenoids as main bioactive compounds of essential oils, their roles in human health and potential application as natural food preservatives. Food Chemistry X, 13: 100217.

Orhan I, Demirci B, Omar I, Siddiqui H, Kaya E, Choudhary MI, Ecevit-Genç G, Ozhatay N, Sener B, Başer KH., 2010. Essential oil compositions and antioxidant properties of the roots of twelve Anatolian *Paeonia* taxa with special reference to chromosome counts. Pharmaceutical Biology, 48(1): 10-16.

Papandreou V, Magiatis P, Chinou I, Kalpoutzakis E, Skaltsounis IA, Tsarbopoulos A., 2002. Volatiles with antimicrobial activity from the roots of Greek *Paeonia* taxa. Journal of Ethnopharmacology, 81: 101-104.

Red Data Book of Turkish Plants (Pteridophyta and Spermatophyta). Edited by T. Ekim, M. Koyuncu, M. Vural, H. Duman, Z. Aytaç & N. Adigüzel. Ankara: Turkish Association for the Conservation of Nature, and Van Centennial University. 2000. ISBN 975 93611.

Sancar PY., 2025. Biosystematic, essential oil, and biological activity studies on medicinal plant *Moluccella* L. (Lamiaceae) species from Turkey. Plants, 14: 542.

Tarhan N, Arslan M, Şar S., 2016. Bazı tıbbi bitkiler ve onlara ait mitoslar. Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi, 6(1): 1–9.

Verma RS, Padalia RC, Chauhan A, Yadav A, Chanotiya CS., 2015. Essential oil composition of Himalayan peony (*Paeonia emodi* Royle). Journal of Essential Oil Research, 27(6): 477-480.

Yang Y, Sun M, Shanshan L, Qihang C, Teixeira da Silva JA, Wang A, Yu X, Wang L., 2020. Germplasm resources and genetic breeding of *Paeonia*: A systematic review. Horticulture Research, 7.

Yılmaz Sancar P, İnci Ş, Demirpolat A, Kırbağ S., 2024. Antimicrobial, antioxidant and essential oil studies on *Veratrum album* L. (Melanthiaceae). International Journal of Secondary Metabolite, 11(2): 255-265.

Yu X, Zhang H, Wang J, Wang J, Wang Z, Li J., 2022. Phytochemical compositions and antioxidant activities of essential oils extracted from the flowers of *Paeonia delavayi* using supercritical carbon dioxide fluid. Molecules, 27(9): 3000.

Zeybek N, Zeybek U., 1994. Farmasötik botanik kapalı tohumlu bitkiler (*Angiospermae*) sistematığı ve önemli maddeleri. Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir, ss. 180-181.

Biyodizel Katkı Maddesi Olarak Grafen Nanopartiküllerin Değerlendirilmesi: Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı

Ali Can MERT¹, Aşlı ABDULVAHİTOĞLU^{2*}

¹Jandarma ve Sahil Güvenlik Akademisi, Ankara

²Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Adana

¹<https://orcid.org/0009-0006-5981-1125>

²<https://orcid.org/0000-0002-3603-6748>

*Sorumlu yazar: aabdulvahitoglu@atu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 14.03.2025

Kabul tarihi: 26.05.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Grafen

Grafen oksit

Nano parçacık

ÇKKV

ÖZ

Sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş süreci, biyodizelin fosil yakıtlara yenilenebilir bir alternatif olarak araştırılmasını hızlandırmıştır. Son dönem çalışmalar, biyodizel karışımlarının performansını ve emisyon değerlerini iyileştirmek amacıyla özellikle grafen gibi nanomalzemelerin katkı olarak kullanımını incelemiştir. Bu çalışmada, grafen katkılı biyodizel-dizel karışımları, literatürde yer alan performans ve emisyon verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Altı farklı Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemi-TOPSIS, COPRAS, MAIRCA, MOORA, MAUT ve MOOSRA-çeşitli kriterler temelinde yakıt karışımlarını sıralamak için uygulanmış; elde edilen sıralamalar BORDA birleştirme yöntemiyle nihai hale getirilmiştir. Sonuçlara göre B20G90 karışımı çoğu yöntemde üstün performans göstererek verimlilik ve emisyonlar arasında dengeli bir çözüm sunmuştur.

Assesment of Graphene Nanoparticles as an Additive in Biodiesel: A Multi-Criteria Decision Making Approach

Research Article

Article History:

Received: 14.03.2025

Accepted: 26.05.2025

Available online:12.09.2025

Keywords:

Graphen

Graphane oxide

Nanoparticle

MCDM

ABSTRACT

The transition toward sustainable energy sources has accelerated research into biodiesel as a renewable alternative to fossil fuels. Recent studies have examined the use of nanomaterial additives—particularly graphene—to improve the performance and emissions of biodiesel blends. This study evaluates graphene-enhanced biodiesel-diesel blends using performance and emission data collected from the literature. Six Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods—TOPSIS, COPRAS, MAIRCA, MOORA, MAUT, and MOOSRA—were applied to rank the blends based on various criteria. The final ranking was obtained using the BORDA aggregation method. Results indicate that the B20G90 blend consistently outperformed others, offering a favorable balance between efficiency and emissions. The study demonstrates the applicability of integrated MCDM techniques for systematic, data-driven evaluation of alternative fuel blends.

To Cite: Mert AC, Abdulvahitoglu A., 2025. Assesment of graphene nanoparticles as an additive in biodiesel: A multi-criteria decision making approach. Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(2): 303-327.

Introduction

Energy is an indispensable element for humanity and forms the foundation of economic development. As the world's population continues to grow each year, the demand for energy also increases. However, fossil fuels can have adverse effects on both human health and the environment. Their combustion releases harmful pollutants such as hydrocarbons, carbon dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, particulate matter, and nitrogen oxides, along with greenhouse gas (GHG) emissions. These pollutants have been proven to pose significant risks to human health and contribute to global warming, leading to environmental disasters such as droughts and floods. Due to the limited availability of petroleum-based fuels and their high emission levels, researchers have increasingly focused on developing alternative fuels. Considering the environmental impacts of fossil fuel consumption, scientists worldwide are striving to advance sustainable, renewable, and clean energy sources. As the world increasingly seeks alternatives to conventional energy sources, the development of sustainable fuels is becoming more critical. One such alternative is biodiesel, a renewable fuel derived from organic materials.

Biodiesel refers to renewable, oil-rich feedstocks such as animal fats, vegetable oils, and algae-derived mixtures of fatty acid methyl esters. One of the most striking advantages of biodiesel, which replaces non-renewable fuels as a renewable resource, improve engine performance. In addition, other advantages that make it attractive to use biodiesel fuel in engines are; less cost, less exhaust emissions and ease of supply of raw materials. However, most studies in the literature focus on specific types of nanoparticles (e.g., graphene or graphene oxide) and particular biodiesel sources. This makes it difficult to generalize the findings, and there is a gap in understanding how these nanoparticles perform in a wider range of biodiesel types and under varying engine conditions. It has been revealed by some studies that by using these particles, engine efficiency will increase and friction will be minimized.

Nowadays, new additives are added to biodiesel fuels used as alternative fuels to reduce emission values and increase engine performance. These additives are currently mostly nanoparticles that emerge with the development of technology. The mixture of these particles with diesel/biodiesel fuels provides better engine performance and less NO_x, CO, CO₂ etc. It is thought that emission gases can be reduced. And with the continuous development of technology, studies are being carried out on these.

Nowadays, there are many studies on fuel mixtures with nanoparticles additives. One of the leading ones of these nano particles is graphene and graphene oxide. The layer of carbon atoms that has a hexagonal honeycomb-shaped carbon arrangement, is single atom high and is

two-dimensional, is called graphene. Graphene additive fuel mixtures are one of them. Investigations are carried out on the engine performance and emission properties of graphene. In this section, studies on the use of nanoparticles such as graphene as additives are mentioned and theoretical studies on this are summarized.

The effects of Graphene Quantum Dot (GQD) nanoparticles in an ethanol-biodiesel blend (B10) on a diesel engine were studied by (Heidari-Maleni et al., 2020). GQD nanoparticles at 30 ppm were added to each fuel blend, tested at three different engine speeds. Despite a decrease in power and torque, the research suggested potential benefits of using GQD nanoparticles as additives in improving engine performance and emissions (Heidari-Maleni et al., 2020).

Hoseini et al studied the physicochemical properties of three biodiesel feedstocks and their performance in diesel engines when blended with GO nanoparticles. Primrose, tree of heaven fruit, and camelina were evaluated as potential biodiesel sources in Iran, finding camelina oilseeds to have superior properties such as lower viscosity. The research highlighted GO nanoparticles as beneficial additives for improving the quality of biodiesel fuels in Iran (Hoseini et al., 2020).

Rajpoot and colleagues studied a 4-stroke, single-cylinder CI engine using second-generation *Jatropha* biodiesel blended with 100 ppm graphene nanoparticles. Results indicated that graphene nanoparticles improved thermal efficiency, reduced fuel consumption, smoke opacity, and particulate matter emissions, enhancing overall engine efficiency (Rajpoot et al., 2023).

Sharma and et al., studied the impact of blending few-layered graphene and graphite nanoparticles with biodiesel derived from waste cooking oil. This research highlights the potential of graphene-based nanoparticle additives to improve biodiesel combustion properties and decrease NO_x emissions (Sharma et al., 2022).

An experimental study conducted to investigate the effects of GO nanoparticles on a diesel engine fueled with *Jatropha* methyl ester (JME) by El Seesy et al. Results indicated that incorporating GO nanoparticles improved thermal efficiency by 17% and significantly reduced CO emissions by 60% and UHC emissions by 50% compared to pure JME fuel (El-Seesy et al., 2018).

Bayındırlı and colleagues investigated the effects of adding reduced graphene oxide (rGO) and graphite nanoparticles to cottonseed oil methyl ester biodiesel through transesterification. The study demonstrated that at full load, nanoparticle-enhanced fuels boosted brake thermal efficiency by up to 17.97% and lowered brake specific fuel

consumption by as much as 16.28%. Additionally, increased nanoparticle concentrations correlated with higher cylinder pressures, indicating improved combustion characteristics (Bayindirli et al., 2023).

Agbulut and colleagues investigated the effects of GO nanoparticles as additives in biodiesel-diesel blends used in compression ignition (CI) engines. Results showed that blending biodiesel with diesel (B15) reduced brake thermal efficiency (BTE) by 2.67% while lowering CO and HC emissions by 7.5% and 8.53%, respectively. However, it increased brake specific fuel consumption (BSFC) by 5.54% and raised NO_x emissions by 3.37% compared to pure diesel (B0) (Agbulut et al., 2022).

Hosseini and colleagues investigated the impact of GO nanoparticles on a diesel engine fueled with B20 blend of *Oenothera lamarckiana* biodiesel. The study found that incorporating GO nanoparticles led to increased power output and exhaust gas temperature (EGT) (Hoseini et al., 2020).

Pireh and colleagues conducted a study on the combustion characteristics, performance, and emissions of a diesel engine using graphene oxide nanoparticles (GONPs) blended with diesel and waste cooking oil (WCO) biodiesel mixtures. The findings indicated that GONPs increased NO_x and CO₂ emissions while reducing CO emissions (Pireh et al., 2022).

Murugan and colleagues investigated the effects of nanographene oxide (NGO) additives on palm oil methyl ester (PME) blended with diesel fuel (B50) in a diesel engine. The results showed significant reductions in hydrocarbon, carbon monoxide, and smoke emissions, attributed to NGO's catalytic properties and increased surface area-to-volume ratio. However, there was a slight increase in nitrogen oxide emissions due to higher peak pressure and combustion heat release (Murugan et al., 2022).

Ooi et al investigates the influence of GO nanoparticles on diesel fuel combustion, showing significant improvements in combustion efficiency that could lead to cleaner emissions and lower fuel combustion (Ooi et al., 2016).

Hosseini et al. examined the effect of graphene oxide nanoparticles on the performance and emissions of diesel engines when integrated into *Ailanthus altissima* biodiesel blends. The study revealed enhancements in engine performance and reductions in specific emissions, indicating the potential for environmentally friendly fuels (Hoseini et al., 2018).

Nair et al conducted a study on the effects of blending graphene nanoparticles with Karanja biodiesel on engine performance and emissions. The research demonstrated that blends containing nanoparticles performed comparably to diesel, while achieving reductions in emissions such as CO, HC, and NO_x (Nair et al., 2021).

Bidir et al examines the influence of graphene nanoparticles on the performance and emissions of biodiesel blends, revealing enhancements in thermal efficiency and reduced NO_x concentrations. However, the study also identifies negative effects on combustion rate and engine performance at higher graphene nanoparticle (GNP) proportions (Bidir et al., 2023). Despite the extensive studies on the use of graphene and other nanoparticles as additives in biodiesel and diesel fuel mixtures, there remains a notable gap in comprehensive investigations that explore the full spectrum of nanoparticle types and their effects across various biodiesel blends and engine types. The majority of studies tend to focus on specific fuel types or singular nanoparticle applications, leaving room for a broader, more integrative approach to optimizing fuel performance and emission reductions.

The integration of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods in mechanical engineering is essential for addressing the complexity and multifaceted nature of modern engineering problems. These methods offer a systematic and structured approach to decision-making, enabling engineers to evaluate multiple criteria, balance trade-offs, and make informed choices. From material selection and design optimization to supplier evaluation and project management, MCDM enhances decision-making processes across various domains in mechanical engineering. As engineering challenges continue to evolve, the significance of MCDM in achieving optimal and sustainable solutions is expected to increase further.

In the literature, there are several studies that utilize MCDM techniques to determine optimal conditions. These techniques are extensively used to address complex decisions involving conflicting criteria. In the energy and environmental sectors, they support the evaluation of renewable energy alternatives, efficiency improvements, and the selection of sustainable technologies (Rahman et al., 2022; Orozco et al., 2023). MCDM also contributes to transport planning, manufacturing optimization, and agricultural sustainability (Emovon and Oghenenyero, 2020; Firuoz et al., 2021; Cai et al., 2025). Furthermore, it is applied in project risk management, including tunnel construction projects (Gogate et al., 2023). These applications highlight the versatility of MCDM techniques in addressing diverse challenges across engineering sectors. For instance, Khan et al. explored the use of biosynthesized graphene oxide nanofluids to enhance the efficiency of solar panels in photovoltaic thermal systems. Their study employed MCDM methods like AHP and TOPSIS to evaluate various nanofluids under different Direct Normal Irradiance (DNI) conditions, with graphene oxide emerging as the top performer in terms of overall efficiency, exergy loss, and surface temperature (Khan et al., 2024).

In the majority of studies in the literature, the impact of graphene blending in diesel-biodiesel fuel mixtures on engine performance and emission values has been investigated. These studies generally involve the addition of graphene additives at various concentrations (in ppm) to diesel or biodiesel fuels at 0%, 10%, and 20%, with the resulting effects on engine performance and emissions being examined. The findings of these studies indicate that graphene-enhanced fuel mixtures improve engine performance (e.g., power and torque) and reduce emissions (e.g., NO_x, CO, CO₂). For this study, performance and emission data from published literature were used to assess the impact of graphene additives. The most suitable graphene concentration and biodiesel ratio were selected using a multi-criteria decision-making (MCDM) approach. The novelty of this work lies in the comprehensive application of six different MCDM methods, which were aggregated using the BORDA method, to assess graphene-enhanced biodiesel blends based on published experimental data.

Material and Methods

This study adopts a quantitative research approach to systematically evaluate the effects of graphene-doped fuel blends. The use of MCDM methods allows for the integration of multiple criteria to assess the overall impact on greenhouse gas emissions and related factors.

Standard Deviation Method

The standard deviation method is a technique used for weighting criteria. In probability and statistics, the standard deviation (σ) of a probability distribution is a measure of the dispersion of values (Demir, 2021). In the standard deviation method, it is important to normalize the criteria because of the differences in scale of the data. A prominent feature of this method is that it mitigates the effect of subjectivity from decision-makers and effectively utilizes decision information. The standard deviation method has been used in many decision-making problems in the literature (Demir, 2021).

The Standard deviation method is implemented using the equations (1)-(4) provided below (Demir, 2021)

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, \quad a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (1)$$

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

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

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

TOPSIS Technique

The TOPSIS algorithm was developed by Hwang and Yoon in 1981 (Abdulahitoglu et al. 2021). It is based on the total Euclidean distance between the weighted normalised elements of the decision matrix and the best and worst values for each criteria. The final ranking is determined by the ratio of the relative aggregate distance from the worst solutions to the total distances from the best and worst solutions, as well as the choice of distances from the positive and negative ideal solutions. The TOPSIS technique is used to organise options according to certain criteria (Abdulahitoglu et al., 2021; Abdulvahitoglu and Kilic, 2022). The TOPSIS method is implemented using the equations (5)-(12) provided below (Abdulahitoglu and Kilic, 2022).

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}}, i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_j r_{1j} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & \vdots \\ w_1 r_{i1} & & & w_j r_{ij} & & w_n r_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_j r_{mj} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A^+ = \left\{ \max_i v_{ij} \mid (j \in J), \left(\min_i v_{ij} \right) j \in J' \right\} \quad (8)$$

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$$

$$A^- = \left\{ \min_i v_{ij} \mid (j \in J), \left(\max_i v_{ij} \right) j \in J' \right\} \quad (9)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

where

$$J = \{j = 1, 2, \dots, n \mid j \text{ associated with benefit criteria}\}$$

$$J' = \{j = 1, 2, \dots, n \mid j \text{ associated with cost criteria}\}$$

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (10)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (11)$$

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (12)$$

COPRAS technique

Zavadskas and Kaklauskas first published the Complex Proportional Assessment method in 1996 (Demir et al., 2021). It is used to assess and rank solutions while taking into consideration the criterion's cost and benefit features (Demir, 2021). This technique compares options and reports their relative superiority as a percentage. The COPRAS method is implemented using the equations (13)-(16) provided below (Demir, 2021):

$$x_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (i = 1, \dots, m \text{ and } j = 1, \dots, p) \quad (13)$$

$$n_{ij} = x_{ij}^* w_j \quad (14)$$

$$Q_i = S_i^+ + \frac{\sum_{i=1}^m S_i^-}{S_i^- \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{S_i^-}\right)} \quad (15)$$

$$P_i = \left(\frac{Q_i}{Q_{max}}\right) * 100 \quad (16)$$

MOOSRA Technique

In 2012, M.C. Das et al, brought MOOSRA technique to the literature as a choice ranking approach (Demir et al., 2021). MOOSRA is a method for multi-objective optimisation. The initial step is to create the problem's decision matrix, followed by normalising it. The MOOSRA approach calculates each alternative's overall performance score either by dividing the sum of the normalised performance values for advantageous criteria or by the sum of the normalised performance values for cost criteria. The MOOSRA technique is implemented using the equations (17)-(20) provided below (Demir et al., 2021)

$$X^* = \begin{bmatrix} x_{11}^* & \dots & x_{1p}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}^* & \dots & x_{mn}^* \end{bmatrix} \quad (i = 1, \dots, m \text{ and } j = 1, \dots, n) \quad (17)$$

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (18)$$

$$a_{ij} = x_{ij}^* \cdot w_j \quad (19)$$

$$Y_i = \frac{\sum_j^g x_{ij}^* w_j}{\sum_{j'=g+1}^n x_{ij'}^* w_{j'}} , \quad j = 1, 2, \dots, g \text{ for beneficial, } j' = g + 1, g + 2, \dots, n \text{ for cost} \quad (20)$$

Alternatives are ranked based on their overall performance scores, with the highest score indicating the best option. The criterion weight values w_j , determined using the standard deviation method, are used to weight the matrix values. After normalizing each criterion, the best value is set to 1, while the worst value is set to 0. The matrix is then normalized using the cost-actuated Equation 20, except when the criterion direction is advantageous, in which case Equation 19 is applied.

MAIRCA

D. Pamucar et al presented MAIRCA to the literature in 2014 as a ranking alternative. It is based on calculating the gap between theoretical and real preference levels. Unlike other MCDM approaches, it assumes that the selection probabilities of all alternatives are same. The MAIRCA technique is implemented using the equations (21-31) shown below.

$$X^* = \begin{bmatrix} x_{11}^* & \dots & x_{1n}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}^* & \dots & x_{mn}^* \end{bmatrix} \quad (i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n) \quad (21)$$

$$\text{Beneficial } n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (22)$$

$$\text{Cost } n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^+}{x_i^- - x_i^+} \quad (23)$$

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & \dots & n_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{m1} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$P_i = P_{i+1} = \dots = P_m = 1/m \quad (25)$$

$$t_{ij} = P_i * w_{ij} \quad (26)$$

$$r_{ij} = t_{ij} * n_{ij} \quad (27)$$

$$R = \begin{bmatrix} t_{11}n_{11} & \dots & t_{1n}n_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1}n_{m1} & \dots & t_{mn}n_{mn} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$G = T - R \quad (29)$$

$$G = \begin{bmatrix} t_{11} - r_{11} & \dots & t_{1n} - r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} - r_{m1} & \dots & t_{mn} - r_{mn} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$Q_i = \sum_j^n g_{ij} \quad (31)$$

MAUT

Keeney and Raiffa developed the MAUT technique to the literature in 1976 (Demir et al., 2021). The following formula describes the MAUT approach (Demir et al., 2021).

$$x_j(a_i) = \frac{x_i(a_i) - \min(x)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad \text{for beneficial} \quad (32)$$

$$x_j(a_i) = 1 + \frac{x_j - x_i(a_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad \text{for cost} \quad (33)$$

$$r_{ij} = \frac{e^{(x_{ij})^2} - 1}{1.71} \quad (34)$$

$$x(a_i) = \sum_{j=1}^q x_j(a_i) \cdot w_j \quad (35)$$

Where $x(a_i)$ denotes the beneficial value and $x_j(a_i)$ normalized beneficial value, w_j is the weighing values which were calculated by standard deviation method.

MOORA Technique

The MOORA technique was introduced into the literature by Braures and Zavadakas in 2006. This technique is very simple and easy to apply, making it highly reliable for addressing various problems in the decision-making process. The MOORA method is implemented using the equations (36)-(38) provided below

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (i = 1, \dots, m \text{ and } j = 1, \dots, p) \quad (36)$$

$$X^* = \begin{bmatrix} x_{11}^* & \dots & x_{1p}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}^* & \dots & x_{mp}^* \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} w_1 x_{11}^* & \dots & w_n x_{1p}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 x_{m1}^* & \dots & w_n x_{mp}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mp} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$y_j = \sum \text{beneficial criteria values} - \sum \text{cost criteria values} \quad (38)$$

Borda Technique

The Borda technique, developed by Jean-Charles de Borda in 1770, is a voting system used to obtain integrated solutions for multi-criteria decision problems. This method operates using a scoring system based on the rankings of alternatives.

The Borda count (B_i) is calculated as follows:

$$B_i = \sum_{k=1}^r m - a_{ik} \quad (39)$$

where m is the number of alternatives.

The points for each alternative are summed up, and this total is the Borda count (B_i) for that alternative. When the Borda counts are calculated, the alternative with the highest total score is considered the best choice.

The decision matrix was constructed utilizing an experimental study contributed to the literature by Hoseini et al., in 2018.

Fuel Blend Characteristics

Symbols used in the tables are B denotes for Biodiesel and G denotes for Graphen nanoparticle. Fuel blend symbols and their meanings are shown in Table 1.

Table 1. Fuel blend symbols and their meanings (Hoseini et al., 2018)

Symbol	Meaning	Symbol	Meaning	Symbol	Meaning
B0G0	100% diesel	B10 G0	90% diesel 10% biodiesel	B20G0	80% diesel 20% biodiesel
B0G30	100% diesel 30 ppm graphen	B10G30	90% diesel 10% Biodiesel 30 ppm graphen	B20G30	80% diesel 20% Biodiesel 30 ppm graphen
B0G60	100% diesel 60 ppm graphen	B10G60	90% diesel 10% Biodiesel 60 ppm graphen	B20G60	80% diesel 20% Biodiesel 60 ppm graphen
B0G90	100% diesel 90 ppm graphen	B10G90	90% diesel 10% Biodiesel 90 ppm graphen	B20G90	80% diesel 20% Biodiesel 90 ppm graphen

Table 2. Fuel properties of blends (Hoseini et al., 2018)

Fuel Blend	Density (g/cm ³)	Kinematic Viscosity (mm ² /s)	Higher Heating Values (Mj/kg)	Cetane Number
B0G0	0.83	5.4645	45.7132	46
B0G30	0.8223	5.4423	45.8312	46.5
B0G60	0.8211	5.4091	45.8268	47
B0G90	0.8206	5.4213	45.9489	47
B10G0	0.8345	5.5338	44.1101	46.5
B10G30	0.8331	5.5103	44.6534	47
B10G60	0.8324	5.4991	44.832	47.5
B10G90	0.8327	5.5011	44.7892	47.5
B20G0	0.8381	5.564	43.6318	47
B20G30	0.837	5.5332	43.9318	47.5
B20G60	0.8364	5.5201	44.0149	48.5
B20G90	0.8369	5.5291	44.0134	48.5

Brake Power is define as the rate of work performed by the engine. Fuel properties such as heating value and viscosity have imortant effects on engine power.

Specific fuel consumption (SFC) is a measure of the efficiency of an engine. It is typically expressed in terms of the amount of fuel consumed per unit of power produced.

Table 3, 4 and 5 is given below:

Table 3. Engine operating characteristics of blends (Hoseini et al., 2018)

Fuel Blend	Brake Power	SFC
B0G30	4.15084	404.5184
B0G60	4.35379	393.744
B0G90	4.49565	384.8
B10G0	3.97823	424
B10G30	4.191463	384.7
B10G60	4.374064	380.88
B10G90	4.607188	376.89
B20G0	3.9073	438
B20G30	4.242156	398.14
B20G60	4.39454	385.35
B20G90	4.455494	374.58

Table 4. Emissions results (Hoseini et al., 2018)

Fuel Blend	CO	CO ₂	UHC	NO _x
B0G0	1.36	3.7	227.79	145.38
B0G30	1.32	3.67	211.98	146.91
B0G60	1.29	3.65	201.12	148.35
B0G90	1.27	3.65	191.94	153.11
B10G0	1.24	3.37	204.37	148.1
B10G30	1.18	3.51	185.11	149.21
B10G60	1.11	3.55	176.34	153.99
B10G90	1.01	3.61	166.7	155.96
B20G0	1.21	3.35	171.13	162.32
B20G30	1.12	3.43	148.34	167.9
B20G60	1.09	3.55	135.83	170.32
B20G90	1.11	3.77	124.12	174.32

The symbols attributed to the criterion shown in Table 5

Table 5. Criterion

Criteria	Symbol
Density	C1
Kinematic Viscosity	C2
Higher Heating Values	C3
Cetane Number	C4
Brake Power	C5
SFC	C6
CO	C7
CO ₂	C8
UHC	C9
NO _x	C10

The blends were symbolized as alternatives as seen in the Table 6. The table illustrates different fuel blend ratios with graphene and biodiesel content. assigned with respective alternatives (A1 to A11) based on their composition.

Table 6. Symbols for alternatives of fuel blends

Fuel Blend	Alternative
B0G30	A1
B0G60	A2
B0G90	A3
B10G0	A4
B10G30	A5
B10G60	A6
B10G90	A7
B20G0	A8
B20G30	A9
B20G60	A10
B20G90	A11

The most suitable of these fuel ratios will be determined at the end with the methods to be applied.

Results and Discussion

In this study, the optimal fuel mixture alternative is identified using multi-criteria decision-making (MCDM) methods. The MCDM methods employed include Standard Deviation (for weighing the criteria), TOPSIS, COPRAS, MAUT, MAIRCA, MOORA, MOOSRA and the BORDA method. Initially, alternatives (A1 to A11) are ranked based on each fuel mixture. Subsequently, each criterion (CO, CO₂, NO_x, UHC, SFC, brake power, density, kinematic viscosity, higher heating value etc.) is ranked from C1 to C10. Using these rankings, the MCDM methods generate a final ranking of the alternatives and the best alternative is selected.

In order to calculate the weight of each criteria standard deviation model was chosen. Using equation 1 the Decision matrix constructed for standard deviation model as seen in Table 7. The table presents various criteria values for biodiesel-graphene blended fuels at different ratios (30, 60 and 90 ppm graphene, B0, B10 and B20 biodiesel) sourced from the literature. These values include density, kinematic viscosity, high-temperature stability and cetane number, resulting from the different fuel mixture ratios. Additionally, the combustion results for these fuel mixtures are provided including brake power, specific fuel consumption (SFC) and gas emission values such as CO, CO₂, UHC and NO_x.

Table 7. Constructed decision matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
A1	0.8223	5.4423	45.8312	46.5	4.15084	404.5184	1.32	3.67	211.98	146.91
A2	0.8211	5.4091	45.8268	47	4.35379	393.744	1.29	3.65	201.12	148.35
A3	0.8206	5.4213	45.9489	47	4.49565	384.8	1.27	3.65	191.94	153.11
A4	0.8345	5.5338	44.1101	46.5	3.97823	424	1.24	3.37	204.37	148.1
A5	0.8331	5.5103	44.6534	47	4.191463	384.7	1.18	3.51	185.11	149.21
A6	0.8324	5.4991	44.8320	47.5	4.374064	380.88	1.11	3.55	176.34	153.99
A7	0.8327	5.5011	44.7892	47.5	4.607188	376.89	1.01	3.61	166.7	155.96
A8	0.8381	5.564	43.6318	47	3.9073	438	1.21	3.35	171.13	162.32
A9	0.8370	5.5332	43.9318	47.5	4.242156	398.14	1.12	3.43	148.34	167.9
A10	0.8364	5.5201	44.0149	48.5	4.39454	385.35	1.09	3.55	135.83	170.32
A11	0.8369	5.5291	44.0134	48.5	4.455494	374.58	1.11	3.77	124.12	174.32

After constructing the decision matrix normalisation was done using equation 2. That is, the square of each of the alternatives was taken and added. Then, the square root of this result was taken and the result was proportioned to each alternative individually. Thus, it was normalized. The normalized matrix shown in Table 8.

Table 8. Normalized matrix for standard deviation model

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
A1	0.29821	0.29852	0.30916	0.29627	0.29164	0.30837	0.33702	0.31103	0.36233	0.28107
A2	0.29778	0.29670	0.30913	0.29946	0.30590	0.30016	0.32936	0.30934	0.34376	0.28382
A3	0.29760	0.29737	0.30996	0.29946	0.31586	0.29334	0.32426	0.30934	0.32807	0.29293
A4	0.30264	0.30354	0.29755	0.29627	0.27951	0.32322	0.31660	0.28561	0.34932	0.28334
A5	0.30213	0.30225	0.30122	0.29946	0.29449	0.29326	0.30128	0.29747	0.31640	0.28547
A6	0.30187	0.30163	0.30242	0.30264	0.30732	0.29035	0.28340	0.30086	0.30141	0.29461
A7	0.30198	0.30174	0.30214	0.30264	0.32370	0.28731	0.25787	0.30595	0.28493	0.29838
A8	0.30394	0.30519	0.29433	0.29946	0.27453	0.33390	0.30894	0.28391	0.29250	0.31055
A9	0.30354	0.30350	0.29635	0.30264	0.29805	0.30351	0.28596	0.29069	0.25355	0.32123
A10	0.30333	0.30278	0.29691	0.30901	0.30876	0.29376	0.27830	0.30086	0.23217	0.32585
A11	0.30351	0.30328	0.29690	0.30901	0.31304	0.28555	0.28340	0.31950	0.21215	0.33351

Standard deviation calculated using equation 3 and result tabulated in Table 9.

Table 9. Standard deviations

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
σ_1	0.00233	0.00263	0.00544	0.00414	0.01448	0.01461	0.02368	0.01067	0.04671	0.01792

Weights of each criteria calculated by using equation 4 and results tabulated in Table 10. The results show that the most important criteria is the C9 which is Unburned Hydro Carbon.

Table 10. Weights of the criterion

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
w	0.01631	0.01847	0.03815	0.02901	0.10154	0.10244	0.16604	0.07484	0.32754	0.12567

Since each MCDM method has a distinct approach to evaluating alternatives. using multiple methods helps strengthen the reliability of the final decision.

TOPSIS Technique Results

The constructed decision matrix (Table 7) was normalized by using equation 5 and in order to calculate weighted normalized matrix the weights which were calculated (Table 10) was used. Each criterion of the resulting normalized decision matrix is multiplied by its weight coefficient. Then weighted normalized matrix V was formed by using equation 7. Equation 8-12 used for calculating final ranking. Results are tabulated in Table 11.

Table 11. Final Ranking according to TOPSIS technique

Alternative	Symbol	C*	Rank
A1	B0G30	0.870962	11
A2	B0G60	0.789311	9
A3	B0G90	0.689010	8
A4	B10G0	0.848183	10
A5	B10G30	0.610183	7
A6	B10G60	0.512898	6
A7	B10G90	0.407043	4
A8	B20G0	0.498858	5
A9	B20G30	0.247692	3
A10	B20G60	0.145042	2
A11	B20G90	0.111837	1

According to the results summarized in Table 11, the B20G90 fuel mixture demonstrates the highest performance based on the applied evaluation criteria.

Following the results obtained through TOPSIS, the COPRAS method was utilized to assess the stability and reliability of the alternative rankings.

COPRAS Technique Results

The constructed decision matrix (Table 7) was normalized by using equation 13 and in order to calculate weighted normalized matrix the weights which were calculated (Table 10) was used. COPRAS method is implemented by using equation 13-16. Results are tabulated in Table 12.

Table 12. Results of calculations

Alternative	S_i^+	S_i^-	$1/S_i^-$	Q	Q_{max}
A1	0.0221	0.0765	13.0758	0.0835883	0.101146014
A2	0.0225	0.0741	13.4998	0.0860080	
A3	0.0229	0.0724	13.8145	0.0878024	
A4	0.0210	0.0747	13.3786	0.0839323	
A5	0.0218	0.0698	14.3203	0.0891573	
A6	0.0223	0.0677	14.7738	0.0918011	
A7	0.0230	0.0648	15.4302	0.0955005	
A8	0.0208	0.0701	14.2734	0.0879391	
A9	0.0218	0.0645	15.5118	0.0946874	
A10	0.0224	0.0618	16.1776	0.0984375	
A11	0.0229	0.0601	16.6362	0.1011460	

Table 13. Rankings according to COPRAS technique

Alternative	P _{index}	Rank
A1	82.64	11
A2	85.03	9
A3	86.81	8
A4	82.98	10
A5	88.15	6
A6	90.76	5
A7	94.42	3
A8	86.94	7
A9	93.61	4
A10	97.32	2
A11	100.00	1

According to the results obtained, the highest performance is observed in alternative A11 (P11), which corresponds to the B20G90 fuel mixture, indicating its superiority among the evaluated options. To validate and reinforce the findings obtained through COPRAS, the MOOSRA method was subsequently employed.

MOOSRA Technique Results

The MOOSRA technique is implemented using equation (17)-(20). The constructed decision matrix (Table 7) was normalized by using equation 18 and to calculate weighted normalized matrix the weights which were calculated (Table 10) was used. Ranking of the alternatives according to MOOSRA technique is given in Table 14. The data in Table 14 reveal that the B20G90 fuel mixture achieves the best score among the evaluated alternatives.

Table 14. Ranking of the alternatives according to MOOSRA technique

Alternative	Result	Rank
A1	0.85905	11
A2	0.89092	10
A3	0.92732	8
A4	0.92198	9
A5	0.95293	7
A6	1.00259	6
A7	1.05609	5
A8	1.14997	4
A9	1.25325	3
A10	1.34237	2
A11	1.44787	1

To further validate the robustness of the obtained rankings, the MAIRCA method was subsequently employed.

MAIRCA Technique Results

The MAIRCA technique is implemented using equation (21)-(31). The constructed decision matrix (Table 7) was normalized by using equation 22 and to calculate weighted normalized matrix the weights which were calculated (Table 10) was used. Ranking of the alternatives according to MAIRCA technique is given in Table 15. As presented in Table 15, the criterion Q7 demonstrates the highest performance. Consequently, the optimal value is achieved with the B10G90 fuel mixture.

Table 15. Criteria function

Criteria Function Q	Result	Rank
Q1	0.0706753	11
Q2	0.0607130	9
Q3	0.0552399	7
Q4	0.0638812	10
Q5	0.0482981	6
Q6	0.0417328	5
Q7	0.0307711	1
Q8	0.0600658	8
Q9	0.0402530	4
Q10	0.0343406	3
Q11	0.0344513	2

Following the analysis with the MAIRCA method, the next step involves evaluating the alternatives using the MAUT method, which focuses on maximizing or minimizing the criteria values to determine the optimal solution.

MAUT Technique Results

MAUT technique is implemented by using equation (32)–(35). While creating the normalized decision matrix, it is created by maximizing or minimizing. The alternatives are maximized or minimized according to the desired situation. Obtained ranking is shown in Table 16.

Table 16. Final Ranking for MAUT technique

Alternative	Final Score	Rank
A1	0.2393117397	8
A2	0.2742086746	6
A3	0.2936545709	4
A4	0.1231477504	10
A5	0.2221735151	9
A6	0.2761847234	5
A7	0.4921020909	2
A8	0.0769260223	11
A9	0.2369208738	7
A10	0.4234498477	3
A11	0.6438020592	1

As evidenced in Table 16, the optimal value is achieved with the B20G90 fuel mixture. In order to compare the outcomes of different ranking techniques, the MOORA method was also applied to the same dataset.

MOORA Technique Results

The MOORA technique is implemented using equation (36)-(38). The constructed decision matrix (Table 7) was normalized by using equation 37 and in order to calculate weighted normalized matrix the weights which were calculated (Table 10) was used. Ranking of the alternatives according to MOOSRA technique is given in Table 17.

Table 17. Ranks for MOORA technique

	Results	Rank
Y1	-0.2419745	11
Y2	-0.2293383	9
Y3	-0.2206212	7
Y4	-0.2399077	10
Y5	-0.2141201	6
Y6	-0.2023479	5
Y7	-0.1866127	3
Y8	-0.2217227	8
Y9	-0.1925338	4
Y10	-0.1779156	2
Y11	-0.1680528	1

The results indicate that the optimal value is attained with the B20G90 fuel mixture. In order to make a decision 6 different MCDM method used and the ranks were tabulated in Table 18.

Table 18. Comparative rankings of ruel blends by applied MCDM techniques

Alternative	MAIRCA	TOPSIS	MOOSRA	COPRAS	MAUT	MOORA
A1	11	11	11	11	8	11
A2	9	9	10	9	6	9
A3	7	8	8	8	4	7
A4	10	10	9	10	10	10
A5	6	7	7	6	9	6
A6	5	6	6	5	5	5
A7	1	4	5	3	2	3
A8	8	5	4	7	11	8
A9	4	3	3	4	7	4
A10	3	2	2	2	3	2
A11	2	1	1	1	1	1

BORDA Technique Results

There are some differences in the ranks of the preferences so Borda method was used to make the decision more precise. Equation 39 is used for calculating borda number and results are tabulated in Table 19. Once the borda number calculated the ranks are decided. Final rankings were tabulated in Table 20.

Table 19. Final ranking of alternatives using the BORDA technique

Alternative	Borda Number	The Ranks
A1	3	11
A2	14	9
A3	24	7
A4	7	10
A5	25	6
A6	34	5
A7	48	3
A8	23	8
A9	41	4
A10	52	2
A11	59	1

Table 20. Overall performance ranking of Graphene-Biodiesel blends via BORDA count

Alternative	Borda Rank
A1	11
A2	9
A3	7
A4	10
A5	6
A6	5
A7	3
A8	8
A9	4
A10	2
A11	1

From the results obtained according to the BORDA method, it can be seen that the best option is A11. It can be seen from the table 20 that the best value can be obtained from the B20G90 fuel mixture. The rankings obtained from each method are presented in Figure 1. and the final result obtained using the Borda method is also provided.

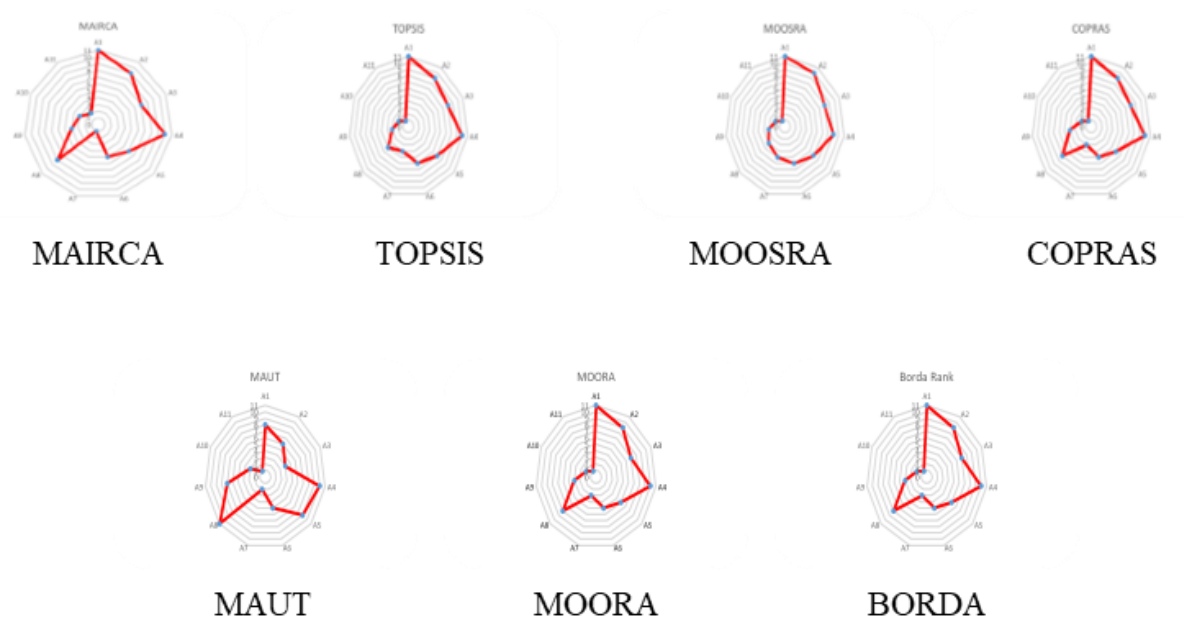


Figure 1. Graphical results of Ranks for MCDM techniques

Conclusion

The quest for sustainable energy sources has been a pressing global concern for decades, driven by the need to mitigate climate change and reduce environmental degradation. Since the Industrial Revolution, reliance on fossil fuels such as coal, oil, and natural gas has been the cornerstone of modern civilization's energy consumption. However, the combustion of these fossil fuels releases significant quantities of greenhouse gases (GHGs), primarily carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and nitrous oxide (N_2O), into the atmosphere, contributing to global warming and climate change. Energy is one of the most important needs for people today. With the introduction of fossil fuels into widespread use and the recognition of their harmful effects, energy production has shifted towards new and more environmentally friendly fuel sources. One of these sources is graphene and graphene oxide, which consist of nanoparticles. Studies on these innovative graphene and graphene oxide-enhanced fuels are promising.

Studies on these innovative graphene and graphene oxide-enhanced fuels are promising. In this study, six different MCDM (Multi-Criteria Decision Making) methods

were employed to evaluate various fuel blends with different graphene ratios. The aim was to identify the most suitable alternative fuel mixture based on multiple evaluation criteria. The rankings obtained from each MCDM method were then consolidated using the Borda count method to ensure a comprehensive and balanced assessment. This integrated approach helps determine the most systematic and reliable option, thereby minimizing uncertainty and risk. Ultimately, the optimal fuel blend was identified according to the given criteria through this multi-method evaluation process.

The research design provides a systematic framework to investigate the effects of graphene-doped fuel blends on greenhouse gas emissions. By applying a structured methodology, this study aims to produce reliable and comprehensive insights into the environmental and technical advantages of using graphene-doped fuels. The integration of MCDM (Multi-Criteria Decision Making) methods enables a balanced assessment of multiple performance criteria, thereby supporting informed decision-making in the field of sustainable fuel development.

Among the six MCDM methods applied, the TOPSIS, COPRAS, MOOSRA, MAUT, and MOORA methods identified A11 (B20G90) as the optimal blend, while the MAIRCA method selected A7 (B10G90). To consolidate these differing rankings and reach a final decision, the Borda count method was employed. This approach involved assigning scores to the alternatives based on their rankings in each method, leading to a unified and systematic selection process. According to the Borda method results, the most suitable option was A11, corresponding to a blend of 20% biodiesel and 90 ppm graphene oxide.

The performance metrics for B20G90 are as follows: density 0.8369 g/cm³, kinematic viscosity 5.5291 mm²/s, higher heating value 44.0134 MJ/kg, cetane number 48.5, brake power 4.4554, specific fuel consumption (SFC) 374.58 g/kWh, CO 1.11%, CO₂ 3.77%, unburned hydrocarbons (UHC) 124.12 ppm, and NO_x 174.32 ppm. These findings indicate that applying such a multi-method decision-making strategy facilitates the identification of the most effective fuel blend among several alternatives.

Acknowledgment:

This study was prepared based on the master's thesis titled “INVESTIGATION OF IMPACTS OF GRAPHENE-DOPED FUEL BLENDS ON GREENHOUSE GAS EMISSIONS” (Master's Thesis, Adana Alparslan Türkeş University of Science and Technology, Adana, Turkey, 2024).

References

Abdulahitoglu A, Kilic M., 2022. A new approach for selecting the most suitable oilseed for biodiesel production; the integrated AHP-TOPSIS method. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3): 101604.

Abdulahitoglu A, Macit İ, Koyuncu M., 2021. Jandarma karakolu kuruluş yerinin AHP-TOPSIS tabanlı bir matematiksel model ile seçimi ve CAS/CBS ile analizi. *Güvenlik Bilimleri Dergisi*, 10(2): 305-338.

Abdulahitoglu A, Vural D, Abdulvahitoglu A., 2023. Optimising traffic safety – Locating traffic gendarmes based on multi-criteria decision making. *Promet - Traffic Transp.* 35: 800–813.

Ağbulut Ü, Elibol E, Demirci T, Sarıdemir S, Gürel AE, Rajak U, Afzal A, Verma TN., 2022. Synthesis of graphene oxide nanoparticles and the influences of their usage as fuel additives on CI engine behaviors. *Energy*, 244: 122603.

Bayindirli C, Celik M, Zan R., 2023. Optimizing the thermophysical properties and combustion performance of biodiesel by graphite and reduced graphene oxide nanoparticle fuel additive. *Engineering Science and Technology an International Journal*. 37: 101295.

Bidir MG, Narayanan KM, Adaramola MS, Hagos FY, Chandra SR., 2023. Investigation of combustion. performance. and emissions of biodiesel blends using graphene nanoparticle as an additive. *International Journal of Engine Research*, 24(11): 4459-4469.

Cai J, Xiao Y, Wang Y, Cai R., 2025. A six - stage evaluation model for optimizing urban EV charging and swapping station locations. *Sustainable Cities and Society*, 125: 106342.

Chacko N, Jeyaseelan T., 2020. Comparative evaluation of graphene oxide and graphene nanoplatelets as fuel additives on the combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel blend. *Fuel Processing Technology*, 204: 106406.

Chen Z, Liu Y, Luo J., 2016. Tribological properties of few-layer graphene oxide sheets as oil-based lubricant additives. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 29(2): 439-444.

Demir G., 2021. Türk çimento firmalarının finansal performansının bulanık SWARA - COPRAS- MAUT yöntemleri ile karşılaştırılması. comparison of the financial performance of turkish cement firms with Fuzzy SWARA-COPRAS- 20: 1875–1892.

Demir G, Özyalçın AT, Bircan H., 2021. Çok kriterli karar verme yöntemleri ve ÇKKV yazılımı ile problem çözümü. Nobel Yayınevi. Ankara.

Emovon I, Oghenenyerovwu OS., 2020. Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review. *Results in Materials*. 7: 100115.

El-Seesy AI, Hassan H, Ookawara SJECE., 2018. Performance combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with Jatropha methyl ester and graphene oxide additives. *Energy Conversion and Management*. 166: 674-686.

El-Seesy AI, Hassan H., 2019. Investigation of the effect of adding graphene oxide graphene nanoplatelet and multiwalled carbon nanotube additives with n-butanol-Jatropha methyl ester on a diesel engine performance. *Renewable Energy*, 132: 558-574.

Feng L, Qin Z, Huang Y, Peng K, Wang F, Yan Y, Chen Y., 2020. Boron- sulfur- and phosphorus-doped graphene for environmental applications. *Science of the Total Environment*, 698: 134239.

Firouzi S, Allahyari MS, Isazadeh M, Nikkhah A, Van Haute S., 2021. Hybrid multi-criteria decision-making approach to select appropriate biomass resources for biofuel production. *Science of the Total Environment*, 770: 144449.

Gogate NG, Shelake Abhaysinha G, Band P., 2023. Selection of most significant risk factors for Indian tunnel projects: an integrated fuzzy-based MCDM approach. *International Journal of Construction Management*, 24(2): 161–176.

García-Orozco S, Vargas-Gutiérrez G, Ordóñez-Sánchez S, Silva R., 2023. Using multi-criteria decision making in quality function deployment for offshore renewable energies. *Energies*, 16(18): 6533.

Heidari-Maleni A, Gundoshmian TM, Jahanbakhshi A, Ghobadian B., 2020. Performance improvement and exhaust emissions reduction in diesel engine through the use of graphene quantum dot (GQD) nanoparticles and ethanol-biodiesel blends. *Fuel*, 267: 117116.

Hoseini SS, Najafi G, Ghobadian B, Mamat R, Ebadi MT, Yusaf T., 2018. Novel environmentally friendly fuel: The effects of nanographene oxide additives on the performance and emission characteristics of diesel engines fuelled with Ailanthus altissima biodiesel. *Renewable Energy*, 125: 283-294.

Hoseini SS, Najafi G, Ghobadian B, Ebadi MT, Mamat R, Yusaf TJRE., 2020. Performance and emission characteristics of a CI engine using graphene oxide (GO) nanoparticles additives in biodiesel-diesel blends. *Renewable Energy*, 145: 458-465.

Hoseini SS, Najafi G, Ghobadian B, Ebadi MT, Mama R, Yusaf TJRE., 2020. Biodiesels from three feedstock: The effect of graphene oxide (GO) nanoparticles diesel engine parameters fuelled with biodiesel. *Renewable Energy*, 145: 190-201.

Khan F, Karimi MN, Khan O, Yadav AK, Alhodaib A, Gürel AE, Ağbulut Ü., 2024. A hybrid MCDM optimization for utilization of novel set of biosynthesized nanofluids on thermal performance for solar thermal collectors. *International Journal of Thermofluids*, 22: 100686.

Montella L, Liu X, Monaco R, Murino T, Nielsen PS., 2025. An integrated multi-criteria decision making framework for industrial excess heat recovery and utilization. *Energy*, 318: 134721.

Muralidharan K, Vasudevan D., 2011. Performance emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine using methyl esters of waste cooking oil and diesel blends. *Applied Energy*, 88: 3959-3968.

Murugan N, Venu H, Jayaraman J, Appavu P., 2022. Emission and performance characteristics study on nanographene oxide additives doped palm oil methyl ester blend in a diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1): 1304-1310.

Nair J, Prasad Kumar P, Thakur AK, Samhita S, Aravinda A., 2021. Influence on emissions and performance of CI engine with graphene nanoparticles blended with Karanja biodiesel. In *AIP Conference Proceedings*, 2317: 1, AIP Publishing.

Ooi JB, Ismail HM, Swamy V, Wang X, Swain AK, Rajanren JR., 2016. Graphite oxide nanoparticle as a diesel fuel additive for cleaner emissions and lower fuel consumption. *Energy & Fuels*, 30(2): 1341-1353.

Özdemir A, Özkan A, Günkaya Z., 2024. What is the best option for surgical face mask wastes treatment? Integrated LCA and MCDM methodologies. *International Journal of Environmental Science Technology*, 21: 8157–8172.

Parvaneh F, Hammad A., 2024. Application of multi-criteria decision-making (MCDM) to select the most sustainable power-generating technology. *Sustainability*, 16(8): 3287.

Phiri J, Gane P, Maloney TC., 2017. General overview of graphene: Production. properties and application in polymer composites. *Materials Science and Engineering B*, 215: 9-28.

Pireh ME, Parashkoohi MG, Zamani DM., 2022. Evaluation of combustion characteristics performances and emissions of a diesel engine using diesel and biodiesel fuel blends containing graphene oxide nanoparticles. *Open Agriculture*, 7(1): 935-947.

Rahman Md M, Mainul Bari ABM, Ali SM, Taghipour A., 2022. Sustainable supplier selection in the textile dyeing industry: An integrated multi-criteria decision analytics approach. *Resources. Conservation & Recycling Advances*, 15: 200117.

Rajpoot AS, Choudhary T, Chelladurai H, Patel NK., 2023. Effect of graphene nanoparticles on the behavior of a CI engine fueled with Jatropha biodiesel. *Materials Today, Proceedings*.

Sharma V, Hossain AK, Ahmed A, Rezk A., 2022. Study on using graphene and graphite nanoparticles as fuel additives in waste cooking oil biodiesel. *Fuel*, 328: 125270.

Pankaj P Awate. Shivprakash B., 2022. Barve graphene/Al6061 nanocomposite selection using TOPSIS and EXPROM2 multi-criteria decision-making methods. *Materials Today: Proceedings*, 62: 6425–6431.

Vazquez A, Astariz S, Iglesias G., 2015. A strategic policy framework for promoting the marine energy sector in Spain. *Journal of Renewable Sustainable Energy*, 7(6): 061702.

Yannis G, Kopsacheili A, Dragomanovits A, Petraki V., 2020. State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(4): 413-431.

Yapay Zeka Destekli Analiz ile Van İli İpekyolu İlçesi Mahallelerinin Ruminant Hayvan Varlığı ve Mera Kaynakları Bakımından Karşılaştırılması*

Naci ÖZELER¹, Ayşe Özge DEMİR^{2**}

¹İpekyolu İlçe Tarım ve Orman Müdürlüğü, Van

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Van

¹<https://orcid.org/0009-0003-2333-4396>

²<https://orcid.org/0000-0001-7203-4734>

*Bu çalışma, birinci isimli yazarın lisans bitirme tezinden türetilmiştir.

**Sorumlu yazar: aodemir@yyu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 05.06.2025

Kabul tarihi:30.07.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Kümeleme analizi

Outlier analizi

Ruminant

Yapay zeka

TURKVET

ÖZ

Kırsal hayvancılığın sürdürülebilirliği, mera varlığı ile hayvan yoğunluğu arasındaki dengenin korunmasına bağlıdır. Bu çalışmada, Van ili İpekyolu ilçesindeki 43 mahallede ruminant hayvan varlığı ve mera kaynakları, Yapay Zeka (YZ) destekli kümeleme ve uç değer analizleriyle değerlendirilmiştir. TURKVET sisteminden elde edilen veriler kullanılarak mahalleler, büyükbaş ve küçükbaş hayvan sayıları ile mera alanı gibi değişkenler doğrultusunda sınıflandırılmıştır. Çalışma kapsamında üç temel küme yapısı belirlenmiştir: Küme 0, küçükbaş hayvan varlığının ve mera alanının yüksek olduğu; Küme 1, büyükbaş hayvan varlığı ile mera alanının dengeli olduğu; Küme 2 ise büyükbaş hayvan yoğunluğunun yüksek, mera alanının ise sınırlı olduğu mahalleleri kapsamaktadır. Ayrıca Erçek, Karagündüz ve Yalınağaç mahalleleri büyükbaş hayvan sayıları bakımından uç değer olarak tanımlanmış ve analiz dışı bırakılmıştır. Görsel analizler (boxplot, scatterplot, dendrogram) kullanılarak mahalleler arasındaki yapısal farklılıklar sezgisel biçimde ortaya konmuştur. Bulgular, bazı mahallelerde işletme sayısının yüksek olmasına rağmen mera alanının sınırlı olduğunu; bazı mahallelerde ise geniş mera alanlarına karşın işletme sayısının düşük kaldığını göstermektedir. Bu durum, hayvancılık faaliyetlerinde farklı üretim sistemlerinin (mera temelli vs. kapalı sistem) mahalle düzeyinde nasıl şekillendiğine dair önemli ipuçları sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, mera planlaması, destekleme politikaları ve kırsal kalkınma stratejileri açısından karar vericilere yol gösterici niteliktedir.

A Comparison of Ruminant Livestock and Pasture Resources in the Neighborhoods of İpekyolu District, Van Province Using Artificial Intelligence-Based Analysis

Research Article

Article History:

Received: 05.06.2025

Accepted: 30.07.2025

Available online:12.09.2025

Keywords:

Clustering analysis

Outlier analysis

Ruminant

Artificial intelligence

ABSTRACT

The sustainability of rural livestock production depends on maintaining a balance between pasture availability and animal density. In this study, ruminant livestock populations and pasture resources across 43 neighborhoods in the İpekyolu district of Van Province were evaluated using Artificial Intelligence (AI) assisted clustering and outlier detection methods. Data retrieved from the national TURKVET system were used to classify the neighborhoods based on variables such as cattle and small ruminant numbers and available pasture area. Three main clusters were identified in the analysis: Cluster 0 included neighborhoods with high

numbers of small ruminants and large pasture areas; Cluster 1 consisted of neighborhoods with a balanced distribution of cattle and pasture resources; and Cluster 2 encompassed neighborhoods with high cattle density but limited pasture availability. Additionally, Erçek, Karagündüz and Yalınağaç were identified as outliers in terms of cattle population and were excluded from the clustering analysis. Visual analyses such as boxplots, scatterplots and dendrograms were employed to intuitively reveal structural differences between the neighborhoods. The results indicate that in some neighborhoods, despite a high number of livestock enterprises, pasture resources are limited, while in others, extensive pasture areas exist alongside a relatively low number of enterprises. This reflects the variation in livestock production systems at the neighborhood level ranging from grazing based to more confined, feed based operations. These findings offer important insights for pasture management, subsidy allocation policies and the formulation of rural development strategies.

To Cite: Özeler N, Demir AÖ., 2025. Yapay zeka destekli analiz ile Van İli İpekyolu İlçesi mahallelerinin ruminant hayvan varlığı ve mera kaynakları bakımından karşılaştırılması. Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(2): 328-342.

Giriş

Kırsal hayvancılığın sürdürülebilirliğini sağlayan en temel unsurlardan biri, mera alanlarının etkin kullanımı ve hayvan yoğunluğu arasındaki dengenin korunmasıdır (Silanikove, 2000). Mera kaynaklarının aşırı kullanımı, toprak bozunumu, verim kaybı ve biyolojik çeşitlilikte azalmaya yol açarak üretim sistemlerinin sürdürülebilirliğini tehlikeye atmaktadır (Gerber ve ark., 2013; FAO, 2020). Geleneksel yöntemlerle bu dengenin değerlendirilmesi sınırlı bir görünürlük sağlarken (Wang ve ark., 2024), son yıllarda Yapay Zeka (YZ) destekli analiz yöntemleri, tarım ve hayvancılık sistemlerine yenilikçi çözümler getirmiştir (Kamilaris ve Prenafeta-Boldú, 2018). Özellikle kümeleme algoritmaları, farklı yapısal özelliklere sahip bölgelerin benzerlik temelli sınıflandırılmasını sağlayarak, yerel kalkınma stratejilerinin mikro düzeyde şekillendirilmesine olanak tanımaktadır (Xu ve Tian, 2015; Xie ve ark., 2021).

Yapay zeka tabanlı modeller, hayvan yoğunluğunu, mera kaynaklarının kullanımını ve işletme verimliliğini çok değişkenli yapılarla analiz etme imkanı sunmaktadır. Özellikle uzaktan algılama (remote sensing), bilgisayarla görme (computer vision) ve makine öğrenimi (machine learning) algoritmaları kullanılarak elde edilen desenler, kırsal planlamada önemli avantajlar sağlamaktadır (Nasirahmadi ve ark., 2017; Liakos ve ark., 2018). Örneğin, pasture suitability modelling, livestock movement optimization ve entegre üretim planlaması gibi konularda derin öğrenme temelli sistemler başarılı sonuçlar vermektedir (Bokani ve ark., 2025).

Bu çalışma, Van ili İpekyolu ilçesindeki mahallelerin tamamının TURKVET sisteminde kayıtlı Nisan 2025 tarihine ait ruminant hayvan varlığı ve mera dağılımını YZ destekli kümeleme ve uç değer analizleriyle inceleyerek, mekansal desenleri sınıflandırmayı amaçlamaktadır.

Materyal ve Metot

Çalışma Alanı ve Veri Kaynağı

Bu araştırma, Türkiye'nin doğusunda yer alan Van ili İpekyolu ilçesine bağlı, 33'ü meralı ve 10'u merasız toplam 43 mahalleyi kapsamaktadır. Söz konusu mahallelerin mera kapasitesi ve ruminant hayvan varlığının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Veri seti, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı'na bağlı TURKVET sisteminden 2025 yılı Nisan ayında temin edilmiş, her mahalleye ait beş temel değişken analiz kapsamına alınmıştır:

- Mera alanı (hektar)
- Büyükbaş hayvan sayısı
- Küçükbaş hayvan sayısı
- Büyükbaş işletme sayısı
- Küçükbaş işletme sayısı

Bu değişkenler, hayvan yoğunluğu ile mera kapasitesi arasındaki dengenin mekansal düzeyde analiz edilmesine olanak tanımıştır.

Veri Temizleme ve Ön İşlemler

İstatistiksel analiz öncesinde kapsamlı bir veri temizleme süreci gerçekleştirilmiştir. Mera ile ilişkilendirilen analizlerde öncelikle mera alanı olmayan mahalleler veri seti dışı bırakılmıştır. Ardından, uç değerleri belirlemek için Tukey'in IQR (Interquartile Range) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, Q1 (birinci çeyrek) ve Q3 (üçüncü çeyrek) değerleri hesaplanarak, aralığın 1,5 katı dışında kalan gözlemler uç değer (outlier) olarak tanımlanmış ve analizden çıkarılmıştır (Tukey, 1977). Bu yaklaşım, veri dağılımındaki aykırı gözlemlerin merkezi eğilimleri bozmasının önüne geçmek amacıyla tercih edilmiştir. Uç değerlerin analiz dışı bırakılması, aykırı gözlemlerin gruplama sonuçlarını çarpıtmasının önüne geçmekte (Chu, 2011; Wang ve ark., 2024) ve kümeleme analizlerinin homojenliği ile istatistiksel geçerliliğini artırmaktadır (Leys ve ark., 2013).

Analitik Ortam ve Yazılım Araçları

Tüm analizler Python 3.10+ programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veri işleme, istatistiksel özetleme ve görselleştirme işlemleri aşağıdaki açık kaynak kütüphaneler aracılığıyla yürütülmüştür:

- pandas: Veri çerçevesi yönetimi, tanımlayıcı istatistik hesaplamaları
- matplotlib ve seaborn: Görsel sunumlar (boxplot, scatterplot, barplot)
- scikit-learn: Standartlaştırma işlemleri (StandardScaler), K-means kümeleme analizi

- `scipy.cluster.hierarchy`: Hiyerarşik kümeleme ve Ward yöntemi ile dendrogram üretimi
- `python-docx`: Otomatik Word raporları oluşturma

Bu yazılım araçları, çok değişkenli yapısal verilerin hem matematiksel hem de görsel olarak analiz edilmesine olanak tanımış ve karmaşık verilerin analitik modelleme ile görsel olarak sunulmasını (Witten ve ark., 2016; Kamilaris ve Prenafeta-Boldú, 2018) derin öğrenme ve makine öğrenmesi çalışmalarında olduğu gibi (Rico-Chávez ve ark., 2022) mümkün kılmıştır.

Kümeleme Analizleri ve Sınıflandırma Yaklaşımı

Araştırmada, mahalleler arası yapısal benzerliklerin belirlenmesi amacıyla iki farklı kümeleme algoritması uygulanmıştır:

1. K-means Kümeleme: Mahalleler, hayvan varlığı ve mera alanı gibi sayısal özellikler temelinde gruplandırılmıştır. Öncelikle veriler `StandardScaler` ile normalize edilmiş, ardından optimal küme sayısı “dirsek yöntemi (elbow method)” ile belirlenmiştir. K-means, homojen grupların oluşturulmasında etkili bir yapay öğrenme yöntemidir (Xu ve Tian, 2015; Witten ve ark., 2016).
2. Hiyerarşik Kümeleme: Ward yöntemiyle, mahalleler arası benzerlikler temelinde görsel olarak analiz edilmiş, dendrogram yardımıyla alt gruplar arasındaki yapısal ayrışma detaylandırılmıştır. Bu yöntem, özellikle mekansal kümelerin görsel olarak tanımlanmasında etkilidir (Xu ve Tian, 2015; Xie ve ark., 2021; Wang ve ark., 2024).

Görselleştirme ve Mekansal Desen Sunumu

Çalışmada tüm analiz sonuçları, karar vericiler için kolay yorumlanabilir olacak şekilde görselleştirilmiştir. Özellikle:

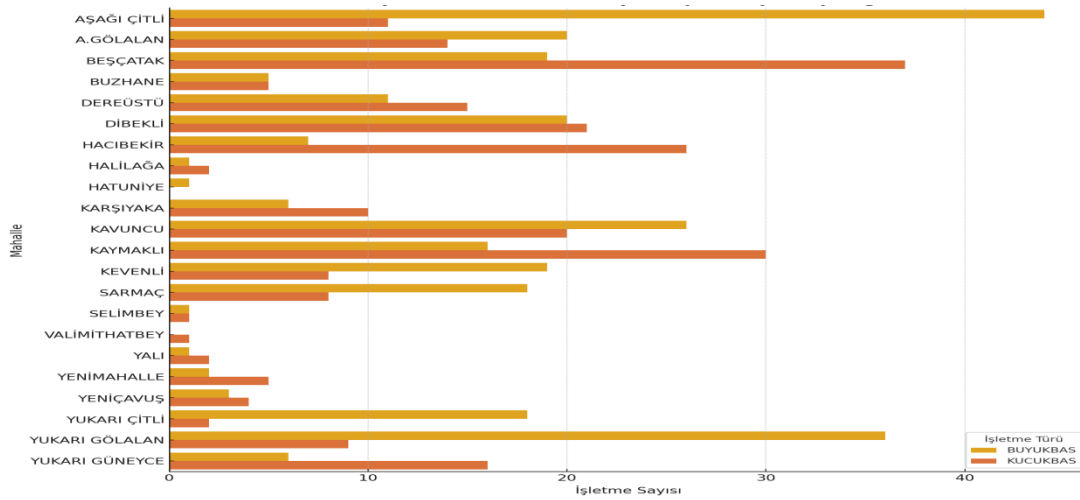
- Boxplot → Gruplar arası değişken dağılımlarının medyan ve yayılımını göstermiştir.
- Scatterplot → Mera alanı ve hayvan varlığı arasındaki doğrusal desenleri sunmuştur.
- Barplot → Mahallelerin toplam hayvan ve işletme sayılarını karşılaştırmalı sunmuştur.
- Dendrogram → Mekansal yapının hiyerarşik örüntülerini tanımlamıştır.

Bu görsel analizler, YZ örüntüleri görünür kılmadaki en güçlü araçlarından biridir (Nasirahmadi ve ark., 2017; Rico-Chávez ve ark., 2022).

Bulgular

Temel Tanımlayıcı İstatistikler ve Uç Değerler

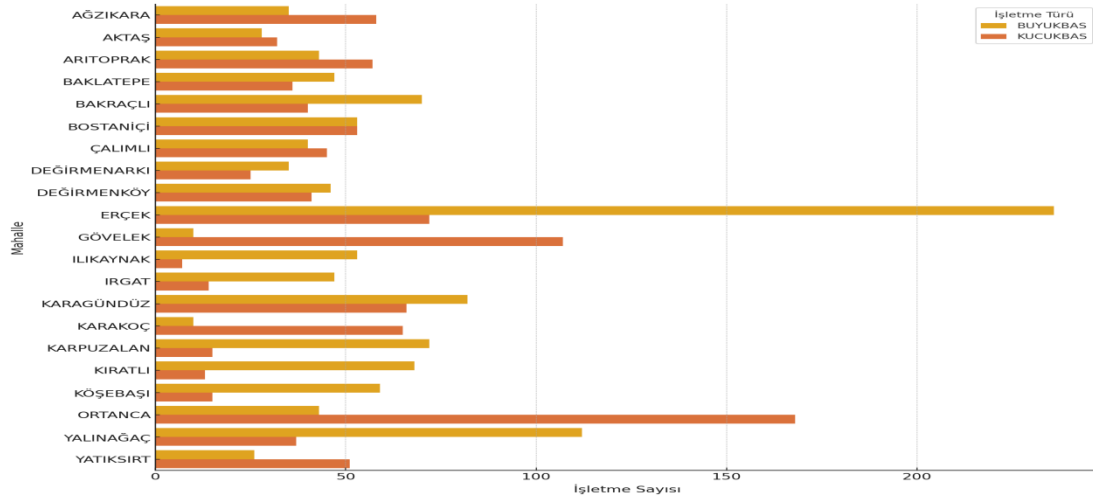
Veri seti üzerinde yapılan tanımlayıcı istatistik analizler, mahalleler arasında mera alanı, hayvan sayıları ve işletme yoğunluklarında önemli varyasyonlar olduğunu göstermiştir. Tüm mahalleler dikkate alındığında büyükbaş ve küçükbaş hayvanların oluşturduğu toplam işletme sayısının medyan değeri 56,0 olarak hesaplanmış ve bu değeri taşıyan mahallenin Beşçatak olduğu belirlenmiştir. Bu tür medyan eşleşmeleri, istatistiksel dağılımın merkezsel eğilimi hakkında güçlü bir gösterge sunmuştur (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. Medyan altı mahallelerde büyükbaş ve küçükbaş işletme dağılımı

Bu görsel, toplam işletme sayısı medyan değerinin altında kalan mahallelerde, büyükbaş ve küçükbaş işletme sayılarının dağılımını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Görsel incelendiğinde, bazı mahallelerde küçükbaş işletmelerin baskın olduğu, bazılarında ise büyükbaş işletmelerin ön plana çıktığı gözlenmektedir. Örneğin, Vali Mithatbey Mahallesinde yalnızca küçükbaş işletme bulunurken, Hatuniye Mahallesinde yalnızca büyükbaş işletme kayıtlıdır. Bu durum, kırsal hayvancılık yapısının homojen olmadığını ve tür tercihlerinin mahalle bazında önemli ölçüde farklılaştığını göstermektedir.

Bu farklılaşmanın temelinde coğrafi konumu ve üretim alışkanlıkları gibi yapısal faktörlerin yanında koşullara bağlı olarak çoğunlukla celeplik hayvan yetiştirme tercihinin yattığı düşünülmektedir. Örneğin, Vali Mithatbey Mahallesi gibi yalnızca küçükbaş işletmeye sahip alanlar ile Hatuniye gibi yalnızca büyükbaş işletme barındıran mahallelerde, mera bulunmaması yada kapalı sistem besicilik alışkanlıklarının yerleşik olması, büyükbaş hayvancılığı ön plana çıkarmaktadır. Bu durum, mahallelerin fiziki çevre özelliklerinin ve yerel üretici tercihlerinin hayvansal üretim desenini doğrudan şekillendirdiğini göstermektedir.



Şekil 2. Medyan üstü mahallelerde büyükbaş ve küçükbaş işletme dağılımı

Görselde toplam işletme sayısı medyan değer üzerinde olan mahallelerdeki büyükbaş ve küçükbaş işletme sayıları sunulmaktadır. Dikkat çeken temel bulgu, işletme sayısının medyan üstü olduğu mahallelerde medyan altı mahallelere göre tür bazında daha dengeli bir dağılımın ortaya çıkmasıdır. Birçok mahallede hem büyükbaş hem de küçükbaş işletmeler birlikte bulunmaktadır ve bunlar genellikle benzer sayılara sahiptir. Bu mahallelerin daha gelişmiş, yoğun üretim sistemlerine sahip olduğu ve hem küçükbaş hem de büyükbaş hayvancılığı entegre biçimde yürüttüğü tahmin edilmektedir. Ayrıca büyükbaş hayvan sayısı bakımından üç mahalle uç değer (outlier) olarak tanımlanmış ve bu mahalleler analiz dışı bırakılmıştır. Bu durum, söz konusu mahallelerde hayvan varlığının diğerlerine kıyasla istatistiksel olarak çok yüksek olduğunu ve genel kümelenme yapısını bozabileceğini ortaya koymuştur. Küme 0: Geniş meraya sahip küçükbaş ağırlıklı mahalleleri, Küme 1: Dengeli yapıya sahip mahalleleri, Küme 2: Büyükbaş yoğunluğu yüksek ancak merası sınırlı alanları kapsamaktadır (Tablo 1).

Küme 0: Bu kümede küçükbaş hayvan sayısı belirgin biçimde yüksektir ve mera varlığı da oldukça fazladır. Buna karşılık büyükbaş hayvan sayısı oldukça düşüktür. Bu yapı, küçükbaş hayvancılığın yoğun biçimde yapıldığı ve otlatmaya dayalı mera temelli sistemlerin hakim olduğu mahalleleri temsil etmektedir.

Küme 1: Büyükbaş hayvan sayısı düşük olmakla birlikte mera varlığı yüksektir. Buna karşın küçükbaş hayvan sayısı oldukça sınırlıdır. Bu yapı, hayvancılığın meraya dayalı besleme sistemlerinin kullanıldığı bölgeleri işaret etmektedir.

Küme 2: Bu kümede mera alanı diğer kümelerle kıyasla sınırlıdır. Bu durum, hayvancılık faaliyetlerinin görece daha zayıf olduğu, belki de kentsel yakınlığı olan veya başka ekonomik faaliyetlerin ön planda olduğu mahalle yapısına işaret etmektedir.

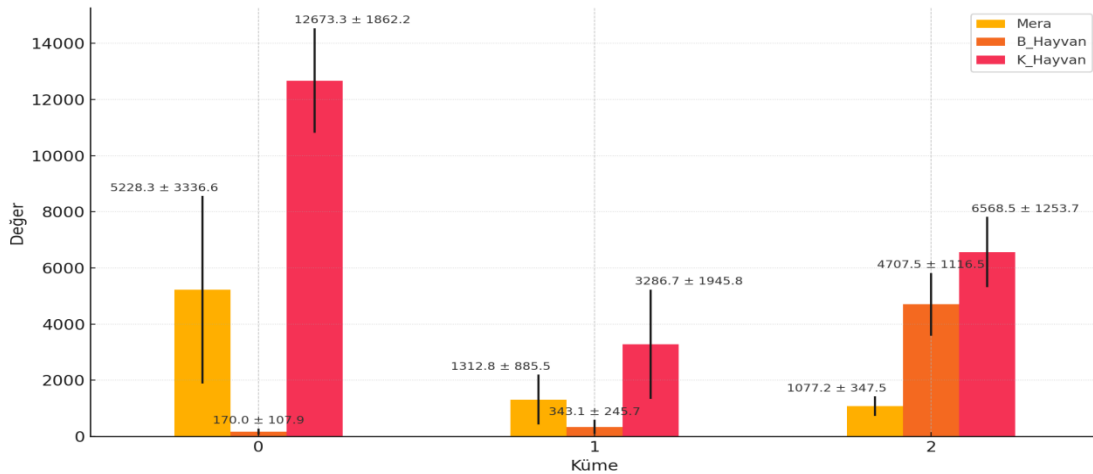
Tablo 1. Büyükbaş hayvan sayısı bakımından kümeleme analizi sonuçları

Küme	Mahalle	Mera (ha)	Büyükbaş sayısı	işletme	Büyükbaş sayısı	hayvan	Küçükbaş sayısı	işletme	Küçükbaş sayısı	hayvan
0	Bostaniçi*	621.16	53		1073**		53		14571	
	Aritoprak	2665.56	43		259		57		10937	
	Gövelek	4018.31	10		50		107		12443	
	Ortanca	9001.17	43		201		168		14640	
1	Yukarı Çitli	0.20	18		499		2		10	
	Karpuzalan	130.47	72		438		15		2937	
	Değirmenarkı	356.25	35		519		25		3237	
	Kıratlı	436.79	68		727		13		1076	
	Baklatepe	457.39	47		540		36		4045	
	A.Gölalan	588.40	20		211		14		2366	
	Dereüstü	619.88	11		145		15		2493	
	Sarmaç	668.75	18		72		8		634	
	Kavuncu	707.13	26		179		20		1561	
	Dibekli	803.40	20		139		21		3430	
	Aşağı Çitli*	854.76	44		1574**		11		2204	
	Kevenli	883.96	19		125		8		2350	
	Ilıkaynak	1107.87	53		454		7		978	
	Aktaş	1140.76	28		943		32		3605	
	Köşebaşı	1302.80	59		446		15		1270	
	Beşçatak	1460.24	19		75		37		2825	
	Kaymaklı	1467.47	16		121		30		3565	
	Değirmenköy	1597.88	46		192		41		3978	
	İrgat	1828.95	47		461		14		1512	
	Ağzıkara	1912.69	35		271		58		5044	
	Yukarı	2011.17	6		34		16		6997	
	Güneyce									
	Karagündüz*	2152.54	82		1623**		66		7063	
	Yukarı Gölalan	2192.07	36		439		9		4562	
	Çalıklı	2558.44	40		517		45		5175	
	Yatıksirt	2652.38	26		248		51		7068	
	Bakraçlı	2697.21	70		750		40		5223	
	Karakoç	3237.49	10		32		65		6227	
2	Erçek	831.48	236		3918		72		7455	
	Yalınağaç	1322.85	112		5497		37		5682	

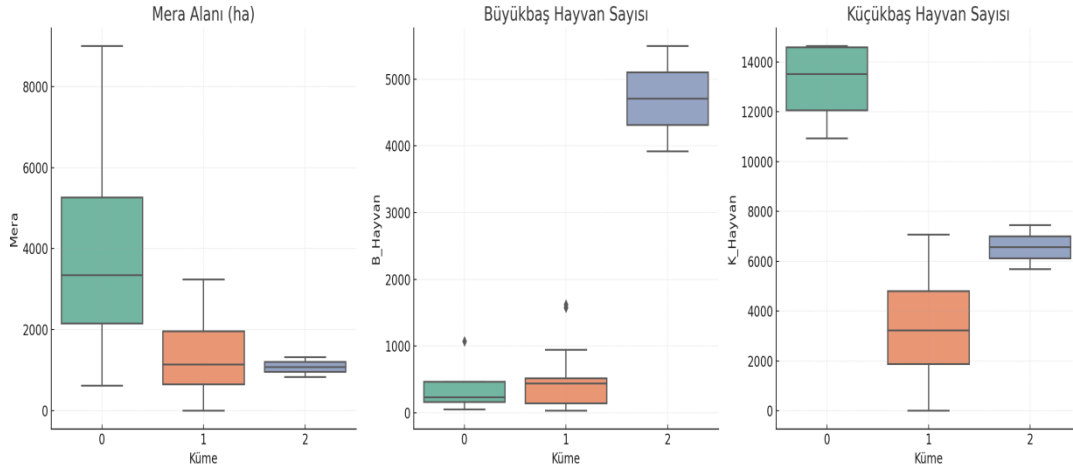
**Büyükbaş hayvan sayısı bakımından *Uç değer olarak belirlenen ve analiz dışı bırakılan mahalleler

Kümeleme Analizleri ve Mekânsal Sınıflandırma

Mahallelerin benzer özellik gösteren gruplara ayrılması, üretim yapısının desenlerini daha görünür hale getirmiştir. Aşağıda sunulan her bir küme için büyükbaş hayvan sayısı, küçükbaş hayvan sayısı ve toplam mera alanını ortalamalarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır (Şekil 3).

**Şekil 3.** Mahallelerin (uç değerler hariç) ortalama değerleri

Kümelerin bir başka ifade biçimi aşağıda Boxplot olarak sunulmuştur (Şekil 4).

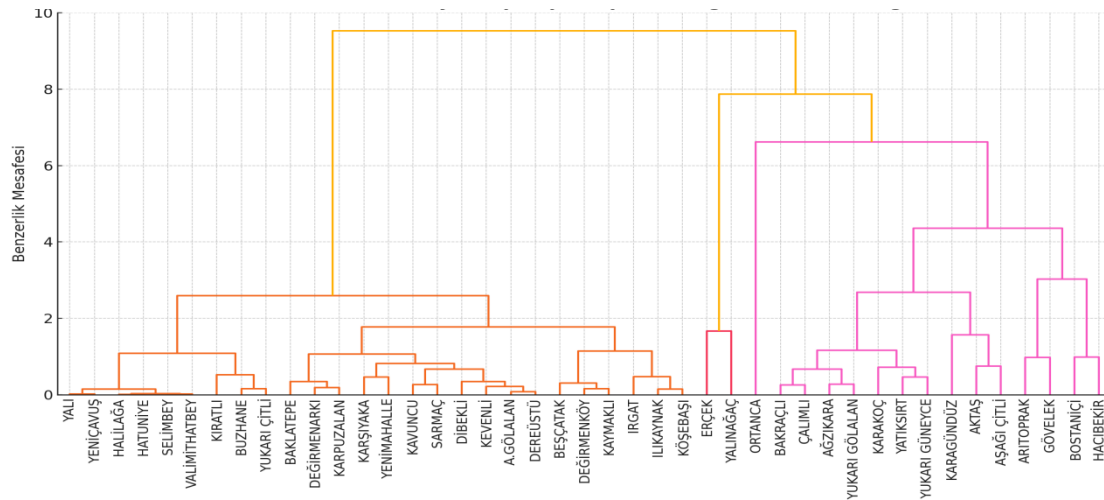


Şekil 4. Kümelere göre değişkenlerin dağılımı

Bu kümeler hem renk kodlamalarıyla hem de boxplot grafiklerinde belirgin şekilde ayrılmıştır. Görsel analizler, kümeler arası dağılım farklarını netleştirerek, mahallelerin hayvancılık yapısına dayalı sınıflandırılmasını kolaylaştırmıştır. Özellikle Küme 2'deki yoğunlaşma, destekleme politikalarının bu bölgelere daha dikkatli uygulanması gerektiğine işaret etmektedir.

Hiyerarşik Kümeleme ve Yapısal Farklılıklar

Mahallelerin hayvancılık ve mera göstergeleri, Ward yöntemi ile yapılan hiyerarşik kümeleme analizine tabi tutulmuş ve sonuçlar dendrogram (ağaç diyagramı) formunda görselleştirilmiştir. Dendrogramda, benzerlik düzeylerine göre mahalleler gruplandırılmış; özellikle Küme 0 ve Küme 2 mahalleleri arasında yapısal olarak anlamlı ayrımlar gözlemlenmiştir (Şekil 5).



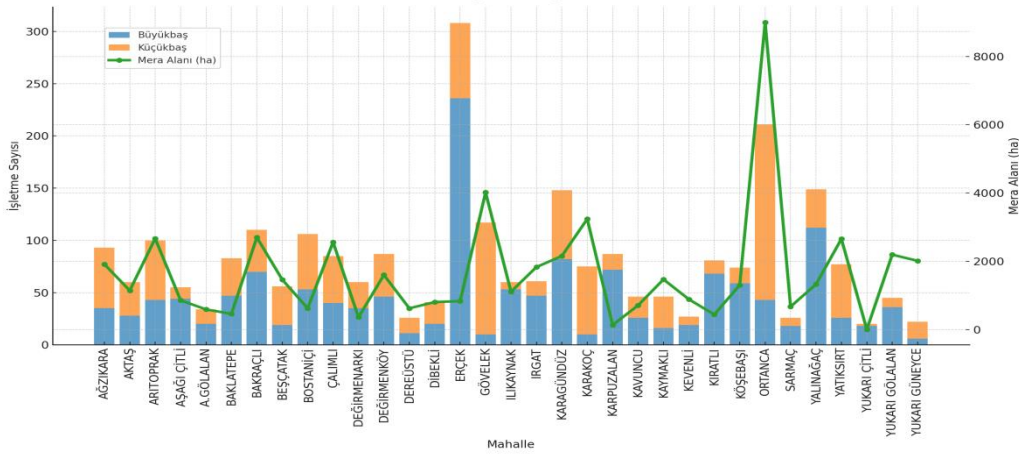
Şekil 5. Mahallelerin mera, büyükbaş ve küçükbaş benzerliğine göre dendrogramı

Ağaç yapısında gözlemlenen ayrımlar, hem hayvan türü yoğunluğu (büyükbaş ve küçükbaş) hem de mera kapasitesi açısından dikkat çekici örüntüler sunmuştur. Düşey eksenle kümeler arasındaki uzaklıkların görselleştirilmesi sayesinde, mahallelerin benzerlik düzeylerine göre sınıflanması karar vericiler için oldukça sezgisel hale gelmiştir.

Bu analiz, klasik K-means sınıflandırmasının ötesinde, mahalleler arası doğal hiyerarşiyi ve alt grup yapısını da açığa çıkarmıştır. Özellikle benzer özelliklere sahip ancak farklı kümelerde yer alan sınır mahallelerin belirlenmesi, yerel yönetimler için stratejik planlama fırsatları yaratmaktadır.

Hayvan Varlığı ve İşletme Dağılımına Dayalı Görsel Karşılaştırmalar

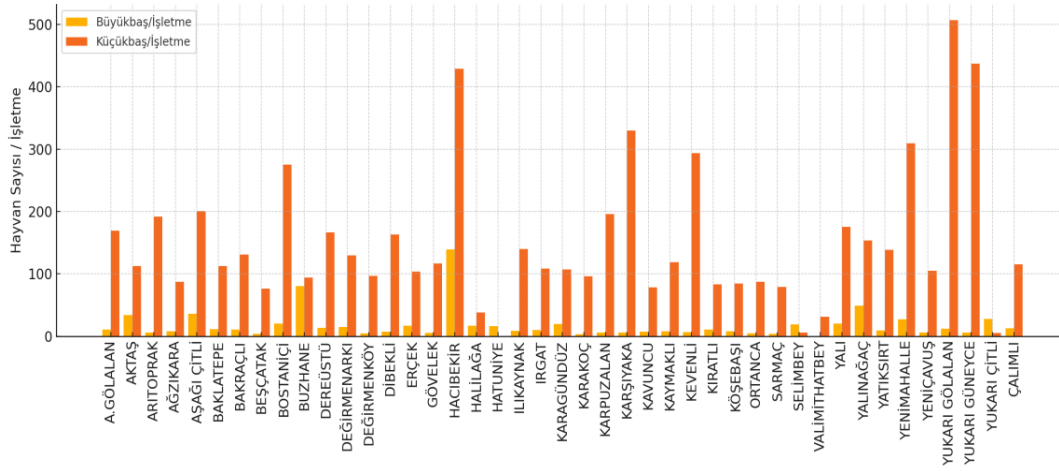
Hayvancılık faaliyetlerinin mekansal yoğunluğunu daha net ortaya koymak amacıyla, mahalle düzeyinde hayvan varlığı ve işletme sayıları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Aşağıdaki grafikte, mahalle bazında işletme sayısı ve mera alanı karşılaştırması, bölgesel üretim desenlerinin çeşitliliğini ve yapısal farklılıkları gözler önüne sermektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Mahalle bazında işletme sayısı ve mera alanı

Mera alanı olan mahallelerin işletme sayıları bakımından oldukça farklı yapılar sergilediği görülmektedir. Ortanca ve Yukarı Gölalan gibi bazı mahallelerde mera alanı geniş olmasına rağmen işletme sayısı görece azdır. Diğer yandan Erçek, Karagündüz, Yalınağaç ve Bostaniçi gibi mahallelerde mera alanı az olmasına rağmen işletme sayıları fazladır.

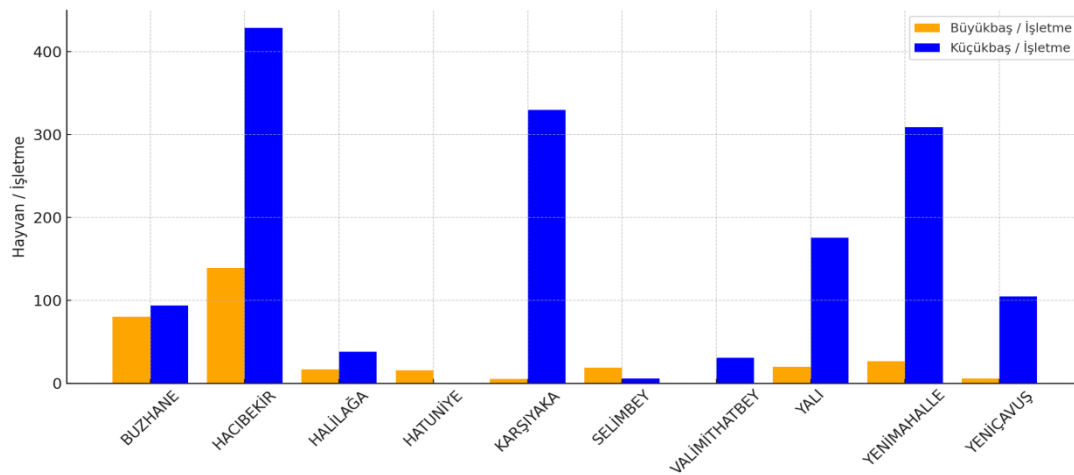
Mahalle düzeyinde yapılan karşılaştırmalı barplot analizleri, hayvan türlerine (büyükbaş ve küçükbaş) ve işletme sayılarına göre dikkat çekici dağılımlar ortaya koymuştur (Şekil 7).



Şekil 7. Mahallelerin işletme başına hayvan sayısı

İşletme başına küçükbaş hayvan sayısının en yüksek olduğu mahalleler sırasıyla Yukarı Gölalan, Yukarı Güneyce ve Hacibekir'dir. Bu durum, küçükbaş hayvanların daha az sayıda büyük işletmelerde yoğunlaştığını düşündürmektedir. Diğer yandan işletme başına büyükbaş hayvan sayısının en yüksek olduğu mahalleler sırasıyla Hacibekir, Buzhane ve Yalinağaç'tır.

Büyükbaş hayvan yetiştiriciliğinin sadece meraya dayalı olarak değil, aynı zamanda kapalı veya yarı kapalı sistemlerde de sürdürüldüğü bilinmektedir. Bu bağlamda, mera alanı olmayan mahallelerde yürütülen hayvancılık faaliyetlerinin işletme yoğunluğu açısından nasıl bir yapı sergilediğini analiz etmek önemlidir. Aşağıda sunulan grafik, mera alanı olmayan mahallelerde büyükbaş ve küçükbaş hayvan varlıklarının işletme başına düşen oranlarını karşılaştırmalı biçimde sunmakta ve bu yerleşimlerdeki üretim ölçeği hakkında önemli ipuçları vermektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Mera alanı olmayan mahallelerde işletme başına hayvan sayısı

Grafikte sunulan bulgular, mera alanı olmayan mahallelerde işletme başına düşen hayvan sayısının genellikle düşük ila orta düzeyde seyrettiğini göstermektedir. Bu durum, kapalı sistem hayvancılığın daha küçük ölçekli, aile işletmeleri düzeyinde sürdürüldüğünü düşündürmektedir. Özellikle küçükbaş hayvancılıkta bazı mahallelerde işletme başına hayvan sayısının yüksek olduğu görülse de, büyükbaş hayvancılık genellikle daha dağınık ve düşük yoğunlukta yürütülmektedir. Bu yapı, yem temelli üretimin maliyet baskısıyla sınırlı kaldığını ve mera alanı olmayan mahallelerde hayvancılığın daha düşük kapasiteli işletmeler tarafından sürdürüldüğünü ortaya koymaktadır. Bulgular, destekleme ve altyapı politikalarının bu tür mahallelerde ölçek büyütme ve yem temini kolaylaştırma hedefiyle yeniden şekillendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Bu sunum biçimi, mikro bölgesel analizler açısından karar vericilere önemli ipuçları sunmaktadır. Örneğin, benzer işletme sayılarına sahip ancak farklı kümelerle düşen mahalleler, yerel politika geliştirme açısından yeniden değerlendirilmesi önerilir.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, Van ili İpekyolu ilçesine bağlı mahallelerde mera alanı ve ruminant hayvan varlığına ilişkin mekansal örüntüleri, istatistiksel ve YZ destekli analiz yöntemleriyle ortaya koymuştur. Bulgular, mera alanı ile hayvan yoğunluğu arasında belirgin bölgesel farklılıklar bulunduğunu göstermiştir. Özellikle, küçükbaş hayvan varlığının yüksek olduğu mahallelerin daha geniş mera alanlarına sahip olması, türlerin ekolojik ihtiyaçlarıyla uyumlu bir dağılıma işaret etmektedir ki bu beklenen bir sonuçtur. Bu durum, yaygın otlatma sistemlerinde mera varlığının küçükbaş hayvancılık için kritik bir kaynak olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır (Silanikove, 2000). Bu çalışma, bilinen ekolojik ilişkileri yeniden teyit etmekle kalmayıp, YZ destekli analizlerle bu ilişkilerin mekânsal örüntülerini yüksek çözünürlükte ve veri odaklı biçimde görünür kılarak, politika geliştirme süreçlerine uygulanabilir bir model sunmaktadır.

Buna karşın, bazı mahallelerde büyükbaş hayvan sayısı oldukça yüksek olmasına rağmen, mera alanlarının sınırlı olduğu görülmüştür. Bu yapı, yem temelli kapalı sistem hayvancılığın bölgesel ölçekte yaygın olduğunu düşündürmektedir. Literatürde, bu tür yapıların yem tüketimini artırdığı, su ayak izini büyüttüğü ve çevresel baskıyı yükselttiği bildirilmektedir (Mekonnen ve Hoekstra, 2012; Gerber ve ark., 2013). Bu nedenle, bölgesel hayvan varlığı planlamasında yalnızca numerik hayvan verileri değil, mera taşıma kapasitesi de dikkate alınmalıdır.

Klasik analiz yöntemleri çoğunlukla sabit varsayımlara (örneğin doğrusal ilişki, normal dağılım) dayanırken; YZ tabanlı yaklaşımlar, veri setinin içsel yapısına uyum sağlayan esnek modelleme teknikleriyle karmaşık ilişkileri keşfetme imkanı sunar (Kamilaris ve Prenafeta-Boldú, 2018). Özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları, yüksek değişkenliğe sahip hayvancılık verilerinde kümelenme, sınıflandırma ve tahminleme performansı açısından klasik çok değişkenli analizlerin ötesine geçmektedir (Liakos ve ark., 2018). Ayrıca YZ destekli görsel analizler (örneğin dendrogramlar, çoklu değişkenli ısı haritaları), karar vericiler için yorumlaması daha kolay ve sezgisel çıktı üretmektedir (Xie ve ark., 2021). Bu yönleriyle YZ tabanlı analizler, hayvancılık sistemlerinin mekânsal planlamasında klasik tekniklere kıyasla daha bütüncül ve dinamik bir karar destek altyapısı sunmaktadır. YZ tabanlı sınıflandırmalar, mekansal heterojenliği sayısallaştırarak bölgesel karar alma süreçlerini optimize etmeye de olanak tanımaktadır (Kamilaris ve Prenafeta-Boldú, 2018; Liakos ve ark., 2018).

Yapay zekâ destekli analizler, geleneksel yöntemlerle görünür olmayan yapısal örüntülerin belirlenmesinde çarpıcı bir rol oynamıştır. K-means kümeleme algoritması kullanılarak mahalleler üç gruba ayrılmış; bu gruplar hem hayvan türü baskınlığına hem de mera kapasitesine göre ayrıştırılmıştır.

Ayrıca, hiyerarşik kümeleme (Ward yöntemi) ile mahallelerin benzerlik düzeyleri dendrogram üzerinde görselleştirilmiş, kümeler arası mesafeler net şekilde ortaya konmuştur. Görselleştirmenin analitik sürece entegrasyonu, karar vericiler için model çıktılarının daha kolay anlaşılmasını sağlamıştır (He ve Zhang, 2021). Özellikle YZ destekli görsel analizler, çok değişkenli yapıları sadeleştirerek veri odaklı kırsal planlamaların temelini oluşturmaktadır (Xie ve ark., 2021).

Bulgular ayrıca, uç değer tespitinin modelin doğruluğu açısından ne denli önemli olduğunu da göstermiştir. İstatistiksel olarak aykırı mahallelerin (örneğin büyükbaş hayvancılığın aşırı yoğunlaştığı bölgeler) analiz dışı bırakılması, kümelerin daha homojen hale gelmesini sağlamış, bu da gruplar arası karşılaştırmaları istatistiksel olarak anlamlı kılmıştır (Tukey, 1977; Leys ve ark., 2013).

Yapay zeka destekli mekânsal analizlerin hayvan yetiştirme ve besleme süreçlerine entegre edilmesi, kaynakların daha verimli kullanımını ve üretim stratejilerinin optimize edilmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle mera kapasitesine göre hayvan yoğunluğunun belirlenmesi, yetersiz otlatma ya da aşırı otlatma riskini azaltarak mera sürdürülebilirliğini korumaya yardımcı olur (Boval ve Dixon, 2012). Aynı zamanda, kümelenmiş mahalle profilleri sayesinde bölgeye özgü yem yönetim planları geliştirilebilir; bu da hem yem maliyetlerinin düşürülmesine hem de hayvan refahının artırılmasına katkı sağlar (Tedeschi, 2006). Bu tür

teknolojik yaklaşımlar, yalnızca mevcut kaynakların korunmasını değil, aynı zamanda iklim değişikliğine uyumlu, çevresel etkileri minimize eden üretim sistemlerinin tasarlanmasını da kolaylaştırmaktadır (Rivera-Ferre ve ark., 2016).

Elde edilen bulgular, yalnızca İpekyolu ilçesi için değil, benzer coğrafi ve sosyo ekonomik yapıya sahip kırsal bölgeler açısından da örnek teşkil edecek niteliktedir. Mera alanı ile hayvan yoğunluğu arasındaki dengesizliklerin mekânsal olarak ortaya konması, hayvancılık destekleme programlarının daha hedef odaklı ve etkili biçimde planlanmasına katkı sunabilir. Özellikle uç değerlerin tespit edilmesi ve kümeler arası yapısal farklılıkların görselleştirilmesi sayesinde, küçük ölçekte dahi yüksek çözünürlüklü, veri temelli politika önerileri geliştirilebilmektedir. Bu bağlamda, çalışmada uygulanan yapay zeka destekli kümeleme ve uç değer analiz yaklaşımları, Türkiye'nin diğer kırsal ilçelerine kolaylıkla uyarlanabilir yapıda olup, yerel düzeyde hayvan varlığı yönetimi, mera tahsisi, destekleme önceliklendirmesi ve altyapı yatırımları gibi stratejik karar süreçlerine doğrudan entegre edilebilir. Sonuç olarak, bu çalışma yalnızca mevcut durumun fotoğrafını çekmekle kalmamış, aynı zamanda YZ temelli analizlerle gelecekteki müdahale alanlarının belirlenmesine de katkı sunmuştur. Mera planlaması, hayvan destekleme stratejileri ve sürdürülebilir üretim sistemleri tasarımı açısından, bu tür teknolojik analizlerin karar destek sistemlerine entegrasyonu önerilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar isim sırasına göre %30 ve %70 oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynaklar

Bokani A, Yadegaridehkordi E, Kanhere SS., 2025. LSTM-H: A hybrid deep learning model for accurate livestock movement prediction in UAV-based monitoring systems. Drones, 9(5): 346.

Boval M, Dixon RM., 2012. The importance of grasslands for animal production and other functions: a review on management and methodological progress in the tropics. Animal, 6(5): 748–762.

Chu SP., 2011. Spatial outlier detection in precision agriculture. Master's thesis, Library and Archives Canada.

FAO., 2020. Overcoming water challenges in agriculture. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e2d2772-5976-4671-9e2a-0b2ad87cb646/content>

Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Tempio G., 2013. Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. FAO.

Kamilaris A, Prenafeta-Boldú FX., 2018. Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147: 70–90.

Leys C, Ley C, Klein O, Bernard P, Licata L., 2013. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, 49(4): 764–766.

Liakos KG, Busato P, Moshou D, Pearson S, Bochtis D., 2018. Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8): 2674.

Mekonnen MM, Hoekstra AY., 2012. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3): 401–415.

Nasirahmadi A, Edwards SA, Sturm B., 2017. Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs. *Livestock Science*, 202: 25-38.

Rico-Chávez AK, Franco JA, Fernandez-Jaramillo AA, Contreras-Medina LM, Guevara-González RG, Hernandez-Escobedo Q., 2022. Machine learning for plant stress modeling: A Perspective towards hormesis management. *Plants (Basel)*, 11(7): 970.

Rivera-Ferre MG, López-i-Gelats F, Howden M, Smith P, Morton J, Herrero M., 2016. Re-framing the climate change debate in the livestock sector: mitigation and adaptation options. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(6): 869-892.

Silanikove N., 2000. The physiological basis of adaptation in goats to harsh environments. *Small Ruminant Research*, 35(3): 181-193.

Tedeschi LO., 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*, 89(2–3): 225-247.

Tukey JW., 1977. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley Publishing Company Reading, Mass. Menlo Park, Cal., London, Amsterdam, Don Mills, Ontario, Sydney 1977, XVI, 688 S.

Wang H, Song C, Wang J, Gao P., 2024. A raster based spatial clustering method with robustness to spatial outliers. *Scientific Reports*, 14: 4103.

Witten IH, Frank E, Hall MA, Pal CJ., 2016. *Data mining: Practical machine learning tools and techniques (4th ed.)*. Morgan Kaufmann.

Xie Y, Shekhar S, Li Y., 2021. Statistically robust clustering techniques for mapping spatial hotspots: A survey. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2103.12019>

Xu R, Tian Y., 2015. A comprehensive survey of clustering algorithms. *Annals of Data Science*, 2(2): 165–193.

Bishop Çatısından Elde Edilen $t_{\alpha}\zeta_1^{\alpha}$ -Smarandache Eğri Tabanlı Regle Yüzeyler

Esra DAMAR^{1*}

¹Hitit Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Çorum, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0002-0743-8545>

*Sorumlu yazar: esradamar@hitit.edu.tr

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 28.07.2025

Kabul tarihi:13.08.2025

Online Yayınlanma:12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Bishop çatısı

Adjoint eğri

Regle yüzey

Smarandache eğri

Açılabilir yüzey

Bu çalışmada, doğrultmanları Smarandache türü eğrilerden oluşan birim vektörlerle tanımlanan bir regle yüzey sınıfı incelenmiştir. Söz konusu yüzeylerin dayanak eğrisi, Bishop çatısı altında tanımlanan teğet vektör ile birinci Bishop vektörünün birleşimiyle elde edilen bir Smarandache eğrisinin integrali yoluyla tanımlanan adjoint eğri olarak alınmıştır. Bu yüzeyler için Gauss ve ortalama eğriliklerin kapalı formda ifadeleri elde edilmiş; ayrıca temel geometrik özellikleri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Çalışmada, yüzeylerin hangi koşullar altında açılabilir, minimal ya da tekil olacağı da detaylı olarak incelenmiştir. Bununla birlikte, yüzey üzerindeki bazı parametrik eğrilerin geodezik ve asimptotik karakterleri değerlendirilmiş ve bu davranışların sağlanması için gerekli ve yeterli koşullar belirlenmiştir.

Ruled Surfaces with $t_{\alpha}\zeta_1^{\alpha}$ -Smarandache Base Curve Derived from the Bishop Frame

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 28.07.2025

Accepted: 13.08.2025

Available online:12.09.2025

Keywords:

Bishop frame

Adjoint curve

Ruled surface

Smarandache curve

Developable surface

In this study, a class of ruled surfaces defined by unit vector fields whose rulings consist of Smarandache-type curves has been investigated. The base curve of these surfaces is taken as the adjoint curve, which is obtained by integrating a Smarandache curve constructed through the combination of the tangent vector and the first Bishop vector defined in the context of the Bishop frame. Closed-form expressions for the Gauss and mean curvatures of the surfaces have been derived, and their fundamental geometric properties have been analyzed in detail. The study also examines the conditions under which these surfaces become developable, minimal, or singular. Moreover, the geodesic and asymptotic behaviors of certain parametric curves on the surface are evaluated, and the necessary and sufficient conditions for these properties are determined.

To Cite: Damar E., 2025. Bishop çatısından elde edilen $t_{\alpha}\zeta_1^{\alpha}$ -Smarandache eğri tabanlı regle yüzeyler. Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(2): 343-369.

Giriş

Diferensiyel geometri alanında, eğri ve yüzeylerin yapısını incelemek, uzayın geometrik özelliklerini analiz etmek açısından büyük önem taşır. Eğrilerin yerel davranışlarını tanımlamak için yaygın olarak kullanılan klasik Frenet çatısı, eğriliğin sıfır olduğu noktalarda tanımsız olabilmektedir. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla Bishop, eğrilik sıfır olduğunda bile tanımlı

olabilen alternatif bir çatı sistemi önermiştir. 3-boyutlu Öklid uzayında paralel çatının (Bishop çatı) avantajları ve Frenet çatısı ile karşılaştırılması Bishop'un orijinal çalışmasında sunulmuştur (Bishop, 1975).

Regle yüzeyler, bir doğrunun bir eğri boyunca hareket ettirilmesiyle oluşturulan geometrik yapılar olup, diferensiyel geometri literatüründe kapsamlı şekilde incelenmiştir. Bu yüzeyler, yapısını belirleyen ve “doğrultman” adı verilen bir doğru ailesinden oluşur (Do Carmo, 2016). Sahip oldukları kendine özgü geometrik özellikler sayesinde, mimari form tasarımı ve geometrik yüzey modelleme gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ali ve ark., 2013; Yılmaz ve ark., 2017). Uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan iki önemli regle yüzey türü, açılabilir (developable) yüzeyler ve minimal yüzeylerdir. Bu yüzey tiplerine ilişkin detaylı çalışmalar literatürde bulunmaktadır (Köse, 1999; Izumiya, 2004; Alegre ve ark., 2010; Güler, 2021). Son yıllarda, hem Öklid hem de Lorentz uzaylarında alternatif hareketli çatılar kullanılarak yeni regle yüzeylerin inşasına yönelik çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Yüksel, 2013; Damar, 2017; Karacan ve ark., 2017; Şenyurt ve ark., 2023a; Şenyurt ve ark., 2023b; Uzun ve ark., 2024).

Smarandache eğrileri, diferensiyel geometri kapsamında incelenen özel eğri türlerinden biridir. İlk olarak Minkowski uzayında tanımlanan bu eğriler, verilen bir temel eğrinin hareketli çatı vektörleri örneğin teğet, normal ve binormal kullanılarak elde edilen konum vektörleri ile tanımlanır (Turgut ve Yılmaz, 2008). Zamanla Öklid uzayına da adapte edilmiş ve kinematik, robotik ve teorik fizik gibi birçok alanda uygulama potansiyeli göstermiştir (Ali, 2010; Nurkan ve Güven, 2022; Canlı ve ark., 2024; Kalkan ve Şenyurt, 2024; Mendonca, 2024; Şenyurt ve ark., 2024).

Çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, konuya ilişkin literatür hakkında bilgi verilmiştir. Ön bilgiler kısmında ise, çalışma boyunca kullanılacak temel kavramlara yer verilmiştir. Bulgular bölümünde, Damar (2025) çalışmasında, daha önce Damar (2024) tarafından tanımlanan $\zeta_1^\alpha \zeta_2^\alpha$ tipi Bishop adjoint eğrisini taban eğri olarak seçmiş ve bu eğri aracılığıyla oluşturulan regle yüzeylerin geometrik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada ise, yine Damar (2024)'te tanımlanan $t_\alpha \zeta_1^\alpha$ tipi Bishop adjoint eğrisi taban eğri olarak seçilmiştir. Doğrultman yönleri, Smarandache türü eğriler aracılığıyla tanımlanan Bishop çatısının birim vektörleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntemle, $M_1(s, v)$ 'den $M_7(s, v)$ 'ye kadar yedi farklı regle yüzey üretilmiş ve bu yüzeylerin diferensiyel geometrik özellikleri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Çalışma, elde edilen bulguların ve potansiyel gelecekteki araştırma yönlerinin tartışılmasıyla sonlandırılmıştır.

Ön Bilgiler

Öklid uzayı E^3 de tanımlı, yay uzunluğuna göre parametrelenmiş düzgün bir eğri $\alpha = \alpha(s)$ olsun. Bu eğriye karşılık gelen Frenet çatısı $\{\mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{b}, \kappa, \tau\}$ ile gösterilsin. α eğrisi birim hızlı olduğundan teğet vektörü $\mathbf{t}(s) = \alpha'(s)$ şeklinde tanımlanır; eğrilik ise $\kappa = \|\alpha''(s)\|$ olarak hesaplanır. İvme vektörü $\alpha''(s) = \kappa(s)\mathbf{n}(s)$ ile ifade edilirken, binormal vektör $\mathbf{b}(s) = \mathbf{t}(s) \times \mathbf{n}(s)$ şeklindedir.

Klasik Frenet formülü, çatı vektörlerinin türevleri arasındaki ilişkiyi aşağıdaki şekilde verir:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{t}' \\ \mathbf{n}' \\ \mathbf{b}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \kappa & 0 \\ -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{n} \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}.$$

Burada burulma (torsiyon) $\tau(s) = \langle \mathbf{n}'(s), \mathbf{b}(s) \rangle$ ifadesiyle tanımlanır. Frenet çatısına alternatif olarak kullanılan Bishop çatısı $\{\mathbf{t}, \boldsymbol{\zeta}_1, \boldsymbol{\zeta}_2\}$ ortonormal üçlüsüyle tanımlanır ve türev matrisi

$$\begin{pmatrix} \mathbf{t}' \\ \boldsymbol{\zeta}'_1 \\ \boldsymbol{\zeta}'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & k_1 & k_2 \\ -k_1 & 0 & 0 \\ -k_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{t} \\ \boldsymbol{\zeta}_1 \\ \boldsymbol{\zeta}_2 \end{pmatrix}$$

şeklinde verilir. Burada $k_1(s)$ and $k_2(s)$ ifadeleri Bishop eğrilikleri olarak adlandırılır.

Frenet ve Bishop çatıları arasındaki dönüşüm şu şekilde verilir:

$$\begin{aligned} \mathbf{t} &= \mathbf{t}, \\ \mathbf{n} &= \cos\theta(s)\boldsymbol{\zeta}_1 + \sin\theta(s)\boldsymbol{\zeta}_2, \\ \mathbf{b} &= -\sin\theta(s)\boldsymbol{\zeta}_1 + \cos\theta(s)\boldsymbol{\zeta}_2. \end{aligned}$$

Buradaki $\theta(s)$, iki sistem arasındaki bağlantıyı kuran açı fonksiyonudur ve $k_1(s) \neq 0$ olmak üzere

$$\theta(s) = \arctan \frac{k_2(s)}{k_1(s)}$$

şeklinde tanımlanır. Bu durumda torsiyon ve toplam eğrilik

$$\tau(s) = -\frac{d\theta(s)}{ds}, \quad \kappa(s) = \sqrt{k_1^2(s) + k_2^2(s)}$$

olarak elde edilir. Dolayısıyla açı fonksiyonu

$$\theta = -\int \tau(s)ds + \theta_0$$

şeklindedir. Buna bağlı olarak Bishop eğrilikleri şu eşitliklerle ifade edilir:

$$k_1(s) = \kappa(s)\cos\theta(s), \quad k_2(s) = \kappa(s)\sin\theta(s).$$

Tanım 2.1 (Nurkan ve ark., 2019). α s-yay uzunluğuna göre parametrelenmiş ve burulması sıfırdan farklı olan düzgün bir eğri olsun. $\{\mathbf{t}_\alpha, \mathbf{n}_\alpha, \mathbf{b}_\alpha\}$ bu eğrinin Frenet çatısını göstermek üzere, α eğrisine ait adjoint eğri aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\beta(s) = \int_{s_0}^s \mathbf{b}_\alpha(u)du.$$

Tanım 2.2 (Ali, 2010). α s-yay uzunluğuna göre parametrelenmiş ve burulması sıfırdan farklı olan düzgün bir eğriyi, $\{t_\alpha, n_\alpha, b_\alpha\}$ da α eğrisinin Frenet çatısını gösterebilir. Bu durumda tn , nb ve tnb Smarandache eğrileri sırasıyla aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{1}{\sqrt{2}}(t_\alpha + n_\alpha), \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{2}}(n_\alpha + b_\alpha), \\ \mu &= \frac{1}{\sqrt{3}}(t_\alpha + n_\alpha + b_\alpha).\end{aligned}$$

Tanım 2.3 (Damar, 2024). α s-yay uzunluğuna göre parametrelenmiş düzgün bir eğriyi, $\{t_\alpha, \zeta_1^\alpha, \zeta_2^\alpha, k_1^\alpha, k_2^\alpha\}$ da α eğrisinin Bishop çatısını gösterebilir. Bu durumda $t_\alpha \zeta_1^\alpha$ -Bishop adjoint eğrisi

$$\beta(s^*(s)) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int (t_\alpha(s) + \zeta_1^\alpha(s)) ds$$

şeklindedir.

Teorem 2.4 (Damar, 2024). α s-yay uzunluğuna göre parametrelenmiş düzgün bir eğriyi, $\{t_\alpha, \zeta_1^\alpha, \zeta_2^\alpha, k_1^\alpha, k_2^\alpha\}$ da α eğrisinin Bishop çatısını gösterebilir. β , $t_\alpha \zeta_1^\alpha$ -Bishop adjoint eğrisi olmak üzere β eğrisinin Frenet vektör alanları, eğrilik ve burulması (torsiyon)

$$\begin{aligned}t_{\beta_1} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(t_\alpha + \zeta_1^\alpha), \\ n_{\beta_1} &= \frac{1}{\sqrt{1+2h^2}}(-ht_\alpha + h\zeta_1^\alpha + \zeta_2^\alpha), \\ b_{\beta_1} &= \frac{1}{\sqrt{1+4h^2}}(t_\alpha - \zeta_1^\alpha + 2h\zeta_2^\alpha), \\ \tau_{\beta_1} &= -\frac{1}{\sqrt{2}}k_2^\alpha - \frac{\sqrt{2}h'}{1+2h^2}, \\ \kappa_{\beta_1} &= \frac{1}{\sqrt{2}}k_2^\alpha \sqrt{1+2h^2}\end{aligned} \tag{1}$$

şeklindedir. Burada $h = \frac{k_1^\alpha}{k_2^\alpha}$ ifadesi Bishop eğriliklerinin oranını tanımlar.

Teorem 2.5 (Damar, 2024). E^3 uzayında s-yay uzunluğuna göre parametrelenmiş düzgün bir eğri α ve bu eğriden üretilen $t_\alpha \zeta_1^\alpha$ -Bishop adjoint eğrisi β olsun. Bu eğrilere ait Bishop çatısı sırasıyla $\{t_\alpha, \zeta_1^\alpha, \zeta_2^\alpha, k_1^\alpha, k_2^\alpha\}$ ve $\{t_\beta, \zeta_1^\beta, \zeta_2^\beta, k_1^\beta, k_2^\beta\}$ olarak verilsin. Bu durumda β eğrisine ait Bishop vektör alanları ve eğrilikleri aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned}\zeta_1^\beta &= \frac{1}{\sqrt{2+4h^2}}[-(\sqrt{2}h\cos\theta_\beta + \sin\theta_\beta)t_\alpha + (\sqrt{2}h\cos\theta_\beta + \sin\theta_\beta)\zeta_1^\alpha + (\sqrt{2}\cos\theta_\beta + 2h\sin\theta_\beta)\zeta_2^\alpha], \\ \zeta_2^\beta &= \frac{1}{\sqrt{2+4h^2}}[-(\sqrt{2}h\sin\theta_\beta + \cos\theta_\beta)t_\alpha + (\sqrt{2}h\sin\theta_\beta - \cos\theta_\beta)\zeta_1^\alpha + (\sqrt{2}\sin\theta_\beta + 2h\cos\theta_\beta)\zeta_2^\alpha], \\ k_1^\beta &= \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1+2h^2}\cos\theta_\beta, \quad k_2^\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1+2h^2}\sin\theta_\beta\end{aligned} \tag{3}$$

burada $\theta_\beta = -\int \tau_\beta(s) ds$ dir.

Teorem 2.6 (Bükcü ve Karacan, 2009). $\alpha: I \rightarrow E^3$ Bishop eğrilikleri sıfırdan farklı olan birim hızlı bir eğri olsun. α eğrisinin slant helis olması için gerek ve yeter şart, eğrilikler oranı $\frac{k_1}{k_2}$ nin sabit olmasıdır.

Regle yüzey, bir doğrunun bir eğri boyunca hareket ettirilmesiyle oluşan özel bir yüzey türüdür. Bu hareket sırasında doğru, her noktada eğriye bağlı olarak yön değiştirir. Böyle bir yüzeyin genel parametrik denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$M(s, v) = \alpha(s) + vr(s)$$

burada $\alpha(s)$ dayanak eğriyi (taban eğri), $r(s)$ doğrultman doğrularının yönünü belirleyen birim vektör alanını, v ise her bir doğrultman boyunca olan yer değiştirmeyi gösteren parametreyi ifade eder.

Bu yapı sayesinde, doğrular (doğrultmanlar) $\alpha(s)$ eğrisi boyunca yön değiştirerek yüzeyi oluşturur. Bu yüzeyler, diferensiyel geometri ve uygulamalı alanlarda yaygın olarak incelenmektedir.

$M(s, v)$ regle yüzeyi için birim normal vektör alanı U_M , Gauss eğriliği K_M ve ortalama eğrilik H_M aşağıdaki ifadelerle hesaplanabilir:

$$U_M = \frac{M_s \times M_v}{\|M_s \times M_v\|}, \quad (4)$$

$$K_M = \frac{eg - f^2}{EG - F^2}, \quad (5)$$

$$H_M = \frac{Eg - 2fF + eG}{2(EG - F^2)} \quad (6)$$

bu formüllerde kullanılan birinci temel form katsayıları

$$E = \langle M_s, M_s \rangle, \quad F = \langle M_s, M_v \rangle, \quad G = \langle M_v, M_v \rangle$$

ile, ikinci temel form katsayıları

$$e = \langle M_{ss}, U_M \rangle, \quad f = \langle M_{sv}, U_M \rangle, \quad g = \langle M_{vv}, U_M \rangle$$

ile tanımlanır. Burada $\langle , \rangle$ iç çarpımı, M_s , M_v ise yüzeyin s ve v yönündeki türevlerini ifade eder. Bu ifadeler, yüzeyin eğrilik özelliklerini belirlemede temel araçlardır.

Önerme 2.7 (O'Neill, 1983). Bir regle yüzeyin açılabilir olması için gerek ve yeter koşul yüzeyin her noktasında Gauss eğriliğinin sıfır olmasıdır.

Önerme 2.8 (O'Neill, 1983). Bir düzgün yüzeyin minimal olması için gerek ve yeter koşul ortalama eğriliğinin sıfır olmasıdır.

Bulgular

Damar (2024) çalışmasında, üç boyutlu Öklid uzayında Bishop çatısına göre tanımlanan Smarandache türü eğrilerin integralini alarak yeni bir eğri ailesi tanıtmıştır. Bu çalışmadan yola çıkılarak, ilgili bölümde $t_\alpha \zeta_1^\alpha$ -tipindeki Bishop adjoint eğri dayanak eğri olarak seçilmiştir. Bu

adjoint eğrinin Bishop çatısından elde edilen birim vektör alanları ise oluşturulacak regle yüzeylerin doğrultman yönleri olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşımla inşa edilen yedi farklı regle yüzey, açılabilirlik ve minimal yüzey olma gibi diferensiyel geometrik kriterlere göre analiz edilmiştir.

Tanım 3.1. Üç boyutlu Öklid uzayı E^3 üzerinde tanımlı bir eğri olan α eğrisinden elde edilen $t_\alpha \zeta_1^\alpha$ - Bishop adjoint eğrisi β olarak tanımlansın. Bu eğriye ait Bishop çatısı $\{t_\beta, \zeta_1^\beta, \zeta_2^\beta, k_1^\beta, k_2^\beta\}$ ile verilsin. Eğer β eğrisi dayanak eğri olarak alınır ve

$$t_\beta, \zeta_1^\beta, \zeta_2^\beta, \frac{1}{\sqrt{2}}(t_\beta + \zeta_1^\beta), \frac{1}{\sqrt{2}}(t_\beta + \zeta_2^\beta), \frac{1}{\sqrt{2}}(\zeta_1^\beta + \zeta_2^\beta), \frac{1}{\sqrt{3}}(t_\beta + \zeta_1^\beta + \zeta_2^\beta)$$

vektörleri sırasıyla doğrultman vektörler olarak seçilirse bu doğrultmanlar aracılığıyla elde edilen $M_1(s, v) - M_7(s, v)$ arasındaki yedi farklı regle yüzey aşağıdaki parametrik ifadelerle tanımlanır:

$$M_1(s, v) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int (t_\alpha(s) + \zeta_1^\alpha(s)) ds + v t_\beta(s),$$

$$M_2(s, v) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int (t_\alpha(s) + \zeta_1^\alpha(s)) ds + v \zeta_1^\beta(s),$$

$$M_3(s, v) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int (t_\alpha(s) + \zeta_1^\alpha(s)) ds + v \zeta_2^\beta(s),$$

$$M_4(s, v) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int (t_\alpha(s) + \zeta_1^\alpha(s)) ds + v \frac{1}{\sqrt{2}}(t_\beta(s) + \zeta_1^\beta(s)),$$

$$M_5(s, v) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int (t_\alpha(s) + \zeta_1^\alpha(s)) ds + v \frac{1}{\sqrt{2}}(t_\beta(s) + \zeta_2^\beta(s)),$$

$$M_6(s, v) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int (t_\alpha(s) + \zeta_1^\alpha(s)) ds + v \frac{1}{\sqrt{2}}(\zeta_1^\beta(s) + \zeta_2^\beta(s)),$$

$$M_7(s, v) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int (t_\alpha(s) + \zeta_1^\alpha(s)) ds + v \frac{1}{\sqrt{3}}(t_\beta(s) + \zeta_1^\beta(s) + \zeta_2^\beta(s)).$$

Bu tanımlar Smarandache-türevi doğrultman vektörleriyle oluşturulan yedi farklı regle yüzeyin parametrik biçimde ifadesini sunmakta ve her biri ilgili geometrik analizlerin temelini oluşturmaktadır.

3.1. t_β Doğrultman vektörünün oluşturduğu $M_1(s, v)$ regle yüzeyi

Teorem 3.2.

Öklid uzayı E^3 üzerinde tanımlı $M_1(s, v)$ regle yüzeyi için Gauss eğriliği ve ortalama eğrilik aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$K_{M_1} = 0, \quad (7)$$

$$H_{M_1} = \frac{\left(\frac{k_1^\beta}{k_2^\beta}\right)' (k_2^\beta)^2}{2v \left((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2\right)^{3/2}}. \quad (8)$$

İspat. $M_1(s, v) = \beta(s) + v\mathbf{t}_\beta(s)$ parametrik denklemi ile verilen yüzeyin s ve v parametrelerine göre birinci ve ikinci mertebeden kısmi türevleri alınırsa

$$M_{1s}(s, v) = \mathbf{t}_\beta + vk_1^\beta \boldsymbol{\zeta}_1^\beta + vk_2^\beta \boldsymbol{\zeta}_2^\beta,$$

$$M_{1ss}(s, v) = -v \left((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2 \right) \mathbf{t}_\beta + \left(k_1^\beta + v(k_1^\beta)' \right) \boldsymbol{\zeta}_1^\beta + \left(k_2^\beta + v(k_2^\beta)' \right) \boldsymbol{\zeta}_2^\beta,$$

$$M_{1v}(s, v) = \mathbf{t}_\beta, \quad M_{1sv}(s, v) = k_1^\beta \boldsymbol{\zeta}_1^\beta + k_2^\beta \boldsymbol{\zeta}_2^\beta, \quad M_{1vv}(s, v) = 0$$

elde edilir. Eşitlik (4)'e göre, $M_1(s, v)$ yüzeyinin birim normal vektör alanı

$$U_{M_1} = \frac{M_{1s} \times M_{1v}}{\|M_{1s} \times M_{1v}\|} = \frac{k_2}{\sqrt{(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2}} \boldsymbol{\zeta}_1 - \frac{k_1}{\sqrt{(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2}} \boldsymbol{\zeta}_2$$

şeklinde dir. Buna göre $M_1(s, v)$ yüzeyinin $E_{M_1}, F_{M_1}, G_{M_1}$ birinci ve $e_{M_1}, f_{M_1}, g_{M_1}$ ikinci temel form katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_{M_1} = \langle M_{1s}, M_{1s} \rangle = 1 + v^2 \left((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2 \right), \quad F_{M_1} = \langle M_{1s}, M_{1v} \rangle = 1, \quad G_{M_1} = \langle M_{1v}, M_{1v} \rangle = 1,$$

$$e_{M_1} = \langle M_{1ss}, U_{M_1} \rangle = \frac{v \left(k_2^\beta (k_1^\beta)' - k_1^\beta (k_2^\beta)' \right)}{\sqrt{(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2}},$$

$$f_{M_1} = \langle M_{1sv}, U_{M_1} \rangle = 0, \quad g_{M_1} = \langle \Phi_{1vv}, U_{M_1} \rangle = 0$$

bu katsayılar sırasıyla Eşitlik (5) ve (6)'da yerine konulduğunda, Eşitlik (7) ve (8) ile verilen Gauss ve ortalama eğrilikler doğrudan elde edilir.

Teorem 3.2. temel alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

Sonuç 3.3.

$M_1(s, v)$ regle yüzeyi açılabilir bir yüzeydir.

İspat. Eşitlik (7) ile Önerme 2.7 birlikte ele alındığında $M_1(s, v)$ yüzeyinin açılabilir olduğu sonucuna ulaşılır.

Sonuç 3.4 (Damar, 2024).

α eğrisi slant helis olsun. Eğer α eğrisinin ikinci Bishop eğriliği k_2^α sabit ise bu eğrinin adjointi olan β eğrisi de slant helistir.

Sonuç 3.5.

$M_1(s, v)$ yüzeyinin minimal yüzey olması için gerek ve yeter koşul β eğrisinin slant helis olmasıdır.

İspat. $M_1(s, v)$ yüzeyinin minimal olması için Eşitlik (8)'den, $H_{M_1} = 0$ olmalıdır. Bu takdirde

$$\left(k_1^\beta(s) \right)' k_2^\beta(s) - \left(k_2^\beta(s) \right)' k_1^\beta(s) = 0$$

denklemini elde edilir. Bu ifade düzenlenirse

$$\frac{(k_1^\beta(s))'}{k_1^\beta(s)} = \frac{(k_2^\beta(s))'}{k_2^\beta(s)}$$

eşitliği elde edilir. Her iki tarafın integrali alındığında

$$\ln|k_1^\beta(s)| = \ln|k_2^\beta(s)| + c_1$$

şeklinde bir ifade elde edilir. Bu eşitlik sadeleştirildiğinde c_1 sabit olmak üzere

$$k_1^\beta(s) = c_1 \cdot k_2^\beta(s)$$

bulunur. Dolayısıyla minimal yüzey olma koşulu, $\frac{k_1^\beta(s)}{k_2^\beta(s)}$ oranının sabit olması gerektiğini ifade eder. Bu durum Teorem 2.6'ya göre β eğrisinin bir slant helis olduğunu gösterir. Diğer taraftan β slant helis ise $\frac{k_1^\beta(s)}{k_2^\beta(s)}$ oranı sabittir. Buradan $H_{M_1} = 0$ olup yüzey minimaldir.

Teorem 3.6.

$M_1(s, v)$ regle yüzeyi her noktada düzgündür ve herhangi bir tekil nokta içermez.

İspat.

Do Carmo (2016) tarafından verilen tanıma göre, $M_1(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında singüler olması için gerek ve yeter koşul

$$\|M_{1s} \times M_{1v}\|(s_\theta, v_\theta) = 0$$

olmasıdır. Bu ifadeye karşılık gelen türevler yerine konulduğunda

$$\|M_{1s} \times M_{1v}\|(s_\theta, v_\theta) = \sqrt{(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2} = 0$$

elde edilir. Burada $k_1^\beta \neq 0$ olduğundan

$$\|M_{1s} \times M_{1v}\|(s_\theta, v_\theta) \neq 0$$

dır. Dolayısıyla $M_1(s, v)$ regle yüzeyi tekil nokta içermez.

Teorem 3.7.

$M_1(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) s-parametre eğrilerinin asimptotik olması için gerek ve yeter koşul yüzeyin daynak eğrisi β nın slant helis olmasıdır.
- ii) v-parametre eğrileri daima asimptotiktir.

İspat. Bir yüzeyde s-parametre eğrilerin asimptotik olması için gerekli ve yeterli koşul ikinci temel form katsayısı e_{M_1} nin sıfır olmasıdır (Do Carmo, 2016). $M_1(s, v)$ yüzeyi için

$$e_{M_1} = \frac{v(k_2^\beta(k_1^\beta)') - k_1^\beta(k_2^\beta)'}{\sqrt{(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2}} = 0$$

şeklinde hesaplanır. $v \neq 0$ olduğundan $e_{M_1} = 0$ eşitliğinin sağlanabilmesi için

$$k_2^\beta (k_1^\beta)' - k_1^\beta (k_2^\beta)' = 0$$

olmalıdır. Bu denklemin çözümünden c sabit olmak üzere

$$k_1^\beta = ck_2^\beta$$

elde edilir. Bu ise β eğrisinin slant helis olduğunu gösterir. Diğer taraftan bir yüzeyde v -parametre eğrilerinin asimptotik olması için ikinci temel form katsayısı g sıfır olmalıdır (Do Carmo, 2016). $M_1(s, v)$ yüzeyinde $g_{M_1} = 0$ olarak hesaplandığından $M_1(s, v)$ yüzeyi üzerinde v -parametre eğrileri daima asimptotiktir.

Teorem 3.8

$M_1(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) s -parametre eğrileri geodezik değildir.
- ii) v -parametre eğrileri daima geodeziktir.

İspat.

$M_1(s, v)$ yüzeyi üzerinde s -parametre eğrilerinin geodezik olması için

$$U_{M_1} \times M_{1ss} = 0$$

olmalıdır (Do Carmo, 2016). Bu denklemde yüzeyin normal vektörü ve s -parametresine göre ikinci türevi yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$U_{M_1} \times M_{1ss} = \frac{\left((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2 + v(k_1^\beta (k_1^\beta)' + k_2^\beta (k_2^\beta)') \right) \mathbf{t}_\beta + \left(k_1^\beta v((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) \right) \zeta_1^\beta + \left(k_2^\beta v((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) \right) \zeta_2^\beta}{\sqrt{(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2}} = 0$$

vektörel ifade elde edilir. Burada

$$\left((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2 + v(k_1^\beta (k_1^\beta)' + k_2^\beta (k_2^\beta)') \right) \mathbf{t}_\beta + k_1^\beta v((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) \zeta_1^\beta + k_2^\beta v((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) \zeta_2^\beta = 0$$

ifadesinin sıfır vektör olması için her bir bileşenin katsayısı sıfır olmalıdır. Bu ise $v \neq 0$ ve $k_1^\beta \neq 0$ olduğundan sağlanamaz. Bu nedenle s -parametre eğrileri $M_1(s, v)$ yüzeyi üzerinde geodezik değildir.

Ayrıca $U_{M_1} \times M_{1vv} = 0$ eşitliği her zaman sağlandığından $M_1(s, v)$ yüzeyi üzerinde v -parametre eğrileri daima geodeziktir.

3.2. ζ_1^β Doğrultman vektörünün oluşturduğu $M_2(s, v)$ regle yüzeyi

Teorem 3.9.

Öklid uzayı E^3 üzerinde tanımlı $M_2(s, v)$ regle yüzeyi için Gauss eğriliği ve ortalama eğrilik aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$K_{M_2} = 0, \quad (9)$$

$$H_{M_2} = \frac{k_2^\beta}{2(1-vk_1^\beta)}. \quad (10)$$

İspat. $M_2(s, v) = \beta(s) + v\zeta_1^\beta(s)$ parametrik denklemi ile verilen yüzeyin s ve v parametrelerine göre birinci ve ikinci mertebeden kısmi türevleri alınır

$$\begin{aligned} M_{2s}(s, v) &= (1 - vk_1^\beta) \mathbf{t}_\beta, \quad M_{2v}(s, v) = \zeta_1^\beta, \\ M_{2ss}(s, v) &= -v(k_1^\beta)' \mathbf{t}_\beta + (1 - vk_1^\beta) k_1^\beta \zeta_1^\beta + (1 - vk_1^\beta) k_2^\beta \zeta_2^\beta, \\ M_{2sv}(s, v) &= -k_1^\beta \mathbf{t}_\beta, \quad M_{2vv}(s, v) = 0 \end{aligned}$$

elde edilir. Eşitlik (4)'e göre, $M_2(s, v)$ yüzeyinin birim normal vektör alanı

$$U_{M_2} = \frac{M_{2s} \times M_{2v}}{\|M_{2s} \times M_{2v}\|} = \zeta_2^\beta$$

şeklindedir. Buna göre $M_2(s, v)$ yüzeyinin $E_{M_2}, F_{M_2}, G_{M_2}$ birinci ve $e_{M_2}, f_{M_2}, g_{M_2}$ ikinci temel form katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} E_{M_2} &= \langle M_{2s}, M_{2s} \rangle = (1 - vk_1^\beta)^2, \quad F_{M_2} = \langle M_{2s}, M_{2v} \rangle = 0, \quad G_{M_2} = \langle M_{2v}, M_{2v} \rangle = 1, \\ e_{M_2} &= \langle M_{2ss}, U_{M_2} \rangle = (1 - vk_1^\beta) k_2^\beta, \quad f_{M_2} = \langle M_{2sv}, U_{M_2} \rangle = 0, \quad g_{M_2} = \langle M_{2vv}, U_{M_2} \rangle = 0 \end{aligned}$$

bu katsayılar sırasıyla Eşitlik (5) ve (6)'da yerine konulduğunda, Eşitlik (9) ve (10) ile verilen Gauss ve ortalama eğrilikler doğrudan elde edilir.

Teorem 3.9. temel alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

Sonuç 3.10.

$M_2(s, v)$ regle yüzeyi açılabilir bir yüzeydir.

Sonuç 3.11.

β düzlemsel bir eğri ise α eğrisinin eğrilikleri arasında aşağıdaki bağıntı vardır

$$k_2^\alpha = -\frac{2\left(\frac{k_1^\alpha}{k_2^\alpha}\right)'}{1 + 2\left(\frac{k_1^\alpha}{k_2^\alpha}\right)^2}.$$

İspat.

Kabul edelim ki β düzlemsel bir eğri olsun. Bu durumda $k_2^\beta = 0$ olmalıdır. Eşitlik (3)'ten

$$k_2^\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + 2h^2} \sin \theta_\beta = 0$$

elde edilir. Buradan

$$\theta_\beta = \int \tau_\beta ds = 0$$

sonucu çıkar. Diğer yandan, Eşitlik (1)'den

$$-\frac{1}{\sqrt{2}}k_2^\alpha - \frac{\sqrt{2}\left(\frac{k_1^\alpha}{k_2^\alpha}\right)'}{1 + 2\left(\frac{k_1^\alpha}{k_2^\alpha}\right)} = 0$$

elde edilir. Bu ifadeden

$$k_2^\alpha = -\frac{2\left(\frac{k_1^\alpha}{k_2^\alpha}\right)'}{1 + 2\left(\frac{k_1^\alpha}{k_2^\alpha}\right)^2}$$

sonucu bulunur. Bu da ispatı tamamlar.

Sonuç 3.12.

$M_2(s, v)$ yüzeyinin minimal yüzey olması için gerek ve yeter koşul β eğrisinin düzlemsel olmasıdır.

İspat. Kabul edelimki β eğrisi düzlemsel olsun. Bu taktirde $k_2^\beta = 0$ olur. Eşitlik (10)' dan $H_{M_2} = 0$ sonucu elde edilir ve böylece $M_2(s, v)$ yüzeyi minimal olur. Tersine $M_2(s, v)$ yüzeyi minimal olsun bu durumda $H_{M_2} = 0$ olur. Buradan $k_2^\beta = 0$ elde edilir ki bu da β eğrisinin düzlemsel olmasıdır.

Teorem 3.13.

$M_2(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında tekillik göstermesi için gerek ve yeter koşul

$$k_1^\beta = \frac{1}{v_\theta}$$

eşitliğinin sağlanmasıdır.

İspat. Do Carmo (2016) tarafından verilen tanıma göre, $M_2(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında singüler olması için gerek ve yeter koşul

$$\|M_{2s} \times M_{2v}\|(s_\theta, v_\theta) = 0$$

olmasıdır. Bu ifadeye karşılık gelen türevler yerine konulduğunda

$$\|M_{2s} \times M_{2v}\|(s_\theta, v_\theta) = (1 - v_\theta k_1^\beta) = 0$$

bulunur. Bu ifade düzenlenirse

$$k_1^\beta = \frac{1}{v_\theta}$$

elde edilir. Böylece ispat tamamlanmış olur.

Teorem 3.14.

$M_2(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) s -parametre eğrilerinin asimptotik olması için gerek ve yeter koşul yüzeyin dayanak eğrisi β nın düzlemsel olmasıdır.
- ii) v -parametre eğrileri daima asimptotiktir.

İspat. $M_2(s, v)$ yüzeyi üzerinde s -parametre eğrilerinin asimptotik olması için

$$e_{M_2} = (1 - vk_1^\beta)k_2^\beta = 0$$

koşulunun sağlanması gerekir. Buradan

$$k_2^\beta = 0 \quad \text{ya da} \quad k_1^\beta = \frac{1}{v}$$

şartlarından en az birinin sağlanması gerekir. Ancak, $k_1^\beta = \frac{1}{v}$ koşulunu sağlayan nokta singüler bir noktadır. Bu nedenle, $k_2^\beta = 0$ alınır ve bu da β eğrisinin düzlemsel olduğunu gösterir. Ayrıca $M_2(s, v)$ yüzeyinde $g_{M_2} = 0$ olarak hesaplandığından $M_2(s, v)$ yüzeyi üzerinde v -parametre eğrileri daima asimptotiktir.

Teorem 3.15.

$M_2(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) s -parametre eğrileri geodezik değildir.
- ii) v -parametre eğrileri daima geodeziktir.

İspat. $M_2(s, v)$ regle yüzeyi üzerinde s -parametre eğrilerin geodezik olabilmesi için

$$U_{M_2} \times M_{2ss} = -v(k_1^\beta)' \zeta_1^\beta - (1 - vk_1^\beta)k_1^\beta t_\beta = 0$$

koşulunun sağlanması gerekir. Bu vektörel ifadenin sıfıra eşit olması

$$-v(k_1^\beta)' = 0, \quad (11)$$

$$(1 - vk_1^\beta)k_1^\beta = 0 \quad (12)$$

denklemlerinin aynı anda sağlanması ile mümkündür. Burada $v \neq 0$ olduğundan Eşitlik (11) $(k_1^\beta)' = 0$ sonucunu verir. Eşitlik (12) den $k_1^\beta \neq 0$ olduğundan $k_1^\beta = \frac{1}{v}$ elde edilir. Ancak, $k_1^\beta = \frac{1}{v}$ koşulunu sağlayan nokta singülerdir. Bu nedenle s -parametre eğrileri geodezik değildir. Buna karşın $U_{M_2} \times M_{2vv} = 0$ eşitliği her zaman sağlandığından $M_2(s, v)$ yüzeyi üzerinde v -parametre eğrileri daima geodeziktir.

3.3. ζ_2^β doğrultman vektörünün oluşturduğu $M_3(s, v)$ regle yüzeyi

Teorem 3.16.

Öklid uzayı E^3 üzerinde tanımlı $M_3(s, v)$ regle yüzeyi için Gauss eğriliği ve ortalama eğrilik aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$K_{M_3} = 0, \quad (13)$$

$$H_{M_3} = \frac{-k_1^\beta}{2(1-vk_2^\beta)}. \quad (14)$$

İspat. $M_3(s, v) = \beta(s) + v\zeta_2^\beta(s)$ parametrik denklemleri ile verilen yüzeyin s ve v parametrelerine göre birinci ve ikinci mertebeden kısmi türevleri alınır

$$M_{3s}(s, v) = (1 - vk_2^\beta)t_\beta, \quad M_{3v}(s, v) = \zeta_2^\beta,$$

$$M_{3ss}(s, v) = -v(k_2^\beta)'t_\beta + (1 - vk_2^\beta)k_1^\beta \zeta_1^\beta + (1 - vk_2^\beta)k_2^\beta \zeta_2^\beta,$$

$$M_{3sv}(s, v) = -k_2^\beta t_\beta, \quad M_{3vv}(s, v) = 0$$

elde edilir. Eşitlik (4)'e göre, $M_3(s, v)$ yüzeyinin birim normal vektör alanı

$$U_{M_3} = \frac{M_{3s} \times M_{3v}}{\|M_{3s} \times M_{3v}\|} = -\zeta_1^\beta$$

şeklindedir. Buna göre, $M_3(s, v)$ yüzeyinin $E_{M_3}, F_{M_3}, G_{M_3}$ birinci ve $e_{M_3}, f_{M_3}, g_{M_3}$ ikinci temel form katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} E_{M_3} &= \langle M_{3s}, M_{3s} \rangle = (1 - vk_2^\beta)^2, F_{M_3} = \langle M_{3s}, M_{3v} \rangle = 0, G_{M_3} = \langle M_{3v}, M_{3v} \rangle = 1, \\ e_{M_3} &= \langle M_{3ss}, U_{M_3} \rangle = -(1 - vk_2^\beta)k_1^\beta, f_{M_3} = \langle M_{3sv}, U_{M_3} \rangle = 0, g_{M_3} = \langle M_{3vv}, U_{M_3} \rangle = 0 \end{aligned}$$

bu katsayılar sırasıyla Eşitlik (5) ve (6)'da yerine konulduğunda, Eşitlik (13) ve (14) ile verilen Gauss ve ortalama eğrilikler doğrudan elde edilir.

Teorem 3.16. temel alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

Sonuç 3.17.

$M_3(s, v)$ regle yüzeyi açılabilir bir yüzeydir.

Sonuç 3.18.

$M_3(s, v)$ regle yüzeyi minimal yüzey değildir.

İspat. Eşitlik (14)'ten yüzeyin minimal olması için $k_1^\beta = 0$ olmalıdır. Ancak Bishop çatısı tanım gereği k_1^β eğriliği sıfırdan farklıdır. Bu durumda $M_3(s, v)$ yüzeyi minimal değildir.

Sonuç 3.19.

$M_3(s, v)$ regle yüzeyi üzerindeki her parametre eğrisi bir eğrilik çizgisidir.

İspat. Do Carmo (2016) numaralı kaynağında verdiği tanıma göre, bir regle yüzey üzerindeki parametre eğrisinin bir eğrilik çizgisi olması için gerek ve yeter koşul $F = f = 0$ olmasıdır. Buradan ispat tamamlanır.

Teorem 3.20.

$M_3(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında tekillik göstermesi için gerek ve yeter koşul

$$k_2^\beta = \frac{1}{v_\theta}$$

eşitliğinin sağlanmasıdır.

İspat. $M_3(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında singüler olması için gerek ve yeter şart

$$\|M_{3s} \times M_{3v}\|(s_\theta, v_\theta) = 1 - v_\theta k_2^\beta = 0$$

olmasıdır. Bu ifade düzenlenirse

$$k_2^\beta = \frac{1}{v_\theta}$$

elde edilir. Böylece ispat tamamlanmış olur.

Teorem 3.21.

$M_3(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

i) s -parametre eğrileri asimptotik değildir.

ii) v -parametre eğrileri daima asimptotiktir.

İspat. $M_3(s, v)$ yüzeyi üzerinde s -parametre eğrilerinin asimptotik olması için

$$e_{M_3} = -(1 - vk_2^\beta)k_1^\beta = 0$$

eşitliğinin sağlanması gerekir. Buradan

$$k_1^\beta = 0 \quad \text{ya da} \quad k_2^\beta = \frac{1}{v}$$

şartlarından en az birinin sağlanması gerekir. Ancak $k_2^\beta = \frac{1}{v}$ koşulunu sağlayan nokta singüler bir noktadır. Diğer taraftan tanım gereği $k_1^\beta \neq 0$ dır. Bu nedenle s -parametre eğrileri asimptotik değildir. Buna karşın $M_3(s, v)$ yüzeyinde $g_{M_3} = 0$ olarak hesaplandığından $M_3(s, v)$ yüzeyi üzerinde v -parametre eğrileri daima asimptotiktir.

Teorem 3.22.

$M_3(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

i) s -parametre eğrilerinin geodezik olması için gerek ve yeter koşul β eğrisinin düzlemsel olmasıdır.

ii) v -parametre eğrileri daima geodeziktir.

İspat. $M_3(s, v)$ regle yüzeyi üzerinde s -parametre eğrilerin geodezik olabilmesi

$$U_{M_3} \times M_{3ss} = -v(k_2^\beta)' \zeta_1^\beta - (1 - vk_2^\beta)k_2^\beta t_\beta = 0$$

koşulunun sağlanması gerekir. Bu vektörel ifadenin sıfıra eşit olması

$$-v(k_2^\beta)' = 0, \quad (15)$$

$$(1 - vk_2^\beta)k_2^\beta = 0. \quad (16)$$

denklemlerinin aynı anda sağlanması ile mümkündür. Burada $v \neq 0$ olduğundan Eşitlik (15) $(k_2^\beta)' = 0$ sonucunu verir. Eşitlik (16) dan $k_2^\beta = 0$ ya da $k_2^\beta = \frac{1}{v}$ elde edilir. Ancak $k_2^\beta = \frac{1}{v}$ koşulunu sağlayan nokta singülerdir. Bu nedenle $k_2^\beta = 0$ dır. Bu durumda ise β eğrisi düzlemsel olur. Ayrıca $U_{M_3} \times M_{3vv} = 0$ eşitliği her zaman sağlandığından $M_3(s, v)$ yüzeyi üzerinde v -parametre eğrileri daima geodeziktir.

3.3. $\frac{1}{\sqrt{2}}(t_\beta + \zeta_1^\beta)$ Doğrultman vektörünün oluşturduğu $M_4(s, v)$ regle yüzeyi

Teorem 3.23.

Öklid uzayı E^3 üzerinde tanımlı $M_4(s, v)$ regle yüzeyi için Gauss eğriliği ve ortalama eğrilik aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$K_{M_4} = -\frac{(k_2^\beta)^2}{((\sqrt{2}-vk_1^\beta)^2 + v^2((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) - 1)(v^2(k_2^\beta)^2 + (1-\sqrt{2}vk_1^\beta)^2)}, \quad (17)$$

$$H_{M_4} = \frac{v^2 k_2^\beta \left(2 \left(\frac{k_1^\beta}{k_2^\beta} \right)' k_2^\beta + (2(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) \right) - \sqrt{2}v(2k_1^\beta k_2^\beta - (k_2^\beta)')}{2\sqrt{v^2(k_2^\beta)^2 + (1-\sqrt{2}vk_1^\beta)^2}((\sqrt{2}-vk_1^\beta)^2 + v^2((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) - 1)}. \quad (18)$$

İspat. $M_4(s, v) = \beta(s) + \frac{v}{\sqrt{2}}(\mathbf{t}_\beta(s) + \boldsymbol{\zeta}_1^\beta(s))$ parametrik denklemi ile verilen yüzeyin s ve v parametrelerine göre birinci ve ikinci mertebeden kısmi türevleri alınır

$$\begin{aligned} M_{4s}(s, v) &= \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}k_1^\beta\right)\mathbf{t}_\beta + \frac{v}{\sqrt{2}}k_1^\beta\boldsymbol{\zeta}_1^\beta + \frac{v}{\sqrt{2}}k_2^\beta\boldsymbol{\zeta}_2^\beta, \\ M_{4ss}(s, v) &= -\frac{v}{\sqrt{2}}\left((k_1^\beta)' + (k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2\right)\mathbf{t}_\beta \\ &+ \left(\left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}k_1^\beta\right)k_1^\beta + \frac{v}{\sqrt{2}}(k_1^\beta)'\right)\boldsymbol{\zeta}_1^\beta + \left(\left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}k_1^\beta\right)k_2^\beta + \frac{v}{\sqrt{2}}(k_2^\beta)'\right)\boldsymbol{\zeta}_2^\beta, \\ M_{4v}(s, v) &= \frac{1}{\sqrt{2}}\mathbf{t}_\beta + \frac{1}{\sqrt{2}}\boldsymbol{\zeta}_1^\beta, \quad M_{4sv}(s, v) = -\frac{k_1^\beta}{\sqrt{2}}\mathbf{t}_\beta + \frac{k_1^\beta}{\sqrt{2}}\boldsymbol{\zeta}_1^\beta + \frac{k_2^\beta}{\sqrt{2}}\boldsymbol{\zeta}_2^\beta, \quad M_{4vv}(s, v) = 0 \end{aligned}$$

elde edilir. Eşitlik (4)'e göre, $M_4(s, v)$ yüzeyinin birim normal vektör alanı

$$U_{M_4} = \frac{M_{4s} \times M_{4v}}{\|M_{4s} \times M_{4v}\|} = \frac{(-\sqrt{2}vk_2^\beta)\mathbf{t}_\beta + (\sqrt{2}vk_2^\beta)\boldsymbol{\zeta}_1^\beta + (1 - \sqrt{2}vk_1^\beta)\boldsymbol{\zeta}_2^\beta}{2\sqrt{v^2(k_2^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_1^\beta)^2}}$$

şeklinde. Buna göre $M_4(s, v)$ yüzeyinin $E_{M_4}, F_{M_4}, G_{M_4}$ birinci ve $e_{M_4}, f_{M_4}, g_{M_4}$ ikinci temel form katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır

$$\begin{aligned} E_{M_4} &= \langle M_{4s}, M_{4s} \rangle = \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}k_1^\beta\right)^2 + \frac{v^2}{2}\left((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2\right), \\ F_{M_4} &= \langle M_{4s}, M_{4v} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad G_{M_4} = \langle M_{4v}, M_{4v} \rangle = 1, \quad e_{M_4} = \langle M_{4ss}, U_{M_4} \rangle = \\ &= \frac{v^2k_2^\beta\left(2\left(\frac{k_1^\beta}{k_2^\beta}\right)'k_2^\beta + (2(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2)\right) - \sqrt{2}v(2k_1^\beta k_2^\beta - (k_2^\beta)') + 2k_2^\beta}{2\sqrt{v^2(k_2^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_1^\beta)^2}}, \\ f_{M_4} &= \langle M_{4sv}, U_{M_4} \rangle = \frac{\sqrt{2}k_2^\beta}{2\sqrt{v^2(k_2^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_1^\beta)^2}}, \quad g_{M_4} = \langle M_{4vv}, U_{M_4} \rangle = 0 \end{aligned}$$

bu katsayılar sırasıyla Eşitlik (5) ve (6)'da yerine konulduğunda, Eşitlik (17) ve (18) ile verilen Gauss ve ortalama eğrilikler doğrudan elde edilir.

Teorem 3.23. temel alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

Sonuç 3.24.

$M_4(s, v)$ regle yüzeyinin dayanak eğrisi β düzlemsel ise, $M_4(s, v)$ yüzeyi hem açılabilir hemde minimal bir yüzeydir.

İspat. Kabul edelim ki β eğrisi düzlemsel olsun, Bu durumda $k_2^\beta = 0$ olur. Diğer taraftan (17) ve (18) numaralı denklemler göz önüne alındığında, terimler yeniden düzenlenip $k_2^\beta = 0$ yerine konulursa

$$2k_2^\beta(k_1^\beta)' - 2k_1^\beta(k_2^\beta)' + k_2^\beta(2(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) - \frac{\sqrt{2}}{v}(2k_1^\beta k_2^\beta - (k_2^\beta)') = 0$$

elde edilir. Bu durumda, $M_4(s, v)$ yüzeyi hem açılabilir hemde minimal bir yüzey olur.

Teorem 3.25.

$M_4(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında tekillik göstermesi için gerek ve yeter koşul

$$v_\theta k_2^\beta = 0 \text{ ve } 1 - \sqrt{2}v_\theta k_1^\beta = 0$$

eşitliklerinin sağlanmasıdır.

İspat. $M_4(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında singüler olması için gerek ve yeter şart

$$\|M_{4s} \times M_{4v}\|(s_\theta, v_\theta) = 0$$

olmasıdır. Bu ifadeye karşılık gelen türevler yerine konulduğunda

$$\|M_{4s} \times M_{4v}\|(s_\theta, v_\theta) = v_\theta^2 (k_2^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v_\theta k_1^\beta)^2 = 0$$

bulunur. Bu ifade düzenlenirse

$$v_\theta k_2^\beta = 0 \text{ ve } 1 - \sqrt{2}v_\theta k_1^\beta = 0$$

elde edilir. Böylece ispat tamamlanmış olur.

Teorem 3.26.

$M_4(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) $M_4(s, v)$ regle yüzeyinin dayanak eğrisi β düzlemsel ise s-parametre eğrileri asimptotiktir.
- ii) v-parametre eğrileri daima asimptotiktir.

İspat. Kabul edelim ki β eğrisi düzlemsel olsun, $M_4(s, v)$ yüzeyi üzerinde s-parametre eğrilerinin asimptotik olması için

$$v^2 k_2^\beta \left(2 \left(\frac{k_1^\beta}{k_2^\beta} \right)' k_2^\beta + (2(k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) \right) - \sqrt{2}v (2k_1^\beta k_2^\beta - (k_2^\beta)') + 2k_2^\beta = 0$$

olmalıdır. Burada $v, k_1^\beta \neq 0$ ve $k_2^\beta = 0$ olduğundan s-parametre eğrileri asimptotiktir. Ayrıca $M_4(s, v)$ yüzeyinde $g_{M_4} = 0$ olarak hesaplandığından $M_4(s, v)$ yüzeyi üzerinde v-parametre eğrileri daima asimptotiktir.

Teorem 3.27.

$M_4(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) s-parametre eğrileri geodezik değildir.
- ii) v-parametre eğrileri daima geodeziktir.

İspat. $M_4(s, v)$ regle yüzeyi üzerinde s-parametre eğrilerin geodezik olabilmesi

$$U_{M_4} \times M_{4ss} = X_1 t_\beta + Y_1 \zeta_1^\beta + Z_1 \zeta_1^\beta = 0$$

koşulunun sağlanması gerekir. Burada X_1, Y_1, Z_1 katsayıları aşağıdaki şekildedir:

$$X_1 = \frac{\sqrt{2}v k_2^\beta \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}} k_1^\beta \right) k_2^\beta - 2(1 - \sqrt{2}v k_1^\beta) \left(\left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}} k_1^\beta \right) k_1^\beta + \frac{v}{\sqrt{2}} (k_1^\beta)' \right) + v^2 k_2^\beta (k_2^\beta)'}{2\sqrt{v^2 (k_2^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v k_1^\beta)^2}}$$

$$Y_1 = \frac{\sqrt{2}vk_2^\beta \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}k_1^\beta\right)k_2^\beta + v^2k_2^\beta(k_1^\beta)' - \sqrt{2}v(1 - \sqrt{2}vk_1^\beta)\left((k_1^\beta)' + (k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2\right)}{2\sqrt{v^2(k_2^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_1^\beta)^2}},$$

$$Z_1 = \frac{vk_2^\beta \left(-\sqrt{2}\left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}k_1^\beta\right)k_1^\beta + vk_2^\beta \left(v(k_1^\beta)' + (k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2\right) - vk_2^\beta(k_1^\beta)'\right)}{2\sqrt{v^2(k_2^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_1^\beta)^2}}.$$

Yüzeyin geodezik olması için bu katsayıların aynı anda sıfır olması gerekir. Ancak $(1 - \sqrt{2}vk_1^\beta) = 0$ ve $vk_2^\beta = 0$ noktaları singüler nokta olduğu için s-parametre eğrileri geodezik değildir. Buna karşın $U_{M_4} \times M_{4vv} = 0$ eşitliği her zaman sağlandığından $M_4(s, v)$ yüzeyi üzerinde v-parametre eğrileri daima geodeziktir.

3.5. $\frac{1}{\sqrt{2}}(t_\beta(s) + \zeta_2^\beta(s))$ doğrultman vektörünün oluşturduğu $M_5(s, v)$ regle yüzeyi

Teorem 3.28.

Öklid uzayı E^3 üzerinde tanımlı $M_5(s, v)$ regle yüzeyi için Gauss eğriliği ve ortalama eğrilik aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$K_{M_5} = -\frac{(k_1^\beta)^2}{((\sqrt{2}-vk_2^\beta)^2 + v^2((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) - 1)(v^2(k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_2^\beta)^2)}, \quad (19)$$

$$H_{M_5} = \frac{-v^2k_1^\beta \left(2\left(\frac{k_2^\beta}{k_1^\beta}\right)'k_1^\beta + (2(k_2^\beta)^2 + (k_1^\beta)^2)\right) + \sqrt{2}v(2k_1^\beta k_2^\beta - (k_1^\beta)')}{2\sqrt{v^2(k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_2^\beta)^2}((\sqrt{2}-vk_2^\beta)^2 + v^2((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2) - 1)}. \quad (20)$$

İspat. $M_5(s, v) = \beta(s) + \frac{v}{\sqrt{2}}(t_\beta(s) + \zeta_2^\beta(s))$ parametrik denklemi ile verilen yüzeyin s ve v parametrelerine göre birinci ve ikinci mertebeden kısmi türevleri alınır

$$M_{5s}(s, v) = \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}k_2^\beta\right)t_\beta + \frac{v}{\sqrt{2}}k_1^\beta\zeta_1^\beta + \frac{v}{\sqrt{2}}k_2^\beta\zeta_2^\beta,$$

$$M_{5ss}(s, v) = -\frac{v}{\sqrt{2}}((k_2^\beta)' + (k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2)t_\beta + \left(\left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}k_2^\beta\right)k_1^\beta + \frac{v}{\sqrt{2}}(k_1^\beta)'\right)\zeta_1^\beta$$

$$+ \left(\left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}k_2^\beta\right)k_2^\beta + \frac{v}{\sqrt{2}}(k_2^\beta)'\right)\zeta_2^\beta,$$

$$M_{5sv}(s, v) = \frac{1}{\sqrt{2}}t_\beta + \frac{1}{\sqrt{2}}\zeta_2^\beta, \quad M_{5sv}(s, v) = -\frac{k_2^\beta}{\sqrt{2}}t_\beta + \frac{k_1^\beta}{\sqrt{2}}\zeta_1^\beta + \frac{k_2^\beta}{\sqrt{2}}\zeta_2^\beta, \quad M_{5vv}(s, v) = 0$$

elde edilir. Eşitlik (4)'e göre, $M_5(s, v)$ yüzeyinin birim normal vektör alanı

$$U_{M_5} = \frac{\sqrt{2}vk_1^\beta}{2\sqrt{v^2(k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_2^\beta)^2}}t_\beta - \frac{(1 - \sqrt{2}vk_2^\beta)}{\sqrt{v^2(k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_2^\beta)^2}}\zeta_1^\beta - \frac{\sqrt{2}vk_1^\beta}{2\sqrt{v^2(k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}vk_2^\beta)^2}}\zeta_2^\beta$$

şeklinde dir. Buna göre $M_5(s, v)$ yüzeyinin $E_{M_5}, F_{M_5}, G_{M_5}$ birinci ve $e_{M_5}, f_{M_5}, g_{M_5}$ ikinci temel form katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned}
E_{M_5} &= \langle \Phi_{5s}, \Phi_{5s} \rangle = \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}} k_2^\beta\right)^2 + \frac{v^2}{2} \left((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2\right), \\
F_{M_5} &= \langle M_{5s}, M_{5v} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad G_{M_5} = \langle M_{5v}, M_{5v} \rangle = 1, \\
e_{M_5} &= \langle M_{5ss}, U_{M_5} \rangle = \frac{-v^2 k_1^\beta \left(2 \left(\frac{k_2^\beta}{k_1^\beta}\right)' k_1^\beta + (2(k_2^\beta)^2 + (k_1^\beta)^2)\right) + \sqrt{2}v (2k_1^\beta k_2^\beta - (k_1^\beta)') - 2k_1^\beta}{2\sqrt{v^2(k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v k_2^\beta)^2}}, \\
f_{M_5} &= \langle M_{5sv}, U_{M_5} \rangle = \frac{-\sqrt{2}k_1^\beta}{2\sqrt{v^2(k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v k_2^\beta)^2}}, \quad g_{M_5} = \langle M_{5vv}, U_{M_5} \rangle = 0
\end{aligned}$$

bu katsayılar sırasıyla Eşitlik (5) ve (6)'da yerine konulduğunda, Eşitlik (19) ve (20) ile verilen Gauss ve ortalama eğrilikler doğrudan elde edilir.

Teorem 3.28. temel alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

Sonuç 3.29.

$M_5(s, v)$ regle yüzeyi açılabilir değildir.

Sonuç 3.30.

$M_5(s, v)$ regle yüzeyinin minimal olması için gerek ve yeter koşul

$$-v^2 k_1^\beta \left(2 \left(\frac{k_2^\beta}{k_1^\beta}\right)' k_1^\beta + (2(k_2^\beta)^2 + (k_1^\beta)^2)\right) + \sqrt{2}v (2k_1^\beta k_2^\beta - (k_1^\beta)') = 0$$

eşitliğinin sağlanmasıdır.

Teorem 3.31.

$M_5(s, v)$ regle yüzeyi her noktada düzgündür ve herhangi bir tekil nokta içermez.

İspat.

$M_5(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında singüler olması için gerek ve yeter koşul

$$\|M_{5s} \times M_{5v}\|(s_\theta, v_\theta) = \frac{1}{2} \left(v_\theta^2 (k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v_\theta k_2^\beta)^2\right) = 0$$

eşitliğinin sağlanmasıdır. Burada $v_\theta \neq 0$ ve $k_1^\beta \neq 0$ olduğundan

$$\frac{1}{2} \left(v_\theta^2 (k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v_\theta k_2^\beta)^2\right) \neq 0$$

dır. Dolayısıyla $M_5(s, v)$ regle yüzeyi tekil nokta içermez.

Teorem 3.32.

$M_5(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

i) s -parametre eğrilerinin asimptotik olması için gerek ve yeter koşul $-v^2 k_1^\beta \left(2 \left(\frac{k_2^\beta}{k_1^\beta}\right)' k_1^\beta + \right.$

$$\left. (2(k_2^\beta)^2 + (k_1^\beta)^2)\right) + \sqrt{2}v (2k_1^\beta k_2^\beta - (k_1^\beta)') - 2k_1^\beta = 0 \text{ denkleminin sağlanmasıdır.}$$

ii) v -parametre eğrileri daima asimptotiktir.

İspat. $M_5(s, v)$ yüzeyi üzerinde s-parametre eğrilerinin asimptotik olması için

$$e_{M_5} = \frac{-v^2 k_1^\beta \left(2 \left(\frac{k_2^\beta}{k_1^\beta} \right)' k_1^\beta + (2(k_2^\beta)^2 + (k_1^\beta)^2) \right) + \sqrt{2}v (2k_1^\beta k_2^\beta - (k_1^\beta)') - 2k_1^\beta}{2\sqrt{v^2 (k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v k_2^\beta)^2}} = 0$$

eşitliği sağlanmalıdır. Buradan ispat açıktır. Ayrıca $M_5(s, v)$ yüzeyinde $g_{M_5} = 0$ olarak hesaplandığından $M_5(s, v)$ yüzeyi üzerinde v-parametre eğrileri daima asimptotiktir.

Teorem 3.33.

$M_5(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

i) s-parametre eğrilerinin geodezik olması için gerek ve yeter koşul

$$v = \frac{1}{\sqrt{2}k_2^\beta}, \quad (k_1^\beta)' = -k_1^\beta k_2^\beta, \quad (k_2^\beta)' = (k_1^\beta)^2 - k_1^\beta k_2^\beta$$

eşitliklerinin aynı anda sağlanmasıdır.

ii) v-parametre eğrileri daima geodeziktir.

İspat. $M_5(s, v)$ regle yüzeyi üzerinde s-parametre eğrilerin geodezik olabilmesi için

$$U_{M_5} \times M_{5ss} = X_1 t_\beta + Y_1 \zeta_1^\beta + Z_1 \zeta_1^\beta = 0$$

koşulunun sağlanması gerekir. Burada X_1, Y_1, Z_1 katsayıları aşağıdaki şekildedir:

$$X_1 = \frac{\sqrt{2}v k_1^\beta \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}} k_2^\beta\right) k_1^\beta - 2 \left(1 - \sqrt{2}v k_2^\beta\right) \left(\left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}} k_2^\beta\right) k_2^\beta + \frac{v}{\sqrt{2}} (k_2^\beta)' \right) + v^2 k_1^\beta (k_1^\beta)'}{2\sqrt{v^2 (k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v k_2^\beta)^2}},$$

$$Y_1 = \frac{-\sqrt{2}v k_1^\beta \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}} k_2^\beta\right) k_2^\beta - v^2 k_1^\beta (k_2^\beta)' + v^2 k_1^\beta \left((k_1^\beta)' + (k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2 \right)}{2\sqrt{v^2 (k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v k_2^\beta)^2}},$$

$$Z_1 = \frac{\sqrt{2}v k_1^\beta \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}} k_2^\beta\right) k_1^\beta + v^2 k_1^\beta (k_1^\beta)' + \sqrt{2}v (1 - \sqrt{2}v k_2^\beta) \left((k_1^\beta)' + (k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2 \right)}{2\sqrt{v^2 (k_1^\beta)^2 + (1 - \sqrt{2}v k_2^\beta)^2}}.$$

Yüzeyin geodezik olması için bu katsayıların aynı anda sıfır olması gerekir. Paydalar ortaktır ve sıfırdan farklıdır. Dolayısıyla yalnızca payların sıfır olması gerekir. Bu da ancak

$$v = \frac{1}{\sqrt{2}k_2^\beta}, \quad (k_1^\beta)' = -k_1^\beta k_2^\beta, \quad (k_2^\beta)' = (k_1^\beta)^2 - k_1^\beta k_2^\beta$$

eşitlikleri sağlandığında mümkündür. Diğer taraftan $U_{M_5} \times M_{5vv} = 0$ eşitliği her zaman sağlandığından $M_5(s, v)$ yüzeyi üzerinde v-parametre eğrileri daima geodeziktir.

3.6. $\frac{1}{\sqrt{2}}(\zeta_1^\beta + \zeta_2^\beta)$ Doğrultman vektörünün oluşturduğu $M_6(s, v)$ regle yüzeyi

Teorem 3.34.

Öklid uzayı E^3 üzerinde tanımlı $M_6(s, v)$ regle yüzeyi için Gauss eğriliği ve ortalama eğrilik aşağıdaki ifadelerle verilir

$$K_{M_6} = 0, \quad (21)$$

$$H_{M_6} = \frac{k_2^\beta - k_1^\beta}{2\sqrt{2} - 2v(k_1^\beta + k_2^\beta)}. \quad (22)$$

İspat. $M_6(s, v) = \beta(s) + \frac{v}{\sqrt{2}}(\zeta_1^\beta(s) + \zeta_2^\beta(s))$ parametrik denklemi ile verilen yüzeyin s ve v parametrelerine göre birinci ve ikinci mertebeden kısmi türevleri alınır

$$M_{6s}(s, v) = \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}(k_1^\beta + k_2^\beta)\right) \mathbf{t}_\beta,$$

$$M_{6ss}(s, v) = -\frac{v}{\sqrt{2}}((k_1^\beta)' + (k_2^\beta)') \mathbf{t}_\beta + \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}(k_1^\beta + k_2^\beta)\right) k_1^\beta \zeta_1^\beta + \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}(k_1^\beta + k_2^\beta)\right) k_2^\beta \zeta_2^\beta,$$

$$M_{6v}(s, v) = \frac{1}{\sqrt{2}} \zeta_1^\beta + \frac{1}{\sqrt{2}} \zeta_2^\beta, \quad M_{6sv}(s, v) = -\frac{1}{\sqrt{2}}(k_1^\beta + k_2^\beta) \mathbf{t}_\beta, \quad M_{6vv}(s, v) = 0$$

elde edilir. Eşitlik (4)'e göre, $M_4(s, v)$ yüzeyinin birim normal vektör alanı

$$U_{M_6} = \frac{M_{6s} \times M_{6v}}{\|M_{6s} \times M_{6v}\|} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \zeta_1^\beta + \frac{1}{\sqrt{2}} \zeta_2^\beta$$

şeklindedir. Buna göre $M_6(s, v)$ yüzeyinin $E_{M_6}, F_{M_6}, G_{M_6}$ birinci ve $e_{M_6}, f_{M_6}, g_{M_6}$ ikinci temel form katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E = \langle M_{6s}, M_{6s} \rangle = \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}(k_1^\beta + k_2^\beta)\right)^2,$$

$$F = \langle M_{6s}, M_{6v} \rangle = 0, \quad G = \langle M_{6v}, M_{6v} \rangle = 1,$$

$$e = \langle M_{6ss}, U_{M_6} \rangle = (k_2^\beta - k_1^\beta) \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{v}{2}(k_1^\beta + k_2^\beta) \right),$$

$$f = \langle M_{6sv}, U_{M_6} \rangle = 0, \quad g = \langle M_{6vv}, U_{M_6} \rangle = 0,$$

bu katsayılar sırasıyla Eşitlik (5) ve (6)'da yerine konulduğunda, Eşitlik (21) ve (22) ile verilen Gauss ve ortalama eğrilikler doğrudan elde edilir.

Teorem 3.34. temel alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

Sonuç 3.35.

$M_6(s, v)$ regle yüzeyi açılabilir.

Sonuç 3.36.

$M_6(s, v)$ regle yüzeyinin minimal olması için gerek ve yeter koşul $k_1^\beta = k_2^\beta$ olmasıdır.

İspat. $M_6(s, v)$ regle yüzeyi minimal olduğunu kabul edelim. Bu durumda Eşitlik (22)'ye göre ortalama eğrilik şöyle verilir:

$$H_{M_6} = \frac{k_2^\beta - k_1^\beta}{2\sqrt{2} - 2v(k_1^\beta + k_2^\beta)} = 0$$

bu eşitlikten

$$k_2^\beta - k_1^\beta = 0 \Rightarrow k_2^\beta = k_1^\beta$$

elde edilir. Tersine, eğer $k_1^\beta = k_2^\beta$ eşitliği sağlanıyorsa, $H_{M_6} = 0$ olur. Bu durumda yüzey minimal olur.

Sonuç 3.37.

$M_6(s, v)$ regle yüzeyi minimal ise $\theta_\beta = \frac{\pi}{4} + k\pi$ dir.

İspat. Kabul edelim ki $M_6(s, v)$ regle yüzeyi minimal olsun. Bu durumda Sonuç 3.36.' dan $k_2^\beta = k_1^\beta$ dir. Diğer taraftan

$$\theta_\beta = \arctan \frac{k_2(s)}{k_1(s)} = \arctan(1)$$

olduğundan $\theta_\beta = \frac{\pi}{4} + k\pi$, $k \in \mathbb{Z}$ elde edilir.

Teorem 3.38.

$M_6(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında tekillik göstermesi için gerek ve yeter koşul

$$k_1^\beta + k_2^\beta = \frac{\sqrt{2}}{v_\theta}$$

eşitliğinin sağlanmasıdır.

İspat. $M_6(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında singüler olması için gerek ve yeter koşul

$$\|M_{6s} \times M_{6v}\|(s_\theta, v_\theta) = 1 - \frac{v_0}{\sqrt{2}}(k_1^\beta + k_2^\beta) = 0$$

eşitliğinin sağlanmasıdır. Bu ifade uygun şekilde düzenlenirse istenilen eşitlik elde edilir.

Teorem 3.39.

$M_6(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) s-parametre eğrilerinin asimptotik olması için gerek ve yeter koşul $k_1^\beta = k_2^\beta$ eşitliğinin sağlanmasıdır.
- ii) v-parametre eğrileri daima asimptotiktir.

İspat. $M_6(s, v)$ yüzeyi üzerinde s-parametre eğrilerinin asimptotik olması için gerek ve yeter koşul

$$e = (k_2^\beta - k_1^\beta) \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{v}{2}(k_1^\beta + k_2^\beta) \right) = 0$$

olmasıdır. Buradan

$$k_2^\beta = k_1^\beta \text{ ya da } k_1^\beta + k_2^\beta = \frac{\sqrt{2}}{v_0}$$

dir. Burada $k_1^\beta + k_2^\beta = \frac{\sqrt{2}}{v_0}$ yüzey üzerinde singüler nokta olduğundan $k_1^\beta = k_2^\beta$ olmalıdır. Ayrıca $M_6(s, v)$ yüzeyinde $g_{M_6} = 0$ olarak hesaplandığından $M_6(s, v)$ yüzeyi üzerinde v -parametre eğrileri daima asimptotiktir.

Teorem 3.40.

$M_6(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) s -parametre eğrileri geodezik değildir.
- ii) v -parametre eğrileri daima geodeziktir.

İspat. $M_6(s, v)$ regle yüzeyi üzerinde s -parametre eğrilerin geodezik olabilmesi için

$$U_{M_6} \times M_{6ss} = \frac{(-\sqrt{2} + v(k_1^\beta + k_2^\beta))(k_1^\beta + k_2^\beta)t_\beta - v((k_1^\beta)' + (k_2^\beta)')\zeta_1^\beta - v((k_1^\beta)' + (k_2^\beta)')\zeta_2^\beta}{2} = 0$$

koşulunun sağlanması gerekir. Buradan

$$(-\sqrt{2} + v(k_1^\beta + k_2^\beta))(k_1^\beta + k_2^\beta) = 0, \quad ((k_1^\beta)' + (k_2^\beta)') = 0$$

ifadelerinin aynı anda sıfır olması gerekir.

$$(k_1^\beta + k_2^\beta) = \frac{\sqrt{2}}{v}, \quad k_1^\beta = -k_2^\beta + c$$

belirtilen koşulu sağlayan $(k_1^\beta + k_2^\beta) = \frac{\sqrt{2}}{v}$ noktası yüzey üzerinde singüler nokta olduğu için s -parametre eğrileri geodezik değildir. Buna karşın $U_{M_6} \times M_{6vv} = 0$ eşitliği her zaman sağlandığından $M_6(s, v)$ yüzeyi üzerinde v -parametre eğrileri daima geodeziktir.

3.7. $\frac{1}{\sqrt{3}}(t_\beta + \zeta_1^\beta + \zeta_2^\beta)$ Doğrultman vektörünün oluşturduğu $M_7(s, v)$ regle yüzeyi

Teorem 3.41.

Öklid uzayı E^3 üzerinde tanımlı $M_7(s, v)$ regle yüzeyi için Gauss eğriliği ve ortalama eğrilik aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$K_{M_7} = \frac{(k_2^\beta - k_1^\beta)^2}{3\left(1 - 3\left(1 - \frac{v}{\sqrt{3}}(k_1^\beta + k_2^\beta)\right)^2 + v^2(k_2^\beta)^2 + (k_1^\beta)^2\right)}, \quad (23)$$

$$H_{M_7} = \frac{v^2 \left(\left((k_1^\beta)' + (k_2^\beta)' + (k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2 \right) (k_2^\beta - k_1^\beta) - (k_1^\beta + k_2^\beta) k_1^\beta (k_1^\beta + 2k_2^\beta) + (k_1^\beta)' (k_1^\beta + 2k_2^\beta) \right. \\ \left. + (k_1^\beta + k_2^\beta) k_2^\beta (k_2^\beta + 2k_1^\beta) - (k_2^\beta)' (k_2^\beta + 2k_1^\beta) \right. \\ \left. + \sqrt{3}v \left(2(k_1^\beta - k_2^\beta) + (k_2^\beta)' - (k_1^\beta)' \right) + (k_2^\beta - k_1^\beta) \right)}{6\sqrt{3} \left(1 - \frac{v}{\sqrt{2}}(k_1^\beta + k_2^\beta) \right)^2 - 2\sqrt{3}}. \quad (24)$$

İspat. $M_7(s, v) = \beta(s) + \frac{v}{\sqrt{3}}(t_\beta(s) + \zeta_1^\beta(s) + \zeta_2^\beta(s))$ parametrik denklemi ile verilen yüzeyin s ve v parametrelerine göre birinci ve ikinci mertebeden kısmi türevleri alınırsa

$$M_{7s}(s, v) = \left(1 - \frac{v}{\sqrt{3}}(k_1^\beta + k_2^\beta)\right) \mathbf{t}_\beta + \frac{vk_1^\beta}{\sqrt{3}} \zeta_1^\beta + \frac{vk_2^\beta}{\sqrt{3}} \zeta_2^\beta,$$

$$M_{7ss}(s, v) = -\frac{v}{\sqrt{3}} \left((k_1^\beta)' + (k_2^\beta)' \right) \mathbf{t}_\beta$$

$$+ \left(\left(1 - \frac{v}{\sqrt{3}}(k_1^\beta + k_2^\beta)\right) k_1^\beta + \frac{v}{\sqrt{3}}(k_1^\beta)' \right) \zeta_1^\beta + \left(\left(1 - \frac{v}{\sqrt{3}}(k_1^\beta + k_2^\beta)\right) k_2^\beta + \frac{v}{\sqrt{3}}(k_2^\beta)' \right) \zeta_2^\beta,$$

$$M_{7v}(s, v) = \frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{t}_\beta + \frac{1}{\sqrt{3}} \zeta_1^\beta + \frac{1}{\sqrt{3}} \zeta_2^\beta, \quad M_{7sv}(s, v) = -\frac{1}{\sqrt{3}}(k_1^\beta + k_2^\beta) \mathbf{t}_\beta + \frac{k_1^\beta}{\sqrt{3}} \zeta_1^\beta + \frac{k_2^\beta}{\sqrt{3}} \zeta_2^\beta, \quad M_{7vv}(s, v) = 0,$$

elde edilir. Eşitlik (4)'e göre $M_7(s, v)$ yüzeyinin birim normal vektör alanı

$$U_{M_7} = \frac{v(k_1^\beta - k_2^\beta) \mathbf{t}_\beta + (-\sqrt{3} + v(k_1^\beta + 2k_2^\beta)) \zeta_1^\beta + (\sqrt{3} - v(k_2^\beta + 2k_1^\beta)) \zeta_2^\beta}{\sqrt{v^2(k_1^\beta - k_2^\beta)^2 + (-\sqrt{3} + v(k_1^\beta + 2k_2^\beta))^2 + (\sqrt{3} - v(k_2^\beta + 2k_1^\beta))^2}}$$

şeklinde dir. Buna göre, $M_7(s, v)$ yüzeyinin $E_{M_7}, F_{M_7}, G_{M_7}$ birinci ve $e_{M_7}, f_{M_7}, g_{M_7}$ ikinci temel form katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_{M_7} = \langle M_{7s}, M_{7s} \rangle = \left(1 - \frac{v}{\sqrt{3}}(k_1^\beta + k_2^\beta)\right)^2 + \frac{v^2}{3} \left((k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2 \right),$$

$$F_{M_7} = \langle M_{7s}, M_{7v} \rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad G_{M_7} = \langle M_{7v}, M_{7v} \rangle = 1,$$

$$e = \langle M_{7ss}, U_{M_7} \rangle = \frac{-\sqrt{3}v^2 \left((k_1^\beta)' + (k_2^\beta)' + (k_1^\beta)^2 + (k_2^\beta)^2 \right) (k_1^\beta - k_2^\beta) + \left((\sqrt{3} - v(k_1^\beta + k_2^\beta)) k_1^\beta + v(k_1^\beta)' \right) (-\sqrt{3} + v(k_1^\beta + 2k_2^\beta)) + \left((\sqrt{3} - v(k_1^\beta + k_2^\beta)) k_2^\beta + v(k_2^\beta)' \right) (\sqrt{3} - v(k_2^\beta + 2k_1^\beta))}{v^2(k_1^\beta - k_2^\beta)^2 + (-\sqrt{3} + v(k_1^\beta + 2k_2^\beta))^2 + (\sqrt{3} - v(k_2^\beta + 2k_1^\beta))^2},$$

$$f_{M_7} = \langle M_{7sv}, U_{M_7} \rangle = \frac{k_2^\beta - k_1^\beta}{3}, \quad g_{M_7} = \langle M_{7vv}, U_{M_7} \rangle = 0.$$

Bu katsayılar sırasıyla Eşitlik (5) ve (6)'da yerine konulduğunda, Eşitlik (23) ve (24) ile verilen Gauss ve ortalama eğrilikler doğrudan elde edilir.

Teorem 3.41. temel alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

Sonuç 3.42.

$M_7(s, v)$ regle yüzeyi açılabilir regle yüzey olması için gerek ve yeter koşul $k_1^\beta = k_2^\beta$ eşitliğinin sağlanmasıdır.

Sonuç 3.43.

β eğrisinin eğrilikleri arasında $k_1^\beta = k_2^\beta$ bağıntısı varsa $M_7(s, v)$ regle yüzeyi minimaldir.

İspat. $k_1^\beta = k_2^\beta$ eşitliği Eşitlik (24)'te yerine yazıldığında, $H_{M_7} = 0$ olur. Bu ise yüzeyin minimal olmasıdır.

Teorem 3.44.

$M_7(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında tekillik göstermesi için gerek ve yeter koşul

$$k_1^\beta = k_2^\beta = \frac{\sqrt{3}}{3v_\theta}$$

eşitliğinin sağlanmasıdır.

İspat. $M_7(s, v)$ regle yüzeyinin (s_θ, v_θ) noktasında singüler olması için gerek ve yeter koşul

$$\|M_{7s} \times M_{7v}\|(s_0, v_0) = \frac{1}{3} \sqrt{v_0^2(k_1^\beta - k_2^\beta)^2 + (-\sqrt{3} + v_0(k_1^\beta + 2k_2^\beta))^2 + (\sqrt{3} - v_0(k_2^\beta + 2k_1^\beta))^2}$$

eşitliğinin sağlanmasıdır. Burada

$$v_\theta(k_1^\beta - k_2^\beta) = 0, -\sqrt{3} + v_\theta(k_1^\beta + 2k_2^\beta) = 0, \sqrt{3} - v_\theta(k_2^\beta + 2k_1^\beta) = 0$$

dır. Bu ifadeler birlikte düşünülürse

$$k_1^\beta = k_2^\beta = \frac{\sqrt{3}}{3v_\theta}$$

elde edilir.

Teorem 3.45.

$M_7(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) s -parametre eğrileri asimptotik değildir.
- ii) v -parametre eğrileri daima asimptotiktir.

İspat. Diğer durumlara benzer şekilde ispatlanır.

Teorem 3.46.

$M_7(s, v)$ regle yüzeyi için aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

- i) s -parametre eğrileri geodezik değildir.
- ii) v -parametre eğrileri daima geodeziktir.

İspat. Diğer durumlara benzer şekilde ispatlanır.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışma, Smarandache eğrileri, Bishop çatısı ve regle yüzey teorisini bir araya getirerek yeni bir yüzey sınıfı önermektedir. Klasik Frenet çatısının yetersiz kaldığı durumları aşmak amacıyla, $\mathbf{t}_\alpha \zeta_1^\alpha$ Bishop adjoint eğrisi taban eğri olarak alınmış ve Bishop çatısına göre tanımlanan Smarandache türü doğrultmanlarla regle yüzeyler inşa edilmiştir.

Bu yüzeylerin açılabilirlik, minimallik ve tekillik gibi geometrik özellikleri analiz edilmiş; ayrıca üzerlerindeki parametrik eğrilerin geodezik ve asimptotik davranışları incelenmiştir.

Damar (2025) çalışmasında, dayanak eğri olarak $\zeta_1^\alpha + \zeta_2^\alpha$ bileşiminden elde edilen adjoint eğri alınırken, bu çalışmada dayanak eğri olarak $\mathbf{t}_\alpha + \zeta_1^\alpha$ kombinasyonuna dayalı adjoint eğri kullanılmıştır. Yüzey üretiminde dayanak eğrinin bu şekilde değiştirilmesi, yüzeylerin eğrilik,

minimalite ve geodezik-asimptotik karakteristikleri üzerinde belirgin farklılıklara yol açmıştır. Özellikle açılabilir yüzey ve tekil noktaların sayısında artışlar gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar yalnızca teorik geometri alanına katkı sağlamakla kalmayıp; kinematik, bilgisayarla geometrik modelleme ve fizik gibi uygulamalı alanlarda da yeni potansiyel uygulamalar sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, önerilen yöntemin farklı çatılar için uygulanabilirliği araştırılabilir. Ayrıca çalışmanın Lorentz-Minkowski uzayına genellenmesi, timelike ve spacelike yüzeylerin analizi açısından yeni perspektifler sağlayabilir. Buna ek olarak, bu tür yüzeylerin sayısal modelleme yöntemleriyle görselleştirilmesi ve fiziksel sistemlere entegrasyonu üzerine uygulamalı çalışmalar da gerçekleştirilebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Katkı Beyanı Özeti

Yazar, makalenin tamamı için tek başına sorumluluk beyan eder.

Teşekkür

Bu makaleye yorum ve önerileriyle katkıda bulunan hakemlere teşekkür ederim.

Kaynaklar

Alegre P, Arslan K, Carriazo A, Murathan C, Öztürk G., 2010. Some special types of developable ruled surface. Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics, 39: 319-325.

Ali AT., 2010. Special smarandache curves in the Euclidean space. International Journal of Mathematics Combinatorics, 2: 30-36.

Ali AT, Abdel Aziz HS, Sorour AH., 2013. Ruled surfaces generated by some special curves in Euclidean 3-space. Journal of the Egyptian Mathematical Society, 21: 285–294.

Bishop LR., 1975. There is more than one way to frame a curve. The American Mathematical Monthly, 82: 246–251.

Bükcü B, Karacan MK., 2009. The slant helices according to Bishop frame. International Journal of Computing Science and Mathematics, 3: 67–70.

Canlı D, Şenyurt S, Kaya FE, Grilli L., 2024. The pedal curves generated by alternative frame vectors and their Smarandache curves. Symmetry, 16: 1012.

Damar E, Yüksel N, Vanlı AT., 2017. The ruled surfaces according to type-2 Bishop frame in E^3 . International Mathematical Forum, 12: 133-143.

Damar E., 2024. Adjoint curves of special Smarandache curves with respect to Bishop frame. AIMS Mathematics, 9(12): 35355-35376.

Damar E., 2025. A novel approach to ruled surfaces using adjoint curve. Symmetry, 17(7): 1018.

Do Carmo MP., 2016. Differential geometry of curves and surfaces. Revised and Updated Second Edition; Courier Dover Publications: Mineola, NY, USA.

Güler F., 2021. An approach for designing a developable and minimal ruled surfaces using the curvature theory. International Journal of Geometric Methods in Modern Physics, 18: 2150015.

Kalkan ÖB, Şenyurt S., 2024. Osculating type ruled surfaces with type-2 bishop frame in E^3 . Symmetry, 16: 498.

Karacan MK, Yoon DW, Yuksel N., 2017. Classification of some special types ruled surfaces in simply isotropic 3-space. Annals of West University of Timisoara-Mathematics and Computer Science, 55: 87-98.

Köse O., 1999. A method of the determination of a developable ruled surface. Mechanism and Machine Theory, 34(1): 187–193.

Izumiya S, Takeuchi N., 2004. New special curves and developable surfaces. Turkish Journal of Mathematics, 28(2) :153–164.

Nurkan SK, Güven İ., 2022. A new approach for Smarandache curves. Turkish Journal of Mathematics and Computer Science, 14: 155–165.

Nurkan SK, Güven İA, Karacan MK., 2019. Characterizations of adjoint curves in Euclidean 3-space. Proceedings of the National Academy of Sciences, 89: 155-161.

Mendonca T, Alan J, Teixeira R., 2024. Smarandache curves of natural curves pairaccording to Frenet frame. Advances Resources, 25: 1-13.

O'Neill B., 1983. Semi-Riemannian geometry. Academic press, New York, NY, USA.

Şenyurt Ş, Canlı D, Çan E, Mazlum SG., 2023a. Another application of Smarandache based ruled surfaces with the Darboux vector according to Frenet frame in E^3 . Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statittics, 72: 880-906.

Senyurt Ş, Mazlum SG, Canli D, Can E., 2023b. Some special Smarandache ruled surfaces according to alternative frame in E^3 . Maejo International Journal of Science and Technology, 17: 138–153.

Şenyurt Ş, Kaya FE, Canlı D., 2024. Pedal curves obtained from Frenet vector of a space curve and Smarandache curves belonging to these curves. AIMS Mathematics, 9: 20136–20162.

Turgut M, Yılmaz S., 2008. Smarandache curves in Minkowski space time. International Journal of Mathematics Combinatorics, 3: 51–55.

Uzun G, Şenyurt S, Akdağ K., 2024. Ruled surfaces with T_1N_1 -Smarandache base curve obtained from the Successor frame. Hagia Sophia Journal of Geometry, 6: 45-68.

Yılmaz B, Ramis CA, Yaylı Y., 2017. On developable ruled surface of the principal-direction curve. Konuralp Journal of Mathematics, 5: 172–180.

Yüksel N., 2013. The ruled surfaces according to Bishop frame in Minkowski 3-space. Abstract and Applied Analysis 1: 810640.

Aronya (*Aronia melanocarpa*) Yapraklarının Farklı Hasat Dönemlerindeki Mineral İçeriklerinin Hayvan Beslemede Kullanım Potansiyeli

Esra KAYA^{1*}, Arzu ARSLAN²

¹Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Celal Oruç Hayvansal Üretim Yüksekokulu, Ağrı

²Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi, Zootekni Anabilim Dalı, Ağrı

¹<http://orcid.org/0000-0002-4697-7365>

²<http://orcid.org/0009-0006-7096-2848>

*Sorumlu yazar: esra_gursoykaya@hotmail.com

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 17.07.2025

Kabul tarihi: 07.08.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Aronya yaprakları

Mineral bileşimi

Hayvan besleme

Ağır metaller

Doğal yem katkısı

Bu çalışma, Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarının farklı fenolojik dönemlerdeki mineral içeriğini belirleyerek hayvan beslemesinde kullanılabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Erzincan ilinde yetiştirilen Aronya bitkisine ait yapraklar, üç farklı hasat döneminde toplanarak ICP-MS yöntemiyle analiz edilmiştir. Araştırmada toplam 19 elementin (Na, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, Co, Ni, Al, Cr, V, Sr, As, Cd, Pb, Hg, Ag) düzeyleri belirlenmiş, veriler istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bulgular, Aronya yapraklarının özellikle makro mineraller (Na, K, Ca, Mg) ve mikro mineraller (Mn, Zn, Cu) bakımından zengin olduğunu ve ruminant beslenmesinde tamamlayıcı mineral kaynağı olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Tespit edilen As, Cd, Pb ve Ag düzeyleri Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) tarafından belirtilen sınırların altında kalırken, civa (Hg) düzeyleri belirlenen maksimum sınırın üzerinde bulunmuştur. Bu durum, Aronya yapraklarının toksik element birikimi açısından çevresel koşullara duyarlı olabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, Aronya yaprakları dengeli mineral profiliyle hayvan beslemesinde doğal bir mineral katkısı potansiyeli taşımakta, ancak toksik element içerikleri bakımından düzenli analiz ve kalite kontrol gerektirmektedir.

The Potential Use of Mineral Contents in Aronia (*Aronia melanocarpa*) Leaves from Different Harvest Periods in Animal Nutrition

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 17.07.2025

Accepted: 07.08.2025

Available online: 12.09.2025

Keywords

Aronia melanocarpa

Mineral composition

Animal nutrition

Heavy metals

Natural feed additive

This study aimed to determine the mineral composition of Aronia (*Aronia melanocarpa*) leaves at different phenological stages and evaluate their potential use in animal nutrition. Leaf samples were collected from Aronia plants cultivated in Erzincan (Türkiye) during three different harvest periods and analyzed using ICP-MS to determine the concentrations of 19 elements (Na, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, Co, Ni, Al, Cr, V, Sr, As, Cd, Pb, Hg, Ag). Statistical evaluation was performed to assess differences among harvest times. The results revealed that Aronia leaves are particularly rich in macro minerals (Na, K, Ca, Mg) and micro minerals (Mn, Zn, Cu), indicating their potential as a complementary natural mineral source in ruminant feeding. While concentrations of As, Cd, Pb, and Ag remained well below the maximum tolerable limits established by the European Food Safety Authority (EFSA), mercury (Hg) levels exceeded the recommended safety threshold. This highlights the influence of environmental factors on toxic element accumulation. In conclusion, Aronia leaves exhibit a balanced mineral profile and may serve as a sustainable and safe feed additive in animal nutrition, provided that regular monitoring and quality control are implemented to

Giriş

Hayvan beslenmesinde mineraller, canlı organizmanın temel metabolik fonksiyonlarının sağlıklı ve verimli bir şekilde sürdürülebilmesi için vazgeçilmez besin öğeleri arasında yer almaktadır (McDowell, 2020; NRC, 2021). Makro mineraller (Na, K, Ca, Mg) ve mikro mineraller (Fe, Cu, Zn, Mn, Co) enzimatik sistemlerin aktivasyonu, hormon üretimi, sinirsel iletim, kas kasılması, osmotik denge, bağışıklık fonksiyonları, kemik gelişimi ve üreme gibi pek çok yaşamsal sürecin düzenlenmesinde kritik roller üstlenir (Underwood ve Suttle, 1999; Spears, 2000; Goff, 2018; Suttle, 2022). Özellikle yoğun üretim sistemlerinde yer alan ruminantlarda mineral ihtiyaçları artmakta ve bu nedenle rasyonlarda mineral katkı maddelerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır (Duplessis ve ark., 2023). Ancak sentetik mineral katkılarının biyoyararlanımının sınırlı olması ve çevresel atık sorunları nedeniyle doğal ve sürdürülebilir alternatif kaynaklara yönelik ilgi giderek artmaktadır (Alloway, 2012; CAC, 2021).

Doğal bitkisel kaynakların hayvan beslemede kullanımı, sürdürülebilir hayvancılık ilkeleri ile uyumlu olup çevresel ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sağlar. Yapraklar, tohum dışı bitki kısımları arasında yüksek mineral içerikleriyle potansiyel yem katkı maddesi olarak öne çıkar (Khanal, 2001). *Aronia melanocarpa* (aronya) bitkisi, özellikle meyveleriyle bilinirken, yaprakları da yüksek antioksidan aktivite ve fenolik bileşik zenginliği yanı sıra mineral profili bakımından da dikkat çekmektedir (Do ve ark., 2014). Yaprakların fenolojik gelişim dönemlerine göre mineral içeriklerinin değişimi, yaprakların optimum hasat zamanının belirlenmesinde önemli bir parametredir.

Bitki yapraklarının mineral içeriği, toprak yapısı, iklim koşulları, hasat zamanı ve fizyolojik olgunluk gibi birçok faktörün etkisiyle farklılık gösterir (Alloway, 2012). Bu nedenle yaprakların farklı hasat zamanlarında analiz edilmesi, optimum toplama zamanının belirlenmesine ve mineral değerlerinin maksimum olduğu dönemin saptanmasına olanak sağlar (McDowell, 2020). Ayrıca, toksik elementlerin (örneğin Pb, Cd, As, Hg) güvenli sınırlar içinde olup olmadığının değerlendirilmesi, hayvan sağlığı ve yem güvenliği açısından kritik bir konudur (CAC, 2021; Dujardin ve ark., 2023).

Bu çalışma, Aronya yapraklarının üç farklı hasat döneminde toplam 19 element açısından mineral içeriklerini belirleyerek, elde edilen sonuçların hayvan beslemesindeki

potansiyelini belirlemeyi hedeflemektedir. Çalışma, doğal mineral kaynakların belirlenmesi açısından önemli bir veri sunacağı düşünülmektedir.

Materyal ve Metot

Bu araştırmada, Erzincan ili sınırlarında 2024 yılında yetiştirilen, dört yaşındaki bir Aronya bahçesinden (39.642148° enlem, 39.535962° boylam), bahçeyi temsil edecek şekilde farklı ağaçlardan yaprak örnekleri toplanmıştır. Yapraklar üç farklı dönemde (Temmuz sonu – meyve hasadı öncesi, Ağustos ortası – meyve hasadı dönemi ve Ağustos sonu – meyve hasadı sonrası) olmak üzere üç örnek şeklinde alınmıştır. Örnekler gölgede kurutulmuş, laboratuvar koşullarında öğütülerek (Lavion HC-100) analiz için hazır hale getirilmiştir. Farklı dönemlerde elde edilen 3 x 6 paralel örneklerin mineral içerik analizleri, ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz edilen elementler şunlardır: Na, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, Co, Ni, Al, Cr, V, Sr, As, Cd, Pb, Hg, Ag. Elde edilen veriler SPSS 12 yazılımı ile istatistiksel olarak değerlendirilmiş; tek yönlü ANOVA testi uygulanmış ve anlamlı fark görülen parametrelerde Duncan testine tabi tutulmuştur. İstatistiksel anlamlılık düzeyi $p < 0.001$ olarak belirlenmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Aronya yapraklarında bazı makro mineral içerikleri incelenmiş ve hasat dönemlerine göre elde edilen tüm değerler arasındaki farklılıklar önemli ($P < 0.001$) olarak belirlenmiştir (Tablo 1). Na, Mg minerallerinin en yüksek değerleri hasat döneminde en düşük ise Na'da hasat öncesi, Mg'da ise hasat sonrasında belirlenmiştir. K ve Ca minerallerinin en düşük değerleri ise hasat döneminde görülmüştür.

Tablo 1. Aronya yapraklarının hasat dönemlerine göre bazı makro mineral içerikleri (%)

Element	Hasat Öncesi	Hasat Dönemi	Hasat Sonrası	p-değeri
Na	0.0039 c	0.0083 a	0.0061 c	<0.001
Mg	0.9346 a	0.9417 a	0.7727 b	<0.001
K	0.7743 b	0.5970 c	0.9956 a	<0.001
Ca	0.5496 a	0.4244 c	0.4484 b	<0.001

Na: Sodyum, Mg: Magnezyum, K: Potasyum, Ca: Kalsiyum; ^{a,b,c}: Aynı satırda farklı harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki farklılıklar önemlidir.

Sodyum (Na)

Sodyum, özellikle hayvanlarda osmotik denge, sinir iletimi ve kas fonksiyonları açısından gerekli bir makro mineraldir (MvDowell, 2003). Hasat öncesi Aronya yapraklarındaki sodyum oranı %0,0039-0,0083 arasında ölçülmüştür. Aronya yapraklarının mineral madde içeriklerinin belirlendiği çalışmalarda ise bu çalışma değerlerinden daha düşük 0,018- 0,35 mg/g olarak belirlenmiştir (Pavlovic ve ark., 2015; Biel ve Jaroszevska, 2017; Cvetkovic ve ark., 2018). Söz konusu farklar, bitkinin yetiştirildiği çevresel koşullar (toprak tipi, sulama suyu kaynakları, gübreleme rejimi), hasat zamanı, yaprakların yaş durumu, laboratuvar analiz teknikleri ve ölçüm birimlerinin dönüşüm yöntemlerinden kaynaklanıyor olabilir. Özellikle toprakta veya sulama suyunda sodyum yoğunluğunun fazla olması, bitkide birikimi artırabilir. Bu bağlamda, bu çalışmada elde edilen sodyum düzeylerinin, daha önceki literatürde bildirilen değerlerden önemli ölçüde yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Ancak, elde edilen bu düzeylerin ruminant beslemesi açısından toksik sınıra yakın olmadıkları da görülmektedir.

Magnezyum (Mg)

Bu çalışmada, Aronya yapraklarının farklı hasat dönemlerinde magnezyum (Mg) içeriği %0,7727 ile %0,9346 arasında belirlenmiştir. Oysa literatürde Pavlović ve ark. (2015), Biel ve Jaroszevska (2017) ile Cvetković ve ark. (2018) tarafından bildirilen değerler yalnızca 0,8 – 4,7 mg/g aralığındadır. Bu durum, çalışmamızda elde edilen değerlerin önceki çalışmalara kıyasla oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu farkın başlıca nedenleri arasında; bitkilerin yetiştirildiği toprağın mineral kompozisyonu, kullanılan gübreler, çevresel koşullar (iklim, yağış miktarı, sulama rejimi), bitkisel materyalin yaşı ve örnekleme zamanı gibi agronomik ve çevresel etmenler yer alabilir. Mg düzeyleri, Aronya yapraklarının özellikle ruminant beslenmesinde magnezyum yönünden iyi bir kaynak olabileceğini düşündürmektedir. Magnezyum, sinir iletimi, enzim aktivitesi, enerji metabolizması ve kas kasılmalarında önemli görevler üstlenen hayati bir makro mineraldir. Ruminantlarda hipomagnezemi (çayır tetanisi) gibi Mg yetersizliklerine bağlı metabolik bozuklukların önlenmesinde yeterli magnezyum alımı kritik öneme sahiptir (McDowell, 2003). Bu bağlamda, çalışmada elde edilen yüksek Mg düzeyleri, Aronya yapraklarının hayvan besleme açısından potansiyel değerini ortaya koymakta; özellikle mineral dengesinin korunması gereken ruminant rasyonlarında destekleyici bir katkı maddesi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Potasyum (K)

Bu çalışmada Aronya yapraklarının farklı hasat dönemlerinde potasyum (K) içeriği %0,5970 ile %0,9956 arasında ölçülmüştür. Buna karşılık, Pavlović ve ark. (2015), Biel ve Jaroszevska (2017) ile Cvetković ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmalarda Aronya yapraklarının potasyum içeriği yalnızca 0,76 – 15,8 mg/g aralığında bildirilmiştir. Bu fark, bu çalışmada elde edilen değerlerin literatürdeki bulgulara kıyasla belirgin şekilde yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Farklılığın nedeni olarak bitkilerin yetiştirildiği toprağın potasyum içeriği, gübreleme programı, hasat zamanı, iklimsel faktörler ve kullanılan analitik yöntemler de ki farklılıkların olması gösterilebilir. Potasyum, bitkilerde olduğu kadar hayvan beslenmesinde de kritik öneme sahip bir makro mineraldir. Hayvanlarda asit-baz dengesi, sinir uyarılarının iletimi, kas kasılmaları ve su-elektrolit dengesi gibi yaşamsal fizyolojik işlevlerde yer alır (McDowell, 2003). Ruminantlarda potasyum eksikliği nadiren görülmekle birlikte, özellikle sıcak dönemlerde terleme yoluyla potasyum kayıpları arttığında veya sodyum-potasyum dengesinde bozulmalar yaşandığında potasyum takviyesi önem kazanabilir. Bu çalışmada elde edilen K düzeyleri, Aronya yapraklarının hayvan rasyonlarında potasyum açısından destekleyici bir yem katkısı olabileceğini göstermektedir. Özellikle sulu yeşil yemlerin veya mineralce fakir kaba yemlerin rasyonda baskın olduğu dönemlerde, potasyum içeriği yüksek yaprak materyalleri besinsel denge açısından katkı sağlayabilir.

Kalsiyum (Ca)

Bu çalışmada Aronya yapraklarının kalsiyum (Ca) içeriği, hasat dönemlerine göre %0,4244 ile %0,5495 arasında değişmiştir. Aronya yapraklarının mineral madde içeriklerini inceleyen çalışmalarda bildirilen 3,6 – 9,2 mg/g aralığındaki Ca düzeylerinden genel olarak daha yüksektir (Pavlović ve ark., 2015; Biel ve Jaroszevska, 2017; Cvetković ve ark., 2018). Elde edilen bu yüksek kalsiyum düzeyleri, Aronya yapraklarının hayvan beslemesinde potansiyel bir kalsiyum kaynağı olabileceğini göstermektedir. Ca düzeyindeki bu farklılık, büyük olasılıkla toprak yapısı, gübreleme programı, iklim koşulları, bitkinin fizyolojik olgunluk düzeyi ve kullanılan analitik teknikler gibi çevresel ve teknik etkenlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, literatürde yer alan bazı çalışmaların yaş madde bazlı, bu çalışmanın ise kuru madde bazlı değerlendirme yapmış olması da önemli bir farklılık nedenidir. Kalsiyum, özellikle iskelet sisteminin gelişimi, kas kasılması, sinirsel uyarı iletimi ve kan pıhtılaşması gibi temel fizyolojik süreçlerde görev alan bir makro mineraldir (McDowell, 2003). Ruminant beslemesinde Ca/P oranının dengelenmesi, metabolik

hastalıkların önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda Aronya yaprakları, özellikle kalsiyum içeriği düşük kaba yemlerin rasyonda yer aldığı durumlarda tamamlayıcı bir mineral kaynak olarak değerlendirilebilir.

Aronya yapraklarının hasat dönemlerine göre bazı mikro mineral içerikleri incelenmiş ve elde edilen değerler arasındaki farklılıklar önemli ($P<0.001$) olarak tespit edilmiştir (Tablo 2). İncelenen Al, V, Cr, Fe, Co, Ni, Ag değerleri en yüksek hasat sonrası dönemde tespit edilmiştir. Al, V, Cr, Mn, Fe, Mn, Co, Ni, Sr ve Ag minerallerinde en düşük hasat döneminde olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Aronya yapraklarının hasat dönemlerine göre bazı mikro mineral içerikleri (mg/g)

Element	Hasat Öncesi	Hasat Dönemi	Hasat Sonrası	p-değeri
Al	0,4682934 b	0,2206719 c	0,4686405 a	<0.001
V	8,2526341 b	3,7407024 c	9,2177034 a	<0.001
Cr	0,0027269 b	0,0011139 c	0,0034870 a	<0.001
Mn	0,1232731 a	0,0930030 c	0,0964809 b	<0.001
Fe	0,3798669 b	0,2620112 c	0,4564486 a	<0.001
Co	0.0003441 b	0.0001852 c	0.0004616 a	<0.001
Ni	0,0088991 b	0,0067007 c	0,0095836 a	<0.001
Cu	0,0028900 c	0,0066409 a	0,0038271 b	<0.001
Zn	0,0166585 c	0,0257869 a	0,0240780 b	<0.001
Sr	0,2798215 a	0,0553960 c	0,2058213 b	<0.001
Ag	0.0000025 b	0.0000015 c	0.0000031 a	<0.001

Al: Alüminyum, V: Vanadyum, Cr: Krom, Mn: Mangenez, Fe: Demir, Co: Kobalt, Ni: Nikel, Cu: Bakır, Zn: Çinko, Sr: Stronsiyum, Ag: Gümüş, ^{a,b,c}: Aynı satırda farklı harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki farklılıklar önemlidir.

Alüminyum (Al)

Bu çalışmada, Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında alüminyum (Al) içeriği, farklı hasat dönemlerine bağlı olarak 0,22067 – 0,46864 mg/g (220,67 – 468,64 mg/kg) aralığında belirlenmiştir. Bu değerler, Pavlović ve arkadaşları (2015) tarafından bildirilen 0,011 mg/g (yani 11 mg/kg) düzeyine kıyasla daha yüksek olsa da, hayvan beslemesinde tolere edilebilir seviyelerin altında kalmaktadır. Ruminantlar için yemde güvenli kabul edilen maksimum alüminyum seviyesi yaklaşık 1000 mg/kg kuru madde olarak belirtilmektedir (NRC, 2005). Bu bağlamda, bu çalışmada elde edilen Al düzeyleri bu sınır değerinin altında kalmakta ve Aronya yapraklarında alüminyum birikiminin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Alüminyumun bitkilerdeki birikim düzeyleri; toprak pH'ı, bitki türü ve çevresel faktörler gibi etmenlere bağlı olarak değişiklik gösterebileceğinden, bu farklılıkların muhtemelen yetiştirme koşullarından ve toprak özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, Aronya yapraklarında tespit edilen düşük Al düzeyleri, hayvan beslemesi açısından olumlu bir özellik olarak değerlendirilmekte ve toksikolojik açıdan bir risk oluşturmadığı söylenebilir.

Vanadyum (V)

Bu çalışmada, Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında vanadyum (V) düzeyleri, hasat dönemlerine bağlı olarak 3,74070 ile 9,21770 mg/g aralığında belirlenmiştir. Bu değerler, kuru madde bazında 3.740,70 ile 9.217,70 mg/kg vanadyum içeriğine karşılık gelmektedir. Hayvan beslemede yemlerde tolere edilebilir maksimum vanadyum düzeyinin NRC (2005) tarafından 50 mg/kg (yani 0,05 mg/g) olarak önerildiği dikkate alındığında, Aronya yapraklarında belirlenen vanadyum düzeylerinin bu sınırın üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, özellikle uzun süreli ve yüksek miktartlı kullanım senaryolarında dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu vanadyum düzeylerinin potansiyel etkileri; hayvan türü, kullanım dozu, rasyonun genel bileşimi ve uygulama süresine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, Aronya yapraklarının yem rasyonlarına dahil edilmeden önce içerdiği vanadyum miktarının dikkate alınması ve olası birikim riskine karşı gerekli değerlendirmelerin yapılması önerilmektedir.

Krom (Cr)

Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarının krom (Cr) içeriği, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,0027268 – 0,0034870 mg/g aralığında belirlenmiştir. Bu değerler, Pavlović ve ark. (2015) ile Biel ve Jaroszevska (2017) tarafından bildirilen 0,00005 – 0,001 mg/g düzeylerine kıyasla daha yüksektir. Bununla birlikte, hayvan beslemesinde toplam krom için önerilen toksikolojik üst sınır 100 mg/kg (yani 0,1 mg/g) olarak kabul edilmektedir (McDowell, 2003). Bu bağlamda, Aronya yapraklarında tespit edilen Cr düzeylerinin söz konusu sınır değerinin oldukça altında kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla, mevcut krom içeriği açısından Aronya yapraklarının hayvan beslemesinde kullanımı toksikolojik bir risk oluşturmamaktadır. Ancak, Cr düzeyinin literatürde bildirilen ortalama seviyelerin üzerinde olması, özellikle uzun süreli kullanımlarda dikkatle izlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Manganez (Mn)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında manganez (Mn) düzeyi, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,093 – 0,1232 mg/g aralığında belirlenmiştir. Bu değerler, Pavlović ve ark. (2015), Biel ve Jaroszevska (2017) ile Cvetković ve ark. (2018) tarafından bildirilen 0,006 – 0,151 mg/g aralığıyla büyük ölçüde örtüşmektedir. Ancak, Saracila ve ark. (2024) tarafından bildirilen 0,20548 mg/g düzeyi, bu çalışmada elde edilen değerlerin üzerinde olup, Aronya yapraklarında Mn birikiminin çevresel faktörlere ve yetiştirme koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceğini göstermektedir.

Manganez, özellikle kemik gelişimi, üreme performansı, bağışıklık sistemi ve enzimatik reaksiyonlar açısından ruminantlar ve kümes hayvanları için esansiyel bir mikro elementtir. Hayvan beslemesinde Mn için önerilen tolere edilebilir üst sınır 2000 mg/kg (yani 2 mg/g) olarak bildirilmiştir (NRC, 2005). Bu bağlamda hem bu çalışmada hem de literatürde bildirilen Mn düzeylerinin söz konusu sınırın oldukça altında kaldığı ve toksikolojik açıdan bir risk oluşturmadığı söylenebilir. Bu nedenle Aronya yaprakları, Mn yönünden güvenli ve fonksiyonel bir yem katkı maddesi veya tamamlayıcı yem kaynağı olarak değerlendirilebilir.

Demir (Fe)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarının demir (Fe) içeriği, hasat öncesi dönemde 0,2620 – 0,4564 mg/g aralığında belirlenmiştir. Bu düzeyler, Pavlović ve ark. (2015), Biel ve Jaroszevska (2017), Cvetković ve ark. (2018) ile Saracila ve ark. (2024) tarafından bildirilen 0,017 – 0,09429 mg/g seviyelerine kıyasla belirgin şekilde daha yüksektir. Bu farklılıkların, bitkinin yetiştiği toprağın mineral içeriği, çevresel koşullar, hasat zamanı, yaprak yaşlanması ve kullanılan analiz yöntemleri gibi faktörlere bağlı olarak ortaya çıkmış olabileceği düşünülmektedir.

Demir, tüm hayvan türlerinde başta oksijen taşınımı ve enzimatik süreçler olmak üzere pek çok metabolik işlevde rol alan esansiyel bir mikro elementtir. Bununla birlikte, ruminant beslemesinde kuru madde bazında 500 mg/kg (yani 0,5 mg/g) seviyesi genellikle maksimum tolere edilebilir sınır olarak kabul edilmektedir (NRC, 2005). Bu çalışmada tespit edilen demir düzeyleri ise 0,2620 – 0,4564 mg/g aralığında olup, bu sınır değerinin altında kalmaktadır. Dolayısıyla, Aronya yapraklarının demir içeriği açısından doğrudan bir toksikolojik risk oluşturmadığı söylenebilir. Bununla birlikte, demirce zengin diğer yem kaynaklarıyla birlikte rasyona dahil edilmesi planlandığında toplam demir alımı dikkate alınmalı; özellikle mineral dengesizlikleri ve antagonistik etkileşimlerin önlenmesi açısından dikkatli formülasyon yapılması önerilmektedir.

Kobalt (Co)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarının kobalt (Co) içeriği, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,0001852 – 0,0004616 mg/g aralığında belirlenmiştir. Bu değerler, Biel ve Jaroszevska (2017) tarafından bildirilen 0,0005 mg/g düzeyine yakın olmakla birlikte, söz konusu literatür değerinin altında kalmaktadır. Bu durum, Aronya yapraklarının yetiştirildiği çevresel koşullar, toprak yapısı ve mevsimsel farklılıklar gibi etmenlerin kobalt birikimi üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.

Kobalt, ruminantlar için esansiyel bir mikro mineraldir ve özellikle B12 vitamini sentezi için gereklidir. Hayvan beslemesinde kobalt için güvenli kabul edilen üst sınır 25 mg/kg (yani 0,025 mg/g) olarak belirtilmektedir (NRC, 2005). Bu bağlamda, bu çalışmada elde edilen kobalt düzeylerinin hem literatürde bildirilen değerlerle uyumlu olduğu, hem de toksikolojik sınırın oldukça altında kaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, Aronya yapraklarının Co içeriği açısından hayvan beslemesinde güvenli bir kaynak olabileceğini göstermektedir.

Nikel (Ni)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında nikel (Ni) içeriği, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,0067007 – 0,0088991 mg/g aralığında belirlenmiştir. Bu düzeyler, Pavlović ve ark. (2015) ile Biel ve Jaroszevska (2017) tarafından bildirilen 0,00014 – 0,004 mg/g aralığındaki Ni seviyelerine kıyasla anlamlı şekilde yüksektir. Söz konusu farklılıklar; bitkinin yetiştiği toprak yapısı, çevresel nikel kontaminasyonu, hasat zamanı ve analitik yöntem farklılıkları gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir.

Nikel, bitkilerde zorunlu bir element olarak kabul edilmemekle birlikte, bazı enzimlerin yapısında yer alarak azot metabolizmasında dolaylı roller üstlenebilir. Hayvan beslemesinde ise nikelin fizyolojik gereksinimi oldukça düşük olup, aşırı alımı durumunda toksik etkilere neden olabilir. NRC (2005) ve çeşitli kaynaklara göre yemlerde tolere edilebilir üst sınır değeri genellikle 100 mg/kg (yani 0,1 mg/g) olarak belirtilmektedir. Bu bağlamda, çalışmada elde edilen nikel düzeyleri bu sınırın oldukça altında kalmaktadır. Buda, Aronya yapraklarının nikel içeriği açısından hayvan beslemesinde kullanılabilirliğini sınırlandırıcı bir risk taşımadığını göstermektedir.

Bakır (Cu)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında bakır (Cu) düzeyleri, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,0028900 – 0,0066409 mg/g aralığında belirlenmiştir. Bu değerler, Pavlović ve ark. (2015), Biel ve Jaroszevska (2017) ile Cvetković ve ark. (2018) tarafından

bildirilen 0,001 – 0,02 mg/g düzeyleriyle uyumludur. Elde edilen değerler, literatürdeki minimum ve maksimum aralık içerisinde yer almakta olup, Aronya yapraklarının Cu içeriği bakımından dengeli bir profile sahip olduğunu göstermektedir.

Bakır, demir metabolizması, bağışıklık sistemi fonksiyonları, enzim aktivitesi ve büyüme gibi birçok fizyolojik süreçte rol alan esansiyel bir mikro elementtir. Ancak aşırı alımı durumunda toksik etkilere neden olabilmektedir. Hayvan beslemede Cu için önerilen tolere edilebilir üst sınır genellikle 40 mg/kg (yani 0,04 mg/g) olarak bildirilmektedir (NRC, 2005). Bu bağlamda, Aronya yapraklarında tespit edilen Cu düzeyleri bu sınırın oldukça altında olup, toksikolojik açıdan herhangi bir risk oluşturmadığı söylenebilir. Sonuç olarak Aronya yaprakları, Cu bakımından güvenli bir yem katkı maddesi veya tamamlayıcı yem kaynağı olarak değerlendirilebilir.

Çinko (Zn)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarının çinko (Zn) içeriği, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,0166585 – 0,0257869 mg/g aralığında belirlenmiştir. Bu değerler, Pavlović ve ark. (2015), Biel ve Jaroszewska (2017), Cvetković ve ark. (2018) ve Sărăcilă ve ark. (2024) tarafından bildirilen 0,008 – 0,025 mg/g düzeyleriyle büyük ölçüde uyumludur. Özellikle bu çalışmada belirlenen üst sınır değeri, literatürde bildirilen maksimum değere çok yakın olup; alt sınır değeri ise literatürdeki ortalama düzeylerle örtüşmektedir. Bu durum, Aronya yapraklarının Zn bakımından zengin bir mineral profile sahip olduğunu ve türün çevresel koşullara göre belirli bir çinko birikim kapasitesine sahip olabileceğini göstermektedir.

Çinko, özellikle büyüme, bağışıklık fonksiyonları, enzimatik aktiviteler ve üreme sağlığı açısından hayvanlar için esansiyel bir mikro elementtir. Hayvan beslemesinde Zn için tolere edilebilir üst sınır değeri 500 mg/kg (yani 0,5 mg/g) olarak belirtilmektedir (NRC, 2005). Bu bağlamda, çalışmada elde edilen Zn düzeylerinin bu sınırın oldukça altında kaldığı ve toksikolojik açıdan bir risk oluşturmadığı anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, Aronya yaprakları Zn açısından dengeli ve güvenli bir yem katkı maddesi olarak değerlendirilebilir.

Stronsiyum (Sr)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında stronsiyum (Sr) düzeyleri, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,0553960 – 0,2798215 mg/g (yani 55,40 – 279,82 mg/kg) aralığında belirlenmiştir. Stronsiyum, bitkiler için esansiyel olmayan bir element olmasına rağmen, kemik metabolizması ve kalsiyumla olan biyokimyasal etkileşimleri nedeniyle

hayvan beslemesinde dikkatle değeriendirilmesi gereken bir mikro elementtir. Stronsiyum için hayvan besleme literatüründe net bir maksimum tolerans seviyesi tanımlanmamış olmakla birlikte, DCE (2019) hayvanların (sığır, domuz, tavuk) rasyonlarında Sr'ye karşı oldukça yüksek bir tolerans gösterdiği ve toksik etkilerin genellikle 2000 mg/kg düzeylerinin üzerinde ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu bağlamda, Aronya yapraklarında belirlenen Sr düzeylerinin bu toksik sınırın oldukça altında kaldığı ve toksikolojik açıdan herhangi bir risk oluşturmadığı söylenebilir.

Gümüş (Ag)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında gümüş (Ag) düzeyleri, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,0000015 – 0,0000031 mg/g aralığında belirlenmiştir. Gümüş, bitkiler için esansiyel bir element olmamakla birlikte, çevresel kontaminasyon göstergesi olarak değeriendirilmekte ve biyolojik sistemlerde birikme eğilimi nedeniyle dikkatle izlenmesi gereken elementlerden biridir. Hayvan beslemesinde Ag için önerilen bir esansiyel gereksinim bulunmamakta; aksine, yüksek dozlarda toksik etkiler (özellikle karaciğer, böbrek ve sinir sistemi üzerinde) gösterebileceği bilinmektedir.

Literatürde, yemlerde tolere edilebilir gümüş miktarına ilişkin net bir üst sınır bulunmamakla birlikte, toksik etkilerin genellikle 5–10 mg/kg ve üzerindeki düzeylerde ortaya çıktığı bildirilmektedir (Maziero ve ark., 2020). Bu bağlamda, Aronya yapraklarında tespit edilen Ag düzeylerinin söz konusu toksisite sınırlarının çok altında olduğu ve bu haliyle toksikolojik açıdan bir risk oluşturmadığı söylenebilir. Bununla birlikte, çevresel kaynaklı ağır metal birikimi açısından izlenmeye devam edilmesi önerilmektedir.

Toksik Elementler

Aronya yapraklarının bazı toksik element içerikleri incelenmiş ve Tablo 3'te sunulmuştur. Elde edilen değerler arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P<0.001$).

Tablo 3. Aronya yapraklarının hasat dönemlerine göre bazı toksik element içerikleri (mg/kg)

Element	Hasat Öncesi	Hasat Dönemi	Hasat Sonrası	p-değeri
As	0.1234 b	0.0673 c	0.1347 a	<0.001
Cd	0.0173 c	0.0335 a	0.0201 b	<0.001
Hg	2.0985 a	1.7881 b	1.8002 b	<0.001
Pb	0.2560 b	0.2764 a	0.2373 c	<0.001

As: Arsenik, Cd: Kadmiyum, Hg: Civa, Pb: Kurşun, a,b,c: Aynı satırda farklı harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki farklılıklar önemlidir.

Arsenik (As)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında arsenik (As) düzeyleri, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,123 – 0,135 mg/kg aralığında belirlenmiştir. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) tarafından yayımlanan bilimsel görüşlere göre, hayvan yemlerinde toplam arsenik için önerilen maksimum tolerans sınırı 2 mg/kg'dır (Dujardin ve ark., 2023; EFSA, 2005;). Bu bağlamda, Aronya yapraklarında ölçülen As düzeylerinin, EFSA tarafından belirlenen sınırın çok altında olduğu görülmektedir. Arsenik, kronik maruziyet durumlarında karaciğer, böbrek ve sinir sistemi üzerinde toksik etkilere neden olabilen önemli bir kontaminanttır. Ancak bu çalışmada elde edilen değerler, yem katkısı olarak değerlendirildiğinde toksikolojik açıdan herhangi bir risk oluşturmayacak düzeydedir.

Kadmiyum (Cd)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında kadmiyum (Cd) düzeyleri, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,0173 – 0,0335 mg/kg aralığında belirlenmiştir. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), hayvan yemlerinde kadmiyum için tolere edilebilir maksimum sınır değerini 1 mg/kg olarak belirlemiştir (EFSA, 2009; Dujardin ve ark., 2023). Bu bağlamda, Aronya yapraklarında tespit edilen Cd düzeylerinin EFSA tarafından bildirilen yasal sınırın çok altında kaldığı görülmektedir. Kadmiyum, özellikle böbrek ve karaciğer gibi organlarda birikim eğiliminde olan ve uzun süreli maruziyetlerde nefrotoksisite, immunosupresyon ve büyüme geriliği gibi etkilere yol açabilen toksik bir ağır metaldir. Ancak bu çalışmada elde edilen Cd düzeyleri, yem katkısı ya da tamamlayıcı yem olarak kullanım açısından toksikolojik bir risk oluşturmamaktadır.

Cıva (Hg)

Bu çalışmada Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında cıva (Hg) düzeyleri, hasat dönemlerine bağlı olarak 1,7881 – 2,0985 mg/kg aralığında belirlenmiştir. Cıva, özellikle çevresel kaynaklı kirlilikle ilişkilendirilen ve biyolojik sistemlerde birikebilen bir elementtir. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), hayvan yemlerinde toplam cıva için maksimum sınır değerini 0,1 mg/kg olarak bildirmiştir (EFSA, 2008). Bu kapsamda değerlendirildiğinde, Aronya yapraklarında tespit edilen Hg düzeyleri, söz konusu sınır değer üzerinde bulunmakta ve bu durum potansiyel dikkat gerektiren bir durumu işaret etmektedir. Her ne kadar bu sonuçlar tek başına kesin bir toksik etki anlamına gelmesede, yem amaçlı kullanım öncesinde dikkatli bir değerlendirme yapılmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle cıvanın birikici doğası göz önünde bulundurulduğunda, bu tür materyallerin yalnızca kontrollü oranlarda ve diğer düşük içerikli hammaddelerle birlikte formüle edilerek kullanılması önerilmektedir. Bununla birlikte, cıva düzeylerindeki farklılıkların bölgesel toprak yapısı, çevresel koşullar ve tarımsal uygulamalardan etkilenebileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle Aronya yapraklarının yem katkısı olarak potansiyel kullanımına yönelik olarak, kaynak izlenebilirliği ve düzenli ağır metal analizleri ile desteklenen bir kalite kontrol süreci önem taşımaktadır.

Kurşun (Pb)

Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarında kurşun (Pb) düzeyleri, hasat dönemlerine bağlı olarak 0,2373 – 0,2764 mg/kg aralığında belirlenmiştir. Kurşun; çevresel kaynaklı kirlilikten kolayca etkilenen, biyolojik sistemlerde birikebilen ve özellikle sinir sistemi, böbrek ve hematopoetik sistem üzerinde toksik etkiler gösterebilen ağır metallerden biridir. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), hayvan yemlerinde toplam kurşun için maksimum tolere edilebilir sınır değerini 2 mg/kg olarak belirlemiştir (Dujardin ve ark., 2023). Bu kapsamda değerlendirildiğinde, çalışmada saptanan Pb düzeylerinin bu sınırın oldukça altında kaldığı ve toksikolojik açıdan herhangi bir risk oluşturmadığı söylenebilir.

Sonuç

Bu çalışma, Aronya (*Aronia melanocarpa*) yapraklarının üç farklı hasat dönemine ait mineral içeriklerinin belirlenmesiyle, hayvan beslemesinde potansiyel bir doğal mineral kaynağı olarak değerlendirilmesini amaçlamıştır. Elde edilen bulgular, Aronya yapraklarının Na, Mg, K, Ca gibi makro minerallerin yanı sıra Mn, Fe, Zn, Cu gibi mikro mineraller bakımından zengin bir içeriğe sahip olduğunu ve bu özellikleriyle ruminant beslenmesinde

tamamlayıcı yem veya yem katkı maddesi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Özellikle Mn, Zn, Cu gibi mikro elementlerin düzeyleri, hayvanların fizyolojik ihtiyaçlarını karşılayabilecek düzeyde olup, toksikolojik sınırların oldukça altında kalmıştır. Ayrıca, çalışmada analiz edilen toksik elementler (As, Cd, Pb, Hg, Ag) açısından değerlendirildiğinde, As, Cd ve Pb düzeylerinin EFSA tarafından bildirilen yasal sınırların altında kaldığı ve bu açıdan toksikolojik bir risk taşımadığı belirlenmiştir. Ancak, cıva (Hg) düzeylerinin sınır değerin üzerinde olması, bu bitkinin hayvan yemlerine katılımlarında dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu durum, bölgesel çevresel koşulların ağır metal birikimi üzerinde etkili olabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, Aronya yaprakları, sahip oldukları dengeli mineral profili ve düşük toksik element içeriğiyle, hayvan beslemesinde sürdürülebilir, doğal ve güvenli bir mineral kaynağı olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir. Ancak, bazı ağır metallerin çevresel kaynaklı değişkenliği göz önüne alınarak, kullanım öncesinde düzenli analizlerle kalite kontrolünün sağlanması önerilmektedir.

Çıkar Çatışmanı Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Alloway BJ., 2012. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer Science & Business Media.

Biel W, Jaroszewska A., 2017. The nutritional value of leaves of selected berry species. Scientia Agricola, 74: 405-410.

Codex Alimentarius Commission, CAC. (2021). General standard for contaminants and toxins in food and feed (CXS 193–1995, amended 2021). FAO & WHO. https://www.fao.org/faowhocodexalimentarius/shproxy/en/?lnk=1&url=https%3A%2F%2Fworkspace.fao.org%2Fsites%2Fcodex%2Fstandards%2FCXS%2B193-1995%2FCXS_193e.pdf

Cvetkovic D, Stanojevic L, Zvezdanovic J, Savic S, Ilic D, Karabegovic I., 2018. Aronia leaves at the end of harvest season—Promising source of phenolic compounds, macro- and microelements. Scientia Horticulturae, 239: 17-25.

DCE, Dairy Cattle Extension., 2019. Mineral tolerances of animals. eXtension Foundation. Retrieved July 15, 2025, from <https://dairy-cattle.extension.org/mineral-tolerances-of-animals/>

Do Thi N, Hwang ES., 2014. Bioactive compound contents and antioxidant activity in Aronia (*Aronia melanocarpa*) leaves collected at different growth stages. *Preventive Nutrition and Food Science*, 19(3): 204.

Dujardin L, Rossi M, Castenmiller J, Rowland I, Schneidereit J, Fernández-Cruz ML., 2023. Dietary exposure to heavy metals and iodine intake via consumption of seaweeds and halophytes in the European population. *EFSA Journal*, 21(2): e07798.

Duplessis M, Royer I., 2023. The importance of an integrated approach to assess trace mineral feeding practices in dairy cows. *Front Animal Science*, 4: 1-8.

EFSA., 2008. Scientific opinion – Mercury as undesirable substance in animal feed. *EFSA Journal*, 654.

EFSA., 2009. Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain on cadmium in food. *EFSA Journal*, 980.

Goff JP., 2018. Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid–base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. *Journal of Dairy Science*, 101(4): 2763-2813.

Khanal RC, Subba DB., 2001. Nutritional evaluation of leaves from some major fodder trees cultivated in the hills of Nepal. *Animal Feed Science and Technology*, 92(1-2): 17-32.

Maziero JS, Thiye VC, Rogero SO, Cavalcante AK, Damasceno KC, Ormenio MB, Katti KV., 2020. Species-specific in vitro and in vivo evaluation of toxicity of silver nanoparticles stabilized with gum Arabic protein. *International Journal of Nanomedicine*, 7359-7376.

McDowell LR., 2003. *Minerals in animal and human nutrition*, 2nd Edition. Elsevier, 660 s.

McDowell LR., 2020. *Vitamins and minerals in animal nutrition*. 3rd ed. CRC Press.

Mohandoss D, Dhurvas RD, Nappinnai M, Rogero JR, Lugão AB, Katti KV., 2020. Species-specific in vitro and in vivo evaluation of toxicity of silver nanoparticles stabilized with gum Arabic protein. *Int J Nanomedicine*, 2(15): 7359-7376.

NRC., 2005. National Research Council Division on Earth, Studies, L., Board on Agriculture, Natural Resources, Committee on Minerals, ... & Water for Animals. *Mineral tolerance of animals*. National Academies Press.

NRC., 2021. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 8th revised ed. National Academies Press.

Pavlovic AN, Brcanovic JM, Veljkovic JN, Mitic SS, Tošić SB, Kalicanin BM, Kostic DA, Đorđević MS, Velimirovic DS., 2015. Characterization of commercially available products of aronia according to their metal content. *Fruits*, 70: 385-393.

Saracila M, Untea AE, Oancea AG, Varzaru I, Vlaicu PA., 2024. Comparative analysis of black chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) fruit, leaves, and pomace for their phytochemical composition, antioxidant potential, and polyphenol bioaccessibility. *Foods*, 13(12): 1856.

Suttle N., 2022. Mineral nutrition of livestock. GB: Cabi.

Spears JW., 2000. Micronutrients and immune function in cattle. *Proceedings of the Nutrition Society*, 59(4): 587-594.

Underwood EJ, Suttle NF., 1999. The mineral nutrition of livestock. 3rd ed. Wallingford, UK: CABI Publishing.

Yapay Zekâ Destekli Öğrenme Yönetim Sistemi Kullanımı ve Dijital Dönüşüm

Ayşe ALKAN^{1*}

¹Samsun Bilim ve Sanat Merkezi, Samsun

¹<https://orcid.org/0000-0002-9125-1408>

*Sorumlu yazar: ayse.alkan55@gmail.com

Derleme

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 23.04.2025

Kabul tarihi: 22.06.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Yapay zekâ

Öğrenme yönetim sistemleri

Dijital dönüşüm

Kişiselleştirilmiş öğrenme

Eğitim teknolojileri

ÖZ

Bu çalışma, öğrenme yönetim sistemlerinin (Learning Management Systems-LMS) yapay zekâ (YZ) teknolojileri ile geçirdiği dönüşümü ve bu dönüşümün eğitsel süreçlere etkilerini incelemektedir. YZ tabanlı uygulamalar, öğrenci etkileşimini artırma, kişiselleştirilmiş öğrenme yolları sunma ve öğretim süreçlerini geliştirme potansiyeline sahiptir. LMS'lerin YZ ile desteklenmesi; öğrenme analitikleri, akıllı öneri sistemleri, otomatik değerlendirme araçları ve sohbet robotları gibi teknolojik yenilikleri içermekte olup, öğretim elemanlarına daha verimli öğretim ortamları sunmaktadır. Dijitalleşen eğitim ortamlarında YZ destekli LMS kullanımı, hem öğretmen hem öğrenci deneyimini yeniden şekillendirmekte, öğrenme-öğretme süreçlerini daha dinamik ve etkileşimli bir yapıya kavuşturmaktadır. Bu araştırma, söz konusu teknolojik gelişmeleri literatür temelinde değerlendirmeyi ve gelecekteki uygulamalara ışık tutmayı amaçlamaktadır.

Use of Artificial Intelligence-Supported Learning Management System and Digital Transformation

Review Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 23.04.2025

Accepted: 22.06.2025

Available online: 12.09.2025

Keywords:

Artificial intelligence

Learning management systems

Digital transformation

Personalized learning

Educational technologies

This study examines the transformation of learning management systems (LMS) with artificial intelligence (AI) technologies and the effects of this transformation on educational processes. AI-based applications have the potential to increase student interaction, offer personalized learning paths and improve teaching processes. Supporting LMSs with AI includes technological innovations such as learning analytics, intelligent recommendation systems, automatic assessment tools and chatbots, and offers more efficient teaching environments to faculty members. The use of AI-supported LMS in digitalized educational environments reshapes both teacher and student experiences and provides a more dynamic and interactive structure to teaching-learning processes. This research aims to evaluate these technological developments on the basis of literature and shed light on future applications.

To Cite: Alkan A., 2025. Yapay zekâ destekli öğrenme yönetim sistemi kullanımı ve dijital dönüşüm. Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(2): 386-401.

Giriş

Geleneksel eğitim yaklaşımlarının aksine gelişen dijital teknolojiler geleneksel yapıyı dönüştürerek daha dinamik, etkileşimli ve öğrenci odaklı öğrenme deneyimlerinin ortaya

çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Eğitim teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, öğrencilerin öğrenme süreçleri dijital ortamlarda izlenebilmekte; başarı durumları, katılım düzeyleri, içeriklerle etkileşimleri gibi pek çok veri anlık olarak toplanmakta ve analiz edilebilir hâle gelmektedir. Bu dijital izler, büyük veri yığınlarını oluşturarak eğitimde karar verme süreçlerine katkı sağlayan önemli bir kaynak haline gelebilmektedir. Bu veri yığınları öğretim sürecinin bireyselleştirilmesine katkı sağlamakta, öğrenciye özgü öğrenme yollarının tasarlanmasına imkân tanımaktadır. Böylece öğretmenler, öğrencilerin öğrenme ihtiyaçlarını daha iyi analiz ederek uygun öğretim materyallerini ve yöntemlerini seçebilmekte, aynı zamanda öğrencilerin gelişimini izleyerek zamanında geri bildirimler sunabilmektedir. Bu gelişmeler, yalnızca öğretim sürecini değil, aynı zamanda ölçme-değerlendirme, rehberlik ve öğrenme analitiklerini kapsayan daha geniş bir eğitimsel dönüşümü de beraberinde getirmektedir (Luan ve Tsai, 2021).

Bu dönüşümün etkili ve sürdürülebilir olabilmesi ise, yalnızca dijital verilerin toplanmasıyla sınırlı kalmayıp, bu verilerin anlamlı bilgiye dönüştürülmesini sağlayacak ileri teknolojilerin eğitim ortamlarında kullanılmasını gerektirmektedir. Günümüzde dijital eğitim ortamlarının gelişmesiyle birlikte, öğrenme süreçlerinin daha verimli, kişiselleştirilmiş ve dinamik bir yapıya kavuşabilmesi için ileri düzey teknolojik araçlara duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu doğrultuda YZ, eğitim teknolojileri alanında önemli bir rol üstlenmektedir.

İnternetin eğitim alanında yaygın şekilde kullanılması, elektronik öğrenme (e-öğrenme), mobil öğrenme (m-öğrenme), çevrimiçi öğrenme, web tabanlı eğitim ve kitlesel açık çevrimiçi dersler (MOOC) gibi çeşitli dijital öğrenme platformlarının yaygınlaşmasına zemin hazırlamıştır. Bu platformların artan kullanımıyla birlikte, dijital ortamlarda eğitim gören öğrenci sayısında da önemli bir artış yaşanmış ve buna bağlı olarak üretilen veri miktarı da gözle görülür biçimde çoğalmıştır. Öğrencilerin çevrimiçi öğrenme süreçlerinde gerçekleştirdiği her etkileşim dijital bir iz bırakmakta ve bu izler zamanla büyük ve anlamlı veri yığınlarına dönüşmektedir. Geleneksel sınıf ortamlarına kıyasla, çevrimiçi sistemler öğrencilerin etkileşimlerini, katılım düzeylerini ve öğrenme davranışlarını detaylı biçimde veri tabanlarında kaydedebilmekte ve analiz edilebilir hale getirmektedir (Greller ve Drachsler, 2012).

Dijital öğrenme süreçlerinin temel altyapısını oluşturan LMS, bu süreçleri planlama, uygulama, izleme ve değerlendirme faaliyetlerini desteklemek ve yönetmek için kullanılan çevrimiçi yazılım sistemleridir (Aljawarneh, 2020; Turnbull ve ark., 2022). İçerik yönetimi ve öğrenci takibi gibi temel işlevlerle sınırlı olan LMS'ler, teknolojik gelişmelerle birlikte çok daha gelişmiş, esnek ve öğrenci merkezli yapılar haline gelmiştir (Watson ve Watson, 2007).

Bu sistemlerin YZ gibi ileri teknolojilerle desteklenmesi ise, LMS'lerin eğitimdeki rolünü daha da stratejik ve etkili bir noktaya getirmektedir (Zawacki-Richter ve ark., 2019). Özellikle öğrenci davranışlarını tahmin etme, riskli öğrencileri erken belirleme ve bireysel öğrenme yolları oluşturma gibi alanlarda YZ destekli LMS çözümleri, dijital dönüşümün en somut göstergelerinden biri olmuştur (Lu ve ark., 2018).

Günümüzde dijital teknolojilerin hızla gelişmesi, eğitim sistemlerinde köklü dönüşümlere neden olmakta; özellikle YZ destekli LMS'ler, öğretim süreçlerinin kişiselleştirilmesini, öğrenme analitiği temelli kararlar alınmasını ve öğrenci başarısının izlenmesini mümkün kılmaktadır (Zawacki-Richter ve ark., 2019). Bu sistemlerin sunduğu olanaklar, öğretmenlerin pedagojik uygulamalarını yeniden şekillendirmekte ve öğrencilerin bireysel ihtiyaçlarına daha duyarlı öğrenme ortamları oluşturulmasına katkı sağlamaktadır (Holmes ve ark., 2019). YZ destekli LMS'lerin eğitimdeki yeri, potansiyeli ve sınırlılıklarını ele alan kapsamlı çalışmalar, hem akademik literatüre katkı sunmakta hem de uygulayıcılara rehberlik etmektedir. Bu çalışmada da YZ'nin eğitim teknolojilerindeki yeri, LMS'lerin eğitimdeki önemi ile LMS'lerde YZ tabanlı gelişmeler ve eğitsel yansımaları bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

Yapay Zekânın Eğitim Teknolojilerindeki Yeri

Günümüzde dijital eğitim ortamlarının gelişmesiyle birlikte YZ, eğitim teknolojilerinde hızla yerini almaktadır. Bu teknolojiler, sadece öğrenme sürecini desteklemek amacıyla değil, aynı zamanda eğitim ortamlarını daha kişiselleştirilmiş, uyarlanabilir ve veri temelli hâle getirmektedir.

İngiliz matematikçi ve bilgisayar bilimci Alan Turing'in 1950 yılında "Computing Machinery and Intelligence" adlı makalesinde sorduğu "Makineler düşünebilir mi?" sorusu, yapay zekâ araştırmalarının temelini oluşturmuştur (Turing, 1950). Turing'in ortaya koyduğu "Turing Testi", bir makinenin insan gibi düşünebildiğinin anlaşılması için önerdiği temel bir değerlendirme yöntemi olarak YZ literatüründe önemli bir yere sahip olmuştur (Saygin ve ark., 2000). Yapay zekâ kavramı ise, bilimsel anlamda ilk kez 1956 yılında Dartmouth College'da düzenlenen ve John McCarthy, Marvin Minsky, Nathaniel Rochester ile Claude Shannon gibi önemli isimlerin katıldığı konferansta söylenmiştir (McCarthy ve ark., 2006).

2000'li yıllardan itibaren veri sayısındaki artış ile bilgi işlem gücündeki gelişmeler ve özellikle makine öğrenmesi (Machine Learning-ML) ile derin öğrenme (Deep Learning-DL) algoritmalarındaki ilerlemeler sayesinde YZ alanı büyük bir hız kazanmıştır. Günümüzde bu sistemler; dil işleme, görsel tanıma, tahminleme, öğrenme analitiği ve otomasyon gibi birçok alanda kullanılmakta, bireylerin günlük yaşamına ve kurumların karar alma süreçlerinde yer

almaktadır (Goodfellow ve ark., 2016; Russell ve Norvig, 2021). Endüstri 4.0 ile birlikte YZ, toplumsal, ekonomik ve eğitsel alanlarda önemli dönüşümlere yol açan bir güç hâline gelmiştir (Schwab, 2016). Eğitim alanında da, öğrenci performansının izlenmesi, kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimlerinin sunulması ve öğrenme süreçlerinin analiz edilmesi gibi uygulamalarda büyük bir ivme ile yer almaktadır (Zawacki-Richter ve ark., 2019). İçerik önerme sistemleri, otomatik geri bildirim araçları ve sanal öğretmenler gibi teknolojiler aracılığıyla eğitim süreçlerinin daha verimli hale gelmesine destek olmaktadır (Holmes ve ark., 2019).

İnsan zekâsına özgü bilişsel yetenekleri özellikle akıl yürütme, karar verme ve geleceği öngörme becerilerinin makineler aracılığıyla taklit edilme süreci olarak tanımlanan YZ'nin temel amacı, insan benzeri düşünme süreçlerini gerektiren karmaşık görevlerin otomasyonunu sağlayarak verimliliği artırmak ve bireylerin üzerindeki bilişsel yükü hafifletmektir (Obschonka ve Audretsch, 2020; Xue ve Wang, 2022).

Eğitim alanında, YZ teknolojilerinin sunduğu en önemli katkılardan biri de, bireysel farklılıkların dikkate alınmasını sağlamasıdır. Her öğrencinin öğrenme hızı, ilgisi, motivasyonu ve bilişsel düzeyi farklılık gösterebilmektedir. Geleneksel öğretim yöntemleriyle bu farklılıkların karşılanmasında zorluklar yaşanırken, YZ temelli çözümler kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimlerinin tasarlanmasını mümkün kılmaktadır. Kuprenko (2020) da bu konuda, YZ destekli algoritmaların, öğrenci profillerine göre uyarlanmış eğitim süreçlerinin oluşturulmasına olanak sağladığını belirtmektedir.

Benzer şekilde Drigas ve Ioannidou (2012) ile Fahimirad ve Kotamjani (2018) de, farklı öğrenme hızlarına sahip öğrenciler için erken tanılama ve müdahale sağlayan YZ sistemlerinin, öğrenme sürecinde zamanında ve etkili destek sunduğunu vurgulamaktadır. Bu teknolojik olanaklar, yalnızca bireyselleştirilmiş içerik sunmakla kalmamakta, aynı zamanda öğrencilerin performanslarının izlenmesi, ders materyallerinin otomatik oluşturulması ve uygun öğretim stratejilerinin belirlenmesi gibi işlevlerle de eğitimde kaliteyi artırmaktadır (Karaca ve Telli, 2019).

Yapay zekâ teknolojileri, sadece yüz yüze yürütülen geleneksel eğitim ortamlarında değil, aynı zamanda uzaktan eğitim gibi alternatif öğrenme modellerinde de etkili biçimde kullanılabilir. Günümüzde sınıf temelli eğitim yanında, sunduğu fırsatlar sebebi ile çevrim içi, harmanlanmış (blended) ve uzaktan öğrenme gibi dijital ortamlar da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Moore ve ark., 2011; Means ve ark., 2013). Dijital ortamlar, bireysel ihtiyaçlara uygun öğrenme deneyimlerinin sunulmasını ve öğrenmenin mekân ve zamandan bağımsız hâle gelmesini mümkün kılmaktadır. Yapay zekâ, farklı eğitim türlerinde öğrenme

süreçlerini daha dinamik, etkileşimli ve kişiselleştirilmiş kılmak için güçlü bir araç olarak olmaktadır (Luckin ve Holmes, 2016; Holmes ve ark., 2019).

COVID-19 pandemisiyle birlikte hız kazanan dijitalleşme süreci, eğitim ortamlarının yapısında değişiklikler oluşturmuş; uzaktan ve çevrimiçi öğrenme uygulamaları, geleneksel öğretim yaklaşımlarının yerini giderek daha esnek, erişilebilir ve teknoloji temelli modellere bırakmıştır. Bu süreçte YZ destekli uygulamaların sunduğu kişiselleştirme, esneklik ve veri analitiği gibi imkânlar, öğrenci merkezli öğretim anlayışının ön plana çıkmasını sağlamıştır. Bu değişimin etkili ve sürdürülebilir olabilmesi için yalnızca teknolojik gelişmeler yeterli olmamakta; bu teknolojilerin eğitim ortamlarında altyapılarının da oluşturulması gerekmektedir. Öğrenme Yönetim Sistemleri, uzaktan ve çevrimiçi öğrenme ortamlarının alt yapılarının planlanması, yürütülmesi ve değerlendirilmesinde aktif bir rol üstlenmektedir. Bu çerçevede, bir sonraki bölümde LMS'lerin eğitim sistemindeki yeri, sunduğu olanaklar ve YZ tabanlı yeniliklerle nasıl bütünleştiği ayrıntılı bir biçimde ele alınmıştır.

Öğrenme Yönetim Sistemlerinin Eğitimdeki Önemi

Öğrenme yönetim sistemleri, uzaktan eğitim süreçlerinin planlanması, uygulanması ve değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen, web tabanlı yazılımlardır. Özellikle yükseköğretim kurumlarında, açık ve uzaktan eğitim modellerinde ve kurumsal eğitim ortamlarında bu sistemlerin kullanım alanı artış göstermektedir (Sclater, 2008; Turnbull ve ark., 2019).

Öğrenme yönetim sistemleri, eğitimde dijital dönüşümün önemli araçlarından biri olarak, zaman ve mekân sınırlılıklarını ortadan kaldırarak öğrenme sürecini esnek ve kişiselleştirilebilir hale getirmektedir. Bu sistemler; senkron (eş zamanlı) ve asenkron (farklı zamanlarda) eğitim imkânları sayesinde öğrencilere kendi öğrenme hızlarında ilerleyebilme, ders materyallerine istedikleri anda erişebilme ve ihtiyaç duyduklarında içeriği tekrar edebilme fırsatı sunmaktadır. Böylece bireysel öğrenme tercihlerine ve farklı öğrenme stillerine uygun, esnek ve kapsayıcı öğrenme ortamları oluşturulabilmektedir. Ayrıca, dijital araçlarla etkileşimi destekleyen bu sistemler, öğrencilerin aktif katılımını artırarak hem motivasyonu hem de akademik başarıyı olumlu yönde etkilemektedir (Anderson, 2004; Hrastinski, 2008; Bradley, 2020). Kişiselleştirilmiş öğrenme imkânı sunan LMS'ler, öğrenci merkezli yaklaşımların uygulanmasını kolaylaştırmakta; bireysel farklılıklara göre uyarlanabilir öğrenme yollarının tasarlanmasına ve öğrencilerin kendi hızlarında ilerleyebilecekleri dinamik öğrenme ortamlarının geliştirilmesine de katkı sağlamaktadır (Sun ve Chen, 2016; Sinclair ve Aho, 2018; Pardo ve ark., 2019; Aljawarneh, 2020).

Öğrenme Yönetim Sistemleri, sadece içerik sunumunda değil; bunlara ek olarak öğrenme sürecinin izlenmesi, değerlendirilmesi ve geribildirim süreçlerinin yürütülmesinde de katkı sunmaktadır. Bu sistemler sayesinde ders materyalleri merkezi bir platformda toplanabilmekte, ödev, sınav ve anket gibi araçlarla öğrenme süreçlerinin izlenmesi sağlanabilmektedir. Bireyselleştirilmiş geri bildirim verilmesi, öğretme sürecinin etkili veri temelli hale gelmesine katkı sunmaktadır. Ayrıca, tartışma panoları, grup çalışmaları ve iş birliğine dayalı öğrenme modülleri sayesinde öğrenenler arası etkileşim artmakta; sosyal öğrenme desteklenmektedir. Erişilebilirlik ilkelerine uygun şekilde tasarlanabilen LMS'ler, farklı engel türlerine sahip bireylerin eğitim süreçlerine katılımını kolaylaştırarak kapsayıcı eğitimi de desteklemektedir (Hrastinski, 2009; Comas-Quinn, 2011; Garrison, 2011; Seale, 2013). Bu yönleriyle LMS'ler, geleneksel sınıf ortamlarının ötesine geçerek öğrenmeyi sürekli, erişilebilir ve etkileşimli bir deneyim haline dönüştürmektedir.

Günümüzde farklı eğitim düzeylerinde ve kurumlarda yaygın biçimde kullanılan LMS'ler bulunmaktadır. Bu sistemler, kurumların pedagojik ve teknik ihtiyaçlarına göre değişiklik gösterebilmektedir. LMS'ler, ticari ya da açık kaynak kodlu olabilmektedir. Moodle öğrenme yönetim sistemi; açık kaynak kodlu yapısı, kullanım kolaylığı, bütünleşik kullanıcı arayüzü, video konferans desteği, genişletilebilir eklenti altyapısı ve yüksek düzeyde özelleştirilebilirliği sayesinde özellikle üniversiteler ile mesleki eğitim kurumlarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Dougiamas ve Taylor, 2003; Costello, 2013; Esnaola-Arribillag ve Bezanilla, 2020; Rodrigues, 2020).

Blackboard öğrenme yönetim sistemi de, örgün öğretim süreçlerini dijital ortama taşıma amacıyla geliştirilmiş, dünya genelinde yaygın olarak kullanılan bir platformdur. Eğitim teknolojilerinin gelişimiyle şekillenen bu sistem, özellikle üniversiteler ve K12 düzeyindeki eğitim kurumları tarafından tercih edilmektedir (Bradford ve ark., 2007). Merkezi Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Blackboard, güçlü kurumsal entegrasyon yetenekleri ve gelişmiş raporlama araçları sayesinde tercih edilmektedir (Bradford ve ark., 2007). Sistem aracılığıyla öğretmenler; ders içeriklerini (dosya, video vb.) öğrencilere ulaştırabilmekte, duyuru, mesaj ve e-posta gibi iletişim kanallarını kullanabilmekte, ayrıca test, ödev gibi ölçme-değerlendirme araçlarını aktif bir şekilde uygulayabilmektedir. Ayrıca, tartışma forumlarında sınıf içi etkileşim desteklenmekte; sanal sınıf ortamlarında ise eşzamanlı canlı ders oturumları gerçekleştirilebilmektedir. Bu oturumların kaydedilmesi sayesinde öğrenciler ders içeriklerine istedikleri zaman erişebilmekte ve bireysel öğrenme hızlarına uygun biçimde ilerleyebilmektedir (Hamilton ve ark., 2014).

Kullanıcı dostu arayüzü, özelleştirilebilir yapısı ve mobil cihazlarla yüksek uyumluluğu sayesinde Canvas da, üniversiteler tarafından yaygın biçimde tercih edilmektedir (Watson ve Watson, 2007). COVID-19 pandemisi sürecinde çevrim içi eğitimin zorunlu hâle gelmesiyle birlikte, senkron ve asenkron öğrenme olanaklarını bütünleştiren Google Classroom ve Microsoft Teams for Education da sıklıkla kullanan LMS’lerdendir. Bu platformlar, aynı zamanda öğrencilerin dijital okuryazarlık, işbirlikli öğrenme ve öz düzenleme becerilerinin gelişimini destekleyen özellikleriyle dikkat çekmektedir (Almarashdeh, 2016; Iftakhar, 2016; Bradley, 2020; Trust ve Whalen, 2020).

Özellikle Moodle, Canvas ve Blackboard gibi sistemler, hem içerik yönetimi hem de izleme-değerlendirme araçları açısından sundukları bütünleşik çözümlerle küresel ölçekte yaygın şekilde tercih edilmektedir (Lonn ve Teasley, 2009; Turnbull ve ark., 2022). Bu sistemlerin kullanılmaları; kurumların pedagojik ve teknik gereksinimleri, mevcut altyapı koşulları, kullanıcıların deneyim düzeyi ile öğrenme analitiği araçlarıyla bütünleşme yetkinliği gibi çeşitli faktörlerle ilişkilidir (Al-Fraihat ve ark., 2020).

Aşağıdaki Tablo1’de popüler LMS’ler; kaynak türü, özelleştirilebilirlik düzeyi, senkron/asenkron eğitim desteği, etkileşim araçları ve kullanım alanları olarak belirli kriterler açısından karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. LMS’lerin karşılaştırılması

LMS	Kaynak Türü	Özelleştirilebilirlik	Senkron/Asenkron Destek	Etkileşim Araçları	Kullanım Alanları
Moodle	Açık kaynak	Yüksek	Her ikisi	Forum, mesajlaşma, grup çalışmaları	Üniversiteler, mesleki eğitim
Blackboard	Ticari	Orta	Her ikisi	Forum, sanal sınıf, mesaj/email	Üniversiteler, K12 okulları
Canvas	Ticari	Yüksek	Her ikisi	Mesajlaşma, grup ödevleri, mobil uyum	Üniversiteler
Google Classroom	Ücretsiz (Google)	Düşük	Her ikisi	Yorumlar, ortak belgeler	K12, üniversite, yaygın eğitim
Microsoft Teams Edu.	Ücretsiz (MS)	Orta	Her ikisi	Sohbet, grup çalışmaları, video çağrı	Tüm eğitim düzeyleri

Eğitim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, bu sistemlerin sunduğu imkânlar da dönüşüme uğramaktadır. Son yıllarda, özellikle YZ destekli çözümler, LMS’lerin işlevselliğini artırarak daha kişiselleştirilmiş, öngörülebilir ve veri temelli öğrenme deneyimlerinin

tasarlanmasını sağlamaktadır. Yapay zekâ teknolojilerinin LMS'ler ile bütünleştirilmesi, hem öğrenen hem de eğitici açısından yeni fırsatlar sunmakta; eğitimde verimliliğin, etkililiğin ve erişilebilirliğin artırılmasını sağlayabilmektedir. Bir sonraki bölümde, YZ'nın LMS'lerde kullanılması ile ortaya çıkan yeni uygulamalar, avantajlar ve potansiyel gelişim alanları ele alınmıştır.

Öğrenme Yönetim Sistemlerinde Yapay Zekâ Tabanlı Gelişmeler ve Eğitsel Yansımaları

Dijital eğitim ortamlarında yaşanan teknolojik gelişmeler, LMS'lerin yalnızca içerik yönetimi ve öğrenci takibi gibi temel işlevlerle sınırlı kalmayıp, daha gelişmiş özellikler sunmasını gerekli kılmıştır. Günümüz teknolojik gelişmelerin merkezinde yer alan YZ teknolojileri, LMS'lerin daha akıllı, kişiselleştirilebilir ve veri odaklı yapılar haline gelmesine imkân sunmaktadır. LMS'ler ile kullanılan YZ uygulamaları öğrenme süreçlerinin otomatik olarak izlenmesini, öğrencilerin ihtiyaçlarına uygun içeriklerin önerilmesini ve öğretim sürecine ilişkin kararların veri temelli biçimde alınmasını sağlamaktadır. LMS'lerin YZ tabanlı sistemler ile desteklenmesi, öğrenme analitiği uygulamalarını gündeme getirmiştir. Öğrenme analitiği ile, öğrencilerin platform üzerindeki etkileşimlerinden elde edilen büyük veriler algoritmalar aracılığıyla analiz edilerek bireysel başarı tahminleri yapılabilmekte, risk altındaki öğrenciler tespit edilebilmekte ve öğretmenlere erken müdahale imkânı sunulmaktadır (Zawacki-Richter ve ark., 2019; Ifenthaler ve Yau, 2020). Bu sistemlerin veriye dayalı karar destek hizmetleri sunması, çevrim içi öğrenme ortamlarının etkililiğini artırmaktadır (Kebritchi ark., 2017). Pardo ve ark., (2019)'de öğrenme analitiğinin, sadece izleme aracı değil; aynı zamanda öğrencilerin öz düzenleme becerilerini geliştiren, kişisel öğrenme yollarını destekleyen bir mekanizma olarak da işlev gördüğünü belirtmektedir.

YZ destekli LMS'lerin, kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimleri sunması da YZ'nin önemli avantajlarından biridir. Uyarlanabilir öğrenme ortamları ile öğrencilerin öğrenme hızına, ilgilerine ve önceki başarılarına göre içerik ve görevleri ayarlanarak öğrenme süreci bireyselleştirilebilmektedir. Öğrencinin ihtiyacına yönelik materyallerin sunulması da öğrencinin motivasyonun artmasına ve öğrenme sürecine aktif katılımın desteklenmesine katkı sağlamaktadır (Holmes ve ark., 2019; Chen ve ark., 2020). Ayrıca, doğal dil işleme (Natural Language Processing-NLP) ve YZ destekli sohbet botları gibi araçlar da öğrenci destek hizmetlerinin dijitalleşmesini sağlamaktadır. Sohbet botları, öğrencilere 7/24 erişilebilir yardım sunarken; akademik danışmanlık, teknik destek ve yönlendirme gibi konularda görev almaktadır (Winkler ve Söllner, 2018).

YZ teknolojilerinin LMS’lerdeki etkisi sadece öğrencilere değil, öğretmenlere de eğitim sürecinde destek olmaktadır. YZ tabanlı sistemler, öğretmenlerin öğrenci performanslarını gerçek zamanlı olarak izlemesini ve bireyselleştirilmiş öğrenme yolları oluşturarak her öğrencinin ihtiyacına göre farklılaştırılmış öğretim sunmasını sağlamaktadır. Özellikle makine öğrenmesi algoritmaları, öğrencilerin önceki etkileşimlerini analiz ederek öğretmenlere risk altında olan öğrencileri işaret eden uyarılar sunabilmektedir. Ayrıca, YZ destekli sistemler; sınavların otomatik olarak değerlendirilmesi, öğrencilerin sıklıkla zorlandığı konuların belirlenmesi ve öğretmenlere yönelik içerik önerilerinin yapılması gibi işlevlerle, öğretmenlerin zaman yönetimini kolaylaştırmakta ve mesleki yüklerini hafifletmektedir (Luckin ve ark., 2016). Zawacki-Richter ve ark., (2019) de YZ teknolojilerinin öğretmenlere özelleştirilmiş mesleki gelişim yolları sunabildiğini ve dijital pedagojik becerilerinin gelişimini desteklediğini vurgulanmaktadır.

YZ uygulamaları LMS’lerde birçok avantaj sunsa da, bu teknolojilerin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. YZ destekli LMS’lerin sunduğu avantajların yanı sıra, bazı önemli riskler de bulunmaktadır. Bu sistemlerde öğrenci verilerinin toplanması ve işlenmesi, veri güvenliği ve mahremiyet açısından etik sorunları gündeme getirmektedir (Huang, 2023). Ayrıca, YZ destekli LMS’lerin öğretmen ve öğrenci rollerinde dönüşüme neden olarak, öğretmenlerin geleneksel rollerinin destekleyici veya tamamlayıcı bir yapıya yol açabileceği ve bu durumun pedagojik yaklaşımları yeniden değerlendirmeyi gerektirdiği belirtilmektedir (Nikitina ve Ishchenko, 2023). Dijital altyapıya erişimdeki eşitsizlikler, YZ destekli LMS’lerin eğitimde fırsat eşitliğini olumsuz etkileyebileceği ve dijital uçurumu derinleştirebileceği riskini taşımaktadır (Vesna ve ark., 2024). Aşağıda yer alan Tablo2’de, YZ’nin LMS işlevlerine olan katkılarını ve beraberinde getirebileceği olası sınırlılıkları özetlemektedir.

Tablo 2. Yapay zekânın LMS işlevlerine etkisi

LMS İşlevi	YZ'nin Katkısı (Avantaj)	Olası Sınırlılıklar
Kişiselleştirilmiş Öğrenme	Öğrenciye özel içerik ve öğrenme yolları önerilir (Alotaibi,2024).	Aşırı kişiselleştirme, öğrenme çeşitliliğini sınırlayabilir (Vergara ve ark., 2024).
Değerlendirme ve Geribildirim	Otomatik ve anlık değerlendirme yapılabilir (Eltahir ve Babiker, 2024).	Otomasyon hataları, yanlış geri bildirimlere yol açabilir (Alotaibi, 2024).
Öğrenci Takibi ve Analitiği	Öğrenci davranışları izlenerek erken müdahale sağlanır (Alotaibi, 2024).	Veri gizliliği ve etik sorunlar ortaya çıkabilir (Eltahir ve Babiker, 2024).
İçerik Yönetimi	İçerik sınıflandırma ve öneri sistemleri ile zenginleştirme yapılır (Vergara ve ark., 2024).	Sistem önerileri pedagojik hedeflerle örtüşmeyebilir (Alotaibi, 2024).
Etkileşim ve Katılım Artırımı	Sohbet robotları ve uyarlanabilir içeriklerle öğrenci katılımı desteklenir (Alotaibi, 2024).	Gerçek insan etkileşiminin yerini alması, motivasyon üzerinde olumsuz etki yaratabilir (Vergara ve ark., 2024).

Tablo 2, YZ teknolojilerinin LMS'lerin temel işlevlerine çok yönlü katkılar sunduğunu göstermektedir. Kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimlerinin sunulması, öğrenci performansının izlenerek erken müdahale sağlanması, otomatik değerlendirme ve içerik önerileri gibi avantajlar, öğretim sürecini hem öğrenci hem de öğretmen açısından daha etkili ve verimli hâle getirmektedir. Bununla birlikte, aşırı kişiselleştirmenin öğrenme çeşitliliğini sınırlaması, algoritmaların hata payı, veri gizliliğine yönelik etik sorunlar ve yapay etkileşimlerin motivasyon üzerindeki olası olumsuz etkileri gibi sınırlılıklar da göz ardı edilmemelidir. Dolayısıyla, YZ tabanlı sistemler eğitim ortamlarında yer alırken yalnızca teknolojik yeterlilik değil; aynı zamanda pedagojik uyum, etik sorumluluklar ve kullanıcı merkezli tasarım ilkeleri de dikkate alınmalıdır. Bu noktada, öğretmenlerin ve eğitim yöneticilerinin söz konusu sistemlerin işleyişine ilişkin farkındalıklarının artırılması, teknolojinin sunduğu olanaklardan maksimum düzeyde yararlanılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, YZ teknolojilerinin LMS'ler üzerindeki etkileri çok yönlü bir bakış açısıyla ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, YZ destekli LMS'lerin geleneksel sistemlerden farklı olarak yalnızca içerik aktarımı ya da öğrenci takibi değil, aynı zamanda kişiselleştirilmiş öğrenme, otomatik değerlendirme, öğrenme analitiği ve öğrenci destek hizmetleri gibi birçok alanda eğitim süreçlerini dönüştürdüğünü ortaya koymaktadır. YZ uygulamaları sayesinde öğretmenler öğrencilerin performansını daha yakından izleyebilmekte, risk altındaki öğrenciler için erken müdahale stratejileri geliştirebilmekte ve bireyselleştirilmiş öğretim planlamaları yapabilmektedir. Aynı şekilde, öğrenciler de kendi öğrenme yollarını daha etkin biçimde yönetme ve destek hizmetlerine anlık erişim sağlama imkânına kavuşmaktadır. Ancak bu teknolojik gelişmelerin sunduğu olanaklara rağmen, bazı sınırlılıkların ve risklerin varlığı da dikkat çekicidir. Özellikle veri gizliliği, pedagojik uyumsuzluklar ve etik sorunlar, YZ destekli LMS'lerin kullanım sürecinde çözülmesi gereken başlıca sorunlar arasında yer almaktadır. Ayrıca, teknolojinin öğretmen-öğrenci etkileşiminin yerini alabilecek şekilde kullanılması durumunda, öğrenme motivasyonunun ve sosyal etkileşimlerin olumsuz etkilenebileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Çalışmadan elde edilen bulgular, YZ destekli LMS'lerin eğitim süreçlerinde sunduğu olanakların yanında, bazı yapısal ve etik sorunları da beraberinde getirdiğini ortaya koymaktadır. Bulgular, mevcut literatürde yer alan Holmes ve ark., (2019) ve Zawacki-Richter ve ark., (2019) gibi çalışmalardaki sonuçlarla örtüşerek, YZ tabanlı sistemlerin özellikle öğrenme sürecinin bireyselleştirilmesi, erken uyarı mekanizmaları ve öğrenme analitikleri

yoluyla öğrenci başarısının artırılmasında etkili olduğunu desteklemektedir. Bununla birlikte, katılımcı görüşlerinde vurgulanan veri güvenliği, algoritmik önyargılar ve öğretmen-öğrenci rollerindeki dönüşüme dair endişeler, Huang'ın (2023) çalışmasında öne çıkan etik ve hukuki çerçeve tartışmaları ile paralellik göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışma, sadece teknik kazanımlara değil, aynı zamanda dijitalleşme sürecinde ortaya çıkan pedagojik, etik ve eşitsizlik temelli risklerin analizine de yer vererek alanyazına bütüncül bir bakış açısı sunmaktadır.

Bu çerçevede, aşağıdaki öneriler sunulabilir:

1. **Pedagojik Temelli Tasarım:** YZ destekli LMS'lerin yalnızca teknik yeterlilikleri değil, aynı zamanda pedagojik uygunlukları da göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır. Sistem önerilerinin öğretim hedefleriyle uyumlu olması sağlanmalıdır.
2. **Öğretmen Eğitimi:** Öğretmenlerin YZ tabanlı sistemleri etkin kullanabilmeleri için mesleki gelişim programlarına dâhil edilmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu sayede öğretmenler, teknolojiyi yalnızca kullanıcı olarak değil, aynı zamanda pedagojik bir araç olarak değerlendirebilir.
3. **Etik ve Veri Güvenliği Standartları:** Öğrenme analitiği ve öğrenci izleme süreçlerinde veri gizliliğine ve etik kurallara öncelik verilmelidir. Öğrenci verilerinin güvenliği ve sistemlerin şeffaflığı konusunda ulusal ve uluslararası standartlara uygun hareket edilmelidir.
4. **Karma Öğrenme Modelleri:** YZ destekli LMS'lerin sunduğu avantajlar, öğretmen-öğrenci etkileşimini tamamen ortadan kaldıracak biçimde değil, yüz yüze eğitimi tamamlayıcı ve zenginleştirici bir araç olarak değerlendirilmelidir.
5. **Çok Disiplinli Yaklaşım:** Eğitim teknolojilerinin geliştirilmesinde eğitim bilimleri, bilişim, etik ve sosyoloji gibi farklı disiplinlerin iş birliği içinde çalışması, daha bütüncül ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, YZ teknolojileri eğitim alanında büyük fırsatlar sunmakla birlikte, bu fırsatların etkili ve etik biçimde kullanılması ancak bilinçli bir planlama, sürekli eğitim ve bütüncül bir bakış açısı ile mümkün olacaktır.

Gelecek Araştırmalara Yönelik Öneriler:

- Farklı disiplinlerde ve öğrenme bağlamlarında YZ destekli LMS'lerin etkilerini inceleyen karşılaştırmalı çalışmalar yapılabilir.
- YZ'nin öğretmen rolleri üzerindeki dönüşüm etkileri, öğrenci motivasyonu ve öğrenme stilleri üzerindeki etkileri uzun vadeli çalışmalar ile incelenebilir.

- Veri güvenliği ve etik kullanımı konusunda daha derinlemesine teorik ve uygulamalı araştırmalar yapılabilir.
- Öğretmenlerin bireyselleştirilmiş geri bildirim alma, öğrenme analitiği verilerini yorumlama ve dijital pedagojik becerilerini geliştirme süreçlerinde YZ tabanlı sistemlerden nasıl yararlandığı araştırılabilir.
- Öğrencilerin motivasyon düzeyleri, akademik başarıları ve öğrenme süreçlerine aktif katılımları üzerindeki etkiler, nicel ve nitel yöntemlerle değerlendirilebilir.
- Öğretmenlerin YZ tabanlı sistemleri etkili biçimde kullanabilmeleri için mesleki gelişim olanakları sunulmalı; dijital okuryazarlık, veri yorumlama ve etik farkındalık gibi alanlarda desteklenmeleri sağlanmalıdır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırmacıların Katkı Oranı

Bu çalışma tek yazarlı olup, tüm süreç yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

Al-Fraihat D, Joy M, Masa'deh RE, Sinclair J., 2020. Evaluating E-learning systems success: An empirical study. *Computers in Human Behavior*, 102: 67-86.

Aljawarneh SA., 2020. Reviewing and exploring innovative ubiquitous learning tools in higher education. *Journal of Computing in Higher Education*, 32(1): 57-73.

Almarashdeh I., 2016. Sharing instructors' experience with learning management systems. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 14(3): 1–4.

Alotaibi NS., 2024. The impact of AI and LMS integration on the future of higher education: Opportunities, challenges, and strategies for transformation. *Sustainability*, 16(23): 10357.

Anderson T., 2004. Toward a theory of online learning. In T. Anderson & F. Elloumi (Eds.), *Theory and practice of online learning* (pp. 33–60). Athabasca University Press.

Bradford P, Porciello M, Balkon N, Backus D., 2007. The blackboard learning system: The be all and end all in educational instruction?. *Journal of Educational Technology Systems*, 35(3): 301-314.

Bradley VM., 2020. Learning management system (LMS) use with online instruction. *International Journal of Technology in Education*, 4(1): 68.

Chen L, Chen P, Lin Z., 2020. Artificial intelligence in education: A review. IEEE Access, 8: 75264–75278.

Comas-Quinn A., 2011. Learning to teach online or learning to become an online teacher: An exploration of teachers' experiences in a blended learning course. ReCALL, 23(3): 218–232.

Costello E., 2013. Opening up to open source: Looking at how Moodle was adopted in higher education. Open Learning, 28(3): 187-200.

Dougiamas M, Taylor PC., 2003. Moodle: Using learning communities to create an open source course management system. EdMedia+ Innovate Learning, 171-178.

Drigas AS, Ioannidou RE., 2012. Artificial intelligence in special education: A decade review. International Journal of Engineering Education, 28(6): 1366.

Eltahir ME, Babiker FME., 2024. The influence of artificial intelligence tools on student performance in e-learning environments: Case study. Electronic Journal of e-Learning, 22(9): 91-110.

Esnaola-Arribillaga I, Bezanilla MJ., 2020. Levels of moodle use to support university face-to-face teaching. IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje, 15(3): 129-137.

Fahimirad M, Kotamjani S., 2018. A review on application of artificial intelligence in teaching and learning in educational contexts. International Journal of Learning and Development, Macrothink Institute, 8(4): 106-118.

Garrison DR., 2011. E-learning in the 21st century: A framework for research and practice, 2nd ed. Routledge.

Goodfellow I, Bengio Y, Courville A, Bengio Y., 2016. Deep learning. Cambridge: MIT press. 1(2).

Greller W, Drachsler H., 2012. Translating learning into numbers: A Generic. Educational Technology and Society, 15(42): 42-57.

Hamilton R, Vohs, KD, McGill AL., 2014. We'll be honest, this won't be the best article you'll ever read: The use of dispreferred markers in word-of-mouth communication. Journal of Consumer Research, 41: 197-212.

Holmes W, Bialik M, Fadel C., 2019. Artificial intelligence in education promises and implications for teaching and learning. Center for Curriculum Redesign.

Hrastinski S., 2008. Asynchronous and synchronous e-learning. Educause Quarterly, 31(4): 51–55.

- Hrastinski S., 2009. A theory of online learning as online participation. *Computers & Education*, 52(1): 78–82.
- Huang L., 2023. Ethics of artificial intelligence in education: Student privacy and data protection. *Science Insights Education Frontiers*, 16(2): 2577-2587.
- Ifenthaler D, Yau JYK., 2020. Utilising learning analytics to support study success in higher education: A systematic review. *Educational Technology Research and Development*, 68(4): 1961-1990.
- Iftakhar S., 2016. Google classroom: What works and how? *Journal of Education and Social Sciences*, 3(1): 12–18.
- Karaca B, Telli G., 2019. The role of artificial intelligence in various processes and its predictive function. In G. Telli (Ed.), *Artificial Intelligence and The Future*, pp: 172-185. Istanbul: Dogu Publishing.
- Kebritchi M, Lipschuetz A, Santiago L., 2017. Issues and challenges for teaching successful online courses in higher education. *Journal of Educational Technology Systems*, 46(1): 4–29.
- Kuprenko V., 2020. Artificial intelligence in education: Benefits, challenges, and use cases. Erişim adresi: <https://medium.com/towards-artificial-intelligence/artificial-intelligence-in-education-benefitschallenges-and-use-cases-db52d8921f7a>.
- Lonn S, Teasley SD., 2009. Saving time or innovating practice: Investigating perceptions and uses of Learning Management Systems. *Computers & Education*, 53(3): 686–694.
- Lu OHT, Huang AYQ, Huang JCH, Yang SJH., 2018. Applying learning analytics for the early prediction of students' academic performance in blended learning. *Journal of Educational Technology & Society*, 21(2): 220–232.
- Luan H, Tsai CC., 2021. A review of using machine learning approaches for precision education. *Educational Technology & Society*, 24(1): 250-266.
- Luckin R, Holmes W., 2016. *Intelligence unleashed: An argument for AI in Education*. UCL Knowledge Lab: London, UK.
- McCarthy J, Minsky ML, Rochester N, Shannon CE., 2006. A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence, 1955. *AI Magazine*, 27(4): 12.
- Means B, Toyama Y, Murphy R, Baki M., 2013. The effectiveness of online and blended learning: A meta-analysis of the empirical literature. *Teachers College Record*, 115(3): 1-47.
- Moore MG, Dickson-Deane C, Galyen K., 2011. E-learning, online learning, and distance learning environments: Are they the same? *The Internet and Higher Education*, 14(2): 129–135.

Nikitina I, Ishchenko T., 2024. The impact of AI on teachers: Support or Replacement?. *Scientific Journal of Polonia University*, 65(4): 93-99.

Obschonka M, Audretsch DB., 2020. Artificial intelligence and big data in Entrepreneurship: A new era has begun. *Small Business Economics* 55(3): 529-539.

Pardo A, Han F, Ellis RA., 2016. Combining university student self-regulated learning indicators and engagement with online learning events to predict academic performance. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 10(1): 82-92.

Pardo A, Jovanovic J, Dawson S, Gašević D, Mirriahi N., 2019. Using learning analytics to scale the provision of personalised feedback. *British Journal of Educational Technology*, 50(1): 128–138.

Rodrigues S., 2020). Higher education teachers' needs concerning with the moodle and the impact of training received in the use of the platform: Case study in higher education. In 2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 1-6.

Russell SJ, Norvig P., 2021. *Artificial intelligence: A modern approach*, 4th ed. Pearson.

Saygin AP, Cicekli I, Akman V., 2000. Turing Test: 50 years later. *Minds and Machines*, 10(4): 463–518.

Schwab K., 2016. *The fourth industrial revolution*. World Economic Forum.

Sclater N., 2008. *Web 2.0, personal learning environments, and the future of learning management systems*. EDUCAUSE Center for Applied Research.

Seale J., 2013. *E-learning and disability in higher education: Accessibility Research and Practice* (2nd ed.). Routledge.

Sinclair J, Aho AM., 2018. Experts on super innovators: Understanding staff adoption of learning management systems. *Higher Education Research & Development*, 37(1): 158-172.

Sun A, Chen X., 2016. Online education and its effective practice: A Research Review. *Journal of Information Technology Education: Research*, 15: 157–190.

Trust T, Whalen J., 2020. Should teachers be trained in emergency remote teaching? Lessons learned from the COVID-19 pandemic. *Journal of Technology and Teacher Education*, 28(2): 189-199.

Turing AM., 1950. Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236): 433-460.

Turnbull D, Chugh R, Luck J., 2019. Transitioning to E-Learning during the COVID-19 pandemic: How have higher education institutions responded to the challenge? *Education and Information Technologies*, 26(5): 6401–6419.

Turnbull D, Chugh R, Luck J., 2022. An overview of the common elements of learning management system policies in higher education institutions. *TechTrends*, 66(5): 855-867.

Vergara D, Lampropoulos G, Antón-Sancho Á, Fernández-Arias P., 2024. Impact of artificial intelligence on learning management systems: A bibliometric review. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(9): 75.

Vesna L, Sawale PS, Kaul P, Pal S, Murthy BSNVR., 2024. Digital divide in AI-powered education: Challenges and solutions for equitable learning. *Journal of Information Systems Engineering*, 10(2): 301-310.

Watson WR, Watson SL., 2007. An argument for clarity: What are learning management systems, what are they not, and what should they become? *TechTrends*, 51(2): 28–34.

Winkler R, Söllner M., 2018. Unleashing the potential of chatbots in education: A state-of-the-art analysis. In *Proceedings of the 19th International Conference on Information Systems Development*.

Xue Y, Wang Y., 2022. [Retracted] Artificial intelligence for education and teaching. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022(1): 4750018.

Zawacki-Richter O, Marín VI, Bond M, Gouverneur F., 2019. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education-where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1): 1-27.

Kimyada Hipokloröz Asit Kullanımı: Bilimsel Literatürün Bibliyometrik Analizi

Fatih Mehmet ATEŞ^{1*}

¹Bayburt Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bayburt

¹<https://orcid.org/0000-0002-7497-2211>

*Sorumlu yazar: fmehmetates@bayburt.edu.tr

Derleme

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 20.02.2025

Kabul tarihi: 21.05.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar Kelimeler

Hipokloröz asit

Enfeksiyon

Kullanım

Bibliyometrik analiz

Bibliyometri

ÖZ

Tarihsel olarak alkoller, aldehitler, klorlu bileşikler ve hipokloröz asit gibi kimyasallar enfeksiyon etkenlerini ortadan kaldırmak veya etkisiz hale getirmek için kullanılmıştır. Bilimsel literatürü analiz etmek için sağlam bir araç olarak bibliyometrinin potansiyelini kabul ederek, enfeksiyonlarda hipokloröz asit uygulamasıyla ilgili araştırmalar üzerine bibliyometrik bir çalışma yürüttük. Bu analiz, ortaya çıkan eğilimleri belirlemeyi, ortak kalıpları ortaya çıkarmayı, iş birliklerini ve ağları incelemeyi ve gelecekteki araştırma yönlerini tahmin etmeyi amaçlamıştır. Yöntemler: Scopus veri tabanını kullanarak, 1982 ile 2024 yılları arasında “hipokloröz asit”, “enfeksiyon” ve “kullanım” anahtar kelimeleriyle yayınlanan belgeleri aradık. Veri analizi R-Studio 2024.09.0 Build 375'te, bibliometrix R paketi aracılığıyla makine öğrenimi tabanlı bir bibliyometrik yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazar ilgisi, yayınların sayısı ve kesirli katkısı analiz edilerek değerlendirilirken, Lotka yasası yazar üretkenliğini değerlendirmiştir. Bradford yasası, konuyu kapsayan çekirdek dergileri belirlemek için kullanılmıştır. Tematik manzara niş temalar, yeni ortaya çıkan temalar, motor temalar ve çekirdek temalar olarak sınıflandırılmıştır. Sonuçlar: Toplam 574 belge tespit edilmiş ve bunların çoğunluğunu (%74) orijinal makaleler oluşturmuştur. Yayınların yıllık büyüme oranı %5.08 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak, 424 dergi birden fazla belge yayınlamıştır. İlgili yazarların çoğu Amerika Birleşik Devletleri'nde çalışmaktadır. Nötrofiller, hayvanlar ve hidrojen peroksit yeni ortaya çıkan temalar iken, hipokloröz asit, insan ve makale temel temaları temsil etmektedir. Sonuçlar/Uygulama için Uygulamalar: Enfeksiyon uzmanlarının ilgi alanları zaman içinde çeşitlenmiş ve metabolizma, reaktif oksijen metabolitleri, anti-enfektif ajanlar eklenmiştir.

The Use of Hypochlorous Acid in Chemistry: Bibliometric Analysis of Scientific Literature

Review Article

Article History:

Received: 20.02.2025

Accepted: 21.05.2025

Available online: 12.09.2025

Keywords:

Hypochlorous acid

Infection

Use

Bibliometric analysis

Bibliometrics

ABSTRACT

Historically, chemicals such as alcohols, aldehydes, chlorinated compounds and hypochlorous acid have been used to eliminate or inactivate infectious agents. Recognizing the potential of bibliometrics as a robust tool for analyzing scientific literature, we conducted a bibliometric study on research related to the application of hypochlorous acid in infections. This analysis aimed to identify emerging trends, reveal common patterns, examine collaborations and networks, and predict future research directions. Methods: Using the Scopus database, we searched for documents published between 1982 and 2024 with the keywords “hypochlorous acid,” “infection,” and “use.” Data analysis was conducted in R-Studio 2024.09.0 Build 375, employing a machine learning-based bibliometric approach through the bibliometrix R package. Author relevance was assessed by analyzing the number and fractional contribution of publications, while Lotka's law evaluated author productivity. Bradford's law was used to pinpoint the core

journals covering the topic. The thematic landscape was classified into niche themes, emerging themes, engine themes, and core themes. Results: A total of 574 documents were identified, with original articles accounting for the majority (74%). The annual growth rate of publications was calculated at 5.08%. Overall, 424 journals published more than one document. Most of the corresponding authors work in the United States. Neutrophils, animals and hydrogen peroxide are emerging themes, while hypochlorous acid, human, and article represent the basic themes. Conclusions/Applications for Practice: The interests of infection specialists have diversified over time and metabolism, reactive oxygen metabolites, anti-infective agents have been added.

To Cite: Ateş FM., 2025. The use of hypochlorous acid in chemistry: Bibliometric analysis of scientific literature. Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(2): 402-414.

Introduction

From past to present, human beings have had to struggle with countless infectious agents. Sterilization and disinfection processes have been used to eliminate or neutralize these infectious agents. Sterilization refers to the complete elimination of microbiological agents, including spores, from inanimate surfaces by physical or chemical methods, while disinfection refers only to the elimination of infectious agents. In disinfection processes, factors such as pre-cleaning of the application area, type and intensity of infection, pH, temperature, disinfectant concentration, application time, etc. are important factors that ensure the success of disinfection (Ateş, 2020). The destruction of pathogenic microorganisms in living tissues with chemicals is called antisepsis. While heat, radiation, filtration, gas vapor and chemicals can be used for sterilization; physical methods can be used for pasteurization. Alcohols, aldehydes, chlorinated compounds and oxidizers can be used for chemical disinfection. In addition to these, chemicals such as chlorine, hypochlorous acid and sodium dichloroisocyanurate (NaDCC) can also be used for disinfection (Külekcı, 2005). Regulation of environmental factors is not enough to protect against infections; strengthening the immune system, eating a balanced diet, paying attention to personal hygiene and taking precautions during travel are also effective protection methods (Ateş, 2020).

It is usual to prefer chemicals to be used in disinfection that do not cause corrosion on the surface they come into contact with, are non-toxic and low priced. Hypochlorous acid (HOCl) is widely used as an economical and effective disinfectant against pathogenic microorganisms in all mammals since it can be produced by electrolysis of water and NaCl. Neutrophils, eosinophils, B-lymphocytes produce HOCl in response to infections with nicotinamide adenine dinucleotide phosphate oxidase bound to the mitochondrial membrane (Kettle and Winterbourn, 1997). The resulting HOCl reaches maximum antimicrobial activity at pH=3-6 (Wang et al., 2007). In aqueous solutions, HOCl dissociates into H^+ and OCl^- ions, leading to the denaturation of proteins. HOCl neutralizes viruses by generating chloramine and nitrogen radicals, as well as disrupting double-stranded DNA (Winter et al., 2008). It can be stated that the destruction of infectious agents in humans and the ecosystem they live in through HOCl is a safe method. The

use of HOCl in the prevention of infections will enable national and international collaborations, networking capabilities and organizational activities to be carried out. In this study, a bibliometric review was conducted to analyze the literature, investigate trends, patterns in collaborative research, track collaboration networks and predict future research directions between 1982 and 2024 on the use of HOCl in infections.

Methods

Today, various databases such as Web of Science (WoS), Scopus, Google Scholar, Microsoft Academic, Crossref, Dimensions and CiteSeer can be used for bibliometric analysis. Google Scholar has been compared to other databases such as WoS and Scopus by a number of researchers because it is the bibliography database most preferred by researchers. These researchers found significant overlap in terms of content, number of articles, typology, number of conferences and proceedings (Bar-Ilan, 2010; García-Pérez, 2010; Jacsò, 2010; Li et al., 2010; Aguillo, 2012). There are several reports arguing that Scopus is a strong competitor of WoS in bibliometrics. Similarly, compared to WoS, Scopus is cited as having a broader coverage and possibly a larger research area, especially in the social sciences (Li et al., 2010; Mongeon and Paul-Hus, 2016). Bass J et al. stated that Scopus is an important source for curated, high quality, bibliometric data analysis in academic research (Baas et al., 2020). Therefore, in our study, the Scopus database was used for the analysis. A comprehensive search was conducted in the Scopus database between July 1982 and September 2024. Search fields included article title, abstract and keywords. The keywords “Hypochlorous Acid”, “Infection”, “Use” were used in the database searches. Bibliographic metadata were downloaded in BibTex format and exported in Excel format in the R environment (R-Studio 2024.09.0 Build 375 software). Bibliometric analysis of the excel file obtained from the Scopus database was performed through the R-Studio program.

A bibliographic data frame was constructed, encompassing various bibliographic attributes such as authors' names, affiliations, titles, keywords, journal details, publication year, volume, issue, page numbers, editors, and citation counts. The primary results were summarized using the summary function. The data collection process included basic metrics (annual scientific output, average annual citations), sources (most relevant and cited sources, source dynamics), authors (top contributing authors, collaboration networks, country affiliations, and production by country), and documents (most cited globally, frequently used keywords, and keyword trends). The annual growth rate was calculated to evaluate the progression of scientific output over time.

The most relevant authors were evaluated based on their publication count and

contributions in co-authorship. Lotka's law was utilized to analyze author productivity, while Bradford's law identified core journals concentrating on the subject. Multi-country production (MCP) was assessed by counting documents with at least one co-author affiliated with a country different from the first author. The frequency distribution of co-authorship links for each document was analyzed using semantic similarity to disambiguate link elements. Corresponding authors' countries were used to rank the most influential nations, while country-level scientific production referred to document counts based on authors' country affiliations. The institution of the first author determined the most productive country.

A correspondence analysis and clustering approach identified shared keywords and relationships among authors and institutions across research themes. A thematic map was generated by applying a clustering algorithm to the keyword network. The map categorized mainstream themes into niche themes, emerging themes, engine themes, and core themes. Each cluster was represented as a bubble, with bubble names derived from the highest-occurring keywords. Bubble size corresponded to cluster word frequency, and bubble position was determined by cluster centrality and density. The Biblioshiny () function was used to visualize all results.

Results

Overview

We analyzed a total of 574 documents, predominantly consisting of original articles ($n = 424$; 74%) and review articles ($n = 97$; 16%). From 1982 to 2024, 2571 authors contributed to these publications, with an average of six co-authors per document. The annual growth rate of 5.08% reflects a steady increase in scientific output over this period. While only four documents were published in 1982, this number rose significantly to 574 by 2024. The average number of citations per year ranged from 2 to 3 citations. The highest average total citations per article occurred in 2017, with 11,24 citations per publication, whereas 1985 recorded the lowest average, at just 0.15 citations per article.

Sources

A total of 424 journals contributed to the publications analyzed, with 30 journals accounting for approximately 33% of all retrieved documents, as illustrated in Figure 1. The Journal of Hospital Infection led with 23 articles, followed by “Plos One” with 22 articles, “Infection and Immunity” with 21, and the “Journal of Wound Care” with 18 publications. Among the top five journals, the number of publications increased significantly during the period 2012–2024 compared to 1982–2012. The most cited journal in this field was “Nutrients”, which accumulated 1151 citations.

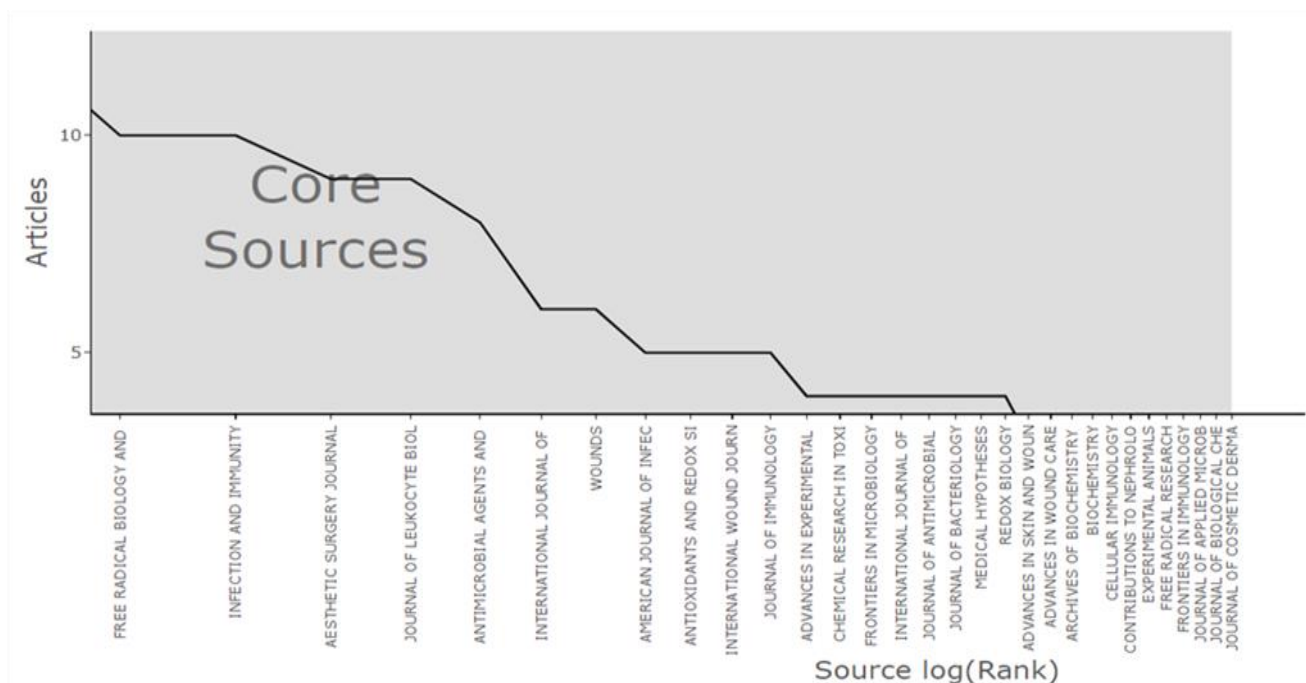
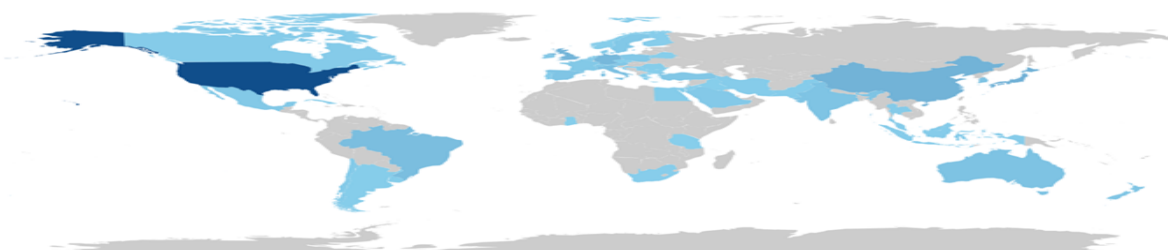


Figure 1. Source clustering through Bradford’s Law

Authors, affiliations, countries

The most relevant authors were Kettle A.J., Beyenal H. and Patel R. with a fractional frequency of 16 (3.2), 13 (1.72) and 13 (1.72) documents, respectively. The frequency distribution of scientific productivity identified that there were several “core” authors (n = 287; 11.1%) who wrote at least two papers and “occasional” authors (n = 2284; 88.9%) who published only one paper. The countries of the top twenty authors are presented in Figure 2.



Country	Number of documents	Country	Number of documents
USA	542	SPAIN	35
JAPAN	111	NEW ZEALAND	33
CHINA	109	TURKEY	29
UK	98	IRELAND	28
GERMANY	87	AUSTRIA	25
BRAZIL	64	SWEDEN	25
ITALY	52	POLAND	24
AUSTRALIA	46	FRANCE	22
INDIA	41	MEXICO	22
SOUTH KOREA	39	SAUDI ARABIA	19

Figure 2. Country-specific production

Based on the Multi-Country Production (MCP) ratio, India, Turkey, and Ireland

demonstrate low levels of international collaboration, whereas the USA, New Zealand, and the United Kingdom exhibit the highest collaboration rates. As shown in Figure 2, the USA is the most prolific country, contributing 542 documents to the field. The most relevant institutions were Washington State University, University of Otago Christchurch, Louisiana State University Health Sciences Center.

Documents

The top ten most cited papers are listed in Table 1 (Schuller-Levis and Park, 2003; Barker et al., 2004; De Larco et al., 2004; El-Benna et al., 2008; Bar-Ilan, 2010; García-Pérez, 2010; Jacsò, 2010; Li et al., 2010; Aguillo, 2012; Boyce, 2016; Mongeon and Paul-Hus, 2016; Carr and Maggini, 2017; Baas et al., 2020). The most cited documents identified in the primary search strategy (keywords: “Hypochlorous Acid” and “Infection”) remained prominent in the sensitivity analysis after adding the term “use.” Among these, the majority were review articles. The top-ranked article, “Vitamin C and Immune Function” by Carr and Maggini (2017), received 1.151 global citations. Most of the highly cited articles (n = 10) were published between 2000 and 2017, while fewer recent articles (2018–2024) were noted, likely due to a shorter citation timeframe.

Table 1. Top ten most global cited documents

Paper	DOI	Total citation	TC per year	Normalized TC
Carr AC, 2017, NUTRIENTS	https://doi.org/10.3390/nu9111211	1151	143.875	12.802
EvanS P, 2001, BR J NUTR	https://doi.org/10.1079/bjn2000296	435	18.125	2.691
Knight JA, 2000, ANN CLIN LAB SCI		425	17.000	2.459
Jaeschke H, 2006, AM J PHYSIOL GASTROINTEST LIVER PHYSIOL	https://doi.org/10.1152/ajpgi.00568.2005	424	22.315	3.072
Schuller-Levis GB, 2003, FEMS MICROBIOL LETT	https://doi.org/10.1016/S0378-1097(03)00611-6	368	16,727	2.947
De Larco JE, 2004, CLIN CANCER RES	https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-03-0760	359	17.095	3.247
Winterbourn CC, 2013, ANTIOXID REDOX SIGNAL	https://doi.org/10.1089/ars.2012.4827	355	29.583	6.145
Barker J, 2004, J HOSP INFECT	https://doi.org/10.1016/j.jhin.2004.04.021	325	15.476	2.939
E-Benna J, 2008, SEMINIMMUNOPATHOL	https://doi.org/10.1007/s00281-008-0118-3	293	17.235	4.060
Boyce JM, 2016, ANTIMICROB RESIST INFECT CONTROL	https://doi.org/10.1186/s13756-016-0111-x	292	3.444	5.620

*DOI: Digital object identifier; TC: total citations

When the terms “hypochlorous acid” and “infection” were excluded from the search strategy, keyword analysis revealed that “human,” “article,” and “humans” were the most frequently used terms, appearing 436, 335, and 324 times, respectively. A visualization of these keywords is presented in the word cloud shown in Figure 3.

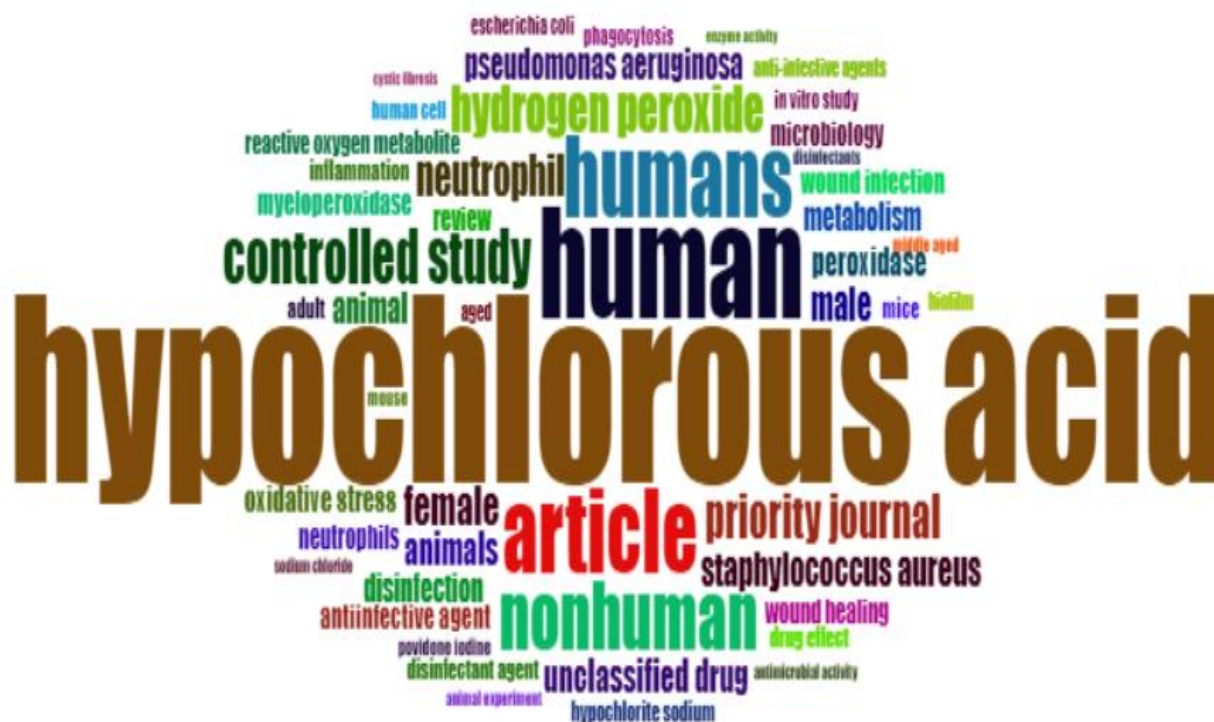


Figure 3. Word cloud

Conceptual structure

The main themes and trends are shown in Figure 4 and Figure 5. The thematic map (Figure 4) shows that neutrophils, animals and hydrogen peroxide are emerging themes, while hypochlorous acid, human, article represent the main themes. Figure 4 shows the evolution of the main thematic areas and their relationships over four different time periods: 1982-1994, 1995-2004, 2005-2014 and 2015-2024. Over time, the 'human' theme links have varied from hypochlorous acid, disinfection, microbiology, neutrophil, anti-infective agents. “Human” and “article” merged under “hypochlorous acid” in 1995-2004. The term “Taurine” initially appeared as a niche theme but began to merge with “hypochlorous acid” between 2005 and 2014. Similarly, “Anti-infective agent” emerged as a theme during 2005-2014 and continued to garner attention in the subsequent decade. The country collaboration network (Figure 6) illustrates international partnerships based on publications, with line thickness representing the strength of collaboration. The United States shows a strong connection with Japan and the United Kingdom, while European countries tend to collaborate predominantly with each other.

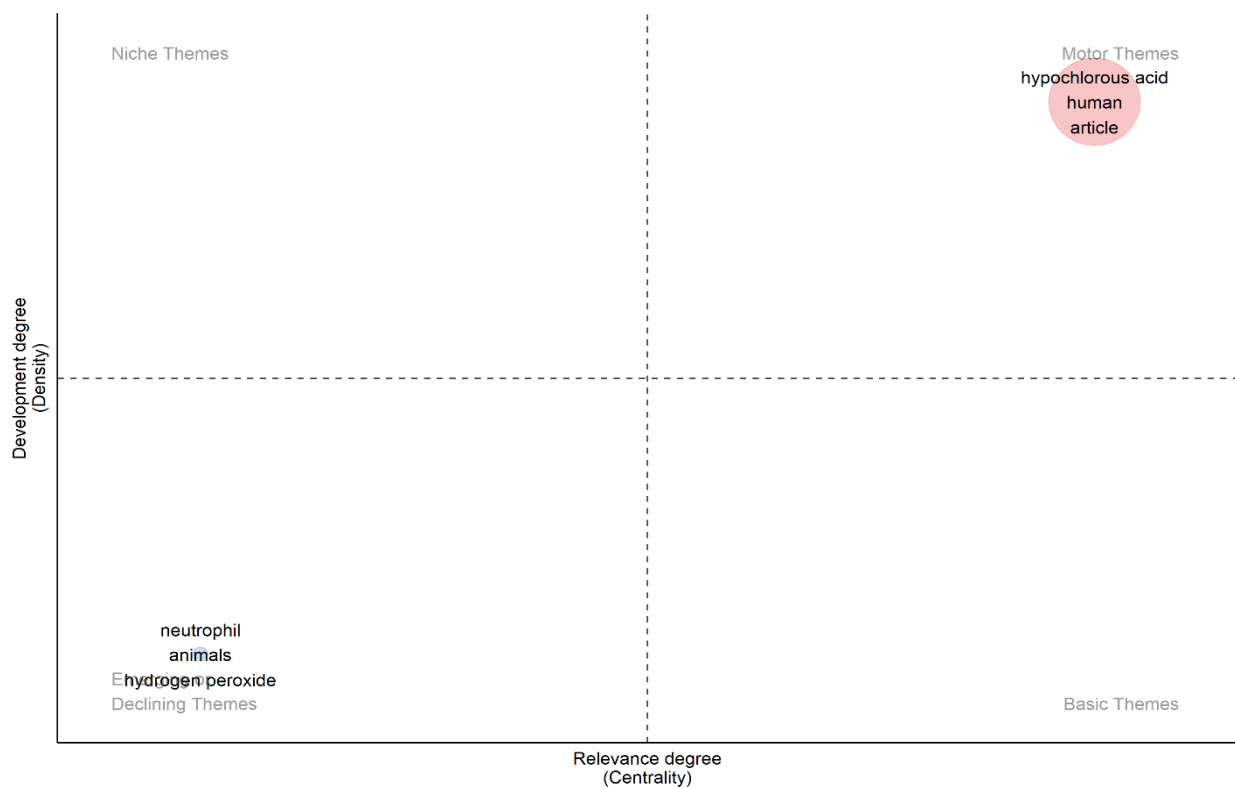


Figure 4. Thematic map

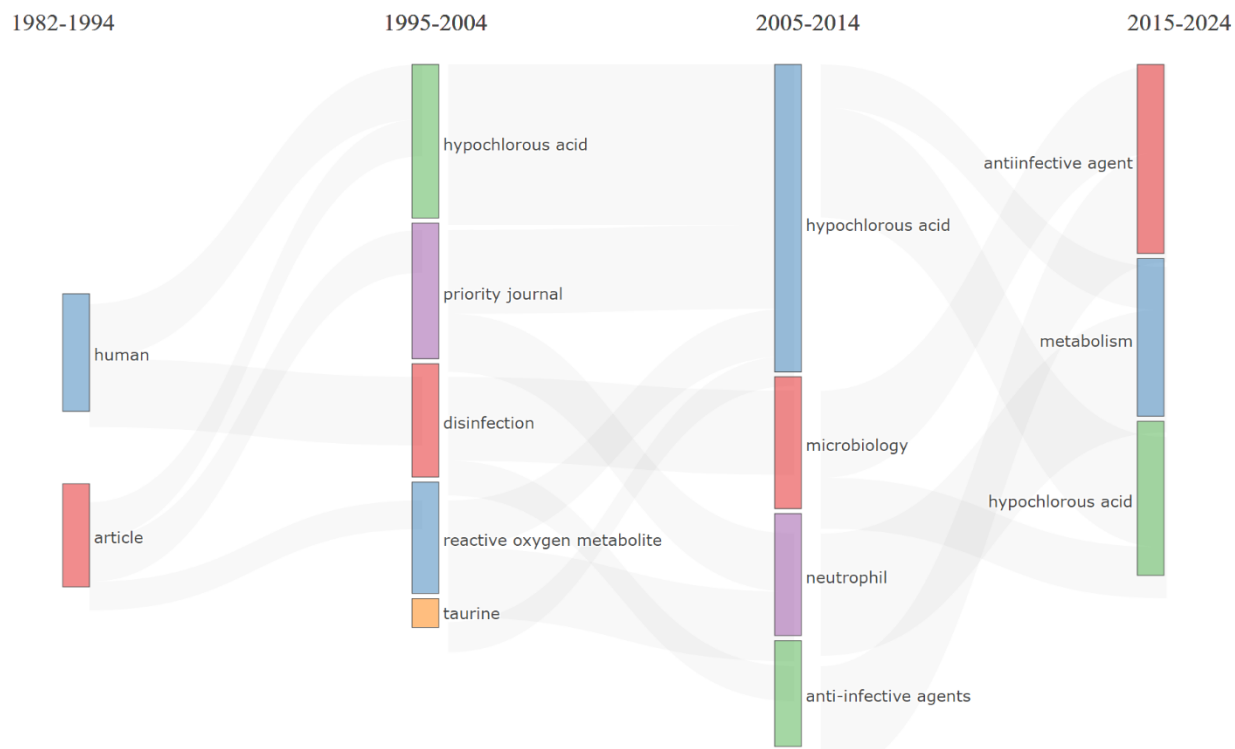


Figure 5. Thematic evolution

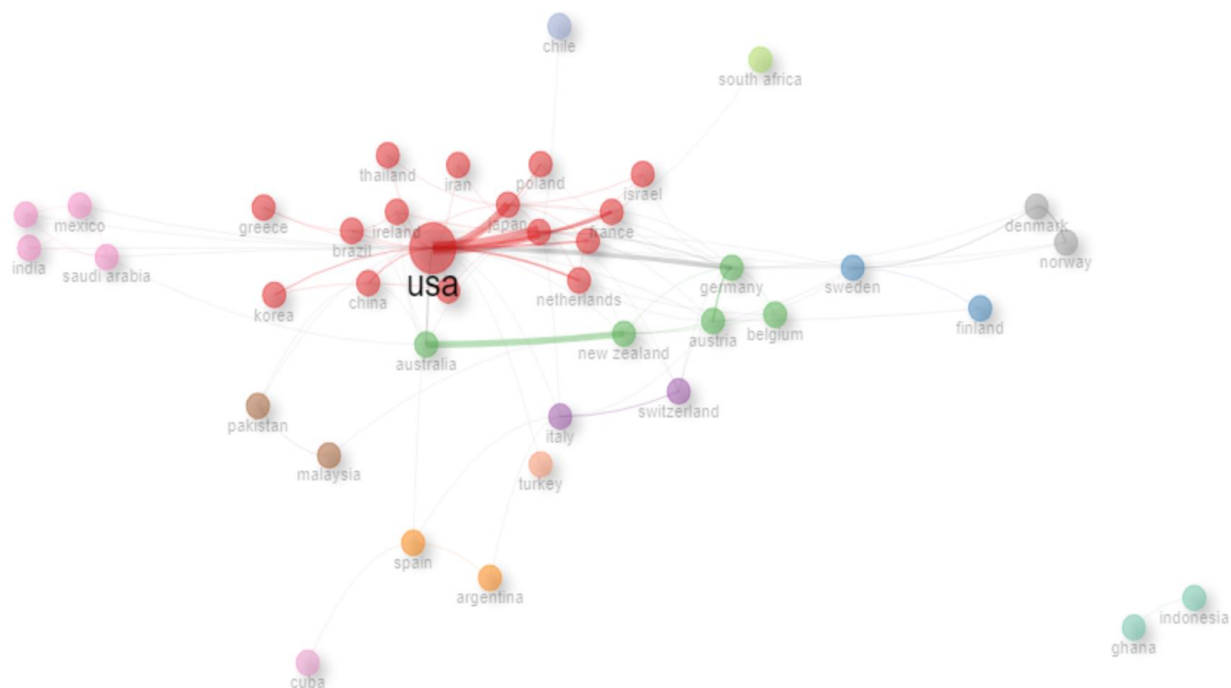


Figure 6. Collaboration network

Discussion and Conclusion

A bibliometric analysis of scientific literature on the use of HOCl in infections from 1982 to 2024 demonstrated an average annual increase in scientific production of approximately 6%, with 32 articles published up to October 2024. Among the 574 documents published during this period, 74% were original research articles, highlighting the novel contributions to this field of study. About one-fifth of all published documents come from a select group of highly ranked journals with an impact factor above 2, specializing in infection, microbiology, and immunology, as well as HOCl. Journals focused on infections saw a significant rise in the number of publications related to HOCl between 2012 and 2024, indicating growing scientific interest in neutrophils as part of a multidisciplinary approach to infection management.

The global distribution of scientific publications spans all continents, reflecting the widespread incidence of infections. Major hubs for scientific production include North America (USA, Canada, Mexico), Europe (Germany, Italy, UK, Spain), and Asia (China, India, South Korea). The USA, Canada, the UK, and China not only produce a large volume of scientific output but also maintain effective, focused collaborative networks. In contrast, continental European countries sustain high productivity and tend to foster collaboration at the European level. Scandinavian countries exhibit their own distinct collaborative networks. Other nations, such as Turkey, India, and South Korea, achieve high productivity through a more dispersed, national-level collaboration approach.

Notable academic institutions contributing to this body of research include those in North America (e.g., Washington State University, Louisiana State University Health Sciences Center, University of Iowa), Europe (e.g., Freie Universität Berlin, University of Copenhagen), and New Zealand (University of Otago Christchurch).

A limitation of this analysis is that collaboration is measured through a simple co-authorship proxy, which may not fully capture the dynamics of active scientific networks or the scientific impact of the published work. Additionally, the search strategy was designed to balance comprehensiveness and usability, which meant limiting the inclusion of broader keywords (such as "infection" or "use") to reduce potential background noise.

Some of the most cited publications between 2000 and 2024 are directly focused on infection. Articles by Carr, Evans, Knight et al (Vitamin C and Immune Function, Micronutrients: Oxidant/Antioxidant Status and Review: Free Radicals, Antioxidants, and the Immune System) addressed the use of hypochlorous acid in infections (Knight, 2000; Evans and Halliwell, 2001; Carr and Maggini, 2017). Similarly, Jaeschke 'Mechanisms of Liver Injury. II. Mechanisms of neutrophil-induced liver cell injury during hepatic ischemia-reperfusion and other acute inflammatory conditions' showed that it is possible to prevent infections by HOCl production in neutrophils (Jaeschke, 2005). Winterbourn & Kettle 'Redox Reactions and Microbial Killing in The Neutrophil Phagosome. Antioxidants & Redox Signaling' found, in line with previous researchers, that neutrophils rapidly kill most ingested microorganisms by a myeloperoxidase-dependent mechanism that is almost certainly HOCl-dependent (Winterbourn and Kettle, 2013). In his study "Modern Technologies for Improving Cleaning and Disinfection of Environmental Surfaces in Hospitals," Boyce highlighted that hydrogen peroxide-based liquid disinfectants, as well as combination products containing peracetic acid and hydrogen peroxide, are effective alternatives to commonly used disinfectants. He also pointed out that electrolyzed water (hypochlorous acid) and cold atmospheric pressure plasma show promising potential for use in hospital settings (Boyce, 2016). HOCl is used in general cleaning and disinfection processes in the agricultural sector, food sector, medical sector (Park et al., 2007; Stroman et al., 2017). If HOCl is applied by fogging method, it is antibacterial and antiviral (Zhao et al., 2014). Due to the fact that HOCl is cheaper than other disinfectants and has a wide range of antimicrobial effects, different, especially medical uses have increased and diversified. One of the most important reasons for its widespread use is that HOCl can also be produced by the human defense system. Therefore, it can be said to be more natural when other cleaning and antimicrobial agents are considered (Ateş, 2020). The major limitation of the study is linked to its very nature. Bibliometric analysis provides quantitative

information with very high or low predictive potential. The quality of the data may be biased due to the lack of standardization of the elements investigated, such as their links. The use of only documents from the Scopus database is insufficient to present the current work on infection and all global research activities related to HOCl. Additionally, quantitative data, particularly citation counts, can be influenced by the number of years during which publications have had the opportunity to accumulate references. Furthermore, many studies may include updates and multiple publications, report different endpoints, or vary in their follow-up durations.

The research objectives surrounding the use of HOCl have evolved over time, reflecting the global progress in combating infections. Infection management today is based on a multidisciplinary approach that integrates various therapies, including systemic and targeted agents, as well as surgery. Over the years, the primary focus of infection specialists has shifted, incorporating factors such as safety, health-related quality of life, the sustainability of therapies, and their combination with systemic treatments, in addition to overall efficacy, effectiveness, and treatment outcomes. The data presented here offers a unique perspective on the diverse role of HOCl in infection prevention, emphasizing that technological advancements and clinical management must evolve together in a process of continuous growth and optimization.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Author contributions

Authorsolely responsible for the entire work.

References

- Aguillo IF., 2012. Is Google Scholar useful for bibliometrics? A webometric analysis. *Scientometrics*, 91(2): 343-351.
- Ateş FM., 2020. Water, salt, hypochlorous acid and protection from infections. *Bayburt University Journal of Science*, 3(2): 154-160.
- Bar-Ilan J., 2010. Citations to the “Introduction to informetrics” indexed by WOS, Scopus and Google Scholar. *Scientometrics*, 82(3): 495-506.
- Barker J, Vipond IB, Bloomfield SF., 2004. Effects of cleaning and disinfection in reducing the spread of Norovirus contamination via environmental surfaces. *Journal of Hospital Infection*, 58(1): 42-49.
- Baas J, Schotten M, Plume A, Côté G, Karimi R., 2020. Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies. *Quantitative*

Science Studies, 1(1): 377-386.

Boyce JM., 2016. Modern technologies for improving cleaning and disinfection of environmental surfaces in hospitals. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 5: 1-10.

Carr AC, Maggini S., 2017. Vitamin C and immune function. *Nutrients*, 9(11): 1211.

De Larco JE, Wuertz BR, Furcht LT., 2004. The potential role of neutrophils in promoting the metastatic phenotype of tumors releasing interleukin-8. *Clinical Cancer Research*, 10(15): 4895-4900.

El-Benna J, Dang PMC, Gougerot-Pocidalo MA., 2008. Priming of the neutrophil NADPH oxidase activation: role of p47phox phosphorylation and NOX2 mobilization to the plasma membrane. In *Seminars in Immunopathology*, 30(3): 279-289. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Evans P, Halliwell B., 2001. Micronutrients: oxidant/antioxidant status. *British Journal of Nutrition*, 85(S2): S67-S74.

García-Pérez MA., 2010. Accuracy and completeness of publication and citation records in the Web of Science, PsycINFO, and Google Scholar: A case study for the computation of h indices in psychology. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 61(10): 2070-2085.

Jacsò P., 2010. Pragmatic issues in calculating and comparing the quantity and quality of research through rating and ranking of researchers based on peer reviews and bibliometric indicators from Web of Science, Scopus and Google Scholar. *Online Information Review*, 34(6): 972-982.

Jaeschke H., 2006. Mechanisms of liver injury. II. Mechanisms of neutrophil-induced liver cell injury during hepatic ischemia-reperfusion and other acute inflammatory conditions. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, 290(6): G1083-G1088.

Kettle AJ, Winterbourn CC., 1997. Myeloperoxidase: A key regulator of neutrophil oxidant production. *Redox Report*, 3(1): 3-15.

Knight JA., 2000. Free radicals, antioxidants, and the immune system. *Annals of Clinical & Laboratory Science*, 30(2): 145-158.

Külekcı G., 2005. Principles of use of chlorinating disinfectants under what conditions and for what purposes are they used? What are its derivatives? 4th National Sterilization Disinfection Congress, 207-219.

Li J, Burnham JF, Lemley T, Britton RM., 2010. Citation analysis: Comparison of Web of Science®, Scopus™, SciFinder®, and Google Scholar. *Journal of Electronic Resources in Medical Libraries*, 7(3): 196-217.

Mongeon P, Paul-Hus A., 2016. The journal coverage of Web of Science and Scopus: A comparative analysis. *Scientometrics*, 106: 213-228.

Park GW, Boston DM, Kase JA, Sampson MN, Sobsey MD., 2007. Evaluation of liquid- and fog-based application of Sterilox hypochlorous acid solution for surface inactivation of human norovirus. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(14): 4463-4468.

Schuller-Levis GB, Park E., 2003. Taurine: new implications for an old amino acid. *FEMS Microbiology Letters*, 226(2): 195-202.

Stroman DW, Mintun K, Epstein AB, Brimer CM, Patel CR, Branch JD, Najafi-Tagol K., 2017. Reduction in bacterial load using hypochlorous acid hygiene solution on ocular skin. *Clinical Ophthalmology*, 707-714.

Wang L, Bassiri M, Najafi R, Najafi K, Yang J, Khosrovi B, Robson MC., 2007. Hypochlorous acid as a potential wound care agent: part I. Stabilized hypochlorous acid: a component of the inorganic armamentarium of innate immunity. *Journal of Burns and Wounds*, 6.

Winter J, Ilbert M, Graf PCF, Özcelik D, Jakob U., 2008. Bleach activates a redox-regulated chaperone by oxidative protein unfolding. *Cell*, 135(4): 691-701.

Winterbourn CC, Kettle AJ., 2013. Redox reactions and microbial killing in the neutrophil phagosome. *Antioxidants & Redox Signaling*, 18(6): 642-660.

Zhao Y, Xin H, Zhao D, Zheng W, Tian W, Ma H, Soupir M., 2014. Free chlorine loss during spraying of membraneless acidic electrolyzed water and its antimicrobial effect on airborne bacteria from poultry house. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 21(2): 249-225.

Zinc Finger Proteins in Colorectal and Breast Cancer: Diagnostic, Prognostic, and Therapeutic Approaches with a Current Literature Review

Seda BEYAZI^{1*}, Abdullah JM AKMAKJI², Ayşenur BÜYÜKSUNGUR³, İrem Nur GÖZEL⁴, Ali AR ALABEDİ⁵, Abdullah ASLAN⁶

^{1*,2,3,4,5,6} Fırat University, Department of Biology, Molecular Biology and Genetic Program, Elazığ, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0003-0436-8112>

²<https://orcid.org/0000-0002-8223-7743>

³<https://orcid.org/0009-0003-2510-8683>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-3661-7753>

⁵<https://orcid.org/0009-0001-5807-7102>

⁶<https://orcid.org/0000-0002-6243-4221>

*Corresponding author: sbeyaz@firat.edu.tr

Review Article

Article History:

Received: 12.07.2025

Accepted: 13.08.2025

Available online: 12.09.2025

Keywords:

Breast cancer

Colorectal cancer

Gene regulation

Therapeutic targets

Zinc finger protein (ZFPs)

ABSTRACT

Cancer is one of the leading causes of death worldwide and poses a significant burden on healthcare systems. ZFPs play crucial roles in regulating gene expression and are involved in key processes in cancer biology. This study examines the molecular functions of ZFPs in colorectal and breast cancers and their potential as therapeutic targets. In colorectal cancer, ZFP36 acts as a tumor suppressor, while ZFPs such as ZNF143, ZNF460, ZNF677, ZNF281, and ZNF384 regulate processes such as cell proliferation, metastasis, epithelial-mesenchymal transition (EMT), and drug resistance. In breast cancer, ZFPs like ZEB1, ZNF703, and ZBTB33 are directly associated with tumor progression, treatment resistance, and poor prognosis. Clinical and experimental data indicate that these proteins are considered crucial biomarkers and targets in diagnostic and therapeutic strategies. The functional and structural diversity of ZFPs deepens the molecular understanding of cancer and provides a strong foundation for personalized medical approaches.

Kolorektal ve Meme Kanserlerinde Çinko Parmak Proteinleri: Tanısal, Prognostik ve Terapötik Yaklaşımlar ile Güncel Literatür Taraması

Derleme

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 12.07.2025

Kabul tarihi: 13.08.2025

Online Yayınlanma: 12.09.2025

Anahtar Kelimeler:

Meme kanseri

Kolorektal kanser

Gen düzenlenmesi

Terapötik hedefler

Çinko parmak proteinleri (ZFP'ler)

ÖZ

Kanser, dünya genelinde en önemli ölüm nedenlerinden biri olmakta ve sağlık sistemleri üzerinde ciddi bir yük oluşturmaktadır. ZFP'ler, gen ekspresyonunun düzenlenmesinde görev almakta ve kanser biyolojisinde temel roller üstlenmektedir. Bu çalışma, ZFP'lerin kolorektal ve meme kanserlerindeki moleküler işlevlerini ve terapötik hedef olarak taşıdıkları potansiyeli incelemektedir. Kolorektal kanserde ZFP36 tümör baskılayıcı olarak görev yapmaktadır; ZNF143, ZNF460, ZNF677, ZNF281 ve ZNF384 gibi ZFP'ler ise hücre proliferasyonu, metastaz, epitel-mezenkimal geçiş (EMT) ve ilaç direnci süreçlerini düzenlemektedir. Meme kanserinde ZEB1, ZNF703 ve ZBTB33 gibi ZFP'lerin tümör ilerlemesi, tedavi direnci ve kötü prognoz ile doğrudan ilişkili olduğu gösterilmektedir. Klinik ve deneysel veriler, bu proteinlerin tanı ve tedavi stratejilerinde belirleyici biyobelirteçler ve hedefler olarak değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. ZFP'lerin fonksiyonel ve yapısal çeşitliliği, kanserin moleküler düzeyde anlaşılmasını derinleştirmekte ve kişiselleştirilmiş tıbbi yaklaşımlar için güçlü bir temel sunmaktadır.

Introduction

Worldwide, cancer continues to be a major cause of mortality across nations, regardless of their economic status (Figures 1, 2). In addition to the existing health burden, a significant increase in cancer cases is expected due to population growth and aging. Moreover, the widespread adoption of lifestyle factors that increase cancer risk further accelerates this rise. Low and middle-income countries (LMICs) are particularly affected by this trend due to economic transformations. Factors such as increased mechanization in transportation and labor, shifts in women's social and financial roles, and greater access to international markets are changing lifestyles and fostering the spread of cancer risk factors. As a result, risk factors more commonly observed in high-income countries (HICs), including tobacco use, physical inactivity, overweight, and reproductive behaviors, are becoming increasingly prevalent in LMICs, contributing to a growing cancer burden in these regions. This situation poses a significant global health challenge, underscoring the need to develop preventive strategies that account for these diverse economic and social contexts (Torre et al., 2016).

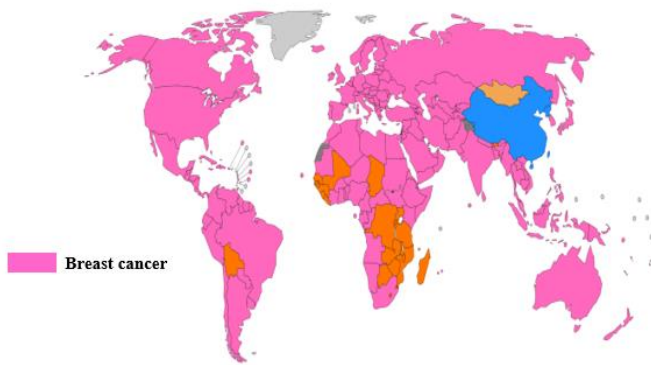


Figure 1. Most common cancer site by country in females in 2022, with absolute case numbers and incidence rates (Globocan, 2022)

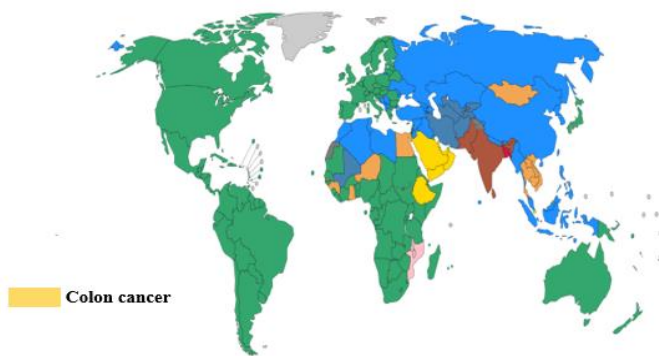


Figure 2. Most common cancer site by country in females in 2022, with absolute case numbers and incidence rates (Globocan, 2022)

Zinc finger proteins (ZFPs) are recognized as the largest and most diverse family of transcription factors, accounting for approximately 5% of the human genome (Figure 3). ZFPs comprise a broad and heterogeneous group of proteins characterized by zinc-coordinated finger-like (ZnF) domains that enable DNA binding and play critical roles in numerous biological processes. These proteins possess the capacity to interact with DNA, RNA, poly-ADP-ribose, proteins, and lipids. Functioning as multifunctional proteins that facilitate DNA binding and gene regulation, ZFPs are crucial regulators of fundamental cellular processes such as development, differentiation, metabolic homeostasis, and programmed cell death (Ye et al., 2019; Hong et al., 2023). Numerous cellular processes, including transcriptional control, chromatin remodeling, proteostasis, cellular signaling, proliferation, and differentiation, are mediated by the more than 30 different types of ZFPs that have been identified to date (Cassandri et al., 2017; Singh and Van Attikum, 2021). Increasing research highlights the crucial role of zinc finger proteins (ZFPs) in cancer, affecting various phases, including tumor initiation, growth, and metastasis. Aberrations in intracellular signaling pathways, a hallmark of cancer, are frequently driven or modulated by ZFPs, thereby contributing to tumorigenesis (Ye et al., 2019; Hong et al., 2023).

The present study aims to elucidate the specific functions of ZFPs within colorectal and breast cancer pathophysiology and to evaluate their promise as viable molecular targets for the development of innovative, targeted cancer therapies.

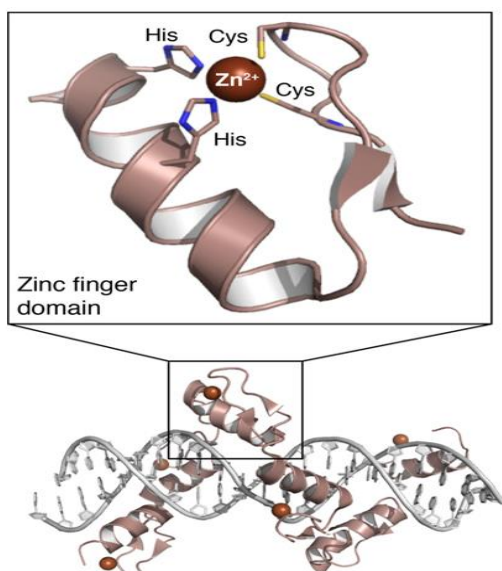


Figure 3. Structure of zinc finger proteins (Gersbach et al., 2014)

The Role of Zinc Finger Proteins in Colon Cancer: Diagnosis, Prognosis, and Therapeutic Potential

Colorectal Cancer

Colorectal cancer represents a major worldwide public health issue, comprising about 10% of all cancer cases and deaths annually. It ranks as the third most frequent cancer among men and the second among women. Epidemiological data indicate that women experience roughly 25% lower rates of incidence and mortality than men. Geographically, these rates vary, with industrialized nations often showing the highest incidence and fatality rates. Lifestyle-related risk factors like smoking, obesity, lack of physical activity, food choices in high-income countries, and an aging population are linked to the increased prevalence of colorectal cancer. Treatment options for both localized and advanced-stage colorectal cancer have expanded due to a better understanding of the disease's pathogenesis, allowing for more individualized therapeutic approaches (Figure 4). Palliative chemotherapy, targeted therapies, immunotherapies, extensive surgical procedures for locoregional and metastatic disease, endoscopic and surgical local resection, preoperative radiotherapy, and systemic neoadjuvant treatments are some of the current treatment approaches (Dekker et al., 2019). Furthermore, colon cancer's prognosis is greatly impacted by distant metastases, which primarily target the liver. Colorectal liver metastases account for almost half of colorectal cancer patients' deaths (Tinguely et al., 2020).

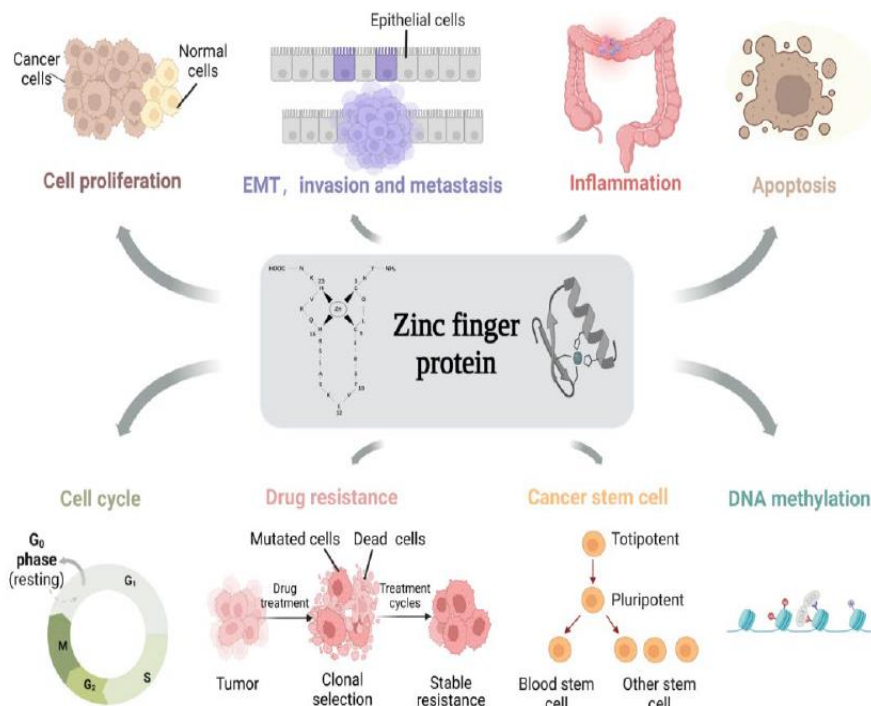


Figure 4. The role of ZFPs in shaping cellular processes in the pathogenesis of colorectal cancer (Liu et al., 2022)

Diagnosis and Prognosis of Colorectal Cancer

Computed Tomography Colography (CT) is a non-invasive imaging technique that creates high-resolution images of the colon using CT scanners and specific software. Despite being more convenient and comfortable for patients than colonoscopy, tissue collection is not feasible; hence, colonoscopy is still necessary to confirm worrisome lesions. Because they are non-invasive, blood-based biomarkers like carcinoembryonic antigen (CEA) and carbohydrate antigen 19-9 (CA19-9) are frequently employed in clinical practice. Their specificity is constrained, though, as levels may also rise in other medical disorders, and their sensitivity falls between 40 and 60%. Consequently, a sizable fraction of patients with colorectal cancer might be incorrectly classified, which would decrease the efficacy of screening initiatives (Serras et al., 2024).

Particularly in detecting distant metastases, diagnostic sensitivity and specificity in colorectal cancer patients can be significantly improved by combining CEA levels with microRNA-141 (miR-141), as demonstrated by research aiming to overcome current diagnostic limitations (Cheng et al., 2011). One common first-line diagnostic method in colorectal cancer screening programs is the fecal occult blood test (FOBT). It can lower mortality rates by 15% to 33% and is crucial in identifying high-risk individuals, even if it

does not directly diagnose colorectal cancer. Despite the possibility of false positives brought on by outside variables, including diet, exercise, and some medications, FOBT is nevertheless a practical, affordable, and non-invasive technique that is favored in extensive screening initiatives. According to conventional FOBTs, fecal immunochemical assays (FIT) have a better sensitivity. They are instrumental in early-stage screening because they can identify a greater percentage of individuals with colorectal cancer sooner due to their capacity to detect microscopic bleeding from lesions in the gastrointestinal region selectively. FIT tests, however, are not very sensitive in identifying advanced adenomas and stage I colorectal cancer. Furthermore, storage and shipping circumstances can cause the antibodies employed in FIT to become unstable, which could result in false-negative results and lower the screening's overall dependability. The use of DNA-based analysis in feces samples has enabled the detection of genetic and epigenetic changes released by tumor cells in recent years. This method has shown promise as a diagnostic tool for colorectal cancer detection that is more sensitive and specific (Cao et al., 2024).

Zinc Finger Protein-36 (ZFP36/TTP): The Regulatory Role of Tristetraprolin in Colorectal Cancer

Controlling post-transcriptional gene expression requires the well-characterized RNA-binding protein tristetraprolin (TTP), commonly referred to as ZFP36, NUP475, G0/G1 switch regulatory protein 24 (GOS24), and TPA-inducible sequence 11 (TIS11) (Shukla et al., 2017). The gene encoding TTP is mapped to chromosome 19q13.2 and comprises two exons separated by a single intron. It transcribes a 1.7-kilobase mRNA that translates into a protein with an approximate molecular mass of 34 kDa (Guo et al., 2017). Structurally, TTP harbors three proline-rich regions and two highly conserved tandem CCCH-type zinc finger (TZF) motifs defined by the CX₈CX₃CX₃H consensus sequence. Additionally, the protein contains multiple phosphorylation sites located on serine and threonine residues, notably at positions S88, S186, S66, T92, S169, S228, and S197, which are implicated in the modulation of its biological activity (Lai et al., 2019). ZFP36 is identified as a tumor suppressor whose expression is reduced during colorectal cancer progression, and it functions by regulating mRNA stability. Re-expression of ZFP36 suppresses epithelial-mesenchymal transition (EMT) and increases the sensitivity of cells to anoikis. Additionally, ZFP36 has been shown to inhibit the expression of three key transcription factors involved in the EMT process: ZEB1, MACC1, and SOX9. Furthermore, ZFP36 expression is negatively correlated with the Wnt/ β -catenin signaling pathway, which is frequently activated in colorectal cancer. EMT is

facilitated by decreased ZFP36 expression, while it is suppressed by re-expression of ZFP36. ZFP36's capacity to suppress the expression of oncogenic transcription factors implicated in EMT, including SOX9, MACC1, and ZEB1, is linked to this antitumor impact. Interestingly, ZFP36 had not been found to directly target SOX9. According to recent research, ZFP36 reduces the stability of SOX9 mRNA, which lowers the transcription factor's levels and aids in the prevention of EMT. These findings offer a significant molecular framework for understanding how ZFP36 exerts its tumor-suppressive functions (Montorsi et al., 2016)

Zinc Finger Protein-143 (ZNF143): A Transcriptional Regulator of Cell Proliferation and DNA Replication

One transcription factor that is essential to the advancement of the cell cycle is zinc finger protein-143 (ZNF143). A new inhibitor that targets ZNF143, YPC-21661, promotes apoptosis by halting the cell cycle during the G2/M phase, hence exerting lethal effects on cancer cells. This is in contrast to small compounds that block the transcriptional activity of E2F or c-Myc, which arrest the cell cycle in the G0/G1 phase. In colorectal cancer cells, YPC-21661 downregulates the expression of ZNF143 target genes by preventing its binding to DNA. It is also known that ZNF143 can bind to cisplatin-modified DNA, and this interaction contributes to the development of cisplatin resistance. Accordingly, the suppressive effect of YPC-21661 on ZNF143 has been reported to enhance the therapeutic efficacy of cisplatin. This study identifies YPC-21661 as the first ZNF143 inhibitor to exhibit anticancer activity both *in vitro* and *in vivo*, suggesting its potential as a therapeutic agent in colorectal cancer treatment. Additionally, silencing ZNF143 suppresses IL-8 expression, while activation of the IL-8–CXCR axis promotes colorectal cancer progression (Lan et al., 2025)

Zinc Finger E-box Binding Homeobox Transcription Factors 1/2 (ZEB1/ZEB2): Critical Roles in the Epithelial-Mesenchymal Transition (EMT) Process

The epithelial-mesenchymal transition (EMT), in which epithelial cells go through several molecular alterations and take on mesenchymal traits, is mostly regulated by zinc finger E-box-binding homeobox 1 (ZEB1) (Poonaki et al., 2022). ZEB1 has been identified as a central gene in the EMT process across various tumor types, including lung, breast, cervical, and prostate cancers (Savci-Heijink et al., 2019). The lncRNA ZFAS1/miR200b/ZEB1 protein axis may control EMT in colorectal adenocarcinoma, according to a prior study. However, its potential as a non-invasive diagnostic biomarker for colorectal cancer in its early stages has not yet been thoroughly investigated (O'Brien et al., 2021).

ZEB2 is thought to primarily function during embryogenesis and promote EMT and metastasis in various cancer types (Katsura et al., 2017). But an increasing amount of data indicates that ZEB2 plays new roles in both healthy and malignant adult tissues, upending the conventional wisdom that sees ZEB2 only as an oncoprotein that promotes metastases. Both ZEB1 and ZEB2 play critical roles in the metastasis process, which is the leading cause of cancer-related mortality. Many human malignancies exhibit unusually high levels of ZEB1 expression. ZEB1 is impacted by extracellular signals released into the tumor microenvironment, such as TGF- β , FGF, EGF, HGF, Wnt, Notch, and Hedgehog, and it also promotes metastatic processes, including cell migration and invasion. Moreover, by activating EMT helps regulate several signaling pathways, including MAPK, PI3K, NF- κ B, Wnt/ β -catenin, and Notch. The loss of E-cadherin, a protein involved in intercellular adhesion, as a result of transcription factors directly suppressing the CDH1 gene, is one of the defining events of EMT. ZEB1 and ZEB2 are two of these variables that are especially significant (Caramel et al., 2017). Both ZEB1 and ZEB2 regulate their target genes by binding to E-box motifs in promoter regions. For example, both ZEB factors are known to suppress the expression of E-cadherin, P-cadherin, and gap junction proteins such as connexin 26 (GJB2) and connexin 31 (GJB3) (Parfenyev et al., 2025).

Recent Studies on the Role and Clinical Relevance of Zinc Finger Proteins in Colorectal Cancer

Hao et al. (2021) employed bioinformatic strategies to investigate ZNF460 expression, revealing its upregulation at both transcriptomic and proteomic levels. Elevated ZNF460 levels were statistically correlated with deeper tumor infiltration, regional lymphatic dissemination, distant organ metastasis, and increased circulating CA19-9 concentrations (all $P < 0.05$). The study established that ZNF460 overexpression is predictive of unfavorable clinical outcomes, showing a significant association with reduced overall survival (OS) and relapse-free survival (RFS). Multivariate statistical assessments confirmed that ZNF460 acts as an independent prognostic indicator for both OS (HR = 1.636; 95% CI: 1.028–2.603; $P = 0.038$) and RFS (HR = 2.215; 95% CI: 1.227–3.997; $P = 0.008$). Functional assays demonstrated that silencing ZNF460 diminished the invasive and metastatic behavior of colon cancer cells. Mechanistic exploration indicated that ZNF460 facilitates tumor progression by activating the JAK2/STAT3 axis. Altogether, these insights underscore the oncogenic role of ZNF460 in colorectal cancer and propose it as a candidate for targeted therapy development.

Siraj et al. (2021) used immunohistochemistry to examine ZNF677 protein expression in a sizable cohort of 1,158 individuals with colorectal cancer. In contrast to normal tissues (5.1%, 11/214; $p < 0.0001$), they found that ZNF677 loss was substantially more prevalent in CRC tissues (45.3%, 525/1158). Mucinous histology ($p = 0.0311$), advanced clinical stage ($p < 0.0001$), and lymph node (LN) metastases ($p = 0.0374$) were all substantially correlated with this reduction of expression. Additional analysis showed that, in comparison to the entire population, ZNF677 loss was significantly higher in CRC cases with LN metastases ($p = 0.0258$). ZNF677 loss was an independent predictor of lymph node metastasis in colorectal cancer (CRC) (odds ratio = 1.41; 95% CI: 1.05–1.87; $p = 0.0203$), according to multivariate logistic regression analysis. In CRC cell lines, functional gain-and loss-of-function tests showed that whilst ZNF677 overexpression restored these effects, decreased ZNF677 expression markedly boosted cell proliferation, EMT, and chemoresistance. Consequently, the authors suggested that ZNF677 be taken into account as a possible target for tailored treatment approaches in addition to being a predictive biomarker.

Qin et al. (2019) revealed that ZNF281 expression at both mRNA and protein levels was markedly upregulated in colorectal carcinoma tissues in comparison to adjacent non-cancerous colonic tissues. This overexpression was significantly correlated with poor cellular differentiation and more aggressive disease features, including advanced T and N categories and elevated TNM staging. Based on these correlations, the authors proposed that ZNF281 may act as an independent prognostic factor in colorectal cancer patients. Functional analyses further demonstrated that silencing ZNF281 expression resulted in a pronounced decline in tumor cell proliferation, motility, and invasive capacity, which was primarily mediated through the downregulation of the Wnt/ β -catenin signaling pathway. According to Yan et al. (2022), colorectal cancer samples had significantly higher levels of the transcription factor ZNF384, which belongs to the zinc finger protein family, and this was linked to a worse prognosis. Notably, ZNF384 inhibition prevented the development of CRC cells, while overexpression enhanced their capacity for invasion and migration. Additionally, they showed that ZNF384 controls Matrix Metalloproteinase-2 (MMP2) expression. ZNF384-mediated invasion and migration were inhibited by MMP2 inhibition, although the inhibitory effects of ZNF384 knockdown were reversed by MMP2 overexpression. Additionally, MMP2 and Hypoxia-Inducible Factor-1 α (HIF-1 α), a transcription factor that is increased in hypoxic environments, showed favorable correlations with ZNF384 expression levels in human colorectal cancer samples.

The Role of Zinc Finger Proteins in Breast Cancer: Diagnosis, Prognosis, and Therapeutic Potential

Diagnosis and Prognosis of Breast Cancer

Breast cancer is one of the most significant threats to women's health. Although diagnostic and treatment methods have made some progress, the pathogenic factors of breast cancer, like other cancers, remain unclear (Akyolcu et al., 2019). Despite many causes, the exact etiology is not yet determined, leading to variations in diagnosis and treatment approaches. Over 1.2 million cases are diagnosed worldwide each year, affecting 10-12% of the female population (Benson et al., 2009). Advanced age and female gender are among the most common risk factors. Genetic mutations, particularly in BRCA-1 and BRCA-2, account for approximately 10% of breast cancers (Watkins, 2019).

Diagnostic imaging methods such as mammography, magnetic resonance imaging (MRI), and ultrasonography play a significant role in breast cancer diagnosis. Mammography is widely used for detecting early-stage cancers and is particularly recommended for specific age groups. Digital mammography and computer-aided detection systems are improving diagnostic accuracy. MRI provides high-resolution imaging without using ionizing radiation and is preferred in patients with a genetic predisposition or cases with ambiguous findings. Ultrasonography determines the size and location of intramammary masses but has limitations in differentiating benign from malignant lesions, while biopsy guidance reduces unnecessary invasive procedures. Definitive diagnosis is established through fine-needle aspiration and core needle biopsy; vacuum-assisted biopsy is enhancing diagnostic precision in uncertain cases. Surgical treatment plays a critical role in tumor excision and staging; breast-conserving surgery involves the removal of the tumor with limited surrounding tissue, whereas mastectomy entails the complete removal of the breast. Sentinel lymph node biopsy is reducing surgical complications. Radiotherapy is generally applied following breast-conserving surgery, targeting tumor cells, and is also used for symptom management in advanced stages. Systemic therapies include chemotherapy, hormone therapy, and targeted therapies. Emerging approaches such as nanotechnology, gene therapy, and immunotherapy are being noted as promising modalities in breast cancer treatment (Kumar, 2021).

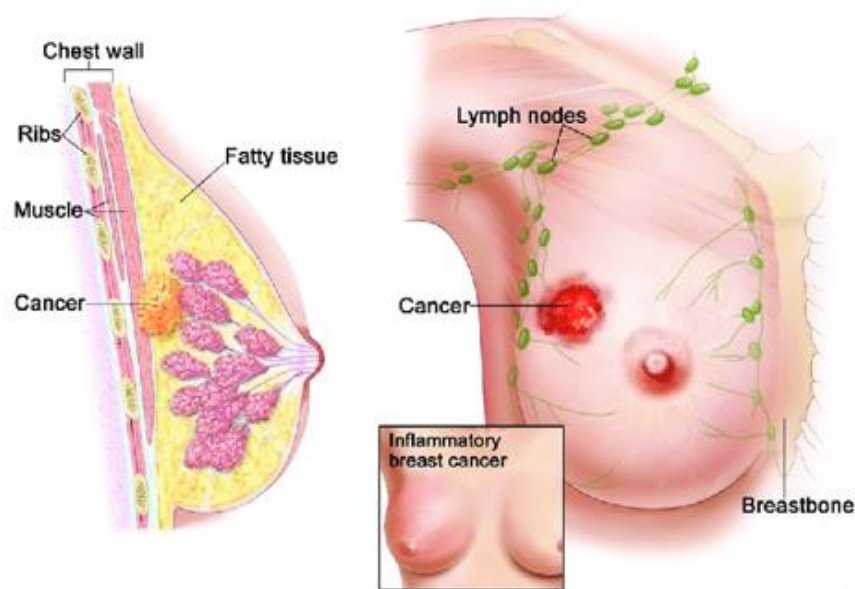


Figure 5. Demonstration of proliferation in breast tumor cells (Kumar, 2021)

Zinc Finger E-Box Binding Homeobox 1/2 (ZEB1): Metastasis in Breast Cancer

One of the most common protein families is zinc finger proteins (ZNFs), which are distinguished by their diverse range of molecular functions. They may attach to a variety of biomolecules, such as DNA, RNA, poly(ADP-ribose) (PAR), and other proteins, thanks to their structural diversity (Cassandri et al., 2017). ZNFs were first identified as repetitive zinc-binding domains with conserved cysteine and histidine residues in the transcription factor IIIA (TFIIIA) of *Xenopus*. Numerous physiological processes, such as membrane association, protein–protein interactions, and nucleic acid recognition, are mediated by these proteins (Laity et al., 2001). In conditions such as laryngeal squamous cell carcinoma, glioma, non-small cell lung cancer, gastric cancer, oral squamous cell carcinoma, gallbladder cancer, and breast cancer, overexpression of ZNF X (ZFX) has been shown to stimulate cell proliferation and metastasis (Jen and Wang, 2016). According to earlier research, several ZNFs participate in transcriptional suppression via corepressors, which alters how different downstream genes are regulated (An, 2022). The process by which epithelial cells turn into mesenchymal-like cells as a result of modifications in the expression levels of important markers like vimentin and E-cadherin is known as the EMT. EMT-inducible transcription factors from the SNAIL, SLUG, TWIST, and ZEB families are the main regulators of EMT (Cho et al., 2019). Zinc finger E-box binding homeobox 1 (ZEB1) is highly linked to aggressive characteristics, metastasis, and poor clinical prognosis in a variety of tumor types, including breast, lung, and pancreatic malignancies, according to data acquired about EMT-inducible transcription

factors. Two zinc finger clusters found in ZEB1 attach to particular DNA sequences called E-box elements (Cho et al., 2019).

ZEB1 is a key initiator of the EMT and a potent regulator of gene expression, influencing both embryonic development and cancer progression. Elevated ZEB1 mRNA levels and EMT-associated phenotypes are frequently observed in patients with triple-negative breast cancer. In addition to driving tumor progression, ZEB1 promotes metastasis in both pancreatic and breast cancers. Notably, ZEB1 has been shown to facilitate bone-specific metastasis of breast cancer by upregulating extracellular antagonists such as chordin-like 1, follistatin, and noggin. These factors inhibit activin ligand signaling and bone morphogenetic proteins, which are members of the TGF β family, thereby creating a microenvironment conducive to metastatic colonization in bone tissue (Maturi et al., 2018).

Zinc Finger Protein-703 (ZNF703): Oncogene in Estrogen Receptor-Positive (ER+) Subtypes

Steroid hormones regulate cell growth and differentiation, affecting normal physiology, reproductive events, and behaviors. Estrogens exert their effects on target tissues through two members of the nuclear receptor superfamily: estrogen receptor- α (ER α) and ER β . ER α is considered an important biological marker for the response of breast cancers to hormone therapy. The shortened isoform ER α -36 has been observed to confer resistance to tamoxifen. Current studies aim to clarify the prognostic and predictive roles of ER β . Existing literature indicates that nuclear wild-type ER β supports ER α in predicting endocrine therapy response and is associated with better overall outcomes and metastatic potential in breast and prostate cancers. The cytoplasmic ER β 2 isoform (also known as ER β cx) is linked to poorer survival rates and metastatic characteristics (Thomas and Gustafsson, 2011). ZNF703 is known to be highly prevalent in breast cancer, identified by genome-wide measurement of DNA copy number using genomic hybridization, alongside ERBB2 and CCND1. ZNF703 expression has been discovered in a subset of triple-negative breast cancers (TNBC), both in human tumor samples and cancer cell lines (Zhang et al., 2022).

Recent studies have demonstrated that inhibition of ZNF703 in breast cancer cells induces apoptosis. Moreover, overexpression of ZNF703 has been shown to modulate downstream signaling of estrogen receptor alpha (ER α), a receptor that, despite being typically absent in triple-negative breast cancer (TNBC), still plays a notable role in this context (Wang et al., 2025).

Zinc Finger and BTB Domain-Containing Protein-33 (ZBTB33-Kaiso): Epigenetic Regulation

ZBTB33 (Kaiso) was initially identified as a transcription factor and is considered a member of the BTB/POZ subgroup of zinc finger proteins. It contains a dual-mode DNA-binding domain that recognizes both sequence-specific consensus regions and methylated CpG nucleotides. Its nuclear function has been found to influence transcriptional programs that promote the development and progression of breast cancer. Subsequent studies revealed that a large portion of the sequence motifs within the nucleus are unmethylated and located in open chromatin regions. Due to its crucial role in transcriptional regulation, ZBTB33 is generally regarded as a nuclear protein. Numerous studies have demonstrated that the atomic localization of ZBTB33 is dynamically regulated through its interaction with p120 (CTNND1) (Singhal et al., 2021).

Studies on the Role and Clinical Associations of Zinc Finger Proteins in Breast Cancer in the Literature

Bassey-Archibong et al. (2016) analyzed breast cancer samples from The Cancer Genome Atlas (TCGA) and Gene Expression Omnibus (GEO) datasets to assess the clinical significance of ZBTB33 expression. Silencing ZBTB33 in breast cancer cell lines such as MDA-MB-231 and Hs578T led to decreased levels of proteins associated with epithelial-mesenchymal transition (EMT) and inhibited the TGF β signaling-induced EMT process. Furthermore, ZBTB33 deficiency reduced the metastatic potential of TNBC cells in mouse models. High expression of ZBTB33 and TGF β R1 in breast cancer patients correlated with poorer overall survival, while overexpression of TGF β R1 in ZBTB33-deficient cells was insufficient to restore metastatic potential. In conclusion, ZBTB33 plays a critical role in TGF β signaling and TNBC metastasis. Using RT-qPCR and western blot analysis, Guo et al. (2021) assessed the expression of MIR-491-5p and ZNF703 in breast cancer tissues and cells. They used Transwell assays to confirm ZNF703's cellular activity and investigated its expression using immunohistochemistry. Western blot analysis was also used to examine protein levels associated with the AKT/mTOR signaling pathways. ZNF703 and MIR-491-5p interacted, as demonstrated by a dual-luciferase reporter experiment. The findings indicated that ZNF703 was significantly expressed in breast cancer, and MIR-491-5p was expressed at low levels; this pattern was linked to a poor prognosis for the patients.

Zhang et al. (2018) reported that breast tumors with elevated ZEB1 expression exhibit a markedly reduced response to chemotherapy. Their findings further revealed a positive

correlation between ZEB1 and the proteins cyclin D1 and Bcl-xL, both of which are key mediators of chemotherapy resistance. In vitro experiments demonstrated that forced overexpression of ZEB1 diminished the sensitivity of breast cancer cells to genotoxic agents such as epirubicin (EPI). Mechanistically, ZEB1 was shown to promote the transcription of ataxia–telangiectasia mutated (ATM) kinase by recruiting a ZEB1/p300/PCAF complex to its promoter, thereby enhancing DNA damage repair via the homologous recombination (HR) pathway. Consistent with these results, ectopic ZEB1 expression reduced the therapeutic efficacy of EPI in vivo, as evidenced by studies using a nude mouse xenograft model. Collectively, these findings underscore the pivotal role of ZEB1 in driving chemotherapy resistance in breast cancer.

Udu-Ituma et al. (2023) developed antisense oligonucleotides (ASO) against ZNF703 mRNA and demonstrated that these downregulated ZNF703 protein expression. ZNF703 inhibition reduced cell proliferation and induced apoptosis; moreover, when used in combination with cisplatin, ASO9 enhanced anticancer effects. They reported that ASO technology holds potential for increasing the number of targetable cancer genes. Singhal et al. (2021) investigated the intracellular distribution of the transcriptional regulator ZBTB33 in breast cancer tumors using quantitative automated imaging and computational methods. Multivariate analyses revealed that the intracellular localization of ZBTB33 uncovered new functional and predictive links among tumor immune microenvironment, survival, ethnic origin, and LC3A/B proteins associated with autophagy. Luo et al. (2020) found significantly increased expression of ZEB1-AS1 in triple-negative breast cancer (TNBC) tissue samples and cell lines by RT-qPCR analyses. Inhibition of ZEB1-AS1 suppressed cell proliferation, migration, and invasion, and also promoted apoptosis. RT-qPCR data showed elevated ZEB1 gene expression in TNBC tissues, and silencing ZEB1 inhibited TNBC progression. Mechanistic analyses demonstrated that ZEB1-AS1 interacts with the ELAVL1 protein to maintain the stability of ZEB1 mRNA. Similarly, ZEB1 binds to ELAVL1, supporting mRNA stability. These findings suggest a critical regulatory role of the ZEB1-AS1/ELAVL1/ZEB1 axis in TNBC pathogenesis.

Conclusion

Zinc finger proteins (ZFPs) are important transcriptional regulators involved in cancer development, progression, and treatment resistance due to their structural and functional diversity. In colorectal and breast cancers, specific ZFPs such as ZFP36, ZNF143, ZEB1/2, ZNF703, and ZBTB33 regulate key oncogenic pathways, including EMT, Wnt/ β -catenin,

JAK/STAT, and DNA damage response. Their altered expression in tumors and association with clinical outcomes like metastasis and drug resistance make them promising biomarkers for diagnosis and prognosis. Novel therapeutic strategies such as small-molecule inhibitors, antisense oligonucleotides, CRISPR/Cas9 gene editing, and epigenetic modulators target ZFPs to improve treatment outcomes. For example, inhibiting ZNF143 may enhance chemotherapy sensitivity, while targeting ZNF703 can reduce tumor cell proliferation. These approaches aim to selectively target cancer cells while minimizing side effects on healthy tissues. However, successful clinical translation requires a deeper understanding of ZFP-related molecular mechanisms and validation in larger patient groups. Integrating genomic, proteomic, and epigenetic data with AI-assisted bioinformatics will help clarify the roles of ZFPs in cancer biology and support the development of personalized therapies.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Authors' Contributions

The authors declare that they have contributed equally to the article.

References

Ajani JA, Barthel JS, Bekaii-Saab T, Bentrem DJ, D'Amico TA, Das P, Denlinger C, Fuchs CS, Gerdes H, Hayman JA, Hazard L, Hofstetter WL, Ilson DH, Keswani RN, Kleinberg LR, Korn M, Meredith K, Mulcahy MF, Orringer MB, Osarogiagbon RU, Posey JA, Sasson AR, Scott WJ, Shibata S, Strong VEM, Washington MK, Willett C, Wood DE, Wright CD, Yang G., 2010. Gastric cancer. *Journal of the National Comprehensive Cancer Network*, 8(4): 378-409.

Akyolcu N, Ozhanlı Y, Kandemir D., 2019. Recent developments in breast cancer. *Journal of Health Science and Profession*, 6(3): 583-594.

An G, Feng L, Hou L, Li X, Bai J, He L, Gu S, Zhao X., 2022. A bioinformatics analysis of zinc finger protein family reveals potential oncogenic biomarkers in breast cancer. *Gene*, 828: 146471.

Bai F, Xiao K., 2020. Prediction of gastric cancer risk: association between ZBTB20 genetic variance and gastric cancer risk in Chinese Han population. *Bioscience Reports*, 40(9): BSR20202102.

Bassey-Archibong BI, Kwiecien JM, Milosavljevic SB, Hallett RM, Rayner LGA, Erb MJ, Crawford-Brown CJ, Stephenson KB, Bedard PA, Hassell JA, Daniel JM., 2016. Kaiso depletion attenuates transforming growth factor- β signaling and metastatic activity of triple-negative breast cancer cells. *Oncogenesis*, 5(3): e208-e208.

Benson JR, Jatoi I, Keisch M, Esteva FJ, Makris A, Jordan VC., 2009. Early breast cancer. *The Lancet*, 373(9673): 1463-1479.

Bluemn EG, Nelson PS., 2012. The androgen/androgen receptor axis in prostate cancer. *Current Opinion in Oncology*, 24(3): 251-257.

Boustani M, Hall KS, Lane KA, Aljadhey H, Gao S, Unverzagt F, Murray MD, Ogunniyi A, Hendrie H., 2007. The association between cognition and histamine-2 receptor antagonists in African Americans. *Journal of the American Geriatrics Society*, 55(8): 1248-1253.

Cao L, Lin G, Fan D, Weng K, Chen Y, Wang J, Li P, Zheng C, Huang C, Xie J., 2024. NUA1K1 activates STAT5/GLI1/SOX2 signaling to enhance cancer cell expansion and drives chemoresistance in gastric cancer. *Cell Reports*, 43(7): 114446.

Cao L, Wang S, Zhang Y, Wong KC, Nakatsu G, Wang X, Wong S, Ji J, Yu J., 2018. Zinc-finger protein 471 suppresses gastric cancer through transcriptionally repressing downstream oncogenic PLS3 and TFAP2A. *Oncogene*, 37(26): 3601-3616.

Cao Q, Tian Y, Deng Z, Yang F, Chen E., 2024. Epigenetic alteration in colorectal cancer: potential diagnostic and prognostic implications. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(6): 3358-3382.

Caramel J, Ligier M, Puisieux A., 2017. Pleiotropic roles for ZEB1 in cancer. *Cancer Research*, 78(1): 30-35.

Cassandri M, Smirnov A, Novelli F, Pitolli C, Agostini M, Malewicz M, Raschella G., 2017. Zinc finger proteins in health and disease. *Cell Death Discovery*, 3(1): 17071.

Chen H, Lu W, Huang C, Ding K, Xia D, Wu Y, Cai M., 2017. Prognostic significance of ZEB1 and ZEB2 in digestive cancers: a cohort-based analysis and secondary analysis. *Oncotarget*, 8(19): 31435.

Chen J, Zhang D, Yan W, Yang D, Shen B., 2013. Translational bioinformatics for diagnostic and prognostic prediction of prostate cancer in the next-generation sequencing era. *BioMed Research International*, 2013(1): 901578.

Cheng H, Zhang L, Cogdell DE, Zheng H, Schetter AJ, Nykter M, Harris CC, Chen K, Hamilton SR, Zhang W., 2011. Circulating plasma MiR-141 is a novel biomarker for metastatic colon cancer and predicts poor prognosis. *PloS One*, 6(3): e17745.

Chiarella E, Aloisio A, Scicchitano S, Bond HM, Mesuraca M., 2021. Regulatory role of microRNAs targeting the transcription co-factor ZNF521 in normal tissues and cancers. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16): 8461-8473.

Cho HJ, Oh N, Park JH, Kim KS, Kim HK, Lee E, Hwang S, Kim SJ, Park KS., 2019. ZEB1 collaborates with ELK3 to repress E-cadherin expression in triple-negative breast cancer cells. *Molecular Cancer Research*, 17(11): 2257-2266.

Dekker E, Tanis PJ, Vleugels JLA, Kasi PM, Wallace MB., 2019. Colorectal cancer. *The Lancet*, 394(10207): 1467-1480.

Del Rizzo PA, Trievel RC., 2011. Substrate and product specificities of SET domain methyltransferases. *Epigenetics*, 6(9): 1059-1067.

Diaz-Riascos ZV, Ginesta MM, Fabregat J, Serrano T, Busquets J, Buscail L, Cordelier P, Vasseur S, Capellá G., 2019. Expression and role of microRNAs from the miR-200 family in the tumor formation and metastatic propensity of pancreatic cancer. *Molecular Therapy - Nucleic Acids*, 17: 491-503.

Drapela S, Bouchal J, Jolly MK, Culig Z, Soucek K., 2020. ZEB1: a critical regulator of cell plasticity, DNA damage response, and therapy resistance. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 7: 36.

Duan P, Li B, Zhou Y, Cao H, Chen S, Xing Y., 2024. ZBTB20 suppresses tumor growth in glioblastoma through activating the TET1/FAS/caspase-3 pathway. *Oncology Letters*, 28(2): 358-367.

Dutta A, Chakraborty A., 2018. Cinnamon in anticancer armamentarium: a molecular approach. *Journal of Toxicology*, 2018(1): 8978731.

Feng J., 2018. Upregulation of microRNA-4262 targets Kaiso (ZBTB33) to inhibit the proliferation and EMT of cervical cancer cells. *Oncology Research*, 26(8): 1215-1225.

Feng Y, Ji D, Huang Y, Ji B, Zhang Y, Li J, Peng W, Zhang C, Zhang D, Sun Y, Xu Z., 2020. TGM3 functions as a tumor suppressor by repressing epithelial to mesenchymal transition and the PI3K/AKT signaling pathway in colorectal cancer. *Oncology Reports*, 43(3): 864-876.

Gersbach CA, Gaj T, Barbas CF III., 2014. Synthetic zinc finger proteins: The advent of targeted gene regulation and genome modification technologies. *Accounts of Chemical Research*, 47(8): 2309-2318.

Globocan., 2022. https://gco.iarc.fr/today/en/dataviz/bars-compare-populations?mode=cancer&cancers=8&group_populations=1&populations=900&types=0_1&sort_by=value1. 09.07.2025.

Guo J, Luo C, Yang Y, Dong J, Guo Z, Yang J, Lian H, Ye G, Liu M., 2021. MiR-491-5p, as a tumor suppressor, prevents migration and invasion of breast cancer by targeting ZNF-703 to regulate AKT/mTOR pathway. *Cancer Management and Research*, 13: 403-413.

Guo J, Wang H, Jiang S, Xia J, Jin S., 2017. The cross-talk between tristetraprolin and cytokines in cancer. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*, 17(11): 1477-1486.

Hao T, Xu J, Fang S, Jiang J, Chen X, Wu W, Li L, Li M, Zhang C, He Y., 2021. Overexpression of ZNF460 predicts worse survival and promotes metastasis through JAK2/STAT3 signaling pathway in patient with colon cancer. *Journal of Cancer*, 12(11): 3198-3208.

Hao YJ, Li Y, Fan LQ, Zhao Q, Tan BB, Jiao ZK, Zhao XF, Zhang ZD, Wang D., 2015. Role of RNA-interference-induced zinc finger protein 139 suppression in gastric cancer cell sensitivity to chemotherapeutic agents. *Oncology Letters*, 10(3): 1333-1338.

He Z, Zhong Y, Hu H, Li F., 2023. ZFP64 promotes gallbladder cancer progression through recruiting HDAC1 to activate NOTCH1 signaling pathway. *Cancers*, 15(18): 4508-4525.

Hedayat-Evrigh N, Khalkhali-Evrigh R, Bakhtiarizadeh MR., 2020. Genome-wide identification and analysis of variants in domestic and wild bactrian camels using whole-genome sequencing data. *International Journal of Genomics*, 2020(1): 2430846.

Hjelmborg JB, Scheike T, Holst K, Skytthe A, Penney KL, Graff RE, Pukkala E, Christensen K, Adami HO, Holm NV, Nuttal E, Hansen S, Hartman M, Czene K, Harris JR, Kaprio J, Mucci LA., 2014. The heritability of prostate cancer in the Nordic twin study of cancer. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 23(11): 2303-2310.

Hong K, Yang Q, Yin H, Wei N, Wang W, Yu B., 2023. Comprehensive analysis of ZNF family genes in prognosis, immunity, and treatment of esophageal cancer. *BMC Cancer*, 23(1): 301-319.

Hu JX, Zhao CF, Chen WB, Liu QC, Li QW, Lin YY, Gao F., 2021. Pancreatic cancer: a review of epidemiology, trends and risk factors. *World Journal of Gastroenterology*, 27(27): 4298-4321.

Huang S, Wu J, Yang Y, Zhu M, Chen L, Zhang S, Yang Y, Sun X, Xie Y., 2025. Investigate the effect of ZFP64 on mRNA expression of HBG based on bioinformatics and experimental validation. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 1-11.

Huang T, Wang Y, Li M, Wang W, Qi Z, Li J., 2022. Circular RNA hsa_circ_0119412 contributes to tumorigenesis of gastric cancer via the regulation of the miR-1298-5p/zinc finger BED-type containing 3 (ZBED3) axis. *Bioengineered*, 13(3): 5827–5842.

Huang W, Li N, Hu J, Wang L., 2016. Inhibitory effect of RNA-mediated knockdown of zinc finger protein 91 pseudogene on pancreatic cancer cell growth and invasion. *Oncology Letters*, 12(2): 1343-1348.

Jen J, Wang YC., 2016. Zinc finger proteins in cancer progression. *Journal of Biomedical Science*, 23: 53-62.

Jiang H, Zhang L, Liu J, Chen Z, Na R, Ding G, Zhang H, Ding Q., 2012. Knockdown of zinc finger protein X-linked inhibits prostate cancer cell proliferation and induces apoptosis by activating caspase-3 and caspase-9. *Cancer Gene Therapy*, 19(10): 684-689.

Kadmas JL, Beckerle MC., 2004. The LIM domain: from the cytoskeleton to the nucleus. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 5(11): 920-931.

Karlsson O, Thor S, Norberg T, Ohlsson H, Edlund T., 1990. Insulin gene enhancer binding protein Isl-1 is a member of a novel class of proteins containing both a homeo- and a Cys-His domain. *Nature*, 344(6269): 879-882.

Katsura A, Tamura Y, Hokari S, Harada M, Morikawa M, Sakurai T, Takahashi K, Mizutani A, Nishida J, Yokoyama Y, Morishita Y, Murakami T, Ehata S, Miyazono K, Koinuma D., 2017. ZEB1-regulated inflammatory phenotype in breast cancer cells. *Molecular Oncology*, 11(9): 1241-1262.

Kelly SP, Anderson WF, Rosenberg PS, Cook MB., 2018. Past, current, and future incidence rates and burden of metastatic prostate cancer in the United States. *European Urology Focus*, 4(1): 121-127.

Kiri S, Ryba T., 2024. Cancer, metastasis, and the epigenome. *Molecular Cancer*, 23(1): 154-181.

Kumar A., 2021. Comprehensive review on etiopathogenesis, treatment and emerging therapies of breast cancer. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 14(8): 20-33.

Lai WS, Wells ML, Perera L, Blackshear PJ., 2019. The tandem zinc finger RNA binding domain of members of the tristetraprolin protein family. *Wiley Interdisciplinary Reviews: RNA*, 10(4): e1531.

Laity JH, Lee BM, Wright PE., 2001. Zinc finger proteins: new insights into structural and functional diversity. *Current Opinion in Structural Biology*, 11(1): 39-46.

Lan C, Qiu M, Lin M., 2025. Zinc finger proteins in colorectal cancer: insights into molecular mechanisms and therapeutic implications. *Technology in Cancer Research and Treatment*, 24: 15330338251334447.

Li Y, Zhao Q, Fan LQ, Wang LL, Tan BB, Leng YL, Liu Y, Wang D., 2014. Zinc finger protein 139 expression in gastric cancer and its clinical significance. *World Journal of Gastroenterology*, 20(48): 18346-18353.

Linder P, Fuller-Pace FV., 2013. Looking back on the birth of DEAD-box RNA helicases. *Biochimica Et Biophysica Acta (BBA) - Gene Regulatory Mechanisms*, 1829(8): 750–755.

Liu J, Zhang H., 2024. Zinc finger and BTB domain-containing 20: a newly emerging player in pathogenesis and development of human cancers. *Biomolecules*, 14(2): 192-210.

Liu S, Liu X, Lin X, Chen H., 2023. Zinc finger proteins in the war on gastric cancer: molecular mechanism and clinical potential. *Cells*, 12(9): 1314-1342.

Liu S, Sima X, Liu X, Chen H., 2022. Zinc finger proteins: functions and mechanisms in colon cancer. *Cancers*, 14(21): 5242.

Locke JA, Guns ES, Lubik AA, Adomat HH, Hendy SC, Wood CA, Ettinger SL, Gleave ME, Nelson CC., 2008. Androgen levels increase by intratumoral de novo steroidogenesis during progression of castration-resistant prostate cancer. *Cancer Research*, 68(15): 6407-6415.

Lu B, Klingbeil O, Tarumoto Y, Somerville TDD, Huang YH, Wei Y, Wai DC, Low JKK, Milazzo JP, Wu XS, Cao Z, Yan X, Demerdash OE, Huang G, Mackay JP, Kinney JB, Shi J, Vakoc CR., 2018. A transcription factor addiction in leukemia imposed by the MLL promoter sequence. *Cancer Cell*, 34(6): 970–981.

Luo N, Zhang K, Li X, Hu Y., 2020. ZEB1 upregulation of long noncoding RNA ZEB1-AS1 facilitates the progression of triple-negative breast cancer by binding with ELAVL1 to maintain the stability of ZEB1 mRNA. *Journal of Cellular Biochemistry*, 121(10): 4176-4187.

Maturi V, Enroth S, Heldin CH, Moustakas A., 2018. Genome-wide binding of transcription factor ZEB1 in triple-negative breast cancer cells. *Journal of Cellular Physiology*, 233(10): 7113-7127.

Montanaro M, Agostini M, Anemona L, Bonanno E, Servadei F, Finazzi Agrò E, Asimakopoulos AD, Ganini C, Cipriani C, Signoretti M, Bove P, Rugolo F, Imperiali B, Melino G, Mauriello A, Scimeca M., 2023. ZNF750: a novel prognostic biomarker in metastatic prostate cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7): 6519-6534.

Montorsi L, Guizzetti F, Alecci C, Caporali A, Martello A, Atene CG, Parenti S, Pizzini S, Zanovello P, Bortoluzzi S., 2016. Loss of ZFP36 expression in colorectal cancer correlates

with Wnt/ β -catenin activity and enhances the epithelial-to-mesenchymal transition through the upregulation of ZEB1, SOX9, and MACC1. *Oncotarget*, 7(37): 59144-59157.

Ngwa CJ, Farrukh A, Pradel G., 2021. Zinc finger proteins of *Plasmodium falciparum*. *Cellular Microbiology*, 23(12): e13387.

O'Brien SJ, Fiechter C, Burton J, Hallion J, Paas M, Patel A, Patel A, Rochet A, Scheurlen K, Gardner S, Eichenberger M, Sarojini H, Srivastava S, Rai S, Kalbfleisch T, Polk HC, Galandiuk S., 2021. Long non-coding RNA ZFAS1 is a major regulator of epithelial-mesenchymal transition through miR-200/ZEB1/E-cadherin, vimentin signaling in colon adenocarcinoma. *Cell Death Discovery*, 7(1): 61-75.

Obinata D, Takayama K, Inoue S, Takahashi S., 2024. Exploring androgen receptor signaling pathway in prostate cancer: a path to new discoveries. *International Journal of Urology*, 31(6): 590-597.

Paller CJ, Antonarakis ES., 2013. Management of biochemically recurrent prostate cancer after local therapy: evolving standards of care and new directions. *Clinical Advances in Hematology & Oncology: H&O*, 11(1): 14-23.

Parfenyev SE, Daks AA, Shuvalov OY, Fedorova OA, Pestov NB, Korneenko TV, Barlev NA., 2025. Dualistic role of ZEB1 and ZEB2 in tumor progression. *Biology Direct*, 20(1): 32-48.

Poonaki E, Kahlert UD, Meuth SG, Gorji A., 2022. The role of the ZEB1–ZEB1-neuroinflammation axis in CNS disorders. *Journal of Neuroinflammation*, 19(1): 275-291.

Qin C, Bu P, Zhang Q, Chen J, Li Q, Liu J, Dong H, Ren X., 2019. ZNF281 regulates cell proliferation, migration and invasion in colorectal cancer through Wnt/ β -catenin signaling. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 52(6): 1503–1516.

Qiu G, Deng Y., 2022. ZFP64 transcriptionally activates PD-1 and CTLA-4 and plays an oncogenic role in esophageal cancer. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 622: 72-78.

Qu Y, Dang S, Hou P., 2013. Gene methylation in gastric cancer. *Clinica Chimica Acta*, 424: 53-65.

Rhie SK, Yao L, Luo Z, Witt H, Schreiner S, Guo Y, Perez AA, Farnham PJ., 2018. ZFX acts as a transcriptional activator in multiple types of human tumors by binding downstream of transcription start sites at the majority of CpG island promoters. *Genome Research*, 28(3): 310–320.

Satpathy AT, KC W, Albring JC, Edelson BT, Kretzer NM, Bhattacharya D, Murphy TL, Murphy KM., 2012. Zbtb46 expression distinguishes classical dendritic cells and their

committed progenitors from other immune lineages. *Journal of Experimental Medicine*, 209(6): 1135-1152.

Savci-Heijink CD, Halfwerk H, Hooijer GKJ, Koster J, Horlings HM, Meijer SL, Van De Vijver MJ., 2019. Epithelial-to-mesenchymal transition status of primary breast carcinomas and its correlation with metastatic behavior. *Breast Cancer Research and Treatment*, 174(3): 649–659.

Serras J, Duchowski A, Nobre I, Moreira C, Maciel A, Jorge J., 2024. Immersive virtual colonography viewer for colon growths diagnosis: design and think-aloud study. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(5): 40-57.

Shi J, Li W, Ding X., 2017. Assessment of the association between ZBTB20 rs9841504 polymorphism and gastric and esophageal cancer susceptibility: a meta-analysis. *The International Journal of Biological Markers*, 32(1): e96-e101.

Shukla S, Elson G, Blackshear PJ, Lutz CS, Leibovich SJ., 2017. 3'UTR AU-rich elements (AREs) and the RNA-binding protein tristetraprolin (TTP) are not required for the LPS-mediated destabilization of phospholipase-C β -2 mRNA in murine macrophages. *Inflammation*, 40(2): 645–656.

Singh JK, Van Attikum H., 2021. DNA double-strand break repair: putting zinc fingers on the sore spot. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 113: 65-74.

Singhal SK, Byun JS, Park S, Yan T, Yancey R, Caban A, Hernandez SG, Hewitt SM, Boisvert H, Hennek S, Bobrov M, Ahmed Md SU, White J, Yates C, Aukerman A, Vanguri R, Bareja R, Lenci R, Farre PL, Siervi AD, Napoles AM, Vohra N, Gardner K., 2021. Kaiso (ZBTB33) subcellular partitioning functionally links LC3A/B, the tumor microenvironment, and breast cancer survival. *Communications Biology*, 4(1): 150-163.

Siraj AK, Parvathareddy SK, Siraj N, Al-Obaisi K, Aldughaiter SM, AlManea HM, AlHussaini HF, Al-Dayel F, Al-Kuraya KS., 2021. Loss of ZNF677 expression is a predictive biomarker for lymph node metastasis in middle eastern colorectal cancer. *Scientific Reports*, 11(1): 22346.

Smirnov A, Cappello A, Lena AM, Anemona L, Mauriello A, Di Daniele N, Annicchiarico-Petruzzelli M, Melino G, Candi E., 2018. ZNF185 is a p53 target gene following DNA damage. *Aging (Albany NY)*, 10(11): 3308-3326.

Smirnov A, Lena AM, Cappello A, Panatta E, Anemona L, Bischetti S, Annicchiarico-Petruzzelli M, Mauriello A, Melino G, Candi E., 2019. ZNF185 is a p63 target gene critical for epidermal differentiation and squamous cell carcinoma development. *Oncogene*, 38(10): 1625-1638.

Smyth EC, Nilsson M, Grabsch HI, Van Grieken NC, Lordick F., 2020. Gastric cancer. *Lancet*, 396(10251): 635-648.

Song Z, Li W, Wang L, Jia N, Chen B., 2017. MicroRNA-454 inhibits tumor cell proliferation, migration and invasion by downregulating zinc finger e-box-binding homeobox 1 in gastric cancer. *Molecular Medicine Reports*, 16(6): 9067-9073.

Sun J, Liu J, Hou Y, Bao J, Wang T, Liu L, Zhang Y, Zhong R, Sun Z, Ye Y, Liu J., 2024. ZFP64 drives glycolysis-mediated stem cell-like properties and tumorigenesis in breast cancer. *Biology Direct*, 19(1): 83-97.

Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, Bray F., 2021. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA a Cancer Journal for Clinicians*, 71(3): 209–249.

Takayama KI., 2019. Splicing factors have an essential role in prostate cancer progression and androgen receptor signaling. *Biomolecules*, 9(4): 131-146.

Tan Z., 2019. Recent advances in the surgical treatment of advanced gastric cancer: a review. *Medical Science Monitor*, 25: 3537–3541.

Tang N, Xu S, Song T, Qiu Y, He J, Fu X., 2021. Zinc finger protein 91 accelerates tumour progression by activating β -catenin signalling in pancreatic cancer. *Cell Proliferation*, 54(5): e13031.

Thomas C, Gustafsson JA., 2011. The different roles of ER subtypes in cancer biology and therapy. *Nature Reviews Cancer*, 11(8): 597-608.

Tinguely P, Dal G, Bottai M, Nilsson H, Freedman J, Engstrand J., 2020. Microwave ablation versus resection for colorectal cancer liver metastases-a propensity score analysis from a population-based nationwide registry. *European Journal of Surgical Oncology*, 46: 476–485.

Torre LA, Siegel RL, Ward EM, Jemal A., 2016. Global cancer incidence and mortality rates and trends an update. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 25(1): 16-27.

Udu-Ituma S, Adélaïde J, Le TK, Omabe K, Finetti P, Paris C, Guille A, Bertucci F, Birnbaum D, Rocchi P, Chaffanet M., 2023. ZNF703 mRNA-targeting antisense oligonucleotide blocks cell proliferation and induces apoptosis in breast cancer cell lines. *Pharmaceutics*, 15(7): 1930-1947.

Vanaja DK, Cheville JC, Iturria SJ, Young CY., 2003. Transcriptional silencing of zinc finger protein 185 identified by expression profiling is associated with prostate cancer progression. *Cancer Research*, 63(14): 3877-3882.

Wang D, Zhu ZZ, Jiang H, Zhu J, Cong WM, Wen BJ, He SQ, Liu SF., 2015. Multiple genes identified as targets for 20q13.12-13.33 gain contributing to unfavorable clinical outcomes in patients with hepatocellular carcinoma. *Hepatology International*, 9(3): 438–446.

Wang G, Wang J, Li C, Mu X, Mu Q, Zhang X, Su X., 2025. ZNF703 promotes Triple-Negative breast cancer cell progression and in combination with STK11 predicts disease recurrence (ZS–TNBC Model). *Gene*, 942: 149258.

Wang J, Fu J, Xu C, Jia R, Zhang X, Zhao S., 2021. Circ_ZFP644 attenuates caerulein-induced inflammatory injury in rat pancreatic acinar cells by modulating miR-106b/Pias3 axis. *Experimental and Molecular Pathology*, 121: 104644.

Wang Y, Sun HY, Kumar S, Puerta MDM, Jo H, Rezvan A., 2019. ZBTB46 is a shear-sensitive transcription factor inhibiting endothelial cell proliferation via gene expression regulation of cell cycle proteins. *Laboratory Investigation*, 99(3): 305-318.

Watkins EJ, 2019. Overview of breast cancer. *Jaapa*, 32(10): 13-17.

Wen S, Chang HC, Tian J, Shang Z, Niu Y, Chang C., 2015. Stromal androgen receptor roles in the development of normal prostate, benign prostate hyperplasia, and prostate cancer. *The American Journal of Pathology*, 185(2): 293-301.

Xu X, Zhu Z, Xu Y, Tian S, Jiang Y, Zhao H., 2020. Effects of zinc finger protein 403 on the proliferation, migration and invasion abilities of prostate cancer cells. *Oncology Reports*, 44(6): 2455-2464.

Yan Z, Zhou Y, Yang Y, Zeng C, Li P, Tian H, Tang X, Zhang G., 2022. Zinc finger protein 384 enhances colorectal cancer metastasis by upregulating MMP2. *Oncology Reports*, 47(3): 1-15.

Ye Q, Liu J, Xie K., 2019. Zinc finger proteins and regulation of the hallmarks of cancer. *Histology and Histopathology*, 34: 1097-1109.

Yu J, Liang QY, Wang J, Cheng Y, Wang S, Poon TCW, Go MY, Tao Q, Chang Z, Sung JJY., 2013. Zinc-finger protein 331, a novel putative tumor suppressor, suppresses growth and invasiveness of gastric cancer. *Oncogene*, 32(3): 307-317.

Yuan J, Lu J, Zhu J, Chen F, Zeng Z, Yan J, Li C, Zhou R, Tong Q., 2024. LncRNA FIRRE drives gastric cancer progression via ZFP64-mediated TUBB3 promoter activation. *Cancer Letters*, 611: 217398.

Zhang JS, Gong A, Young CYF., 2007. ZNF185, an actin–actin-cytoskeleton-associated growth inhibitory LIM protein in prostate cancer. *Oncogene*, 26(1): 111-122.

Zhang X, Mu X, Huang O, Wang Z, Chen J, Chen D, Wang G., 2022. ZNF703 promotes triple-negative breast cancer cells through cell-cycle signaling and associated with poor prognosis. *BMC Cancer*, 22(1): 226-238.

Zhang X, Zhang Z, Zhang Q, Zhang Q, Sun P, Xiang R, Ren G, Yang S., 2018. ZEB1 confers chemotherapeutic resistance to breast cancer by activating ATM. *Cell Death & Disease*, 9(2): 57-72.

Zhang Y, Xie Z, Zhou L, Li L, Zhang H, Zhou G, Ma X, Herrera PL, Liu Z, Grusby MJ, Zhang WJ., 2012. The zinc finger protein ZBTB20 regulates transcription of fructose-1,6-bisphosphatase 1 and β cell function in mice. *Gastroenterology*, 142(7): 1571–1580.

Zhang Y, Zhou X, Zhang MM, Cheng L, Zhang Y, Wang X., 2019. ZBTB20 promotes cell migration and invasion of gastric cancer by inhibiting I κ B α to induce NF- κ B activation. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 47(1): 3862-3872.

Zheng C, Wu H, Jin S, Li D, Tan S, Zhu X., 2022. Roles of Myc-associated zinc finger protein in malignant tumors. *Asia-Pacific Journal of Clinical Oncology*, 18(6): 506-514.

Zhou Y, Zhou Y, Wang K, Li T, Zhang M, Yang Y, Xie W, Li H, Liu H, Ding Q, Liu D, Liu J, Hu R., 2019. ROCK2 confers acquired gemcitabine resistance in pancreatic cancer cells by upregulating transcription factor ZEB1. *Cancers*, 11(12): 1928-1948.

Zhu M, Zhang P, Yu S, Tang C, Wang Y, Shen Z, Chen W, Liu T, Cui Y., 2022. Targeting ZFP64/GAL-1 axis promotes therapeutic effect of nab-paclitaxel and reverses immunosuppressive microenvironment in gastric cancer. *Journal of Experimental and Clinical Cancer Research*, 41(1): 14-34.