

Araştırma Makalesi/Research Article

## Yarı Humid Ekolojik Koşullar Altında Toprak Erozyon Duyarlılık Çalışmalarında Fuzzy-Analitik Hiyerarşi Süreci Yaklaşımı

Sena Pacci<sup>1</sup> 

Muhammet Emin Safflı<sup>1</sup> 

Orhan Dengiz<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Samsun  
\*Sorumlu yazar: pacciis@outlook.com

Geliş Tarihi: 03.04.2023

Kabul Tarihi: 19.05.2023

### Öz

Bu çalışmada yarı humid ekolojik koşullara sahip Çorum il sınırı içerisinde yer alan mikro havza içerisinde dağılım gösteren toprakların, erozyona karşı duyarlılıklarının USLE-K ve Fuzzy-AHS ile belirlenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, mikro havzada 33 adet toprak örnekleme yapılmış ve toprakların erozyona duyarlılıkları üzerinde etkili olan organik madde, kum, silt, kil, hacim ağırlığı ve hidrolik iletkenlik faktörleri gibi bazı fiziko-kimyasal toprak özellikleri kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, toprak erozyonunu yakından etkilemekte olan USLE-K faktörü belirlenmiş ve dağılım haritaları oluşturularak her iki yaklaşım karşılaştırılmıştır. Elde edilen her iki yaklaşıma ait konumsal dağılım haritaları incelendiğinde USLE-K dağılımına göre 0.030–0.430 ve Fuzzy-AHS dağılımına göre ise 0.178-0.785 aralıklarında olmak üzere, havzanın batı ve kuzey kesimlerinde dağılım gösteren toprakların daha duyarlı oldukları belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Toprak erozyonu, erodibilite, USLE-K, Fuzzy-AHS

### Fuzzy-Analitic Hierarchy Process Approach in Soil Erodibility Studies under Semi-Humid Ecological Conditions

#### Abstract

The study aims to determine and compare the susceptibility of soils in a micro basin located in the Çorum province with semi-arid ecological conditions to erosion. To achieve this goal, two methods, USLE-K and Fuzzy-AHP, are used. The study collected 33 soil samples from the micro basin and analyzed various physico-chemical soil properties that can affect the susceptibility of soils to erosion. These properties include organic matter, sand, silt, clay, bulk density, and hydraulic conductivity. The USLE-K factor was also determined to estimate the average annual soil loss caused by rainfall and other erosive factors. The analysis of the spatial distribution maps created using both the USLE-K and Fuzzy-AHP approaches showed that the soils distributed in the western and northern parts of the micro basin were more susceptible to soil erosion compared to other areas.

**Keywords:** Soil erosion, erodibility, USLE-K, Fuzzy-AHP

#### Giriş

Toprak erozyonu; tarım alanlarının sürdürülebilir kalkınmasını etkilediği gibi; çevreyi, ekonomiyi ve toplumu da önemli düzeyde etkileyen, küresel bir sorundur. Toprak erozyonu ve toprağın erozyona karşı hassaslığın bir kavramı olan toprak erodibilitesi (aşınabilirliği) 1920'lerden beri araştırmacılar tarafından incelenmekte, küresel ısınma ve insan nüfusunun artışının etkisi ile daha da artan bir sorun olarak vurgulanmaktadır (Kajembe ve ark., 2005). Toprak erozyonu, toprakların üretkenliğini ve verimliliğini azalmasının yanı sıra, su rezervuar alanları ve su yollarının çökmesi ve artan kirlilik gibi çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceği gibi, bitki besini bakımından zengin olan verimli üst toprağın üretkenlik fonksiyonunun kaybı olmasına da yol açabilmektedir. Toprak erozyonu süreci, rüzgar veya su kuvvetlerinin etkisi ile toprak tanecikleri arasındaki yapının bozulup birbirinden ayrılmasını ve başka bir yere taşınmasını içerir. Bu süreç toprakların organik madde içeriği, tekstürü, eğim ve yağış gibi çeşitli toprak parametresi ve çevresel faktörlere bağlı olarak

meydana gelmektedir (Dede ve ark., 2022). Bu nedenle Nciizah ve Wakindiki (2015) toprak kaynaklarını yönetmek ve toprak bozulmasını önlemek için anlaşılması çok önemli olan toprak erodibilitesi kavramını toprağın erozyona ne kadar duyarlı olduğunun bir ölçüsü olarak tarif etmektedir.

Toprakların erozyona duyarlılığını değerlendirmek amacı ile geçmişten günümüze kadar birçok nitel ve nicel toprak erozyon hassasiyet modelleri geliştirilmiştir (Demirağ Turan ve ark., 2022). Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (USLE) de toprağın erodibitesini değerlendirmek amacı ile yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir (Devatha ve ark., 2015). Denklem, yağış ve yüzey akışının neden olduğu kabuk ve akıntı erozyonu nedeniyle yıllık ortalama toprak kaybı oranını tahmin eder. USLE, yağış erodivitesi, toprak aşınabilirliği (erodobilite), eğim uzunluğu ve dikliği, bitki örtüsü ve erozyon kontrol uygulamaları dahil olmak üzere bir dizi faktörü dikkate alır (Alewell ve ark., 2019). Son zamanlarda, toprak yönetimi uygulamalarının toprak erozyonu üzerindeki etkilerini ve toprakların duyarlılıklarını daha iyi açıklamak için USLE'nin özellikle toprak aşınabilirlik faktörü olarak bilinen (USLE-K) güncellenmiş farklı versiyonu ve yaklaşımları geliştirilmiştir (Sadeghi ve ark., 2004). Araştırmacıların yapmış oldukları birçok araştırmalarda USLE-K kullanılarak, toprak erozyonunun daha doğru anlaşılabilmesi ve toprak erozyon riskinin azaltılması, toprakların sağlığının, kalitesinin ve üretkenliğinin korunması çalışmalarında bilinçli kararlar alınabileceğini belirtilmiştir (Lu ve ark., 2004; Gitas ve ark., 2007; Prasannakumar ve ark., 2012; Wang ve ark., 2016).

Diğer bir yandan doğada meydana gelen bu olayların hızlı ve doğru değerlendirilebilmesi için uzaktan algılama (UA) ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) de aktif olarak kullanılmaktadır (Güzin ve Karaca, 2021; Jafari ve Abedi, 2021). Ancak, UA ve CBS bu doğrultuda kullanılmadan önce veri setleri üzerinde yapılması gereken iyileştirme süreçleri bulunmaktadır. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımı, UA ve CBS' de veri seti hazırlama, birleştirme ve çalışma alanı özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılan en yaygın yöntemdir (Akbari ve ark., 2021). ÇKKV yaklaşımlarından biri olan Bulanık Analitik Hiyerarşik Süreç (Fuzzy-AHS) ise son zamanlarda bu alanda birçok araştırmacı tarafından kullanılmaya başlamıştır (Mosadeghi ve ark., 2015; Asakereh ve ark., 2017; Rajasekhar ve ark., 2019; Shao ve ark., 2020; Kılıç ve ark., 2022; Dengiz ve ark., 2023). Fuzzy-AHS yöntemi yetmişli yıllarda Saaty (1977) tarafından ortaya atılan Analitik Hiyerarşik Süreç (AHS) yöntemindeki yetersizlik ve bulanıklık sebebi ile ilk olarak Van Laarhoven ve Pedrycz (1983) tarafından üçgen üyelik fonksiyonlarını tanımlanan bulanık oranlarla karşılaştırarak ortaya atılmıştır (Deng, 1999; Pala, 2016). Fuzzy-AHS'de kesin değerler kullanmak yerine karar vericiyi de kapsayan bir değer aralığı kullanılmaktadır (Kuswandari, 2004). AHS ve Fuzzy-AHS yöntemleri arasında bir değerlendirme yapıldığı takdirde, Fuzzy-AHS'nin klasik AHS'ye göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur (Triantaphyllou ve Lin 1996; Günden ve Miran, 2008).

Bu çalışmada, yarı kurak ekolojik koşullara sahip Çorum il sınırı içerisinde yer alan mikro havza içerisinde dağılım gösteren toprakların, erozyona karşı duyarlılıklarının USLE-K ve Fuzzy-AHS olmak üzere iki farklı yaklaşımla belirlenmesi ve bunların dağılım haritalarının oluşturularak karşılaştırılması amaçlanmıştır.

## **Materyal ve Yöntem**

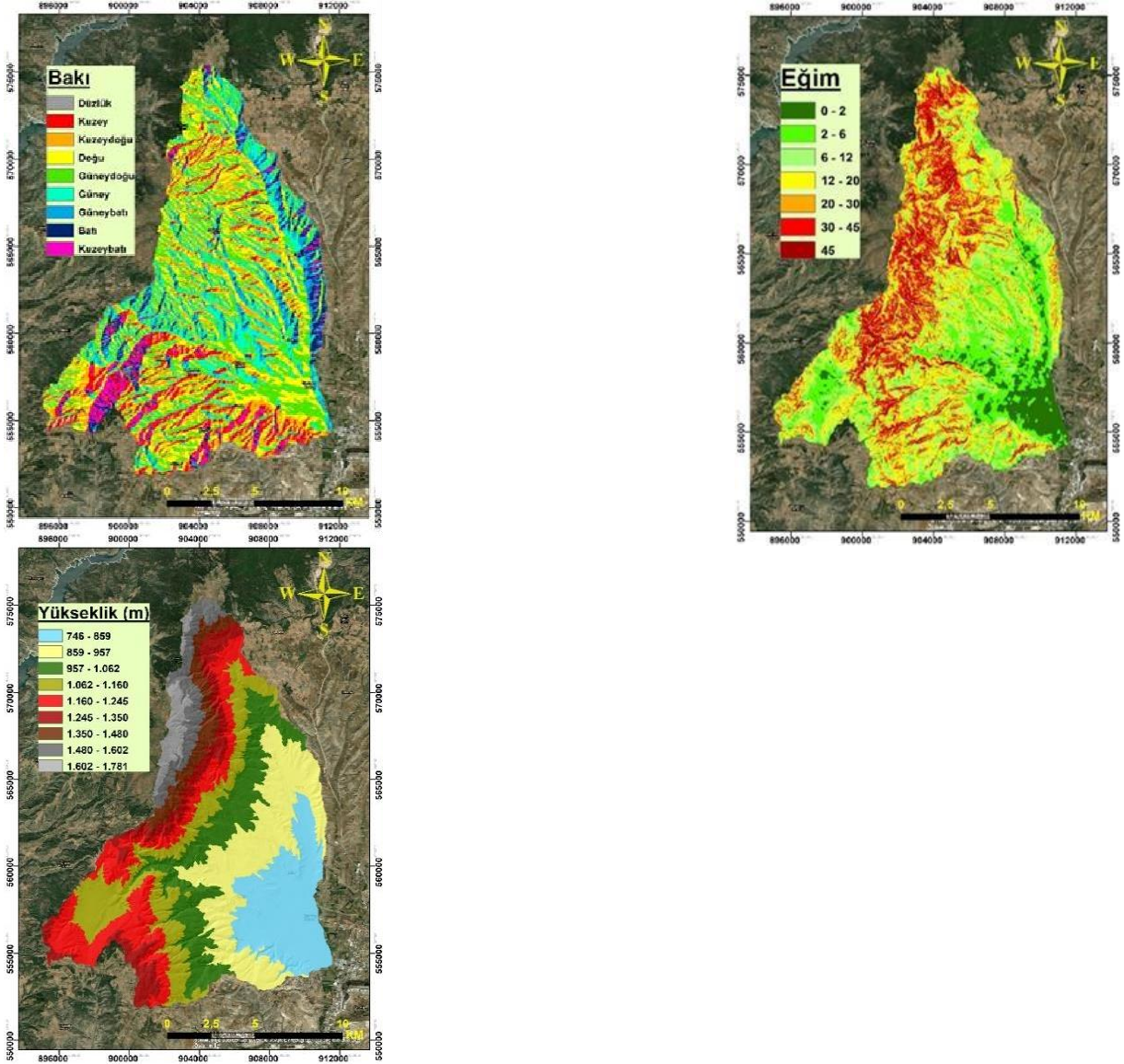
### **Çalışma alanının genel özellikleri**

Bu araştırma, Türkiye'nin kuzey kesiminde yer alan ve Karadeniz Bölgesinin orta kesimlerinde bulunan Çorum ilindeki mikro havza içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Bu mikro havza 645000-663000 Doğu ve 44850000-4510000 Kuzey koordinatları arasında yer almaktadır (WGS84, Zone36-N, Universal Transverse Mercator-UTM-m). Çalışma alanına ait yüzey alanı miktarı ise 21001.7 ha olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanına ait lokasyon haritası  
Figure 1. Location map of the study area.

Çalışma alanına ait en yüksek ve en düşük yükseklik verileri 746 m ve 1781 m olarak belirlenmiştir. Kuzey batı kesimlerinde yer alan bölgelerde, yükseklik 1600 metrelere kadar çıkarken eğim derecesi ise (>45%) olarak belirlenmiştir. Çalışma alanının güneydoğu kesimleri ise (0%-6%) arasında eğime bağlı değişiklik göstermektedir. Çalışma alanı, genel olarak bakı açısından güneydoğu ve güneybatı yönlü olarak dağılım gösterirken bazı güney kesimlerde ki kısımların ise kuzey ve kuzeybatı yönlü bakıya sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2).



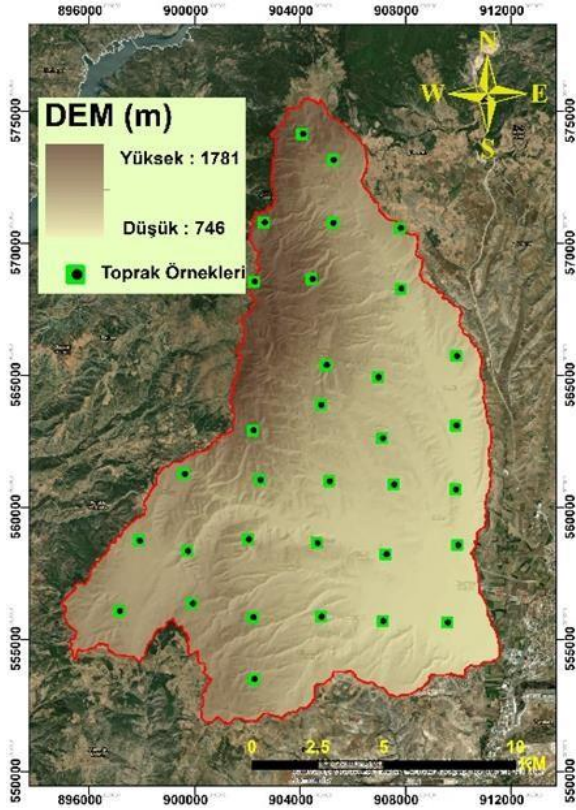
Şekil 2. Çalışma alanına ait yükseklik, eğim ve baki haritaları  
Figure 2. Elevation, slope and aspect maps of the study area

Çalışma alanına ait meteoroloji verileri, Çorum Meteoroloji İstasyonundan elde edilen uzun aralıklı verilerden (1981-2021) elde edilmiştir. Elde edilen verilerin sonucunda yıllık ortalama yağışın 443.7 mm ve sıcaklığın ise 10.7°C olduğu elde edilmiştir. Bölük'e (2016) göre, çalışma alanı Erinç'in Türkiye'deki makro iklim bölgelerine göre 25.21 puanlık yağış aktivite indeksi ile yarı nemli sınıfa girmektedir.

## Yöntem

### Toprak örnekleme ve analizler

Bu çalışmaya yönelik olarak, Çorum'da bulunan mikro havza sınırları içerisinde grit yöntemine göre koordinatları belirlenen noktalardan 0-20 cm derinlikten 33 adet toprak örneği alınmıştır. Topraklar, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için ön işlemlerden (kaba parçalar ve bitki kalıntıları uzaklaştırılmış, laboratuvar koşullarda hava kuru hale getirilen topraklar tahta tokmakla dövülerek 2 mm elekten elenmiştir) geçirilmiş ve analize hazır hale getirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Toprak örnekleme deseni  
Figure 3. Soil sampling pattern

Toprak örneklerine ait parçacık (kil, silt, kum) dağılımı (Bouyoucos, 1962), silindir yöntemine göre hacim ağırlığı (Blake, 1986), Walkey Blake yöntemine göre organik madde içeriği (Jackson, 1958), hidrolik iletkenlik (Klute ve Dirksen, 1986) özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların en büyük, en küçük, standart sapma, varyasyon katsayısı, ortalama, çarpıklık ve basıklık değerleri şeklindeki tanımlayıcı parametreleri ile Spearman korelasyon analizleri SPSS programı (IBM 2015) yardımı ile hesaplanmıştır.

#### Toprak aşınabilirliği (USLE-K):

Evrensel Toprak Kayıp Denklemi (Universal Soil Loss Equation -USLE ), erozyonu etkileyen başlıca faktörlerden yağış, toprağın erozyon özelliği, eğim durumu, bitki örtüsü ve toprak koruma değerlerinin arasındaki ilişkilerin çarpılması ile elde edilen sonuca dayanmaktadır (Wischmeier ve Smith, 1978). Toprak erozyon duyarlılığı USLE-K faktör ile ilgili eşitlik aşağıda verilmiştir (Eşitlik 1)

$$K = 1/100 \{2.1 \times 10^{-4} \times (12 - OM) \times [SI \times (SA + SI)]^{1.14} + 2.5 \times (PE - 3) + 3.25 \times (ST - 2)\} \quad (1)$$

K: Toprak erodibilitesi ( $t \text{ ha h}^{-1} \text{ MJ mm}^{-1}$ ), OM: Toprak organik maddesi, SI: silt içeriği, SA: kum içeriği, PE: geçirgenlik sınıfı, ST: strüktür kodu

#### Bulanık Kümeler Kuramı:

Gerçek hayatta, birçok durum veya olgunun kesin tanımını yapmak mümkün değildir. Bunun temel nedeni olarak ise gerçek hayattaki yüksek derecedeki belirsizliklerdir. Bulanık kümeler kavramı ilk olarak Zadeh tarafından 1965 yılında, matematiksel yöntemlerin gerçek hayattaki birçok sistemle uğraşırken yetersiz kalmasından memnun olmaması sonucunda ortaya çıkmıştır. Bulanık kümeler kavramı, belirsiz ve muğlak olan sorunların çözüme kavuşması için ortaya konulmuştur. Zadeh'ten sonra bulanık mantık ve bulanık kümeler kuramı pek çok alanda uygulanmaya ve gelişmeye başlamıştır.

“Muhtemelen öyledir, pek açık değil, çok iyi, çok muhtemel, vasat” gibi birçok farklı kalıbı günlük hayatımızda kullanmaktayız. Bulanık kümeler kavramına göre, küme içerisinde bulunan her elemanın, klasik küme kavramında olduğu şekilde “kümeye ait” ya da “kümeye ait değil” olarak, bir

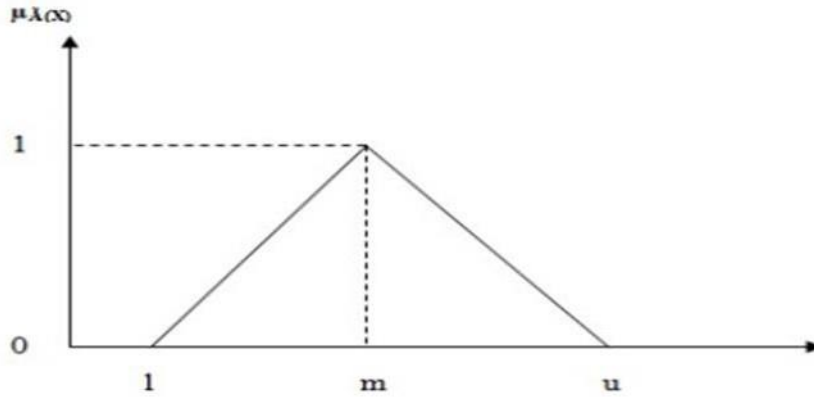
başka ifadeyle 0 veya 1 şeklinde değil, bir dereceye kadar üye olarak görülür. X bir evrensel küme olmak kaydıyla,  $\tilde{A}$  bulanık kümesini tanımlayan üyelik fonksiyonu  $\mu_{\tilde{A}}(x):R \rightarrow [0,1]$  şeklinde tanımlanır.

Bulanık sayılar, reel sayıların bir bulanık alt kümesidir ve “güvenlik aralığı” fikrinin gelişmiş halini ifade ederler. Dubois ve Prade’e göre bulanık sayılar şu özelliklere sahip olmalıdır (Dubois ve Prade,1983). Üyelik fonksiyonu  $\mu_{\tilde{A}}(x):R \rightarrow [0,1]$  olan “ $\tilde{A}$ ” bulanık sayısı için;

1.  $\mu_{\tilde{A}}(x)$ , Reel sayılar kümesinden 0,1 kapalı aralığında bir sürekli fonksiyondur.
2.  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  bir konveks bulanık altkümedir.
3.  $\mu_{\tilde{A}}(x_0) = 1$  yapan bir  $x_0$  sayısı vardır.

Üyelik fonksiyonu Eşitlik (2)’de görülen  $\tilde{A}$  bulanık sayısı, bir üçgenel bulanık sayıdır (ÜBS). Burada  $l \leq m \leq u$ ’dur ve  $l$  en küçük olası değeri,  $m$  en umut verici değeri,  $u$  ise en büyük olası değeri göstermektedir. Bir ÜBS genellikle  $(l,m,u)$  şeklinde gösterilir. Şekil 4’de  $\tilde{A}$  üçgenel bulanık sayısının üyelik fonksiyonu görülmektedir.

$$\mu_{\tilde{A}} = \begin{cases} 0 & , x < l \\ (x-l)/(m-l) & , l \leq x \leq m \\ (u-x)/(u-m) & , m \leq x \leq u \\ 0 & , x > u \end{cases} \quad (2)$$



Şekil 4. Üçgen Üyelik Fonksiyonu  
Figure 4. Triangle Membership Function

Özellikle çok ölçütlü bulanık karar verme problemlerinde yaygın bir biçimde kullanılan üçgenel bulanık sayılarla temel aritmetik işlemler şu şekildedir:

$\tilde{A}_1 = (l_1, m_1, u_1)$  ve  $\tilde{A}_2 = (l_2, m_2, u_2)$  iki üçgen bulanık sayı olsun;

$$\text{Toplama} \quad \tilde{A}_1 \oplus \tilde{A}_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (3)$$

$$\text{Çarpma} \quad \tilde{A}_1 \otimes \tilde{A}_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad (4)$$

$$\text{Bölme} \quad \tilde{A}_1 / \tilde{A}_2 = (l_1 / l_2, m_1 / m_2, u_1 / u_2) \quad (5)$$

$$\text{Negatif} \quad -\tilde{A}_1 = (-l_1, -m_1, -u_1) \quad (6)$$

$$\text{Tersi} \quad 1 / \tilde{A}_1 = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1) \quad (7)$$

### Bulanık analitik hiyerarşi süreci (Fuzzy-AHS):

Analitik hiyerarşi süreci (AHS) 1977 yılında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen birçok ölçütlü bir yöntemdir. AHS çok kriterli karar vermede, grupların veya bireylerin önceliklerini dikkate alan, nitel ve nicel değişkenleri bir arada değerlendirmeye imkân sunan bir yöntemdir (Dağdeviren ve ark., 2004). AHS yönteminin en büyük handikabı ise belirsizlik ve karar verme durumları ile başa çıkamamasıdır (Deng,1999). AHS, yöntemi gerçek hayatta birçok karar verme probleminin çözümünde etkin bir biçimde kullanılmasına rağmen, ikili karşılaştırmalar yaparken kesin sayılar kullanmasından dolayı eleştirilmektedir (Dağdeviren, 2007). Bu nedenle, bulanık analitik hiyerarşi sürecine yönelik ilk çalışma üçgen bulanık sayılar kullanılarak, bulanık oranları karşılaştıran Van Laarhoven ve Pedrycz (1983) tarafından gerçekleştirilmiştir. Chang, (1996) tarafından yapılan çalışma

ile Bulanık Analitik Hiyerarşi Sürecinin (B-AHS) ikili karşılaştırma ölçeği için üçgen bulanık sayıları ve ikili karşılaştırmaların yapay mertebe değerleri için mertebe analizi yöntemini kullanarak B-AHS'nin ele alınmasında yeni bir yaklaşım ortaya konmuştur. Bulanık küme teorisinin çok ölçütlü analizlere uygulandığı ilk girişim olarak Bellman ve Zadeh (1970) tarafından yapılan çalışma öne çıkmaktadır.

Çeşitli problem tiplerini çözmek için birçok B-AHS metodu kullanılmaktadır. Bunlar;

1. Chang'ın Bulanık AHS Yöntemi (Chang, 1996)
2. Liou ve Wang'ın Yöntemi (Liou & Wang, 1992)
3. Abdel-Kader'ın Yöntemi (Abdel-Kader & Dugdale, 2001)

Bu çalışmada Chang (1996) tarafından geliştirilmiş olan B-AHS metodu kullanılmıştır. Nedeni ise bu metodun diğer B-AHS metodlarına göre adımları daha basit olmakla birlikte zaman tasarrufu sağlaması ve az miktarda hesaplama gerektirmesidir. Chang'ın yaklaşımına göre ikili karşılaştırmalar üçgensel bulanık sayılarla temsil edilmektedir. Bulanık sayıların tercih edilmesi ile birlikte tahmine bağlı dezavantajlar giderilmek istenmiştir. Chang'ın yöntemine göre, her bir ölçüt alınır ve her bir hedef için mertebe analizi uygulanır. Böylece her bir ölçüt için m tane mertebe analiz değerleri elde edilir. Bu değerler şu şekilde gösterilir.

Chang tarafından ileri sürülen genişletilmiş analize dayalı B-AHS yöntemine göre izlenen yöntem aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  bir nesnel kümesi ve  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  bir amaçlar kümesi olsun. Genişletilmiş analiz yöntemine göre, her bir nesne bir amacı gerçekleştirmek üzere ele alınır. Genişletilmiş ifadesi ile bu nesnenin amacı ne kadar gerçekleştirdiği ifade edilmektedir. Böylece, m tane genişletilmiş analiz değeri elde edilmiş olup şu şekilde gösterilir.

$$M_{gi}^1, M_{gi}^2, M_{gi}^3, \dots, M_{gi}^m \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Buradaki tüm  $M_{gi}^j$  (j=1,2,...,m) değerleri üçgensel bulanık sayılardır (Çizelge 2). Chang'ın B-AHS adımları aşağıdaki adımlarla özetlenebilir.

1. Adım: i. nesne için bulanık büyüklük değeri şu şekilde tanımlanır:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (8)$$

Burada  $S_i$ , i. amacın sentez değerini  $M_{gi}^j$  her bir amaca yönelik genişletilmiş değeri ifade etmektedir.

$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$  değerini elde etmek için m adet genişletilmiş analiz değeri bulanık toplama işlemi için aşağıdaki gibi bir matris ile uygulanır:

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left( \sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (9)$$

Daha sonra  $\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$  elde etmek için  $M_{gi}^j$  (j=1,2,...,m) değerlerinin bulanık toplam işlemi şu şekilde uygulanır:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left( \sum_{j=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \right) \quad (10)$$

Daha sonra ise vektörün tersi hesaplanır.

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (11)$$

2. Adım:  $M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$  olayının olabilirlik derecesi

$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))]$  şeklinde tanımlanır ve aşağıdaki ifade ile açıklanır.

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{yükseklik } (M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) =$$

$$\begin{cases} 1 & , m_2 \geq m_1 \\ 0 & , l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & , \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (12)$$

Burada d,  $\mu_{M_1}$  ve  $\mu_{M_2}$  arasındaki en yüksek D kesişim noktasının ordinatıdır.  $M_1$  ve  $M_2$ 'yi karşılaştırmak için

$V(M_1 \geq M_2)$  ve  $V(M_2 \geq M_1)$  değerlerinin her ikisine de ihtiyaç duyulur.

3. Adım: Konveks bir bulanık sayının k adet bulanık sayıdan,  $M_i$  ( $i=1,2,\dots,k$ ), daha büyük olasılırlık derecesi şöyle tanımlanır:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ ve } (M \geq M_2) \text{ ve } \dots \text{ ve } (M \geq M_k)] \\ = \min V(M \geq M_i), i = 1, 2, 3, \dots, k. \quad (13)$$

Bu durumda  $S_j$ 'ler için şu varsayımlar yapılmıştır:

$$k = 1, 2, \dots, n; k \neq j \text{ için } d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k).$$

Daha sonra ağırlık vektörü,  $A_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )'nin n elemandan oluştuğu şu şekilde ifade edilir:

$$W'(d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))$$

4. Adım: Normalizasyon ile normalize edilmiş  $W$ 'nin bulanık bir sayı olmadığı

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \text{ ifadesi ile gösterilmektedir.}$$

Table 1. Fuzzy significance scale

Çizelge 1. Bulanık önem ölçeği

Rakamsal Değer	Dilsel İfade	Üçgen Bulanık Sayı Değeri	Karşılık Üçgen Bulanık Sayı
1	Eşit	(1,1,1)	(1,1,1)
2	Zayıf Üstünlük	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)
3	Fena Değil	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)
4	Tercih Edilir	(3,4,5)	(1/5,1/4,1/3)
5	İyi	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)
6	Oldukça İyi	(5,6,7)	(1/7,1/6,1/5)
7	Çok İyi	(6,7,8)	(1/8,1/7,1/6)
8	Mutlak	(7,8,9)	(1/9,1/8,1/7)
9	Mükemmel	(8,9,9)	(1/9,1/9,1/8)

### Standart skorlama fonksiyonu

Toprak erozyon duyarlılık hesaplaması yapılırken farklı parametreler bir arada değerlendirilmektedir. Bu çalışmada toprakların erozyon duyarlılık açısından ele alınan 6 adet fiziksel ve kimyasal toprak indikatörleri daha önceki yapılmış birçok çölleşme ve arazi bozulumu açısından toprak kalite çalışmaları kapsamında dikkate alınan indikatörler seçilmiştir (Wischmeier ve Smith, 1978; Lal, 1988; Pieri, 1989; Kanar ve Dengiz, 2015; Celilov ve Dengiz, 2019). Parametrelere ait çok çeşitli birimler olması nedeniyle birimsizleştirme işlemine standart skorlama fonksiyonu (SSF) (Karlen et al., 2014; Andrews et al., 2002) kullanılmıştır. En çok istenen toprak işlevselliğinin düşük ve yüksek değerlerle ilişkilendirildiği toprak erozyon duyarlılık ilişkilerine göre iki tür parametre ayrılır (Liebig ve ark., 2001): İlk olarak, "Daha iyidir" işlevi (More is better-MB), kil, organik madde (OM) ve hidrolik iletkenlik (HI). İkincisi, "Daha az iyidir" işlevi (Less is better-LB), toprakların erozyona duyarlılık rolleri nedeniyle kum, silt, hacim ağırlığı (HA). SSF denklemleri (Andrews ve ark., 2002) göstergeler için Çizelge 2'de verilmiştir.



Table 2. Standard scoring functions for soil parameters  
Çizelge 2. Toprak parametreleri için standart puanlama fonksiyonları

Parametreler	FT*	L	U	SSF Equation**
Hacim ağırlığı	LB	6.90	8.56	
Silt	LB	4.45	70.67	$f(x) = \left\{ 1 - 0.9 \times \frac{0.1}{U-L} \times \frac{x-L}{U-L} + 0.1 \right\}$ $L \leq x \leq U$
Kum	LB	14.67	80.41	$1$ $x \geq U$
Organik madde	MB	0.45	6.31	
Kil	MB	5.63	63.98	$f(x) = \left\{ 0.9 \times \frac{0.1}{U-L} \times \frac{x-L}{U-L} + 0.1 \right\}$ $L \leq x \leq U$
Hidrolik iletkenlik	MB	20.00	120.00	$1$ $x \geq U$

\* FT, fonksiyon türü; MB, daha fazla daha iyidir; LB, daha az daha iyidir

\*\* SSF standart puanlama fonksiyonu; x, gösterge değeri; f(x) 0,1 ile 1 arasında değişen gösterge puanı; L ve U, sırasıyla alt ve üst eşik değeri.

### Toprak erozyon duyarlılığı ve konumsal dağılımının belirlenmesi

Parametrelerin önem seviyeleri belirlendikten sonra, Toprak erozyon duyarlılık haritalandırmak için Ağırlıklı Doğrusal Kombinasyon (weighted linear combination - WLC) yöntemi kullanılmıştır. WLC, basit toplamlı ağırlıklandırma (simple additive weighting - SAW), ağırlıklı toplama, ağırlıklı doğrusal ortalama ve ağırlıklı bindirme olarak da bilinmektedir (Malczewski and Rinner, 2015). WLC yöntemi aşağıdaki eşitliğe göre toprak erozyon duyarlılık değerleri hesaplanır:

$$ED_i = \sum_{k=1}^l w_k a_{ik} \quad (14)$$

$ED_i$ , i noktasındaki toprak erozyon duyarlılık değeri;  $w_k$ , k parametrenin göreceli önem seviyesini,  $a_{ik}$  bölgesinin k parametre altındaki standart değerini ve l toplam parametre sayısını temsil etmektedir (Elalfy et al., 2010).

Çalışma alanının fuzzy-erozyon duyarlılık dağılım haritasını ve ele alınan toprak parametrelerini dağılım haritalarını üretebilmek için enterpolasyon metotlarından yararlanılmıştır. Enterpolasyon teknikleri mesafeye bağlı değişimleri ve nokta verilerin haritalandırılması işleminde kullanılır (Goovaerts, 1998; Mulla ve McBratney, 2000). Alansal dağılımın ortaya konması amacı ile en fazla kullanılan enterpolasyon metotlarından Ters mesafe ağırlıklandırma (IDW), Radyal tabanlı fonksiyon (RBF) (Spline) deterministik metotlar ile stokastik metotlardan da (temelde Kriging olarak da bilinmektedir) doğal (ordinary), evrensel (universal), basit (simple) kriging metotları bu çalışmada kullanılmıştır. Metotların karşılaştırılmalarında ölçülen değerler ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi anlamlandırabilmek ve en uygun metodu belirlemek için literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Arslan ve ark., 2012; Taşan ve Demir, 2017; Çelik ve Dengiz, 2018). En fazla kullanılan metotlar ise hata kareler ortalaması karekökü (RMSE), ortalama mutlak hatadır (MAE). Bu çalışma için hata kareler ortalaması karekökü seçilerek, enterpolasyonda kullanılan on beş metot (Ters Mesafe Ağırlıklandırma (IDW); 1, 2, 3 kuvvetleri, Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF); Thin Plate Spline, Completely Regularized Spline, Spline With Tension, Kriging; Doğal (Ordinary), Basit (Simple), Evrensel (Universal) karşılaştırılmıştır. En düşük hata kareler ortalaması karekökü değerini veren yöntem, en uygun yöntem olarak değerlendirilmiştir. Hata kareler ortalaması karekökü hesaplanmasında şu işlem kullanılmaktadır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Z_i^* - Z_i)^2}{n}} \quad (15)$$

RMSE: karekök ortalama hata,  $Z_i$  tahmin edilen değer,  $Z_i^*$  gözlenen değer, ve n örnek sayısı.

**Bulgular ve Tartışma****Toprakların bazı fiziko-kimyasal özellikleri**

Çalışma alanından alınan 33 adet toprak örneğinde incelenen fiziksel ve kimyasal özelliklerin ve bu özelliklerden hesaplanan USLE-K ve fuzzy-erozyon duyarlılığı parametrelerinin tanımlayıcı istatistikleri Tablo 3’de verilmiştir. Çalışma alanı topraklarının kum içerikleri %28.42 ile %79.43 arasında değişmekte olup, ortalama %46.91, silt içerikleri %12.62 ile %54.88 arasında değişmekte ve ortalama %25.92, kil içeriği ise %3.88 ile %54.18 arasında değişim göstermekte ve ortalama %27.16 olup, genellikle tekstür sınıfı kumlu killi tındır.

Toprakların erozyona duyarlılığı açısından önemli bir parametre olan organik madde içeriği; alan içerisinde en düşük değer %0.968, en yüksek değer %5.310 ve ortalama %2.523 olmakla beraber çalışma alanı içerisinde oldukça farklı dağılımlar sergilemektedir. Wilding’in (1985) %15’den az ise düşük, %15-35 arası ise orta ve %35’den fazla ise yüksek olmak üzere sınıflandırdığı değişkenlik katsayısına (CV) göre, çalışma alanının toprak özelliklerinden hacim ağırlığı değeri ortalamaya göre <%15 değişkenlik ile “düşük” varyasyon göstermiştir. Silt, kum ve fuzzy-erozyon duyarlılığı değerleri ise %15-35 değerleri arasında değişkenlik ile “orta” varyasyon gösterirken; organik madde, kil, hidrolik iletkenlik ve USLE-K değerleri ise ortalamaya göre %35 daha büyük değişkenlik göstererek yüksek varyasyon sergilemiştir. Çalışma alanında incelenen tüm toprak parametreleri istatistiksel olarak sağa çarpık, pozitif bir dağılım göstermektedir. Sola çarpık, negatif bir dağılımda özellikler ortalamadan daha yüksek düzeylerde dağılım sıklığına sahipken sağa çarpık, pozitif olan durumda bunun tam tersi bir durum gerçekleşmektedir (Pacci, 2023). Çarpıklık katsayısı en yüksek normalden en uzak dağılım gösteren özellik hidrolik iletkenlik olarak belirlenmiştir. Hİ değerinin sağa çarpık ve sola yığılımlı bir dağılım sergileme sebebi, toprakların hidrolik iletkenlik düzeyinin büyük bir kısmının ortalamadan (1.802) daha düşük seviyede olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, incelenen tüm parametreler içerisinde organik madde, silt, hidrolik iletkenlik, USLE-K ve erozyon duyarlılığı parametrelerinin eğrileri normal dağılıma göre daha dik (+) bir dağılım gösterirken kil, kum ve hacim ağırlığı değerleri basık (-) bir dağılım sergilemektedir.

Table 3. Descriptive statistics of soil physico-chemical properties, USLE-K values and erosion susceptibility values

Çizelge 3. Toprakların fiziko-kimyasal özellikleri. USLE-K değerleri ve erozyona duyarlılık değerlerine ait tanımlayıcı istatistik değerleri

Tanımlayıcılar	Ort.	S.S	V.K*	Varyans	E.D.D	E.Y.D	Çar.**	Bas.
%OM	2.523	1.008	39.952	1.017	0.968	5.310	0.771	0.404
%Kil	27.160	13.399	49.333	179.554	3.887	54.189	0.019	-0.823
%Silt	25.922	8.793	33.920	77.322	12.625	54.888	1.682	4.377
%Kum	46.917	14.118	30.091	199.335	28.425	79.431	0.752	-0.204
HA (g/cm <sup>3</sup> )	1.440	0.062	4.305	0.004	1.34	1.57	0.042	-0.787
Hİ	1.802	2.214	122.863	4.905	0.051	10.601	2.265	6.725
USLE-K	0.150	0.121	80.666	0.015	0.022	0.454	1.116	0.074
F-ED	0.528	0.153	28.977	0.024	0.152	0.809	0.287	0.261

Ort.: Ortalama, S.S.: Standart sapma, VK.: Varyasyon katsayısı, EDD: En Düşük Değer, EYD: En Yüksek Değer, Çar:

Çarpıklık, Bas: Basıklık, OM: Organik Madde, HA: Hacim Ağırlığı, Hİ: Hidrolik İletkenlik, ED: Erozyon Duyarlılığı

\*Değişkenlik Katsayısı: < 15 = Düşük Değişkenlik, 15-35 = Orta Değişkenlik, >35 = Yüksek Değişkenlik

\*\*Çarpıklık: < | $\mp$ 0,5 | = Normal Dağılım, 0,5- 1,0 = Veri setine karakter dönüşümü uygulanır. ÇK > 1,0 → Logaritma dönüşümü uygulanır.

**Erozyon duyarlılık özelliği ile toprak parametreler arasındaki korelasyon analizi**

Toprak özellikleri ile USLE-K ve fuzzy-ED arasında ikili ilişkilerin değerlendirildiği Spearman korelasyon analizi sonuçları Tabla 4’de verilmiştir. Buna göre, çalışma alanı topraklarında incelenen parametrelerin birbirleri ile arasında 11 adet istatistiksel açıdan anlamlı ( $p < 0.05$ ;  $p < 0.01$ ) ilişkiler belirlenmiştir. Kum ile hacim ağırlığı (0.554\*\*) kum ile hidrolik iletkenlik (0.832\*\*) ve hidrolik iletkenlik ile hacim ağırlığı arasında (0.417\*\*) %1 düzeyinde pozitif yönlü ilişki olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, hacim ağırlığı ve organik madde (-0.725\*\*), kil ile kum (-0.806\*\*), kil ile hacim ağırlığı (-0.463\*\*) ve kil ile hidrolik iletkenlik (-0.969\*\*) arasında ise %1 düzeyinde negatif yönlü ilişki tespit edilmiştir. Toprakların hidrolik iletkenliği özelliği; toprak sıkışması, toplam porozite, tekstür ve strüktür gibi toprak özellikleri hakkında bilgi vermesi (Öztek ve ark., 2007),

erozyona karşı toprakların yüzey akışa geçmesinin değerlendirilmesinde kullanılan bir faktördür. Kum içeriği yüksek olan topraklarda yüksek hacim ağırlığı, organik madde içeriği yüksek olan topraklarda ise düşük hacim ağırlığı ile topraklarda makro gözeneklilik düzeylerinin artışı görülmektedir (Bırol Y., 2010). Bu durum, toprakların daha iyi drene olmasını, hidrolik iletkenliğin artmasını sağlamaktadır (Türkmen ve Erdem, 2020). Ayrıca, organik madde ile erozyon duyarlılığı (-0.398\*) ve kum ile silt arasında (-0.344\*) %5 düzeyinde negatif ilişki tespit edilmiştir. Toprakların organik madde içeriklerindeki artış agregatlaşmayı desteklemekte ve bu durum toprakların erozyona karşı duyarlılıklarını azaltmaktadır (Dede ve ark., 2022).

Table 4. Correlation between soil physico-chemical properties, USLE-K values and erosion susceptibility values  
Çizelge 4. Toprakların fiziko-kimyasal özellikleri, USLE-K değerleri ve erozyona duyarlılık değerleri arasındaki korelasyon

	Fuzzy-ED	USLE-K	OM	Kil	Silt	Kum	HA	Hİ
Fuzzy-ED	1.00							
USLE-K	0.200	1.00						
OM	-0.398*	-0.263	1.00					
Kil	-0.189	0.140	0.027	1.00				
Silt	0.027	0.232	-0.061	-0.084	1.00			
Kum	0.216	-0.271	-0.049	-0.806**	-0.344*	1.00		
HA	0.257	0.003	-0.725**	-0.463**	-0.037	0.554**	1.00	
Hİ	0.102	-0.173	0.045	-0.969**	-0.011	0.832**	0.417**	1.00

\*. Korelasyon 0.05 derecesinde önemlidir.

\*\* .Korelasyon 0.01 derecesinde önemlidir.

Fuzzy-ED: Bulanık erozyon duyarlılığı, USLE-K: Evrensel Toprak Kaybı Denklemi toprak aşınabilirlik faktörü, OM: Organik madde, HA: Hacim ağırlığı, Hİ: Hidrolik iletkenlik.

#### Fuzzy- analitik hiyerarşi sürecinin uygulanması

F-AHS ile Çorum il sınırları içerisinde yer alan mikro havzaya yönelik erozyon duyarlılığına dair çalışma gerçekleştirilmiştir. F-AHS analizlerinde birden çok kriterin birbirleriyle ikili karşılaştırma yapılarak uzmanların görüşlerinin değerlendirilmesi sonucunda ortak bir sonuca varılmıştır. Çalışmada mikro havzaya yönelik erozyon duyarlılığı ile ilgili olan 6 adet kriter belirlenmiştir (Tablo 5.) Bu kriterler mikro havzaya yönelik olarak erozyon duyarlılığını ortaya koymak amacıyla belirlenmiştir.

Table 5. Pairwise comparison matrix  
Çizelge 5. İkili karşılaştırma matrisi

	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6
C.1	<b>1</b>	1	2	3	3	2
C.2	1	<b>1</b>	1/2	2	1/2	3
C.3	1/2	2	<b>1</b>	3	1	2
C.4	1/3	1/2	1/3	<b>1</b>	1	1/2
C.5	1/3	2	1	1	<b>1</b>	1/3
C.6	1/2	1/3	1/2	2	3	<b>1</b>

C.1: Organik Madde, C.2: Hacim Ağırlığı, C.3: Kil, C.4: Kum, C.5: Silt, C.6: Hidrolik İletkenlik

Erozyon duyarlılığın belirlenmesi ve ikili karşılaştırma matrisinden elde edilen veriler ile birlikte bulanık üçgensel matris oluşturulmuştur (Tablo 6). Üçgensel matristen elde edilen veriler Chang' i n geliştirmiş olduğu F-AHS sistemine göre verilen eşitliklerin yardımıyla hesaplanmıştır.

Table 6. Fuzzy triangular comparison matrix

Çizelge 6. Bulanık üçgensel karşılaştırma matrisi

	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6
C.1	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,2,3)
C.2	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)	(2,3,4)
C.3	(1/3,1/2,1)	(1,2,3)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,2,3)
C.4	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)
C.5	(1/4,1/3,1/2)	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)
C.6	(1/3,1/2,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/3,1/2,1)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,1,1)

C.1: Organik Madde, C.2: Hacim Ağırlığı, C.3: Kil, C.4: Kum, C.5: Silt, C.6: Hidrolik İletkenlik

Bulanık üçgensel karşılaştırma matrisinin elde edilmesinin ardından erozyon duyarlılığı için gerekli olan normalize ağırlık hesaplaması yapılmıştır (Tablo 7). Kriterlerimiz göz önüne alındığı zaman erozyon duyarlılığı açısından organik maddenin en yüksek değeri (0.317) alması ve buna ek olarak kil parametresinin (0.264) ikinci sırada ki değeri aldığını görmekteyiz. İkisinin bir araya gelerek toprakların erozyona karşı direncini artıran koşulları sağlaması ile ilgilidir. En düşük değerleri alan hidrolik iletkenlik (0.033) ve kum miktarı parametresinin (0.038) ile son sıraları almasının sebebi olarak erozyon duyarlılığını negatif yönlü etkilemeleri göz önüne alınarak değerlendirilmiştir.

Table 7. Normalized weight values of criteria

Çizelge 7. Kriterlerin normalize ağırlık değerleri

Parametreler	Normalize Ağırlık Vektörü
Organik Madde	0.317
Hacim Ağırlığı	0.224
Kil	0.264
Kum	0.038
Silt	0.123
Hidrolik İletkenlik	0.033

### Toprak parametreleri ve erozyon duyarlılık faktörlerin konumsal dağılımları

Toprak parametreleri ve erozyon duyarlılık faktörlerin (Fuzzy-ED ve USLE-K) konumsal dağılımları alanlarının belirlenmesinde kullanılan on beş adet enterpolasyon modellerinden en düşük RMSE değerleri dikkate alınarak en uygun olanları belirlenmiş ve Tablo 8’te verilmiştir. Ayrıca parametrelere ve erozyon duyarlılık faktörlerine ait dağılım haritaları ise Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir. Buna göre, hacim ağırlığı konumsal dağılım haritalarında en düşük RMSE değeri (0.052) Radial Tabanlı Fonksiyona ait SWT semi varyogramında, diğer ele alınan tüm parametreler de ise Kriginge ait Simple kriging modelinin küresel, üssel ve Gaussian semi varyogram modellerinde belirlenmiştir.

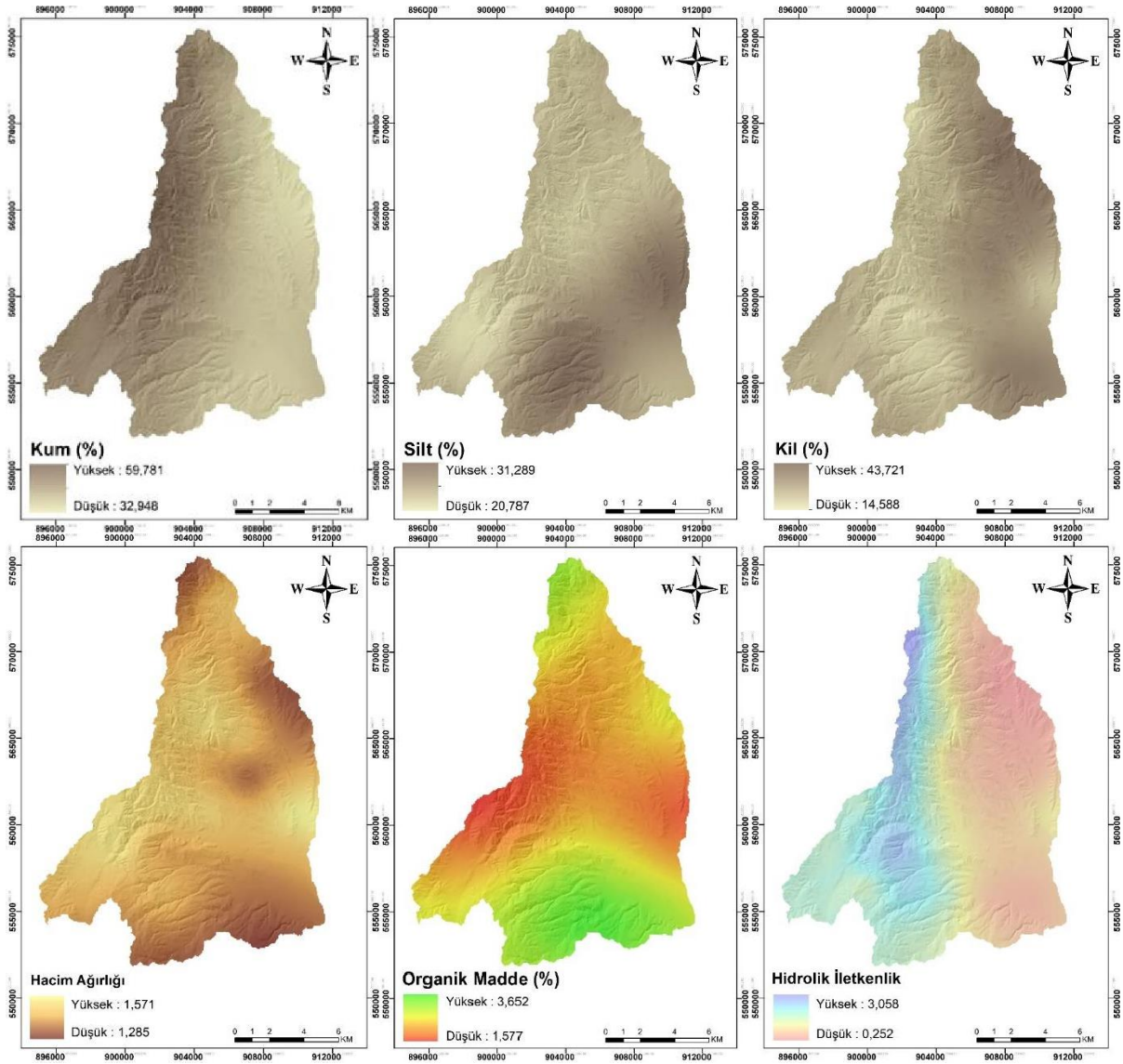
Table 8. RMSE values of the most appropriate semivariogram models of physico-chemical, erosion sensitivity factor values of soils.

Çizelge 8. Toprakların fiziko-kimyasal, erozyon duyarlılık faktör değerlerine ait en uygun semi varyogram modellerin RMSE değerleri

EM	SM	RMSE Değerleri							
		OM	Kil	Silt	Kum	HA	Hİ	Fuzzy-ED	USLE-K
IDW	1	0.9950	13.1363	8.7312	12.6095	0.0589	2.2858	0.1516	0.1265
	2	1.0192	12.8833	8.6440	12.7608	0.0577	2.3030	0.1551	0.1322
	3	1.0594	12.8961	8.7413	13.2088	0.0575	2.3448	0.1615	0.1389
RBF	CRS	1.0038	12.6024	8.6158	12.5224	0.0522	2.3030	0.1544	0.1368
	SWT	0.9957	12.5981	8.6141	12.3784	<b>0.0520</b>	2.2867	0.1524	0.1336
	TPS	1.1760	15.6348	10.3531	16.5641	0.0520	2.8945	0.2017	0.1884
Kriging	Ordinary								
	Sph.	0.9635	12.6412	8.4030	12.2136	0.0557	2.3130	0.1502	0.1220
	Exp.	0.9667	12.6713	8.4643	12.4470	0.0555	2.3532	0.1504	0.1217
	Gau.	0.9557	12.5168	8.5266	12.0560	0.0557	2.3068	0.1500	0.1217
	Simple								
	Sph.	0.9455	12.2519	<b>8.2650</b>	11.9673	0.0561	<b>2.2382</b>	0.1478	0.1202
	Exp.	0.9590	<b>12.4816</b>	8.3199	12.4757	0.0562	2.2965	0.1488	<b>0.1198</b>
	Gau.	<b>0.9388</b>	12.2585	8.2560	<b>11.7684</b>	0.0560	2.2493	<b>0.1473</b>	0.1200
	Universal								
	Sph.	0.9635	12.6412	8.4030	12.2136	0.0557	2.2522	0.1502	0.1220
	Exp.	0.9667	12.6713	8.4643	12.4470	0.0555	2.2609	0.1504	0.1217
	Gau.	0.9557	12.5168	8.5266	12.0560	0.0557	2.2443	0.1500	0.1217

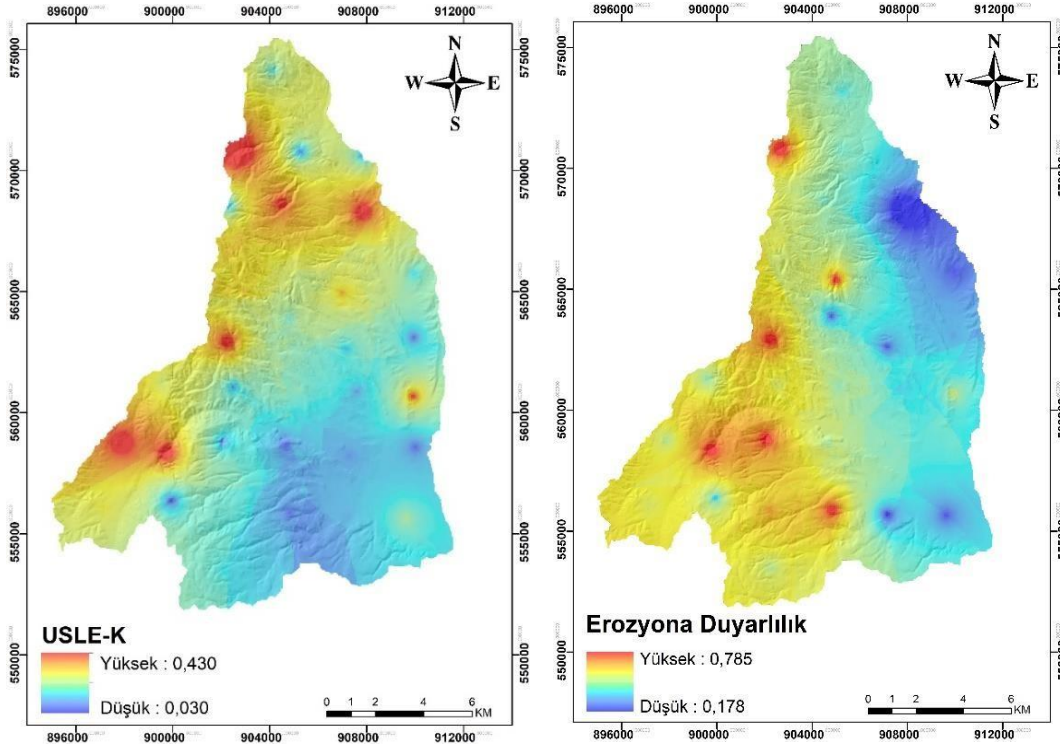
E.M: Enterpolasyon Modeller, SM: Semi varyogram Modeller, HA: Hacim ağırlığı, Hİ: Hidrolik İletkenlik, RBF: Radyal tabanlı fonksiyon, IDW: Ters mesafe ağırlıklandırma, Shp: Küresel, Exp: Üssel, Gau: Gaussian

Alan içerisinde dağılım gösteren toprak örneklerine ait oluşturulan dağılım haritalar incelendiğinde, bölgedeki kum, silt, kil dağılımları havzanın kuzeydoğusu ve güneyinde toprak bünyesindeki kil miktarının arttığı gözlenmektedir. Aynı şekilde, havzanın batısında kum miktarında artış gözlenmiş ve bu durum hacim ağırlığının alanın doğusunda artmasına neden olmuştur. Öte yandan, bu durum kuzeydoğu, güneybatı ve alanın iç kısımlarında hacim ağırlığının düşmesine sebep olmuştur. Kil ve organik maddenin bu bölgelerde düşük olması hacim ağırlığının düşmesine sebep olmuş olabilir. Hacim ağırlığının yüksek olduğu bölgeler ve organik maddenin de etkisiyle hidrolik iletkenliği etkilediği de gözlenmektedir. Bu da organik maddenin etkisiyle makro gözeneklerin artması sonucuyla hidrolik iletkenliğin artmasına etkiye bulunduğu söylenebilir (Şekil 5).



Şekil 5. Bölgeye ait kum, silt, kil, hacim ağırlığı, organik madde, hidrolik iletkenlik haritaları  
Figure 5. Sand, silt, clay, bulk density, organic matter, hydraulic conductivity maps of the region

USLE-K ve fuzzy-erozyon duyarlılığı ait konumsal dağılımlarını gösteren haritaları Şekil 6'da verilmiştir. USLE-K için havza içerisinde güney ve güneydoğu kesimlerinde düşük değerler ile dağılım gösterdiği gözlenirken, batı ve kuzey kesimlerinde yüksek değerli dağılımlar elde edilmiştir. Ancak bu durum fuzzy-erozyon duyarlılığı için bir miktar değişiklik göstermekte olup, dağılıma ait haritayı incelediğimiz zaman doğu, kuzeydoğu ve güneydoğu kesimlerinde düşük değerler alırken batı ve güneybatı kesimlerinde yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir. Fakat her iki yaklaşımda da havzanın doğu ve güneydoğu kesimleri toprakların erozyona karşı duyarlılıkları düşük, batı ve kuzeybatı kesimlerin daha hassas olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. USLE- K ve erozyon duyarlılığı haritaları  
Figure 6. USLE-K and erosion susceptibility maps

### Sonuç

Bu çalışma, yarı nemli ekolojik şartlara sahip Çorum ili sınırları içerisinde yer alan mikro havza topraklarının, erozyona duyarlılıkları yönünden etkili olabilen parametreler dikkate alınmış ve fuzzy-AHS yaklaşımı ile hassaslaştırılmış ağırlık değerleri ile birlikte erozyona karşı duyarlılığı belirlenmiştir. Bu amaçla, organik madde, kum, silt, kil, hacim ağırlığı ve hidrolik iletkenlik faktörleri gibi toprakların bazı fiziko-kimyasal toprak özellikleri kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, toprak erozyonunu yakından etkilemekte olan USLE-K faktörü belirlenmiş ve her iki yaklaşım karşılaştırılmıştır. Elde edilen her iki yaklaşıma ait konumsal dağılım haritaları incelendiğinde, bölgenin kuzeybatı ve güneybatı kesimlerinde, eğimin yüksek olduğu dağlık alanlarda dağılım gösteren toprakların erozyona daha duyarlı oldukları ortaya konulmuştur.

İncelenen toprakların çoğunluğu kumlu sınıfta yer almakla beraber, alan içerisinde kil bünyeli topraklar da vardır. Çalışma alanından alınan toprak örneklerinin organik madde içerikleri de göz önüne alındığı zaman toprak bünyesindeki bu değişkenlik, çalışma alanından alınan örneklerin hacim ağırlıklarında da farklılıklar meydana getirmektedir. Toprakta organik madde içeriği fazla olan noktalarda kabuk oluşumunun azalması ve agregatlaşmanın artması beklenmektedir. Bu durumun alanda erozyona duyarlılığı azalttığı ve aynı zamanda USLE-K faktörünün diğer noktalara göre daha düşük olmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Benzer şekilde kil miktarının yüksek olduğu bölgelerde USLE-K faktör değeri düşük bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen bulguların erozyon konusunda yapılacak çalışmalara önemli bilimsel katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

### Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

### Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### Kaynaklar

Abdel-Kader, M.G., Dugdale, D., 2001. Evaluating investments in advanced manufacturing technology: A fuzzy set theory approach. The British Accounting Review. 33(4): 455-489.

- Akbari, M., Memarian, H., Neamatollahi, E., Jafari Shalamzari, M., Alizadeh Noughani, M., Zakeri, D., 2021. Prioritizing policies and strategies for desertification risk management using MCDM–DPSIR approach in northeastern Iran. *Environment, Development and Sustainability*. 23: 2503-2523.
- Alewel, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P., 2019. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and water conservation research*. 7(3): 203-225.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Science Society of America*. 68(6): 1945-1962.
- Arslan, H., Cemek, B., Güler, M., Yıldırım, D., 2012. Evaluation of the spatial distribution of the exchangeable sodium percentage (ESP) with different interpolation methods. II. National Irrigation and Agricultural Structures Symposium, 24-25 May, İzmir.
- Asakereh, A., Soleymani, M., Sheikhdavoodi, M. J., 2017. A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Solar Energy*. 155: 342-353.
- Bellman, R.E., Zadeh, L.A., 1970. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*. 17(4): 141-164.
- Biröl, Y., 2010. Fındık zuruf kompostunun sıkıştırılmış killi tınlı bir toprağın fiziksel özellikleri üzerine etkisi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Blake, G., Hartge, K. H., 1986. Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*. 5: 363-375.
- Bouyoucos, G. J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*. 54(5): 464-465.
- Celilov, C., Dengiz, O., 2019. Erozyon Duyarlılık Parametrelerinin Farklı Enterpolasyon Yöntemleriyle Konumsal Dağılımlarının Belirlenmesi: Türkiye, Ilgaz Milli Park Toprakları. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*. 6(3): 242-256.
- Chang, D.Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHS. *European Journal of Operational Research*. 95(3): 649-655.
- Çelik, P., Dengiz, O., 2018. Akselendi Ovası Tarım Topraklarının Temel Toprak Özellikleri ve Bitki Besin Elementi Durumlarının Belirlenmesi ve Dağılım Haritalarının Oluşturulması, *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*. 5:1, 9-18
- Dağdeviren, M., 2007. Bulanık analitik hiyerarşi prosesi ile personel seçimi ve bir uygulama. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 22(4): 791-799.
- Dağdeviren, M., Akay, D., Kurt, M., 2004. İş değerlendirme sürecinde analitik hiyerarşi prosesi ve uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 19(2): 131-138.
- Dede, V., Dengiz, O., Demirağ Turan, İ., Zorlu, K., Pacci, S., Serin, S., 2022. Ilgaz Dağı periglasyal şekilleri üzerinde oluşmuş toprakların erozyon duyarlılıklarının belirlenmesi ve yapay sinir ağı (YSA) ile tahmin edilmesi. *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*. 47: 1-22.
- Demirağ Turan, İ., Özkan, B., Dengiz, O., 2020. Bulanık mantık analitik hiyerarşik süreç (BAHS) ile Sinop İli erozyon duyarlılığının mekansal dağılımının belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*. (75): 57-70.
- Dengiz, O., Saflı, M. E., Pacci, S., 2023. Ilgaz Dağı Milli Parkı doğal çam orman arazilerinin çölleşme risk değerlendirmesinde Bulanık-AHP Yaklaşımı ve yapay zekâ kullanımı. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*. 10(1): 75-90.
- Deng, H., 1999. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison. *International journal of approximate reasoning*. 21(3): 215-231.
- Devatha, C. P., Deshpande, V., Renukprasad, M. S., 2015. Estimation of soil loss using USLE model for Kulhan Watershed, Chattisgarh-A case study. *Aquatic Procedia*. 4: 1429-1436.
- Dubois, D., Prade, H., 1983. Ranking fuzzy numbers in the setting of possibility theory. *Information sciences*. 30(3): 183-224.
- Gitas, I. Z., Douros, K., Minakou, C., Silleos, G. N., Karydas, C. G., 2007. Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSeL eProc*. 8:40–52.
- Goovaerts, P., 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*. 27: 315-334.
- Günden, C., Miran, B., 2008. Bulanık analitik hiyerarşi süreci kullanılarak çiftçi kararlarının analizi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. 45(3): 195-206.
- Güzin, A., Karaca, Ö., 2021. Çerçi ve Murt Deresi (Fethiye-Muğla) taşkın duyarlılık alanlarının CBS ile çok kriterli karar verme analizi kullanılarak haritalanması. *Yerbilimleri*. 42(1): 121-143.
- Jafari, R., Abedi, M., 2021. Remote sensing-based biological and nonbiological indices for evaluating desertification in Iran: Image versus field indices. *Land Degradation & Development*. 32(9): 2805-2822.
- Kanar, E., Dengiz, O., 2015. Madendere Havzası Topraklarında Arazi Kullanım/Arazi Örtüsü ile Bazı Erozyon Duyarlılık İndeksleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*. 2(1): 15-27.



- Kajembe, G. C., Julius, F., Nduwamungu, J., Mtakwa, P. W., Nyange, D. A., 2005. Impact of indigenous-based interventions on land conservation: a case study of a soil conservation and agroforestry project, Arumeru District, Tanzania. *Land Degradation & Development*. 16(3): 311-325.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., Schuman, G. E., 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial) *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61 (1): 4-10.
- Klute, A., Dirksen, C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*. 5: 687-734.
- Kılıc, O. M., Ersayın, K., Gunal, H., Khalofah, A., Alsubeie, M. S., 2022. Combination of fuzzy-AHP and GIS techniques in land suitability assessment for wheat (*Triticum aestivum*) cultivation. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 29(4): 2634-2644.
- Kuswandari, R., 2004. Assesment of Different Methods for Measuring the Sustainability of Forest Management. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands.
- Lal, R., 1988. *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society, Lucie Press, Florida.
- Liebig, M.A., Varvel, G., Doran, J., 2001. A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Soil and Crop Management*. 93(2): 313-318.
- Liou, T. S., Wang, M. J. J., 1992. Ranking fuzzy numbers with integral value. *Fuzzy Sets and Systems*. 50(3): 247-255.
- Lu, D., Li, G., Valladares, G. S., Batistella, M., 2004. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. *Land Degrad Dev*. 15(5):499-512.
- Mosadeghi, R., Warnken, J., Tomlinson, R., Mirfenderesk, H., 2015. Comparison of Fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning. *Computers, Environment and Urban Systems*. 49: 54-65.
- Mulla, D. J., McBratney, A. B., 2000. Soil Spatial Variability A-321-A-351. *Handbook of Soil Science*, Malcolm E. Sumner (Ed. In Chief) CRS Press, Florida.
- Nciizah, A. D., Wakindiki, I. I., 2015. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 61(6): 827-842.
- Öztekin, T., Cemek, B., Brown, L., 2007. Pedotransfer functions for the hydraulic properties of layered soils. *GOÜ. Ziraat Fakültesi Dergisi*. 24(2): 77-86.
- Pacci, S., 2023. Ayrıçığı tarımı yapılan toprakların SMAF modeli ile toprak kalite indislerinin belirlenmesi: Tokat-Zile, Belpınar köyü örneği. Yüksek lisans tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalı.
- Pala, O., 2016. Bulanık analitik hiyerarşi prosesi ve meslek seçiminde uygulanması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*. 18(3): 427-445.
- Pieri, C., 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de trente années de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. IRAT, Paris, 444 pp.
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., Geetha, N., 2012. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geosci Front*. 3(2):209-215.
- Rajasekhar, M., Raju, G. S., Sreenivasulu, Y., Raju, R. S., 2019. Delineation of groundwater potential zones in semi-arid region of Jilledubanderu river basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India using fuzzy logic, AHP and integrated fuzzy-AHP approaches. *HydroResearch*. 2: 97-108.
- Saaty, T. L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*. 15(3): 234-281.
- Saaty, T. L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York.
- Sadeghi, S. H. R., Singh, J. K., Das, G., 2004. Efficiency of annual soil erosion models for storm-wise sediment prediction: a case study. *Agric Eng Int CIGR. J* 13:1-14.
- Shao, Z., Huq, M. E., Cai, B., Altan, O., Li, Y., 2020. Integrated remote sensing and GIS approach using Fuzzy-AHP to delineate and identify groundwater potential zones in semi-arid Shanxi Province, China. *Environmental Modelling & Software*. 134: 104868.
- Taşan, M., Demir, Y., 2017. Çeltik yetiştiriciliği yapılan arazilerde demir ve mangan içeriklerinin alansal dağılımının farklı enterpolasyon yöntemleri ile belirlenmesi. *Anadolu Tarım Bilim. Derg.* 32: 64-73.
- Triantaphyllou, E., C. Lin., 1996. Development and evaluation of five fuzzy multiattribute decision-making methods. *International Journal of Approximate Reasoning*. 14: 281-310.
- Türkmen, F., Erdem, M., 2020. Çırçıp deresi havzasında RUSLE modeli ile erozyon riskinin değerlendirilmesi, Turnasuyu-Ordu. *Akademik Ziraat Dergisi*. 9(1): 129-136.
- Van Laarhoven, P. J., Pedrycz, W., 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy sets and Systems*. 11(1-3): 229-241.
- Walkley, A., Black, I. A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*. 37(1): 29-38.

- Wang, B., Zheng, F., Guan, Y., 2016. Improved USLE-K factor prediction: a case study on water erosion areas in China. *International Soil and Water Conservation Research*. 4(3): 168-176.
- Wilding, L. P., 1985. Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In *Soil spatial variability*, Las Vegas NV, 30 November-1 December 1984 pp. 166-194.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D., 1978. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning, *Agriculture Handbook 537*, United States Department of Agriculture, Washington DC, pp. 58.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets. *Information and control*. 8(3): 338-353.