



Parmak erozyonu süreçlerinin WEPP modeli yaklaşımı ile ince bünyeli topraklar için değerlendirilmesi

Şefika ARSLAN¹, Selen DEVİREN SAYGIN^{1*}, Fikret ARI², Çağla TEMİZ¹, Mehmet Altay ÜNAL³, Günay ERPUL¹

¹Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Dışkapı, Ankara

²Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Gölbaşı, Ankara

³Ankara Üniversitesi Kök Hücre Enstitüsü, Çankaya, Ankara

Öz

Bu çalışmada, yarı kurak iklim şartlarında altında gelişen, kil içeriği yüksek 5 farklı kuru tarım arazisine ait toprak örneklerinin parmak erozyon süreçlerine karşı olan duyarlılıkları WEPP model (Water Erosion Prediction Project/Su Erozyonu Tahmin Projesi) yaklaşımına uygun olarak değerlendirilerek, model performansı Nash-Sutcliffe model etkinliği (NSE, Nash-Sutcliffe model efficiency) yaklaşımı ile belirlenmiştir. Modelde parmak erozyonu süreçleri parmak erozyon duyarlılığı (K_r , $s\ m^{-1}$) ve kritik akış kesme gerilimi (τ_{cr}) olarak adlandırılan değişkenler ile ölçülmektedir. Bu değişkenlerin elde edilmesinde, V şekilli küçük oluk ölçüm düzeneğinden (mini-flume) yararlanılmış olup, değerlendirilen farklı toprak türleri için, değişen yüzey akış oranları altında parçalanma oranı ve akış gerilimleri ölçülmüştür. Model performansının değerlendirilmesi amacı ile, WEPP modeli için içsel toprak özelliklerinden yararlanılarak geliştirilen deneysel eşitlikler ile tahmin edilen duyarlılık ve kritik akış kesme gerilimi değerleri, laboratuvar ortamında mini-flume ölçümlerinden elde edilen değerler ile NSE yaklaşımına göre karşılaştırılmıştır. Bulgular, örneklerin silt kapsamı arttıkça model performansının yükseldiğini göstermiştir. Bu durum modelin geliştirildiği toprak koşulları göz önüne alındığında uyumlu olarak değerlendirilmiştir. Kritik akış kesme gerilimleri açısından ölçülen ve tahmin edilen değerler karşılaştırıldığında, laboratuvar ortamında ölçülen τ_{cr} değerleri (0,36; 0,35; 0,37; 0,35; 0,40) model tahminleri (4,39; 3,5; 3,5; 3,5; 3,5)'ne göre oldukça düşük, model performansını ortaya koyan NSE değerleri (-1,36E+04; -5,70E+04; -2,21E+04; -1,04E+03; -1,98E+04)'de son derece düşüktür. Bu durum, modelin örneklem setinin değişen bünye koşulları açısından sınırlı olması ile açıklanabilmektedir. Özellikle ulusal ölçekte yapılacak planlamalarda tarım topraklarında karşılaşılan parmak erozyon riskinin değerlendirilmesi amacıyla önerilen eşitliklerin daha geniş veri setleri ile doğrulamalarının yapılması ve süreç tabanlı modelleme yaklaşımının kullanımının yaygınlaştırılması toprak ve su koruma açısından alınacak önlemlerin ve arazi yönetimleriyle ilgili olarak ortaya konulacak hedeflerin gerçekleştirilebilmesi açısından son derece önemli ve gereklidir.

Anahtar Kelimeler: WEPP modeli, parmak erozyon duyarlılığı, kritik akış kesme gerilimi, su erozyonu.

Evaluation of rill erosion processes with WEPP model approach for fine-textured soils

Abstract

In the study, erodibility of the soils belonging to 5 different dry agricultural land under semi-arid climate conditions and having higher clay contents was evaluated for rill erosion processes with the WEPP model (Water Erosion Prediction Project) approach. And model performance was determined by the Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE, Nash-Sutcliffe model efficiency) approach for studied soil conditions. The variables used for estimating rill erosion rates in the model are rill erodibility (K_r , $s\ m^{-1}$) and critical flow shear stress (τ_{cr}). A V-shaped mini-flume measurement setup was used to obtain these variables, and the rate of detachment and flow shear stress were measured under varying runoff rates for the different soil types evaluated. In order to evaluate the model performance, the erodibility and critical flow shear the values predicted by the empirical equations developed for the WEPP model using intrinsic soil properties were compared with the values obtained from mini-flume measurements in laboratory by using the NSE approach. The results showed that the model performance increased as the silt content of the samples increased. This situation is considered to be compatible with the soil conditions under which the model was developed.

* Sorumlu yazar:

Tel. : 0 312 596 1683

E-posta : sdeviren@agri.ankara.edu.tr

Makale Türü: ARAŞTIRMA MAKALESİ

Geliş Tarihi : 12 Ekim 2023 e-ISSN : 2146-8141

Kabul Tarihi : 30 Kasım 2023 DOI : 10.33409/tbbbd.1374916

When the measured and predicted values were compared in terms of critical flow shear stress, the laboratory measured τ_{cr} values (0.3625; 0.3493; 0.3703; 0.3499; 0.3971) are considerably lower than the model predictions (4.3886; 3.5; 3.5; 3.5; 3.5), and the NSE values (-1.36E+04; -5.70E+04; -2.21E+04; -1.04E+03; -1.98E+04), which reveal the model performance, are also extremely low. This can be explained by the limited sample set of the model in terms of varying constitutive conditions. It is very important and necessary to verify the proposed equations with larger data sets and to extend the use of process-based modelling approach in order to evaluate the rill erosion risk encountered in agricultural soils, especially in national planning, in order to achieve the measures to be taken in terms of soil and water conservation and the targets to be set for land management.

Keywords: WEPP model, rill erodibility, critical flow shear stress, water erosion.

© 2023 Türkiye Toprak Bilimi Derneği. Her Hakkı Saklıdır

Giriş

Toprak erozyonu, tüm dünyada üretkenliği olumsuz olarak etkilediği için ekosistem hizmetlerinin devamlılığının sağlanmasında toprak koruma önlemlerinin alınmasını zorunlu kılan önemli bir sorun olarak ifade edilmektedir (Crosson, 1997; Daily ve ark. 1997). Türkiye'nin yarı-kurak alanları içerisindeki pek çok tarım alanında düşük üretim potansiyeli erozyon olayları ile ilişkilendirilmektedir (Özdemir, 2002). Türkiye'de yapılan güncel erozyon araştırma bulgularına göre ise su erozyonu ile meydana gelen kayıpların %38,71'i tarım alanlarında meydana gelmekte olup, her yıl hektarda ortalama 2 ton toprak, su erozyonu sebebi ile yer değiştirmektedir (Erpul ve ark. 2018).

Toprak verimini doğrudan etkileyen erozyon sebebi ile verimli üst toprak katmanında bulunan fosfor, potasyum, azot vb. gibi bitki besin maddeleri uzaklaşmakta ve akabinde toprakların üretim potansiyelleri önemli düzeyde azalmaktadır. Bu durum gelecekte toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını sınırlandırarak, gıda ve çevre güvenliğini tehdit etmektedir. Bununla birlikte erozyonun olumsuz etkileri sadece tarımsal üretim potansiyellerinde azalmaya yol açması ile sınırlı değildir. Öyle ki, su erozyonu sebebi ile parçalanarak taşınan sedimentler; göller, akarsu yatakları, baraj ve göletlerde siltasyona neden olarak bu yapıların ekonomik ömürlerini sınırlandırmaktadır (Saygın ve ark. 2014; Karagöz ve ark. 2015; Öztürk ve ark. 2023). Çevre sağlığı açısından, özellikle akarsuların tortu ve besin maddeleri ile kirlenmesi sonucu su kalitesi önemli düzeylerde düşmektedir (Kumarasiri ve ark. 2022). Türkiye'de yüzyıllar boyunca uygun olmayan arazi kullanımları ve tarım baskısı sebebi ile özellikle engebeli alanlarda üst toprak katmanı önemli oranda, hatta yer yer alttaki ana kaya ortaya çıkacak biçimde taşınmıştır (Saygın ve ark. 2014; 2021).

Su erozyonunun tarım alanlarında görülen en yaygın türü olan parmak erozyonu, birkaç cm derinlikteki küçük kanallarda yüzey akışların toplanarak toprak taneciklerini taşınması süreci olarak ifade edilmektedir. Başlangıç evresinde oldukça kolay bir şekilde görülebilen parmaklar genellikle devam eden bir erozyon sorununun ilk belirteci olup, zamanla önemli düzeylerde toprak kayıplarına sebep olabilmektedir. Etkili toprak koruma önlemleri alınmadığı sürece, düzenli olarak aşınan alanlardaki parmaklar, ilerleyen dönemler içerisinde oyuntulara evrilerek tarım arazilerinin verimsizleşmesi ve üretimin yapılamaz hale gelmesine yol açabilmektedir.

Su Erozyonu Tahmin Projesi (WEPP) Modeli yaygın olarak kullanılan fiziksel süreç tabanlı erozyon modeline bir örnektir. WEPP modeli, farklılaşan erozyon süreçlerini yansıttığı için parmak erozyonu süreçleri hakkında ayrıntılı bilgi sunmaktadır. Toprak kaybını tahmin etmek ve toprağın korunması için havza yönetimi uygulamalarını seçmek için bir sistem toplama yöntemini modelleme yaklaşımı olarak geliştirilmiştir (Foster ve Lane, 1987; Lane ve Nearing, 1989; Nearing ve ark. 1989; Flanagan ve Nearing, 1995; Flanagan ve ark. 2007). Toprak kayıplarını farklılaşan süreçlere bağlı olarak tahmin etmesi, diğer erozyon modellerine kıyasla daha başarılı tahminler yapabilmesine olanak sağlamaktadır (Saygın ve ark. 2018). Süreç tabanlı sürekli simülasyon modeli olan WEPP erozyon modeli denge hali süreklilik denklemi (Eşitlik 1) toprak kayıplarını hem tek bir eğim dikliği boyunca hem de havza ölçeğinde, net ayrılma ve depolanmayı değerlendirerek hesaplamaktadır.

$$dG/dx = D_r + D_i \quad [1]$$

Burada,

G: sediment yükü ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), x: eğim mesafesi (m), D_r : parmak parçalanması ya da depolanması ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), D_i : parmaklardan yüzey erozyonuna olan iletim oranı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)'dir.

Modelde, parmak erozyonundaki net toprak kaybı (parmak erozyon oranı) toprağın kritik akış kesme gerilimini geçtiği durumlarda oluşan hidrolik gerilimin bulunduğu ve sediment yükünün sediment taşıma kapasitesinden daha az olduğu durumlarda hesaplanır. Türkiye’de süreç tabanlı WEPP modeli kullanılarak yapılan çalışmalar USLE/RUSLE (Universal Soil Loss Equation/Revised Universal Soil Loss Equation) gibi deneysel modellere kıyasla daha detaylı veri seti gereksinimi sebebiyle oldukça sınırlıdır (Yüksel ve ark., 2016; Reis ve ark., 2017; Demir ve Oğuz, 2019). Bunun yanı sıra, WEPP modeli kil içeriğinin nispeten düşük olduğu siltçe zengin topraklar üzerinde yürütülen çalışmalar neticesinde elde edilen veri setleri dahilinde geliştirildiği için modelin performansı ile ilgili kapsamlı araştırmalara gereksinim duyulmaktadır (Guo vd, 2023; Wang vd, 2023).

Bu sebeple, çalışma kapsamında yarı kurak Orta Anadolu şartlarında gelişen kil içeriği yüksek topraklarda parmak erozyon duyarlılıklarının süreç tabanlı WEPP modeli ile belirlenmesi ve model performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, WEPP modelinde, içsel toprak özelliklerinden yararlanılarak üretilen deneysel eşitlikler ile tahmin edilen duyarlılık ve kritik akış kesme gerilimi değerleri ile laboratuvar ortamında mini-flume ölçümlerinden elde edilen değerler NSE yaklaşımı ile karşılaştırılarak farklı topraklar için model performansı değerlendirilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Çalışma alanı ve toprak örnekleme

Çalışma kapsamında, Ankara ili Ayaş, Beypazarı ve Polatlı ilçelerinden 2018 yılında ağustos ayı içerisinde, nadasa bırakılmış 5 farklı tarım arazisinden üçer tekerrürlü olarak alınan 15 adet toprak örneği kullanılmıştır. Laboratuvara getirilen örnekler ortalama 20°C’de 7 gün boyunca havada kurutulmuştur. Bitkisel kalıntılar ve büyük kayaç parçalarını uzaklaştırmak ve agregat boyut dağılımını homojenleştirmek için 8 mm’lik elekten geçirilen örnekler ezilerek çapı > 2 mm olan kaya parçaları ayrılmış ve < 2 mm’lik elekten geçirilen toprak örnekleri laboratuvar analizleri için hazır hale getirilmiştir. Örneklere ait temel toprak özellikleri Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Toprak Erozyonu Araştırma Laboratuvarında yapılan analizler neticesinde belirlenmiştir. Bu kapsamda, bünye (Bouyoucos, 1962), pH (Richards, 1954), EC (Richards, 1954), kireç (Çağlar, 1958), organik madde (Nelson ve Sommers, 1982), hidrolik iletkenlik (Klute ve Dirksen, 1986) ve suya dayanıklı agregat yüzdesi (Kemper ve Rosenau, 1986) ölçülmüştür. Çalışma alanı topraklarının genel durumunu ortaya koymak için değerlendirilen her bir temel toprak özelliğine ait tanımlayıcı istatistikler IBM SPSS Statistics 23 programı kullanılarak belirlenmiştir.

WEPP model değişkenlerinin elde edilmesi

WEPP model değişkenlerinin elde edilmesinde, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Erozyonu Araştırma Laboratuvarında bulunan “Parmak Erozyonu Ölçüm Düzenegi”nden yararlanılmıştır. Shainberg ve ark. (1996) tarafından bildirilen esaslara uygun olarak tasarlanan düzenek yardımıyla toprakların, parmak duyarlılıkları (K_r) ve parmak oluşum süreçlerini başlatan kritik akış kesme gerilimleri (τ_{cr}) aşağıda belirtildiği şekilde elde edilmiştir (Saygın ve ark. 2021).

V şekilli küçük-oluk (mini-flume) deney düzenegi ile K_r ve τ_{cr} değişkenlerinin elde edilmesi

Parmaklardaki net toprak parçalanması, akışın hidrolik kesme gerilimi toprağın kritik akış kesme gerilimini aştığı koşullar için eşitlik 2’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır (Flanagan ve Nearing, 1995).

$$D_c = K_r(\tau - \tau_{cr}) \quad [2]$$

Burada D_c , akışın parçalama oranı ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_r parmak duyarlılığı (s m^{-1}); τ akış kesme gerilimi (Pa); ve τ_{cr} kritik akış kesme gerilimi (Pa) (Foster ve ark. 1995). Akış kesme gerilimi, kanalın hidrolik yarıçapı (m) ve kanal eğiminden yararlanılarak manning eşitliği yardımı ile eşitlik 3’te gösterildiği şekilde elde edilmiştir (Shainberg ve ark., 1994).

$$\tau = \gamma R_h S \quad [3]$$

Burada, γ suyun ağırlığı (N.m^{-3}); R_h akışın hidrolik yarıçapı (m); ve S parmak kanalının eğim derecesidir (m.m^{-1}).

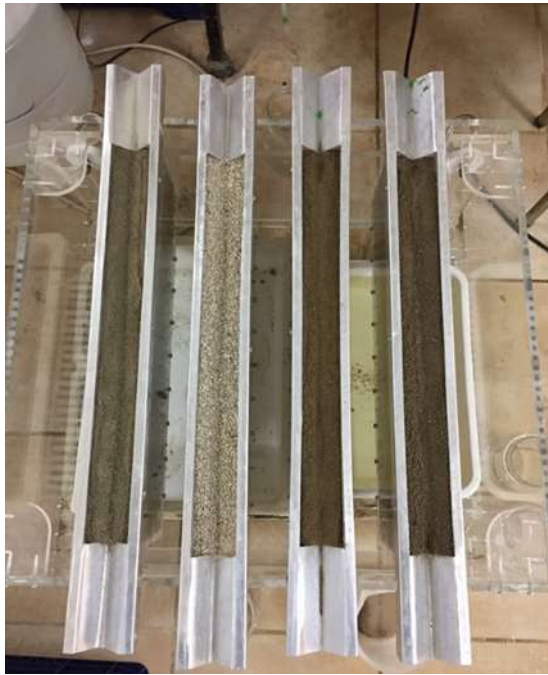
%3 eğim koşullarında, 5 farklı toprakta WEPP model yaklaşımına uygun olarak parmak erozyon duyarlılıkları ve kritik kesme gerilimleri incelenmiştir. Her bir toprak için üçer tekerrürlü olarak

gerçekleştirilen her bir mini-flume deneyinde 12 farklı yüzey akış konsantrasyonu (0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 ve 0.65 L dk⁻¹) altında taşınan sediment konsantrasyonları ölçülmüştür. Yüzey akış konsantrasyonlarındaki artış sırasında süreklilik esas olup belirtilen akış konsantrasyonlarına kademeli olarak ulaşılmış olup deney herhangi bir şekilde son konsantrasyon değerine ulaşmaya kadar kesintiye uğratılmamıştır. Ölçülen her bir parçalanma oranına karşılık gelen akış kesme gerilmeleri arasındaki doğrusal ilişkiden kritik akış kesme gerilimi elde edilmektedir. Kurulan ilişkinin eşitliğinde eğrinin eğimi parmak duyarlılığını, eğrinin akış gerilimi ile kesiştiği nokta ise kritik akış kesme gerilimini vermektedir.

Sırasıyla, Şekil 1 ve 2'de toprakların parmak erozyon duyarlılığının belirlenmesinde kullanılan v-şekilli oluk seti (mini-flume) ve ölçümlerden görünüm sunulmaktadır.



Şekil 1. Parmak erozyonu ölçüm çalışmasından görünüm (mini-flume düzenenği)



Şekil 2. Yüzey akışları sonrası kanalda gözlemlenen değişimler

WEPP modeli parmak erozyon duyarlılık etmeni

WEPP modelinde içsel toprak özelliklerinden yararlanılarak parmak erozyon duyarlılıklarının (K_r) ve kritik akış kesme gerilimi (τ_{cr}) değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılan deneysel eşitlikler kum kapsamlarına göre iki grup halinde değerlendirilmekte olup, eşitlik 4'ten eşitlik 7'ye kadar verilmektedir (Nearing ve ark. 1989). Çalışmada, 1 numaralı örneğin kum içeriği %30'dan fazla olduğu için eşitlik 4 ve eşitlik 5 kullanılmış olup diğer topraklar için eşitlik 6 ve eşitlik 7 yardımı ile K_r ve τ_{cr} değişkenleri tahmin edilmiştir.

%30 ve daha fazla kum içeren topraklar için;

$$K_r = .00197 + .00030VFS + .03863e^{-1.84OM} \quad [4]$$

Burada, K_r : Parmak duyarlılığı ($s \cdot m^{-1}$), VFS: üst toprakta çok ince kum yüzdesi OM: Organik madde kapsamı (%) dir. Bu topraklar için τ_{cr} değeri eşitlik 5 ile hesaplanmaktadır.

$$\tau_{cr} = 2,67 + 0,065C - 0,058 * VFS \quad [5]$$

Burada, τ_{cr} : Kritik akış kesme gerilimi (Pa), VFS, yüzey toprağının çok ince kum yüzdesi, C, yüzey toprağının kil kapsamıdır.

%30'dan daha az kum içeren topraklar için;

$$K_r = .0069 + .134e^{-.20C} \quad [6]$$

Burada, K_r : Parmak duyarlılığı ($s \cdot m^{-1}$), C: üst toprakta kil yüzdesi (%) olup, bu topraklar için τ_{cr} değeri 3,5 Pa olarak alınmıştır.

Model performansının değerlendirilmesi

Deneyel olarak belirlenen parmak duyarlılığı (K_r) ve kritik akış kesme gerilimi (τ_{cr}) değerleri ile WEPP modelinde içsel toprak özelliklerinden yararlanılarak tahmin edilen K_r ve τ_{cr} değerleri arasındaki ilişki Nash-Sutcliffe model etkinliği (NSE) yaklaşımı ile değerlendirilmiştir (Nash ve Sutcliffe, 1970). Bu yaklaşım çeşitli modeller ile elde edilen özelliklere ait değerler ile ölçüm yoluyla elde edilenler arasındaki ilişkiyi değerlendirmektedir. Birçok hidrolojik tahminin doğruluğunu ölçmek için kullanılan, ölçüm verisi varyansına kıyasla kalıcı varyansın göreceli büyüklüğünü belirleyen normalleştirilmiş bir istatistik yöntemi olan bu yaklaşım aynı zamanda sediment taşınımı, izotop davranışı, toprak davranışlarının modellenmesi ve jeofiziksel modellemelerde de başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Moriyası ve ark., 2007; Campforts ve ark., 2016). Değerlendirilen özelliklere ait NSE değerleri, eşitlik 8'de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Y_0 - Y_t)^2}{\sum(Y_0 - Y_{ort})^2} \quad [8]$$

Burada, Y_0 ölçülen değer, Y_t model ile tahmin edilen değer, Y_{ort} ölçülen ortalama.

NSE değeri $-\infty$ 'dan 1'e kadar değişebilmektedir. Burada, NSE = 1 olması veya 1'e yaklaşması, modelin değerlendirilen koşullar için oldukça uygun olduğunu kanıtlar. 0 ile 1 arasındaki değerler genelde model performansının kabul edilebilir olduğu anlamına gelmektedir. Değerin 0'dan küçük olması, ortalama ölçüm değerinin tahmin edilen veriden daha iyi tahmin edici olduğunu ve model performansının yetersiz olduğunu göstermektedir. NSE'nin yöntem performans ölçümündeki etkinliğinin en önemli sebebi, ölçülen ve tahmin edilen verilerdeki örtüşmeyi en iyi temsil eden fonksiyon olmasıdır (Sevat ve Dezetter, 1991; Yılmaz, 2014).

Bulgular ve Tartışma

Toprak karakteristikleri

Ankara İli Beypazarı ve Polatlı İlçelerinde kuru tarım yapılan farklı arazi koşulları incelenmiş olup, kolloidal yapısının güçlü olduğu ön-çalışma neticesinde tespit edilen 5 farklı araziden üçer tekerrürlü olacak şekilde toprak örnekleri alınarak, temel fiziko-kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir (Çizelge 1). Analiz edilen özellikler açısından değerlendirilen toprakların geneline ait tanımlayıcı istatistikler Çizelge 2'de görülmektedir. Ayaş ilçesinden alınan 1 numaralı örnekleme noktasındaki topraklar kil tın bünyeli, hafif alkalın karakterli, tuzsuz, orta düzeyde organik madde içeriğine sahip olup orta kireçli bir yapı sergilemektedir. Polatlı ilçesinden alınan 2 numaralı örnekleme noktasındaki topraklar kil bünyeli, hafif alkalın karakterli, tuzsuz, iyi düzeyde organik madde içeriğine sahip olup fazla kireçli bir yapıya sahiptir. Polatlı ilçesinden alınan 3 numaralı örnekleme noktasındaki topraklar siltli killi tın bünyeli, hafif alkalın karakterli, tuzsuz, iyi düzeyde organik madde içeriğine sahip olup fazla kireçli bir yapıya sahiptir. Polatlı ilçesinden alınan 4 numaralı örnekleme noktasındaki topraklar kil bünyeli, hafif alkalın karakterli, tuzsuz, iyi düzeyde organik madde içeriğine sahip olup çok fazla kireçli bir yapı sergilemektedir. Beypazarı ilçesinden alınan 5 numaralı örnekleme noktasındaki topraklar ise kil bünyeli, hafif alkalın karakterli, tuzsuz, iyi

düzye organik madde içeriğine sahip olup fazla kireçli bir yapıya sahiptir (Soil Survey Staff, 2014). Örneklerde yapılan analizler sonucu bulunan Suya Dayanıklı Agregat (SDA) değerlerinin %39,12 ile %80,95 arasında olduğu belirlenmiştir. Ortalama olarak SDA değeri ise %60,48 olarak bulunmuştur (Çizelge 2). SDA değerlerinin yüksek olması erozyona karşı duyarlılığı azaltmaktadır. Toprakların organik madde içeriklerinin yüksek olmasının SDA değerlerini olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir (Chenu ve ark., 2000). Ayrıca kil miktarının yüksek olduğu topraklarda SDA değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Genellikle kil içeriğinin artması ile SDA da bir artış gözlenmektedir (Yılmaz ve ark. 2005). Araştırma topraklarının hidrolik iletkenlik (Hİ) değerleri ise 1,45-6,55 cm saat⁻¹ arasında değişim göstermiştir (Çizelge 1). Topraklar yüksek kil içeriklerine bağlı olarak yavaş ile orta düzeyde Hİ değerlerine sahiptir (Benson ve Trast, 1995).

Çizelge 1. Çalışılan topraklara ait temel toprak karakteristikleri

Toprak	pH ¹	EC (dS m ⁻¹) ²	Kireç (%)	OM (%) ³	Kil (%)	Silt (%)	Kum (%)	TS ⁴	SDA(%) ⁵	Hİ (cm saat ⁻¹) ⁶
1	7,63	0,47	7,9	2,54	36	25	39	CL	52,44	5,33
2	7,91	1,18	23,5	3,35	56	25	19	C	73,77	5,47
3	8,09	1,19	17,7	3,11	37	43	20	SiCL	39,12	1,45
4	8,00	0,68	26,7	3,04	56	29	15	C	80,95	4,81
5	7,97	0,32	23,8	3,16	43	36	21	C	56,12	6,55

¹, Toprak reaksiyonu; ², Elektriksel iletkenlik (dS m⁻¹); ³, Organik madde içeriği (%); ⁴, Tekstür (bünye) sınıfı (Toprak no (1): Killi tın (CL), (2): Kil (C), (3): Siltli killi tın (SiCL), (4): Kil (C), (5): Kil (C)); ⁵, Suya dayanıklı agregat yüzdesi (%); ⁶, Hidrolik iletkenlik (cm saat⁻¹).

Çizelge 2. Örnek ortalamalarına göre toprak özelliklerine ait tanımlayıcı istatistikler

Özellik	Ortalama	Standart sapma	CV	Minimum	Maksimum
pH	7,92	0,17	2,15	7,63	8,09
EC (dS m ⁻¹)	0,77	0,40	51,95	0,32	1,19
Kireç (%)	19,92	7,47	37,5	7,90	26,70
OM (%)	3,04	0,30	9,87	2,54	3,35
Kil (%)	45,60	9,86	21,62	36	56
Silt (%)	31,60	7,80	24,68	25	43
Kum (%)	22,80	9,34	40,96	15	39
SDA (%)	60,48	16,85	27,86	39,12	80,95
Hİ (cm saat ⁻¹)	4,72	1,94	41,10	1,45	6,55

Tanımlayıcı bir istatistik özellik olarak, topraklarda ölçülen her bir özellik için elde edilen varyasyon katsayısı (CV), standart sapmanın ortalamaya göre gösterdiği değişimin yüzde olarak ifadesi veya bir başka ifade ile olasılık dağılımı için normalize edilmiş istatistiksel yayılma ölçüsünü vermektedir (Gülser ve ark., 2021). Değerlendirilen özellikler açısından toprakların heterojenlik seviyeleri başta bünyesel özellikler olmak üzere ölçülen temel toprak özellikleri açısından Ogunkunle (1993) tarafından bildirilen değişim sınıflarına göre değerlendirilmiştir. Buna göre, 0 ile 15 arasında değişen CV değerine sahip özellikler en az değişime sahipken, 15 ile 35 arası orta derecede değişebilir, 35 ve daha yüksek değerler ise değerlendirilen özellik açısından örneklemin oldukça değişken olduğu işaret etmektedir. Elde edilen bulgulara göre değerlendirilen toprak özelliklerinden pH ve organik madde açısından topraklar en az değişimi gösterirken; kil, silt ve suya dayanıklı agregat yüzdeleri açısından orta derecede değişkenlik göstermektedir. Kum, kireç ve elektriksel iletkenlik değerlendirilen örnekler açısından oldukça yüksek değişime sahiptirler (Çizelge 2). Örnek ortalamalarının göz önünde bulundurulduğu Çizelge 2'ye göre, denemelerde kullanılan toprakların genel itibarıyla Orta Anadolu koşullarıyla uyumlu olarak kilce zengin, hafif alkalin karakterli, genel olarak tuzsuz, fazla kireçli ve iyi düzeyde organik madde kapsamına sahip olduğu görülmektedir.

Parmak erozyon değişimlerin değerlendirilmesi

WEPP modelinde uygun olarak, toprakların parmak erozyon duyarlılığı ve kritik akış kesme gerilimleri "Parmak Erozyonu Ölçüm Düzenegi" yardımıyla 2 ve 3 no'lu eşitlikler ile deney düzeneklerinden elde edilen değişkenler yardımıyla elde edilmiştir. Başlangıç nem koşulu hava kuru olan örneklerden elde edilen K,

($s\ m^{-1}$) ve τ_{cr} (Pa) değerleri için tanımlayıcı istatistik değerleri sırasıyla Çizelge 3 ve 4'te verilmiştir. En yüksek Kr değeri değerlendirilen örnekler içerisinde kum içeriğinin en yüksek olduğu (%39) killi tın bünyeye sahip 1 numaralı toprak için elde edilirken, en düşük Kr değeri beklenildiği üzere en düşük kum içeriğine ve en yüksek kil içeriğine sahip 4 numaralı toprak için elde edilmiştir (Çizelge 3). Kritik akış kesme gerilimleri açısından en düşük τ_{cr} değerleri kil kapsamının en yüksek olduğu (%56) 2 (C) ve 4 (C) numaralı toprak koşulları için ölçülmüştür. En yüksek τ_{cr} yine kil bünyeye sahip olan 5 numaralı (C) toprakta ölçülmüştür (Çizelge 4).

Çizelge 3. Mini-flume ile ölçülen K_r ($s\ m^{-1}$) değerleri

Toprak	Ortalama	Standart sapma	CV	Minimum	Maksimum
1	0,0330a	0,0064	19,39	0,0258	0,0378
2	0,0202b	0,0015	7,43	0,0186	0,0214
3	0,0045d	0,0023	51,11	0,0025	0,0071
4	0,0040d	0,0006	15,00	0,0034	0,0045
5	0,0144c	0,0008	5,55	0,0136	0,0153

Farklı küçük harflerle gösterilen değerler LSD testine göre %5 düzeyinde önemlidir ($p<0,05$)

Çizelge 4. Mini-flume ile ölçülen τ_{cr} (Pa) değerleri

Toprak	Ortalama	Standart sapma	CV	Minimum	Maksimum
1	0,3625ab	0,0250	6,89	0,3341	0,3806
2	0,3493b	0,0093	2,66	0,3434	0,3599
3	0,3703ab	0,0067	1,81	0,3637	0,3770
4	0,3499b	0,0300	8,57	0,3199	0,3798
5	0,3971a	0,0208	5,24	0,3752	0,4168

Farklı küçük harflerle gösterilen değerler, LSD testine göre %5 düzeyinde önemlidir ($p<0,05$).

Kr değişkeni için yapılan levene istatistiği sonucunda; $p<0,05$ olduğu için parametrik olmayan Kruskal-Wallis testi gerçekleştirilmiş olup, 5 farklı tarım arazisinden alınan toprak örneklerinde Mini-flume ile ölçülen Kr değerleri için en az iki grup arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu sonucuna varılmıştır ($p<0,05$) (Çizelge 5). Çoklu karşılaştırmada gruplar arasındaki fark LSD (Least Significant Difference) testi ile değerlendirilmiştir. 3 numara (SiCL) ile 4 numaralı (C) toprak grupları arasındaki fark dışındaki diğer toprak grupları için ölçülen Kr değerleri birbirinden istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılaşmıştır ($p<0,05$) (Çizelge 3).

Çizelge 5. Mini-flume ile ölçülen K_r ($s\ m^{-1}$) değerleri için Kruskal-Wallis-H testi analiz sonuçları

Test İstatistiği ^{a,b}	Kr	Sıralar		
		Toprak grup	N	Sıra ortalamaları
Ki-kare	12.833	1.00	3	14.00
Serbestlik derecesi	4	2.00	3	11.00
Önem düzeyi	0.012	3.00	3	3.33
a. Kruskal Wallis Test		4.00	3	3.67
b. Grup değişkeni: Toprak grup		5.00	3	8.00
		Toplam	15	

τ_{cr} değişkeni için yapılan levene istatistiği sonucunda; $p>0,05$ olduğu için parametrik tek yönlü varyans (Anova) analizi gerçekleştirilmiş olup, elde edilen bulgulara göre 5 farklı tarım arazisinden alınan toprak örneklerinde mini-flume ile ölçülen τ_{cr} değerleri için en az iki grup arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu sonucuna varılmıştır ($p<0,05$) (Çizelge 6). Gruplar arasındaki fark LSD (Least Significant Difference) testi ile değerlendirilmiş olup, 2 numaralı (C) toprak ile 5 numaralı (C) toprak arasında ve 4 numaralı (C) toprak ile 5 numaralı (C) toprak arasında istatistik olarak önemli farklar bulunmuştur ($p<0,05$). Diğer toprak grupları arasındaki farklar önemsiz olarak değerlendirilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 6. 5 Mini-flume ile ölçülen τ_{cr} (Pa) değerleri arasındaki tek yönlü varyans (Anova) analiz sonuçları

ANOVA	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F	Önem düzeyi
Gruplar arası	0.005	4	0.001	2.762	0.088
Gruplar içi	0.004	10	0.000		
Toplam	0.009	14			

Yapılan analizler sonucunda ölçülen K_r değerleri ve WEPP modeli K_r & τ_{cr} tahmin değerleri ile içsel toprak özellikleri arasında istatistik olarak önemli ilişkiler elde edilmiştir. Ölçülen τ_{cr} değerleri ile içsel toprak özellikleri arasında anlamlı ilişkiler bulunamamıştır. K_r ile kum içeriği arasında pozitif yönde güçlü düzeyde anlamlı bir ilişki bulunmuştur yani K_r arttığında kum içeriği de anlamlı olarak ve güçlü bir ilişki ile artmaktadır. K_r ile pH arasında negatif yönde güçlü düzeyde anlamlı bir ilişki bulunmuştur yani K_r arttığında pH anlamlı olarak ve güçlü bir ilişki ile azalmaktadır. Tahmin edilen K_r değerleri ile kum içeriği arasında negatif yönde güçlü düzeyde anlamlı bir ilişki; pH, Kireç ve OM arasında pozitif yönde güçlü düzeyde anlamlı bir ilişki bulunmuştur. Tahmin edilen τ_{cr} ile kum içeriği arasında pozitif yönde, güçlü düzeyde anlamlı bir ilişki; pH, Kireç ve OM arasında negatif yönde güçlü düzeyde anlamlı bir ilişki bulunmuştur (Çizelge 7). Genellikle toprakların erozyon eğilimi ile topraktaki kaba fraksiyonlar arasında pozitif yönlü bir korelasyon beklenmektedir. Bir diğer ifade ile; toprakta kum ve silt fraksiyonunun yüksek olması ile erozyon eğilimi yani erozyona duyarlılık artmaktadır. Ancak bu durum erozyon mekanizmalarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bununla birlikte hem su hem de rüzgâr erozyon süreçlerinde, aşınmayı azaltıcı ve önleyici rolü olan kil ve organik madde içerikleri ile duyarlılık arasında negatif yönlü bir ilişki mevcuttur (Sönmez, 1994).

Çizelge 7. K_r & K_r _Tahmin & τ_{cr} _Tahmin değerleri ile içsel toprak özellikleri¹ arasındaki önemli korelasyonlar²

Değişken	Özellik & (Korelasyon Katsayısı) ^p -değeri
K_r	Kum (0.861)*, pH (-0.945)**
K_r _Tahmin	Kum (-0.951)**, pH (0.959)** Kireç(0.847)*, OM (0.905)**
τ_{cr} _Tahmin	Kum (0.970)**, pH (-0.928)** Kireç(-0.899)**, OM (-0.925)**

^[1] K_r , parmak duyarlılığı ($s\ m^{-1}$); τ_{cr} , kritik akış kesme gerilimi (Pa); pH, toprak asitliği; EC, elektriksel iletkenlik ($dS\ m^{-1}$); OM, organik madde; SDA, suya dayanıklı agregat; ^[2] * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$.

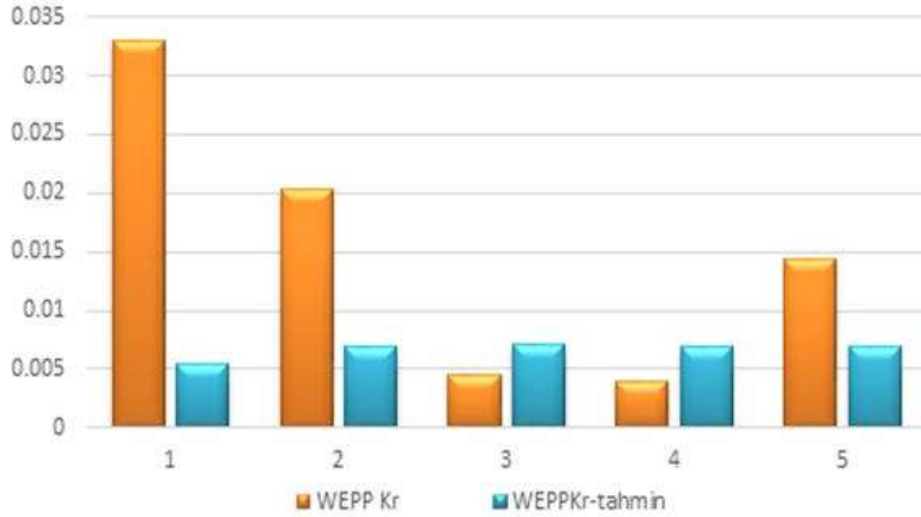
Çizelge 8. Nash-Sutcliffe model etkinliği (NSE) katsayıları

Toprak	K_r	τ_{cr}
1	-1,18	-1,36E+04
2	-0,10	-5,70E+04
3	0,97	-2,21E+04
4	0,95	-1,04E+03
5	0,44	-1,98E+04

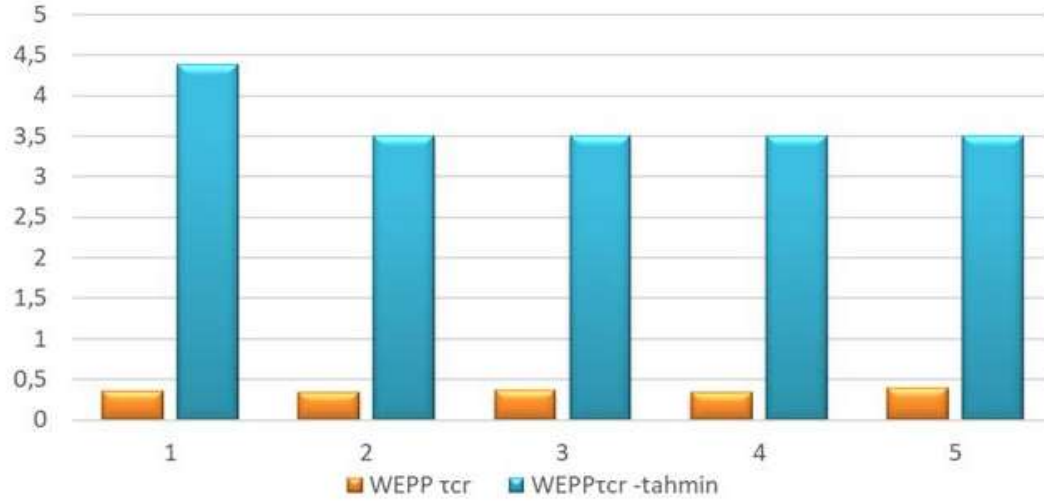
K_r : Parmak duyarlılığı ($s\ m^{-1}$), τ_{cr} : Kritik akış kesme gerilimi (Pa)

WEPP modeli doğrulanması

WEPP modeline göre; eşitlik 4, 5, 6 ve 7 yardımıyla topraklara ait içsel özelliklerinden yararlanılarak K_r ve τ_{cr} değerleri tahmin edilmiştir. Tahmin edilen bu değerler Şekil 3 ve 4'te görüleceği üzere V şekilli küçük oluk ölçüm düzeneği (mini-flume) olarak da ifade edilebilen "Parmak Erozyonu Ölçüm Düzeneği" yardımı ile hava kuru koşullar altında değerlendirilen K_r ve τ_{cr} değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. Ölçülen ve tahmin edilen WEPP-Kr değerleri

Şekil 4. Ölçülen ve tahmin edilen WEPP-τ_{cr} değerleri

Model performansı, düzenekte ölçülen K_r ve τ_{cr} değişkenleri ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişkinin Nash-Sutcliffe model etkinliği (NSE) yaklaşımı ile örnek bazlı olarak değerlendirilmiştir (Nash ve Sutcliffe, 1970) [Eş. (8)]. Bu bağlamda WEPP modeline ait eşitlikler ile tahmin edilen ve laboratuvar ortamında miniflume deneyleri ile ölçülen K_r ve τ_{cr} değişkenleri örneklenen topraklar için NSE yaklaşımına göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Çizelge 8).

Çizelge 8. Nash-Sutcliffe model etkinliği (NSE) katsayıları

Toprak	K_r	τ_{cr}
1	-1,18	-1,36E+04
2	-0,10	-5,70E+04
3	0,97	-2,21E+04
4	0,95	-1,04E+03
5	0,44	-1,98E+04

K_r : Parmak duyarlılığı ($s\ m^{-1}$), τ_{cr} : Kritik akış kesme gerilimi (Pa)

WEPP modelinde τ_{cr} değişkenlerin tahmini için verilen mevcut temel katsayılar gerçek değerlerin çok üzerinde tahminlerde bulunma eğilimindedir. Laboratuvar koşullarında elde edilen değerlerin temel model katsayıları ile tahmin edilen değerlerden toprakların geneli için oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, eşitliklerin geliştirildiği saha çalışmalarında çok daha büyük ve dayanıklı agregatların bulunması ve laboratuvar koşullarında deneylerin çok daha küçük düzeneklerde ve daha tekdüze agregat yapısı altında gerçekleştirilmesinin yarattığı etki ile açıklanabilmektedir (Saygın ve ark., 2018). Romero ve ark. (2007) benzer şekilde kritik akış kesme gerilimlerinin içsel toprak özelliği dışındaki akışı yönlendiren diğer faktörler tarafından da yönlendirilmesi sebebiyle tahminlerde isabet derecelerinin düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Geliştirilen eşitlikler daha ziyade %30'dan daha fazla kum içeriğine sahip topraklara ait özellikleri yansıtmakla birlikte (Flanagan ve Nearing, 1995), özellikle bazı topraklarda mini-flume düzeneği ile ölçülen K_r değerlerinin modelin temel veri setleri dahilinde geliştirilen WEPP modeline ait K_r tahminleri ile yüksek uyum göstermiştir. Değerlendirilen topraklar içerisinde silt içeriği %25'den fazla olan, 3 (SiCL), 4 (C) ve 5 (C) numaralı topraklar için model geçerli olup, en yüksek uyum (NSE: 0,97) siltli kil tın bünyeye sahip 3 numaralı toprak için elde edilmiştir.

Sonuç

Araştırma kapsamında WEPP modeli için içsel toprak özelliklerinden yararlanılarak tahmin edilen duyarlılık ve kritik akış kesme gerilimi değerleri ile laboratuvar ortamında mini-flume ölçümlerinden elde edilen değerlerden yararlanılarak model performansı NSE yaklaşımı ile değerlendirilmiştir.

Bulgular siltli killi tın ve kil bünyeye sahip olan topraklarda model performansının yüksek olduğunu göstermiştir. Kritik akış kesme gerilimleri açısından ölçülen ve tahmin edilen değerler karşılaştırıldığında, laboratuvar ortamında ölçülen τ_{cr} değerleri model tahminlerine göre oldukça düşük, model performansını ortaya koyan NSE değerleri de son derece düşüktür. Bu durum, modelin örneklem setinin değişen bünye koşulları açısından sınırlı olması ile açıklanabilmektedir.

WEPP modeli, toprak kaybı ve birikmesinin mekânsal ve zamansal dağılımlarını tahmin etme yeteneklerinden dolayı mevcut hidrolojik modellere göre birden fazla avantaj sağlamaktadır. Saha testi için pratik veya ekonomik olmayan çeşitli durumlarda durum değerlendirmesi için güvenilir bir yöntem olarak, akış ve sediment verimini simüle etmek için kullanılabilir. Böylelikle, zamana bağlı olarak farklılaşan su erozyonu süreçlerinin izlenmesi, düşünülen koruma önlemlerinin etkinliklerinin değerlendirilmesi ve uygun arazi kullanımlarının tespiti yönünde kapsamlı güvenilir çözümler üretebilir. Öyle ki, elde edilen sonuçlar, değerlendirilen 3 örnekte parmak duyarlılığı için 0,40'ın üzerinde NSE katsayısı ile WEPP'in tatmin edici bir performans sergilediğini göstermektedir.

İstatistiksel yaklaşımların daha anlamlı olması için eldeki verilerin sayısı oldukça önemlidir. Bundan sonraki yapılacak olan çalışmalarda örneklem setinin arttırılması ve özellikleri bakımından çeşitlendirilmesi ve ilgili sonuçların NSE ile birlikte diğer model performans yöntemleri kullanılarak karşılaştırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından (TÜBİTAK-3001), 1180111 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Benson CH, Trast JM, 1995. Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. *Clays and clay minerals*, 43, 669-681.
- Bouyoucos GJ, 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465.
- Campforts B, Vanacker V, Vanderborght J, Baken S, Smolders E, Govers G, 2016. Simulating the mobility of meteoric ¹⁰Be in the landscape through a coupled soil-hillslope model (Be2D), *Earth and Planetary Science Letters*. 439: 143-157.
- Chenu C, Le Bissonnais Y, Arrouays D, 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1479-1486.
- Crosson P, 1997. Will erosion threaten agricultural productivity?. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 39(8), 4-31.

- Çağlar KÖ, 1958. Toprak İlimi, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No:10, Ankara.
- Çamuroğlu A, 2020. Uzaktan Algılama Ve Coğrafi Bilgi Sistemleri İle Yağış Ve Rüzgar Kaynaklı Toprak Erozyonu Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Daily GC, Matson PA, Vitousek PM, 1997. Ecosystem services supplied by soil. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems, 113-132.
- Demir S, Oğuz I, 2019. Determination of surface flow and soil loss with WEPP hillslope model in Northern Turkey. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 14(2), 463-472.
- Deviren Saygın S, Huang CH, Flanagan DC, Erpul G, 2018. Process-based soil erodibility estimation for empirical water erosion models. Journal of Hydraulic Research, 56(2), 181-195.
- Erpul G, Şahin S, İnce K, Küçümen A, Akdağ MA, Demirtaş İ, Çetin E, 2018. Türkiye su erozyonu atlası. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Flanagan DC, Nearing MA, 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. Nserl Rep, 10, 1-123.
- Flanagan DC, Gilley JE, Franti TG, 2007. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. Transactions of the ASABE, 50(5), 1603-1612.
- Foster GR, Lane LJ, 1987. User requirements: USDA, water erosion prediction project (WEPP) Draft 6.3. NSERL report (USA).
- Foster GR, Flanagan DC, Nearing MA, Lane LJ, Risse LM, Finkner SC, 1995. Chapter 11.1-11.12: Hillslope erosion component. In Flanagan DC, Nearing MA, (Eds.), USDA water erosion prediction project hillslope and watershed model documentation (NSERL Report No. 10). West Lafayette, IN: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Guo T, Flanagan DC, Srivastava A, LaPlante NH, 2023. Simulation Approaches and Potential Improvements of Ephemeral Gully Erosion Prediction in the Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model. In Soil Erosion Research Under a Changing Climate, January 8-13, 2023, Aguadilla, Puerto Rico, USA (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Gülser C, Ekberli İ, Gülser F, 2021. Effects of deforestation on soil properties and organic carbon stock of a hillslope position land in Black Sea Region of Turkey. Eurasian Journal of Soil Science, 10(4), 278-284.
- Karagöz A, Doğan O, Erpul G, Dengiz O, Sönmez B, Tekeli İ, Deviren Saygın S, Madenoğlu S, 2015. Çölleşme, Kuraklık Ve Erozyonun Olası Etkilerinin Türkiye Ölçeğinde Değerlendirilmesi. Türkiye Ziraat Mühendisliği VIII. Teknik Kongresi, 118-139, 12-16 Ocak, Ankara.
- Kemper WD, Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and size distribution, In Methods of soil analysis Part 1 (2nd edn.), Klute A (ed.). ASA: Madison, WI; 425-442.
- Klute A, Dirksen C, 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods, 5, 687-734.
- Kumarasiri ADTN, Udayakumara EPN, Jayawardana JMCK, 2022. Impacts of soil erosion and forest quality on water quality in Samanalawewa watershed, Sri Lanka. Modeling Earth Systems and Environment, 8(1), 529-544.
- Lane LJ, Nearing MA, 1989. USDA-Water Erosion Prediction Project: hillslope profile model documentation (Vol. 2). National Soil Erosion Research Laboratory.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL, 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, Transactions of the ASABE. 50 (3), 885-900.
- Nash JE, Sutcliffe JV, 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles, J. of Hydrology, 10(3), 282-290.
- Nearing MA, Foster GR, Lane LJ, Finkner SC, 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. Transactions of the ASAE, 32(5), 1587-1593.
- Nelson DW, Sommers LE, 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods, 5, 961-1010.
- Ogunkunle AO, 1993. Variation of some soil properties along two toposequences on quartzite schist and banded gneiss in southwestern Nigeria, GeoJournal, 30(4), 397-402.
- Özdemir N, 2002. Toprak ve Su Koruma. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No: 22, Samsun
- Özdemir N, Öztürk E, Durmuş Ök, 2015. Erozyona duyarlılık ve toprak kaybı arasındaki ilişkiler. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 30(2), 182-188.

- Özsoy G, 2007. Uzaktan algılama (UA) ve coğrafi bilgi sistemi (CBS) teknikleri kullanılarak erozyon riskinin belirlenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Öztürk A, Özcan AU, Aytas İ, Tuttu G, Gülçin D, Mongil-Manso J, ... Velázquez J, 2023. Simulating with a combination of RUSLE GIS and sediment delivery ratio for soil restoration. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 719.
- Reis M, Altun Aladag I, Bolat N, Dutal H, 2017. Using GeoWEPP model to determine sediment yield and runoff in the Keklik watershed in Kahramanmaraş, Turkey. *Şumarski list*, 141(11-12), 563-569.
- Renard KG, Foster GR, Lane IJ, Laflen JM, 1996. Soil loss estimation. In *Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*; Agassi M, (ed.). Marcel Dekkar, New York, 169-202.
- Richards LA, (Ed.), 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (No. 60). US Government Printing Office.
- Romero CC, Stroosnijder L, Baigorria GA, 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena*, 70(2), 105-113.
- Saygın SD, Ozcan AU, Basaran M, Timur OB, Dolarslan M, Yılman FE, Erpul G, 2014. The combined RUSLE/SDR approach integrated with GIS and geostatistics to estimate annual sediment flux rates in the semi-arid catchment, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 71, 1605-1618.
- Saygın SD, Huang CH, Flanagan DC, Erpul G, 2018. Process-based soil erodibility estimation for empirical water erosion models. *Journal of Hydraulic Research*, 56(2), 181-195.
- Saygın SD, Arı F, Temiz Ç, Arslan Ş, Ünal MA, Erpul G, 2021. Analysis of soil cohesion by fluidized bed methodology using integrable differential pressure sensors for a wide range of soil textures. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, 106525.
- Sevat E, Dezetter A, 1991. Selection of Calibration Objective Functions in the Context of Rainfall-Runoff Modeling in a Sudanese Savannah Area, *Hydrological Sci. J.*, 36(4), 307-330.
- Shainberg I, Laflen J, Bradford J, Norton LD, 1994. Hydraulic flow and water-quality characteristics in rill erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 58:1007-1012.
- Shainberg I, Goldstein D, Levy GJ, 1996. Rill erosion dependence on soil water content, aging, and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 60(3), 916-922.
- Sönmez K, 1994. *Toprak Koruma*, Atatürk Üniversitesi Yayınları No: 169, Erzurum
- Staff SS, 2014. *Keys to soil taxonomy*. United States Department of Agriculture: Washington, DC, USA.
- Wang S, McGehee RP, Guo T, Flanagan DC, Engel BA, 2023. Calibration, validation, and evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for hillslopes with natural runoff plot data. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(4), 669-687.
- Yılmaz E, Alagöz ZV, Öktüren F, 2005. Toprakta agregat oluşumu ve stabilitesi. *S.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(36), 78-86.
- Yılmaz MU, 2014. Performans Ağırlıklı Yöntemlerle Aylık Akımların Tahmini: Orta Fırat Havzası Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yüksel EE, Özalp M, Yıldırım S, 2016. Using a geospatial interface (GeoWEPP) to predict soil loss, runoff and sediment yield of Kokolet Creek Watershed. *International Journal of Ecosystems & Ecology Sciences*, 6(3), 437-442.