

RUSLE Yöntemi Kullanılarak Porsuk Çayı Havzası'nda Erozyon Duyarlılığının ve Toprak Kayıplarının Belirlenmesi

Determination of Erosion Susceptibility and Soil Loss in the Porsuk Stream Basin Using the RUSLE Method

Ali Ünver^{1*}, Ebubekir Karakoca²

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Coğrafya Programı, Bilecik/Türkiye.

²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Bilecik/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Ali Ünver
aliunver3216@gmail.com

doi: 10.48123/rsgis.1687713

Yayın süreci

Geliş tarihi: 30.04.2025
Kabul tarihi: 12.07.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Bu çalışma, Kuzeybatı Anadolu'daki Porsuk Çayı Havzası'nda toprak kayıpları ve erozyon duyarlılığı riskinin mekânsal dağılımını RUSLE açılımı modeliyle nicel olarak değerlendirmektedir. Araştırma alanı, Eskişehir ve Kütahya'nın büyük bölümü ile Ankara, Uşak ve Afyonkarahisar'ın bazı kesimlerini kapsamaktadır. RUSLE modelinin yağış erozivitesi (R), toprak erodibilite (K), eğim uzunluğu ve eğim (LS), bitki örtüsü (C) ve koruma önlemleri (P) faktörleri; Google Earth Engine platformunda ALOS PALSAR DEM, CHIRPS yağış verileri, 1/100.000 ölçekli toprak haritaları, Sentinel-2 NDVI ve MODIS arazi kullanım verileriyle 30*30 m çözünürlükte Üretilmiştir. Analizler, özellikle Sündiken ve Karlık Dağları gibi yüksek eğimli alanlarda erozyon riskinin arttığını göstermektedir. Çok hafif riskli alanlar havzanın %41,01'ini oluştururken, toplam toprak kaybının %15,47'sine neden olmaktadır. Yüksek ve çok yüksek riskli alanlar ise havzanın %34,57'sini kapsamakta ve toplam kaybın %62,90'ına sebep olmaktadır. Ortalama yıllık toprak kaybı 2,35 ton ha⁻¹ y⁻¹, toplam kayıp ise yıllık 2,538,269.32 tondur. Sonuçlar, sürdürülebilir arazi yönetimi için ağaçlandırma, teraslama ve koruyucu tarım uygulamalarının gerekliliğini vurgulamaktadır. Ayrıca, coğrafi teknolojilerin RUSLE parametrelerinin türetilmesinde sağladığı avantajlar örneklenmiştir.

Anahtar kelimeler: Erozyon, Uzaktan algılama, CBS, RUSLE, Porsuk çayı

Abstract

This study quantitatively evaluates the spatial distribution of soil loss and erosion susceptibility risk in the Porsuk Stream Basin in Northwestern Anatolia using the RUSLE expansion model. The research area covers most of Eskişehir and Kütahya, as well as parts of Ankara, Uşak, and Afyonkarahisar. The rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), vegetation cover (C), and conservation practices (P) factors of the RUSLE model were produced at a 30×30 m resolution on the Google Earth Engine platform using ALOS PALSAR DEM, CHIRPS precipitation data, 1:100,000 scale soil maps, Sentinel-2 NDVI, and MODIS land use data. The analyses show that erosion risk increases especially in steeply sloped areas such as the Sündiken and Karlık Mountains. Very low-risk areas constitute 41.01% of the basin and cause 15.47% of the total soil loss. High and very high-risk areas cover 34.57% of the basin and account for 62.90% of the total loss. The average annual soil loss is 2.35 t ha⁻¹ y⁻¹, and the total annual loss is 2,538,269.32 tons. The results emphasize the necessity of afforestation, terracing, and conservation agriculture practices for sustainable land management. In addition, the advantages provided by geographic technologies in deriving RUSLE parameters are exemplified.

Keywords: Erosion, Remote sensing, GIS, RUSLE, Porsuk river

1. Giriş

Erozyon, yeryüzü şekillenmesinde rol oynayan doğal süreçlerden biridir. Ana kayaçların dış etkenlerle (fiziksel ve kimyasal/ biyolojik) ayrışması sonucu oluşan toprakların; su, rüzgâr ve yerçekimi gibi kuvvetlerin etkisiyle taşınması, jeolojik zamanlardan bu yana topografyanın biçimlenmesinde belirleyici olmuştur (Eriñ, 1973). Ancak bu süreç, yalnızca doğal dinamiklerle sınırlı kalmamakta; özellikle yanlış arazi kullanımı gibi insan faaliyetleri erozyon hızını artırarak, günümüzde önemli bir çevresel sorun haline gelmesine neden olmaktadır. Sanayi Devrimi ile birlikte artan ormansızlaştırma ve madencilik faaliyetleri, doğal bitki örtüsünün tahribine ve dolayısıyla erozyonun hızlanmasına neden olmuştur. 20. yüzyılda modern tarım tekniklerinin yaygınlaşması ve hızla artan nüfus, küresel ölçekte erozyonun boyutlarını daha da genişletmiş; bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde toprak bozulmasını ciddi bir çevresel tehdit haline getirmiştir (Clark & Jacks, 2007). Türkiye’de, su erozyonuna bağlı yıllık ortalama toprak kaybı 642 milyon tona ulaşmakta ve hektar başına ortalama 8,24 ton ha⁻¹ y⁻¹ toprak kaybı yaşanmaktadır (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2021). Toprak kaybının dağılımında %60,28 oranında çok hafif, %19,13 hafif, %7,93 orta, %5,97 şiddetli ve %6,70 çok şiddetli erozyon gözlemlenmektedir. Bu süreçte topografya %47,55 oranında belirleyici bir etken olurken; bitki örtüsü (%34,82), yağış (%14,26) ve toprak özellikleri (%3,36) diğer faktörler arasında yer almaktadır (Demirtaş, 2024).

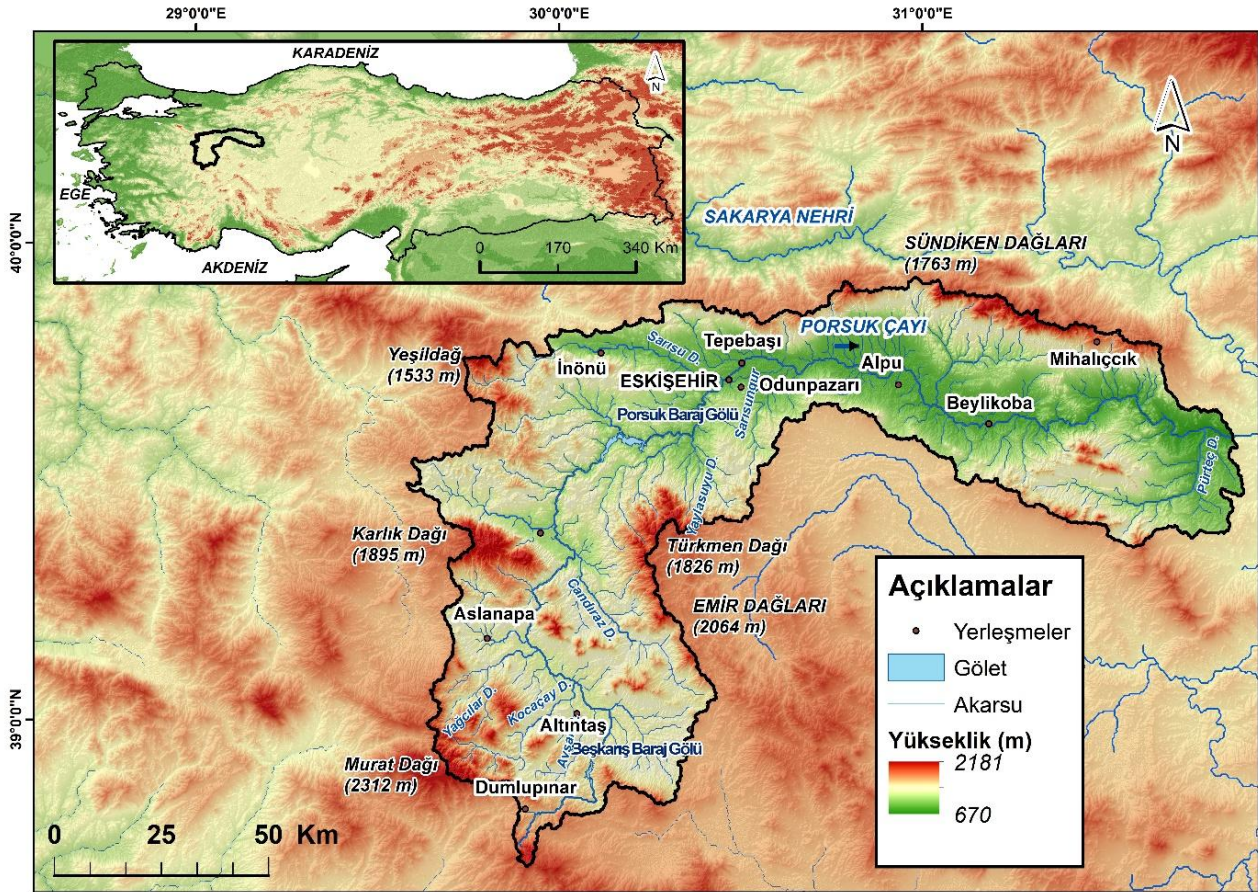
Türkiye’de erozyon araştırmaları, 1950’li yıllardan itibaren sistematik bir şekilde başlamış olup, bu alandaki öncü çalışmalardan biri İlgüz (1955)’ün Mustafa Kemal Paşa Çayı havzasında yaptığı araştırmadır. İlgüz, havzadaki erozyon şiddetini ve Ulubat Gölü ile ilişkisini inceleyerek, Türkiye’deki erozyonun boyutlarını bilimsel olarak ortaya koymuştur). 1980’li yıllarda USLE (Universal Soil Loss Equation) modelinin özellikle tarım alanlarında uygulanmaya başlanması, erozyon hesaplamalarının nicel ve bilimsel temellere dayanmasını mümkün kılmıştır. Bunu takip eden 1990’lı yıllarda RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) modelinin kullanıma girmesi, özellikle büyük akarsu havzalarında erozyonun mekânsal dağılımının daha sağlıklı ve detaylı bir biçimde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu gelişmeleri takiben, Türkiye’nin özgün topografik ve iklimsel koşullarına uyarlanarak geliştirilen Türkiye Toprak Erozyon Tahmin Modeli (TURTEM), ulusal düzeyde erozyon risk analizlerinin gerçekleştirilmesine önemli katkılar sağlamıştır (Özden & Özden, 1997). Günümüzde, Türkiye’nin farklı havza ve bölgelerinde gerçekleştirilen çok sayıda erozyon çalışması bulunmaktadır. Özellikle Dicle, Fırat, Kızılırmak, Sakarya ve Batı Akdeniz havzaları, erozyonun en yoğun gözlemlendiği alanlar arasında öne çıkmaktadır (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2024). Marmara Bölgesi’nde (Okçu vd., 2006; Fıçıcı, 2016; Atalay Dutucu & Mutlu, 2022), Ege Bölgesi’nde (Danacıoğlu & Tağıl, 2017), İç Anadolu Bölgesi’nde (Bozyiğit & Kaya, 2017; Karakoca, 2025), Batı Karadeniz’de (Eraslan vd., 2016), Doğu Karadeniz’de (Hatipoğlu & Hatipoğlu, 2020), Batı Akdeniz’de (Çilek vd., 2014; Avcıoğlu vd., 2020), Doğu Akdeniz’de (Değerliyurt, 2013) yürütülen çalışmalar, ülke genelinde erozyon risklerinin mekânsal farklılıklarını detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Ayrıca, Meriç-Ergene (Özşahin, 2016a, Özşahin, 2016b; Uludağ & Fıçıcı, 2018), Susurluk (Mutlu vd., 2021), Gediz (Tağıl vd., 2023), Sakarya (Karaş vd., 2009; Ustaoglu & Koç, 2018), Küçük ve Büyük Menderes (Özdemir & Dönmez, 2016; Gündüzoğlu, 2019), Akarçay ve Burdur Havzaları (Erkal & Yıldırım, 2012; Dursun & Babalık, 2023), Yeşilirmak (İmamoğlu, 2020), Kızılırmak (Ataol & Köle, 2016), Seyhan ve Ceyhan (Erol, 2003; Çilek & Berberoğlu, 2013), Dicle-Fırat (Sunkar & Avcı, 2015; Avcı vd., 2017; Karakoyun & Kaya, 2022; Yalçınkaya vd., 2022), Çoruh (Zengin vd., 2009) ve Aras (Aykır & Fıçıcı, 2022) havzalarında yürütülen araştırmalar da, havza ölçeğinde erozyon dinamiklerinin ayrıntılı bir şekilde incelendiğini göstermektedir. Bu araştırmalar, Türkiye’nin farklı iklimsel, jeomorfolojik ve hidrolojik karakteristiklere sahip bölgelerinde erozyon süreçlerinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamıştır. Ayrıca bölgesel ölçekli arazi yönetimi ve koruma stratejilerinin geliştirilmesine bilimsel zemin oluşturmıştır.

Sakarya Nehri havzası özelinde ise su kaynaklarının durumu ve havza yönetimi konularında çeşitli araştırmalar öne çıkmaktadır. Sakarya Nehri’nin su kalitesinin tarımsal sulamaya uygunluğunun incelenmesi (Dorak & Aşık, 2018) ve faktör analizleri ile su kalitesinin değerlendirilmesi (Şengörür & İsa, 2001), taşkın yayılım haritalarının oluşturulması (Sönmez, 2013), Göksu Çayı Havzası’nda risk temelli havza yöntemi (Uzun & Garipağaoğlu, 2022) ve Sakarya Havzası’ndaki sıcaklık ve yağış değişimlerinin analizi (Rümeysa & Atalay Dutucu, 2020) bu temalar arasında yer almaktadır. Ayrıca, Yuvacık Barajı’nda iklim değişikliğinin akım ve sediman rejimine etkileri (Özdemir, 2021), Porsuk Çayı’nda debi analizleri (Tekkanat, 2016) ve su kalitesi değerlendirmeleri (Köse vd., 2016) ile Kirmir Çayı’ndaki biyolojik çeşitliliğe ilişkin çalışmalar (Gül vd., 2008) önemli bilgiler sunmaktadır. Sakarya Nehri Vadisi özelinde ise İnhisar-Osmaneli arasındaki seki sistemlerinin morfolojik, sedimantolojik ve kronolojik özelliklerine yönelik araştırmalar ise bölgedeki flüvyal süreçlerin tarihsel gelişimini ortaya koyarak vadinin jeomorfolojik evrimine ışık tutmaktadır (Karakoca & Uncu, 2020; Karakoca vd., 2025).

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı

Bu çalışmanın yapıldığı Porsuk Çayı Havzası, Sakarya Havzası'nın önemli alt havzalarından birini oluşturmaktadır. Kuzeybatı Anadolu'da yer alan havza, 29°38' 00"–31°59' 00" doğu boylamları ile 38°44' 00"–39°99' 00" kuzey enlemleri arasında yer almaktadır (Şekil 1). Havza morfometrik olarak doğu-batı yönünde yaklaşık 202 km, kuzey-güney doğrultusunda ise 135 km uzunluğa sahiptir. Havzanın toplam yüzölçümü 1.079.744,67 hektar (10.797,45 km²) olarak hesaplanmıştır. İdari olarak, Eskişehir ve Kütahya illerine bağlı yedi ilçe merkezi ile birlikte Ankara, Uşak ve Afyonkarahisar illerinin bazı kesimleri çalışma alanı içerisinde yer almaktadır. Porsuk Çayı, Murat Dağı'nın eteklerinde doğarak Tokul Köyü yakınlarında kuzeye yöneldikten sonra, Kütahya kent merkezinden geçerek doğuya doğru akışını sürdürmekte; Eskişehir il merkezini geçtikten sonra Sazlılar mevkiinde (660 m yükselti) Sakarya Nehri'ne katılmaktadır. Yaklaşık 436 km uzunluğundaki Porsuk Çayı, bölgedeki hidrolojik sistemin temel bileşenlerinden bir olup, su rejimi ve sediment taşınımı açısından belirleyici bir role sahiptir. Kokar Çayı, Çat Deresi, Felent Çayı, Kargın Deresi ve Sarısu Deresi gibi önemli yan kollar, Porsuk Havzası'nın hidrolojik yapısını destekleyen diğer su unsurları arasında yer almaktadır (Çetin, 2011).



Şekil 1. Çalışma sahasının lokasyon haritası

2.2. Kullanılan Veri ve Yöntem

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, RUSLE modelinin tüm bileşenleri Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinde entegre edilerek kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. GEE, bulut tabanlı büyük veri işleme kapasitesi ve gelişmiş mekânsal analiz araçları ile geniş alanlarda yüksek çözünürlüklü ve hızlı coğrafi veri analizleri yapılmasını mümkün kılan güçlü bir platformdur (Gorelick vd., 2017). GEE'nin en önemli avantajları; farklı kaynaklardan elde edilen büyük hacimli verilerin hızlı ve bütüncül şekilde işlenebilmesi, çok çeşitli uydu ve iklim veri setlerine erişim imkânı ve analizlerin tekrarlanabilirliğinin yüksek olmasıdır (Amani vd., 2020; Tamiminia vd., 2020). Ancak, GEE'de veri çözünürlüğü ve güncelliği, platformda sunulan veri setleriyle sınırlı olabilmektedir.

RUSLE modeline yönelik analizlerde, temel altlık veri olarak ALOS PALSAR platformundan elde edilen 12.5 m çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanılmıştır. Yağış erozyon faktörü (R faktörü) hesaplamasında, 2023 yılına ait yağış verileri, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlüğe sahip CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data) veri setinden temin edilmiştir. Toprak erodibilite faktörü (K faktörü), T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilen 1/100.000 ölçekli toprak haritalarına dayalı olarak işlenmiş ve belirlenmiştir. LS faktörü, DEM verisinden türetilen eğim ve akış birikimi parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Bitki örtüsü faktörü (C faktörü), 2023 yılına ait Sentinel-2 uydu görüntülerinden türetilen Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) değerleri ile belirlenmiştir. Sentinel-2'nin B8 (NIR, 833 nm) ve B4 (Red, 665 nm) bantları kullanılarak NDVI hesaplanmıştır. Bu bantlar 10*10 m mekânsal çözünürlüğe ve 5 günlük tekrar ziyaret süresine sahip olup, bitki örtüsü analizlerinde yüksek doğruluk sağlamaktadır (Drusch vd., 2012). Koruma önlemleri faktörü (P faktörü) ise, MODIS MCD12Q1 (2020) arazi kullanım verileri temel alınarak hesaplanmıştır.

Tüm bu faktörler, GEE platformunda işlenerek RUSLE modeli uygulanmıştır. Farklı çözünürlükteki veri setlerinin birlikte kullanılması durumunda, analizlerde en düşük çözünürlüğe sahip olan MODIS verisi (500 m) kullanılmıştır. MODIS verisi, P faktörünün mekânsal dağılımını belirlemek amacıyla kullanılmış ve analizlerin gerçekleştirildiği 30*30 m çözünürlüğe indirgenmiştir. Literatürde, P faktörünün erozyon üzerindeki etkisinin diğer faktörlere göre genellikle daha sınırlı olduğu ve birçok çalışmada bu faktörün 1 olarak kabul edildiği bilinmektedir (Renard vd., 1997). Bu çalışmada havzadaki arazi yönetimi uygulamalarının erozyon üzerindeki potansiyel etkilerini daha iyi değerlendirebilmek ve daha detaylı bir risk analizi yapabilmek amacıyla, arazi kullanımına dayalı P faktörü değerleri kullanılmıştır. P faktörü değerleri, Panagos vd. (2015) tarafından Avrupa ölçeğinde yapılan çalışmada önerilen değerler temel alınarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, havzadaki farklı arazi kullanım tiplerinin erozyon üzerindeki etkilerini daha hassas bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Elde edilen toprak kaybı verilerinin arazi kullanım sınıflarındaki alansal dağılımını göstermek için, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından sağlanan ve Türkiye için en kapsamlı ve güncel arazi kullanım verisi olduğu düşünülen CORINE 2018 veri seti kullanılmıştır. CORINE 2018, RUSLE analizine doğrudan dahil edilmemiş, sadece toprak kaybı sonuçlarının farklı arazi kullanım sınıfları içindeki dağılımını görselleştirmek ve yorumlamak amacıyla kullanılmıştır. Sonuçlar, toprak kaybı değerlerinin doğal dağılımı dikkate alınarak oluşturulan histogram analizi yöntemiyle beş farklı risk sınıfında (çok hafif, hafif, orta, yüksek ve çok yüksek) değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan veriler ve kaynaklar Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri özellikleri ve kaynakları

Veri	Veri Özellikleri	Veri Kaynakları
Topografya	Çözünürlük: 12,5 m	ALOS PALSAR (2023)
Yağış	Yıllık Yağış Verisi (1981-2024), ~5 km	CHIRPS/PENTAD
Toprak	Ölçek: 1/100.000	T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı
Bitki Örtüsü	Sentinel-2 NDVI (B8, B4 bantları, 2023), 10 m	COPERNICUS/S2
Koruma Önlemleri	Arazi kullanım sınıfları (2020), 500 m (30 m'ye indirgenmiş)	MODIS/006/MCD12Q1
Arazi Kullanımı*	CORINE 2018, 100 m	EEA (European Environment Agency)
Veri İşleme Platformu	Çözünürlük: 30 m (analiz)	Google Earth Engine (GEE)

*CORINE 2018 arazi kullanım verileri, RUSLE analizine dahil edilmemiştir. Bu veriler, toprak kaybı verilerinin arazi kullanım sınıflarındaki alansal dağılımını göstermek amacıyla kullanılmıştır.

2.3. RUSLE Modeli ve Uygulama Yaklaşımı

Toprak erozyon riskinin mekânsal dağılımını ortaya koymak ve bu sürece etki eden faktörleri belirlemek amacıyla RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) modeli tercih edilmiştir. RUSLE, dünya genelinde yaygın olarak kullanılan, veri gereksinimi nispeten az olan ve farklı ölçeklerde uygulanabilen bir ampirik modeldir (Renard vd., 1997). RUSLE modeli, beş temel bileşenin bir araya gelmesiyle oluşturulmaktadır: Yağış erozyon faktörü (R), toprak erodibilite katsayısı (K), topoğrafya faktörü (LS), bitki örtüsü ve arazi kullanım faktörü (C) ve koruma uygulamaları faktörü (P) (Şekil 2).

Bu çalışmada, toplam yıllık toprak kaybı (A , $t \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$), RUSLE modeline dayalı olarak aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır (Renard vd., 1991):

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

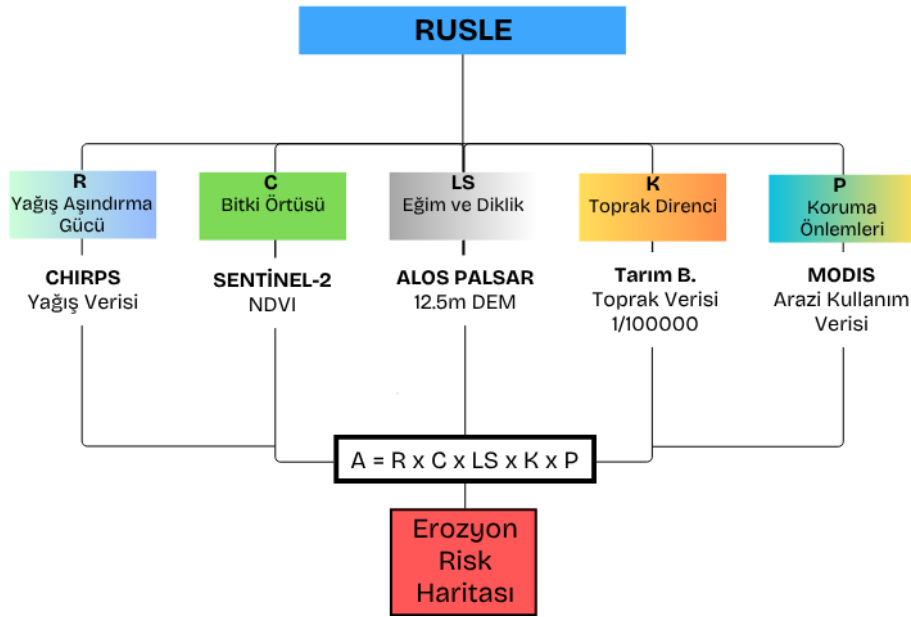
Burada:

- A: Yıllık ortalama toprak kaybı ($t\ ha^{-1}\ y^{-1}$),
- R: Yağış erozyon faktörü ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ y^{-1}$),
- K: Toprak erodibilite faktörü ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$),
- LS: Eğim uzunluğu ve eğim derecesi faktörü,
- C: Bitki örtüsü ve arazi kullanımı faktörü,
- P: Koruma uygulamaları faktörü.

Bu faktörler, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ortamında raster katmanlar olarak oluşturulduktan sonra, RUSLE modelinin denklemi ($A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$) her bir piksel için uygulanmıştır. Her bir piksel, belirli bir alanı (örneğin, 30 m x 30 m) temsil etmekte olup, bu pikseldeki toprak kaybı miktarı, modelin beş bileşeninin çarpımıyla hesaplanmıştır. Her bir faktörün mekânsal dağılımı, çalışma alanının tamamını kapsayacak şekilde raster formatında birleştirilmiştir.

RUSLE modeli, her pikseldeki yıllık toprak kaybını $t\ ha^{-1}\ y^{-1}$ cinsinden hesaplar. Bu hesaplama, her pikselin alanına göre normalize edilerek gerçekleştirilir. Örneğin, bir pikselin boyutu 30 m x 30 m (0.09 ha) olduğunda, bu pikseldeki toplam toprak kaybı miktarı, hektar başına düşen yıllık kayıp miktarına dönüştürülür. Bu dönüşüm, modelin çıktıların doğrudan $t\ ha^{-1}\ y^{-1}$ biriminde ifade edilmesini sağlar (Nearing vd., 1989). Böylece, her bir piksel için yıllık toprak kaybı miktarı belirlenir ve bu değerler, çalışma alanının tamamı için birleştirilerek toplam toprak kaybı haritası oluşturulur.

RUSLE modelinin sağladığı en önemli avantajlardan biri, yalnızca sınıfsal erozyon riskini değil, aynı zamanda nicel bir sonuç olan $t\ ha^{-1}\ y^{-1}$ cinsinden toprak kaybı miktarını da sunmasıdır. Bu özellik, diğer erozyon modellerinden farklı olarak hem mekânsal hem de sayısal analizlere olanak tanır (Nearing, 2013). Elde edilen sonuçlar, histogram analizi ile sınıflandırılarak erozyon risk sınıfları oluşturulmuş; aynı zamanda her bir piksel için kesin toprak kaybı miktarı da hesaplanmıştır.



Şekil 2. RUSLE model bileşenlerinin hesaplanma akışı

2.3.1. LS Faktörünün Hesaplanması

LS faktörü, topografyanın erozyon üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılan önemli bir parametredir (Renard vd., 1997). Bu çalışmada, LS faktörü, arazi eğimi ve akış birikimi haritaları temel alınarak hesaplanmıştır. Eğim sınıflandırmasında, literatürde yaygın olarak kabul edilen yaklaşım doğrultusunda, arazi eğimi %9'un altındaki düz alanlar ve %9'un üzerindeki dağlık alanlar olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmıştır (Moore & Burch, 1986).

Eğim değerlerinin radyan cinsine dönüştürülmesinde aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$Sloperad = \sin (Slopedeg. \pi / 180) \quad (2)$$

Bu dönüşüm, eğim verilerinin modellemeye uygun hâle getirilmesini sağlamış ve LS faktörünün daha doğru hesaplanmasına olanak tanımıştır. LS faktörü, GEE platformunda aşağıda belirtilen formüller yardımıyla hesaplanmıştır:

$$L = Sloperad1.5 \cdot FlowAccum0.6 \quad (3)$$

$$LS = Sloperad1.3 \cdot FlowAccum0.5 \quad (4)$$

Akış birikimi haritaları, Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) verilerinden türetilmiş ve yönlendirme algoritmaları yardımıyla oluşturulmuştur (Desmet & Govers, 1996). Elde edilen LS faktörü, modelin diğer bileşenleriyle entegre edilerek erozyon analizlerinde kullanılmıştır.

2.3.2. R Faktörünün Hesaplanması:

R faktörü, yağışın miktar ve şiddetini temsil ederek erozyon potansiyelinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Bu çalışmada, R faktörü hesaplamalarında CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data) veri seti kullanılmıştır. CHIRPS, 1981 yılından itibaren küresel ölçekte 0.05° çözünürlüklü yağış verisi sunmakta ve özellikle iklim analizlerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Funk vd., 2015).

1981–2024 yıllarına ait uzun dönem günlük yağış verileri, dinamik ve güncel yapısı, yüksek mekânsal (0.05°) ve zamansal (günlük) çözünürlüğü ile geniş alanlarda yağışın mekânsal dağılımını hassas şekilde yansıtabilen CHIRPS veri setinden (UCSB-CHG/CHIRPS/PENTAD veri koleksiyonu aracılığıyla) elde edilerek yıllık ortalama yağış rasteri (hücrese veri) oluşturulmuştur. Meteoroloji istasyonlarının seyrek veya eksik olduğu bölgelerde güvenilir sonuçlar sunması ve GEE platformunda kolayca erişilebilir olması da bu tercihte etkili olmuştur. Bu veriler, Renard vd., (1997) tarafından önerilen aşağıdaki denklem kullanılarak R faktörüne dönüştürülmüştür:

$$R = 0.363 \cdot P_{yillik} + 79 \quad (5)$$

Burada, P_{yillik} , CHIRPS veri setinden elde edilen yıllık toplam yağış miktarını ifade etmektedir. Bu formül, bölgesel iklim koşullarına uyum sağlayacak biçimde literatürde sıkça kullanılmaktadır.

2.3.3. K Faktörünün Hesaplanması:

K faktörü, bir toprağın su erozyonuna karşı direnç düzeyini ifade eden ve toprakların fiziksel-kimyasal özelliklerine dayanan önemli bir parametredir. Bu çalışmada, K faktörünün hesaplanmasında, Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilen 1/100.000 ölçekli toprak haritaları kullanılmıştır.

Toprak haritaları, önce ArcMap 10.8 yazılımında sayısallaştırılarak sınıflandırılmış; ardından raster formata dönüştürülerek GEE ortamına aktarılmıştır. Bu aşamada, çalışma alanındaki topraklar belirli sınıflara ayrılmış ve her bir toprak türü için, literatürde yaygın olarak kabul gören ve çalışma alanımızı da kapsayan "Türkiye Büyük Toprak Gruplarının Erozyona Duyarlılık "K" Faktörleri" (Cebel vd., 2013) çalışmasında raporlanan K katsayıları arasından, bölgeye karşılık gelen değerler seçilerek modellemeye dâhil edilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Çalışmada belirlenen toprak sınıfları ve bunlara ait K faktörü değerleri

Toprak Türü	K Faktörü
Çıplak Kaya ve Molozlar	0.025
Alüvyal Topraklar	0.06
Kahverengi Topraklar	0.035
Kestane Renkli Topraklar	0.035
Kırmızımsı Kestane Renkli Topraklar	0.045
Kırmızımsı Kahverengi Topraklar	0.05
Hidromorfik Topraklar	0.04
Kolüvyal Topraklar	0.065
Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları	0.045
Yüksek Dağ Çayır Toprakları	0.025
Kahverengi Orman Toprakları	0.03

K faktörü, bir toprağın su erozyonuna karşı ne derece dirençli olduğunu gösteren ve toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine dayanan kritik bir parametredir. Düşük K değerleri, toprağın erozyona karşı daha dayanıklı olduğunu, yüksek K değerleri ise erozyon riskinin arttığını göstermektedir (Renard vd., 1991).

Bu çalışmada, K faktörünün hesaplanmasında, sayısallaştırılan ve raster formata dönüştürülen toprak haritaları Google Earth Engine (GEE) platformuna aktarılmıştır. GEE ortamında, her bir toprak birimi, fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre ayrılarak K faktörü değerleri ilgili piksellere atanmıştır.

GEE ortamında yapılan sınıflandırmaya göre, çalışma alanında yaygın olarak bulunan alüvyal ve kolüvyal toprak türleri için literatürde önerilen K faktörü değerleri şu şekildedir: Alüvyal topraklar için $K = 0.06$, kolüvyal topraklar için ise $K = 0.065$.

Bu işlemler sonucunda, 0 ile 0.065 arasında değişen bir renk paletiyle K faktörü haritası oluşturulmuş ve erozyona karşı duyarlılığı yüksek ve düşük olan toprak alanları görsel olarak detaylandırılmıştır. Bu harita, modelin diğer bileşenleriyle entegre edilerek erozyon risk analizine dâhil edilmiştir.

2.3.4. C Faktörünün Hesaplanması

Bu çalışmada, C faktörünün hesaplanmasında Sentinel-2 uydu verilerinden türetilen NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) değerleri kullanılmıştır. NDVI, bitki örtüsünün yoğunluğu ve sağlığını belirlemede yaygın olarak kullanılan bir indeks olup, aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Rouse vd., 1974):

$$NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4) \quad (6)$$

Burada, B8 bandı yakın kızılötesi (NIR) yansımayı, B4 bandı ise kırmızı ışık yansımayı temsil etmektedir. NDVI değerleri -1 ile +1 arasında değişmekte olup, pozitif değerler sağlıklı ve yoğun bitki örtüsünü, negatif değerler ise su yüzeyleri ve çıplak arazileri göstermektedir. 2023–2024 yıllarına ait Sentinel-2 uydu görüntüleri, GEE platformunda işlenerek ortalama NDVI haritası oluşturulmuştur. Elde edilen NDVI değerleri, Van der Knijff vd. (2000) tarafından önerilen aşağıdaki denklem ile C faktörüne dönüştürülmüştür:

$$C = e^{(-2 \cdot NDVI)} \quad (7)$$

Bu denklem sayesinde bitki örtüsünün erozyonu önleme kapasitesi sayısal olarak ifade edilmiştir. Yoğun ve sağlıklı bitki örtüsüne sahip alanlarda C değeri düşük, çıplak veya zayıf bitki örtüsüne sahip alanlarda ise C değeri yüksek çıkmaktadır. Çalışmada elde edilen C faktörü haritaları, 0 ile 1 arasında bir renk paleti ile görselleştirilmiş ve bu sayede erozyon riski açısından bitki örtüsünün etkisi mekânsal olarak detaylı biçimde ortaya konmuştur. Literatürde yoğun bitki örtüsünün erozyonun şiddetini önemli ölçüde azalttığı vurgulanmakta olup (Renard vd., 1997), bu çalışmanın C faktörü dağılımı da bu bulgularla uyumludur.

2.3.5. P Faktörü Hesaplaması

P (koruma uygulamaları) faktörü, RUSLE modeli içerisinde, arazi kullanım biçimi ve uygulanan koruma tedbirlerinin erozyon üzerindeki etkisini yansıtan bir bileşendir. Düşük P faktörü değerleri, etkin koruma önlemlerini; yüksek değerler ise yetersiz veya hiç uygulanmayan koruma önlemlerini ifade etmektedir (Renard vd., 1997).

Bu çalışmada P faktörü, MODIS MCD12Q1 arazi kullanım verileri ile eğim sınıflarının entegrasyonu yoluyla hesaplanmıştır. GEE ortamında elde edilen veriler doğrultusunda, arazi kullanım türlerine göre P faktörü değerleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Ormanlık alanlar ve doğal bölgeler: $P = 0.6–0.7$
- Tarım alanları: $P = 0.8–0.9$
- Şehirleşmiş alanlar: $P = 1.0$

Ayrıca, eğim verileri ile arazi kullanım türleri birleştirilerek daha ayrıntılı bir mekânsal analiz gerçekleştirilmiştir:

- Eğim $< 5^\circ$: Yüksek koruma kapasitesi → düşük P değerleri
- Eğim $> 20^\circ$: Düşük koruma kapasitesi → yüksek P değerleri
- GEE platformunda yapılan analizler sonucunda, örneğin;
- Ormanlık alanlarda: $P = 0.6$
- Yüksek eğimli tarım alanlarında: $P = 0.9$
- Şehirleşmiş alanlarda: $P = 1.0$ olarak tanımlanmıştır.

Sonuçta elde edilen P faktörü haritaları, literatürde bildirilen erozyon riskinin arazi kullanım türlerine göre farklılık gösterdiğini net bir biçimde ortaya koymuş ve modelin mekânsal doğruluğunu artırmıştır.

2.4. Erozyon Risk Haritalarının Oluşturulması ve Riskli Alanların Belirlenmesi

Modelin tüm bileşenleri, GEE platformunda elde edilen mekânsal veriler ve literatür tabanlı katsayılar kullanılarak raster formatında hesaplanmıştır. Elde edilen her bir faktör katmanı, çarpan ilişkisine dayalı olarak birleştirilmiş ve çalışma alanının tamamı için toplam toprak kaybı haritası üretilmiştir.

Oluşturulan toprak kaybı raster verisi üzerinde yapılan histogram analizi temel alınarak erozyon şiddeti, Nearing (2013) sınıflandırmasına göre beş ana sınıfa ayrılmıştır:

- Çok Hafif Erozyon: $<10 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (yeşil)
- Hafif Erozyon: $10\text{--}20 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (sarı)
- Orta Erozyon: $20\text{--}30 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (turuncu)
- Yüksek Erozyon: $30\text{--}40 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (kırmızı)
- Çok Yüksek Erozyon: $>40 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (koyu kırmızı)

Bu sınıflandırma, doğal dağılıma dayalı histogram analizine göre yapılmış ve mekânsal yorumlamanın güvenilirliğini artırmıştır (Çelikalın vd., 2014). Model çıktıları doğrultusunda, erozyon riski taşıyan bölgeler detaylı şekilde tanımlanmış ve aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

- Çok Hafif ve Hafif Erozyon Bölgeleri: Genellikle düşük eğimli ve yoğun bitki örtüsüyle kaplı alanlardır. Ormanlık alanlar ve iyi yönetilen tarım arazileri bu kategoriye girmekte olup, erozyon riski oldukça düşüktür.
- Orta Seviyede Erozyon Bölgeleri: Orta eğimli tarım alanları ile parçalı bitki örtüsüne sahip açık araziler bu sınıfa dahildir. Erozyon riski orta düzeyde olup, uygun arazi yönetimi ve koruma önlemleri gerekmektedir.
- Riskli ve Yüksek Riskli Erozyon Bölgeleri: Bu alanlar, genellikle çıplak yüzeyler, yüksek eğimli yamaçlar ve koruma önlemlerinin yetersiz olduğu bölgelerden oluşmaktadır. Erozyon şiddeti yüksektir ve bu bölgelerde acil erozyon kontrol önlemleri uygulanması gerekmektedir.

Bu bulgular, çalışmanın odaklandığı havzada erozyon dinamiklerinin mekânsal dağılımını ortaya koymuş ve sürdürülebilir arazi yönetimi için kritik veriler sunmuştur. Çalışma, erozyon riski yüksek bölgelerin belirlenmesiyle, bölgedeki arazi kullanımı ve koruma stratejilerinin geliştirilmesinde rehberlik sağlamaktadır.

3. Bulgular

3.1. Çalışma Sahasında Erozyona Etki Eden Faktörler

3.1.1. Eğim

Eğim, erozyon süreçlerini doğrudan etkileyen en önemli morfometrik parametrelerden biridir. Arazi eğimi, yüzeysel akışın hem hızını hem de yönünü belirleyerek toprak kaybının şiddetini doğrudan etkilerken, yükselti ise iklim koşulları ve bitki örtüsü üzerinde dolaylı bir etkiye sahip olarak erozyon süreçlerini etkilemektedir (Şekil 3a). Porsuk Çayı Havzası'nda eğim dağılımı, genel olarak düz ve düze yakın, az eğimli, dik ve çok dik alanlar içermektedir. Havzanın yaklaşık %60'ı eğimli, dik ve çok dik yamaçlardan oluşurken, geri kalan %40'lık kısmı düz ve düze yakın alanları kapsamaktadır. Eğim ve yükselti haritaları, ALOS PALSAR DEM verileri kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3a, 3b).

Eğim değerinin yüksek olduğu bölgelerde yüzeysel akış hızlanmakta, bu durum toprak kaybını artırarak erozyon riskini önemli ölçüde yükseltmektedir. Özellikle Sündiken Dağları ve Murat Dağı çevresindeki dik yamaçlarda, erozyonun daha şiddetli ve yaygın olduğu tespit edilmiştir.

3.1.2. Bakı

Bakı, erozyon süreçlerini etkileyen temel morfometrik faktörlerden biridir. Yamaçların yönelimi, yağışın toplanma ve akış biçimlerini doğrudan etkileyerek, toprak kaybı ve erozyon riskinin belirlenmesinde önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Porsuk Çayı Havzası'nda kuzeye bakan yamaçlar, güneye bakan yamaçlara göre daha fazla yağış almakta ve bu durum, bu alanlarda bitki örtüsünün daha yoğun gelişmesini sağlamaktadır. Buna bağlı olarak, kuzeye bakan yamaçlarda erozyon riski daha düşüktür.

Öte yandan, güneye bakan yamaçlarda kuraklık etkisi daha belirgindir ve yağışların yüzeysel akışa dönüşme oranı daha yüksektir. Bu durum, söz konusu alanlarda toprak kaybının artmasına ve erozyon riskinin yükselmesine neden olmaktadır (Kaymak, 2020). Bakı yönündeki bu farklılıklar, havzanın mikroklimatik özellikleriyle birleşerek erozyonun

mekânsal dağılımını önemli ölçüde şekillendirmektedir. Bakı haritası, ALOS PALSAR DEM verilerinden türetilen yüzey modelleri kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3c).

3.1.3. Jeolojik Özellikler

Porsuk Çayı Havzası'nın jeolojik yapısı, erozyon süreçlerini doğrudan etkileyen önemli etmenlerden biridir. Havza, Paleozoik, Mesozoyik ve Senozoyik dönemlere ait kayaç birimlerini içermektedir (Şengör & Yılmaz, 1983).

Paleozoik döneme ait kayaçlar, özellikle mignatit ve gnays türlerinden oluşmakta olup, düşük geçirgenlik özellikleri nedeniyle yüzeysel akışı artırmakta ve buna bağlı olarak erozyon riskini yükseltmektedir (Bakış vd., 2008). Bu kayaçlar, havzanın kuzey ve güney kesimlerinde geniş alanlar kaplamaktadır. Mesozoyik döneme ait kayaçlar arasında Orta-Üst Jura-Alt Kretase (kireçtaşı) ve Üst Kretase (kumtaşı-çamurtaşı-riyolit) birimleri bulunmaktadır. Karbonatlı kayaçlar, yüksek geçirgenlik özellikleri sayesinde yağış sularının yer altına sızmasını kolaylaştırmakta ve yüzeysel akışı azaltarak erozyon potansiyelini düşürmektedir (Yurteri, 2024). Bu kayaçlar, havzanın doğu ve batı kesimlerinde yaygın olarak görülmektedir. Senozoyik döneme ait birimler arasında Üst Eosen-Alt Miyosen (çakıtaşı-kumtaşı-çamurtaşı) ve Kuvaterner (alüvyon, yamaç molozu, birikinti konisi) yer almaktadır. Bu birimler, düşük geçirgenlik özellikleri nedeniyle suyun yüzeyde kalmasına neden olmakta ve bu durum yüzeysel akış miktarını artırarak erozyon riskinin artmasına yol açmaktadır (Ocakoğlu & Akkiraz, 2019). Özellikle havzanın alüvyal düzlüklerinde bu birimler belirgin şekilde gözlemlenmektedir. Topografik ve jeolojik çeşitlilik, havza genelinde erozyon riskinin mekânsal farklılıklar göstermesine yol açmaktadır. Bu çalışmada kullanılan jeoloji haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından sunulan 1/100.000 ölçekli veri setine dayanmaktadır (Şekil 3d).

3.1.4. Toprak Özellikleri

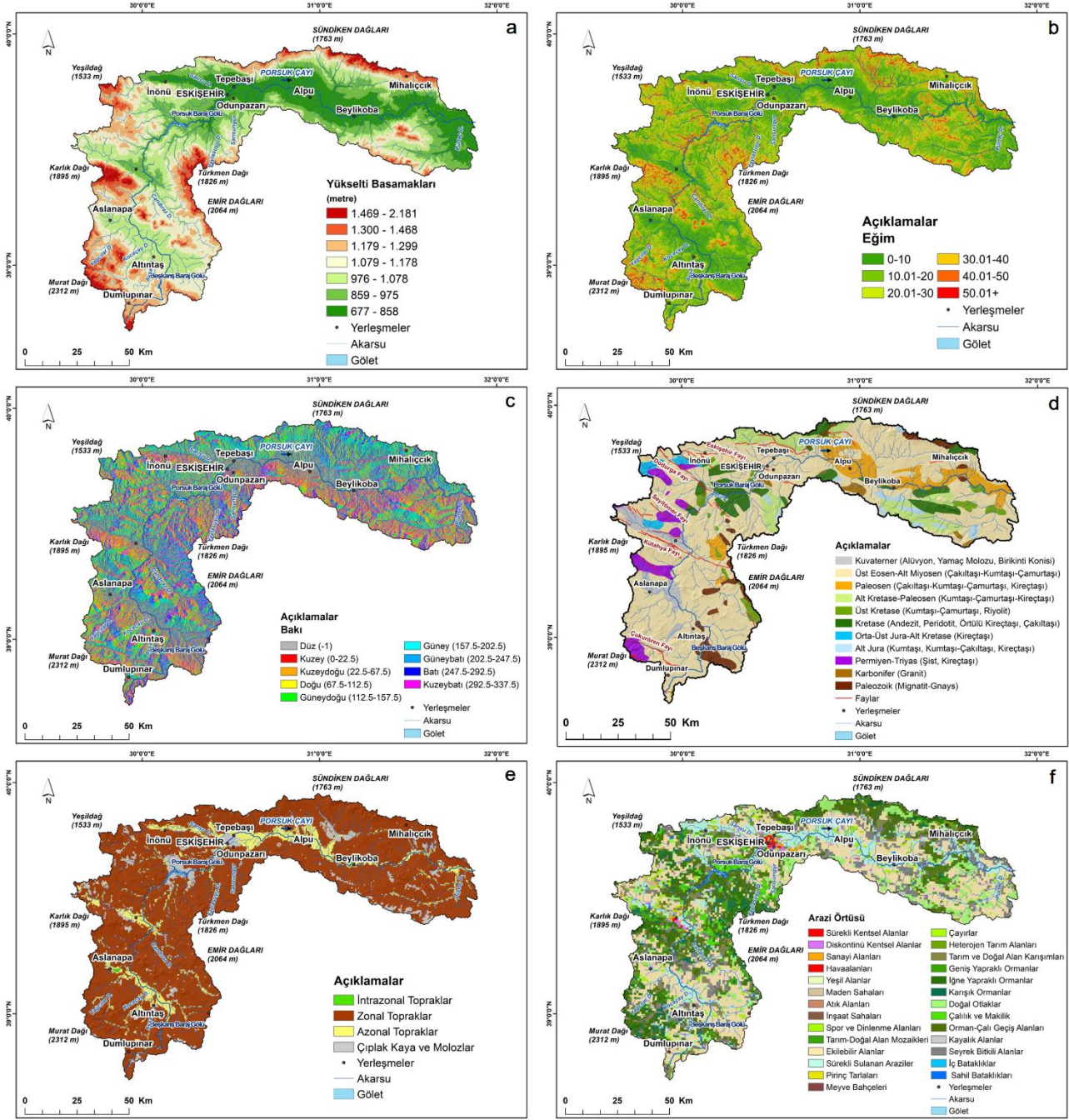
Toprak özellikleri, erozyon süreçlerinin belirlenmesinde kritik rol oynayan diğer önemli faktörlerden biridir. Porsuk Çayı Havzası'nda kahverengi orman toprakları, kahverengi topraklar, alüvyal topraklar ve kireçsiz kahverengi orman toprakları gibi çeşitli toprak türleri bulunmaktadır (Bakış vd., 2008).

Havza genelinde en yaygın toprak tipi, %45,16 oranıyla kahverengi orman topraklarıdır. Bu topraklar genellikle eğimli alanlarda yaygın olup, gevşek ve geçirgen yapıları nedeniyle yağış sularının hızla yüzeye ulaşmasına neden olmaktadır. Bu durum da erozyon riskini artırmaktadır (Güngör, 2011). Alüvyal topraklar ise daha çok havzanın düşük seviyelerinde ve akarsu vadilerinde yer almaktadır. Her ne kadar bu topraklar suyun birikmesine olanak tanısa da düşük geçirgenlik özellikleri nedeniyle yüzeysel akış miktarını artırmakta ve buna bağlı olarak erozyon riskinin yükselmesine sebep olmaktadır (Ocak vd., 2012). Çalışmada kullanılan toprak verisi, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilen 1/100.000 ölçekli toprak haritasına dayanmaktadır (Şekil 3e).

3.1.5. Arazi Kullanımı

Arazi kullanımı, erozyon riskini doğrudan etkileyen önemli parametrelerden biridir. Porsuk Çayı Havzası'nda tarım alanları, orman örtüsü, mera arazileri ve kentsel yerleşimler gibi farklı arazi kullanım türleri bulunmaktadır. Havza genelinde en yaygın kullanım türü, %31,85 oranıyla tarım alanlarıdır. Ancak tarımsal faaliyetler, toprağın çıplak kalma süresini uzatarak yüzeysel akışın artmasına ve dolayısıyla erozyon riskinin yükselmesine neden olmaktadır (Montgomery, 2007). Ormanlık alanlar ise özellikle eğimli yamaçlarda yüzeysel akışı sınırlayarak erozyonun önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Karaçam ve sarıçam gibi iğne yapraklı türlerin oluşturduğu orman örtüsü, bu işlevi etkin biçimde yerine getirmektedir (Anderson & Richards, 1981).

Bununla birlikte, aşırı otlatma, orman tahribatı ve yanlış arazi kullanım uygulamaları gibi insan kaynaklı müdahaleler, havzada erozyon riskini artıran başlıca etkenler arasında yer almaktadır (Öztürk & Altan, 2008). Arazi kullanım haritası, Copernicus Land Monitoring Service (2018) tarafından sunulan CORINE verisi temel alınarak oluşturulmuştur (Şekil 3f).



Şekil 3. Çalışma sahasında erozyona etki eden faktörler: a) yükselti, b) eğim, c) bakı, d) jeoloji, e) toprak ve f) arazi kullanımı

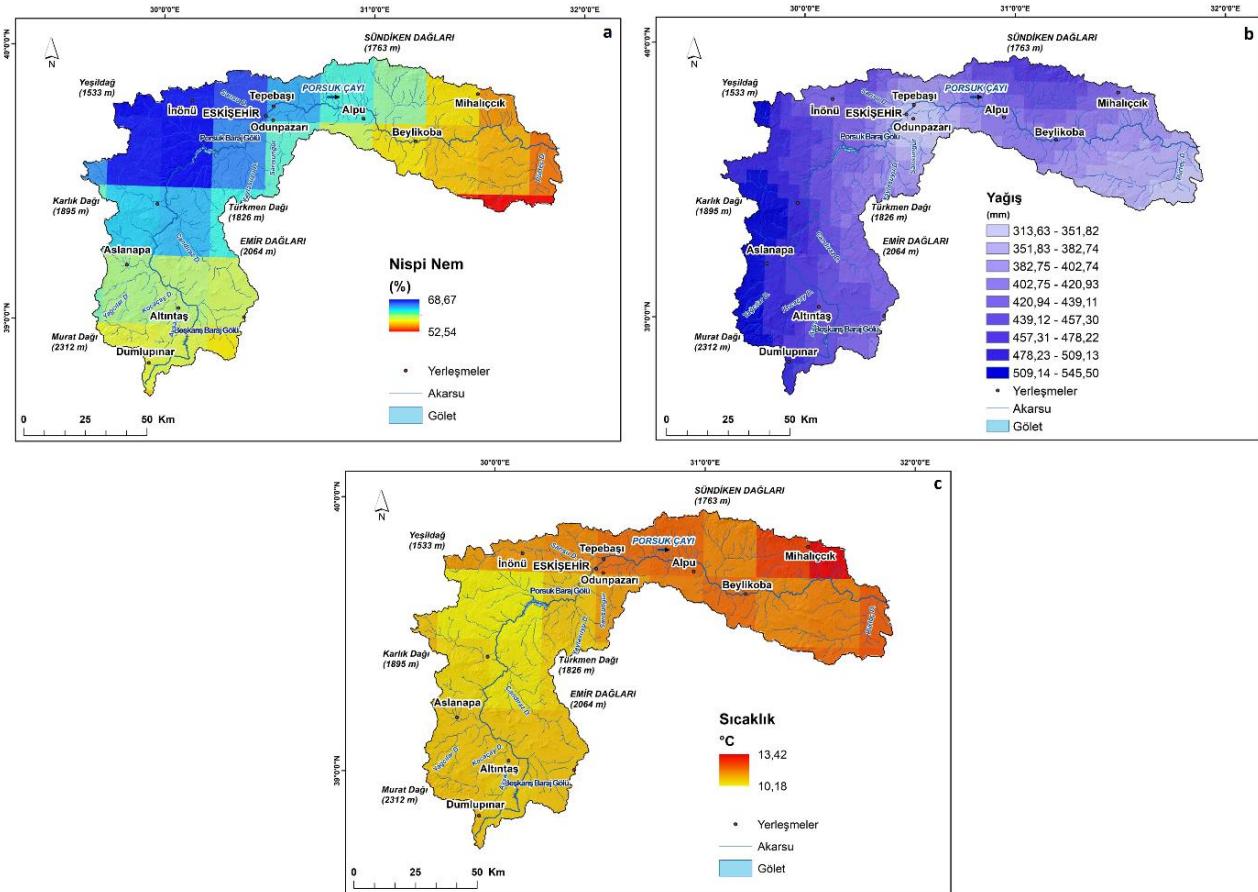
3.1.6. İklim Özellikleri

Porsuk Çayı Havzası'ndaki erozyon süreçleri üzerinde doğrudan etkili olan temel faktörlerden biri, havzanın iklimsel özellikleridir. Havza, İç Batı Anadolu'nun coğrafi olarak geçiş bölgesinde yer almakta olup, Ege ve Marmara bölgelerinin ılıman iklimi ile İç Anadolu'nun karasal iklimi arasında bir sınır teşkil etmektedir. Bu geçiş bölgesel yapısı, havzada çeşitli mikroklimatik koşulların gelişmesine ve iklimsel çeşitliliğin belirginleşmesine neden olmaktadır. Genel olarak, kış aylarında uzun, soğuk ve yağışlı bir iklim hüküm sürerken; yaz aylarında ise sıcak ve kurak bir dönem yaşanmaktadır. Batıdan doğuya doğru ilerledikçe karasal iklim etkisi giderek daha belirgin hale gelmektedir. Bu iklimsel farklılıklar, tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği, bitki örtüsünün dağılımı ve toprak erozyon süreçleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır (Öztürk & Altan, 2008).

1991–2023 dönemine ait yağış verileri incelendiğinde, havzanın yıllık ortalama yağış miktarının 494 mm olduğu belirlenmiştir. Yağışların yaklaşık %34'ü kış, %31'i ise ilkbahar mevsimlerinde gerçekleşmektedir (Şekil 4b). Ancak son yıllarda, yağış miktarları ve mevsimsel dağılımlarında gözlemlenen düzensizlikler, dikkat çekici bir trend göstermektedir. Özellikle kış aylarında meydana gelen yoğun yağışlar, eğimli alanlarda yüzey akışını artırarak erozyon riskini yükseltirken; yaz aylarındaki kuraklık, toprak neminin azalmasına ve kuraklık etkisinin artmasına yol açmaktadır (Duvan vd., 2021).

Havzanın yıllık ortalama sıcaklık değeri 11,51°C olarak belirlenmiştir. Ocak ayında en düşük sıcaklık ortalaması 0,69°C, temmuz ayında ise en yüksek sıcaklık ortalaması 22,24°C olarak kaydedilmiştir. Bu sıcaklık verileri, ERA5-Land uydu tabanlı veri setinden elde edilmiştir ve küresel düzeydeki meteorolojik değişkenlerin yüksek çözünürlükle analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (Muñoz-Sabater vd., 2021). Uzun dönem sıcaklık verileri, küresel iklim değişikliği ile paralel olarak sıcaklık ortalamalarında 0,5–1,0°C arasında bir artış olduğunu göstermektedir. Bu artış, toprak neminin azalmasına yol açarak, özellikle yaz aylarında erozyon riskini artıran önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır (Şekil 4c).

Nispi nem oranı, havzanın bir diğer kritik iklimsel parametresidir. Yıllık ortalama nem oranı %61,81 olarak belirlenmiştir; Ocak ayında bu oran %68,67 ile zirveye ulaşırken, temmuz ayında %52,54 ile en düşük seviyeye inmektedir (Şekil 4a). Mevsimsel nem değişimleri, bitki örtüsünün gelişimi ve tarımsal üretkenlik üzerinde doğrudan etkili olmakta; özellikle yaz döneminde buharlaşmanın artması, su kaynakları üzerindeki baskıyı artırarak erozyon potansiyelini yükseltmektedir (Tekkanat & Sarış, 2015). Rüzgarlar genellikle "hafif rüzgâr" sınıfına girse de, çıplak ve eğimli arazilerde toprak yüzeyinin korunmasız kalması durumunda rüzgâr erozyonuna yol açabilmektedir. Özellikle kuzeybatı yönünden esen rüzgarlar, bitki örtüsünden yoksun alanlarda toprak partiküllerinin taşınmasını hızlandırarak yüzeysel toprak kaybını artırmaktadır (İnce, 2019).



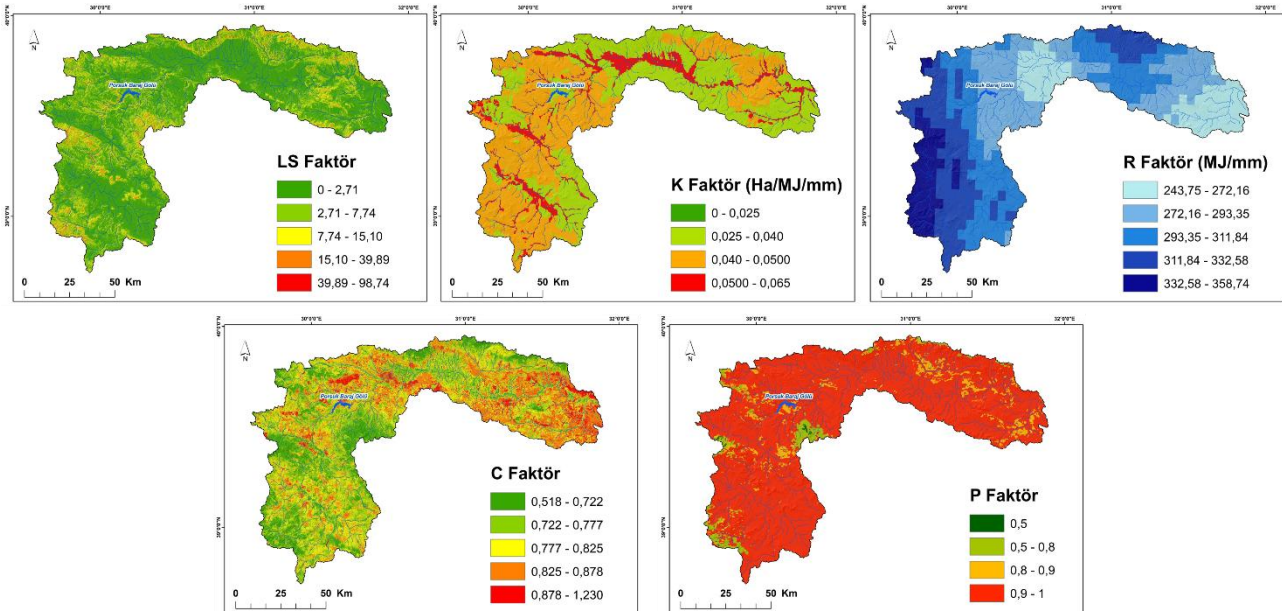
Şekil 4. Çalışma sahasının 1991-2023 yılları arası: a) ortalama nispi nem, b) yağış ve c) sıcaklık haritaları

3.2. RUSLE Faktörlerinin Mekânsal Dağılımı

Porsuk Çayı Havzası'nda toprak kaybını etkileyen faktörlerin mekânsal dağılımları, RUSLE modelinin temel bileşenleri olan R, K, LS, C ve P parametreleri üzerinden analiz edilmiştir (Şekil 5). Bu analizler, her bir faktörün havza genelindeki etkilerini inceleyerek erozyon riskine olan katkılarını daha iyi anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

- R Faktörü (Yağış Erozivite Faktörü): Kuzeydoğu ve güneybatı bölgelerinde yüksek değerlere sahip olan bu faktör, yağış yoğunluğunun erozyon üzerindeki etkisinin bu bölgelerde belirgin olduğunu göstermektedir. Yağışın şiddeti, yüzey akışını artırarak toprak kaybını tetiklemektedir.
- K Faktörü (Toprak Erozivite Faktörü): Kolüvyal toprakların yoğun olarak bulunduğu alanlarda daha yüksek değerlere sahip olan bu faktör, toprak türlerinin erozyona karşı duyarlılığını doğrudan etkilemektedir. Özellikle gevşek ve pürüzsüz yapıya sahip topraklar, erozyon riskini artırmaktadır.
- LS Faktörü (Eğim ve Akış Birikimi Faktörü): Sündiken Dağları, Karlık Dağı ve Emir Dağları gibi eğimin yüksek olduğu dağlık alanlarda belirgin bir artış göstermektedir. Yüksek eğimli alanlarda, akış birikimi ve eğimin etkisiyle erozyon süreci hızlanmakta, bu da toprak kaybının arttığı bölgeleri ortaya koymaktadır.
- C Faktörü (Bitki Örtüsü ve Arazi Kullanımı Faktörü): Yoğun bitki örtüsüne sahip olan bölgelerde düşük, seyrek bitki örtüsüne sahip alanlarda ise daha yüksek değerlere sahiptir. Bitki örtüsünün erozyonun önlenmesindeki rolü büyük olup, yoğun örtü, toprakları koruyarak erozyonu engellemektedir.
- P Faktörü (Koruma Önlemleri Faktörü): Koruma tedbirlerinin etkin olduğu bölgelerde düşük, tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu alanlarda ise daha yüksek değerlere sahip olan bu faktör, tarımsal faaliyetlerin erozyon riskini artırma potansiyelini göstermektedir. Özellikle ormanlaştırma ve toprağın korunduğu alanlarda erozyon riski düşerken, tarım yapılan alanlarda bu risk artmaktadır.

Bu faktörlerin mekânsal dağılımı, Porsuk Çayı Havzası'nın farklı bölgelerinde etkili olan erozyon duyarlılığını ortaya koyarak, bölgedeki erozyon riskini anlamada önemli katkılar sunmaktadır.



Şekil 5. RUSLE faktörlerinin Porsuk Çayı Havzası'ndaki mekânsal dağılımı: a) LS faktörü, b) K faktörü, c) R faktörü, d) C faktörü ve e) P faktörü

3.3. Erozyon Risk Sınıflarının Dağılımı

RUSLE faktörlerinin birleşik değerlendirilmesi sonucunda, Porsuk Çayı Havzası'ndaki erozyon risk sınıflarının mekânsal dağılımı belirlenmiştir. Havzanın toplam yüzölçümü 1.079.744,67 hektar olup, hektar başına hesaplanan ortalama yıllık toprak kaybı 2,35 ton ha⁻¹ yıl⁻¹ olarak belirlenmiştir. Çalışma alanındaki toplam yıllık toprak kaybı ise 2,538,269.32 ton olarak hesaplanmıştır. Erozyon risk sınıflarının ilgili alanları ve toprak kayıplarına ilişkin oranlar, Tablo 3'te sunulmuştur. Bu veriler, Porsuk Çayı Havzası'ndaki erozyon riskinin mekânsal dağılımını ve bölgesel farklılıklarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele (ÇEM) Genel Müdürlüğü'nün 2022-2025 dönemi Türkiye havza istatistiklerine göre, Sakarya Havzası'nda ortalama toprak kaybı 5.48 ton ha⁻¹ yıl⁻¹ olarak tespit edilmiştir (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2022). Porsuk Çayı Havzası, Sakarya Havzası'nın bir alt havzası olmasına rağmen, bu çalışmada elde edilen 2,35 ton ha⁻¹ yıl⁻¹ değeri, bölgesel farklılıkların ve havza özelindeki koşulların erozyon oranları üzerindeki etkisini göstermektedir.

Havzanın büyük bir kısmı, çok hafif risk sınıfı altında olup, toplam yüzölçümünün %41,01'ini kapsar ve toprak kaybının sadece %15,47'sine neden olmaktadır. Hafif ve orta risk sınıfları ise havzanın %24,43'ünü kaplamakta olup, toplam toprak kaybının %22,05'ine yol açmaktadır. Buna karşın, yüksek ve çok yüksek risk sınıfları, havzanın %34,57'lik kısmını oluşturmalarına rağmen toplam toprak kaybının %62,49'unı meydana getirmektedir. Bu durum, özellikle eğim ve bitki örtüsü gibi faktörlerin erozyon riskinin artırıcı etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Sündiken Dağları, yüksek eğim oranları ve seyrek bitki örtüsü nedeniyle erozyon riskinin en yoğun olduğu bölgelerden biridir. Mihaliççik, Altıntaş ve Aslanapa çevresinde, tarımsal faaliyetlerin yoğun olması ve ağaçlandırma eksikliklerinin yaşanması erozyon riskini arttıran önemli faktörlerdir. Karlık ve Emir Dağları ise eğim faktörünün etkisiyle yüksek risk sınıfına girmektedir. Ayrıca, özellikle Eskişehir çevresi gibi yerleşim alanları, kentsel genişleme ve tarımsal faaliyetlerin birleşimiyle yüksek risk altındaki bölgeler arasında yer almaktadır.

Bu analiz, bölgedeki erozyon riskinin yerel farklılıklarını ve bu riskin belirli alanlarda ne kadar yoğunlaştığını vurgulamaktadır. Erozyonun daha da artmaması için bu risk sınıflarına yönelik özel önlemler ve müdahaleler önerilmelidir.

Tablo 3. Porsuk Çayı Havzası'nda toprak kaybı risk sınıfları ve dağılımları

Sınıf	Kapladığı Alan (ha)	Kapladığı Oran (%)	Kaybedilen Toprak (ton)	Kayıp Oranı (%)	Hektar Başına Kayıp (ton ha ⁻¹ y ⁻¹)
Çok Hafif (<10)	442775.07	41.01	392,653.94	15.47	0.58
Hafif (10-20)	160090.65	14.83	283,921.36	11.19	1.46
Orta (20-30)	103610.07	9.60	275,642.29	10.86	2.35
Yüksek (30-40)	77829.30	7.21	276,072.11	10.88	3.24
Çok Yüksek (>40)	295439.58	27.36	1,309,979.62	51.61	4.12
Toplam	1,079,744.67	100.00	2,538,269.32	100.00	2.35

3.4. Arazi Kullanım Sınıflarına Göre Toprak Kaybı

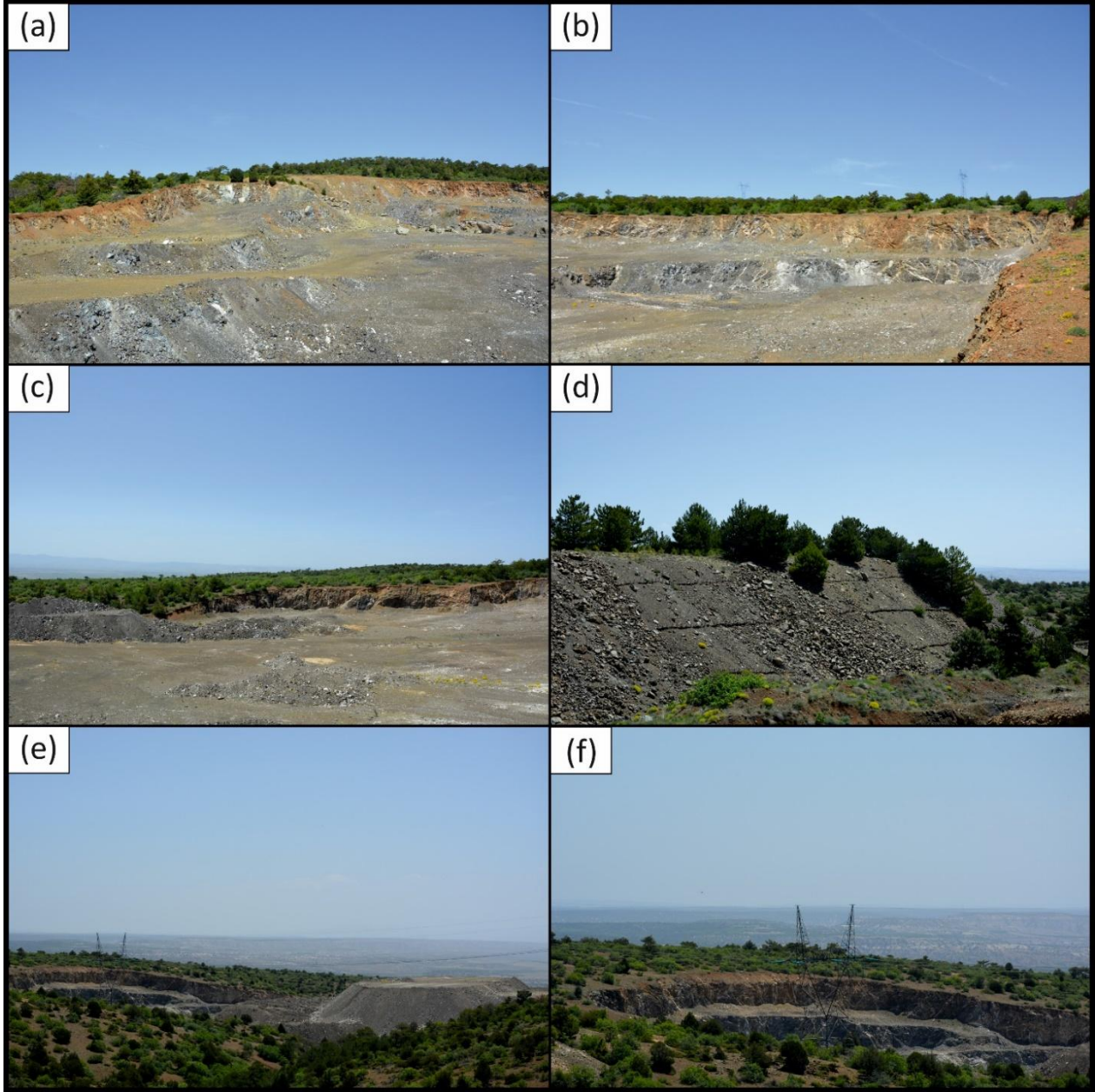
Toprak kaybı miktarları, Avrupa Birliği tarafından geliştirilen ve arazi örtüsü/arazi kullanımı değişimlerinin izlenmesinde yaygın olarak kullanılan CORINE (Coordination of Information on the Environment) arazi sınıflandırması temel alınarak analiz edilmiştir. CORINE, Avrupa'nın arazi örtüsü hakkında tutarlı ve karşılaştırılabilir veri sağlaması, farklı ülkeler ve bölgeler arasında analiz yapma imkânı sunması nedeniyle tercih edilmiştir (Büttner, 2014). Çalışma alanının toplam büyüklüğü 1.079.744,67 hektar olup, toplam yıllık toprak kaybı 2,538,269.32 ton olarak hesaplanmıştır. Ekilebilir alanlar, toplam alanın %29,91'ini kapsamakta olup, bu alanlar toplam toprak kaybının %28,62'sine karşılık gelmektedir. Özellikle Altıntaş ve Aslanapa çevresinde yüksek toprak kaybı gözlemlenmiştir. Bu alanları orman-çalı geçiş alanları takip etmektedir; bu alanlar toplam yüzölçümünün %14,93'ünü oluşturmakta ve toprak kaybına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Tablo 4). Özellikle Mihaliççik çevresinde erozyon riski yüksek olarak tespit edilmiştir.

Bu bulgular, arazi kullanım türlerinin erozyon üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu ekilebilir alanlarda erozyonun arttığı ve bu bölgelerde alınacak koruma önlemlerinin ne denli önemli olduğu vurgulanmaktadır. Ekilebilir alanlar ve orman-çalı geçiş alanları gibi bölgelerde erozyon riskini azaltmaya yönelik tedbirlerin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır. Bu tedbirler, yerel ekosistemleri koruma ve toprak kaybını en aza indirme açısından büyük bir öneme sahiptir.

Tablo 4. Arazi sınıflarına göre toprak kaybı alan ve oranları

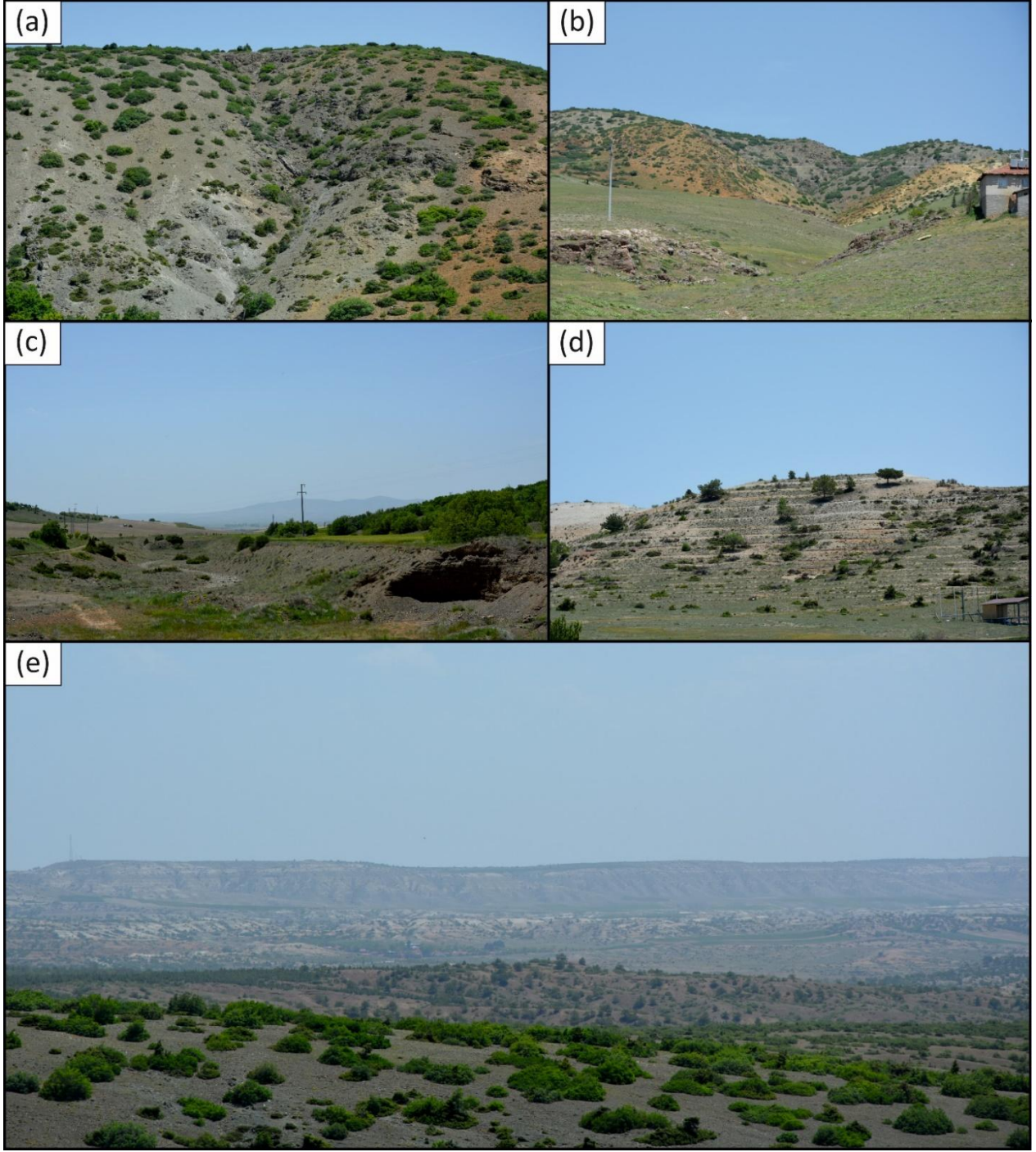
Arazi Sınıfı (CORINE)	Alan (ha)	Oran (%)	Toplam Toprak Kaybı (ton)
211-Ekilebilir Alanlar	322,867.18	29.91	726,467.87
324-Orman-Çalı Geçiş Alanları	161,229.92	14.93	362,767.03
212-Sürekli Sulanan Araziler	107,355.19	9.94	241,402.80
333-Seyrek Bitkili Alanlar	86,476.92	8.01	194,611.80
321-Doğal Otlaklar	80,015.73	7.41	180,077.40
312-İğne Yapraklı Ormanlar	73,642.96	6.82	165,873.14
243-Tarım ve Doğal Alan Karışımları	64,166.87	5.94	144,475.56
231-Çayırlar	33,455.67	3.10	75,480.68
323-Çalılık ve Makilik	26,725.79	2.48	60,319.53
311-Geniş Yapraklı Ormanlar	23,589.64	2.19	53,156.23
313-Karışık Ormanlar	22,885.94	2.12	51,975.27
242-Heterojen Tarım Alanları	14,592.03	1.35	32,875.41
112-Kentsel Alanlar	11,501.79	1.06	26,423.14
121-Sanayi Alanları	5,274.74	0.49	12,111.92
131-Maden Sahaları	7,276.76	0.67	16,723.88
141-Yeşil Alanlar	1,581.14	0.15	3,634.71
332-Kayalık Alanlar	1,160.73	0.11	2,672.76
133-İnşaat Sahaları	738.22	0.07	1,636.61
213-Pirinç Tarlaları	633.51	0.06	1,403.30
222-Meyve Bahçeleri	528.07	0.05	1,170.10
142-Spor ve Dinlenme Alanları	421.85	0.04	935.01
244-Tarım-Doğal Alan Mozaikleri	421.85	0.04	935.01
411-İç Bataklıklar	316.71	0.03	702.82
421Sahil Bataklıkları	3,794.38	0.35	8,417.76
111-Sürekli Kentsel Alanlar	3,055.99	0.28	6,782.96
124-Havaalanları	210.68	0.02	467.31
132-Atık Alanları	210.68	0.02	467.31
Toplam	1,079,744.67	100.00	2,538,269.32

Porsuk Çayı Havzası'nda RUSLE modeli sonuçlarının yerinde doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen kapsamlı saha çalışmaları, havzanın farklı bölgelerinde hem doğal hem de antropojenik faktörlerin etkisiyle gelişen erozyon süreçlerini ayrıntılı biçimde belgelemektedir. Özellikle Kozlube Köyü'nün kuzey kesimleri, Kozlube-Söğütçük yolu arasındaki yamaçlar ve Alpu ilçesi yakınlarındaki Sündiken Dağları yamaçlarında yoğunlaşan arazi gözlemleri, insan faaliyetlerinin erozyon üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymuştur. Şekil 6'da sunulan antropojenik etkilere bakıldığında, maden çıkarma sahalarının (Şekil 6a, 6b ve 6c) doğal arazi örtüsünü tamamen ortadan kaldırarak yüksek düzeyde erozyon riski oluşturduğu görülmektedir. Bu alanlarda üst toprak katmanının kaldırılması ve bitki örtüsünün yok edilmesi, toprağın erozyona karşı direncini önemli ölçüde azaltmaktadır. Şekil 6d'de görülen heyelan ve toprak kayması riskini azaltmaya yönelik alınan sınırlı önlemler ise, antropojenik müdahalelerin yol açtığı erozyon süreçlerini kontrol altına alma çabalarını yansıtmaktadır. Ayrıca, Şekil 6e'de maden işletmelerinden çıkan atık malzeme ve molozların vadi tabanına kontrolsüz biçimde depolanmasının, doğal sediment taşınım süreçlerini kesintiye uğratarak vadinin hidrojeomorfolojik dengesini bozduğu tespit edilmiştir. Bu durum, aşağı havzadaki doğal sediment bütçesini değiştirerek yeni erozyon alanlarının oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Şekil 6f ise, havza genelinde antropojenik etkilerin yaygınlığını gösteren panoramik bir görünüm sunmakta ve insan faaliyetlerinin doğal peyzaj üzerindeki geniş ölçekli dönüştürücü etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Çalışma sahasındaki antropojenik etkilerin gösterimi: maden çıkarma sahalarındaki tahribatın erozyon süreçlerine etkisi (a, b, c), erozyon riskini azaltmak için alınan tedbirler (d), maden işletmelerinden çıkan atık malzeme ve molozların vadi tabanına kontrolsüz biçimde depolanması (e, f)

Havzada gözlemlenen doğal erozyon süreçleri ise Şekil 7’de belgelenmiştir. Şekil 7a ve 7b’de, eğimli yamaçlarda seyrek bitki örtüsü nedeniyle gelişen yüzey erozyonu örnekleri yer almaktadır. Bu alanlarda bitki örtüsünün yetersizliği ve eğim faktörü, erozyon şiddetini artıran başlıca etmenlerdir. Yağış sularının etkisiyle toprak parçacıklarının taşınması ve ince oyuntuların oluşumu bu bölgelerde belirgin şekilde gözlenmiştir. Şekil 7c’de ise, daha ileri aşamadaki bir erozyon süreci olan yarıntı erozyonu görülmektedir. Bu tür erozyon, yoğun yağışlar sonrasında yüzey akışının belirli hatlarda yoğunlaşmasıyla oluşmakta ve önemli miktarda toprak kaybına yol açmaktadır. Söğütçük Köyü civarında uygulanan teraslama yöntemi (Şekil 7d), eğimli yamaçlarda basamaklar oluşturarak yüzey akışının hızını azaltmakta ve toprağın yerinde tutulmasını sağlayan etkili bir erozyon kontrol önlemi olarak öne çıkmaktadır. Şekil 7e’de ise Sündiken Dağları’nın yamaçlarında gözlemlenen geniş ölçekli erozyon alanlarının uzaktan görünümü, yüksek eğim, seyrek bitki örtüsü ve uygun olmayan arazi kullanımı gibi faktörlerin birleşiminin bölgesel ölçekte erozyon riskini artırdığını göstermektedir.



Şekil 7. Çalışma sahasındaki doğal erozyon süreçlerinin gösterimi: yüzey ve yarıntı erozyon tiplerinin görünümü (a, b, c) ve alınan tedbirler (d, Söğütçük köyü), Sündiken Dağları'nın yamaçlarında gözlemlenen erozyon alanlarının görünümü (e)

Saha gözlemleri, RUSLE modeli sonuçlarıyla büyük ölçüde uyumlu bulgular sunmuştur. Özellikle Sündiken Dağları'nın güneye bakan yamaçlarında gözlemlenen yoğun erozyon izleri, modelde yüksek ve çok yüksek risk sınıfında gösterilen alanlarla örtüşmektedir. Benzer şekilde, maden çıkarma sahalarında insan eliyle oluşturulan yapay erozyon alanları da modelde yüksek risk taşıyan bölgelerle uyumludur. Arazi çalışmaları sırasında önemli bir husus olarak, RUSLE modelinin Sentinel-2 uydu görüntülerinden türetilen NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) değerlerine dayalı olarak hesaplanan C faktörü ve diğer parametreler üzerinden bir değerlendirme yaptığı tespit edilmiştir. Model, mevcut bitki örtüsü yoğunluğu ve arazi koşullarına dayalı bir risk değerlendirmesi sunmakta; ancak erozyonun doğal mı yoksa antropojenik kökenli mi olduğunu ayırt edememektedir. Bu nedenle, arazi gözlemleri, maden sahalarındaki antropojenik erozyon ile doğal yamaç süreçlerinin ayrımının yapılabilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Nitekim bazı bölgelerde, yoğun toprak taşınımının vadi tabanında doğal birikim alanları oluşturmaları beklenirken, maden sahalarından çıkarılan fazla malzemenin vadi içlerine kontrolsüz biçimde yığılması nedeniyle bu doğal sürecin engellendiği gözlemlenmiştir. Bu durum, antropojenik faktörlerin havzadaki doğal erozyon ve sedimentasyon dinamiklerini nasıl değiştirebildiğini açıkça göstermektedir.

Havzanın genişliği nedeniyle, Altıntaş, Aslanapa, Emirdağ, Kütahya'nın batı kesimleri, Uşak ve Afyonkarahisar sınırlarındaki bazı alanlar ile Murat Dağı çevresi gibi ulaşılması güç veya zaman kısıtlaması nedeniyle gözlem yapılamayan bölgelerde, erozyon riski modelleme sonuçları, literatür ve uzaktan algılama verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu alanlarda da özellikle yüksek eğimli ve bitki örtüsü zayıf yamaçlarda benzer erozyon süreçlerinin etkili olduğu öngörülmektedir. Sonuç olarak, RUSLE modelinin nicel sonuçlarını doğrulayan arazi çalışmaları, erozyon süreçlerinin doğal mı yoksa antropojenik mi olduğunu ayırt etme imkânı sağlamış; bu ayırım ise havzada erozyon kontrolüne yönelik stratejilerin geliştirilmesinde büyük önem taşımaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, Porsuk Çayı Havzası'ndaki erozyon süreçlerini etkileyen faktörlerin mekânsal dağılımını ve erozyon riskinin farklı bölgelerde nasıl değiştiğini ortaya koymuştur. Yapılan analizler, eğim, yağış ve bitki örtüsü gibi faktörlerin erozyon üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir (Şekil 8).

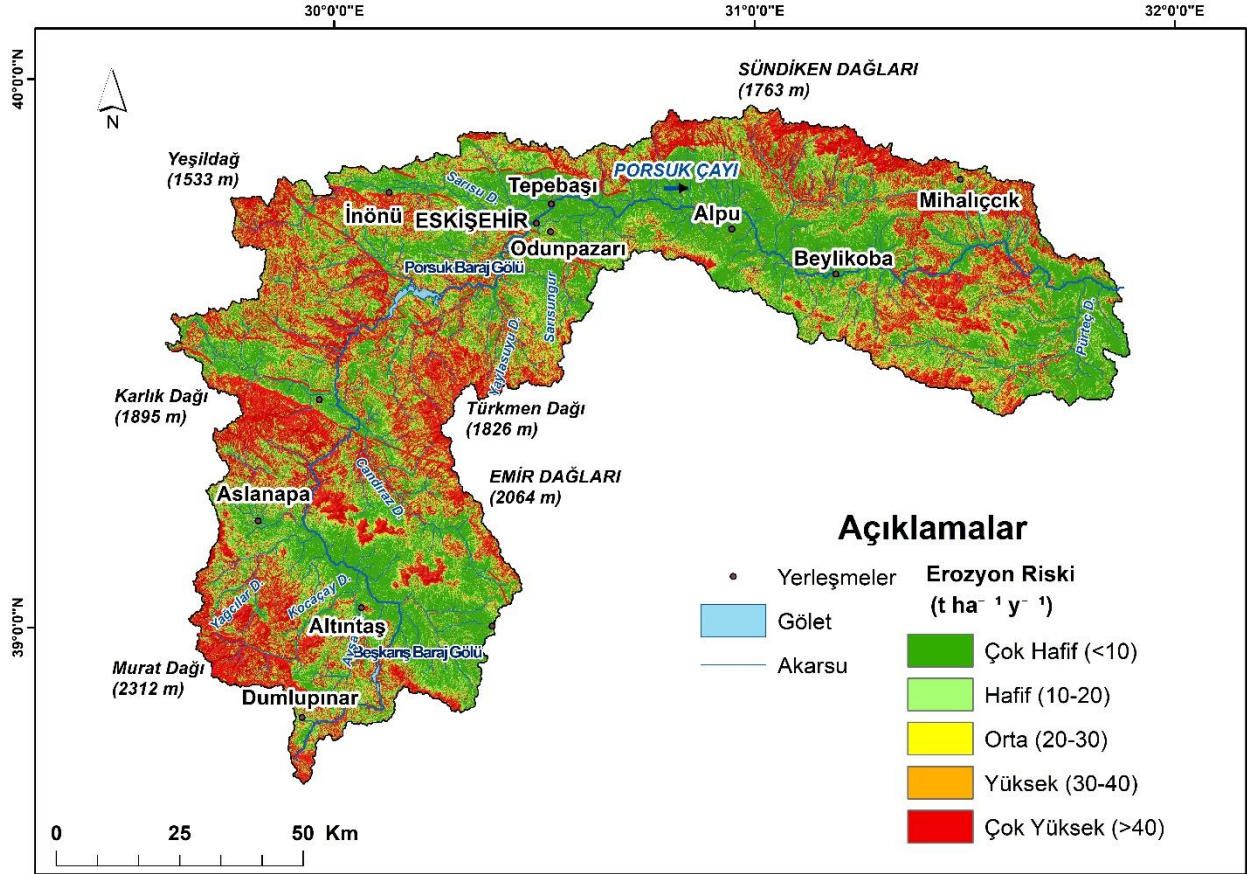
Yağış (R faktörü) ve eğim (LS faktörü) gibi faktörler, erozyon riskini belirlemede kritik rol oynamaktadır. R faktörü, havzada yağış kaynaklı erozyonun yüksek olduğunu ve ortalama 25393 (MJ mm ha⁻¹ y⁻¹) olarak hesaplanan bu değer, bölgede toprak kaybının önemli bir kısmını oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca, eğimin yüksek olduğu alanlarda, özellikle LS faktörünün etkisiyle erozyon riski daha da artmaktadır. Sündiken, Karlık ve Emir Dağları gibi yüksek eğimli bölgelerde, LS değeri maksimum 98.74'e kadar çıkmakta ve bu alanlarda aşırı yüksek erozyon riski belirlenmiştir. Bu durum, eğimin ve yağışın birleşiminin erozyon üzerindeki etkisinin ne kadar büyük olduğunu vurgulamaktadır. Bitki örtüsü ve arazi kullanımı (C faktörü), erozyon riskinin arttığı bölgelerde, çıplak ve tarımsal alanların etkisini pekiştirmektedir. Bu tür alanlarda, bitki örtüsünün yetersizliği nedeniyle yağmur damlalarının doğrudan toprak yüzeyine çarpması ve yüzey akışını artırarak erozyonu tetikleme gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, ormanlık alanlarda bitki örtüsünün koruyucu etkisi sayesinde erozyon oranlarının düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, P faktörünün (koruma önlemleri) düşük olduğu bölgelerde erozyon riski önemli ölçüde artmaktadır. Bu durum erozyon kontrolüne yönelik tedbirlerin alınmasının gerekliliğini göstermektedir.

Havzanın toplam hektar başına yıllık ortalama toprak kaybı 2.35 ton ha⁻¹ yıl⁻¹ olarak hesaplanırken, toplam yıllık toprak kaybı 2,538,269.32 ton olarak belirlenmiştir. Özellikle eğimli alanlarda, yüksek yağışlar ve yüzey akışı birleşerek erozyonun şiddetini artırmaktadır. Bu bağlamda, eğimli alanlarda erozyonun daha fazla olduğu ve düzlük alanlarda riskin azaldığı gözlemlenmiştir. Yerel iklim verilerinin ve arazi kullanımı verilerinin birlikte değerlendirilmesi, erozyon süreçlerini etkileyen faktörler arasında güçlü bir etkileşimin varlığını ortaya koymuştur. Kuzeydoğu bölgelerindeki yoğun yağış, özellikle tarım alanlarındaki bitki örtüsünün yetersizliği nedeniyle erozyon riskini artırmaktadır. Bu etkileşim, LS faktörü yüksek olan bölgelerde daha belirgindir.

Porsuk Çayı Havzası'ndaki bulgular, Türkiye'nin diğer havzalarındaki erozyon süreçleriyle karşılaştırıldığında, özellikle kullanılan veri setlerinin ve modelleme tekniklerinin önemli bir fark yarattığını göstermektedir. Karaş vd. (2009) tarafından yapılan Sakarya-Porsuk-Sarısu Havzası çalışmasında yıllık ortalama potansiyel toprak kaybı 1.88 t/ha/yıl olarak hesaplanmışken, bu çalışmada daha güncel veriler ve gelişmiş modelleme teknikleri kullanılarak hektar başına ortalama yıllık toprak kaybı 2.35 ha⁻¹ yıl⁻¹ olarak belirlenmiştir. Bu farklılık, kullanılan yöntemlerin ve veri kaynaklarının erozyon risk analizlerinde doğruluğu artırdığını göstermektedir. Ayrıca, Karaş vd. (2009) çalışmasında havzanın %79,22'sinin yüksek erozyon riski taşıdığı belirtilmişken, bu çalışmada yüksek ve çok yüksek riskli alanların oranı %34,57 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, kullanılan veri setlerinin ve modelleme tekniklerinin erozyon risk analizlerine büyük katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Porsuk Çayı Havzası'nda erozyon riskinin mekânsal dağılımı belirlenmiş ve bu dağılımın, bölgenin fiziki ve beşerî coğrafya özelliklerinden doğrudan etkilendiği görülmüştür. Yüksek eğimli bölgeler, yüzey akışını artırarak erozyonun şiddetini artırmaktadır. Ayrıca, bakı, jeolojik yapı ve toprak özellikleri gibi faktörler de erozyon süreçlerinin hızlanmasına neden olmaktadır. Bu bulgular doğrultusunda, erozyon riskini azaltmaya yönelik olarak özellikle yüksek eğimli alanlarda ağaçlandırma ve teraslama gibi önlemlerin artırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Ayrıca, erozyon analizlerinde farklı modellerin bir arada kullanılması, daha güçlü ve kapsamlı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. RUSLE ve ICONA gibi modellerin birleştirilmesi, erozyon duyarlılığının mekânsal dağılımını ve toprak kaybı miktarını daha doğru bir şekilde ortaya koyma potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak, yerel koşulların dikkate alındığı daha spesifik ve uygulanabilir erozyon yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi, toprak kaybını azaltmada önemli bir rol oynayacaktır. Özellikle, yüksek eğimli bölgelerde *Pinus sylvestris* (Sarıçam) ve *Juniperus communis* (Ardıç) gibi yerel türlerin kullanıldığı yoğun ağaçlandırma çalışmaları yapılmalı ve bu ağaçlandırma, toprak kaymasının sık görüldüğü yamaçlarda 2x2 metre aralıklarla gerçekleştirilmelidir.

Eğimli tarım arazilerinde ise kontur teraslama uygulanmalı ve teraslar, %15'ten fazla eğime sahip arazilerde 5 metre genişliğinde ve 1 metre yüksekliğinde olacak şekilde inşa edilmelidir. Mihaliçcik çevresindeki yüksek erozyon riskine sahip orman-çalı geçiş alanlarında, yangın riskini azaltmaya yönelik önlemler alınmalı ve bu alanlarda erozyonu önleyici bitki türleri kullanılarak rehabilitasyon çalışmaları yapılmalıdır. Erozyon kontrolü çalışmalarının başarısı için yerel halkın katılımı büyük önem taşımaktadır. Belediyeler ve sivil toplum kuruluşları, erozyonun nedenleri ve sonuçları hakkında farkındalık yaratma çalışmaları yürütmeli ve toprak yönetimi konusunda çiftçilere eğitimler vermelidir. Bu tür spesifik ve yerel koşullara uygun erozyon yönetimi stratejileri, Porsuk Çayı Havzası'nda toprak kaybını azaltmada etkili olacaktır (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2024; Görcelioğlu, 1996).



Şekil 8. Porsuk çayı havzası Rusle sonuç haritası

Katkı Belirtme ve Teşekkür

Bu çalışma, sorumlu yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Arazi çalışmalarındaki değerli destekleri için Doç. Dr. Levent Uncu ve Dr. Öğr. Üyesi Arda Bay'a teşekkür ederiz. Ayrıca, çalışma sürecinde yapıcı katkılarından dolayı editör ve hakemlere şükranlarımızı sunarız.

Kaynaklar

- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakoei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., ... & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for remote sensing big data analysis: A comprehensive tutorial. *Remote Sensing*, 12(15), Article 2503. <https://doi.org/10.3390/rs12152503>
- Anderson, M. G., & Richards, K. S. (1981). Geomorphological aspects of slopes in mudrocks of the United Kingdom. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 14(4), 363–372. <https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1981.014.04.13>
- Atalay Dutucu, A., & Mutlu, Y. E. (2022). Yuvacık Barajı Havzası'nda Erozyon risk analizi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 31(2), 289–303. <https://doi.org/10.51800/ecd.1133879>
- Ataol, M., & Köle, M. M. (2016, May 23–26). Kızılırmak Deltası'nda 2000-2015 yılları arasında gözlenen kıyı erozyonu [Conference presentation]. 4th International Geography Symposium (GEOMED 2016), Kemer, Antalya, Türkiye.

- Avcı, V., Sunkar, M., & Toprak, A. (2017). Malatya kuzeydoğusunda Ballı ve Memikan dereleri arasındaki sahanın erozyon duyarlılık analizi. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (27), 769–799.
- Avcıoğlu, A., Bayrakdar, C., Sarı, E., & Kaya, T. N. A. (2020). TanDEM-X12 m sayısal yükselti verisine dayalı toprak erozyonu tespiti (RUSLE). *Coğrafya Dergisi*, (41), 93–107. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2020-0047>
- Aykır, D., & Fıçıcı, M. (2022). Çıldır Gölü Havzasında erozyon risk analizi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, 9, 38–49. <https://doi.org/10.46453/jader.1144699>
- Bakış, R., Altan, M., Gümüşlüoğlu, E., Tuncan, A., Ayday, C., Önsoy, H., & Olgun, K. (2008). Porsuk Havzası su potansiyelinin hidroelektrik enerji üretimi yönünden incelenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 125–162.
- Bozyiğit, R., & Kaya, B. (2017). Altınapa Barajı Havzasında (Konya) erozyon ve önlemler. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 36, 285–303. <https://doi.org/10.14781/mcd.331368>
- Büttner, G. (2014). Land cover information in Europe. *Land Use Policy*, 38, 589–594. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.10.007>
- Cebel, H., Akgül, S., & Doğan, O., & Elbaşı, F. (2013). Erodibility “K” factor of great soil groups in Turkey. *Toprak Su Dergisi*, 2(1), 30–45.
- Clark, G., & Jacks, D. (2007). Coal and the industrial revolution, 1700–1869. *European Review of Economic History*, 11(1), 39–72. <https://doi.org/10.1017/S1361491606001870>
- Copernicus Land Monitoring Service. (2018). *CORINE land cover (CLC) 2018 raster (100 m)* [Data set]. European Environment Agency (EEA). <https://land.copernicus.eu/en/mapviewer?product=130299ac96e54c30a12edd575ef80f7>
- Çelikalça, O. E., Demirci, R., & Elmas, Ç. (2014). Renkli görüntülerin üç boyutlu histogram yardımıyla ayrıştırılması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 3(1), 38–44.
- Çetin, H. C. (2011). *Porsuk Çayı Havzası yönetim stratejilerinin belirlenmesinde DPSIR yaklaşımının kullanılması* [Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Çilek, A., & Berberoğlu, S. (2013, 6–8 Kasım). *Coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla Seyhan Havzasında PESERA ve RUSLE erozyon modellerinin kıyaslanması* [Bildiri sunumu]. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara, Türkiye.
- Çilek, A., Berberoğlu, S., Erdoğan, M. A., & Dönmez, C. (2014, 8–10 Ekim). *PESERA ve RUSLE erozyon modellerinin Akdeniz ve Ege havzalarındaki sonuçlarının karşılaştırılması* [Bildiri sunumu]. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2014), İstanbul, Türkiye.
- Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü. (2021). *Dinamik Erozyon Modeli ve İzleme Sistemi (DEMİS)*. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://cem.csb.gov.tr/dinamik-erozyon-modeli-ve-izleme-sistemi-demis-i-108100>
- Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü. (2022). *2022 su erozyonu istatistikleri*. <https://cem.csb.gov.tr/2022-su-erozyonu-istatistikleri-i-112579>
- Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü. (2024). *Türkiye’de erozyon*. <https://cem.csb.gov.tr/turkiye-de-erozyon-i-103687>
- Danacıoğlu, Ş., & Tağıl, Ş. (2017). Bakırçay Havzasında RUSLE modeli kullanarak erozyon riskinin değerlendirmesi. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 20(37), 23–39. <https://doi.org/10.31795/baunsobed.645168>
- Değerliyurt, M. (2013). Antakya şehri ve yakın çevresinde meydana gelen erozyonun coğrafi dağılışı ve analizi. *Turkish Studies*, 8(8), 1745–1764. <https://doi.org/10.7827/TurkishStudies.5501>
- Demirtaş, İ. (2024). Dinamik Erozyon Modeli ve İzleme Sistemi (DEMİS) ile ulusal ölçekte arazi kullanım türüne göre erozyon istatistiklerinin belirlenmesi. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, 1(Özel Sayı), 148–167.
- Desmet, P. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427–433.
- Dorak, S., & Aşık, B. B. (2018). Sakarya ili Taraklı ilçesi sulama suyu kaynaklarının su kalitesinin belirlenmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1. *Uluslararası Tarımsal Yapılar ve Sulama Kongresi Özel Sayısı*, 265–273.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Dursun, İ., & Babalık, A. A. (2023). Burdur Gölü Havzasındaki morfometrik parametrelerin ve erozyon durumunun değerlendirilmesi. *Turkish Journal of Forestry*, 24(1), 25–38. <https://doi.org/10.18182/tjf.1205157>
- Duvan, A., Aktürk, G., & Yıldız, O. (2021). Meteorolojik kuraklığın zamansal ve alansal özelliklerine iklim değişikliğinin etkisi, Sakarya Havzası örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 207–217.
- Eraslan, S., İmamoğlu, A., Coşkun, A., Saygın, F., & Dengiz, O. (2016, 18–21 Mayıs). İnebolu Havzası topraklarının erozyon duyarlılıklarını belirlenmesinde agregat ve strüktür stabilite durumları, arazi örtüsü ile olan ilişkileri [Bildiri sunumu]. *Uluslararası Coğrafya Sempozyumu*, Antalya, Türkiye.

- Erinç, S. (1973). Türkiye'nin şekillenmesinde neotektoniğin rolü ve jeomorfoloji–jeodinamik ilişkileri. *Jeomorfoloji Dergisi*, 5(1), 11–26.
- Erkal, T., & Yıldırım, Ü. (2012). Soil erosion risk assessment in the Sincanlı sub-watershed of the Akarçay Basin (Afyonkarahisar, Turkey) using the universal soil loss equation (USLE). *Ekoloji*, 21(84), 18–29.
- Erol, O. (2003). Ceyhan Deltasının jeomorfolojik evrimi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 12(2), 1–26.
- Fıçıcı, M. (2016). *Kapıdağ Yarımadası'nda erozyon ve arazi kullanma ilişkisi* [Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), Article 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- Görçeliolu, E. (1996). Ağaçlandırma alanlarında su ve toprak koruma amacıyla kullanılan teraslar ve orman yollarında erozyon kontrolü. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 46(2), 23–31.
- Gül, A., Yılmaz, M., & Uzel, N. (2008). Sakarya Nehri Kirmir Çayı'nda yaşayan *Capoeta tinca* Heckel, 1843'da Civa-II Klörür'ün akut toksik etkisi. *Kastamonu Education Journal*, 16(1), 199–206.
- Gündüzoğlu, H. A. G. (2019). *Küçük Menderes Havzası'nda sürdürülebilir arazi planlaması* [Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Güngör, Ö. (2011). *Aşağı Porsuk Çayı Havzasında askıda katı madde taşınımının belirlenmesi ve modellenmesi* [Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Hatipoğlu, İ. K., & Hatipoğlu, Ş. C. (2020). Harşit Çayı Havzası'nda ICONA ve alternatif olarak geliştirilen MICONA modellerinin karşılaştırılması. *Journal of Social Sciences and Humanities*, 4(2), 108–135.
- İlgüz, N. (1955). M. K. Paşa Çayı Havzasında erozyon şiddeti ve bununla Ulubat Gölü'nün ilgisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 6(1), 81–108.
- İmamoğlu, A. (2020). Alaca Çayı Havzası erozyon durumunun morfometrik ölçümler ile ilişkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 868–878. <https://doi.org/10.31590/ejosat.710987>
- İnce, K. (2019). Türkiye'de rüzgâr erozyonu toprak duyarlılık değişkenlerinin ulusal ölçekte belirlenmesi ve haritalanması. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 56(1), 121–130. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.455581>
- Karakoca, E. (2025). CBS ve uzaktan algılama teknikleri ile ICONA modeli kullanılarak Katrancı Çayı Havzası'nda (Haymana, Ankara) toprak erozyonu duyarlılığı değerlendirmesi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, 14, 126–145. <https://doi.org/10.46453/jader.1653839>
- Karakoca, E., & Uncu, L. (2020). Orta Sakarya Vadisi akarsu seki sistemlerinin morfometrik ve sedimentolojik özellikleri (İnhisar–Gemiciköy arası, Bilecik). *Coğrafya Dergisi*, 41, 165–177. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2020-0057>
- Karakoca, E., Uncu, L., Sarıkaya, M. A., Şahiner, E., & Köse, O. (2025). Geomorphology and chronology of Late Quaternary terrace staircases of the Sakarya River, northwest Türkiye. *Journal of Quaternary Science*, 40(3), 386–399. <https://doi.org/10.1002/jqs.3695>
- Karakoyun, E., & Kaya, N. (2022). Hydrological simulation and prediction of soil erosion using the SWAT model in a mountainous watershed: A case study of Murat River Basin, Turkey. *Journal of Hydroinformatics*, 24(6), 1175–1193. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.056>
- Karaş, E., Oğuz, İ., Türkseven, E., & Keskin, S. (2009, 16–18 Haziran). Sakarya–Porsuk–Sarısu Havzası'nda CORINE, LEAM ve USLE metodolojilerinin kullanılarak erozyon risk haritalarının hazırlanması [Bildiri sunumu]. *I. Ulusal Kuraklık ve Çölleşme Sempozyumu*, Konya, Türkiye.
- Kaymak, H. (2020). Morfo-klimatik özelliklerin Sündiken Dağları'nda (Eskişehir) bitki örtüsünün dağılışı üzerindeki etkileri. *Türk Coğrafya Dergisi*, 75, 17–32. <https://doi.org/10.17211/tcd.639024>
- Köse, E., Çiçek, A., Emiroğlu, Ö., Tokatlı, C., Uğurluoğlu, A., Başkurt, S., ... & Uylaş, M. (2016). Water quality assessment of Porsuk stream basin. *Biological Diversity and Conservation*, 9(3), 119–126.
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(33), 13268–13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1294–1298. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Mutlu, Y. E., Soykan, A., & Fıçıcı, M. (2021). Kille Çayı (Balıkesir) Havzasında erozyon risk analizi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, 6, 98–111. <https://doi.org/10.46453/jader.866903>
- Nearing, M. A. (2013). Soil erosion and conservation. In A. J. Jakeman, R. A. Letcher, & J. P. Norton (Eds.), *Environmental modelling: Finding simplicity in complexity* (pp. 365–378). John Wiley & Sons.

- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & Finkner, S. C. (1989). A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1587–1593.
- Ocak, A., Orhan, A., & Özdeniz, E. (2012). Porsuk Çayı ve çevresinin florası. *Biological Diversity and Conservation*, 5(2), 41–52.
- Ocakoğlu, F., & Akkiraz, M. S. (2019). A Lower Pleistocene to Holocene terrestrial record from the Eskişehir Graben (Central Anatolia): Paleoclimatic and morphotectonic implications. *Quaternary International*, 510, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.12.026>
- Okçu, D., Söğüt, A. S., Aslan, Z., Sunar, F., & Maktav, D. (2006). Marmara Bölgesi erozyon riski, CBS uygulaması. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 19(2), 61–72.
- Özdemir, A. (2021). İklim değişikliğinin havza ölçeğinde akım ve sediman miktarına etkilerinin değerlendirilmesi: Yuvacık Baraj Gölü Havzası. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 45(1), 129–154.
- Özdemir, M. A., & Dönmez, S. T. (2016). CBS tabanlı RUSLE yöntemiyle Işıklı Gölü Havzasının erozyon risk analizi. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 1–21.
- Özden, Ş., & Özden, D. M. (1997). *Türkiye toprak erozyon tahmin modeli TURTEM*. Başbakanlık Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları.
- Özşahin, E. (2016a). Çok şiddetli erozyon probleminin değerlendirilmesine yönelik pilot bir çalışma: Kavakdere Havzası (Trakya Yarımadası) örneği. *Uluslararası Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(22), 100–119.
- Özşahin, E. (2016b). Ergene Havzasında (Trakya) arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişikliklerinin erozyon üzerine etkileri. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 31(1), 117–126. <https://doi.org/10.7161/anajas.2016.31.1.117-126>
- Öztürk, R., & Altan, T. (2008). Porsuk Çayı çevre sorunları ve bunların çözülmesinde havza yönetimi önerileri. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(8), 79–89.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 48, 38–50.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & Porter, J. P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil & Water Conservation*, 46(1), 30–33.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (Eds.). (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (Agriculture Handbook No. 703). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974, December 10–14). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS* [Symposium presentation]. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Texas, USA.
- Rümeysa, E. R., & Atalay Dutucu, A. (2020). Sakarya Nehri Havzası'nda sıcaklık, yağış ve akarsu rejiminde meydana gelen değişikliklerin incelenmesi (Examination of changes in temperature, rainfall and stream regime in Sakarya River Basin). *Journal of Anatolian Cultural Research (JANCR)*, 4(2), 127–143.
- Sönmez, O. (2013). *Nehirlerde 2 boyutlu taşkın modellemesi ve taşkın haritalarının oluşturulması* [Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Sunkar, M., & Avcı, V. (2015). Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama (UA) ile Hasret Dağı ve çevresinin (Elazığ) erozyon duyarlılık analizi. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 13(1), 17–40. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000161
- Şengörür, B., & İsa, D. (2001). Sakarya Nehri'ne ait su kalite gözlemlerinin faktör analizi. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25, 415–425.
- Şengör, A. M. C., & Yılmaz, Y. (1983). Türkiye'de Tetis'in evrimi: Levha tektoniği açısından bir yaklaşım. *Türkiye Jeoloji Kurumu Yerbilimleri Özel Dizisi*, 1, 75.
- Tağıl, Ş., Alevkayalı, Ç., & Aytan, B. (2023). Gediz Deltası sulak alanı boyunca kıyı şeridi evrimi ve erozyon hassasiyetinin değerlendirilmesi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 32(Cumhuriyet'in 100. Yılı Özel Sayısı), 127–142.
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geospatial big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- Tekkanat, İ., & Sarış, F. (2015). Porsuk Çayı Havzasında akarsu akımlarında gözlenen uzun dönemli eğilimler. *Türk Coğrafya Dergisi*, 64, 69–83. <https://doi.org/10.17211/tcd.44842>
- Tekkanat, S. İ. (2016). Porsuk Çayı üst kesiminde ortalama akımların Şen trend metodu kullanılarak araştırılması. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 14(1), 49–57. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000180
- Uludağ, M., & Fıçı, M. (2018). Saray ilçesinde (Tekirdağ) toprak erozyonunun RUSLE yöntemiyle değerlendirilmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 70, 67–78. <https://doi.org/10.17211/tcd.356669>
- Ustaoglu, B., & Koç, D. (2018). Sakarya'nın toprak özellikleri. In C. İkiel (Ed.), *Sakarya'nın fiziki, beşerî ve iktisadi özellikleri* (pp. 253–274). Sakarya Üniversitesi Yayınları.
- Uzun, M., & Garipağaoğlu, N. (2022). Göksu Çayı Havzası'nın (Sakarya Nehri Havzası) tehlike duyarlılık analizleri kapsamında havza yönetimi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 31(2), 449–471.

- Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (2000). *Soil erosion risk assessment in Europe* (Publication No. EUR 19044 EN). European Soil Bureau, Joint Research Centre, European Commission.
- Yalçinkaya, N. M., Çakar, M. M., & Say, N. (2022). Erozyon ile mücadele kapsamında ağaçlandırma projelerinin etkinliği: Atatürk Barajı örneği. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 282–300. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1018855>
- Yurteri, C. (2024). Morphometric analysis of drainage basin with geographic information systems: A case study of Porsuk Stream Basin, Eskisehir, Western Anatolia, Türkiye. *Geography with Multidisciplinary Approaches*, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.29329/mdag.2024.1095.1>
- Zengin, M., Özer, S., & Özgül, M. (2009). Çoruh Havzası (İspir–Pazaryolu) erozyon durumunun CBS ile belirlenmesi ve çözüm önerileri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 40(1), 9–19.