

## Çok Kriterli Karar Verme Temelli Erozyon Analizi: Entropi-WASPAS Yaklaşımıyla Derindere Havzası'nın (Ardahan) Önceliklendirilmesi

### Erosion Analysis Based on Multi-Criteria Decision-Making: Prioritization of the Derindere Watershed (Ardahan) Using the Entropy-WASPAS Approach

İbrahim DURSUN\*<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi Orman Mühendisliği Bölümü, Isparta

#### Eser bilgisi/Article info

Araştırma makalesi / Research article

DOI: [10.17474/artvinofd.1733893](https://doi.org/10.17474/artvinofd.1733893)

\*Sorumlu yazar/Corresponding author

İbrahim DURSUN

e-mail: [ibrahimdursun@isparta.edu.tr](mailto:ibrahimdursun@isparta.edu.tr)

Geliş tarihi / Received

03.07.2025

Düzeltilme tarihi / Received in revised form

24.08.2025

Kabul tarihi / Accepted

19.09.2025

Elektronik erişim / Online available

15.10.2025

#### Anahtar kelimeler:

Ardahan

Erozyon riski

Entropi

Morfometri

#### Keywords:

Ardahan

Erosion risk

Entropy

Morphometry

#### Özet

Bu çalışmada, Derindere Havzası'nın morfolojik özellikleri ve erozyon riski alt havza ölçeğinde nesnel kriterler kullanılarak belirlenmiştir. Havzanın morfolojik parametreleri, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) verilerinden elde edilen Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanılarak hesaplanmıştır. Entropi yöntemi ile kriter ağırlıkları nesnel olarak belirlenmiş ve ardından ÇKKV yöntemlerinden WASPAS (Ağırlıklı Toplu Toplam Ürün Değerlendirmesi) uygulanarak alt havzaların erozyon riski sınıflandırılmıştır. Analizler, özellikle çatallanma oranı (Rb) ve akarsu uzunluk oranı (RI) gibi parametrelerin erozyon potansiyelinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Bağıl rölyef (Rh<sub>p</sub>) ve engebellik indeksi (R<sub>n</sub>) ise yüksek eğimli alt havzaların erozyona karşı duyarlılığını artırmaktadır. Entropi-WASPAS entegrasyonu sonucu, AH-4 "Çok Yüksek" erozyon riski taşıyan alan olarak tanımlanırken, diğer alt havzalar "Çok Düşük" sınıfta yer almıştır. Orman ekosistemleri, havzanın topografik yapısına bağlı olarak toprak koruma ve su kalitesinin artırılmasında önemli bir işlev üstlenmektedir. Bu bağlamda, yüksek risk taşıyan alt havzalarda orman örtüsünün korunması ve iyileştirilmesi; erozyonun azaltılması ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından öncelikli müdahale alanı olarak önerilmektedir. Morfolojik parametrelerin, erozyon riskini doğru biçimde yansıttığı ve Entropi-WASPAS tabanlı çok kriterli karar verme yaklaşımlarının kaynakların etkili şekilde tahsis açısından güçlü bir karar destek aracı sunduğu görülmektedir. İleriye dönük olarak, iklim değişikliği ve arazi kullanımındaki değişimlerin etkilerini içeren çok boyutlu analizlerin gerçekleştirilmesi, havza yönetimi kararlarının doğruluğunu ve uygulanabilirliğini artıracaktır.

#### Abstract

In this research, the morphometric characteristics and erosion risk of the Derindere Watershed were assessed at the sub-basin scale using objective criteria. The morphometric parameters were derived from a Digital Elevation Model (DEM) generated from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data. Criterion weights were objectively determined through the Entropy method, and subsequently, the WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) technique, one of the MCDM approaches, was employed to classify erosion risk across the sub-basins. The analyses indicated that parameters such as the bifurcation ratio (Rb) and stream length ratio (RI) were key determinants of erosion potential. Furthermore, relative relief (Rh<sub>p</sub>) and the ruggedness index (R<sub>n</sub>) revealed that steeply sloping sub-basins exhibit greater susceptibility to erosion. Through the integration of Entropy and WASPAS, the SW-4 was identified as an area of 'Very High' erosion risk, whereas the remaining sub-basins were classified as 'Very Low.' Forest ecosystems were found to play a crucial role in soil conservation and water quality enhancement, conditioned by the topographic structure of the watershed. Accordingly, preserving and rehabilitating forest cover in high-risk sub-basins is recommended as a priority intervention strategy to mitigate erosion and promote the sustainable management of water resources. The findings demonstrate that morphometric parameters accurately reflect erosion risk, while the Entropy-WASPAS-based multi-criteria decision-making framework offers a robust decision-support tool for the effective allocation of resources. Looking forward, incorporating multidimensional analyses that integrate the impacts of climate change and land-use dynamics will enhance both the accuracy and applicability of watershed management decisions.

## GİRİŞ

Toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, günümüzde yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik açıdan da çok boyutlu bir yaklaşımı zorunlu

kılmaktadır. Havzaların morfolojik özelliklerine yönelik analizlerden elde edilen veriler; su kaynaklarının etkin yönetimi, toprak erozyonu kontrolü, heyelan duyarlılığı haritalaması, yer altı suyu potansiyelinin değerlendirilmesi ve havzaların önceliklendirilmesi gibi

birçok alanda karar destek aracı olarak kullanılmaktadır (Singh ve ark. 2021).

Toprak erozyonu; üretim kaybı, sedimantasyon artışı, biyolojik çeşitlilik kaybı ve baraj ömürlerinin kısılması gibi ekosistem işleyişini doğrudan etkileyen kritik bir süreçtir (Gelagay ve Minale 2016). Türkiye gibi erozyonun yaygın olduğu ülkelerde, bu durum hem çevresel hem de ekonomik açıdan ciddi sonuçlar doğurmaktadır; iklim değişikliğine bağlı yağış rejimi düzensizlikleri ve bitki örtüsündeki değişimler bu riski daha da artırmaktadır (Dursun ve Babalık 2023a, Pamukoğlu ve ark. 2023, Demir ve Dursun 2024). Dolayısıyla erozyon yönetiminin havza ölçeğinde nesnel yöntemlerle değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Havzalar, yapısal özellikleri itibarıyla toprak erozyonunun mekânsal dağılımının analizinde uygun birimler olup morfometrik yapı, hidrolojik denge ve ekosistem sürdürülebilirliği üzerinde belirleyici bir faktördür (Weslati ve Serbaji 2024).

Erozyon, dinamik yapısı ve çok katmanlı doğasıyla karmaşık bir çevresel süreç olarak değerlendirilmelidir. Bu süreçlerin kapsamlı biçimde anlaşılabilmesi, havzaların morfometrik nitelikleri ile hidrolojik işleyişlerinin detaylı analizine bağlıdır. Özellikle morfometrik göstergelerin değerlendirilmesi, mevcut koşulların sağlıklı bir şekilde yorumlanmasının yanı sıra, uzun vadeli planlama ve yönetim stratejilerinin oluşturulması açısından da kritik bir öneme sahiptir (Dursun ve Babalık 2023a, Salvi ve ark. 2025).

Havza morfometrisine yönelik yapılan analizler, toprak erozyonu, su yetersizliği ve arazi bozulumu gibi çevre sorunlarına karşı uzun dönem planlamalarında kullanılabilir. Bu tür çalışmalar aracılığıyla, erozyon açısından hassas bölgeler tespit edilmekte ve bu alanlara yönelik koruma tedbirleri daha etkin bir şekilde planlanabilmektedir (Shekar ve ark. 2025). Bu çerçevede gerçekleştirilen havza önceliklendirme çalışmaları, çevresel bozulma potansiyeli taşıyan alanların tespit edilmesine ve bu alanlara yönelik koruma öncelikleri ile yönetim stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır (Pan ve ark. 2025).

Ancak yalnızca morfometrik ölçütlere dayalı yaklaşımların, çoğu zaman karmaşık çevresel sorunların çözümünde yetersiz kaldığı durumlar olabilmektedir. Bu noktada, sosyo-ekonomik yapıdan ekolojik değişkenlere kadar geniş yelpazede değerlendirmelerin ve analizlerin yapılabildiği Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, çok sayıda kriterin eşzamanlı değerlendirilmesiyle karmaşık karar süreçlerinde nesnel ve sistematik çözümler sunmaktadır (Öztürk 2009, Sarkar ve ark. 2022).

Türkiye'de erozyon risk analizlerinde RUSLE ve ICONA gibi geleneksel modeller ile GeoWEPP gibi süreç tabanlı modellerden yararlanılmış olsa da, bu yaklaşımların ÇKKV yöntemleriyle entegrasyonu literatürde oldukça sınırlıdır. Havza ölçeğinde erozyon risk analizlerinde daha çok RUSLE (Ediş ve ark. 2023, Dursun ve ark. 2025), ICONA (Ediş ve ark. 2021, Dutal 2022, Dursun 2025) ve GeoWEPP (Yüksel ve ark. 2016, Dursun ve Babalık 2023b) gibi modellerin kullanıldığı görülmektedir. Buna karşın, ÇKKV yöntemleri ile bu modellerin entegre edildiği çalışmalar sınırlı sayıda olup, özellikle Entropi-WASPAS (Ağırlıklı Toplu Toplam Ürün Değerlendirmesi) birleşik yaklaşımına dayalı havza önceliklendirmesi neredeyse hiç uygulanmamıştır. Bu durum, bu çalışmayı Türkiye literatüründe yenilikçi ve öncü bir katkı konumuna getirmektedir.

Bu bağlamda, çalışmada kullanılan Entropi yöntemi, kriterler arası bilgi dağılımını esas alarak uzman görüşünden bağımsız biçimde nesnel ağırlıklar belirler. Yöntemin temel avantajı, karar sürecinde dışsal yargıların etkisini en aza indirerek, kriter ağırlıklarının istatistiksel dağılımlara dayalı olarak tanımlanmasını sağlamasıdır (Chen 2019, Dede ve Zorlu 2023). WASPAS yöntemi ise alternatiflerin genel performansını bütüncül bir şekilde karşılaştırır. Bu iki yaklaşımın entegrasyonu, havza önceliklendirmesi için güçlü bir analitik çerçeve sunmakta ve karar vericilere sürdürülebilir planlama süreçlerinde etkili çözümler sağlamaktadır (Goswami ve Behera 2021, Akay ve ark. 2023). Güncel çalışmalar incelendiğinde, Entropi ve WASPAS yöntemlerinin havza önceliklendirmesi kapsamında başarıyla uygulandığı ve karar vericilere etkili çözümler sunduğu görülmektedir (Sarkar ve Gayen 2024, Pan ve ark. 2025). Dolayısıyla, bu iki yöntemin birlikte değerlendirilmesi, çok kriterli,

bilimsel temelli ve sürdürülebilir planlama yaklaşımları geliştirmek açısından önemli bir fırsat sunmaktadır.

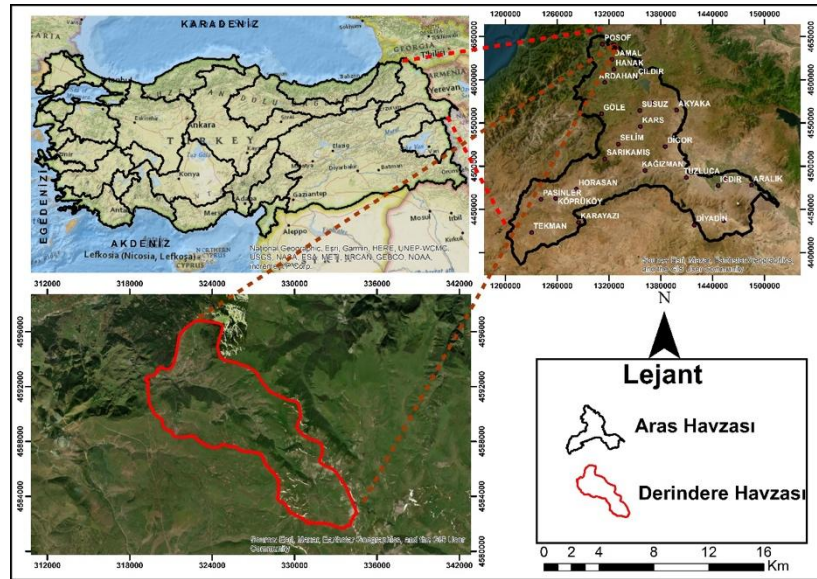
Bu çalışmanın temel amacı, havza düzeyinde toprak erozyonu riskine dayalı bir önceliklendirme yaparak, karar vericilere ekolojik ve hidrolojik süreçleri dikkate alan bilimsel bir yol haritası sunmaktır. Bu kapsamda, morfometrik parametreler Entropi ve WASPAS yöntemleriyle birlikte değerlendirilmiş ve sürdürülebilir doğal kaynak yönetimi çerçevesinde öncelikli alanların belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, çalışmanın çıktıları Birleşmiş Milletler'in 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (özellikle SKH-6: Temiz Su ve Sanitasyon, SKH-13: İklim Eylemi ve SKH-15: Karasal Yaşam) ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, araştırma yalnızca bilimsel katkı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda politik, sosyal ve

çevresel etkiler açısından da önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Materyal

Bu araştırma, Aras Havzası'nın Posof Çayı alt havzasında bulunan Derindere Havzası'nda gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Araştırma sahası, Ardahan ilinin Posof ilçesi sınırları içerisinde yer almakta olup, doğuda Gürcistan, güneyde Damal ilçesi ve kuzeybatıda Posof ilçe merkezi ile çevrilidir. Toplam yüzölçümü yaklaşık 90.11 km<sup>2</sup> olan havza, 41°28'–41°35' kuzey enlemleri ile 42°43'–42°52' doğu boylamları arasında yer almaktadır.



Şekil 1. Araştırma alanının konumu

Bölgenin iklim özellikleri, Türkiye'nin en düşük sıcaklıklarının kaydedildiği Doğu Anadolu Bölgesi içerisinde yer almasına rağmen, Posof ilçesinde sıcaklık ve yağış miktarlarının görece yüksek olması nedeniyle farklılık göstermektedir. Bu durum, bölgenin özel konumsal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. İklim karakteristiği, coğrafi faktörlere bağlı olarak Doğu Anadolu'nun karasal iklimi ile Karadeniz'in nemli iklim tipi arasında bir geçiş özelliği göstermekte ve yarı nemli bir iklim yapısına sahiptir (Kaya 2005). Posof ve çevresinin

yıllık ortalama sıcaklık değerleri, 7.2 °C, yıllık toplam yağış değerlerinin ise 612 mm' dir (Dede 2023).

Jeolojik açıdan, Derindere Havzası, volkanik kökenli formasyonlar üzerinde gelişmiş olup aşınım yüzeyi pliyosen yaşlıdır. Bölgede anakaya olarak andezit, kiltaş, miltaş ve kumtaş formasyonları yaygın olarak görülmektedir. Havza genelinde geniş alanlarda yayılış gösteren azonal toprak grubuna ait litosoller, özellikle dik yamaçlarda etkili olan erozyon sonucu yüzeysel inorganik materyalin alt kesimlere ve vadi tabanına taşınmasına

neden olmuş, böylece bu alanlarda azonal toprakların gelişimini hızlandırmaktadır. Ayrıca, havza içerisinde intrazonal toprak gruplarından kahverengi orman toprakları ile birlikte taşlık ve kayalık alanlar da yayılış göstermektedir (Koçman 1979, Kaya 2005).

Derindere Havzası'nda, vadi yamaçlarında meşe (*Quercus* spp.), titrek kavak (*Populus tremula* L.) türleri hakimdir. Kurtyuvası Tepe ile Mermerler Dere vadisi çevrelerinde ise huş (*Betula pendula* Roth.) türü bulunmaktadır (ÇŞİDM 2024). Ayrıca, bölgede subalpin ve alpin çayır bitkilerine ait türler yaygın olarak görülmektedir (Kaya 2005).

## Yöntem

Derindere Havzası'na ait alt havzalar ve drenaj ağı sistemleri, 30 m çözünürlüğe sahip SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) verilerine dayalı olarak oluşturulan ve boş pikselleri düzeltilmiş Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üzerinden türetilmiştir. Bu SYM verisi, akış yönü ve akış birikimi katmanlarının hesaplanmasında kullanılmış; ardından ArcHydro modülü yardımıyla Strahler'in (1964) geliştirdiği hiyerarşik derecelendirme yöntemine göre akarsu ağı ve alt havzalar oluşturulmuştur (Dursun 2025). Son aşamada, akarsu sayıları ve akarsu uzunlukları ArcGIS 10.2 yazılımında öznitelik tabloları üzerinden hesaplanmıştır (Dursun ve Babalık 2023a, ESRI 2004).

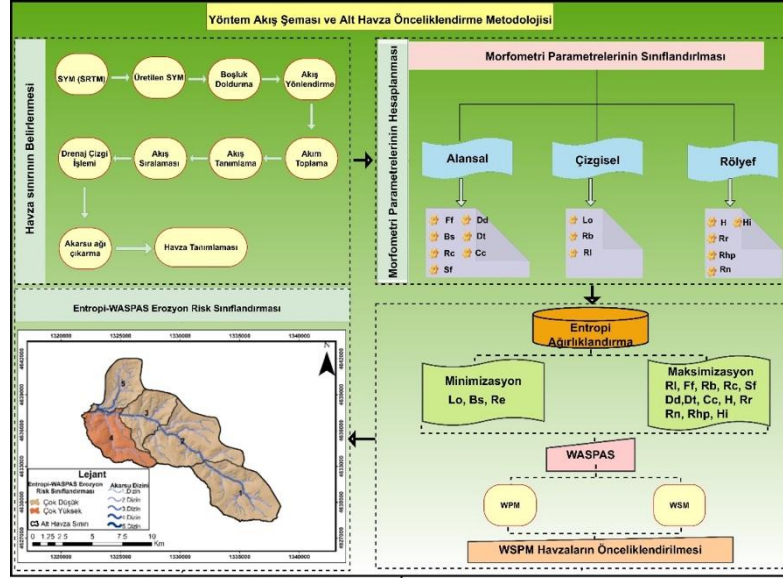
SRTM tabanlı SYM verileri ile oluşturulan drenaj ağları, diğer SYM türlerine kıyasla daha gerçekçi bir topografik temsil sunmakta ve morfometrik analizlerde daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Basavareddy ve ark. 2025). Bununla birlikte, SYM verisinin mekânsal çözünürlüğü ile raster tabanlı akış yönü ve akış birikimi algoritmalarındaki hata kaynakları, morfometrik analiz sonuçlarını etkileyebilir. Örneğin, Akbar ve ark. (2024)  $\pm 30$  m düzeyinde kanal başlangıç hataları gündeme getirirken, Rocha ve ark. (2022) farklı topografik yapı ve çözünürlüklerde hidrolojik model

performansının değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Hidrolojik analiz sonuçlarına göre Derindere Havzası beş alt havzaya ayrılmış; bu alt havzalar, drenaj ağı özellikleri (akarsu sıklığı, drenaj alanı, akarsu uzunluğu, akarsu sırası) ve morfometrik parametreleri (havza alanı, çevre uzunluğu, havza şekli, eğim, rölyef özellikleri) temel alınmıştır. Alt havzaların sınırlandırılmasında hidrolojik akış yönleri, birleşim noktaları ve topografik yükseltiler dikkate alınarak, her bir alt havzanın kendi hidrolojik bütünlüğü korunmuştur. Böylelikle her alt havza, erozyon hassasiyeti açısından bağımsız bir analiz birimi olarak tanımlanmış ve değerlendirilmelerde kullanılmıştır.

Bu bağlamda, her bir alt havza için toplamda 16 morfometrik parametre hesaplanmıştır. Bu parametrelerden; Minimizasyon ilkesi, düşük değerlerin erozyon riskini azalttığı parametreleri; Yüzeysel Akış Uzunluğu (Lo), Havza Uzunluk Oranı (Re) ve Şekil Faktörü (Bs), maksimizasyon ilkesi ise; Çatallanma Oranı (Rb), Akarsu Uzunluk Oranı (Rl), Form Faktörü (Ff), Dairesellik Oranı (Rc), Akarsu Sıklığı (Fs), Drenaj Yoğunluğu (Dd), Drenaj Tekstürü (Dt), Gravelius İndeksi (Cc), Havza Rölyefi (H), Rölyef Oranı (Rr), Bağlı Rölyef (Rhp), Engebelilik Değeri (Rn) ve Hipsometrik İntegral (Hi) ise yüksek değerlerin erozyon riskini artırdığı parametreleri ifade eder. Daha önceki çalışmalarda bu göstergelerin erozyon ve su kaynakları duyarlılığının belirlenmesinde kritik rol oynadığı bildirilmiştir (Singh ve ark. 2021, Sarkar ve ark. 2022, Dursun ve Babalık 2023a, Pan ve ark. 2025). Ayrıca, seçilen parametrelerin sahaya özgü topoğrafik koşulları (yüksek eğim, dar vadiler ve karmaşık drenaj yapısı) temsil etme kabiliyeti, seçim gerekçelerinin bir diğer unsurunu oluşturmaktadır.

Bu morfometrik göstergeler, entropi yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Entropi-WASPAS bütünleşik yöntemi kullanılarak Derindere Havzası'na ait erozyona hassas bölgelere yönelik olarak yürütülen bu çok aşamalı analiz sürecine ilişkin yöntemsel akış Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Yöntem akış şeması

### Entropi Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Entropi kavramı ilk kez 1865 yılında Alman fizikçi ve matematikçi Rudolf Julius Emanuel Clausius tarafından, sistemlerdeki düzensizlik ve belirsizliğin ölçülmesine yönelik bir yaklaşım olarak tanımlanmıştır (Tsallis 2022). Bu temel yaklaşım, daha sonra bilgi kuramı bağlamında Shannon (1948) tarafından yeniden yorumlanmış; entropi, rastgele bir değişkenin olasılık dağılımı fonksiyonu veya olasılık yoğunluk fonksiyonu temelinde, sistemdeki bilgi miktarını ölçen istatistiksel bir ölçüt olarak tanımlanmıştır.

Entropi yöntemi, ardışık ve sistematik biçimde yürütülen beş temel adımdan oluşmaktadır. Entropi yönteminin ilk adımı, karar matrisinin normalize edilmesiyle başlamaktadır. Bu aşamada, kriterlerin fayda ya da maliyet tipi olmalarına göre uygun normalizasyon yöntemi uygulanmakta ve kriter değerleri karşılaştırılabilir hâle getirilmektedir (Eşitlik 1).

$$r_{ij} = \{x_{ij} | \max_{ij}\} (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad r_{ij} = \{x_{ij} | \min_{ij}\} (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

Çalışmanın ikinci aşamasında, karar verme sürecine dâhil edilen ve farklı birimlerle ifade edilen kriterlere ait verilerin karşılaştırılabilir bir forma dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, veriler [0, 1] aralığına indirgenerek standartlaştırılmakta ve bu işlem, Eşitlik (2)

ile tanımlanan normalizasyon yöntemi aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

$$P_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (2)$$

Bu formülde kullanılan terimler: i alternatifleri, j kriterleri, P<sub>ij</sub> ise normalize edilmiş değerleri göstermektedir.

Üçüncü aşamada, her bir değerlendirme kriterine ilişkin Entropi değerleri (E<sub>j</sub>), Eşitlik (3)'te verilen formül doğrultusunda hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, kriterlerin karar sürecine olan bilgi katkı düzeylerini nicel olarak ortaya koymaktadır.

$$E_j = -k * \sum_{i=1}^n P_{ij} * \ln (P_{ij}) \quad (3)$$

Bu formülde kullanılan terimler: k, entropi katsayısı; P<sub>ij</sub>, normalize edilmiş değerler, E<sub>j</sub>, j kriterine ait entropi değeridir.

Dördüncü aşamada, bir önceki adımda elde edilen Entropi değerlerinden yararlanılarak, her bir kriterin farklılaşma derecesi (d<sub>j</sub>) hesaplanmaktadır. Bu işlem, Eşitlik (4) kapsamında tanımlanan formül doğrultusunda gerçekleştirilmekte olup, kriterlerin bilgi içeriğindeki çeşitliliği ortaya koymaktadır.

$$d_j = 1 - E_j \quad (4)$$

Beşinci ve son aşamada, her bir kriterin farklılaşma derecesi, toplam farklılaşma derecesine oranlanarak ilgili kriterin ağırlık katsayısı ( $w_j$ ) hesaplanmaktadır. Bu ağırlıklandırma işlemi, Eşitlik (5) aracılığıyla gerçekleştirilmekte ve karar sürecinde kriterlerin göreceli önem düzeylerinin nicel olarak ifade edilmesine olanak tanımaktadır.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (5)$$

#### WASPAS

İlk olarak Zavadskas ve ark. (2012) tarafından literatüre kazandırılan bu model, Ağırlıklandırılmış Toplam Ürün Değerlendirmesi yaklaşımı olup, Ağırlıklandırılmış Toplam Modeli (WSM) ve Ağırlıklandırılmış Çarpım Modeli (WPM) yöntemlerinin bütünleşik bir yapıda birleşiminden oluşmaktadır. Havza önceliklendirmesi kapsamında erozyona eğilimli alanların tespiti açısından yenilikçi bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

Bu yöntemde izlenen adımlar şu şekildedir:

1. *Aşama-Karar matrisinin oluşturulması:* Karar verme sürecinin ilk aşamasında, alternatifler ile değerlendirme kriterleri arasındaki ilişkiyi ortaya koyan karar matrisi tanımlanır. Bu matris, her bir alternatifin her bir kritere göre göstermiş olduğu performans değerlerini içermekte olup, Eşitlik (6) ile ifade edilmektedir.

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

Burada;  $m$ , değerlendirilen alternatiflerin sayısını;  $n$  ise kullanılan kriter sayısını göstermektedir. Her bir  $x_{ij}$  değeri,  $j$ . kritere göre  $i$  alternatifin performansını ifade etmektedir.

2. *Aşama-Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması:* WASPAS, WSM ve WPM gibi iki ÇKKV yaklaşımının bir kombinasyonudur. Normalize edilmiş karar matrisi, fayda ve maliyet türündeki kriterlere göre Eşitlik (7) ve Eşitlik (8) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\bar{x} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (7)$$

$$\bar{x} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (8)$$

Bu işlemler sonucunda, farklı ölçekteki kriterler normalize edilerek [0, 1] aralığına indirgenir ve karşılaştırılabilir hâle getirilir. Burada  $x_{ij}$  değeri  $x_{ij}$  değerinin normalize edilmiş değerini göstermektedir.

3. *Aşama-WSM baz alınarak yapılan toplam nispi önem değerinin hesaplanması:* WASPAS yaklaşımında ilk olarak WSM kullanılarak her bir alternatifin toplam göreceli önem değeri hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, her bir kriterin normalize edilmiş değeri ile o kritere ait ağırlık katsayısının çarpılması ve elde edilen sonuçların toplanmasıyla yoluyla gerçekleştirilmektedir (Eşitlik 9).

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} * w_j \quad (9)$$

4. *Aşama-WPM kullanılarak alternatiflerin göreceli önem derecelerinin hesaplanması:* Burada her bir kriterin normalize edilmiş değeri, ilgili kriter ağırlığı kadar üs alınarak ve bu yolla  $Q$  değeri elde edilmektedir (Eşitlik 10).

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n (\bar{x}_{ij})^{w_j} \quad (10)$$

5. *Aşama-WSM ve WPM modellerine dayalı birleşik nispi önem değerinin hesaplanması:* Bu son aşamada, her bir alternatifin toplam göreceli önemi, WSM ve WPM yaklaşımlarından elde edilen sonuçların eşit ağırlıklı ortalaması alınarak hesaplanır (Eşitlik 11).

$$Q_i = \lambda * Q_i^{(1)} + (1 - \lambda) * Q_i^{(2)} = \lambda \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} * w_j + (1 - \lambda) \prod_{j=1}^n (\bar{x}_{ij})^{w_j} \quad (11)$$

Bu çalışmada  $\lambda$  değeri sabit alınmamış, senaryo bazlı olarak 0 ile 1 arasında ( $\lambda = 0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1$ ) artan adımlarla değerlendirilmiştir. Böylece farklı  $\lambda$  senaryoları altında elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, yöntemin duyarlılığı analiz edilmiştir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

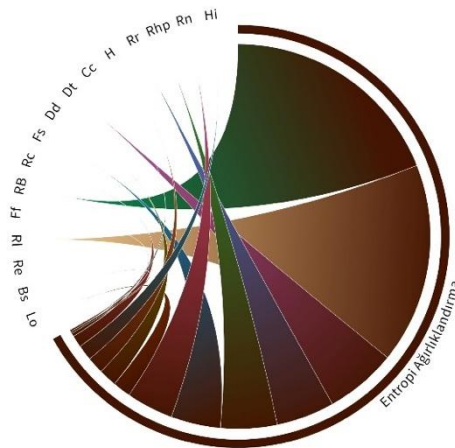
Türkiye'de havza ölçeğinde yapılan uygulamalarda ise çoğunlukla RUSLE (Ediş ve ark. 2023, Dursun ve ark. 2025), ICONA (Ediş ve ark. 2021, Duta 2022, Dursun 2025) ve GeoWEPP (Yüksel ve ark. 2016, Dursun ve Babalık 2023b) tabanlı fiziksel/ampirik modellerin tercih edildiği görülmektedir. Bu modeller ile yapılan erozyon risk analizlerinde, eğim ve drenaj yoğunluğu gibi morfometrik parametrelerin erozyon duyarlılığını belirlemede önemli göstergeler olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışmada ise benzer parametreler, çok kriterli karar destek modeli kapsamında nesnel biçimde ağırlıklandırılarak analiz edilmiştir. Böylelikle, söz konusu ampirik modellere alternatif değil, onları tamamlayıcı nitelikte bir yaklaşım olarak, karar destek sürecine esneklik ve duyarlılık kazandırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, özellikle Alt Havza (AH)-4'ün yüksek risk profiline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, Ediş ve ark. (2021) tarafından ICONA modeliyle, Akay ve ark. (2023) tarafından Entropi-WASPAS entegrasyonu ile yapılan çalışmalarda da benzer biçimde yüksek riskli alanların eğim, jeolojik yapı ve arazi kullanımı faktörleriyle ilişkilendirildiğini göstermektedir. Bu açıdan, araştırma bulguları literatürdeki örneklerle uyumlu olup, Entropi-WASPAS temelli yaklaşımın güvenilirliğini ve

erozyon risk haritalamalarında etkin bir biçimde uygulanabileceğini desteklemektedir.

Entropi sonuçları, havzadaki kriterler arasında bilgi içeriği bakımından dikkate değer farklılıkların bulunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle Rb (0.284) ve Rl (0.252), en yüksek Entropi ağırlıklarına sahip kriterler olarak öne çıkmış; bu durum, söz konusu değişkenlerin erozyon duyarlılığı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Dt (0.090), Rr (0.073), Rhp (0.071) ve Fs (0.062) gibi parametreler de görece yüksek bilgi katkısı sunan kriterler arasında yer almaktadır. Bu bulgular, havzanın morfolojik ve topografik özelliklerinin erozyon potansiyelinin belirlenmesinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Öte yandan, Bs ve Ff gibi kriterlerin ağırlıklarının 0.002; Re'nin ise yalnızca 0.001 olarak hesaplanması, bu parametrelerin mevcut veri seti ve havza koşulları altında sınırlı bilgi katkısı sunduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Cc (0.004), Hi (0.020), H (0.021) ve Rc (0.015) gibi kriterler de düşük ya da orta düzeyde etkili bulunmuştur. Bu dağılım, Entropi yönteminin değişken varyasyonlarını esas alarak karar modeline nesnel katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, erozyon riski değerlendirmesinde daha anlamlı kriterlerin ön plana çıkarılmasını sağlamaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Morfometri parametrelerinin Entropi ağırlıkları

Her bir alt havzanın erozyon riski düzeyi, Entropi yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıkları kullanılarak WASPAS yöntemiyle analiz edilmiştir. Böylece, nesnel ve

veriye dayalı bir önceliklendirme elde edilmiştir. WASPAS yöntemi, karar kalitesini artırmak amacıyla iki temel modelin WSM ve WPM entegrasyonuna dayanmaktadır.

Her iki modelin katkısının dengelenmesi amacıyla  $\lambda$  (lambda) katsayısı başlangıçta 1.0 olarak belirlenmiş ve bu doğrultuda nihai tercihlik skorları ( $Q_i$ ) hesaplanmıştır. Bununla birlikte, modelin duyarlılığını test etmek ve farklı bileşen ağırlıklarının sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, Sarkar ve Gayen (2024) tarafından önerilen yöntem izlenmiş ve  $\lambda$  katsayısı 0.0 ile 1.0 aralığında 0.1'lik artışlarla değiştirilerek toplamda 11 farklı senaryo oluşturulmuştur. Her bir senaryoda, alt havzaların genel  $Q_i$  yeniden hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, her senaryoya karşılık gelen  $Q_i$  değerleri Çizelge 1'de sunulmuştur. AH-4, tüm  $\lambda$  değerlerinde en yüksek  $Q_i$  skorlarına ulaşarak tutarlı biçimde birinci sırada yer almıştır (Çizelge 1 ve 2). Bu sonuç, AH-4'ün eğim, jeolojik yapı, arazi kullanımı ve akış yoğunluğu gibi kriterler bakımından en yüksek erozyon riski taşıyan alt havza olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. AH-4'ün diğer alt havzalara kıyasla yüksek erozyon duyarlılığı göstermesi, çeşitli fizyografik ve arazi kullanım faktörleri ile ilişkilidir. Özellikle bu alt havzada ortalama eğim değerlerinin daha yüksek olması, yüzeysel akışın artmasına ve toprak kaybının hızlanmasına neden olmaktadır. Ayrıca jeolojik birimler daha ayrışabilir ve geçirimsiz litolojilerden oluştuğu için erozyona karşı direnç düşüktür. Arazi kullanımında ise yoğun mera ve parçalı tarım alanlarının baskın olması, bitki örtüsü korumasını azaltmakta ve yağışın doğrudan toprak yüzeyine etki etmesine yol açmaktadır. Buna ek olarak, akış yoğunluğunun yüksekliği drenaj ağını sıklaştırarak yağış sonrası akış

konsantrasyonunu artırmaktadır. Bu unsurlar birlikte değerlendirildiğinde, AH-4'ün yüksek risk profili literatürde benzer çalışmalarla uyumludur ve model sonuçlarını destekler niteliktedir. Ayrıca, AH-4'ün  $Q_i$  skorlarının  $\lambda$  değişiminden etkilenmeksizin artış eğilimi göstermesi, bu alt havzanın kriter bazında yüksek risk potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

AH-5, tüm senaryolarda en düşük  $Q_i$  skorlarına sahip olarak sıralamada sürekli son sırada yer almıştır. Bu bulgu, AH-5'in mevcut kriterler açısından görece düşük erozyon potansiyeline sahip bir morfolojiye işaret etmektedir. AH-1 ve AH-2,  $\lambda$  katsayısındaki değişimlere bağlı olarak sıralama pozisyonlarını değiştirmiştir; özellikle  $\lambda = 0.9$  ve 1.0 değerlerinde AH-1 ikinci sıraya yükselirken, AH-2 üçüncülüğe gerilemiştir. Bu durum, WPM bileşeninin ağırlığının artırıldığı senaryolarda AH-1'in görece üstünlüğünün daha belirgin hale geldiğini, buna karşılık AH-2'nin avantajlarının zayıfladığını göstermektedir.

AH-3, tüm senaryolarda tutarlı biçimde dördüncü sırada kalmış ve sıralama açısından tam bir istikrar göstermiştir. Bu durum, söz konusu alt havzanın düşük düzeyde erozyon riski ile karakterize olduğunu göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde,  $\lambda$  katsayısındaki değişimin bazı alt havzaların sıralamasını etkileyebileceği, ancak AH-4 ve AH-5'in pozisyonları tüm senaryolarda değişmeden kalarak yüksek düzeyde istikrar sağladığı görülmektedir.

**Çizelge 1.** Farklı  $\lambda$  değerlerine göre WASPAS  $Q_i$  değerleri

AH	$\lambda=0$	$\lambda=0.1$	$\lambda=0.2$	$\lambda=0.3$	$\lambda=0.4$	$\lambda=0.5$	$\lambda=0.6$	$\lambda=0.7$	$\lambda=0.8$	$\lambda=0.9$	$\lambda=1$
1	0.627	0.614	0.601	0.588	0.575	0.562	0.549	0.536	0.523	0.510	0.497
2	0.655	0.639	0.623	0.607	0.591	0.575	0.559	0.542	0.526	0.510	0.494
3	0.591	0.581	0.570	0.560	0.549	0.539	0.529	0.518	0.508	0.497	0.487
4	0.920	0.921	0.922	0.923	0.924	0.925	0.926	0.927	0.928	0.929	0.930
5	0.542	0.530	0.517	0.505	0.492	0.480	0.467	0.455	0.442	0.430	0.417

**Çizelge 2.** WASPAS yöntemi ile farklı  $\lambda$  değerlerinde alt havzaların sıralanması

AH	$\lambda=0$	$\lambda=0.1$	$\lambda=0.2$	$\lambda=0.3$	$\lambda=0.4$	$\lambda=0.5$	$\lambda=0.6$	$\lambda=0.7$	$\lambda=0.8$	$\lambda=0.9$	$\lambda=1$
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

WASPAS yöntemi kullanılarak yapılan analiz kapsamında, beş alt havzaya ayrılan Derindere Havzası'nda toprak erozyonu risk düzeyleri belirlenmiştir. Nihai değerlendirmede lambda katsayısı 1.0 olarak kabul edilmiş ve elde edilen WASPAS skorları sırasıyla AH-4 için 0.930, AH-1 için 0.497, AH-2 için 0.494, AH-3 için 0.487 ve AH-5 için 0.417 olarak hesaplanmıştır. Sarkar ve Gayen (2024) tarafından önerilen sınıflandırma yaklaşımı doğrultusunda, bu skorlar erozyon risk gruplarına ayrılmıştır. Buna göre, yalnızca AH-4, 0.827–0.930 aralığına karşılık gelen "Çok Yüksek" risk sınıfında yer alırken, diğer dört alt havza 0.417–0.519 aralığında kalarak "Çok Düşük" risk kategorisine dâhil edilmiştir (Çizelge 3). Bu sonuçlar, AH-4 topoğrafik, morfometrik ve çevresel faktörler açısından erozyona karşı en duyarlı bölge olduğunu ve acil müdahale gerektiren bir alan olarak önceliklendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya

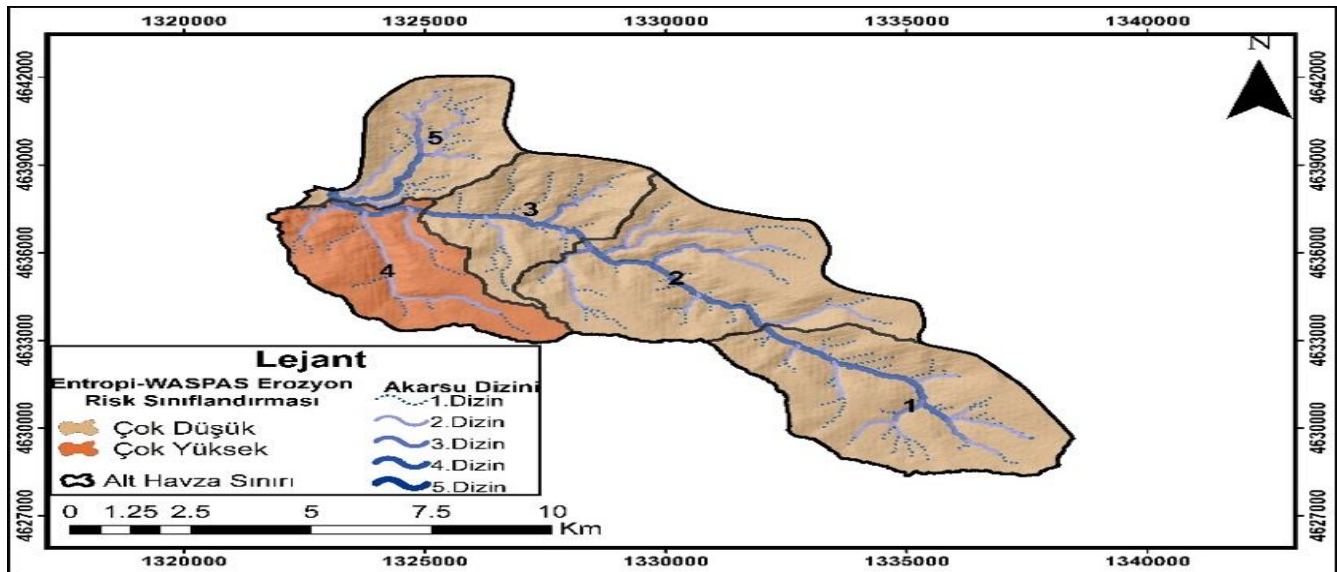
koymaktadır. Öte yandan, AH-1, AH-2, AH-3 ve AH-5 alt havzalarının görece düşük skorlar alması, bu alanların daha düşük erozyon riski taşıdığını, ancak izlenmeye devam edilmesi gereken potansiyel risk bölgeleri olduğunu göstermektedir. Bu tür çok kriterli sınıflandırmalar, sınırlı kaynakların etkin kullanımına olanak sağlamakta; öncelikli müdahale gerektiren alanların belirlenmesi ve sürdürülebilir havza yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine güçlü bir temel sağlamaktadır.

Çizelge 3. WASPAS metoduna göre erozyon risk sınıfları

Erozyon Risk Seviyesi	WASPAS Skoru
Çok Düşük	0.417–0.519
Düşük	0.519–0.622
Orta	0.622–0.724
Yüksek	0.724–0.827
Çok Yüksek	0.827–0.930

Bu sınıflandırma sonuçları, AH-4'ün erozyon riski bakımından en hassas alan olarak öncelikli müdahale gerektiren bir bölge olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Diğer alt havzalar ise görece daha düşük risk

düzeylerine sahip olup, izleme süreçlerine dâhil edilmesi ve orta vadeli havza yönetimi planları kapsamında değerlendirilmesi gereken alanlar olarak öne çıkmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Entropi-WASPAS erozyon risk sınıflandırması

Bu çalışmada, farklı  $\lambda$  senaryolarının uygulanması, yalnızca sabit bir karar modeline bağlı kalmaksızın, karar sürecine esneklik ve derinlik kazandıran bütüncül bir değerlendirme çerçevesi sunmuştur.  $\lambda$  katsayısının 0'dan 1'e kademeli olarak artırılmasıyla elde edilen skor değişimleri, alt havzaların özellikle çarpımsal hassasiyet bileşenlerine nasıl tepki verdiğini ortaya koymuş ve karar modeli bileşenleri arasındaki etkileşimlerin daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu yönüyle kullanılan yöntem, yalnızca mevcut erozyon durumunu nicel olarak ortaya koymakla kalmamış, aynı zamanda karar vericilere hangi alt havzaların öncelikli müdahale gerektirdiği, hangilerinin ise izlemeye alınarak uzun vadeli stratejilere dâhil edilmesi gerektiği konusunda da işlevsel bir rehberlik sunmuştur. Elde edilen bulgular, sınırlı kaynaklarla etkin planlama yapılabilmesi adına bölgesel düzeyde bilimsel temelli, güçlü bir karar destek mekanizması sağlayarak, sürdürülebilir havza yönetimi hedeflerine uygun uygulanabilir bir önceliklendirme yaklaşımı ortaya koymuştur.

Benzer şekilde, Sarkar ve Gayen (2024) tarafından Teesta Nehri Havzası'nda gerçekleştirilen çalışmada da WASPAS yöntemi kullanılarak alt havzalar erozyon duyarlılığına göre sınıflandırılmıştır. Söz konusu çalışmada,  $\lambda=1$  değeri esas alınarak belirlenen eşik değerler aracılığıyla alt havzalar "çok düşük" ten "çok yüksek"e kadar beş risk sınıfına ayrılmıştır. Elde edilen sonuçlar, alt havzaların toprak erozyonuna karşı gösterdiği farklı duyarlılık düzeylerini yansıtarak, koruma önlemlerinin planlanmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca, bazı alt havzaların mevcut durumda düşük risk profiline sahip olmasına rağmen, iklimsel koşullar ve arazi kullanımı gibi değişkenlerin zaman içinde bu risk düzeylerini etkileyebileceği vurgulanmış; bu nedenle bu bölgelerin düzenli olarak izlenmesi gerektiği önerilmiştir. Bulgular, karar vericilere erozyon riski yüksek olan alt havzaların belirlenmesi ve bu alanlarda öncelikli müdahale stratejilerinin geliştirilmesi konusunda yol gösterici bir çerçeve sağlamaktadır.

Benzer bir yaklaşım, Saouita ve ark. (2024) tarafından Tigrigra Havzası'nda gerçekleştirilen çalışmada da benimsenmiştir. Bu çalışmada, 26 alt havza için

hesaplanan WASPAS skorlarının 0.11 ile 0.47 arasında değiştiği ve bu değerlerin çoğunlukla "düşük" ve "orta" risk sınıflarında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu durum, havzada yaygın ancak yoğunluğu görece düşük erozyon süreçlerinin egemen olduğunu göstermektedir. Bulgular, WASPAS gibi ÇKKV yaklaşımlarının, özellikle yayılı erozyon risklerinin belirlenmesinde ve müdahale önceliklerinin sıralanmasında güçlü bir yöntemsel araç olduğunu göstermektedir. Bu yöntemlerin, havza ölçeğinde yürütülen risk analizleri ile stratejik planlama süreçlerinde güvenilir ve sistematik bir karar destek aracı sağladığı görülmektedir.

Akay ve ark. (2023) tarafından Türkiye genelinde yürütülen çalışmada, Entropi tabanlı WASPAS yöntemi ile bulanık kümeleme analizleriyle entegre edilmiştir. Böylelikle ormancılık faaliyetlerinin ve iklimsel değişkenlerin sediment üretimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Söz konusu çalışmada, özellikle odun üretimi ve orman yolu inşaatı gibi insan kaynaklı müdahalelerin sediment riskini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Entropi temelli ağırlıklandırma yöntemi sayesinde karar süreci nesnelleştirilmiş; WASPAS yöntemi ile sediment riskinin il düzeyinde detaylı biçimde haritalandığı belirtilmiştir. Bu çalışma, ÇKKV yaklaşımlarının çevresel risk analizlerinde yüksek çözünürlükte ve çok boyutlu değerlendirme olanağı sunduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile elde edilen bulgular hem yöntemsel yaklaşım hem de pratik uygulama açısından literatürdeki benzer araştırmalarla uyumlu bir çerçeve sunmakta ve Entropi-WASPAS temelli analizlerin havza yönetimi, doğal kaynak planlaması ve çevresel risk değerlendirmelerinde etkili, uygulanabilir araçlar olduğunu göstermektedir.

Çalışmada kullanılan Entropi-WASPAS tabanlı yöntem, veri girişi açısından esnek bir yapıya sahip olup farklı havzalara kolaylıkla uyarlanabilir. Bununla birlikte, yöntemin güvenilirliği kullanılan parametrelerin doğruluğu ve temsil gücü ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle yüksek çözünürlüklü DEM verileri, doğru akarsu ağı çıkarımı ve hassas morfometrik hesaplamalar modelin başarısı için kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, yöntem

farklı havzalara uygulanabilir; ancak veri duyarlılığı ve doğruluğu model performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Derindere Havzası'nın morfometrik özellikleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Beş alt havza toprak erozyonu riski bakımından, nesnel ağırlıklandırma temelli Entropi yöntemiyle belirlenen kriter ağırlıkları kullanılarak ÇKKV yaklaşımlarından biri olan WASPAS yöntemi ile önceliklendirilmiştir. Özellikle çatallanma oranı (Rb) ve akarsu uzunluk oranı (RI) gibi yüksek ağırlık değerleri, havzada yüzeysel akışın hızlandığını ve buna bağlı olarak erozyon riskinin arttığını göstermektedir. Benzer şekilde, bağıl rölyef (Rhp) ve engebelilik indeksi (Rn), yüksek eğimli alt havzalarda erozyon duyarlılığının belirgin biçimde arttığını ortaya koymuştur.

Entropi-WASPAS analizleri sonucunda, AH-4 "Çok Yüksek" erozyon riski taşıyan bölge olarak tanımlanmış, diğer alt havzalar ise "Çok Düşük" risk grubunda sınıflandırılmıştır. Bu önceliklendirme, havza yönetimi açısından etkili bir karar destek aracı olarak değerlendirilmelidir. Çünkü erozyonun kontrol altına alınması, yalnızca toprak kayıplarının azaltılmasıyla sınırlı kalmayıp; su kalitesinin korunması, sediment taşınımının azaltılması ve hidrolojik denge süreçlerinin sürdürülebilirliği açısından da kritik bir rol oynamaktadır. AH-4 gibi yüksek erozyon riskli alt havzalarda doğal bitki örtüsünün korunması ve iyileştirilmesi, erozyon kontrolünde öncelikli bir strateji olarak değerlendirilmelidir. Ayrıca, sürdürülebilir havza yönetimi kapsamında, öncelikli alt havzalarda uygulanacak erozyon kontrol önlemleri ve ekosistemleri koruma çalışmaları, yerel halkın yaşam kalitesinin korunmasına, tarımsal üretkenliğin sürdürülebilirliğine ve bölgesel su kaynaklarının güvenliğine doğrudan katkı sağlayacaktır. Bu nedenle, karar vericilerin sınırlı kaynakları etkin kullanabilmesi için bilimsel ve nesnel kriterlere dayalı önceliklendirme yaklaşımlarını benimsemeleri gerekmektedir. Çalışmada kullanılan  $\lambda$  parametresi ile yapılan duyarlılık analizleri, karar modelinin esnekliğini ve güvenilirliğini artırmış; farklı senaryolar altında risk sınıflarının tutarlılığını göstermiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, morfometrik analizlere ek olarak arazi kullanımı değişimleri, iklim senaryoları ve antropojenik etkilerin de entegre edildiği çok boyutlu karar destek modellerinin geliştirilmesi, havza yönetiminde etkinlik ve karar doğruluğunu güçlendirecektir. Bu bağlamda, orman ekosistemlerinin erozyon kontrolü ve su kalitesi üzerindeki stratejik rolü dikkate alınmalı; alan bazlı koruma ve rehabilitasyon programları geliştirilerek halkın katılımı ve çevresel farkındalık düzeyi artırılmalıdır. Bununla birlikte, erozyonun önlenmesi yalnızca orman ekosistemleriyle sınırlı değildir; iyi yönetilen meralar ve sürdürülebilir tarım uygulamaları da toprak kaybının azaltılmasında önemli katkılar sağlamaktadır. Dolayısıyla, havza ölçeğinde tüm alanların ormanlaştırılmasının her zaman mümkün ya da ekolojik açıdan uygun olmadığı gerçeği dikkate alındığında, doğal ekosistemlerin ve mevcut bitki örtüsünün korunması ile iyileştirilmesine dayalı bütüncül yaklaşımlar, erozyon kontrolünde daha kapsayıcı ve sürdürülebilir stratejiler sunmaktadır. Böylece, ekolojik sürdürülebilirlik ile sosyoekonomik dayanıklılık hedefleri eşzamanlı olarak desteklenebilecektir.

Bu çalışmanın temel sınırlılığı, yalnızca morfometrik parametrelere dayalı bir değerlendirme sunmasıdır. Arazi kullanımı ve örtüsündeki değişimler, yağış rejimi ve toprak özellikleri gibi faktörler modele dâhil edilmemiştir. Ayrıca, havza içindeki antropojenik etkiler (ör. tarım faaliyetleri, yol inşaatları, otlatma yoğunluğu) dikkate alınmamıştır. Bu durum, modelin farklı ekolojik ve sosyo-ekonomik koşullara sahip havzalara doğrudan genellenebilirliğini sınırlandırabilir. İleride yapılacak çalışmalarda bu faktörlerin entegre edilmesi, daha kapsamlı ve gerçekçi sonuçların elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, Entropi tabanlı WASPAS yaklaşımı ile yürütülen bu çalışma, doğal kaynakların korunması ve çevresel risklerin yönetimi bağlamında bilimsel temelli, nesnel ve uygulanabilir bir değerlendirme ve önceliklendirme modeli sunmuştur. Elde edilen bulgular, ÇKKV yöntemlerinin havza ölçeğinde uygulanabilirliğini ve karar vericiler için güçlü bir destek aracı niteliği taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- Akay AO, Şentürk E, Akgül M, Demir M (2023) Spatial assessment of sediment risk with integrated entropy-based WASPAS and fuzzy clustering methods in Turkey: impact of forestry activities and meteorological factors. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(10):1201. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11762-0>
- Akbar AQ, Mitani Y, Nakanishi R, Djameluddin I, Sugahara T (2024) Impact assessment of Digital Elevation Model (DEM) resolution on drainage system extraction and the evaluation of mass movement hazards in the upper catchment. *Geosciences*, 14(8):223. <https://doi.org/10.3390/geosciences14080223>
- Basavareddy Ayyanagowdar MS, Desai S, Satishkumar U, Reddy GS, Kumar M, Kumar P (2025) Multi-Criteria approach for watershed prioritization using morphometry, hypsometric, and erosion analysis in the Mandovi River Basin of the Western Coast of India. *Water Conservation Science and Engineering*, 10(2): 47. <https://doi.org/10.1007/s41101-025-00373-0>
- Chen P (2019) Effects of normalization on the entropy-based TOPSIS method. *Expert Systems with Applications*, 136:33–41. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.06.035>
- ÇŞİDM (2024) Ardahan ili 2023 Yılı Çevre Durum Raporu. Türkiye Cumhuriyeti Ardahan Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü. [https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/ardahan\\_cdr2023-20241230141207.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/ardahan_cdr2023-20241230141207.pdf), Erişim tarihi: 11.06.2025.
- Dede V, Zorlu K (2023) Geoheritage assessment with entropy-based WASPAS approach: an analysis on Karçal Mountains (Turkey). *Geoheritage*, 15(1):5. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00777-7>
- Dede V (2023) Ardahan iline ait bazı temel coğrafi özelliklerin ve arazi-toprak verilerinin coğrafi bilgi sistemleri ile değerlendirilmesi (Kuzeydoğu Anadolu). *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 11(2): 82-98. <https://doi.org/10.33409/tbbbd.1373909>
- Demir S, Dursun İ (2024) Assessment of pre- and post-fire erosion using the RUSLE equation in a watershed affected by the forest fire on Google Earth Engine: The study of Manavgat River Basin. *Natural Hazards*, 120(3):2499–2527. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06291-5>
- Dursun İ, Babalık AA (2023a) Burdur Gölü Havzasındaki morfometrik parametrelerin ve erozyon durumunun değerlendirilmesi. *Türkiye Ormanlık Dergisi*, 24(1):25–38. <https://doi.org/10.18182/tjf.1205157>
- Dursun İ, Babalık AA (2023b) Burdur Gölü Havzasına Ait Bir Alt Havzada GeoWEPP ve Geotekstil Yöntemi Kullanılarak Erozyon Durumunun Belirlenmesi. Tarım, Orman ve Su Bilimlerinde İleri ve Çağdaş Çalışmalar, Publisher: Duvar Yayınları.
- Dursun İ (2025) An integrated analytical approach to sub-watershed prioritization and erosion risk assessment in the Salda Lake Basin, Türkiye. *Environmental Earth Sciences*, 84(15):428. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12434-7>
- Dursun İ, Demir S, Başayığıt L, Babalık AA (2025) Post-fire erosion dynamics in the Dim River Basin: a remote sensing and Google Earth Engine approach. *Fire Ecology*, 21(1): 47. <https://doi.org/10.1186/s42408-025-00363-6>
- Dutal H (2022) Determination of the impact of forest fires on soil erosion risk by using the icona model: a case study of Ayvalı dam watershed. *Turkish Journal of Forest Science*, 6(2): 510-538. <https://doi.org/10.32328/turkjforsci.1167356>
- Ediş S, Aytaş İ, Özcan AU (2021) ICONA modeli kullanarak toprak erozyon riskinin değerlendirilmesi: Meşeli (Çubuk/Ankara) Havzası Örneği. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 7(1): 15-22. <https://doi.org/10.53516/ajfr.948519>
- Ediş S, Timur ÖB, Tuttu G, Aytaş İ, Göl C, Özcan AU (2023) Assessing the impact of engineering measures and vegetation restoration on soil erosion: a case study in Osmanlık, Türkiye. *Sustainability*, 15(15):12001. <https://doi.org/10.3390/su151512001>
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2004) Getting started with ArcGIS (Vol. 265). Redlands: Environmental Systems Research Institute Inc.
- Gelagay HS, Minale AS (2016) Soil loss estimation using GIS and remote sensing techniques: a case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2): 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.01.002>
- Goswami SS, Behera DK (2021) Implementation of Entropy-Aras decision making methodology in the selection of best engineering materials. *Materials Today: Proceedings*, 38:2256-2262. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.320>
- Kaya G (2005) Posof Çayı Havzası'nda yerleşmeler. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 5(1):71-96.
- Koçman A (1979) Yukarı Kura Nehri Havzası'nın fiziksel coğrafyası. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Öztürk D (2009) Risk analizi, CBS tabanlı çok ölçütlü karar analizi yöntemleri ile sel ve taşkın duyarlılığının belirlenmesi: Güney Marmara Havzası örneği. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pamukoğlu Y, Babalık AA, Dursun İ (2023) An Assessment of Climate Change And Carbon Management. In N.Y. Bozdoğan & A.M. Bozdoğan (Eds.), *Academic Research and Reviews in Agriculture, Forestry and Aquaculture Sciences*, pp.284-297. Ankara: Platanus Publishing.
- Pan S, Dey S, Yadav V, Biswas R (2025) Prioritizing sub-watersheds for soil and water resource conservation using multi-analytical approaches: a study of Shilabati River Basin, WB, India. *Journal of Water and Climate Change*, (jwc2025633). <https://doi.org/10.2166/wcc.2025.633>
- Rocha J, Duarte A, Fabres S, Quintela A, Serpa D (2022) Influence of DEM resolution on the hydrological responses of a terraced catchment: an exploratory modelling approach. *Remote Sensing*, 15(1):169. <https://doi.org/10.3390/rs15010169>
- Salvi S, Tiwari H, Bobade S (2025) Morphometric evaluation of Manjara watershed, Latur district, Maharashtra, India: a GIS approach. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(3):106. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-01862-w>
- Saouita J, El-Hmadi A, Ousmana H, Aouragh MH, Iallamen Z, Boufala MH, Ragragui H, Kasse Z, El Ouali A, Jaddi H (2024) Use of Geomatics and Multi-Criteria Methods to Assess Water Erosion in the Tigriga Watershed (Azrou Region, Morocco). In: *BIO Web of Conferences*, 115:01007. EDP Sciences.
- Sarkar P, Kumar P, Vishwakarma DK, Ashok A, Elbeltagi A, Gupta S, Kuriqi A (2022) Watershed prioritization using morphometric analysis by MCDM approaches. *Ecological Informatics*, 70:101763. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101763>
- Sarkar P, Gayen SK (2024) Application of Entropy-AHP and WASPAS methods for prioritizing the sub watersheds of Teesta River basin in terms of soil erosion susceptibility. *Discover Environment*, 2(1):135. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00163-w>
- Shannon CE (1948) A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, 27: 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>

- Shekar PR, Mathew A, Hasher FFB, Mehmood K, Zhran M (2025) Towards sustainable development: ranking of soil erosion-prone areas using morphometric analysis and multi-criteria decision-making techniques. *Sustainability*, 17(5):2124. <https://doi.org/10.3390/su17052124>
- Singh MC, Yousuf A, Prasad V (2021) Morphometric and principal component analysis-based prioritization of reservoir catchments using geospatial techniques for land and water conservation aspects in North-West India. *Arabian Journal of Geosciences*, 14:1-22. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06822-z>
- Strahler AN (1964) Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In: Handbook of Applied Hydrology (Ed: Chow, V.), McGraw Hill, New York, pp. 9-76.
- Tsallis C (2022) Entropy. *Encyclopedia*, 2(1):264-300. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010018>
- Weslati O, Serbaji MM (2024) Spatial assessment of soil erosion by water using RUSLE model, remote sensing and GIS: a case study of Mellegue watershed, Algeria–Tunisia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(1):14. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12163-z>
- Yüksel EE, Özalp M, Yıldırım S (2016) Using a geospatial interface (Geowepp) to predict soil loss, runoff and sediment yield of Kokolet Creek watershed. *International Journal of Ecosystems and Ecology Sciences (IJEES)*, 6(3):437–442.
- Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J, Zakarevicius A (2012) Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 122(6):3-6. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810>