

THE USE OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND REMOTE SENSING TECHNOLOGIES IN COMBATING DESERTIFICATION AND EROSION

Mustafa SERT - Abdullah Emin AKAY - Ayhan ATEŞOĞLU

ABSTRACT

The rapidly developing industry, improper land use, and disproportionate urban growth lead to the excessive depletion of natural resources and various environmental problems. The loss of land cover significantly impacts desertification and erosion, affects ecosystem service provision, causes ecological migrations, loses biodiversity, and impacts food security. Every year, 20 million hectares of arable land are degraded globally, 24 billion tons are affected by erosion, and 70% of arid areas are at risk of desertification. In Turkey, 642 million tons of soil have been displaced due to water erosion, and 22.5% of this area is highly sensitive to desertification. Identifying the sources and severity of these problems is crucial for future actions and planning. With advancements in technology, high-resolution satellite imagery and various software like ArcGIS, Netcad, QGIS, etc., that aid in their analysis have emerged and developed. Alongside these developments, methods and indices that facilitate surface and land cover analysis, such as (Revised Universal Soil Loss Equation) (RUSLE), (Normalized Difference Vegetation Index) (NDVI), (Bare Soil Index) (BSI), (Soil Adjusted Vegetation Index) (SAVI), (Topsoil Grain Size Index) (TGSi), have been developed. In recent years, artificial intelligence algorithms have begun to be integrated into these methods. This study examines the use of Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing technologies in combating desertification and erosion from the past to the present.

Keywords: Soil, Erosion, Desertification, Gis, Remote Sensing

Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü

Mail: sert.mustafa@csb.gov.tr

 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3130-4499>

Bursa Teknik Üniversitesi

Mail: abduallah.akay@btu.edu.tr

 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6558-9029>

Bartın Üniversitesi

Mail: aatesoglu@bartin.edu.tr

 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4030-7782>

Makale Atıf Bilgisi:

Sert, M. – Akay, A. E. – Ateşoğlu, A. (2024). “Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Çalışmalarında Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Teknolojilerinin Kullanımı” *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*, Yıl: 3, Çölleşme, Erozyon ve İklim Değişikliği Özel Sayısı, s. (82-100)

Makale Türü:

Araştırma

Geliş Tarihi:

01.10.2024

Kabul Tarihi:

28.10.2024

Yayın Tarihi:

08.11.2024

Yayın Sezonu:

Kasım 2024

ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE ÇALIŞMALARINDA COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ VE UZAKTAN ALGILAMA TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI

Mustafa SERT - Abdullah Emin AKAY - Ayhan ATEŞOĞLU

ÖZ

Hızla gelişen sanayi, yanlış arazi kullanımı ve orantısız kentsel büyüme, doğal kaynakların aşırı tükenmesine ve çeşitli çevre sorunlarına yol açmaktadır. Arazi örtüsünün kaybı çölleşmeye ve erozyona önemli ölçüde etki etmekte, ekosistem hizmet sunumunu etkilemekte, ekolojik göçlere, biyolojik çeşitliliğin azalmasına ve gıda güvenliğinin bozulmasına yol açmaktadır. Dünya genelinde her yıl 20 milyon hektar verimli toprak degradasyona, 24 milyar ton verimli toprak ise erozyona uğramakta, kurak alanların %70'i çölleşme riski altında bulunmaktadır. Türkiye'de 642 milyon ton toprak su erozyonu nedeniyle taşınmış olup, bu alanın %22,5'i çölleşmeye karşı oldukça hassastır. Bu sorunların kaynağının ve şiddetinin tespit edilmesi ileriye dönük strateji geliştirmede ve planlamada oldukça önem arz etmektedir. Teknolojideki gelişmeler, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve bunları analiz etmeye imkân veren ArcGIS, Netcad, QGIS vb. çeşitli yazılımların ortaya çıkmasına ve gelişmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmelerin yanında, Revize Edilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (Revised Universal Soil Loss Equation) (RUSLE), Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Çıplak Toprak İndeksi (Bare Soil Index) (BSI), Toprakla Düzeltilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (Soil Adjusted Vegetation Index) (SAVI), Üst Toprak Tane Boyutu İndeksi (Topsoil Grain Size Index) (TGSİ) gibi birçok arazi örtüsü, arazi yüzeyi ve erozyon durum analizlerini yapmayı sağlayan metot ve indeksler geliştirilmiştir. Son yıllarda bu metotlara yapay zekâ algoritmaları entegre edilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada geçmişten günümüze çölleşme ve erozyonla mücadelede Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknolojilerinin kullanımı irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toprak, Erozyon, Çölleşme, Cbs, Uzaktan Algılama

1. Giriş

Hızla gelişen sanayi, yanlış arazi kullanımı, kentlerdeki düzensiz artış, günümüz dünyasının en önemli sorunlarından olan iklim değışikliği gibi etmenler doğal kaynakların hızla tükenmesine ve birçok çevresel bazı sorunlara neden olmaktadır. Bunların başında arazi örtüsünün kaybolması sonucu oluşan çölleşme ve savunmasız kalan toprağın bir yerden başka bir yere taşınımıyla oluşan erozyon gelmektedir. Arazi örtüsü ve toprak kayıpları sonucu ekosistem ciddi bir şekilde zarar görmekte, geniş araziler terk edilmekte, ekolojik göçler yaşanmakta, biyoçeşitlilik kayıpları meydana gelmekte, gıda güvenliği doğrudan ve dolaylı olarak etkilenmektedir. Bu sorunların çözümüne yönelik projeler geliştirilmesi, gerekli önlemlerin alınması ve politikalar geliştirilmesi için problemin kaynağının tespit edilmesi elzemdir.

Dünya genelinde her yıl 20 milyon hektar verimli toprak degradasyona, 24 milyar ton toprak ise erozyona uğramaktadır. Kurak alanların %70'i de çölleşme riski altında bulunmaktadır (AbdelRahman, 2023; GSP, 2017). Gıda ve Tarım Örgütü (Food and Agriculture Organization) (FAO) öncülüğündeki Küresel Toprak Ortaklığı raporlarına göre dünya çapında her yıl 75 milyar ton toprak erozyona maruz kalmaktadır (GSP, 2017). Ülkemizde her yıl 642 milyon ton toprak su erozyonu sonucu taşınırken %22,5'lik alan da yüksek çölleşme riski altında bulunmaktadır (ÇEM, 2017; Erpul vd., 2020).

Uzaktan algılama ve uydu teknolojileri, yeryüzünün ve doğal kaynakların kolaylıkla izlenmesine, doğal kaynaklardaki değışimlerin analiz edilmesine, risk bölgelerinin tespit edilerek etkin bir planlama yapılmasına olanak sağlamaktadır. Yersel ölçüm yöntemleri yani sahada verilerin toplanması, bu verilerin bilgisayar ortamına aktarımı son derece maliyetli ve nitelikli işgücü gerektirmektedir. Bu teknoloji, coğrafi verilerin hem zamandan hem işgücünden tasarruf sağlayarak kolaylıkla toplanmasını mümkün kılmaktadır. Bu makalenin amacı, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) teknolojilerinin çölleşme ve erozyonla mücadele çalışmalarında kullanımı ile yapılan çalışmaları derlemek ve sentezlemektir.

2. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) Teknolojileri

CBS, çevresel envanterin çıkarılmasında, değışimlerin, etken faktörlerin gözlemlenmesinde, mevcut uygulama ve planlara dayalı tahminlerde kullanılabilen çok sayıda farklı istatistiksel ve mekânsal verinin sistematik olarak sunulmasıdır. Coğrafi bilgi sistemleri bazı ana bileşenlerden meydana gelmektedir; veri (uydu görüntüleri, haritalar, küresel konumlama sistemi),

bu bileşenlerin temelini oluşturmaktadır. Yazılım ve donanım diğer önemli bileşenlerdir. Bir diğer bileşen CBS teknolojisinin etkin olarak kullanılmasını sağlayan insandır. Çeşitli kaynaklardan (uydular, hava fotoğrafları, GPS cihazları vb.) mekânsal veriler toplanır. Bu veriler CBS yazılımları (ArcGIS, Netcad, QGIS vb.) kullanılarak organize edilip depolanır, veriler arasında ilişki ve desenler ortaya konur. Daha sonra haritalar, grafikler ve raporlar aracılığıyla veriler görselleştirilir ve kullanıcıya sunulur. Çevre yönetimi, şehir planlama, afet yönetimi, tarım, ulaşım gibi birçok alanda karar destek sistemi olarak kullanılır (Uça Avcı vd., 2015).

Uzaktan algılama (UA), yeryüzünü ve yeryüzündeki kaynakları yeryüzüyle herhangi bir fiziki temas gerektirmeden uzayda yer alan sensörler aracılığıyla elektromanyetik dalgalar kullanarak spektral, mekânsal ve zamansal verilerin elde edilmesi ve incelenmesi teknolojisidir (Ramachandra & Kumar, 2004). Uzaktan algılama, uydular ve hava araçlarıyla yeryüzüne yansıyan veya yayılan enerji algılanarak verilerin toplanmasına dayalıdır. Toplanan verilere, görüntü işleme teknikleriyle filtreleme, görüntü kalitesini iyileştirme, geometrik dönüşüm yapılmaktadır. Tüm bu veriler kategorize edilerek doğruluk analizleri yapılmakta ve sonuçların güvenilirliği kontrol edilmektedir. Uzaktan algılama teknolojileri haritacılık, ormancılık, çevre izleme, jeoloji, şehir planlama ve hidroloji gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Özenen-Kavlak vd., 2022)

CBS ve UA teknolojilerinin kullanımı, 20. yüzyılın ortalarına kadar gitmekte olup ABD Ulusal Havacılık Uzay Dairesi (NASA) / Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) ortak programı olan Landsat yer gözlem uydusunu başlattı ve böylece dünya yüzeyinin detaylı görüntüleri sağlandı (Chaminé vd., 2021; Naval Gund vd., 2007). 1970'ler ve sonrasında CBS ve UA teknolojileri, bilgisayarların coğrafi verileri işleyebilme kapasitesinin artmasıyla gelişmeye başladı. Bu teknolojiler ülkemizde de pek çok alanda yarar sağlamakta olup çölleşme ve erozyon durumlarının izlenmesi çalışmalarında entegre bir şekilde kullanılmaktadır. Böylece daha kapsamlı ve doğru analizler yapılabilmektedir (Duman & İrcan, 2022; Karagöz vd., 2017). Uydu görüntüleri bitki örtüsündeki, toprak nemindeki ve kara yüzey koşullarındaki değişiklikleri, çölleşme ve erozyonun kritik göstergelerini tespit edebilir. Daha sonra CBS bu değişiklikleri zaman içinde analiz edip, eğilimleri belirleyerek, gelecekteki etkileri tahmin edebilmektedir. Bu kombinasyon etkili arazi yönetimi ve koruma stratejilerinin planlanması ve uygulanmasında yardımcı olabilmektedir (Chaminé et al., 2021).

Bu bağlamda, literatürde yer alan çalışmalar değerlendirilerek, coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknolojilerinin çölleşme ve erozyonla mücadele çalışmalarında potansiyeli ortaya konulmuştur.

3. Yapılan Çalışmalar ve Operasyonel Metodolojiler

Erozyon riskinin yüksek olduğu alanları ortaya koymak ve barajların bulunduğu havzalarda erozyona karşı tedbir almak amacıyla Yüksel vd. (2008) "Using the Remote Sensing and GIS Technology for Erosion Risk Mapping of Kartalkaya Dam Watershed in Kahramanmaraş, Turkey" adlı çalışmalarında toprak erozyon miktarını etkileyen faktörler (toprak, bitki örtüsü, topografya, iklim) dikkate alarak erozyon risk haritasını hazırlamıştır. Çalışmalarında, erozyon riski haritaları üretmek için CORINE (Çevresel Bilginin Koordinasyonu) modeli, arazi örtü sınıflandırmalarında da ASTER uydu görüntülerini kullanmışlardır. CORINE modelinde erozyon durumunu ortaya koymak için gerekli veri tabanı parametreleri olan eğim, bitki örtüsü/arazi kullanım kabiliyeti ve erozivite kullanılmıştır. Çalışma neticesinde CORINE modeli, CBS ve uzaktan algılama teknolojilerinin kullanımı düşük maliyetle ve kısa sürede erozyonun değerlendirilmesinde etkili ve doğru sonuçlar elde edildiği ortaya koyulmuştur.

Yıldız vd. (2012) "Türkiye Bitki Örtüsünün NDVI Verileri ile Zamansal ve Mekânsal Analizi" başlıklı çalışmada, ülkemizin vejetasyon yoğunluğunu, vejetasyon başlangıç ve maksimum yoğunluğa ulaştığı tarih gibi zamansal değişimi analiz etmiştir. Çalışmalarında 1km çözünürlükteki SPOT uydusu ile bitki örtüsü değişiminin izlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index) (NDVI) indisi kullanılmıştır. Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi, uydu görüntülerinin multi-spektral algılayıcılarla elde edilen bantları aracılığıyla hesaplanmaktadır. Veriler VAST yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir.

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1)$$

Burada, NIR dalga boyu 0,68 - 0,78 µm olan ve bitki örtüsü tarafından yansıtılan yakın kızılötesi ışığı temsil ederken Red dalga boyu 0,61 - 0,68 µm olan bitki örtüsü tarafından emilen kırmızı ışığı temsil etmektedir (Tucker, 1979). Çalışma sonuçları, NDVI indisinin vejetasyon örtüsü durumunun etkin şekilde ortaya konulabileceğini göstermektedir.

Dindaroğlu ve Canbolat (2014) tarafından gerçekleştirilen "Kuzgun Baraj Gölü Havzasında CORINE Yöntemi ile Arazi Kullanım Sınıflarının Tespiti ve Erozyon Riskinin Değerlendirilmesi" adlı çalışma, arazi kullanımının erozyon üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmada Landsat 7 ETM uydu görüntüleri ile vejetasyon sınıflarını ortaya koymak için CORINE yöntemi kullanılmıştır. ERDAS Imagine yazılımıyla arazi kullanım sınıfları tespit edilmiştir. Arazi kullanım planlarının sürdürülebilirliği sağlama konusundaki önemi, ormanlık alanların erozyon riskini en aza indirme kapasitesi ile ilişkilendirilmiştir. Arazi kullanımlarının yanlış yönlendirilmesinin doğal kaynaklar üzerindeki olumsuz etkilerini artırdığı belirtilirken, bitki örtüsünün erozyonu engellemedeki

rolü vurgulanmaktadır. Bu çalışma, uzaktan algılama teknolojilerinin, arazi kullanım sınıflarının belirlenmesi, kuraklık ve çölleşme ile erozyon riskinin değerlendirilmesinde nasıl bir katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Becerril-Piña vd. (2016) "Integration of remote sensing techniques for monitoring desertification in Mexico" adlı çalışmalarında UA teknolojileri ile Meksika platosunda yarı kurak bir bölgede çölleşmeyi değerlendirmişlerdir. Çalışmada 'Landsat Thematic Mapper 5' uydu görüntüleri kullanılmış olup çok zamanlı analizler için seçilen değişkenlerin birbirleriyle karşılaştırılması ve arazi yüzeyindeki değişikliklerin tespit edilmesi amacıyla veriler üzerinde radyometrik karakterizasyon ve kalibrasyon yapılmıştır. Böylece her bir bant için spektral ışımaya dönüştürülerek yüksek kaliteli veri elde edilmiştir. Atmosferin neden olduğu bozulmaları azaltmak için atmosferik düzeltme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm bu işlem ve analizler Idrisi TerrSet ara yüzünde yer alan ATMOSC modülü ve Cos(t) modeli ile gerçekleştirilmiştir. Çölleşme durumunu ve şiddetini değerlendirmek için bazı indeksler kullanılmıştır;

- Çıplak Toprak İndeksi (Bare Soil Index) (BSI): Çıplak toprak yüzeylerinin yansıma özelliklerini analiz ederek, bitki örtüsü olmayan alanları tespit etmek için kullanılmaktadır (Rikimaru vd., 2002; Xiao vd., 2006). BSI, kırmızı (Red), mavi (Blue), yakın kızılötesi(Near Infrared) (NIR) ve kısa dalga kızılötesi (Shortwave Infrared) (SWIR) bantlarının kombinasyonu ile hesaplanmaktadır;

$$BSI = (SWIR + Red) - (NIR + Blue) / (SWIR + Red) + (NIR + Blue) \quad (2)$$

- Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index) (NDVI): Tucker (1979) tarafından uydu görüntüleri üzerinden bitkilerin fotosentez kapasitesini ve sağlık durumunu analiz etmek ve yorumlamak için geliştirilen NDVI metodu kullanılmaktadır. Yakın kızılötesi (NIR) ve kırmızı (Red) bantları aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (3)$$

- Toprakla Düzeltilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (Soil Adjusted Vegetation Index) (SAVI): Arazi örtüsünün zayıf olduğu alanlarda toprak parlaklığını minimize etmek için geliştirilmiş bir bitki örtüsü indeksidir (Huete, 1988). Çölleşme hassasiyeti yüksek bölgelerde bitki örtüsü ölçümlerinin doğruluğunu artırmak için kullanılmaktadır. Yakın kızılötesi (NIR) ve kırmızı (Red) bantlar ve bitki örtüsü ve toprak arasındaki yansıtma farklarını minimize ederek daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayan toprak parlaklık düzeltme faktörü (L) ile hesaplanmaktadır.

$$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) \times (1 + L) \quad (4)$$

- Çölleşme Derecesi İndeksi (Desertification Difference Index) (DDI): Çölleşmenin kapsamını ölçmek ve değerlendirmek için kullanılan bir araçtır. NDVI indisi, Albedo indeksi ve özellik uzayına yerleştirilen doğrunun eğimi (K) ile belirlenmektedir (Pan ve Li, 2013).

$$DDI = (K \times NDVI) - \text{Albedo} \quad (5)$$

- Albedo: Arazi yüzeyine düşen güneş ışınlarını yansıtma yeteneği olarak ifade edilir. Kar, buz gibi güneş ışığını daha fazla yansıtan alanlar 1 olarak değerlendirilirken ormanlar gibi yoğun vejetasyona sahip alanlar, baraj, deniz, okyanus gibi daha çok ışığı absorbe eden alanlar 0 değerini almaktadır.

$$\text{Albedo} = (-1,305 \times NDVI) + 65,93 \quad (6)$$

Arazi yüzey değişikliği yönü ve şiddetindeki değişiklikleri değerlendirmek ve tüm bu bitki indekslerini piksel piksel analiz etmek için çok değişkenli "change-vector analysis" CVA tekniği kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, NDVI ve BSI ilişkisi çölleşmenin karakterizasyonunu kolaylaştırmış, değişimin yönü ve şiddetini piksel piksel tespitinin etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca uzaktan algılamanın hem mekânsal hem de zamansal analize olanak sağlaması etkin ve düşük maliyetli bir araç olduğunu ortaya koymuştur.

"Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia" konu başlıklı çalışmada Lamchin vd. (2016) Landsat uydu görüntülerini kullanarak Moğolistan ölçeğinde arazi örtüsündeki değişimi ortaya koymuş ve çölleşme durumunu değerlendirmişlerdir. Bunun için vejetasyon biyokütlesi, arazi deseni ve mikro meteorolojiden elde edilen arazi yüzeyini temsil eden indikatörler olan NDVI ve TGSI indisleri ile arazi yüzey albedosu dikkate alınmış; arazi örtüsündeki değişimi ve çölleşmeyi değerlendirmek için Karar Ağacı (DT) yaklaşımı kullanılmıştır.

- Üst Toprak Tane Boyutu İndeksi (Topsoil Grain Size Index)(TGSI): Tek bir yağışın dahi bitki örtüsü değişimine etki edeceğinden dolayı NDVI metodunun gerçek çölleşme derecesini yorumlamada yetersiz kalacağından yola çıkarak Xiao vd. (2006) tarafından TGSI geliştirilmiştir. TGSI, toprak yüzeyindeki tane boyutu bileşimini analiz ederek üst toprak tabakasının tespiti için kullanılan uzaktan algılama indeksi olup özellikle kurak bölgelerdeki çölleşmeyi izlemeye olanak sağlamaktadır. Uydu görüntülerinin RGB (kırmızı, yeşil ve mavi) bantları ile hesaplanmaktadır.

$$NDVI = (\text{Red} - \text{Blue}) / (\text{Red} + \text{Blue} + \text{Green}) \quad (7)$$

Karar Ağacı (Decision Tree) (DT): Makine öğreniminde yaygın olarak kullanılan ve geçmiş verileri kullanarak gelecekteki bir durumu tahmin için kullanılan bir diyagramdır. "Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia" adlı çalışmada NDVI, TGSI ve arazi yüzey albedo değişkenleri kullanılarak elde edilen

verileri değerlendirmek için belli dönemdeki her bir bitki örtüsü için çölleşme şiddet derecesinin frekans dağılımına göre DT sınıflandırma tekniklerinin kombinasyonu kullanılmış ve haritalar üretilmiştir. Çalışmanın sonuçları, NDVI ile albedo kombinasyonundan ziyade TGSI ve albedo kombinasyonunun daha sağlıklı sonuç verdiğini ortaya koymuştur.

Özcan (2016) "CBS ve RUSLE Teknolojisi Yardımıyla Çankırı-Ekinne Göleti Su Toplama Havzasında Toprak Kayıplarının Tahmin Edilmesi" adlı çalışmada uluslararası literatürde ve ülkemizde yaygın olarak yer alan su erozyonu neticesinde kaybolan toprak miktarının hesaplamasında kullanılan Evrensel Toprak Kayıpları Denklemi (Universal Soil Loss Equation) (USLE) ve Revize Edilmiş Evrensel Toprak Kayıpları Denklemi (Revised Universal Soil Loss Equation) (RUSLE) ampirik modellerini kullanmıştır. Bu modeller, su erozyonu sonucu oluşan toprak kayıplarını aylık ve yıllık olarak verebilmektedir (Renard vd., 1997; Wischmeier ve Smith, 1978). RUSLE teknolojisi, erozyona etki eden bazı parametrelerin etkileşimiyle sonuç vermektedir. Bu parametreler şunlardır:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (8)$$

- A; Yıllık toprak kaybı ($t \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$)
- R; Yağışların erozyon oluşturma gücü ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ saat}^{-1} \text{ y}^{-1}$)
- K; Toprakların erozyona karşı duyarlılığı ($t \text{ ha saat ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
- L; Eğim uzunluğu (m)
- S; Eğim dikliği (%)
- C; Ürün ve ürün yönetim faktörü
- P; Toprak koruma yöntemleri faktörü

Tüm bu parametreler veri analizi, güncellemesi ve yönetimi, coğrafi analiz, haritalama işlemlerini gerçekleştiren entegre coğrafi bilgi sistemi yazılımı olan 'ArcGIS' 'raster calculator' fonksiyonu üzerinden çarpılarak elde edilmiştir. Ayrıca bazı parametrelerin hesaplamasında Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen neticeye göre su erozyonu sonucu oluşan toprak kaybının derecesinin ve konumsal dağılımının belirlenmesinde RUSLE ile CBS ve uzaktan algılama teknolojilerinin kombinasyonu son derece önem arz etmektedir. Ayrıca baraj, göl, gölet, su toplama havzaları etrafında erozyonun önlenmesi ve idare müddetlerinin uzatılması için planlamada kullanılacak haritaların üretilmesi zaruridir.

"Mapping Soil Erosion Risk Using RUSLE, GIS, Remote Sensing Methods: A Case of Mountainous Sub-watershed, Ifni Lake and High Valley of Tifnoute" adlı çalışmada Lamyaa vd. (2018) havzadaki erozyon sonucu kaybolan yıllık toprak miktarını ortaya koymak için RUSLE modeli kullanılmıştır. RUSLE faktörleri (R, K, LS, C ve P), ABD Ulusal Havacılık Uzay Dairesi (NASA) ve Uzay Araştırma Ajansı

tarafından tropikal yağışları incelemek için yürütülen Tropikal Yağış Ölçüm Misyonu (TRMM), topografik harita, toprak analizi, sayısal yükseklik modeli (DEM) ve uzaktan algılama kullanılarak coğrafi bilgi sistemi yazılımı olan 'ArcGIS' aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplama C faktör parametresi, uydu görüntüleri üzerinden, jeomekânsal verilerin işlenmesi ve analizi yazılımı olan 'ENVI 4.6' ile elde edilmiştir. Araştırmancın sonuçları, CBS ve UA teknolojilerinin toprak erozyonunu kontrol etmeye yönelik koruma uygulamalarının planlanmasını sunmak için önemli bir veri tabanı olduğunu ortaya koymuştur.

Jazouli vd. (2019) toprak erozyonuna karşı savunmasız bir havzanın arazi kullanımını, toprak ve vejetasyon durumunu değişimlerini ortaya koymak amacıyla "Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River" adlı çalışmayı yapmışlardır. Çalışmalarında arazi kullanımını, vejetasyon örtüsü ve değişimini ortaya koymak için Sentinel 2A, Landsat Oli-8 ve ETM'nin çok tarihli uydu görüntüleri kullanılmıştır. Mevcut duruma dayanarak gelecekteki sonuçlar hakkında tahminlerde bulunabilen 'Hüresel Otomata Markov Zincir' (CA_Markov) modeli, toprak kayıplarını ölçmek ve belli yıllara ait erozyon riskini haritalamak için 'Revize Edilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi' (RUSLE) modeli CBS'ye entegre edilmiştir. Alana ait arazi örtüsü, Maksimum Olabilirlik Kestirimi (MLE) (Rossi, 2019) algoritması kullanılarak sınıflandırılmıştır. Çalışma alanı için arazi örtüsü, Maksimum Olabilirlik algoritması kullanılarak denetlenen sınıflandırma yöntemi ile birincil ön arıtma işlemlerinin uygulanmasından sonra elde edildi ve orman, su kütlesi, çıplak toprak, tarım ve ekilmemiş toprak olmak üzere altı sınıfa ayrıldı. Bu çalışma sonuçları CA_Markov modeli ve RUSLE modelinin CBS ve uzaktan algılama ile entegre kullanılmasının arazi örtüsü ve değişimini ortaya koymak ve gelecekteki toprak kayıplarının miktarını doğru bir şekilde belirlemek için uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Erpul vd. (2020) "Su Erozyonu İl İstatistikleri Toprak Erozyonu Kontrol Stratejileri (Sürdürülebilir Arazi/Toprak Yönetimi Uygulama ve Yaklaşımları)" adlı çalışmalarında Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü tarafından başlatılan 'Dinamik Erozyon Modeli ve İzleme Sistemi' (DEMİS) projesi sonuçlarını değerlendirmişlerdir. DEMİS yazılımı, RUSLE modeli için gerekli veri tabanlarının çokyoğun veri içermesi ve düzenli olarak güncelleme yapılacak olması dolayısıyla geliştirilmiştir. DEMİS, RUSLE, CBS, UA ve jeo-istatistik yöntemlerini efektif kullanarak su erozyon şiddet durumlarını hem nitel hem de nicel olarak ortaya koyan haritaları, Türkiye ölçeğinde, havza bazlı, bölgesel ve il ölçeğinde üretmektedir. DEMİS RUSLE modeli, bazı parametrelerin etkileşimiyle ($A = R \times K \times C \times LS \times P$) toprak kaybını, arazi örtüsü ve toprak koruma önlemlerinin mevcudiyeti durumunda gerçek toprak kaybını ve su kaynaklarına taşınan sediment miktarlarını hesaplama olanağı sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan parametreler;

A = Yıllık Ortalama Toprak Kaybı ($t \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$),

R = Yağış Aşındırma Faktörü ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$),

K = Toprak Erozyon Duyarlılığı Faktörü ($t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$),

C = Arazi Örtüsü ve Kullanımı Faktörü,

LS = Eğim Uzunluğu ve Dikliği Faktörü,

P = Erozyon Kontrol Faktörü

Çalışmanın sonuçlarına göre, ülkemizde her yıl yaklaşık 642 milyon ton toprak su erozyonu dolayısıyla taşınmaktadır. Bu miktar, ortalama olarak hektarda yıllık 8,24 ton toprağa karşılık gelmektedir. Su erozyonu şiddet sınıflarına göre ülke yüzölçümünün %60,28'inde çok hafif, %19,13'ü hafif, %7,93'ü orta, %5,97'si şiddetli ve %6,7'si çok şiddetli erozyon sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Arazi kullanım durumuna göre %53,66 mera alanlarında, %38,71 tarım alanlarında ve %4,17 orman alanlarında toprak yer değiştirmektedir.

Alparlan ve Küçükönder (2021) tarafından su erozyonunun yoğun olduğu bölgelerden olan Kaman Deresi alt havzasında erozyon duyarlılığını tespit etmek için "Kaman Deresi Alt Havzasının Erozyon Duyarlılığı" adlı çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada Japon uzaktan algılama cihazı olan Gelişmiş Uzaydan Gelen Termal Emisyon ve Yansıma Radyometresi (ASTER) sayısal yükseklik modeli, RUSLE metodu, TRMM 3B43 ve GloREDA yağış uydu verileri kullanılmıştır. ASTER verileri, coğrafi verileri oluşturmak, düzenlemek, analiz etmek ve görüntülemek için kullanılan ArcMap yazılımı ile analiz edilmiştir. Erozyon neticesinde taşınan sediment, iklim verileri ve topoğrafik özellikler arasındaki ilişkiyi ele alan Modifiye Fournier İndeksi (MFI) kullanılmıştır.

Modifiye Fournier İndeksi: Aylık ve yıllık toplam yağış verilerine dayanmaktadır (Arnoldus, 1977).

$$\text{MFI} = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} \quad (9)$$

• P_i : Aylık yağış miktarı (mm)

• P_t : Toplam yıllık yağış (mm)

RUSLE metodunda yer alan parametrelerden;

• Yağış aşındırma faktörü (R), TRMM Çoklu Uydu Yağış Analizi, TRMM-PR, VIRS, Tropikal Yağış Ölçüm Misyonu (TRMM) Mikrodalgı Görüntüleyicisi (TMI) üzerinden elde edilmiştir.

• Arazi Örtüsü Faktörü (C), Landsat 8 OLI uydu görüntüleri üzerinden NDVI metoduyla hesaplanmıştır.

$$C_r = (-\text{NDVI} + 12) \quad (10)$$

• C_r : Arazi örtüsü faktörü,

$$\text{NDVI} = ((\text{Band 5} - \text{Band 4}) / (\text{Band 5} + \text{Band 4})) \quad (11)$$

Çalışma sonuçları yersel ölçümün ihtiyaçları karşılamadığı durumlarda meteorolojik uydu görüntülerinden elde edilen verilerin önemli katkı sağlayacağını göstermektedir.

“Monitoring Desertification Using Machine-Learning Techniques with Multiple Indicators Derived from MODIS Images in Mu Us Sandy Land, China” başlıklı çalışmada Feng vd. (2022) yüksek hassasiyetli, verimli izleme sistemi olan birden çok gösterge kombinasyonu ve makine öğrenme yöntemlerini (Sınıflandırma Ağaçları ve Regresyon Ağacı (CART)-Karar Ağacı (DT), Rastgele Orman (RF), Evrimsel Sinir Ağları (CNN)) kullanarak çölleşmenin mekânsal model analizini yapmışlardır. İklim ölçümleri için kullanılan Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi (MODIS) uydu verileri, çölleşmenin izlenmesi için kullanılan indekslerle (bitki örtüsü indeksi (MOD13A1), yüzey yansımaları (MCD43A4), kara yüzey sıcaklığı (MOD11A2) ve albedo (MCD43A3)) kombine edilerek kullanılmıştır. Ayrıca makine öğrenimine ilişkin örnek bir veri tabanının görsel olarak oluşturulması ve analiz edilmesi için Landsat 8 OLI uzaktan algılama görüntüleri kullanılmıştır.

NDVI elde etmek için MOD13A1 vejetasyon indeksi; sıcaklık durum indeksi hesabında kullanmak için MOD11A2 arazi yüzey sıcaklığı verisi; üst toprak tane boyutu indeksi (TGSİ) elde etmek için MCD43A4 yüzey yansımaları verisi; yer yüzeyinin yansımaları özelliklerinin ölçülmesi için MCD43A3 albedo verisi kullanılmıştır.

Özellikle arazi bozulmasının izlenmesinde ve toprağın fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan TGSİ kırmızı, mavi, yeşil bantlar için albedo ölçümlerinden elde edilmiştir (Liu vd., 2018; Xiao vd., 2006).

$$TGSİ = (\rho_{red} - \rho_{blue}) / (\rho_{red} + \rho_{blue} + \rho_{green}) \quad (12)$$

Çalışmada kullanılan model örneklerinin doğrulanması için CART-DT, RF ve CNN modelleri kullanılmıştır.

- CART-DT: Karar ağacı algoritması verileri daha küçük parçalara ayırarak karar verme sürecini modelleyen bir özelliği ve değişkeni simgeleyen düğümlerden oluşan sınıflandırma yöntemidir (Quinlan, 1986). Bu model, 'Python' yazılımı kullanılarak çalıştırılmıştır (Lamrini, 2020).
- RF: Uzaktan algılama görüntülerini işlemek için yaygın olarak kullanılan ve birçok karar ağacının birleşiminden oluşan, regresyon ağaçları üzerinden bir yanıt değişkenine bir değer atayan makine öğrenme yöntemidir. Bu çalışmada ağaç sayısı 100 alınmıştır. Bu model, 'Python' yazılımı kullanılarak çalıştırılmıştır (Chen vd., 2019)
- CNN: Görüntü analiz etme ve sınıflandırma amacıyla tasarlanmış, beyindeki nöronlara benzeyen derin öğrenme modelidir. Görüntüdeki özellikleri katmanlar halinde öğrenir. Bu model, 'Python' yazılımı kullanılarak çalıştırılmıştır (Guirado vd., 2020).

Çalışmada çölleşme sonuçlarını değerlendirmek ve analiz etmek için biyoçeşitlilik analizi, habitat analizi, peyzaj deseni ve zaman içindeki değişiminin izlenmesi gibi birçok alanda kullanılan peyzaj indeksleri (parçalanma indeksi (LFI) ve ayrılma indeksi (LSI)) kullanılmıştır (Sui ve Zeng, 2001).

$$FN1 = (Np - 1)/Nc \quad (13)$$

- FN1; Peyzaj parçalanma indeksi
- Np; Toplam peyzaj parçası sayısı
- Nc; Toplam alanının minimum parça alanına oranı

Yıl içerisinde iklim değişikliğine istinaden kurak ve nemli zamanların tespiti için kullanılan toprak yüzeyinin nemliliğini ölçmek amacıyla yüzey ıslaklık indeksi (SWI) kullanılmıştır (Zhuguo vd., 2004)

$$SWI = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i}{\sum_{i=1}^{12} PE_i} \quad (14)$$

- P_i; Aylık yağış
- PE_i; Potansiyel evapotranspirasyon

Çalışmanın sonuçları, rastgele orman yönteminin düşük ve orta çözünürlükteki uzaktan algılama görüntülerine dayalı çölleşmiş arazinin çıkarılmasında diğer tüm modellerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. NDVI, LST, Albedo, ve TGSI metotlarının birleşimiyle çıkarılan arazi sınıflandırma sonuçları doğruluğu yüksek çıkmıştır. TGSI son derece etkili bir izleme endeksi olarak sonuç vermiştir. Bu çalışma çölleşme sürecini izlemek, analiz etmek ve gerekli önlemlerin alınabilmesi için veri tabanı sağlamaktadır.

Erpul vd. (2023) "Arazi Tahribatının Dengelenmesi Karar Destek Sistemi İl İstatistikleri ve Sürdürülebilir Arazi Yönetimi Yaklaşımları ve Uygulamaları" adlı çalışmalarında arazi kullanım durumunun ve değişimlerinin ortaya konulmasını, öncelikli alanların tespit edilmesini, iklim değişikliğinin etkileri karşısında doğa tabanlı çözüm önerilerinin ortaya konulmasını hedeflemiştir. ATD-KDS; karar vericilerin veri ve modellerle doğru ve etkin karar almalarına imkân sağlayan, 'Google Earth Engine'(GEE) tabanlı olup açık kaynak kodlu bir sistemdir. ATD'yi izlemek için arazi örtüsü, arazi üretkenlik dinamiği, toprak organik karbonu olmak üzere üç göstergenin yanı sıra ek göstergeler (erozyon şiddeti, çölleşme hassasiyeti) dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında 1990-2018 tarihleri arasında ülkemizdeki arazi örtüsü değişikliği ortaya konulmuştur. Bu sonuçlara göre konumsal ölçekte ağaçla kaplı alanlarda 1.428,49 ha artış, sulak alanlarda 29.892,27 ha artış tespit edilirken, mera/çayır alanlarda 99.843,60 ha azalış, tarım alanlarında 3.830,74 ha azalış tespit edilmiştir. Bu çalışma, GEE ara yüzü kullanılarak istenilen proje alanında farklı mekânsal veri analizleri kolaylıkla yapmaya olanak sağlamaktadır.

Sayısal toprak haritalarının kaba mekânsal çözünürlükle karakterize edilmesi ve güncel olmaması dolayısıyla gelişmiş tahminler yapabilmek için fiziksel süreç tabanlı modeller (matematiksel ve bilgisayar tabanlı simülasyonlar) desteklenmediğinden dolayı Samarinas vd. (2024) "Soil Loss Estimation by Water Erosion in Agricultural Areas Introducing Artificial Intelligence Geospatial Layers into the RUSLE Model" adlı çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmanın amacı, 13 spektral banda sahip ve 10 metre uzamsal çözünürlüklü Sentinel-2 uydu görüntülerinden yararlanarak yapay zekâ ve yerinde toprak verilerini (fiziksel ölçümlerin yapıldığı veriler) kullanarak toprakla ilgili çeşitli tematik haritaların yer aldığı veri küpü tabanlı araçlara (Toprak Veri Küpü) yönelik olup RUSLE modeline gelişmiş coğrafi katmanlar sağlamaktır. Bu da nihai haritanın hem mekânsal çözünürlüğünü hem de güvenilirliği artırmaktadır.

Çalışmada Avrupa Birliği tarafından yönetilen dünya yüzeyini inceleme programı olan Copernicus tarafından üretilen mekânsal çözünürlüğü 30 metre olan Avrupa Sayısal Yükseklik Modeli (EU-DEM) kullanılmıştır. Meteorolojik veri olarak Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) tarafından üretilen zamansal çözünürlüğü 1 saat olan ERA5-Land kullanılmıştır (Hersbach vd., 2020). Vegetasyon örtüsü ve arazi kullanım verileri Copernicus Arazi İzleme Servisi üzerinden CORINE Arazi Örtüsü veri setinden üretilmiştir. Bu set tam olarak zirai alanlara karşılık gelmeyen Arazi Kullanımı Arazi Örtüsü (LULC) sınıflarını filtrelemek için yapay zekâ (AI) akışında kullanılmıştır.

Yersel ölçümlerde kullanılmak üzere tarım arazilerinden 84 adet toprak numunesi alınmış ve bunlar laboratuvar ortamında Toprak Organik Karbon (SOC) içeriği Walkley-Black metodu ile elde edilmiştir (Walkley ve Black, 1934). Ayrıca Bouyoucos hidrometre metodu ile toprak tekstürleri tespit edilmiştir (Bouyoucos, 1962) Sayısal toprak haritası üzerinden toprak organik karbon ve toprak tekstürü haritalarını üretmek için AI tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır (Wadoux vd., 2020). Bunlar oluşturulurken modele girdi olarak Sentinel-2 uydu görüntüleri, AB-DEM'den arazi verileri ve ERA5'ten iklim verileri kullanılmıştır. Modeli optimize etmek için karar ağaçları (DT) kullanarak çalışan XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) algoritması kullanılmıştır (T. Chen ve Guestrin, 2016).

Yapay zekâ mimarisi, açık kaynak EO verisi ve RUSLE metoduyla üretilen geliştirilmiş toprak tabakasına dayanan toprak erozyonu katmanı elde edilmiştir. Yıllık toprak kaybı tahmini için RUSLE metodu kullanılmıştır. Metoda göre R, K, C ve LS faktörlerinin etkileşimi, erozyon sonucu kaybedilen toprak miktarını ortaya koymaktadır (Renard vd., 1997). Modellerin doğruluğu, AI model performans ölçümleriyle yapılmıştır. Bunlar;

- R^2 katsayısı (determinasyon katsayısı), ortaya koyulan ve model tarafından tahmin edilen çıktı arasındaki herhangi bir doğrusal korelasyon derecesini nicelleştirmek için kullanılmıştır.

- Ortalama karekök sapması (root-mean-square deviation (RMSE)), tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki ortalama farkın tespiti için kullanılmıştır.

Çalışmanın sonuçları erozyon durumunun ortaya koyulmasında ve toprak erozyon haritasının oluşturulmasında mekânsal çözünürlüğün önemini ve RUSLE içinde yapay zekanın entegre edilmesinin önemini göstermiştir. K faktörünü etkileyen toprak organik karbonu ve tekstür haritalarının kullanılması çalışmanın önemli yeniliğidir. Öğrenme algoritması XGBoost toprak erozyonu göstergelerinin ayrıntılı mekânsal dağılımını sağlayan yüksek çözünürlüklü haritalarla makul bir doğruluk göstermiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Günümüzde iklim değişikliğiyle birlikte artan çevresel sorunlara karşı önlem alınması için sorunun kaynağının ve şiddetinin tespit edilmesi son derece önem arz etmektedir. Erozyon ve çölleşme, iklim değişikliğinin sebep olduğu ve canlıların mevcudiyetini etkileyen sorunların başında gelmektedir. Gerek ulusal gerekse uluslararası ölçekte çölleşme ve erozyonun tespit edilmesi, yersel ölçümlerle hem maliyetli hem de oldukça zaman almaktadır. Bu yüzden gerek araştırmacılar gerekse karar alıcılar kısa sürede doğru ve etkili sonuçlar almak için teknolojik olanaklardan faydalanmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknolojileri bunu mümkün kılmaktadır. Yapılan bu derlemeyle son on yıl içindeki bilimsel çalışmalar analiz edilmiş ve uzaktan algılama teknolojilerinin çölleşme ve erozyonla mücadeledeki potansiyelini ortaya koymaya çalışılmıştır. Konu ile ilgili bilimsel çalışmalar son yıllarda oldukça artış göstermektedir. Gerek arazi örtüsündeki değişikliğin tespitinde gerekse erozyon hassasiyetinin ve şiddetinin tespitinde Sentinel ve Landsat uydu görüntüleri yaygın olarak kullanılmakla birlikte farklı uydu görüntüleri (MODIS, ASTER gibi) üretilmektedir. Ayrıca analizlerde kolaylık sağlayan zamansal, mekânsal, konumsal çözünürlükler yıldan yıla artış göstermektedir. Çalışmalarda bitki ve toprak durumunu ortaya koymak için NDVI, TGSİ, BSI, SAVI, SWI, Albedo gibi birçok indeks kullanılmıştır. Son birkaç yılda indekslerin tek başına yeteri kadar etkili sonuç vermemesinden dolayı yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri kullanımı ve makine öğrenme metodlarına odaklanılmıştır. Toprak organik karbon ve toprak tekstürü haritalarının kullanılmasında yapay zekâ tabanlı yaklaşım kullanılmıştır.

Sayısal toprak haritası üzerinden toprak organik karbon ve toprak tekstürü haritalarını üretmek için AI tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır. Bunlar oluşturulurken modele girdi olarak uydu görüntüleri, arazi ve iklim verileri kullanılmıştır. Modelin optimizasyonu için de XGBoost algoritması kullanılmıştır.

Toprak erozyonu durumunun tespiti için geçmişten günümüze en yaygın kullanılan metot RUSLE'dir. Bu metot, toprağın aşınmasını etkileyen yıllık toprak kaybı, yağışların erozyon oluşturma gücü toprakların erozyona karşı duyarlılığı, eğim uzunluğu, eğim dikliği, ürün ve ürün yönetim faktörü, toprak koruma yöntemleri faktörü, sediment iletim oranı faktörlerinin etkileşimiyle elde edilmektedir.

Tüm bu metot ve indeksler etkili sonuçlar vermektedir fakat bazı noktalarda yeterli olmamaktadır. Bitki indeksleri çölleşme ve arazi bozulmasını net şekilde yansıtmayabilir, örneğin vejetasyon yağış faktöründen etkilenebilir. Böyle durumlarda etki eden faktörlerin de dâhil edileceği birden fazla indeks kombinasyonu yapılmalıdır. Doğrulamayı desteklemek ve modellerdeki güvenilirliği tesis etmek için saha ölçümlerine odaklanmalıdır. Toprak yüzeyini belirlemeye yönelik yapay zekâ algoritmalarının kullanımı yaygınlaşmalıdır. K ve C faktörü değerleri için ülkenin uyumlu bitki örtüsü haritaları ve toprak haritaları üretilmelidir.

Kaynaklar

AbdelRahman, M. (2023). *An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications*. <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01155-3>

Alparlan, K., & Küçükönder, M. (2021). Kaman Deresi Alt Havzasının Erozyon Duyarlılığı. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24, 242–258.

Arnoldus, H. M. J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin*, No. 34, 39, 1977.

Becerril-Piña, R., Díaz-Delgado, C., Mastachi-Loza, C. A., & González-Sosa, E. (2016). Integration of remote sensing techniques for monitoring desertification in Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(6), 1323–1340.

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>

ÇEM. (2017). *Türkiye Çölleşme Modeli ve Hassasiyet Haritası*. <https://cem.csb.gov.tr/turkiye-collesme-modeli-ve-hassasiyet-haritasi-i-103686>

Chaminé, H. I., Pereira, A. J. S. C., Teodoro, A. C., & Teixeira, J. (2021). Remote sensing and GIS applications in earth and environmental systems sciences. *SN Applied Sciences*, 3(12), 870. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04855-3>

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>

Chen, X., Wang, T., Liu, S., Peng, F., Tsunekawa, A., Kang, W., Guo, Z., & Feng, K. (2019). A New Application of Random Forest Algorithm to Estimate Coverage of Moss-Dominated Biological Soil Crusts in Semi-Arid Mu Us Sandy Land, China. In *Remote Sensing* (Vol. 11, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/rs11111286>

Dindaroğlu, T., & Canbolat, M. (2014). Kuzgun Baraj Gölü Havzasında CORINE Yöntemi ile Arazi Kullanım Sınıflarının Tespiti ve Erozyon Riskinin Değerlendirilmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 15(1), 33–47. <https://doi.org/10.17474/acuofd.38678>

Duman, N., & İrcan, M. R. (2022). Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Tabanında Çankırı Merkez İlçesinin Erozyon Risk Analizi TT - Erosion Risk Analysis of Çankırı Central District on the Basis of Geographical Information Systems and Remote Sensing. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 20(1), 220–245. <https://doi.org/10.33688/aucbd.1074770>

Erpul, G., Akça, E., Karaman, N. A., Canlı, P., Morkoç, S., Karataş, Z. K., & Tekin, S. N. (2023). *Arazi Tahribatının Dengelenmesi Karar Destek Sistemi İl İstatistikleri ve Sürdürülebilir Arazi Yönetimi Yaklaşımları ve Uygulamaları*. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları.

Erpul, G., İnce, K., Demirhan, A., Küçümen, A., Akdağ, M. A., Demirtaş, İ., Sarıhan, S., Çetin, E., & Şahin, S. (2020). *Su Erozyonu İl İstatistikleri*. Toprak Erozyonu Kontrol Stratejileri (Sürdürülebilir Arazi/Toprak Yönetimi Uygulama ve Yaklaşımları) Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları. https://webdosya.csb.gov.tr/db/cem/icerikler/su_erozyon-20221228103523.pdf

Feng, K., Wang, T., Liu, S., Kang, W., Chen, X., Guo, Z., & Zhi, Y. (2022). Monitoring Desertification Using Machine-Learning Techniques with Multiple Indicators Derived from MODIS Images in Mu Us Sandy Land, China. In *Remote Sensing* (Vol. 14, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/rs14112663>

GSP. (2017). *Global Soil Partnership Endorses Guidelines on Sustainable Soil Management*. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/416516/>

Guirado, E., Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Puertas-Ruiz, S., Herrera, F., & Tabik, S. (2020). Tree Cover Estimation in Global Drylands from Space Using Deep Learning. In *Remote Sensing* (Vol. 12, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/rs12030343>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

Jazouli, A. El, Barakat, A., Khellouk, R., Rais, J., & Baghdadi, M. El. (2019). Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 361–374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.004>

Karagöz, A., Tercan, E., Erpul, G., Türkeş, M., Dengiz, O., Doğan, O., & Öztaş, T. (2017). *Türkiye Çölleşme Modeli*.

Lamchin, M., Lee, J.-Y., Lee, W.-K., Lee, E. J., Kim, M., Lim, C.-H., Choi, H.-A., & Kim, S.-R. (2016). Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. *Advances in Space Research*, 57(1), 64–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.006>

Lamrini, B. (2020). *Contribution to Decision Tree Induction with Python: A Review*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92438>

Lamyaa, K., M'bark, A., Brahim, I., Hicham, A., & Soraya, M. (2018). Mapping Soil Erosion Risk Using RUSLE, GIS, Remote Sensing Methods: A Case of Mountainous Sub-watershed, Ifni Lake and High Valley of Tifnoute (High Moroccan Atlas). *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 14(2 SE-Original Research Article), 1–11. <https://doi.org/10.9734/JGEESI/2018/40322>

Liu, Q., Liu, G., & Huang, C. (2018). Monitoring desertification processes in Mongolian Plateau using MODIS tasseled cap transformation and TGSi time series. *Journal of Arid Land*, 10(1), 12–26. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0109-0>

Navalgund, R., V, J., & Roy, P. (2007). Remote sensing applications: An overview. *Current Science*, Vol. 93.

Özcan, A. U. (2016). CBS ve RUSLE Teknolojisi Yardımıyla Çankırı -Ekinne Göleti Su Toplama Havzasının da Toprak Kayıplarının Tahmin Edilmesi. In *Tücaum Uluslararası Coğrafya Sempozyumu Bildiri Kitabı* (Issue October, pp. 668–674). Ankara Üniversitesi Yayınları.

Özenen-Kavlak, M., Güler, Ü., Demir Çakır, M., Aydemir, S., Aydemir, H. S., Berk Acet, Ş., Aydın, H. O., & Hassan Pashaei, M. (2022). Haberleşme Uygulamalarında Uzaktan Algılama Ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(2), 761–775. <https://doi.org/10.21923/jesd.1000582>

Pan, J., & Li, T. (2013). Extracting desertification from Landsat TM imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-Vegetation feature space. *Natural Hazards*, 68(2), 915–927. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0665-3>

Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1(1), 81–106. <https://doi.org/10.1007/BF00116251>

Ramachandra, T. V., & Kumar, U. (2004). Geographic Resources Decision Support System for Land Use, Land Cover Dynamics Analysis. *Proceedings of the FOSS/GRASS Users Conference*.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., Mccool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water : A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In *Agriculture Handbook*.

Rikimaru, A., Roy, P., & Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*, 43, 39–47.

Rossi, R. J. (2019). Mathematical Statistics: An Introduction to Likelihood Based Inference. *International Statistical Review*, 87, 178–179. <https://doi.org/10.1111/insr.12315>

Samarinas, N., Tsakiridis, N. L., Kalopesa, E., & Zalidis, G. C. (2024). Soil Loss Estimation by Water Erosion in Agricultural Areas Introducing Artificial Intelligence Geospatial Layers into the RUSLE Model. In *Land* (Vol. 13, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/land13020174>

Sui, D. Z., & Zeng, H. (2001). Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen. *Landscape and Urban Planning*, 53(1), 37–52. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00136-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00136-5)

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

Uça Avcı, D., Uça Güneş, P., & Çabuk, A. (2015). Uzaktan Eğitim ile 'Uzaktan Algılama' ve 'Coğrafi Bilgi Sistemleri' Eğitimlerinin Verilmesine Dair Bir Değerlendirme. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 53–68. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/hartek/issue/17001/177622>

Wadoux, A. M. J.-C., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2020). Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions.

Earth-Science Reviews, 210, 103359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>

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). https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/1934/01000/an_examination_of_the_degtjareff_method_for.3.aspx

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning (Issue 537). The USDA Agricultural Handbook.

Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R., & Bayaer, W. (2006). Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 27. <https://doi.org/10.1080/01431160600554363>

Yıldız, H., Mermer, A., Ünal, E., & Akbaş, F. (2012). Türkiye Bitki Örtüsünün NDVI Verileri ile Zamansal ve Mekansal Analizi TT - Spatial and Temporal Analysis of Turkey Vegetation with NDVI Images. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 50–56. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tarbitderg/issue/11499/136983>

Yüksel, A., Gündoğan, R., & Akay, A. E. (2008). Using the Remote Sensing and GIS Technology for Erosion Risk Mapping of Kartalkaya Dam Watershed in Kahramanmaraş, Turkey. In *Sensors* (Vol. 8, Issue 8, pp. 4851–4865). <https://doi.org/10.3390/s8084851>

Zhuguo, M., Li, D., & Yüwen, H. (2004). The extreme dry/wet events in northern China during recent 100 years. *Journal of Geographical Sciences*, 14(3), 275–281. <https://doi.org/10.1007/BF02837407>