



Mekân Tabanlı Toprak Erozyonu Tahmin Modelleri: Bildiklerimiz Değişiyor Mu?

Spatial based soil erosion forecasting models: Is what we know changing?

Çağan Alevkayalı*^a, Bedran Abi^b

Makale Bilgisi

Derleme

DOI:

10.33688/aucbd.1265625

Makale Geçmişi:

Geliş: 15.03.2023

Kabul:

12.09.2023

Anahtar Kelimeler:

Toprak erozyonu
Mekânsal modelleme
Fiziksel modeller
Makine öğrenmesi
Mekânsal veri

Öz

Toprak erozyonu, toprağın üst katmanının aşınarak başka bir yere taşınmasını ifade eden doğal bir süreçtir. Bu oluşum beşeri faaliyetlerin arazi örtüsünde değişimlere neden olmasıyla artan mekânsal bir probleme dönüşmüştür. Toprak erozyonundaki artış toprak verimliliğini olumsuz etkilediği gibi gıda güvenliğini de tehdit etmektedir. Toprak erozyonu kapsamındaki çalışmalar, sürecin işleyişini anlamak ve ortaya çıkan olumsuz etkileri en aza indirmek için sediman taşınımı ve erozyona duyarlı alanların belirlenmesi konularına yoğunlaşmıştır. Son 30 yılda bu konudaki modelleme uygulamalarının artması toprak erozyonu sorunu üzerine ilginin arttığını göstermektedir. Bu çalışmanın amacı toprak erozyonu konusunda en çok başvurulan modellerin geçirdiği değişimin literatür kapsamında değerlendirilmesidir. Bunun için modellerin veri özellikleri ve algoritma yapıları detaylı bir biçimde incelenmiş ve onlarca model arasında USLE/RUSLE, SWAT ve WEPP modelleri ile makine öğrenmesi yaklaşımlarının uygulama sayıları bakımından ön plana çıktığı belirlenmiştir. Bazı modellerin daha çok tercih edilme nedenlerinin farklı ortam koşullarına uyumlu olmaları ve ortamı yüksek doğrulukta benzetim yapabildiklerinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Article Info

Review

DOI:

10.33688/aucbd.1265625

Article History:

Received: 15.03.2023

Accepted: 12.09.2023

Keywords:

Soil erosion
Spatial modelling
Physical models
Machine learning
Spatial data

Abstract

Soil erosion is a natural process that refers to the wearing top of the soil layer and transport to another place. This process has turned into an increasing spatial problem as human activities cause changes in the land cover. The increase in soil erosion not only affects soil fertility, but also threatens food security. Studies within the scope of soil erosion focus on sediment transport and modeling of erosion-sensitive areas in order to understand the dynamics of the process and to minimize the negative effects. The increase in modeling applications on this subject in the last 30 years shows that the interest on the soil erosion problem has increased. The aim of this study is to examine the changes in the most used models in soil erosion studies within the scope of the literature. For this, the data properties and algorithm structures of the models were examined in detail and it was determined that among dozens of models, USLE/RUSLE, SWAT and WEPP models and machine learning approaches came to the fore in terms of the number of applications. In conclusion, some models are more preferred since they are compatible with different environmental conditions and simulate process with high accuracy.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: cagan_alevkayali@hotmail.com

^a Süleyman Demirel Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, Isparta/Türkiye, <http://orcid.org/0000-0001-7044-8183>

^b Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta/Türkiye, <https://orcid.org/0000-0001-8790-6232>

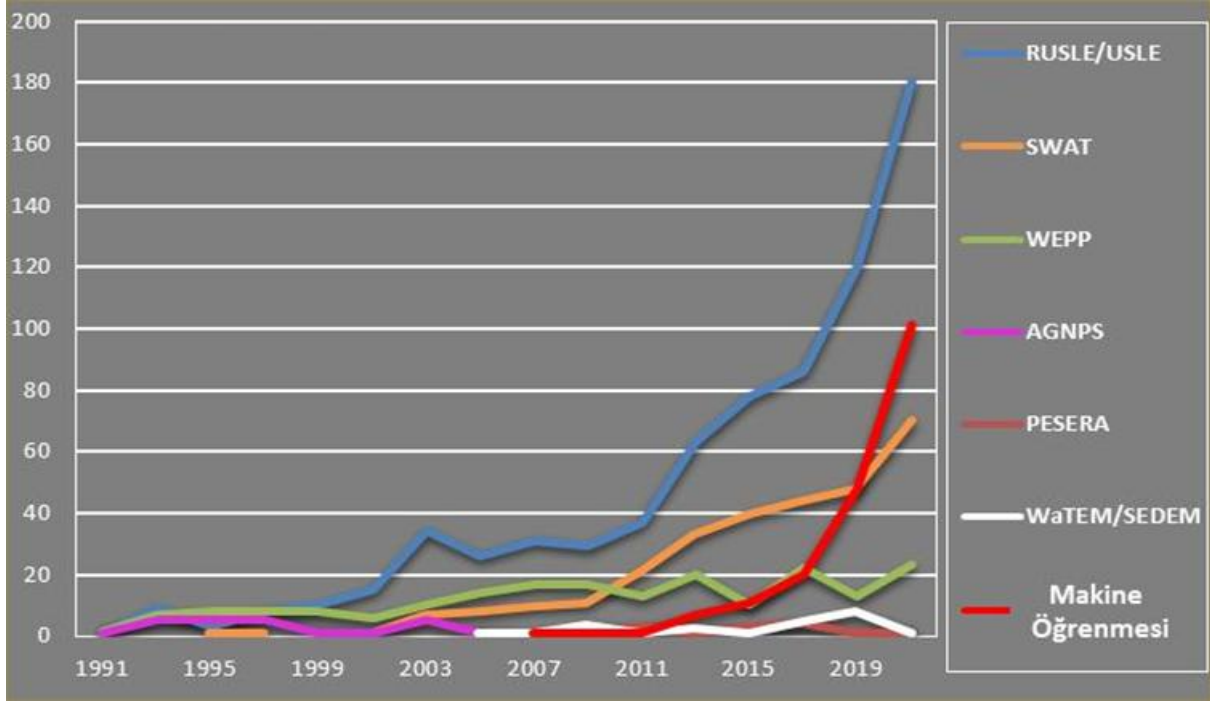
1. Giriş

Toprak erozyonu, en kısa tanımı ile toprağın üst katmanının bulunduğu yerden başka bir yere taşınmasıdır (Karabulut ve Küçükönder, 2008). Bir çevre problemi olarak toprak erozyonu, sediman taşınımı sonucunda doğal bir kaynak olan toprak katmanının aşınarak tarımsal üretimin zarar görmesi yani toprak verimliliğinin azalması olarak tanımlanmaktadır (Zhuang vd., 2015). İklim, anakaya, bitki örtüsü, topoğrafya, eğim ve drenaj yoğunluğu gibi doğal süreçlerle meydana gelen toprak erozyonu; aşırı otlatma, hatalı tarımsal işlemler, aşırı gübreleme, ormansızlaştırma ve yanlış arazi kullanımı gibi faaliyetler sonucunda artış eğilimi göstermektedir (Tağıl, 2009). Bu konuda Zhuang ve arkadaşları (2008) tarafından yapılan çalışmada kara yüzeyinin yaklaşık %11'nin yüksek toprak erozyonuna maruz kaldığı ileri sürülmektedir. Türkiye için Erpul ve diğerleri tarafından (2018) yapılan çalışmada ise ülkenin toplam yüzölçümünün %7'sinin şiddetli erozyona maruz kaldığı ve yılda yaklaşık 642 milyon ton toprağın su kaynaklı toprak erozyonu ile taşındığı ifade edilmektedir.

Toprak erozyonu yeryüzünün farklı bölgelerinde etkili olan bir çevre sorunu olmasından dolayı arazi bozulmasının en temel nedeni olarak kabul edilmektedir (Valentin vd., 2005). Toprak erozyonunun ölçülmesi ve su erozyonuna duyarlı alanların belirlenmesi gerekli önlemlerin alınarak arazi sağlığı ve gıda güvenliğinin korunması açısından önem taşımaktadır (Zhuang vd., 2015). Toprak erozyonunun çevre ile ilgili birçok kuruluş tarafından küresel bir problem olarak kabul edilmesiyle toprak erozyon miktarının tahmin edilmesine yönelik model oluşturma (benzetim) çalışmalarının artmasına neden olmuştur (Dengiz vd., 2014). Bu konudaki modelleme süreçlerinin temel amacı toprak erozyon miktarını ve duyarlı alanları belirlenmesi ile sürecin olumsuz etkilerinin olabildiğince azaltılmasıdır.

Özellikle verimli arazilerde toprak erozyonundan kaynaklanan baskıların denetim altına alınması için öncelikle sediman taşınımının nerede ve ne kadar gerçekleştiğinin yüksek doğrulukta tahmin edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Igwe vd., 2017). Sediman verimi ve hareketliliğine yönelik tahmin çalışmaları; (1) regresyon denklemleri, (2) fiziksel tabanlı benzetim modelleri ve (3) doğrusal olmayan regresyon modelleri (örneğin yapay zekâ) şeklinde sıralanmaktadır (Cambazoğlu ve Göğüş, 2004). Başka bir deyişle toprak erozyonu konusundaki modelleme çalışmalarının temeli matematiksel ifadelerle dayanmaktadır. Bu konudaki matematiksel uygulamalar tarihsel süreçte teknolojik gelişmeler ve farklı yaklaşımların ortaya çıkması ile değişim geçirmiştir. Toprak erozyon miktarı ve duyarlı alanları tahmin edilmesine yönelik çalışmalarının tarihi oldukça geçmiş dönemlere dayansa da modelleme sürecindeki değişimi tetikleyen uygulamanın 1965 yılında Wischmeier ile Smith tarafından geliştirilen Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (USLE) olduğu kabul edilebilir (Laflen ve Flanagan, 2013). Bu yöntemi diğerlerinden farklı kılan özelliği yağış, vejetasyon, toprak parametreleri ile topoğrafya özelliklerini bütüncül bir biçimde ele alarak toprak erozyon miktarının belirlenmesidir (Wischmeier ve Smith, 1978). Son yıllarda toprak erozyonu kapsamında sürekli yüzey verileri ile yapılan tahmin çalışmaları yüzeysel akış kaynaklı sediman taşınımı sürecinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı fiziksel benzetim (simülasyon) modelleri ile görselleştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır (Akdoğan vd., 2015). Kısaca bu yöntemlerle toprak erozyon miktarının tahmin edilmesi ve duyarlı alanları belirlenmesi için algoritmalarla yararlanılarak mekânsal benzetimler yapılmaktadır (Zhuang vd., 2015).

Toprak erozyonu modelleri ile canlandırılmak (benzeştirmek) istenen durum, değişime uğrayan arazide etkili olan fiziksel süreçlerin algoritmalarla tanımlanması yani sayısal olarak ifade edilmesidir (Igwe vd., 2017). Kısaca bu süreçlerin açıklanması deneysel ve fiziksel ölçümlerle fiziksel ortama ait parametrelerin çeşitli prosedürlerle ilişki düzeylerinin belirlenmesine dayandırılmaktadır (Akgün ve Türk, 2011). Son yıllarda erozyona duyarlı alanların belirlenmesi konusunda CBS ve makine öğrenmesi (yapay zekâ algoritmaları) gibi yenilikçi yöntemlerin kullanımı ile daha doğru ve başarılı sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Chakraborty vd., 2020). Bu gelişmelere paralel olarak 1990'lı yıllardan günümüze çok sayıda CBS tabanlı toprak erozyonu modeli geliştirilmiştir (Avcıoğlu vd., 2020; Danacıoğlu ve Tağıl, 2017). Bu modellerin sayısı oldukça fazla olup en çok bilinen ve tercih edilenleri ACTMO, AGNPS, AnnAGNPS, ANSWERS, APEX, CREAMS, DWSM, EGEM, EPIC, EUROSEM, GAMES, GLEAMS, GSSHA, GUEST, HYPE, IDEAL, IQQM, KINEROS, LASCAM, LISEM, MEDALUS, MEFIDIS, MIKE 11, OPUS, PALMS, PEPP-HILLFLOW, PERFECT, PESERA, PRMS, RHEM, RUNOFF, SEDIMOT, SHE/SHESED, SHETRAN, SWAT, SWIM, SWM, SWRRB, TOPMODEL, TOPOG, WaTEM/SEDEM, WEPP ve WESP şeklinde sıralanmaktadır (Pandey vd., 2016). Bu modellerin çoğu deneysel ve fiziksel tabanlı olmakla birlikte yersel ölçümlere dayalı doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkilere göre tasarlanmıştır. En yüksek etki derecesine sahip akademik yayınların tarandığı ortam olan Web of Science (WoS) platformunda son 20 yılda toprak erozyonu modelleme yaklaşımlarına yönelik çalışmalarda hızlı bir artış görülmektedir (Şekil 1). Bazı araştırmacılar toprak erozyonu konusunda deneysel ve fiziksel modellerin sadece saha kaynaklı standart parametrelere bağlı kalmasının toprak erozyonunun çok değişkenli doğasını açıklayamadığı gibi düşük doğrulukta tahminler ürettiklerini ileri sürmektedir (Vu vd., 2021). Toprak erozyonu ile ilgili çalışmalarda ister doğrusal isterse doğrusal olmayan ilişkileri gözetererek çalışılsın ortaya çıkan hata payının mekânsal uygulamalara dayalı makine öğrenmesi yaklaşımları ile oldukça azaltıldığı görülmektedir (Sahour vd., 2021). Bu durum makine öğrenmesi ile yapılan toprak erozyonu çalışmalarının son yıllarda Web of Science platformunda hızlı bir artış eğilimi göstermesi ile desteklenmektedir (Şekil 1). Mosavi ve diğerleri tarafından (2020) yapılan incelemede bu konudaki çalışma sayılarındaki artışın makine öğrenmesi yöntemlerinin fiziksel, deneysel ve kavramsal modellerden daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmesinden kaynaklandığını ileri sürmektedir.



Şekil 1. 1991-2021 yılları arasında Web of Science Platformunda taranan dergilerde RUSLE/USLE, SWAT, AGNPS, WEPP, WaTEM/SEDEM ve Makine Öğrenmesi yöntemlerinin kullanıldığı toprak erozyonu tahmin modellerinin yayın sayıları

Kaynak: <https://mjl.clarivate.com/home> (son erişim: 15/01/2023)

Toprak erozyonu konusunda uygulanan modelleme çalışmaları çeşitli indeksler ve makine öğrenmesi yöntemlerinden oluşsalar da tümünün temelinde matematiksel formüller yer almaktadır (Akgün ve Türk, 2011). Bundan dolayı modelleme yaklaşımı değişse de ortamın canlandırılması sürecinde bileşenlerin birbirleri ile olan ilişkileri matematiksel formüller ve algoritmalarla açıklanmaktadır. Doğal etkenler ve beşeri müdahalelerle değişime uğrayan arazilerde toprak erozyon koşullarını daha yüksek doğrulukta tahminlere taşımak için bu yaklaşımların ne kadar kullanışlı? ne kadar güvenilir? ve ne kadar başarılı olduğu? sorularına yanıt aranmalıdır (Batista vd., 2019; Borrelli vd., 2021). Bu soruların cevaplanması için modellerin temel özellikleri, tasarımları, bileşenleri, girdileri, görselleştirme yetenekleri ve hangi yaklaşıma dayanarak süreci canlandırdıkları açıklığa kavuşturulmalıdır (Borrelli vd., 2021; Pandey vd., 2016; Raza vd., 2021). Böylece bu çalışmanın ortaya çıkmasında iki temel motivasyon bulunmaktadır. Bunlardan ilki gelişen mekânsal teknolojiler ile toprak erozyonu konusunda en çok tercih edilen matematiksel modeller ve yapay zekâ ile ortaya çıkan makine öğrenmesi uygulamalarının bir arada değerlendirildiği bir çalışmaya literatürde rastlanamamasıdır. Diğer motivasyon kaynağı ise toprak erozyonu konusunda yeni başlayan araştırmacıların çalışma alanlarının özelliğine göre veya ulaşmak istedikleri amaca yönelik en doğru modeli seçmelerinde yardımcı olacak bir çalışma ortaya konulmasıdır. Toprak erozyonu kapsamında kullanılan modellerin genel olarak iki amacı bulunmaktadır. Bu amaçlardan ilki toprak erozyon miktarının tahmin edilmesi ötekisi toprak erozyonuna duyarlı alanların sınıflandırılmasıdır.

Toprak erozyon modellerinin temel özelliklerinin değerlendirilmesinin yanında gelişen mekânsal veri üretimi, modelleme sürecinin girdi kaynaklarına uyumlu yapıya dönüşmesine neden

olmuştur. Toprak erozyonu konusunda modellerin mekân düzeyinde çalışması ile bu sürecin açıklanmasında girdi olarak kullanılan veri kaynaklarında sürekli yüzey özelliği kazanması kaliteli mekânsal veriye olan ihtiyacın artmasına neden olmuştur. Toprak erozyonu gibi birçok bileşenin farklı düzeyde etki ettiği karmaşık sürecin mekân düzeyinde modellenmesindeki sorunlardan biri elde edilen bazı verilerin noktasal düzeyde olmasıdır. Noktasal verilerin tüm çalışma alanında sürekli bir yüzey şeklinde kullanılması için noktasal ölçümler mekânsal enterpolasyon yöntemleri ile mekânsal desenlere dönüştürülmektedir (Aşkın, 2016). Kısaca sürekli yüzey niteliğinde olmayan toprak örneklemeleri, meteorolojik gözlemler (yağış, sıcaklık) gibi veriler alansal yapıya dönüştürülmektedir. Bu desen ve örüntülerin üretilmesinde sürekli yüzeylerin yeterli sayıda gözleme dayandırılarak yanlış tahmin edilmesi başarı oranını etkileyen önemli bir durumdur. Tüm bu uygulamalar modelleme sürecinin en başından verinin modellenmeye başladığını ifade etmektedir. Kısaca toprak erozyon sürecinin modellenmesinde verinin gerçeği temsil etmesi için mekânsal enterpolasyon yöntemi ile sürekli yüzey haline getirilen parametrelerde yüksek doğruluk oranlarına ulaşması gerekmektedir (Celilov ve Dengiz, 2019; İmamoğlu vd., 2016).

Toprak erozyonu konusunda yapılan modelleme çalışmalarında ele alınan süreçler arasındaki ilişkiler verilerin mekânsal olarak sürekli birer yüzey olarak sisteme aktarılması ile gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda modellerin doğru çalışması için gerçeğe en yakın yüksek kalitedeki veriye ulaşılması gerekmektedir. Böylece bu çalışmanın amacı su kaynaklı toprak erozyonu konusunda kullanılan modellerin temel özelliklerinin (canlandırma performanslarının) ve veri kaynaklarındaki belirsizlik ile sınırlılıkların ilgili literatür kapsamında değerlendirilmesidir. Bu çalışmada literatürde toprak erozyonu uygulamaları arasından en çok başvurulan model ve yaklaşımların 1-temel özellikleri, 2-veri ve algoritma tasarımları, 3- avantaj ve dezavantajlı yanları değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmanın devamında toprak erozyonu konusunda girdi olarak kullanılan veri kaynaklarındaki bazı sorunlar ele alınmıştır.

2. Toprak Erozyon Miktarı ve Toprak Erozyonuna Duyarlı Alanların Belirlenmesinde Yararlanılan Temel Yöntemler

Çalışmanın bu kısmında sediman veriminin tahmini ve toprak erozyonuna duyarlı alanların sınıflandırılması için geliştirilen farklı yaklaşımların özellikleri açıklanmıştır. Bu yaklaşımlara ait özellikler literatürde yer alan yöntemsel yenilikler ve algoritma tasarımları (algoritma alt yapısı) çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

2.1. Toprak Erozyonu Modelleme Yaklaşımları

Toprak erozyonu konusundaki çalışmalar 20. yüzyılın başlarından bu yana bilim dünyasının ilgisini çekmektedir (Pandey vd., 2016). 2000’li yıllara kadar toprak erozyonu kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda, dikkate alınan temel parametreler akışa geçen su miktarının tahmin edilmesi ve hareket eden toplam sediman miktarının öngörülebilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır (Jetten vd., 2003). Bu dönemi takiben son 20 yılda bilgisayar tabanlı modellerinin yaygınlaşması ile toprak erozyonuna hassas alanların belirlenmesi ve yüzeysel sediman taşınımı (toprak aşınması) odaklı çalışmalara olan ilgi artmıştır (Borrelli vd., 2021). Toprak Erozyonu Modeli olarak adlandırılan bu

çalışmalar arazi yönetimi, akarsu dinamikleri ve yağış-akış ilişkisi gibi farklı süreçler ele alınmaktadır (Merrit vd., 2003). Bu konudaki temel matematiksel modeller genel olarak *deneysel* (ampirik), *kavramsal* ve *fiziksel* (mekânsal) olmak üzere 3 ana başlık altında toplanmaktadır (Igwe vd., 2017; Merrit vd., 2003; Pandey vd., 2016; Renschler ve Harbor, 2002).

Deneysel modeller, taşınan sediman miktarının ve tekstür özelliklerinin tahmin edilmesine yönelik matematiksel formüllerden oluşur (Eisazadeh vd., 2012). Başka bir deyişle deneysel modeller bir veya birkaç noktada yapılan yersel ölçümlere ait sonuçların formüle dönüştürülmesidir. *Kavramsal modeller*, havzada etkili olan dış süreçlerin genel durumunu dikkate alarak havzadaki süreçlerin gruplara ayırmasını sağlayan matematiksel tahminlerdir (Dutta, 2016). Böylece kavramsal modeller bir havzanın genel özelliklerini ayrıntıya girmeden pratik ve basit matematiksel ilişkilerle açıklamaya çalışmaktadır (Parsons vd., 2004). Bu uygulamalar içerisinde son grup olan *fiziksel modeller*; sediman taşınımı ve birikim süreçlerinin mekânsal-zamansal ölçekte topoğrafya, jeoloji, arazi kullanımı, iklim, vejetasyon örtüsü ve akım karakteristiklerinin bir arada değerlendirilmesine dayandırılmaktadır (Chandramohan vd., 2015). Bu modeller ile tasarlanan uygulamalar mekânsal teknolojilerin gelişmesi ile fiziksel bileşenlerin CBS ortamında sürekli bir yüzey olarak değerlendirilebilmesini mümkün kılmaktadır. Dahası CBS ile bu bileşenlerin mekânsal boyutta ilişkilerinin değerlendirilmesi etkin bir hale gelmiştir. Mekânsal olarak sayısal ortama aktarılan bileşenlere dair ilişkilerin kullanımına örnek olarak “Toprak Su Değerlendirme Aracı” literatürdeki kısaltma adı ile SWAT modeli iyi bir örnektir. Bu model yağış-akış ilişkisi üzerinden su kaynaklı toprak erozyonu miktarının tahmin edilmesinde arazi kullanımı, eğim, iklim parametreleri ve toprak özelliklerini bir arada kullanmaktadır (de Vente vd., 2013). Bu modelin çalışma prensibi değişkenler arasındaki ilişkileri çalışma alanına özgü verilerden yararlanarak matematiksel eşitlikler üzerinden hesaplamasıdır. Böylece değişkenler arasındaki ilişkinin sabit bir formül geliştirilerek sadece verilerdeki farklılıktan kaynaklı sonuçlar elde edilmektedir. Kısaca modelin başarısı değişkenler arasındaki ilişkiyi en iyi açıklayacak eşitliğin deneme yoluyla bulunması veya çok örnek üzerinden geliştirilmesine bağlıdır.

Son yıllarda toprak erozyon çalışmalarında sürece etki eden değişkenlere ilişkin eşitliklerin (formüllerin) oluşturulmasında kullanılan model çalışmaları veri odaklı deneysel (ampirik) modellerden süreç odaklı fiziksel modellere kayma eğilimi göstermektedir (Pandey vd., 2016). Örneğin yağış-akış ilişkisinin yersel ölçümlerin deneyler yardımı ile matematiksel olarak formülleştirilmesine dayanan “Evrensel Toprak Kayıpları Denklemi” literatürdeki adı ile USLE modeli önceleri bir deneysel model iken daha sonra CBS yardımı ile zamansal-mekânsal örüntüleri ortaya koyan fiziksel (mekânsal) bir modele dönüşmüştür (Raza vd., 2021). Literatürde yaygın olarak kullanılan toprak erozyonu modelleme yaklaşımlarına bakıldığında mekânsal uygulamaların yaygınlaşması ile deneysel, kavramsal ve fiziksel modellerin iç içe geçtiği anlaşılmaktadır (de Vente vd., 2013).

Toprak erozyonuna duyarlı alanların modellenmesi çalışmalarında deneysel, kavramsal ve fiziksel modellerin dışında makine öğrenmesi yöntemlerinden de yararlanılmaktadır. Bu yöntemlere başvurulmasının nedeni deneysel ve fiziksel tabanlı modellerde tahmin yapmak için arazide önsel

verilerin toplanmasına ihtiyaç duyulurken makine öğrenmesi yaklaşımları ile yersel örneklem ihtiyacının daha az olmasıdır (Nguyen vd., 2021). Ayrıca deneysel yöntemlerde bazı modellerin çalışması için özel uygulamalara ve ölçümlere ihtiyaç duyulurken makine öğrenmesi yöntemleri ile kalibrasyona ihtiyaç duyulmadan yüksek doğrulukta tahminler yapılması mümkündür (Alawell vd., 2021). Makine öğrenmesi yöntemlerinde doğrusal ve rastlantısal yaklaşımların denetimli bir yaklaşım ile kullanılması toprak erozyonun öngörülmesi için yapılan tahminlerin yüksek doğruluk oranlarına ulaşmasını sağlamaktadır (Sahour vd., 2021). Bu yaklaşımların temelinde matematiksel uygulamalar olmasına karşın buradaki sürecin bir denetime yani eğitime dayanması algoritma yapısının başarısını arttırmaktadır. Makine öğrenmesi veya yapay zekâ süreçleri kendi doğrulamalarını gerçek sonuçlar üzerinden yaparak tahmin doğruluğunu arttırdığı gibi zaman ve enerjiden tasarruf sağlamaktadır (Atalay ve Çelik, 2017). Birbirinden farklı özelliklerde ve modelleme yaklaşımları dikkate alındığında literatürde matematiksel modellerden RUSLE/USLE, SWAT, AGNPS, PESERA, WEPP ve WaTEM/SEDEM ile makine öğrenmesi yöntemlerinden Destek Vektör Makineleri, Rastgele Ağaç, Lojistik Regresyon ve Karar Ağaç modellerinin literatürde ön plana çıkmaktadır.

2.2. Matematiksel ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Toprak Erozyonu Modellerinin Temel Özellikleri

Toprak erozyonu, iklim ve toprak özellikleri gibi doğal ortam koşullarından kaynaklanmakla birlikte tarım, madencilik gibi beşeri faaliyetlerin aşınma sürecine olan etkileri ile güçlenmektedir (Yakupoğlu ve Demirci, 2013). Bundan dolayı bu konudaki ilk modelleme çalışmaları insan kaynaklı baraj, yapılaşma yani arazi örtüsü üzerindeki müdahaleler ve iklim özelliklerini dikkate alan fiziksel tabanlı uygulamalardan oluşmuştur (de Vente ve Poesen, 2005). Toprak erozyon tahminleri ve bu durum neticesinde ortaya çıkan duyarlı alanların belirlenmesinde beşeri süreçlerin modelleme sürecine entegre edilmesi için performans ölçümleri yapılmaktadır (Dengiz vd., 2014). Bu durum araştırmacıların toprak erozyonu modellerinde en iyi performansı arama eğilimine girmesine neden olsa da model başarısını belirlenmesi konusunda önemli bir gelişme sağlamıştır. Bu çalışmanın giriş kısmında da ifade edildiği gibi modellerin değişiminde gelişen bilgisayar teknolojileri ve veri üretimi konusunda yüksek kalitede yersel verilere ulaşılmasının kolaylaşması daha iyi modeli arama çabasının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Toprak erozyonu modellerinde gerçeği yansıtmaya performansı, meydana gelen sediman hareketinin en doğru miktarda belirlenmesi ve sediman hareketinin en çok gerçekleştiği bölgenin belirlenmesindeki başarıya bağlıdır. Bu çalışmada toprak erozyon sürecinin bahsi geçen durumlarda başarılı olduğu bilinen ve literatürde en yaygın kullanılan deneysel/fiziksel ve kavramsal modeller olan AGNPS, USLE-RUSLE, PESERA, SWAT, WEPP ve WaTEM/SEDEM modelleri ve makine öğrenmesi yaklaşımlarından Destek Vektör Makineleri, Karar Ağaç ile Rastgele Ağaç yapıları üzerinde incelemeler yapılmıştır. Bu modellerin incelenmesi kapsamında söz konusu yöntemlerin kullanım amaçları, toprak erozyonu sürecindeki hangi aşama üzerinde yoğunlaştıkları, en çok hangi alanlarda etkili sonuçlar ortaya koydukları ve bu sürecin açıklanmasındaki avantajlı-dezavantajlı yanları ortaya konulmuştur (Çizelge 1). Bu incelemelerin ardından her bir modelleme yaklaşımının çalışma sistemi kısaca değerlendirilmiştir:

Çizelge 1.Çalışmada incelenen toprak erozyonu modellerinin temel özellikleri

Model ve Ortaya Çıkış Tarihi	Amaç ve Kullanıldığı Alanlar	İhtiyaç Duyulan Veriler ve Alt Birimler	Çıktılar	Avantaj ve Dezavantaj
AGNPS, Noktasal Kaynaklı Olmayan Tarımsal Kirlilik Modeli 1989 yılında geliştirilmiştir (Young vd., 1989).	Bu model tarım alanlarında su yüzey akışı, sediman ve nitrat hareketini modellemeyi amaçlamaktadır. Büyüklüğü 0.4-16 hektar arasında değişen hücrelerle, en fazla 20 000 hektar alana sahip havzalarda kullanılmaktadır (Öztürk vd., 2003).	AGNPS modeli temelde hidroloji, erozyon ve sediman taşınımı, kimyasal taşınımı ve noktasal kaynaklı girdilerle çalışmaktadır (Apaydın ve Öztürk, 2003). Bunun için model 22 farklı veriye ihtiyaç duymaktadır.	AGNPS modelinde sonuçlar akım, sediman miktarı ve kimyasal elementler olmak üzere üç ana grupta aylık ve yıllık periyotlarda alınmaktadır (Perrone ve Madramootoo, 1999).	Avantaj: AGNPS karmaşık verileri modelleyebilme yeteneği yüksektir. Model tarım arazilerinde başarılı sonuçlar vermektedir. Dezavantaj: Modelde çok sayıda girdi kullanılmasından dolayı hesaplama süresi uzamaktadır. Model engebeli araziler için kullanışlı değildir (Aydın ve Yıldırım, 2002).
PESERA, Avrupa'da toprak erozyonunun detaylı belirlenmesi için Kirkby ve diğerleri (2003) tarafından kullanılmıştır.	Bu model iklim, vejetasyon, topografya ve toprak verilerini suyun akım değerlerini toprak erozyonu hesaplayabilmek için kullanılmaktadır. PESERA özellikle farklı arazi kullanımı türlerinde toprak ve peyzaj özelliklerini temel olarak toprak erozyonunu tahmin etmek için bölgesel bir araç olarak geliştirilmiştir (Berberoğlu ve Çilek, 2013).	PESERA modeli iklim, bitki örtüsü, topografya ve toprak faktörlerine bağlı olarak elde edilen dört bileşeni dikkate alarak erozyonu tahmin etmektedir (Çilek, 2013). Modeli çalıştırmak için; 128 farklı grid formatında katmana ihtiyaç duyulmaktadır. Bunların 96'sı iklim kaynaklı olmakla 25'i arazi örtüsü kaynaklıdır (Kirkby vd., 2008).	Bu model özellikle erozyon miktarını bir yağış dönemindeki toplam akışı dikkate alarak katman aşınım sürecini görüntülemektedir (Licciardello vd., 2009). PESERA su kaynaklı erozyon konusunda yıllara göre değişen koşullarının neden olduğu etkilerin ortaya koyabilmektedir (Panagos vd., 2014).	Avantaj: Model farklı dönemlerde tüm Avrupa ülkeleri için online toprak erozyonu tahminleri yayınlanmaktadır (Tsara vd., 2005). Günlük yağış verileri, sediman ve bitki örtüsü müdahale kapasitesini kullanarak günlük akış çıktısı sunmaktadır. Dezavantaj: Bu model çıktıları yalnızca Avrupa sahası için sınırlanmaktadır (Licciardello vd., 2009).
SWAT, Arnold vd. tarafından 1988 yılında toprak erozyon miktarını tahmin etmek için tasarlanmıştır.	SWAT modeli, havza sınırlarının belirlenmesi, sediman verimi, bitki besin elementleri ve kirliliğe neden olan pestisitler gibi elementlerin hareketini tahmin etmek için geliştirilmiştir (Özdemir ve Güngör, 2019). Bu modelin temel amacı su döngüsü ve toprak elementlerin hareketini hesaplamak ve toprak erozyon miktarı ile ilgili doğruluğu yüksek sonuçlar üretmektedir (Duru vd., 2018). SWAT modeli ile büyük akarsu havzaları ve alt havzalara ait hesaplamalar ayrı ayrı yapılabilmektedir (Abbaspour vd., 2007).	Sayısal yükseklik modeli (DEM), arazi kullanımı haritası, toprak haritası, eğim haritası, günlük iklim verisi, kalibrasyon ve doğrulama için akım gözlem verisi kullanılmaktadır (Dönmez ve Sarı, 2018). SWAT modelinde meteorolojik rasatlar, topografya, arazi kullanımı ve toprak türü verilerinden yararlanılmaktadır.	Farklı çevresel koşullardaki hidrolojik olayları detaylandırarak simüle edebilme yeteneğine sahip bir hidrolojik model olan bu yöntem arazi kullanımı, toprak ve toprak sınıfları, yüzey akışı, tortu birikimi ve nitrat konsantrasyonları gibi önemli havza bileşenlerinin zaman içerisindeki hareketini ve değişimleri ortaya koymaktadır (Neitsch vd., 2011). Yüzeysel akışa geçen su miktarı, yeraltına sızan (perkolasyon) su oranı ve evapotranspirasyon	Avantaj: SWAT fiziksel tabanlı bir model olup, giriş-çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi açıklamak için regresyon denklemlerini kullanarak toprak erozyon ve element hareketlerini tahmin edebilmektedir (Özdemir ve Güngör, 2019). Dezavantaj: SWAT modelinin en önemli eksikliği toprak erozyonuna duyarlı alanları gösteren sürekli bir yüzeyi üretmemesidir (Neitsch vd., 2011).

			ile kaybedilen su miktarı hesaplamaktır (Cuceloglu vd., 2017).	
<p>WEPP, Nearing ve diğerleri tarafından 1989 yılında geliştirilmiştir.</p>	<p>WEPP modelinin amacı bir havzada veya bir yamaçta meydana gelen toprak kayıplarının nerede ve ne zaman meydana geldiğini ve nerede depolanacağını ortaya konulmasıdır (Demir vd., 2017).</p> <p>Böylece uygulama açısından nerelerde hangi toprak koruma önlemlerin alınmasında ve en uygun yöntemlerin seçilmesinde etkili olmaktadır (Kırnak ve Gowda, 2001).</p>	<p>İnfiltrasyon teorisi, hidroloji, toprak fiziği, bitki besleme, hidrolik ve erozyon süreçleri modelin ana bileşenleridir. Böylece bu model iklim parametrelerinden kış yağışları, sıcaklıkları, sulama, bitki gelişimi, atıkların ayrışması, yüzey akış hidrolojisi olmak üzere dokuz parametreyi içermektedir (Demir vd., 2017). Modelde kullanılan hidrolojik parametreler, kinematik dalga denklemini kullanmak suretiyle yüzey akış ve zirve değerinin belirlenmesine dayanmaktadır (Pandey vd., 2016).</p>	<p>Bu model, zamansal değişimi ele alan bir simülasyon olduğundan, yağış havzasında ve yamaçlarda meydana gelen toprak kayıpları ve birikim noktalarının görselleştirmektedir (Kırnak ve Gowda, 2001). Ayrıca bu model ile toprak erozyon sürecindeki su-toprak ve su-bitki arasındaki ilişkiler ortaya konulmaktadır (Aydın, 2009).</p>	<p>Avantaj: WEPP modelini uygularken girdi verilerinin önemli bir parametresi olan topoğrafyayı birleştirerek hızlı sonuçlar üretmektedir (Aydın, 2009). Toprak erozyonunun etkili olduğu sahaların genel durumu hakkında bilgi vermektedir.</p> <p>Dezavantaj: Ayrıntılı yüzey tahminleri bu model ile yapılamamaktadır (Pandey vd., 2016).</p>
<p>WaTEM/SEDEM modeli ilk olarak Van Oost tarafından (2000) kullanılmıştır.</p>	<p>Bu modelin kullanım amacı toprak erozyonu açısından kritik bölgelerin mekânsal olarak havza tabanlı belirlenmesidir (Lieskovský ve Kenderessy, 2014).</p> <p>WaTEM/SEDEM, modeli piksel (parsel) tabanlı yaklaşım kullanarak havza ölçeğinde tortu verimi tahmin etmektedir (de Vente vd., 2008).</p>	<p>WATEM/SEDEM modeli üç bölümden oluşur: RUSLE 2D yaklaşımı kullanılarak toprak erozyonu hesaplaması, tortu taşıma kapasitesinin belirlenmesi ve toprak erozyonunu modellemek için tortunun akarsudaki hareketleri görüntülenmektedir (Bezak vd., 2015).</p>	<p>Bu model parsel bazlı çalışmakta yani mekânsal olarak toprak tortu verimini ve aşınan malzeme miktarına yönelik tahminleri grideler şeklinde üretmektedir (Lieskovský ve Kenderessy, 2014).</p>	<p>Avantaj: WaTEM/SEDEM, RUSLE yöntemi ve regresyon modellerinin ötesinde yeni bir ortamda kalibre edilerek her havzada yeni dinamiklere göre tortu veriminin tahmin edilmesinde başarı sağlamaktadır (Harageweyn vd., 2013).</p> <p>Dezavantaj: Bu modelin en önemli dezavantajı alt havzalardaki yerel uygulamalarda iyi performans sergileyememesidir (Bezak vd., 2015).</p>
<p>USLE-RUSLE, Wishmeier ve Smith tarafından 1978 yılında USLE Modeli tasarlandıktan sonra 1994 yılında model Renard vd.</p>	<p>RUSLE modeli, sadece tarımsal arazilere değil, kentsel kullanım alanlarına, ormanlık alanlara, otlak ve mera sahalarına, otoyol setlerine kadar geniş kullanım alanlarına sahip hale gelmiştir.</p>	<p>Model, ortalama erozyon tahmini sürecinde altı faktörü dikkate almakta ve bunlar aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır:</p> <p>Rusle yöntemi uygulamalarında ana</p>	<p>USLE-RUSLE modellerinin en önemli çıktısı parsel odaklı toprak erozyon miktarı sürekli yüzey haritaları üretilmektedir (Djoukbala vd.,</p>	<p>Avantaj: Bu modelin en önemli avantajı yüksek doğrulukta erozyona duyarlı alanların tahmin edilmesinde ve makul doğrulukta toprak erozyon miktarının öngörülmesini sağlamasıdır (Jahun vd.,</p>

<p>tarafından revize edilerek yeni adıyla RUSLE geliştirilmiştir.</p>	<p>RUSLE yöntemi, uzun vadede damla etkisinden ve yüzeysel akıştan kaynaklanan toprak kaybının ton/hektar/yıl cinsinden tahmini amacıyla kullanılmaktadır (Renard vd., 1994).</p>	<p>veri kaynağı olarak, topoğrafya (Sayısal Yükseklik Modeli), arazi kullanımı, toprak tekstür özellikleri ve organik madde miktarı ve yağış verileri kullanılmaktadır (Danacıoğlu ve Tağıl, 2017).</p>	<p>2019).</p>	<p>2015).</p> <p>Dezavantaj: USLE/RUSLE modelleri sediman hareketlerini vadi veya yarıntılar boyunca açıklayamamasından dolayı büyük havzalarda kullanışlı değildir (Ganashi ve Ramesh, 2016).</p>
<p>DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİ, (DVM), Vapnik tarafından (1995) tasarlanmıştır.</p>	<p>DVM’de amaç, sınıfları birbirinden ayırmak için optimal düzeyde hiper düzleminin elde edilmesidir. Başka bir ifadeyle, farklı sınıflara ait destek vektörleri arasındaki uzaklığı maksimize etmektir (Ayhan ve Erdoğan, 2014).</p> <p>Toprak erozyonu konusunda DVM yönteminin matematiksel modellerden farkı karmaşık ve dinamik olguları boyut arttırarak en başarılı sınıflandırma veya regresyon denklemi ile tahmin etmesidir (Dinh vd., 2021).</p>	<p>Söz konusu algoritma, veriye ilişkin herhangi bir birleşik dağılım fonksiyonu bilgisine ihtiyaç duymadığı için bağımsız öğrenme sürecine dayanmaktadır. Bu özelliği ile konuya ilişkin her türlü veriden yararlanılmasını mümkündür (Soman vd., 2011). Örnek olarak eğitim, Topoğrafik Nemlilik İndeksi, yağış miktarı, arazi kullanımı ve akarsu yoğunluğu gibi toprak erozyonuna etki eden her türlü altlık haritadan yararlanılmaktadır (Liu vd., 2023).</p>	<p>Bu yöntem ile toprak erozyonunun arttığı veya azaldığı bölgelerin görüntülenmesi sağlamaktadır. DVM ile toprak erozyonu konusunda daha çok oyuntu ve parmak erozyonunu belirlemek için kullanılmaktadır (Arabameri vd., 2020).</p>	<p>Avantaj: DVM, toprak erozyonu tahminlerinde sınıflandırma ya da regresyon problemini detaydaki pürüzlere takılmadan çözmesi en önemli avantajlardan biridir (Yakut, 2012). DVM toprak erozyonu gibi karmaşık ve dinamik olgular üzerinde oldukça başarılıdır (Ghosh ve Maiti, 2021).</p> <p>Dezavantaj: Bu yaklaşımın en önemli dezavantajı doğrusal olarak ayırlamayan verilerin farklı bir uzaysal ortama aktarılması ile gerçekten uzaklaşmasıdır (Demirci, 2007).</p>
<p>KARAR AĞAÇ, modeli ilk olarak Breiman ve diğerleri tarafından (1984) bir sınıflandırma ve regresyon algoritması olarak kullanılmıştır.</p>	<p>Karar ağacı yöntemi, basit yapısı sayesinde, sınıflandırma ve tahmin problemleri için uygun bir yaklaşımdır (Breiman vd., 1984). Bu yöntem ile en sık yapılan uygulamalar toprak erozyonu çeşitlerini ayırmak için yersel ölçümler üzerinden karar ağaçları kullanılarak hızlı ve basit sınıflandırmalar yapılmaktadır (Ghosh ve Maiti, 2021). Karar ağaçları oyuntu ve parmak erozyonlarının etkili olduğu alanların tahmin edilmesinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Arabameri vd., 2021).</p>	<p>Karar ağaçları genelden özele doğru eğitilmiş veriden yararlanmaktadır (Lei vd., 2020). Böylece, ağaçlar her örnekteki tüm verileri içeren bir kök düğümle aşağıya doğru inildikçe topoğrafya, jeomorfolojik indeksler, vejetasyon, yağış gibi birbirinden farklı verileri ilişkilendirerek model kurgulanmaktadır (Arabameri vd., 2020).</p>	<p>Bu yöntem ile erozyon bölgeleri sınıflandırılabilir veya algoritma eğitilerek regresyon denklemi ile erozyon tahminleri çıktı olarak üretilebilmektedir (Kavzaoğlu ve Çölkesen, 2010b).</p>	<p>Avantaj: Karar ağaçları, toprak erozyonu çalışmalarında kullanılmasının nedenleri hızlı olması, veri sistemleriyle kolaylıkla entegre edilebilmesi, güvenli olması, kolay ve anlaşılabilir düzeyde sonuçlar üretmesidir (Arabameri vd., 2021).</p> <p>Dezavantaj: Karar ağacı sayıları yani veri boyutu aşırı büyük olduğu durumlarda dallanma sayısı ve takibi zorlaşmakta ve başarısız sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Sürekli değişkenleri tahmin etmekte zorlandığından toprak erozyon sürecinin zamansal değişiminde başarılı sonuçlar üretememektedir (Lei vd., 2020).</p>

<p>RASTGELE ORMAN, 2001 yılında Breiman tarafından geliştirilmiştir.</p>	<p>Breiman (2001) tarafından ilk olarak tasarlanan Rasgele Orman (RO) yöntemi karar ağaçlarının bir araya getirilerek rassallık eklenen bir çeşididir. RO algoritmanın kullanım olarak hızlı performans sunduğundan yüksek boyutlu verileri analiz etmek için uygundur. Rastgele Orman yönteminde algoritma her bir karar ağaçlarıyla ortaya çıkan yeni durumu bir ağaca indirilene kadar verileri eğiterek toprak erozyonunun belirlenmesinin yanı sıra sınıflandırma ve regresyon tabanlı analiz ve tahminler yapılabilmektedir (Phinzi ve Ngetar, 2019).</p>	<p>RO algoritmasını çalıştırmak için en az 2 parametre tanımlanmalıdır (Akar ve Güngör, 2012). Bu parametreler, toprak erozyonuna neden olan ya da bu süreci etkileyen herhangi bir parametrenin sürekli yüzey şeklinde ifadesidir (Lei vd., 2020). RO, tüm değişkenler arasından en iyi karar dalını kullanarak her bir düğümü dallara ayırmak yerine, her bir düğümde rastgele olarak seçilen değişkenler arasından en iyisini belirlenmesi ile büyük alanlarda başarılı bir sınıflandırma yapmaktadır (Erdem vd., 2018).</p>	<p>RO yöntemi ile görüntü sınıflandırma işlemi algoritmanın her bir piksel için karar ağaçları oluşturması ve öğretilen karara uygun sınıflandırmayı belirlemesiyle erozyon sınıfları oluşturulmaktadır (Ghosh ve Maiti, 2021). Böylece girdi verileri eğitilerek toprak erozyonunun fazla veya az olduğu bölgeleri gösteren haritalar üretilmektedir.</p>	<p>Avantaj: Bu yöntem ile girdilerin kullanıcının belirlediği ölçütler tarafından düzenlenmesi ortalama tahmin doğruluğunu iyileştirmektedir (Zahedi vd., 2018). Dezavantaj: Toprak erozyonu konusunda rastgele orman yaklaşımının en önemli dezavantajı değişkenler arasında nedenselliği hesaplanmamasıdır (Arabameri vd., 2019).</p>
---	---	---	--	---

2.2.1. Fiziksel Modeller

2.2.1.1. AGNPS

AGNPS (Agricultural Non-point Source Pollution Model) açık ismi ile Noktasal Kaynaklı Olmayan Tarımsal Kirlilik Modeli ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri-Tarımsal Araştırma Merkezi tarafından yüzey akışı (akımdan, taban akışın ayrılmış miktarı), sediman ve taşınan kimyasal madde miktarı hakkında benzetimlerle (simülasyon) tahmin yapılmasında kullanılan fiziksel bir modeldir (Apaydın ve Öztürk, 2003). AGNPS modeli, bir havza sistemindeki su, sediman ve bitkilerin ihtiyacı olan nitratlarla yüzey sularının kirlenmesine yol açan nitrat miktarını tahmin etmektedir (Kalfazade, 2015). Bu model çoğunlukla büyük araziler ve havzalar için kullanılmaktadır (Öztürk vd., 2003). AGNPS modeli için sediman, hidroloji ve kimyasal sonuçları içeren 3 ana gruptaki 22 farklı veriye (ortalama arazi eğimi, toprak erozyon faktörü, görünüm, toprak bünyesi, drenaj hücrelerinin sayısı, su kaynağı durumu, yüzey koşulu sabiti, SCS eğri numarası, biriktirme faktörü, yüzey eğim faktörü, gübreleme düzeyi, uygulama faktörü, ortalama kanal eğimi, kanalın pürüzlülük katsayısı, kimyasal oksijen ihtiyacı faktörü, ortalama arazi eğim uzunluğu, ortalama kanal şev eğimi, karışım düzeyi, noktasal kaynak göstergesi ve kanal göstergesi) ihtiyaç duyulmaktadır (Aydın ve Yıldırım, 2002). Bu modelde çok çeşitli veri girişine ihtiyaç duyması girdi verilerinin üretilmesi oldukça zaman almasına neden olmaktadır. Böylece model sadeleştirilerek daha az veri girişi ile çalıştırılarak modellenin kullanışlılığı artırılmıştır (Kalfazade, 2015). Buna göre toprak erozyonu modellerinde verilerin basit ve kolay işlenebilmesinin önemli olduğu anlaşılmaktadır.

2.2.1.2. PESERA

PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment) bölgesel bir uygulama yöntemi olup peyzaj, toprak ve arazi kullanımını parametreleri ile toprak erozyon miktarını tahmin etmek üzere tasarlanmış fiziksel bir modeldir (Licciardello vd., 2009). Bu model girdi birimi olarak bitki örtüsü, topoğrafya, iklim ve toprak özelliklerinden yararlanmaktadır (Kirkby, 2003). PESERA, toprak ve bitki örtüsü özellikleri kapsamında aşınma sürecini akış eşik değeri, toprak akış oranı ve yağmurun akışa geçme özellikleri üzerinden formüller yardımı ile modellemektedir (Licciardello vd., 2009). Bu yöntemin uygulanmasında veriler gerekli kaynaklardan temin edildikten sonra değerler arasında doğrusal regresyonlar oluşturularak yapılan hesaplamalar erozyon miktarının tahmini için kullanılmaktadır (Tsara vd., 2005). Hem düşük hem de yüksek çözünürlükteki verilerden yararlanarak geniş alanlarda çalışma yapma şansı sağlayan bu model, formül 1'de görüldüğü gibi toprak erozyon potansiyelinin hesaplanmasına dayanmaktadır (de Vente vd., 2008).

$$E = k. \Delta. \Omega \quad (1)$$

E = erozyon,

k=toprak aşınabilirlik ,

Δ =sayısal yükseklik modeline bağlı topoğrafya potansiyeli

Ω = yüzeysel akış

Bu model özellikle sediman taşınımını her bir yağış dönemindeki toplam akış miktarını kullanarak sonuç üretmektedir (Irvine ve Kosmas, 2007). Modelin çalıştırılması için aylık ve yıllık iklim ve arazi kaynaklı çok sayıda verilere ihtiyaç duymaktadır (Berberoğlu ve Çilek, 2013; Kirkby, 2003). PESERA modeli ile farklı dönemlerde toprak erozyonu tahminleri tüm Avrupa ülkelerini içerisine alan çevrimiçi bir veri tabanı üzerinden yağış değişimi ile sürekli güncellenerek sunulan ve toprak erozyonuna duyarlı alanların görüntülediği dijital bir harita platformudur (Panagos vd., 2014). Bu özelliği ile PESERA modeli toprak erozyonu konusundaki uygulamalarda parametrelerin zamansal değişiminin dikkate alınması gerektiğine örnek oluşturmaktadır.

2.2.1.3. SWAT Modeli

Toprak-Su ilişkisini inceleyen hidrolojik modellerden biri olan Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Arnold vd. (1988) tarafından su ile toprak erozyon ilişkisini tahmin etmek için tasarlanmıştır (Özdemir ve Güngör, 2019). Bu modelin esas amacı havza sınırlarının belirlenmesi, sediman veriminin tahmin edilmesi, bitki besin elementleri ve toprak kirliliğine neden olan pestisitlerin hareketlerinin belirlenmesidir (Özdemir ve Güngör, 2019). SWAT modeli ile havzaya ulaşan suyun yüzey hareketi, sızma ve aşındırma miktarını yani su döngüsü tahmin edilmektedir (Arnold, 1988). Bu modelin en dikkat çeken özelliği topraktaki element hareketlerine yönelik çıktılar üretmesi olsa da esas kullanım amacı toprak erozyon miktarı ile ilgili tahminler yapmaktır (Duru vd., 2018).

SWAT modelinde meteorolojik rasatlar, topoğrafya, arazi kullanımı ve toprak türü verilerinden yararlanılarak yüzeysel akışa geçen su miktarı, yeraltına sızan (perkolasyonu) su oranı ve

evapotranspirasyon ile kaybedilen su hesaplamakta, böylece tarımsal sulama ve su yönetimi için ihtiyaç duyulan hidrolojik süreçler modellenmektedir (Cuceloglu vd., 2017). Sediman hareketlerinin bu model ile yüksek doğrulukta tahmin edilmesinin nedeni topoğrafya, arazi kullanımı ve toprak türlerinin erozyon sürecindeki ilişkilerinin detaylı bir biçimde ele alınmasıdır (Abbaspour vd., 2015). Kısaca bu model ile havzadaki topoğrafya ve iklim özelliklerinin temel alındığı toprak-su ilişkisi belirlenmektedir. Böylece farklı toprak türlerine göre buharlaşma, transpirasyon, sızma, yüzeysel akış ile eğim doğrultusunda hareket eden sediman miktarı tahmin edilmektedir.

2.2.1.4. WEPP

WEPP erozyon modeli, bir havzadan ya da bir yamaçtan meydana gelen toprak kayıplarının nerede, ne zaman yaşanacağını ve akışa geçen malzemenin nerede birikeceğini tahmin etmeye çalışmaktadır (Kırnak, 2001). Bu modelde iklim verileri, sızma mekanizması, su-toprak ve su-bitki arasındaki ilişkilerden yararlanılmaktadır (Pandey vd., 2016). Bu ilişkiler üzerinden yapılan tahminlerle toprak koruma tedbirlerinin alınması gerektiği bölgeler tespit edilmektedir (Aydın, 2009).

WEPP modelini uygularken girdi verilerinin önemli bir parametresi olan topoğrafya özellikleri, CBS ile bütünleşmiş bir biçimde çalışmaktadır (Demir vd., 2017). Bu modelin ön plana çıkan özelliği tüm bileşenlerin toprak erozyon sürecindeki etkilerinin eşit ağırlıkta bütüncül bir biçimde ele alınmasıdır.

2.2.2. Kavramsal Modeller

2.2.2.1. WaTEM/SEDEM

WaTEM/SEDEM, Revize Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (RUSLE) modelinin daha basit düzeyde akarsu kollarında ne kadar sediman taşındığını yıllık ölçekte tahmin edildiği bir modeldir (Haregeweyn vd., 2013; Lieskovský ve Kenderessy, 2014). Bu model üç ana bileşeni olan (1) yıllık ortalama toprak erozyonu oranı verisi, (2) tortu miktarını temsil eden bir raster görüntü ve (3) bunları topoğrafyayla ilişkilendiren algoritmadan oluşmaktadır. Bu model mekânsal düzeyde havzanın topoğrafyası ve akarsu ağının taşıma kapasitesini dikkate alarak havza için çeşitli indeksler üretmektedir (Lieskovský ve Kenderessy, 2014). Model bu işlemi yaparken peyzajı küçük mekânsal birimlere yani ızgara şeklinde bölerek işlem yapmaktadır (de Vente vd., 2008). Bu yüzden modelin sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için ızgara hücrelerinin 100 m × 100 m'yi geçmemesi gerekmektedir (Van Rompaey vd., 2001).

WATEM/SEDEM kavramsal bir model olduğundan iklim ve hidroloji verilerinin sınırlı olduğu sahalarda toprak erozyonu miktarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Guo vd., 2019). Bu uygulama uzaktan algılama yöntemleri aracılığı ile sayısal hale getirilen topoğrafya üzerinden farklı indekslerle su kaynaklı toprak erozyonu konusunda basit ve hızlı bir biçimde sonuçlar üretmektedir.

2.2.3. Deneysel Modeller

2.2.3.1. USLE-RUSLE

USLE modeli Türkçe karşılığı Evrensel Toprak Kayıpları Denklemi yağışa ve toprak yüzeyinde görülen akışa bağlı uzun yıllık verilerin kullanılarak toprak kaybının hesaplandığı bir

yöntemdir (Alparslan ve Küçükönder, 2021). Kısaca bu yöntem incelenen havzanın yıllık potansiyel toprak kaybını belirlenmektedir. USLE modeli Renard ve diğerleri tarafından (1991) kentsel yerleşmeler, ormanlık alanlar, otlak ve meralar gibi farklı arazi kullanım koşullarında toprak erozyon miktarının tahmin edilmesi için mevcut algoritma arazi kullanımı eklenerek geliştirilmiş ve adı Revize Edilmiş Evrensel Toprak Kayıpları Denklemi (RUSLE) olarak değiştirilmiştir (Danacıoğlu ve Tağıl, 2017; Djoukbalı vd., 2019). RUSLE'den üretilen toprak kaybına ilişkin yüksek düzeyde başarılı tahminler ortaya koymaktadır (Phinzi ve Ngetar, 2019). USLE ve RUSLE modeline göre potansiyel toprak kayıpları hesaplanmasında farklı bileşenlerden yararlanılmaktadır (Formül 2):

$$A=R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

A: Yıllık ortalama toprak kaybı (ton/ha-1, yıl-1),

R: Yağış aşındırma faktörü (Mj mm ha-1, Saat-1 yıl-1),

K: Toprak aşınabilirlik (erodibilite) faktörü (t ha Saat ha-1 MJ-1 mm-1)

LS: Topografya faktörü (L: Eğim uzunluğu faktörü ve S: Eğim dikliği faktörü),

C: Arazi kullanımı ve bitki örtüsü faktörü,

P: Erozyon kontrol faktörü olarak açıklanmaktadır (Wischmeier ve Smith, 1978).

R faktörü yağış ve akışın toprak erozyonunun gücünü ortaya koyan parametredir (Avcıoğlu vd., 2020). K faktörü toprağın yüzeysel akışa geçen suya yani yüzeysel aşınmaya gösterdiği direnci ifade etmektedir (Tüfekçioğlu ve Yavuz, 2016). LS faktörü topoğrafya koşulları doğrultusunda eğim ve yamaç uzunluğunun toprak erozyonuna olan etkisinin hesaplandığı girdilerden bir diğeridir (Mutlu ve Soykan, 2018). Bu parametrenin veya girdinin üretilmesi SYM'ye bağlı olduğundan bu verideki çözünürlük ve doğruluk oldukça önemlidir. C faktörü arazi kullanımı ve bitki örtüsünün yüzeydeki yoğunluğunun toprağı tutarak erozyona uğramasını yavaşlatması sürecini ifade etmektedir (İkiel vd., 2020). P faktörü yüzeysel akışa geçen suyu engellenerek toprak erozyon etkisinin azaldığı kontrol birimlerini ve engelleri kapsamaktadır (Özşahin, 2016). RUSLE'nin hesaplanmasında ana parametrelerin ağırlığı eşit olsa da her bir girdiyi oluşturan indeksler farklı katsayılarla ağırlıklandırılmaktadır. RUSLE yönteminin dünya çapında oldukça yaygın kullanılmasının ana nedeni erişilebilmesi mümkün parametrelerden yararlanması ve neredeyse dünyanın genelinde her tür ortama uyarlanabilmesidir (Alewell vd., 2019).

2.2.4. Makine Öğrenmesi Yöntemleri

2.2.4.1. Destek Vektör Makineleri

Destek Vektör Makineleri (DVM), istatistiksel öğrenme teorisi alanında sınıflandırma problemlerinin çözümü için Vapnik tarafından (1995) geliştirilmiş yapısal riski en aza indirmeye çalışan, dış bükey optimizasyona dayalı öğrenme metotlarından biridir (Kavzoglu ve Colkesen, 2009).

Verilerin doğrusal olarak ayrılmadığı bir durum meydana geldiği zamanlarda doğrusal bir tanımla bu boşluk doğrusal olmayan tanımlamalarla doldurulabilmektedir (Yılmaz Akşehirli vd.,

2012). Bu yöntemle asıl yapılmak istenen, eğitim kümesindeki tüm verilerin bağımsız ve benzer olarak dağılımı olmasını dikkate alarak kalan verilerin düzenlemesidir (Song vd., 2002).

Toprak erozyonu konusunda DVM yönteminin matematiksel modellerden farkı karmaşık ve dinamik olgular üzerindeki uygulamalarda başarılı olmasıdır (Dinh vd., 2021). Örnek olarak Golkarian ve diğerleri (2023) tarafından toprak erozyonuna duyarlı bölgelerin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmada RUSLE yöntemine ait parametreler DVM algoritması uygulanarak hesaplanmış ve doğruluğu oldukça yüksek erozyon duyarlılık tahminleri yapmıştır.

2.2.4.2. Karar Ağaç

Karar Ağaçları (KA) son zamanlarda literatürde yaygın kullanımı olan bir sınıflama ve regresyon yöntemi ile veriler arasındaki ilişkinin tanımlandığı algoritmadır (Kavzoğlu ve Çölkesen, 2010). Karar ağaç algoritması standart bir ağacın sistematiğini kullandığından en üst kısım kök olarak, en son kısım ise yaprak olarak adlandırılan bir yapı ile çalışmaktadır (Han ve Kamber, 2006). Sınıfların belirlenmesinde kullanılan ağaç yapısının oluşturulabilmesi için kökten yaprağa kadar sorular sorulmaktadır (Pal ve Mather, 2003). Bu sorgu süreci evet-hayıra dayalı bir regresyon sürecine benzetilebilir. Daha sonra işlemlerin sonunda meydana gelen ağacın yeni veri seti için genelleme kabiliyeti oluşturulur (Larose, 2005). Bu süreç devam ederek her aşamadaki değişkenlerin sonuçları sayısal değerlerine göre karar ağaçları meydana getirir (Nisbet vd., 2009). En son verilen yanıt kadar tekrar eden algoritma, karar ağacındaki girdi verisindeki yaprak düğümüne ve yapraktaki sınıflandırmalar tanımlanmaya kadar bölünür (Bramer, 2007). Makine öğrenmesi yöntemlerinden biri olan KA yüksek varyantlı problemlerden biri olan toprak erozyonuna duyarlı alanların belirlenmesinde alt kararların verilmesi için veri setinin birçok kez eğitilmesi prensibi ile çalışmaktadır (Nguyen vd., 2021). Böylece toprak erozyonuna etki eden veriler eğitime tabi tutularak tahminler yapılmaktadır.

Bu yöntemin toprak erozyonuna duyarlı alanların belirlenmesinde tercih edilmesinin önemli nedenleri kolay ve hızlı uygulanabilmesidir. Bunun yanında konuya ilişkin çeşitli veri setleriyle ilişkilendirilebilir olması tercih edilmesinin diğer bir nedenidir (Güner, 2015). Bu yöntem ile gerçekleştirilen uygulamalar büyük veri setlerini tahmin etmeye çalıştığı durumlarda dallanma sayısının takibinin zorlaşması ile kullanışlılığını yitirmektedir (Oğuzlar, 2004). Aşırı büyük ve çok yönlü veri setlerinin bu yöntemlerle incelenmesi yani analiz edilmesi için zamana ve çok güçlü sistemlere ihtiyaç duyduğundan karar ağaç yönteminin kullanım alanı diğer toprak erozyonu modellerine nazaran daralmaktadır (Akman, 2010). Bu yöntem ile genellikle toprak erozyonu çeşitlerini ayırmak için yersel ölçümlere dayalı hızlı ve basit sınıflandırmalar yapılmaktadır (Geissen vd., 2007). Bunun için karar ağaçları yüzeydeki aşındırma izleri daha belirgin olan oyuntu ve parmak erozyonlarının etkili olduğu alanların belirlenmesinde kullanışlı bir yaklaşımdır (Ghosh ve Maiti, 2021).

2.2.4.3. Rastgele Orman

Makine öğrenmesi yöntemlerinden biri olan Rastgele Orman (RO) yönteminin temelinde karar ağaçlarının kullanıldığı algoritmalar bulunmaktadır (Breiman, 2001). RO algoritmaları kullanım

olarak çok hızlı performans sunduğundan yüksek boyutlu verileri analiz etmek için en uygun yöntemlerden biridir (Breiman, 2001). Rastgele Orman yönteminde algoritmanın, karar ağaçlarına göre farkı sonuç olarak bir ağaç vermemesidir (Korkmaz vd., 2018). Bu yöntem ile karar ağaçları, girdi verilerinin hangi sınıfa ait olduğunu analiz ettikten sonra çıkarttığı kurallarla göre verileri eğiterek sınıflar oluşturmaktadır (Özkan, 2008). Seçilen parametrenin ardından verilerin doğruluğunun belirlenmesi test için ayrı bir veri seti ya da mevcut verinin 1/3'ü kullanılmaktadır (Akar ve Güngör, 2012). Algoritma, eğitim verilerini kullanarak tek bir piksel için yaklaşık bin ağaç, yani bin civarı farklı sınıflandırma ilişkisi kurulmaktadır (Erdem vd., 2018).

Son yıllarda RO yaklaşımı, toprak erozyonu ile birçok mekânsal araştırma probleminin çözümlenmesinde tercih edilen yöntemlerden bir halinde gelmiştir (Nguyen vd., 2019). RO yöntemi ile çeşitli parametreler kullanılarak toprak erozyonuna duyarlı alanların belirlenmesinde yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmektedir (Avand vd., 2022).

2.3. Toprak Erozyonu Modellerinde Kullanılan Verilerde Belirsizlikler ve Sınırlılıklar

Toprak erozyon sürecinin çok değişkenli ve karmaşık bir yapıda olması toprak erozyonu modellerinin uygulanabilirliğinde bazı belirsizlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Modellerin uygulanmasında açığa çıkan belirsizliklerin giderilmesi konusundaki yöntemsel denemeler yapılsa da noktasal olmayan verilerin üretimi her zaman gerçeği yansıtacak yeterliliğe ulaşamamaktadır. Bu konudaki çalışmalarda ele alınan noktasal olmayan verilerin iki temel sorunu bulunmaktadır. Bunlar verilerin gerekli veya benzer çözünürlükte ölçülememesi yani bazı katmanlara ait örneklemelerin farklı yersel mesafeden alınması, ikincisi ise çalışma alanını temsil edecek yeterlilikte (sıklıkta) yersel ölçümün yapılmamasıdır. Bu eksiklikler toprak erozyonunun modellenmesindeki verilerdeki en temel belirsizliği oluşturmakta ve sonuçların doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Örneğin, deneysel modeller arasında yaygın kullanılan USLE yöntemi yeterli çözünürlükteki verinin bulunmadığı bir çalışmada tahmin değerleri ile gerçek ölçümler arasında 3 katta yakın hata oranı meydana gelmiştir (Aksu ve Uçan, 2012).

Veri çözünürlüğü dışında bir model için ihtiyaç duyulan bazı verilerin kaydının tutulmaması ayrı bir belirsizliği ortaya çıkarmaktadır. Örneğin, RUSLE-R faktörü yağışın kinetik enerjisi ile 30 dakikalık yağış yoğunluğu dikkate alınarak sıçratma ve akışın aşındırma etkisi ile belirlenmektedir (Danacıoğlu ve Tağıl, 2017). Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yağış sürelerinin rasat edilmediği bilinmektedir. Panagos ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmada RUSLE modelinde kullanılan R faktörü yani yağış aşındırma gücü farklı iklim bölgelerinde etkinliğinin değiştiği ve bu durumun sonuca etki ettiği ifade edilmektedir. Bu durumda iklim özellikleri ve yağış değişkenliğinin Türkiye'nin farklı bölgelerinde değiştiği (Ölgen, 2010) ve Köppen Geiger iklim sınıflandırmasına göre Türkiye'de farklı iklim tiplerinin olması (Öztürk vd., 2017) bu değerlerin bölgelere göre değişiklik göstermesinde neden olmaktadır. Türkiye için RUSLE-R faktörünün hesaplanmasında birçok çalışmaların genelinde aylık yağış ile toplam yağışın oranlanmasına dayalı Modifiye Edilmiş Fornier İndeksi'nin (MFİ) 4.17 ile çarpımının 152'den çıkarılması formülü kullanılmaktadır (İkiel vd., 2020; Mutlu ve Soykan, 2018; Özdemir ve Dönmez, 2016). RUSLE-R değerinin hesaplanması konusundaki bu sınırlılık Erpul (2016) tarafından Türkiye genelinde birçok istasyonda 2005-2014 yılları arasında 30

dakikalık yağışlar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar gözlem istasyonları tarafından kaydedilen verilerin Türkiye geneline enterpole edilmesiyle sürekli hale getirilmiş ancak verilerin rasat süresi 9 yıl olması yaygın bir biçimde kullanılmasının önüne geçtiği anlaşılmıştır. Bu belirsizlik konusundaki diğer bir örnek yine USLE/RUSLE modellerinde kullanılan K faktörü yani toprak aşınabilirlik sürecinin hesaplanmasında toprağın kesikli yapısının bir bütünmüş gibi enterpole edilmeye uygun olmamasıdır (Baskan vd., 2010).

Toprak erozyon sürecinde etkili olduğu bilinen parametrelerin mekânsal interpolasyon ile sürekli yüzeye dönüştürülmesi bileşenlerin doğru şekilde ilişkilendirilmesine bağlıdır (de Vente ve Poesen, 2005). Bu konudaki önemli bir eksiklik iklim için tutulan rasatların birbirinden kilometrelerce uzak olduğu bilinen gözlem istasyonları ile sınırlı olmasıdır. Toprak erozyonu konusunda verilerin sınırlandırıldığı başka bir boyut çözünürlük konusudur. Örneğin, yer şekillerinin görüntülenmesini sağlayan yer yüzeyinin dijital ortamdaki yükselti değerlerinin süreklilik arz eden bir ifadesi olan Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), toprak erozyonu çalışmalarında farklı çözünürlüklerde kullanılmaktadır (Mondal vd., 2017; Tağıl, 2006). SYM, enterpole edilen farklı aralıklardaki izohipsler, 30 ve 90 metre çözünürlükteki piksellerden oluşan uydu görüntüleri ve santimetre gibi yüksek çözünürlükteki LİDAR verileri gibi çeşitleri olduğundan standart çözünürlükte bir veri değildir (Yastıklı ve Esirtgen, 2011). Toprak erozyonu modelleme sürecinde en doğru sonuçlar için SYM'nin çözünürlüğünün hangi düzeyde olması gerektiği ve topoğrafya ilişkilerinin mekânsal düzeyde anlaşılmasına etki edecek standart bir değer mevcut değildir (Avcıoğlu vd., 2020). Bu örnekte olduğu gibi bazı parametrelerin nasıl sınırlandırıldığı modelleme sürecinin ele alındığı ölçek doğrultusunda değiştiği anlaşılmaktadır. Toprak erozyonu modellenmesinde veri konusu incelendiğinde tasarlanan modellerde kullanılan verilerin çözünürlüğü hem belirsizlikler hem de sınırlılıklar oluşturmaktadır.

Toprak erozyonuna duyarlı alanların tahmin edilmesinde standart bir ölçek ve çözünürlüğün olmamasının yanında bu bileşenlerin farklı yaklaşımlarla ilişkilendirilmesi aynı veriyle elde edilen sonuçların değişmesine neden olmaktadır (Phinzi ve Ngetar, 2019). Örneğin, AGNPS modelinde standart verilerin süreç içindeki akış değerlerinin hesaplanmasında SYM ve yağış verilerinin doğrusal bir ağırlıkta sınırlandırılmadığı (Adu ve Kuramasady, 2018). Fiziksel bir model olan SWAT modelinde yağış-akış ilişkisine bağlı erozyon miktarı arazi kullanımı, toprak türü ve eğim verilerine dayanan çoklu doğrusal regresyon ile belirlenmektedir (Abbaspour vd., 2015). USLE/RUSLE modelinde akışın su kaynaklı toprak erozyonu hareketine ilişkin bileşenler standart ağırlıklarla temsil edilmektedir (Çamuroğlu, 2020). Buradan anlaşılacağı üzere modellerin birçoğunda kullanılan sediman özellikleri, bitki örtüsü, iklim ve topoğrafya gibi veriler benzer olsa da farklı yaklaşımla sürecin modellenmesi aynı alandaki sonuçların değişmesine neden olmaktadır. Bu durum modellerin kendi içerisindeki başarısının denetlenmesi gerektiğini göstermektedir. Kısaca toprak erozyonuna duyarlı alanların tespiti ve sediman veriminin tahmin edilmesinde havza içerisinde etkili olan süreçlerin modellenmesinde veri ve yaklaşımdan bağımsız sonuçların doğruluk düzeyleri dikkate alınmalıdır (de Vente vd., 2013). Bunun dışında toprak erozyonunun zamansal boyutta (yıllık, aylık ve günlük) sınırlandırılması farklı periyotlarda gerçekleşen durumun tespit edilmesinde belirsizlikler yaratmaktadır (Guo vd., 2019).

Kısaca modellerde kullanılan verilerin çözünürlük veya katman olarak sınırlandırılması konu ile ilgili farklı belirsizliklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Son yıllarda yüzey erozyonunu belirlemede makine öğrenmesi yöntemlerinin yaygınlaşması ile çeşitli veriler kullanılmakta ve bu konudaki veri kalıpları kaybolmaktadır (Arabameri vd., 2020). Buradan da anlaşılacağı üzere bu yöntemlerin toprak erozyonu konusunda veri bakımından sınırların kaldırılması ile daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Başka bir deyişle, toprak erozyonunun fiziksel ve deneysel modellerde kullanılan standart veya sınırlı verilerin kullanılması veri esnekliğinin kaybolmasına neden olmaktadır. Bu süreçte veri konusundaki sorunları toparlamak gerekirse toprak erozyonu modellerindeki örnekleme hataları, yetersiz örneklem sayıları, uyumsuz veri çözünürlüğü, sürecin açıklanmasında hataya sürükleyen standart veri kalıpları ve gerçeği temsil etmeyen zaman aralığı çeşitli sınırlılıklar ve belirsizlikler yaratarak başarılı tahminlerin yapılmasını engellemektedir.

3. Sonuç

Erozyona uğrayan toprak miktarı ve toprak erozyonuna duyarlı alanların belirlenmesi konusunda fiziksel, deneysel, kavramsal modeller ve makine öğrenmesi yöntemlerinin farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Modelleme yaklaşımlarının tamamı benzetim sürecinde yüksek çözünürlükte, doğru ölçülmüş veriye ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada ele alınan fiziksel/deneysel, kavramsal modeller ve makine öğrenmesi yaklaşımlarının araştırmacılar tarafından seçiminde bazı özelliklerinin etkili olduğu belirlenmiştir. Bunlardan ilki bir modelleme yaklaşımlarının daha çok tercih edilmesinin en önemli nedeni farklı ortamlarda uygulanabilir olması diğeri ise basit, erişilebilir verilerden yararlanarak hızlı sonuçlar üretmesidir. Modeller genellikle geniş bir zaman diliminin ortalama sonucu üzerinden genel çıktılar üretseler de içlerinden bazıları örneğin PESERA modeli aylık ve yıllık tahminler yapabilmektedir. Bu durumda model seçiminde araştırmacının toprak erozyonu konusundaki hedefi belirleyici unsur olmaktadır. Toprak erozyonu duyarlılık (erozyona duyarlı alanlar) çalışmaları arasında en çok tercih edilen modelleme yaklaşımı USLE/RUSLE ve türevi modeller olduğu görülmektedir. Bunun en temel nedeni arazi üzerinde hangi alanda ne kadar sediman hareketinin olduğunun bu model yardımı ile tahmin edilebilmesidir. Bu iki özelliğin bir arada sunan modellerin oldukça az olması USLE/RUSLE tabanlı modellerin yaygınlaşmasında etkili olmuştur.

Toprak erozyonu çalışmalarında ulaşılmak istenen en temel bulgu akışa geçen sediman miktarının olabildiğince gerçeğe yakın tahmin edilmesidir. Bu hedefe ulaşmak için kullanılan modellerin güçlü ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Örneğin, SWAT modelinde su-toprak ilişkisi ve sediman hareketi ile ilgili iyi tahminler yapılabilirken elde edilen sonuçlar sürekli bir yüzey halinde sunulamamaktadır. Diğer yandan bu konuda en çok başvurulan ve bu konudaki etkinliği yüzlerce kez test edilen RUSLE modelinin en zayıf yanı süreçler arasındaki doğrusal ilişkilere fazla bağlı kalmasıdır. Son yıllarda uygulama alanı genişleyen makine öğrenmesi yöntemleri ise toprak erozyonuna duyarlı alanların başarılı tahmin edilmesinde daha yüksek doğruluk oranları yakalanmıştır. Diğer yandan bu modelleme yaklaşımları ile taşınan sediman miktarı konusundaki uygulamaların sayısı oldukça az olduğu dikkat çekmektedir. Toprak erozyonu ile ilgili tüm modellere baktığımızda durmaksızın değişim sürecinde olan arazi kullanımı ve iklim öğelerinin dinamik yapısını

benzetmelerinde neredeyse tüm modellerin zorlandığı anlaşılmaktadır. Bu zorluğun aşılmasında makine öğrenmesi yöntemlerinin değişime uyum sağlayacak şekilde eğitilebilir olması büyük avantaj sağlaması olumlu bir gelişmedir.

Toprak erozyonu modelleme çalışmalarında çıktı üretme sürecinin girdi kaynakları ile yani verilerle son derece ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu süreçlerin açıklanmasında yararlanılan verilerle ilgili sınırlılıklar ve belirsizlikler modellerin başarısını etkilemektedir. Bu konunun yarattığı olumsuzlukların önüne geçilmesi için düşük çözünürlükte veya kaynağı kesin olmayan verilerin yersel ölçüm ve doğrulama girişimleri ile düzenlenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada elde edilen izlenimler, stokastik ve derin öğrenme süreçlerinin birlikte kullanımının toprak erozyonunun etkili olduğu alanların belirlenmesinde daha doğru sonuçlar üretme potansiyeli olduğunu göstermektedir. Bu durum gelecekte toprak erozyonu çalışmalarında matematiksel modeller ile makine öğrenmesi modellerinin (yapay zekâ) bir arada kullanımının daha ileri boyutlara taşınabileceğini göstermektedir. Son olarak doğal veya beşeri etkenlerle bağlı toprak erozyon miktarının bire bir tahmin edildiği herhangi bir modelin bulunmadığı ancak bu konuda günümüzde kullanılan modellerinin dinamik bir yapıya ulaşarak çoklu etkenler üzerinden yüksek doğrulukta tahminler yürütmesi ile büyük ilerlemeler kaydedilmiştir.



Spatial Based Soil Erosion Forecasting Models: Is What We Know Changing?

Çağan Alevkayalı*^a, Bedran Abi^b

Submitted: 15.03.2023

Accepted: 12.09.2023

EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

Soil erosion is considered the most fundamental cause of land degradation because it is an environmental problem that affects different parts of the World (Valentin et al., 2005). Measuring soil erosion and identifying areas susceptible to water erosion are important to protect soil health and food safety by taking the necessary precautions (Zhang et al., 2015). The fact that soil erosion is accepted as a global problem by many environmental organizations has led to an increase in modeling (simulation) studies in estimating the amount of soil erosion (Dengiz et al., 2014).

In order to control the pressures resulting from soil erosion, especially in fertile lands, there is a need to estimate with high accuracy where and how much sediment transport occurs (Igwe et al., 2017). Estimation studies on sediment yield and transport; are listed as (1) regression equations, (2) physically based simulation models and (3) non-linear regression (for example, artificial intelligence) models (Cambazoğlu and Göğüş, 2004). Although the history of studies on estimating the amount of soil erosion and sensitive areas dates back to ancient times, it can be accepted that the application that triggered the change in the modeling process in 1965 was the Universal Soil Loss Equation (USLE) developed by Wischmeier and Smith (Lafren and Flanagan, 2013). This method differs from others in classifying areas susceptible to soil erosion by taking into account rainfall, soil parameters and topographic features in a holistic manner (Wischmeier and Smith, 1978). In recent years, prediction applications made with continuous surface data within the scope of soil erosion have focused on predicting the sediment transport process with Geographic Information Systems (GIS)-based modeling applications (Akdoğan et al., 2015).

Most of the academic studies about soil erosion such as modeling approaches, indices and machine learning methods are based on mathematical formulas (Akgün and Türk, 2011). Mathematically explaining the conditions of natural and human-induced soil erosion how useful are they? how reliable are they? and how successful are they? successful predictions can be made by answering these questions (Batista et al., 2019; Borrelli et al., 2021). In order to answer these questions, the basic features of the models, their designs, components, inputs, efforts to reach the right

* Corresponding Author: cagan_alevkayali@hotmail.com

^a Suleyman Demirel University, Department of Geography, Isparta/Türkiye, <http://orcid.org/0000-0001-7044-8183>

^b Suleyman Demirel University, Institute of Social Sciences, Isparta/Türkiye, <https://orcid.org/0000-0001-8790-6232>

result and the approach on which the models are based must be explained in detail (Borrelli et al., 2021; Pandey et al., 2016; Raza et al., 2021). The reason why we started this research is that there is no study in the literature that evaluates the most preferred mathematical models and machine learning applications for investigating soil erosion together.

The phenomenon that is intended to be simulated by soil erosion models is the identification of physical processes that are effective in changing land with algorithms (Igwe et al., 2017). In recent years, more accurate results have emerged with the use of innovative methods such as GIS and machine learning (artificial intelligence algorithms) in determining areas susceptible to erosion (Chakraborty et al., 2020). Many GIS-based soil erosion models have been developed since the 1990s with these developments (Avcıoğlu et al., 2020; Danacıoğlu and Tağil, 2017). The number of these models is quite high and the most well-known and preferred ones are listed as ACTMO, AGNPS, AnnAGNPS, ANSWERS, APEX, CREAMS, DWSM, EGEM, EPIC, EUROSEM, GAMES, GLEAMS, GSSHA, GUEST, HYPE, IDEAL, IQQM, KINEROS, LASCAM, LISEM, MEDALUS, MEFIDIS, MIKE 11, OPUS, PALMS, PEPP-HILLFLOW, PERFECT, PESERA, PRMS, RHEM, RUNOFF, SEDIMOT, SHE/SHESED, SHETRAN, SWAT, SWIM, SWM, SWRRB, TOPMODEL, TOPOG, WATEM/SEDEM, WEPP and WESP (Pandey et al., 2016). Most of these models are experimental and physically based and are designed by taking into account linear and non-linear relationships based on terrestrial measurements. There has been a rapid increase in studies on soil erosion modeling approaches in the last 20 years on the Web of Science (WoS) platform, which is the environment where academic publications with the highest impact are scanned (Figure 1). In this study, 1- basic features, 2- data and algorithm designs, 3- advantages and disadvantages of the most commonly used models and approaches among soil erosion applications in the literature were evaluated.

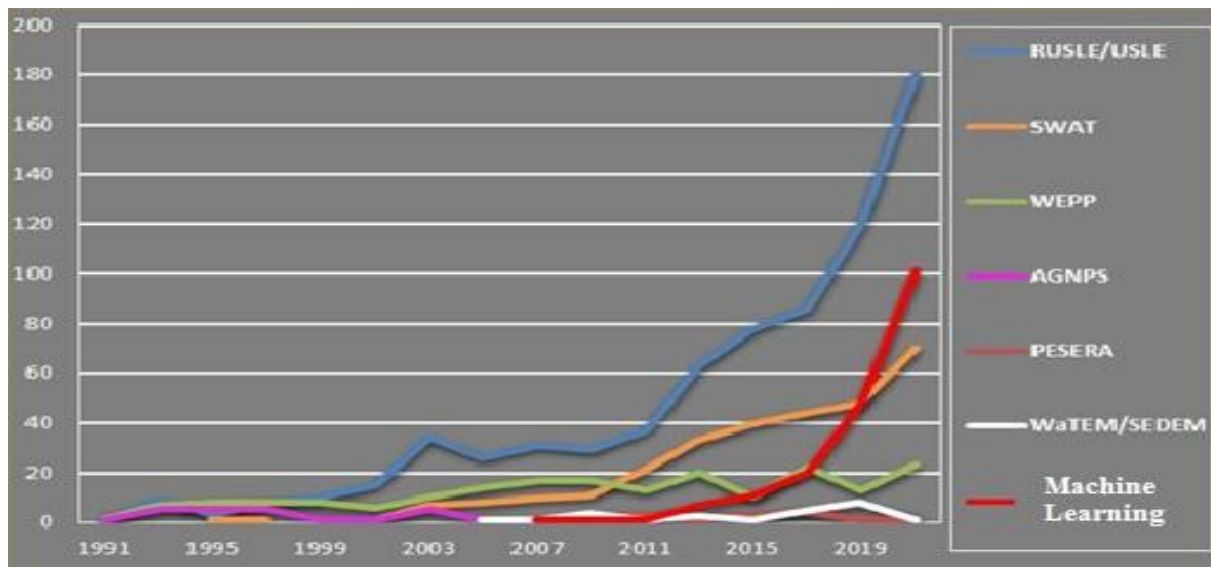


Figure 1. Number of publications of soil erosion prediction models using Rusle/USLE, SWAT, AGNPS, WEPP, WaTEM/SEDEM and Machine Learning methods in journals scanned on the Web of Science Platform between 1991 and 2021

2. Results

Different issues such as land management, stream dynamics and rainfall-flow relationship are addressed in Soil Erosion Models (Merrit et al., 2003). The basis of soil erosion models focusing on these issues is based on mathematical applications grouped under three headings: empirical, conceptual and physical (spatial) (Igwe et al., 2017; Merrit et al., 2003; Pandey et al., 2016; Renschler and Harbor, 2002). Experimental models consist of mathematical formulas for predicting transported sediment yield and texture properties (Eisazadeh et al., 2012). Conceptual models try to explain the general characteristics of a basin with practical and simple mathematical relationships without going into detail (Parsons et al., 2004). The last group of these applications, physical models are designed by evaluating topography, geology, land use, climate, vegetation cover and flow characteristics of sediment transport and accumulation processes on a spatio-temporal scale. Considering their different features and modeling approaches, the mathematical models RUSLE/USLE, SWAT, AGNPS, PESERA, WEPP and WaTEM/SEDEM and the machine learning methods Support Vector Machines, Random Tree, Logistic Regression and Decision Tree models are more common in the literature. The main features of these models are listed as follows:

- AGNPS has a high ability to model complex data. The model gives successful results in agricultural lands. Calculation time increases due to the use of many inputs in the model. The model is not useful for rough terrains (Aydın and Yıldırım, 2002).
- The PESERA model publishes online soil erosion estimates for all European countries in different periods (Tsara et al., 2005). Daily precipitation data provides daily runoff output using sediment and vegetation response capacity. These model outputs are currently limited to the European area only (Licciardello et al., 2009).
- SWAT is a physically based model and can predict soil erosion and element movements by using regression equations to explain the relationship between input and output variables (Özdemir and Güngör, 2019). The most important shortcoming of the SWAT model is that it cannot produce a continuous surface showing areas susceptible to soil erosion (Neitsch et al., 2011).
- The WEPP model produces fast results by combining topography, an important parameter of the input data (Aydın, 2009). Detailed surface predictions cannot be made with this model (Pandey et al., 2016). One of the most important advantages of SVM is that it solves the classification or regression problem in soil erosion predictions without getting stuck in the details (Yakut, 2012).
- SVM is quite successful in complex and dynamic phenomena such as soil erosion (Ghosh and Maiti, 2021). The most important disadvantage of this approach is that data cannot be separated linearly are removed from reality by transferring them to a different spatial environment (Demirci, 2007).
- The reasons for using decision trees in soil erosion studies are that they are fast, can be easily integrated with data systems, are secure, and produce easy and understandable results (Arabameri et al., 2021). Since it is difficult to predict continuous variables, it cannot produce successful results in the temporal change of the soil erosion process (Lei et al., 2020).

- The Random Forest approach improves the average prediction accuracy by arranging the inputs according to user-specified criteria (Zahedi et al., 2018). The most important disadvantage of the random forest approach to soil erosion is that causality between variables is not calculated (Arabameri et al., 2019).

Also, to explain the capabilities of these models, it is useful to look at the data sets used in these models. The resolution of remote sensing-based data used to estimate and classify areas susceptible to soil erosion limits the results produced by studies (Phinzi and Ngetar, 2019). For example, in the AGNPS model, DEM and precipitation data are limited to a linear weight in calculating the flow values of standard data in the process (Adu and Kuramasady, 2018). In the SWAT model, which is a physical model, the amount of erosion due to the rainfall-flow relationship is determined using land use, soil type and slope (Abbaspour et al., 2015). As can be understood from here, since data such as sediment properties, vegetation, climate and topography used in most of the models are produced from similar data sources, input-related failures affect the results of almost all models. This situation causes models to be limited within a certain framework and unsuccessful results to occur. Moreover, calculating the impact coefficients (weights) of the processes effective within the basin equally or randomly creates uncertainties in determining areas susceptible to soil erosion and estimating sediment yield (de Vente et al., 2013). A similar limitation arises in the USLE/RUSLE model that the effect of flow cannot directly represent water-borne soil erosion movement (Çamuroğlu, 2020). Also, limiting soil erosion in temporal dimension (annual, monthly and daily) creates uncertainties in situations that occur in different periods (Guo et al., 2019). In short, limiting the data used in the models in terms of resolution or layers causes different uncertainties to arise on the subject.

In recent years, with the widespread use of machine learning methods to determine surface erosion, various data are used and data patterns on this subject are lost (Arabameri et al., 2020). As can be seen from here, more successful results are obtained by removing the data limits of these methods on soil erosion. In other words, the use of standard or limited data used in physical and experimental models of soil erosion causes loss of data flexibility. To sum up the data problems in this process, sampling errors in soil erosion models, insufficient sample numbers, incompatible data resolution, standard data patterns that lead to errors in explaining the process, and time intervals that do not represent reality create various limitations and uncertainties and prevent successful predictions.

3. Conclusion

The most basic finding to be achieved in soil erosion studies is to estimate the amount of sediment transport as close to reality as possible. The models used in the literature to acquire the amount of sediment transport have strengths and weaknesses. For example, while good predictions can be made regarding water-soil relationships such as sediment flow, sediment grade and sediment discharge in the SWAT model, the results obtained cannot be presented as a continuous surface. On the other hand, the weakness of the RUSLE model, which is the most commonly used model and whose effectiveness has been tested hundreds of times, is that it is too dependent on linear relationships between processes. Machine learning methods, whose application area has expanded in recent years, have achieved higher accuracy rates in successfully predicting areas susceptible to soil erosion. However, it is noteworthy that the number of applications regarding the amount of sediment

movement by these modeling approaches is quite low. When we look at all models related to soil erosion, it is understood that almost all models have difficulty in simulating the dynamic structure of land use and climate elements, which are in the process of constant change. It is a positive development that machine learning methods can be trained to adapt to change and provide a great advantage in overcoming this difficulty. Additionally, the impressions obtained in this study show that combined use of stochastic and deep learning processes have a high potential to produce more accurate results in determining areas where soil erosion is effective. This shows that the combined use of mathematical models and machine learning models (artificial intelligence) in soil erosion studies can be taken to further levels in the future. Finally, there is no model that can accurately predict the amount of soil erosion due to natural or human factors, but the models used today have a dynamic structure that makes high-accuracy predictions possible based on multiple factors.

References/Referanslar

- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333 (2-4), 413-430. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.014
- Adu, J.T., Kumarasamy, M.V. (2018). Assessing non-point source pollution models: A review. *Pol. J. Environ. Stud.* 27, 1913-1922. doi: 10.15244/pjoes/76497.
- Akar, Ö., Güngör, O. (2012). Rastgele orman algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 1 (2), 139-146. doi: 10.9733/jgg.241212.1t
- Akdoğan, Z., Küçükdoğan, A., Güven, B. (2015). Yayılı kirleticilerin havzalardaki taşınım süreçleri: Antibiyotikler, ağır metaller ve besi maddeleri üzerine modelleme yaklaşımları. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 1, 21-31. doi: 10.7240/mufbed.99724
- Akgün, A., Türk, N. (2011). Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: A case study from the Ayvalık region, NW Turkey. *Computers and Geosciences*, 37, 1515-1524. doi: 10.1016/j.cageo.2010.09.006
- Aksu, N., Uçan, K. (2012). Hurman çayı havzasında ölçülen ve ampirik yöntemlerle hesaplanan sediman verimlerinin karşılaştırılması. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 15 (3), 1-8. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ksudobil/issue/22834/243765> adresinden alınmıştır.
- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and water conservation research*, 7 (3), 203-225. doi: 10.1016/j.iswcr.2019.05.004
- Alparslan, K., Küçükönder, M. (2021). Kaman deresi alt havzasının erozyon duyarlılığı. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 217-232. <https://www.researchgate.net/publication/354466877> adresinden alınmıştır.
- Apaydın, H., Öztürk, F. (2003). Yüzey akış ve sediman modellerinin coğrafi bilgi sistemi yardımıyla uygulanması. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 9 (4), 381-389. doi: 10.1501/Tarimbil_0000000841
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K. (2019). Gully erosion zonation mapping using integrated geographically weighted regression with certainty factor and random forest models in GIS. *Journal of environmental management*, 232, 928-942. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.11.110
- Arabameri, A., Chen, W., Loche, M., Zhao, X., Li, Y., Lombardo, L., Bui, D. T. (2020). Comparison of machine learning models for gully erosion susceptibility mapping. *Geoscience Frontiers*, 11 (5), 1609-1620. doi: 10.1016/j.gsf.2019.11.009
- Arabameri, A., Sadhasivam, N., Turabieh, H., Mafarja, M., Rezaie, F., Pal, S. C., Santosh, M. (2021). Credal decision tree based novel ensemble models for spatial assessment of gully erosion and sustainable management. *Scientific Reports*, 11 (1), 3147. doi: 10.1038/s41598-021-82527-3
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R. (1998). Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. model development. *J. Am. Water Res. Assoc.* 34(1), 73-89. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

- Aşkın, T., Türkmen, F., Tarakçıoğlu, C. (2016). Ordu ili merkez ilçe topraklarında erozyon riskinin jeoistatistiksel tekniklerle değerlendirilmesi. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 4 (2) 69-75. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tbbbd/issue/26811/282121> adresinden alınmıştır.
- Atalay, M., Çelik, E. (2017). Büyük veri analizinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamaları. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(22), 155-172. doi: 10.20875/makusobed.309727
- Avand, M., Mohammadi, M., Mirchooli, F., Kaviani, A., Tiefenbacher, J. P. (2022). A new approach for Smart Soil Erosion Modeling: Integration of empirical and machine-learning models. *Environmental Modeling & Assessment*, 1-16. doi: 10.1007/s10666-022-09858-x
- Avcıoğlu, A., Bayraktar, C., Sarı, E., Arslan Kaya, N.T. (2020). TanDEM-X12m sayısal yükselti verisine dayalı toprak erozyonu tespiti (Rusle). *Coğrafya Dergisi*, 41, 93-107. doi: 10.26650/JGEOG2020-0047
- Aydın, C., Yıldırım, Y.E. (2002). Harabe deresi havzasında yağış-akış ilişkisinin AGNPS modeliyle değerlendirilmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 9 (2), 243-248. doi: 10.1501/Tarimbil_0000000797
- Aydın, M. (2009). Gümüşhane-Torul Barajı yağış havzasında arazi kullanımına göre WEPP (Water Erosion Prediction Project) modeli ile toprak kayıplarının belirlenmesi ve alınması gereken önlemler. *Kastamonu Üni, Orman Fakültesi Dergisi*, 9 (1): 54-65. <https://dergipark.org.tr/en/pub/kastorman/issue/17240/180110> adresinden alınmıştır.
- Ayhan, S., Erdoğan, Ş. (2014). Destek vektör makineleriyle sınıflandırma problemlerinin çözümü için çekirdek fonksiyonu seçimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İibf Dergisi*, Nisan 2014, 9 (1), 175-198. <https://dergipark.org.tr/en/pub/oguiibf/issue/5712/76473> adresinden alınmıştır.
- Baskan, O., Cebel, H., Akgül, S., Erpul, G. (2010). Conditional simulation of USLE/RUSLE soil erodibility factor by geostatistics in a Mediterranean catchment, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 60 (6), 1179-1187. doi: 10.1007/s12665-009-0259-2
- Batista, P.V.G., Davies, J., Silva, M.L.N., Quinton, J.N. (2019). On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Reviews*, 197. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.102898
- Berberoğlu, S., Çilek, A. (2013). Coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla Seyhan havzasında pesera ve rusle erozyon modellerinin kıyaslanması. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, 11-13 Kasım 2013, Ankara.
- Bezak, N., Rusjan, S., Petan, S., Sodnik, J., Mikoš, M. (2015). Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure. *Environmental Earth Sciences*, 74, 5245-5261. doi: 10.1007/s12665-015-4534-0
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddocci, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., Maria De Girolamo, A., Desta Gessesse, G., Deumlich, D., Diodato, D., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., Freppaz, M., Gentile, F., Gericke, A., Haregeweyn, N., Hu, B., Jeanneau, A., Kaffas, K., Kiani-Harchegani, M., Villuendas, I.L., Li, C., Lombardo, L., López-Vicente, M., Lucas-Borja, M.E., Märker, M., Matthews, F., Miao, C., Mikoš, M., Modugno, S., Möller, M., Naipal, V., Nearing, M., Owusu, S., Panday, D., Patault, E., Patriche, C.V., Poggio, L., Portes, R., Quijano, L., Rahdari, M.R., Renima, M., Ricci, G.R., Rodrigo-Comino, J., Saia, S., Samani, A.N., Schillaci, C., Syrris, V., Kim, H.Y., Spinola, D.N., Oliveira, P.T., Teng, H., Thapa, R., Vantas, K., Vieira, D., Yang, J.E., Yin, S., Zema, D.A., Zhao, G., Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *EarthArxiv*. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146494
- Bramer, M. (2007). *Principles of Data Mining*. Springer, London
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45 (1), 5-32. doi:10.1023/A:1010933404324
- Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Sotne C.J. (1984). *Classification and Regression Trees*. Wadsworth, Belmont. ISBN-13, 978-0412048418
- Cambazoğlu, M.K., Göğüş M. (2004). Sediman yields of basins in the Western Black Sea region of Turkey. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 28, 355-367.
- Celilov, C., Dengiz, O. (2019). Erozyon duyarlılık parametrelerinin farklı enterpolasyon yöntemleriyle konumsal dağılımlarının belirlenmesi: Türkiye, İlgaç milli park toprakları. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 6 (3): 242-256. doi: 10.19159/tutad.502457
- Chakraborty, R., Pal, C., Sahana, M., Mondal, A., Dou, J., Pham, B.T., Yunus, A.P. (2020). Soil erosion potential hotspot zone identification using machine learning and statistical approaches in eastern India. *Natural Hazards*, 104, 1259-1294. doi:10.1007/s11069-020-04213-3
- Chandramohan T., Venkatesh B., Balchand A.N. (2015). Evaluation of three soil erosion models for small watersheds, international conference on water resources, coastal and ocean engineering (Icwrcoe 2015). *Aquatic Procedia*, 4, 1227-1234. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.156

- Cuceloglu, G., Abbaspour, K.C., Ozturk, I., (2017). Assessing the water-resources potential of Istanbul by using a soil and water assessment tool (SWAT) hydrological model. *Water*, 9 (10), 814. doi:10.3390/w9100814
- Çamuroğlu, A. (2020). *Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri ile yağış ve rüzgâr kaynaklı toprak erozyonu modellenmesi*. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Danacıoğlu, Ş., Tağıl, Ş. (2017). Bakırçay havzasında rusle modeli kullanarak erozyon riskinin değerlendirilmesi. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 20 (37). doi: 10.31795/baunsobed.645168
- de Vente, J., Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews*, 71, 95–125. doi: 10.1016/j.earscirev.2005.02.002
- de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., Arabkhedri, M., Boix-Fayos, C. (2013). Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? *Earth-Science Reviews* 127, 16-29. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.08.014
- de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., Govers, G. (2008). Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change*, 60, 393-415. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.05.002
- Demir, S., Oğuz, İ., Ciba, Ö.F., Özer, E. (2017). Farklı arazi kullanımı altında meydana gelen toprak ve yüzey akış kayıplarının Wepp Hillslope modeli kullanılarak tahmin edilmesi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 34 (Ek Sayı), 97-104. doi: 10.13002/jafag4411
- Demirci, D. A. (2007). *Destek vektör makineleri ile karakter tanıma*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Dengiz, O., İmamoglu, A., Saygın, F., Göl, C., Ediş, S., Doğan, A. (2014). İnebolu havzasının icona modeli ile toprak erozyon risk değerlendirilmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 29, (2), 136-142. doi: 10.7161/anajas.2014.29.2.136-142
- Dinh, T. V., Nguyen, H., Tran, X. L., Hoang, N. D. (2021). Predicting rainfall-induced soil erosion based on a hybridization of adaptive differential evolution and support vector machine classification. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. doi: 10.1155/2021/6647829
- Djoukbal, O., Hasbaia, M., Benselama, O., Mazour, M. (2019). Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria, Modeling). *Earth Systems and Environment*, 5, 725–743. doi: 10.1007/s40808-018-0562-6
- Dong-Peng, Y., Li, J.L., Lun, R., Chao, Z. (2008). Applications of data mining methods in the evaluation of client credibility. In Soares, C., Peng, Y., Meng, J., Washio, T. (Eds.) *Applications of Data Mining in E-Business and Finance*, IOS Press, Amsterdam, 35-43.
- Dönmez, C., Sarı, Ö. (2018). Hidrolojik dinamiklerin SWAT model yaklaşımı ile modellenmesi: Aşağı Seyhan Havzası, Türkiye. *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36 (1).
- Duru, U., Arabi, M., Wohl, E.E. (2018). Modeling Stream Flow and Sediment Yield Using the SWAT Model: A Case Study of Ankara River basin, Turkey. *Physical Geography*, 39 (3), 264-289.
- Dutta, S. (2016). Soil erosion, sediment yield and sedimentation of reservoir: A review. *Model. Earth Systems and Environment*, 2, 123. doi:10.1007/s40808-016-0182-y
- Eisazadeh, L., Sokouti, R., Homae, M., Pazira, E. (2012). Comparison of empirical models to estimate soil erosion and sediment yield in micri catchments. *Eurasian Journal of Soil Science*, 1, 28-33. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ejss/issue/5420/73380> adresinden alınmıştır.
- Erdem, F., Derinpınar, M.A., Nasirzadehdizaji, R., Oy, S., Şeker, D.Z., Bayram, B. (2018). Rastgele orman yöntemi kullanılarak kıyı çizgisi çıkarımı İstanbul örneği. *Geomatik Dergisi*, 3(2), 100-107. doi: 10.29128/geomatik.362179
- Erpul, G. (2016). *Türkiye Yağışlarının Özellikleri ve Yenilenmiş Evrensel Toprak Kayıpları Eşitliği (YETKE) R Faktörü*. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara. ISBN:978-605-4610-93-8
- Erpul, G., Nouri, A., Youssef, F., Basaran, M., Lee, J., Saxton, A. M. (2018). The effect of fallow tillage management on aeolian soil losses in Semiarid Central Anatolia, Turkey. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 1:180019, doi:10.2134/age2018.07.0019.
- Ganasri, B. P., Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953-961. doi: 10.1016/j.gsf.2015.10.007
- Geissen, V., Kampichler, C., López-de Llergo-Juárez, J. J., Galindo-Acántara, A. (2007). Superficial and subterranean soil erosion in Tabasco, tropical Mexico: development of a decision tree modeling approach. *Geoderma*, 139 (3-4), 277-

287. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.01.002
- Ghosh, A., Maiti, R. (2021). Soil erosion susceptibility assessment using logistic regression, decision tree and random forest: study on the Mayurakshi river basin of Eastern India. *Environ Earth Sci* 80, 328 (2021). doi: 10.1007/s12665-021-09631-5
- Golkarian, A., Khosravi, K., Panahi, M., Clague, J. J. (2023). Spatial variability of soil water erosion: Comparing empirical and intelligent techniques. *Geoscience Frontiers*, 14 (1), 101456. doi: 10.1016/j.gsf.2022.101456
- Guo, Y., Peng, C., Zhu, Q., Wang, M., Wang, H., Peng, S., He, H. (2019). Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: Model applications, limitations and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 250, 1-2. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109403
- Han, J., Kamber, M. (2006), *Data Mining: Concepts and Techniques*. Second Edition. Morgan Kaufmann Publications, San Francisco.
- Haregeweyn, N., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., de Vente, J., Nyssen, J., Deckers, J., Moeyersons, J. (2013). Assessing the performance of a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (WATEM/SEDEM) in Northern Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 24 (2), 188-204. doi: 10.1002/ldr.1121
- Igwe, P.U., Onuigbo, A.A., Chinedu, O.C., Ezeaku, I.I., Muoneke, M.M. (2017). Soil erosion: A review of models and applications. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 4 (12), 2456-1908.
- Irvine B., Kosmas, C. (2007). *Deliverable 15: PESERA Users Manual*, Geography Department Leeds University, 133.
- İkiel, C., Ustaoglu, B., Koç, D. E. (2020). Trakya'nın erozyon duyarlılık analizi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, (4), 1-14. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jader/issue/53577/666287> adresinden alınmıştır.
- İmamoğlu, A., Muhammed, B., Dengiz, O. (2016). Çorum Alaca havzasında toprak erozyon duyarlılık faktörünün farklı enterpolasyon modeller kullanılarak konumsal dağılımlarının belirlenmesi. *Toprak Su Dergisi*, 5 (1), (8-15). doi: 10.21657/tsd.15185
- Jahun, B. G., Ibrahim, R., Dlamini, N. S., Musa, S. M. (2015). Review of soil erosion assessment using RUSLE model and GIS. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 5 (9), 36-47.
- Jetten, V., Govers, G., Hessel, R. (2003). Erosion models: Quality of spatial predictions. *Hydrol. Process.* 17, 887–900. doi: 10.1002/hyp.1168
- Kalfazade, M. (2015). *Hidrolojik proses modelleri ile havza şebeke modelleri entegrasyonu, Darlık Havzası örneği*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Karabulut, M., Küçükönder, M. (2008). Kahramanmaraş ovası ve çevresinde CBS kullanılarak erozyon alanlarının tespiti. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 11 (2), 14-22.
- Kavzoglu, T., Colkesen, I., (2009). A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11 (5), 352-359. doi: 10.1016/j.jag.2009.06.002
- Kavzoğlu, T., Çölkesen, İ. (2010). Karar ağaçları ile uydu görüntülerinin sınıflandırılması: Kocaeli örneği. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2 (1), 36-45. <https://dergipark.org.tr/en/pub/hartek/issue/7601/99675> adresinden alınmıştır.
- Kırnak, H., Gowda, P. H. (2001). Using WEPP model to predict sediment and runoff from an agricultural watershed. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 24-31. <https://www.researchgate.net/publication/304426574> adresinden alınmıştır.
- Kirkby, M.J. (2003). Modelling erosion – the PESERA project. *The first SCAPE (Soil Conservation and Protection for Europe) workshop in Alicante (ES)*, 14-16 June 2003, Amsterdam The Netherlands.
- Kirkby, M. J., Irvine, B. J., Jones, R. J., Govers, G., Pesera Team. (2008). The PESERA coarse scale erosion model for Europe. I.–Model rationale and implementation. *European Journal of Soil Science*, 59 (6), 1293-1306. doi:10.1111/j.1365-2389.2008.01072.x
- Lafren, J.M., Flanagan, D.C. (2013). The Development of U.S Soil Erosion Prediction and Modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 1 (2), 1-11. doi: 10.1016/S2095-6339(15)30034-4
- Larose, D. T. (2005), *Discovering Knowledge in Data*, Wiley Publication, New Jersey.
- Li, P., Mu, X., Holden, J., Wu, Y., Irvine, B., Wang, F., Gao, P., Zhao, G., Sun, W., (2017). Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau. *Earth Sci. Rev.* 170, 17–30. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.05.005.
- Liu, G., Arabameri, A., Santosh, M., Nalivan, O. A. (2023). Optimizing machine learning algorithms for spatial prediction of

- gully erosion susceptibility with four training scenarios. *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (16), 46979-46996. doi: 10.1007/s11356-022-25090-2
- Lei, X., Chen, W., Avand, M., Janizadeh, S., Kariminejad, N., Shahabi, H., Costache, R., Shahabi, H., Shirzadi, A., Mosavi, A. (2020). GIS-based machine learning algorithms for gully erosion susceptibility mapping in a semi-arid region of Iran. *Remote Sensing*, 12 (15), 2478. doi: 10.3390/rs12152478
- Licciardello, F., Govers, G., Cerdan, O., Kirkby, M.J., Vacca, A., Kwaad, F.J.P.M., (2009). Evaluation of the PESERA model in two contrasting environments. *Earth Surf. Process. Landforms*, 34, 629–640. doi:10.1002/esp.1745
- Lieskovský, J., Kenderessy, P. (2014). Modelling the effect of vegetation cover and different tillage practices on soil erosion in vineyards: A case study in Vrâble (Slovakia) Using WATEM/SEDEM. *Land Degrad. Develop.*, 25, 288–296. doi:10.1002/ldr.2162
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J. (2003). A review of erosion and sediment transport models *Environmental, Modelling & Software* 18, 761–799. doi: 10.1016/S1364-8152(03)00078-1
- Mondal, A., Khare, D., Kundu, S. (2017). Uncertainty analysis of soil erosion modelling using different resolution of open-source DEMs. *Geocarto International*, 32 (3), 334-349. doi: 10.1080/10106049.2016.1140822
- Mosavi, A., Sajedi-Hosseini, A., Choubin, B., Taromideh, F., Rahi, G., Adrienn A. Dineva, A.A. (2020). Susceptibility mapping of soil water erosion using machine learning models. *Water*, 12. doi: 10.3390/w12071995
- Mutlu, Y. E., Soykan, A. (2018). Rusle (3D) modeli kullanılarak toprak erozyonu tahmini: Havran çayı örneği. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, (1), 50-66. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jader/issue/43138/523028> adresinden alınmıştır.
- 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 American Society of Agricultural Engineers*, 32, 1587– 1593. doi: 10.13031/2013.31195
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Temple, Texas 76502: USDA-153 ARS Grassland Soil and Water Research Laboratory, and Texas A&M University, Blackland Research and Extension Center
- Nguyen, K.A., Chen, W., Lin, B.S., Seeboonruang, U., Thomas, K. (2019). Predicting sheet and rill erosion of shihmen reservoir watershed in Taiwan using machine learning. *Sustainability* 11, 3615. doi: 10.3390/su11133615
- Nguyen, K. A., Chen, W., Lin, B.S., Seeboonruang, U. (2021). Comparison of ensemble machine learning methods for soil erosion pin measurements. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10 (1), 42. doi:10.3390/ijgi10010042.
- Nisbet, R. Elder, J., Miner, G. (2009). *Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications*. Elsevier Inc, Burlington.
- Ölgen, M. K. (2010). Türkiye’de yıllık ve mevsimsel yağış değişkenliğinin alansal dağılımı. *Ege Coğrafya Dergisi*, 19 (1), 85-95. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ecd/issue/4873/66903> adresinden alınmıştır.
- Özdemir, K., Güngör, Ö. (2019). Filyos Çayı havzasında SWAT modelinin uygulaması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (2), 92-102. <https://dergipark.org.tr/en/pub/neufmbd/issue/50471/559228> adresinden alınmıştır.
- Özkan, Y. (2008). *Veri Madenciliği Yöntemleri*. Papatya Yayıncılık Eğitim, İstanbul, 216.
- Özşahin, E. (2016). Alakır Çayı havzasında (Antalya) toprak kaybının mekânsal dağılışı ve etkili faktörler, *tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13 (02), 123-134. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jotaf/issue/19063/201763> adresinden alınmıştır.
- Öztürk, F., Sönmez, K., Yıldırım, Y.E., Bayramın, İ., Apaydın, H., Karaş, E. (2003). Kurukavak Deresi havzasında yüzey akış ve sediment miktarının AGNPS modeli ile tahmini, *Tarım Bilimleri Dergisi*, 9 (3), 344-351. doi: 10.1501/Tarimbil_00000000835
- Öztürk, M. Z., Çetinkaya, G., Aydın, S. (2017). Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Türkiye’nin iklim tipleri. *Coğrafya Dergisi*, (35), 17-27. doi: 10.26650/JGEOG295515
- Öztürkmen, A. R., Ramazanoğlu, E., Tokmakçı, S. (2021). Determination of erodibility (USLE-K) status of suruc plain soils before transition to irrigated agriculture within the scope of Southeastern Anatolia Project. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*, 5 (2), 229-235. doi: 10.31015/jaefs.2021.2.13
- Pal, M., Mather P.M. (2003). An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 86, 554-565. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00132-9
- Pal, M., Mather, P.M. (2005). Support vector machines for classification in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 26 (5): 1007-1011. doi: 10.1080/01431160512331314083

- Panagos, P., Meusburger, K., Van Liedekerke, M., Alewell, C., Hiederer, R., Montanarella, L. (2014). Assessing soil erosion in Europe based on data collected through a European network. *Soil science and plant nutrition*, 60 (1), 15-29. doi: 10.1080/00380768.2013.835701
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Jae Lim, K., Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Sci. Rep.*, 7, 4175, retrieved from <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-rainfall-erosivity>, last access: 23 November 2018.
- Pandey, A., Himanshu, S.K., Mishra, S.K., Singh, V.P. (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena*, 147, 595-620. doi: 10.1016/j.catena.2016.08.002
- Parsons, A.J., Wainwright, J., Powell, D.M., Kaduk, J., Brazier, R.E. (2004). A conceptual model for determining soil erosion by water. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 1293-1302. doi: 10.1002/esp.1096
- Perrone, J., Madramootoo, C. A. (1999). Sediment yield prediction using AGNPS. *Journal of Soil and Water conservation*, 54(1), 415-419. <https://www.jswconline.org/content/54/1/415> adresinden alınmıştır.
- Phinzi, K., Ngetar, N. S. (2019). The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review. *International Soil and Water Conservation Research*, 7 (1), 27-46. doi: 10.1016/j.iswcr.2018.12.002
- Raza, A., Ahrends, H., Habib-Ur-Rahman, M., Gaiser, T. (2021). Modeling approaches to assess soil erosion by water at the field scale with special emphasis on heterogeneity of soils and crops. *Land*, 10 (4), 422. doi: 10.3390/land10040422
- 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)*. Agric. Handb. Vol. 703. US Department of Agriculture: Washington, DC, 1-251.
- Renschler, C.S., Harbor, J. (2002). Soil erosion assessment tools from point to regional scales-the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*, 47, 189-209. doi: 10.1016/S0169-555X(02)00082-X
- Sahour, H., Gholami, V., Vazifedani M., Saeedi, S. (2021). Machine learning applications for water-induced soil erosion modeling and mapping. *Soil and Tillage Research*, 211. doi: 10.1016/j.still.2021.105032
- Soman, K.P., Loganathan, R., Ajay, V. (2011). *Machine Learning with SVM and other Kernel Methods*. PHI Learning Pvt. Ltd., 486.
- Song, Q., Hu, W., Xie, W. (2002). Robust support vector machine with bullet hole image classification. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part C (applications and reviews)*, 32 (4), 440-448. doi: 10.1109/TSMCC.2002.807277
- Tağıl, Ş. (2006). Kazdağı Milli Parkı'nda arazi örtüsü organizasyonunu kontrol eden jeomorfometrik faktörler: Bir cbs yaklaşımı. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 4(2), 37-47. doi: 10.1501/Cogbil_0000000067
- Tağıl, Ş. (2009). Çakırdere ve yahu dere havzalarında (Balıkesir) toprak kaybının mekansal dağılışı ve etkileyen faktörler. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12 (22), 23-39. <https://dergipark.org.tr/en/pub/baunsobed/issue/50240/648074> adresinden alınmıştır.
- Tsara, M., Kosmas, C., Kirkby, M.J., Kosma, D., Yassoglou, N. (2005). An evaluation of the PESERA soil erosion model and its application to a case study in Zakynthos, Greece. *Soil Use and Management*, 21, 377-385. doi: 10.1079/SUM2005322
- Tüfekçioğlu, M., Yavuz, M. (2016). Yusufeli mikro havzasında (Artvin) yüzey erozyonu toprak kaybının tahmin edilmesi ve erozyon risk haritasının oluşturulması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 17 (2), 188-199.
- Valentin, C., Poesen, J., Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63, 132-153. doi: 10.1016/j.catena.2005.06.001
- Van Rompaey, A.J.J., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G., Poesen, J. (2001). Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Process Landforms* 26, 1221-1236. doi: 10.1002/esp.275.
- Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P.J.J. (2000). Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*, 15, 579- 591. doi: 10.1023/A:1008198215674
- Vapnik, V.N. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*, 2. Baskı, Springer-Verlag, New York.
- Vu, D.T., Tran, X.L., Cao, M.T., Tran, T.C., Hoang, N.D. (2021). Machine learning based soil erosion susceptibility prediction using social spider algorithm optimized multivariate adaptive regression spline. *Measurement*, 164. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108066

- Yakupoğlu, T., Demirci, D. (2013). Kahramanmaraş-Narlı Ovası Topraklarının Erozyona Duyarlılıkları ile Bazı Toprak Özellikleri Arasındaki İlişkiler. *Anadolu Tarım Bilim. Dergisi*, 28 (1), 33-38. <https://dergipark.org.tr/en/pub/omuanajas/issue/20216/214184> adresinden alınmıştır.
- Yakut, E. (2012). *Veri Madenciliği Tekniklerinden C5.0 Algoritması, Destek Vektör Makineleri ile Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırma Başarılarının Karşılaştırılması: İmalat Sektöründe Bir Uygulama*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Yastıklı, N., Esirtgen, F. (2011). Sayısal yükseklik modellerinde kalite değerlendirme ve doğruluk analizi. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı 1822 Nisan 2011, Ankara*
- Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., Anderson, W. P. (1989). AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of soil and water conservation*, 44 (2), 168-173.
- Yılmaz Akşehirli, Ö., Ankaralı, H., Aydın, D., Saraçlı, Ö. (2013). Tıbbi tahminde alternatif bir yaklaşım: Destek vektör makineleri. *Türkiye Klinikleri Journal of Biostatistics*, 5 (1).
- Zahedi, P., Parvande, S., Asgharpour, A., McLaury, B. S., Shirazi, S. A., McKinney, B. A. (2018). Random forest regression prediction of solid particle Erosion in elbows. *Powder Technology*, 338, 983-992. doi: 10.1016/j.powtec.2018.07.055
- Zhao, G., Klik, A., Mu, X., Wang, F., Gao, P., Sun, W. (2015). Sediman yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China. *Geomorphology* 241, 343-352. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.04.020.
- Zhuang, F., Wang, Z., Yang, Q. (2008). The retrospection and prospect on soil erosion research in China. *Chinese Journal of Nature*, 30 (1), 12-16.
- Zhuang, Y., Du, C., Zhang, L., Du, Y. Li, S. (2015). Research trends and hotspots in soil erosion from 1932 to 2013: A literature review. *Scientometrics*, 10, 743-758. doi: 10.1007/s11192-015-1706-3