



Evaluation of Future Sediment Yield and Sediment Retention Capacity with InVEST Model under Climate Change Scenarios in Yeşilirmak Basin

Orhan Mete Kılıç^{1,a,*}

¹Department of Geography, Faculty of Arts and Sciences, Tokat Gaziosmanpaşa University, 60010 Tokat, Türkiye

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Research Article</i></p> <p>Received : 03/06/2022 Accepted : 11/06/2022</p> <p>Keywords: Soil erosion Climate change InVEST Sediment yield Sediment retention</p>	<p>Climate change is expected to cause more severe environmental problems, including soil erosion. This study aims to examine the effects of climate change on the sediment yield and sediment retention capacity through soil erosion in the Yeşilirmak Basin with the InVEST sediment delivery ratio model. RCP4.5 and RCP8.5 scenarios of the GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model Version III) general circulation model were used to examine the effects of climate change on soil erosion. Decreases in the sediment yield and sediment retention rates of Yeşilirmak Basin were projected up to 9.48% and 12.47% in 2070, respectively. The main reason for the decrease in soil erosion rates is the decrease in rainfall erosivity resulting from the decrease in precipitation amounts, and the effect of this decrease is predicted to have a positive impact on wetland systems and agricultural lands. In addition, this research points to the advantages of the InVEST model approach in spatial and temporal estimation of the possible effects of future climate change on soil erosion.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(7): 1318-1328, 2022

Yeşilirmak Havzasında İklim Değişim Senaryoları Altında Gelecekteki Sediment Verimi ve Sediment Tutma Kapasitesinin InVEST Model ile Değerlendirilmesi

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Araştırma Makalesi</i></p> <p>Geliş : 03/06/2022 Kabul : 11/06/2022</p> <p>Anahtar Kelimeler: Toprak erozyonu İklim değişimi InVEST Sediment verimi Sediment tutunması</p>	<p>İklim değişikliğinin toprak erozyonu da dâhil olmak üzere daha şiddetli çevresel problemlere yol açması beklenmektedir. Bu çalışmada Yeşilirmak Havzasında da toprak erozyonu yoluyla meydana gelen sediment verimi ve sediment tutma kapasitesi üzerine iklim değişikliğinin etkilerinin InVEST sediment iletim modeli ile incelenmesine yöneliktir. Araştırmada İklim değişikliğinin toprak erozyonu üzerine etkilerinin incelenmesi için GFDL-CM3 (Jeofiziksel Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı İklim Modeli Sürüm III) genel dolaşım modelinin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kullanılmıştır. 2070' li yıllara kadar Yeşilirmak Havzasında referans döneme göre sediment veriminde ve sediment tutunma oranlarında sırasıyla %9,48 ve %12,47 düzeyine varan azalışlar öngörülmüştür. Toprak erozyonu oranlarındaki azalmanın temel sebebi yağış miktarlarındaki düşüşlerden kaynaklanan yağış erozovitesindeki azalmadan kaynaklanmaktadır ve bu azalmanın etkisi sulak alan sistemlerine ve tarım arazilerine olumlu şekilde yansımaları öngörülmüştür. Ayrıca, bu araştırma gelecekteki iklim değişikliğinin toprak erozyonuna olası etkilerinin mekânsal ve zamansal olarak tahmin edilmesinde InVEST model yaklaşımının avantajlarına işaret etmektedir.</p>

^a orhanmete.kilic@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6723-1984>



This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

Giriş

Havzalar insanların ekosistem hizmetlerinden faydalandığı önemli alanların başında gelmektedir. Faydalanılan bu hizmetler arasında gıda üretimi ve temiz içme suyuna ulaşım, besinlerin geri dönüşümü, tıbbi ve enerji kaynaklarının (hidroelektrik, biyokütle) tedariki, su ve hava kalitesinin düzenlenmesinin yanı sıra rekreasyon ve ekoturizm gibi önemli konu başlıkları bulunmaktadır (Bangash ve ark., 2013; Khan ve ark., 2019). Bahsi geçen hizmetlerinden dolayı havza ekosistemleri dünyanın en hayati doğal kaynaklarından ve bu nedenle ekolojik dengenin korunması ve ekosistem servislerinin sürdürülebilirliği için bu kaynakların dikkatli bir şekilde korunması gerekmektedir (Housseyn ve ark., 2021). Özellikle korunması gereken konuların başında toprak erozyonu problemi gelmektedir ki erozyon, ekosistem servislerinin tedarik ve düzenleme hizmetlerinde olumsuz etkilere yol açan küresel bir çevre sorunudur. (Aneseyee ve ark., 2019; Hassen ve Assen, 2018).

Toprak erozyonu toprağı oluşturan bireysel taneciklerin su, rüzgâr, buz veya yerçekimi ile ayrılması, taşınması ve birikmesi olarak açıklanmaktadır (Panagos ve ark., 2015). Bununla birlikte, antropojenik faaliyetler, rüzgâr veya su nedeniyle toprak erozyonu hızlandırılmış bir oranda meydana geldiğinde, doğal toprak fonksiyonlarının bozulması veya kaybolması muhtemeldir (Wu ve ark., 2020). Toprak erozyonu ve buna bağlı olarak meydana gelen sedimentasyon ile yalnızca topraktaki besin maddeleri kaybının artması ve arazi verimliliğinin azalması değil aynı zamanda su kaynaklarında su kalitesinin olumsuz etkilenmesi, göller ve rezervuarlarda su tutma kapasitesinin azalması ve hidroelektrik santralinden enerji tedarikinin azalması, flora ve fauna biyoçeşitliliğinin azalması ve ekosistemin rekreasyon değeri üzerinde istenmeyen olumsuz etkileri bulunmaktadır (Lexartza-Artza ve Wainwright, 2011; Haregeweyn ve ark., 2012; Issaka ve Ashraf, 2017; Uzuner ve Dengiz, 2020). Genel olarak, toprak erozyonu ve sediment verimi, ekosistem hizmetlerini ve işlevlerini azaltıcı etkilere sahip olan önemli arazi bozunum olaylarından birisi olarak değerlendirilmektedir.

Bir peyzaj içindeki toprak erozyonu oranı jeoloji, topografya, eğim, iklim, toprak tipi ve bitki örtüsü tarafından kontrol edilmektedir (Brooks ve ark., 2013). Ayrıca, kentleşme ve kalkınma, ormancılık uygulamaları, tarımsal faaliyetler (arazi hazırlama ve hasat), baraj inşaatı ve işletmesi gibi antropojenik faktörler, erozyon ve sedimentasyon transferini hızlandıran nedenlerdendir. Bunların dışında son yıllarda toprak bilimcileri, iklim değişiminin toprak erozyonu üzerinde gelecekteki olası değişiklikler üzerindeki etkileri konusunda endişelerini dile getirmektedirler (Li ve Fang, 2016). İklim değişikliğinin, yağış miktarı ve yoğunluğundaki değişiklikler yoluyla doğrudan ve toprak örtüsündeki değişiklikler ve toprak organik maddesinin ayrışma oranlarındaki değişiklikler yoluyla da dolaylı olarak toprak erozyonu üzerine kuşkusuz etki edeceği bildirilmektedir (Duulatov ve ark., 2019; Chapman ve ark., 2021). Ayrıca iklim değişikliğinin mahsul yönetimi uygulamaları üzerine tesir edeceği değişikliğin bile toprak erozyonu üzerinde dolaylı yoldan etki etmesi beklenmektedir (Rhodes, 2014). Bu nedenle iklim değişikliği, esas olarak yağış, bitki örtüsü ve mahsul yönetimi uygulamaları değişiklikleri yoluyla toprak

erozyonunu olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilir (Li ve Fang, 2016). Yang ve ark. (2003)'e göre küresel ortalama toprak erozyonunun iklim değişiklikleri nedeniyle 2090 yılına kadar yaklaşık %9 artacağı tahmin edilmektedir.

İklim değişikliğinin toprak erozyonunu ve bununla ilişkili olumsuz etkilerini artırma potansiyeli dikkate alındığında, gelecekteki erozyon oranlarının modellenmesi, gelecekteki koruma stratejisine tavsiyede bulunmaya yardımcı olacak bir temel oluşturulması için çok önemli bir adımdır (Mullan ve ark., 2012). Tahmin modelleri, toprak erozyonunun değerlendirilmesinde giderek daha önemli araçlar haline gelmiştir ve toprak erozyonunun gelecekteki iklim değişikliğine tepkisini değerlendirmenin tek uygulanabilir yolu olarak görülmektedir (De Hipt ve ark., 2018; Teng ve ark., 2018; Borrelli ve ark., 2020). Toprak erozyon oranı kavramsal, deneysel ve fiziksel temelli süreçleri kapsayan modeller kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Bu modellerin birçoğu sediment verimi, depolanma ve tutunma süreçlerini belirleme konusunda sınırlı kapasiteye sahiptir. Ekosistem Hizmetlerinin ve Takaslarının Entegre Değerlemesi (InVEST) modeli ise toprak erozyonunu, sediment verimini, depolanmasını ve tutunmasını modelleyebilen fiziksel temelli süreçlerden bir tanesidir. InVEST modelin içindeki sediment iletim oranı (SİO) modeli USLE veya RUSLE gibi deneysel yaklaşımlardaki sınırlamaların üstesinden gelmek için bir havzanın hidrolojik bağlanabilirliğinin karakterizasyonunu ortaya koyarak havzadaki toprak kaybını, sediment verimini ve tutunmasını mekânsal olarak ortaya koyma avantajına sahip olan bir modeldir (Sharp ve ark., 2018) ve havzadan çıkışa ulaşan tahmini sediment verimleri ile rezervuarlardaki siltasyon oranı karşılaştırılarak kalibrasyon fırsatı sunmaktadır (Bouguerra ve Jebari, 2017). Ayrıca InVEST model ile belirli bir peyzaj genelinde arazi örtüsündeki değişikliklerin ve iklim değişikliği etkilerinin neden olduğu ekosistem hizmetlerindeki aksaklıkları aydınlatmak mümkündür (Vigerstol ve Aukema, 2011). Bangash ve ark. (2013) Akdeniz nehri havzalarında iklim değişiminin toprak erozyonu üzerine etkisini InVEST SİO modeli ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Araştırmacılar iklim değişiminden dolayı gelecekte sediment tutunumunun havzanın üst kısmından alt kısımlara doğru azalacağını öngörmüşler ve modelin avantajlarından bahsetmişlerdir.

Türkiye'de toprak erozyonuna bağlı olarak kaybolan üst toprak miktarının yıllık olarak 642 milyon ton olduğu belirtilmektedir (Erpul ve ark., 2018). Bu miktar ülkemizin erozyona karşı oldukça hassas olduğunu göstermektedir. Bu hassasiyet Türkiye'nin iklimi, topografik yapısının yüksek ve arızalı olması yanında toprak yapısından dolayı ortaya çıkmaktadır (Berberoğlu ve ark., 2020). Ayrıca, ülkemizin iklim değişiminden oldukça etkilenecek olan Doğu Akdeniz havzasında yer alması sebebiyle sıcaklık ve yağış rejimlerindeki değişikliklerden etkilenecek olması toprak erozyonu ve sediment verimleri üzerinde de muhtemelen etkili olacaktır (Kilic ve Gunal, 2021). Bu bakımdan Türkiye'de gelecekte olası toprak erozyonunun mekânsal ve zamansal olarak izlenmesi arazi yönetimi kararları için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin önemli ekosistem hizmetlerine sahip ve stratejik alanlarından birisi olan Yeşilirmak Havzasının da

iklim değişikliğinin toprak erozyonu üzerine etkilerinin InVEST SİO modeli ile belirlenmesine yöneliktir. Bu bakımdan bu çalışmanın temel amaçları; 1) havzanın mevcut dönem sediment verimi ve sediment tutunma alanlarının mekânsal ve miktar olarak belirlenmesi, 2) 2050 ve 2070 yıllarında ki iklim değişiminden kaynaklı sediment verimine ve sediment tutunma kapasitesine olası etkisinin iklim senaryoları kullanılarak araştırılması, 3) alt havza düzeyinde sediment verimi ve sediment tutunma alanlarının mekânsal dağılımlarını göstermektir.

Materyal ve Yöntem

Çalışma Alanı

Yeşilirmak Havzası Türkiye'nin Orta Karadeniz, İç Anadolu ve kısmen de Doğu ve Kuzeydoğu Anadolu Bölgelerini kapsamına alan suları Yeşilirmak yoluyla Karadeniz'e dökülen parçasıdır. Coğrafi bakımdan 39° 30'-41°21' kuzey enlemleri ile 34° 40'- 39° 48' doğu boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 1). Toplam yüzölçümü 36888,24 km² olup, ülkemizin yüzölçümünün yaklaşık olarak %5 ini kapsamaktadır. Bu havza yüksek dağ ve dağ silsileleri ile derin vadiler ve vadi boylarınca yer alan çeşitli ovalardan meydana gelmiştir. Havza içindeki vadiler birbirlerinden sıradağlarla ayrılırlar ve vadilerin her birinde Yeşilirmak'ın önemli üç kolu yer almaktadır. Kuzeyden güneye doğru bu vadiler, Kelkit, Tozanlı ve Çekerek vadileridir. Havzadaki meteoroloji istasyonlarının yağış değerleri incelendiğinde en fazla yağış Karadeniz 'e bakan yamaçları ile yüksek platolara düşmektedir. Elde edilen değerlerden en yüksek yağış Ayvacık'ta ölçülmüş ve bu değer 936 mm, Çarşamba 928 mm ve Samsun 919 mm dir. En az yağışlar ise havzanın iç kesimlerindeki Gökhöyük Devlet Üretim Çiftliğinde 328 mm, Suluca'da 331mm ve Alaca da 366 mm olarak ölçülmüştür. Havzada minimum yıllık yağış ortalaması 300 mm dir. Havzanın jeolojik formasyonlarını genel itibarıyla altüvyonlar, üçüncü zaman tortulları, tuz ihtiva eden tortullar, filişler, üçüncü zaman öncesi tortullar ve metamorfik kütleler oluşturmaktadır.

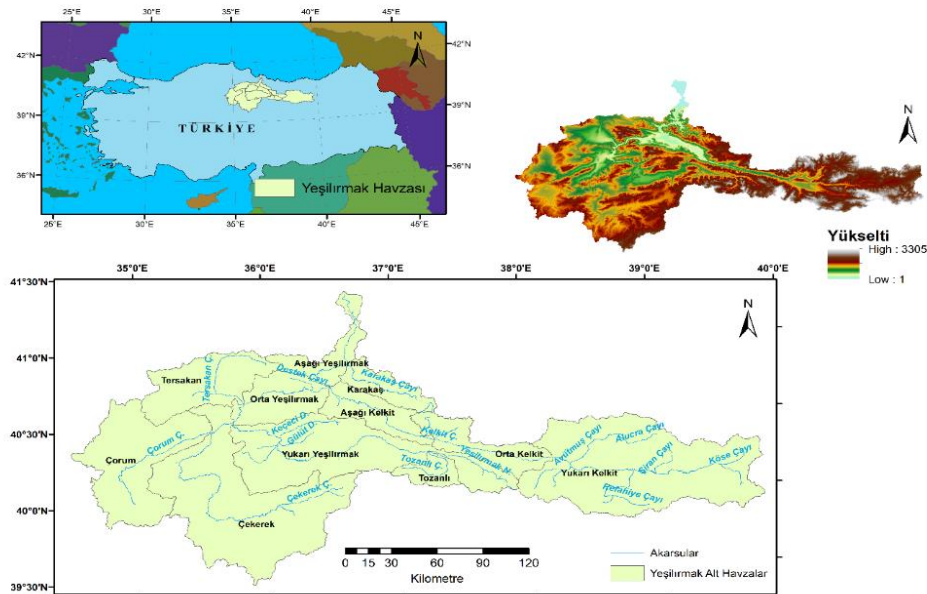
InVEST Sediment İletim Modeli

InVEST model ekosistemlerdeki değişikliklerin insanlara birçok fayda sağlayan ekosistem servislerinde değişikliklere nasıl yol açabileceğini keşfetmeye yardımcı olan bir yazılım paketidir. Bu yazılımın içindeki sediment iletim oranı (SİO) modelinin amacı, ağırlıklı olarak kırsal alanlardaki sediment verim ve tutunma hizmetlerinin ölçülmesi ve haritalandırılmasıdır (Sharp ve ark., 2018). Bu model, iklim, topografya, toprak ve arazi örtüsü verilerinin uzaysal haritalarını kullanarak sediment verim ve tutunmasını CBS tabanlı olarak haritalamaktadır.

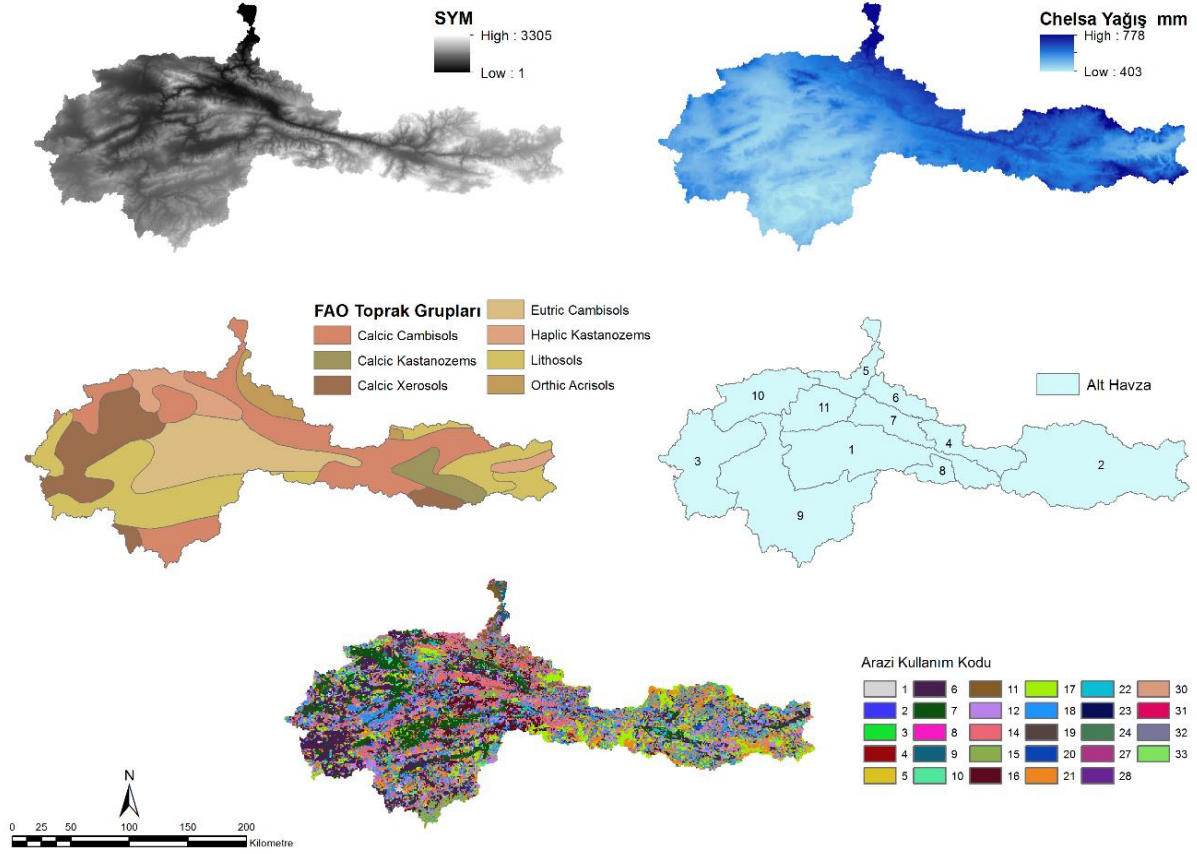
InVEST SİO modeli, Sayısal Yükselti Modeli (SYM) grid haritasının uzaysal çözünürlüğünde çalışmaktadır ve her pikselden hesaplanan yıllık toprak kaybı havza şartlarına göre hesaplanan SİO ile çarpılarak akıma ulaşacak toprak kaybını hesaplamaktadır. Model, yıllık toprak kaybının hesaplanmasında Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (USLE) kullanılmaktadır (Renard ve ark., 1997). (Eşitlik 1).

$$usle_i = (R \times K \times LS \times C \times P)_i \quad (1)$$

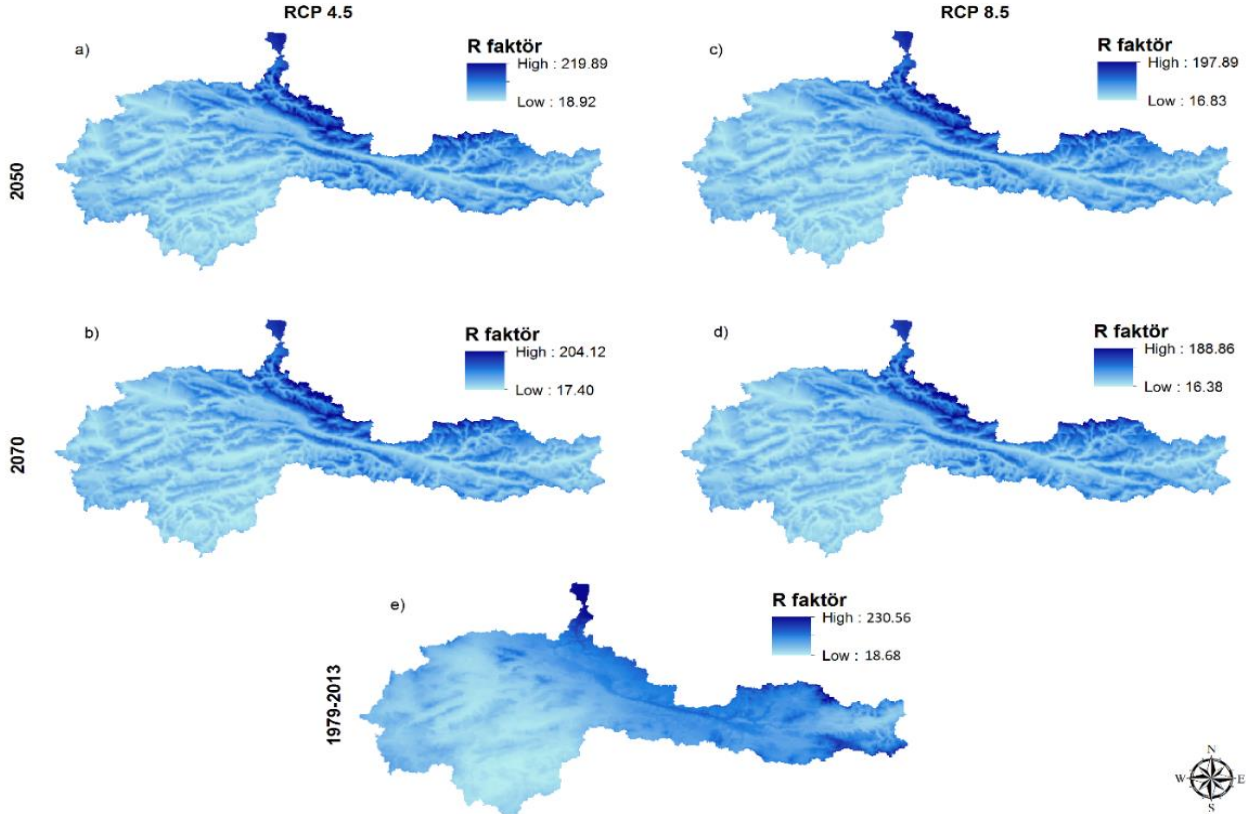
Eşitlikte R yağış erozivitte faktördür (Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹) ve yağmurla ilişkili olması muhtemel yüzey akışının miktarını ve oranını yansıtır (Renard ve ark., 1997). K toprak erodibilite faktördür (t ha hr Mj⁻¹ ha⁻¹ mm⁻¹) ve bu faktör toprakların erozyon sürecine karşı duyarlılığını ifade etmektedir. LS eğim uzunluğu ve eğim dikliği faktörü (birimsiz) topografyanın etkisini ifade eder, eğim uzunluğu ve eğim derecesinin toprak erozyonu üzerindeki etkilerini birleştirmektedir (Das ve ark., 2022). C arazi yönetim faktörü (birimsiz) toprak ve ürün yönetiminin toprak kaybı üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu faktör belirli koşullar altında ekilen araziden kaynaklanan toprak kaybının, işlenmiş, sürekli nadas koşulları altında kalan arazideki kayıplara oranıdır (Fan ve ark., 2021). P koruyucu destek faktörü (birimsiz) yapay erozyon kontrol uygulamalarının erozyon üzerindeki kısıtlayıcı etkisini yansıtmaktadır.



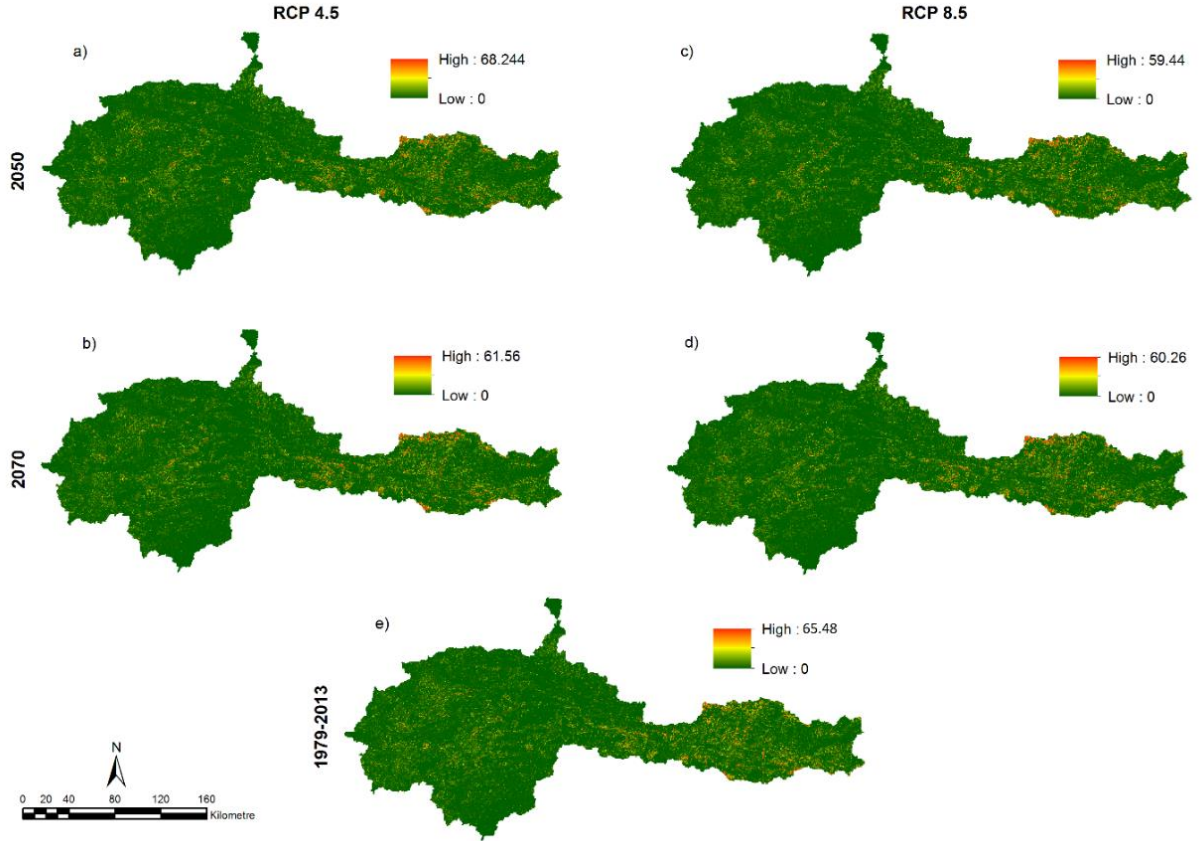
Şekil 1. Yeşilirmak Havzası Topografik Haritası.
Figure 1. Topographic Map of Yesilirmak Basin.



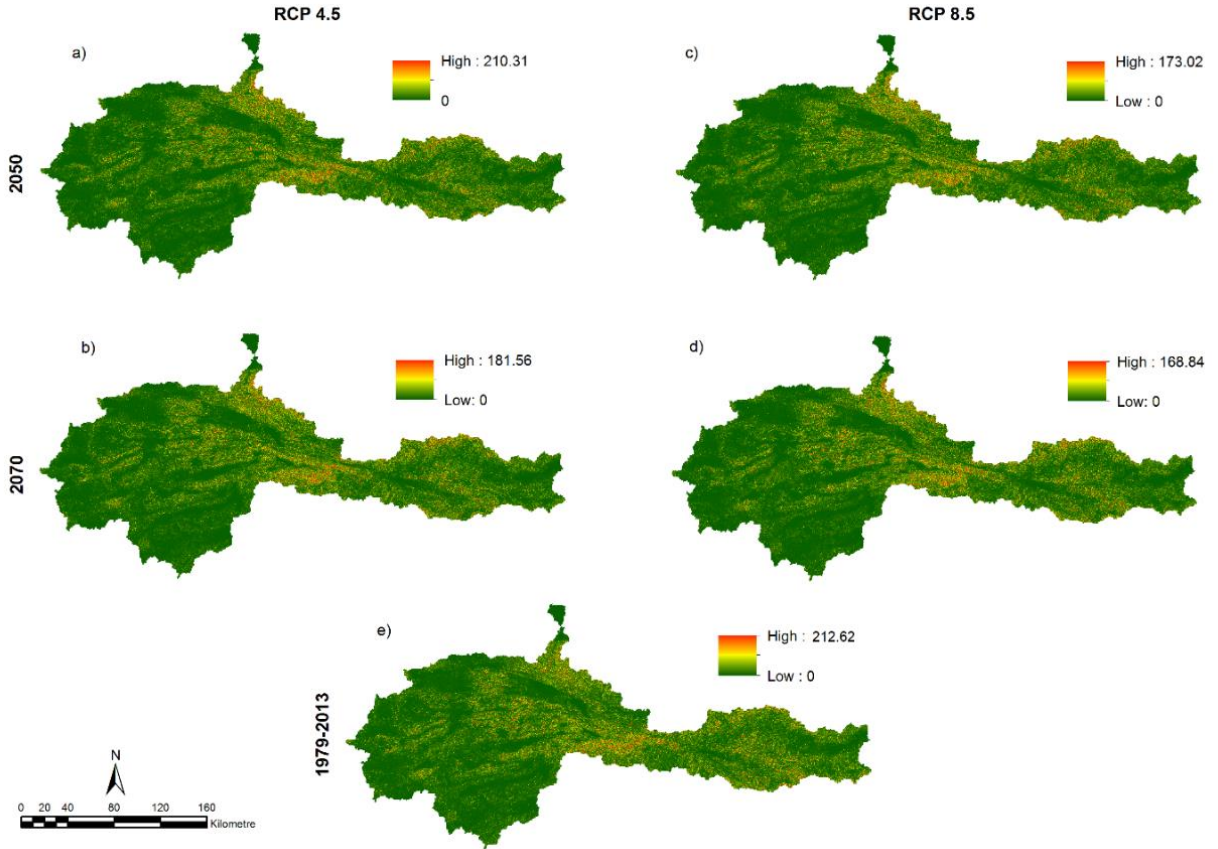
Şekil 2. InVEST SİO modeli için gerekli parametreler.
Figure 2. Required parameters for the InVEST SDR model.



Şekil 3. Yeşilirmak Havzasında GFDL-CM3 senaryolarına ve Referans döneme göre R faktör sayısal haritaları.
Figure 3. R factor grid maps according to GFDL-CM3 scenarios and Current period in Yeşilirmak Basin.



Şekil 4. Yeşilirmak Havzası mevcut ve gelecekteki dönem sediment verim haritaları.
Figure 4. Current and future sediment yield maps of the Yeşilirmak Basin.



Şekil 5. Yeşilirmak Havzası mevcut ve gelecekteki dönem sediment tutma haritaları.
Figure 5. Current and future sediment retention maps of the Yeşilirmak Basin

InVEST SİO modelinde ilk adım USLE denklemi ile yıllık toprak kaybının hesaplanmasıdır ardından ikinci adım olarak Borselli ve ark. (2008) tarafından geliştirilen bağlantı indeksi (IC-Index of connectivity) yardımıyla havzanın karakteristiğine özel hidrolojik bağlantısı hesaplanır (Eşitlik 2, 3 ve 4).

$$IC = \log_{10} \left(\frac{D_{yukarı}}{D_{aşağı}} \right) \quad (2)$$

$$D_{yukarı} = \bar{C}_{th} \bar{S}_{th} \sqrt{A} \quad (3)$$

$$D_{aşağı} = \sum_i \frac{d_i}{C_{th,i} S_{th,i}} \quad (4)$$

Eşitliklerde;

IC: Bağlantı indeksi

$D_{yukarı}$: yukarı eğim bileşeni

$D_{aşağı}$: Aşağı eğim bileşeni, yokuş yukarı katkıda bulunan alanın ortalama eşik C faktörü

S_{th} : Eğime katkıda bulunan alanın ortalama eşiklenmiş eğim derecesidir

A: Yukarı eğime katkıda bulunan alan

d_i : En dik yokuş aşağı yönüne göre i hücre boyunca akış yolunun uzunluğu.

Hidrolojik bağlantının ardından Vigiac ve ark. (2012) tarafından geliştirilen SİO eşitlik 5 yardımıyla hesaplanır.

$$SİO = \frac{SİO_{max}}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC_i}{k}\right)} \quad (5)$$

Eşitlikte; $SİO_{max}$ maksimum teorik SİO, (ortalama 0,8 ayarlanmıştır) IC ve k SİO-IC ilişkisinin şeklini tanımlayan kalibrasyon parametreleridir. ($IC_0 = 0,5$ ve $k=2$, varsayılan değerler)

Havzaya uygun SİO hesaplandıktan sonra havzanın sediment verimi eşitlik 6 kullanılarak hesaplanır. Eşitlik 7 kullanılarak alt havzaların toplam sediment verimi hesaplanır.

$$E_i = usle_i SİO_i \quad (6)$$

$$E \text{ (ton ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}) = \sum_i E_i \quad (7)$$

InVEST SİO modeli sediment verimi haritalamanın yanı sıra ekosistemin sediment tutma servislerini miktar ve dağılım olarak haritalayabilmektedir. Bu tutma servisi eğim, arazi örtüsü ve arazi kullanımı, akışa yakınlık ve akış aşağısında tutma eksikliği nedeniyle sediment bütçesine en fazla katkıda bulunan sıcak noktaları veya alanları mekânsal olarak belirlemektedir (Hamel ve ark., 2015). Bu servis eşitlik 8 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$Sed_Tut = K \times LS (1-CP) SİO \quad (8)$$

Gerekli Veriler ve Model Parametrelerin Üretilmesi

InVEST SİO modeli için gerekli olan parametreler ArcGIS 10.5 CBS yazılımında grid formatında üretilmiştir. Model için gerekli olan parametreler Sayısal Yükselti Modeli (SYM), yağış erozivitesi (R) grid haritası, toprak erodibilitesi (K) grid haritası, arazi yönetim (C) grid haritası, Yeşilirmak havzası alt havzaları vektör haritası,

koruma tedbirleri (P) grid haritası ve arazi örtüsü sınıflarına ve koruma tedbirlerine özgü biofiziksel tablo Yeşilirmak havzası için oluşturulmuştur.

SYM modeli için 30m çözünürlüklü SRTM uydu görüntüleri Birleşik Devletler Jeoloji Servisinin (USGS) internet adresinden (<https://earthexplorer.usgs.gov>) 12.04.2022 tarihinde temin edilmiştir. İndirilen görüntüler ArcGIS yazılımının hidroloji modeli kullanılarak Yeşilirmak Havzasının sınırları ve alt havzaları elde edilmiştir. Elde edilen Yeşilirmak Havza sınırları kullanılarak InVEST modelde kullanılacak SYM oluşturulmuştur (Şekil 2).

Yağış erozovite faktörünün (R) hesaplanmasında 1979-2013 yılları arasındaki iklim verilerinden oluşturulan CHELSA (Dünyanın kara yüzey alanları için yüksek çözünürlüklü klimatolojiler) veri tabanından elde edilen geotiff formatında 1km çözünürlüklü yıllık toplam yağış haritası (Şekil 3) ve Türkiye yıllık yağışlarından elde edilen deneysel R faktör denkleminde (Yılman ve ark., 2006) (eşitlik 9) faydalanılmıştır. Bu denklem, CHELSA yağış haritası ve ArcGIS yazılımının harita hesaplayıcı modülü kullanılarak grid formatında mevcut dönem (1979-2013) R faktör haritası oluşturulmuştur.

$$R = 0,001 (P)^{1,75} \quad (9)$$

Eşitlikte; R yağış erozivitesi ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$), P yıllık toplam yağış miktarı (mm).

Toprak erodibilite (K) faktörü toprak organik maddesi, toprağın fiziksel özellikleri ve bireysel toprak tanecikleri olan kum, silt ve kil yüzdesiyle güçlü bir şekilde ilişkilidir (Shabani ve ark., 2014). Bu araştırmada Yeşilirmak Havzası topraklarının erodibilite değerleri FAO dünya toprak haritasındaki toprak gruplarının veri tabanına işlenen toprak tekstürü ve organik madde içeriklerine göre belirlenmiştir (Roose, 1996). Belirlenen K faktör değerleri toprak gruplarına atanmış ve harita grid formatına çevrilmiştir.

Arazi yönetim faktörünün belirlenmesi için CORINE veri tabanından faydalanılmıştır. 2018 yılına ait CORINE arazi örtüsü arazi kullanımı veri tabanı <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> internet adresinden grid formatında indirilmiştir. CBS çatısı altında havza sınırları vektör haritası yardımıyla Yeşilirmak Havzasına ait 2018 yılı arazi örtüsü ve arazi kullanımı haritası hazırlanmıştır. Havzada belirlenen CORINE 3. Seviye arazi örtüsü ve kullanımı sınıflarının C faktör değerleri literatür taraması ile belirlenmiş ve ardından her sınıfın faktör değerleri biyofiziksel tabloya işlenmiştir (Tosic ve ark., 2011). Koruma destek faktörünün geniş çaplı olan bu havzada belirlenmesindeki zorluklardan dolayı P faktör 1 olarak alınmıştır ve faktör değerleri de biyofiziksel tabloya işlenmiştir. Hazırlanan SYM, R, K, C ve P faktör grid haritaları InVEST SİO modelinde analiz edilerek havzanın mevcut dönem sediment verimi ve sediment tutunma alanları miktar ve alansal olarak belirlenmiştir. Ardından küresel iklim modeli ile hesaplanan gelecek dönem R faktör haritaları ile model çalıştırılarak küresel iklim değişiminin sediment verimine ve sediment tutunumuna etkisi mevcut dönemle karşılaştırılmıştır. Bir sonraki başlıkta küresel iklim senaryosunun hazırlanışı detaylı olarak anlatılmaktadır.

Çizelge 1. Yeşilirmak Havzası Alt Havzaları ve Yüzölçümleri

Table 1. Sub-basins and Basin Surface Areas of Yesilirmak Basin

Alt Havza	Alan (km ²)	Alan %
Tozanlı	663,547	1,80
Karakaş	1084,47	2,94
Aşağı Yeşilirmak	1268,68	3,44
Aşağı Kelkit	1480,48	4,01
Orta Kelkit	1677,73	4,55
Orta Yeşilirmak	1784,63	4,84
Tersakan	2689,84	7,29
Çorum	4341,6	11,77
Yukarı Yeşilirmak	5723,83	15,52
Çekerek	7835,3	21,24
Yukarı Kelkit	8338,13	22,60
Toplam	36888,24	100

Çizelge 2. Yeşilirmak Havzası FAO Toprak Grupları ve Yüzölçümleri

Table 2. FAO Soil Groups of Yeşilirmak Basin and Areas

FAO Grup	K Factor	Alan (km ²)	Alan %
Calcic Cambisols	0,018	12499,03	31,52
Orthic Acrisols	0,026	2003,47	5,05
Lithosols	0,026	9636,816	24,31
Haplic Kastanozems	0,015	2503,04	6,31
Calcic Xerosols	0,044	5244,163	13,22
Eutric Cambisols	0,044	6293,96	15,87
Calcic Kastanozems	0,046	1465,8	3,69

Çizelge 3. Corine Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü Tipleri ve Yüzölçümleri (Biyofiziksel Tablo).

Table 3. Corine Land Use and Land Cover Types and Cover Areas (Biophysical Table).

Arazi Kullanım Kodu	Arazi Kullanımı/ Arazi Örtüsü	Usle_C	Yüz ölçüm (km ²)	Yüz ölçüm %
1	Sürekli Kentsel Doku	0	311,98	0,86
2	Endüstriyel veya ticari alanlar	0	43,08	0,12
3	Kara ve demiryolu ağları	0	6,31	0,02
4	Maden sahaları	0	29,57	0,08
5	İnşaat Alanları	0	16,95	0,05
6	Sulanmayan tarım arazileri	0,45	4970,59	13,67
7	Sulanan tarım arazileri	0,45	3585,48	9,86
8	Bağ alanları	0,45	10,47	0,03
9	Meyve Bahçeleri	0,1	225,56	0,62
10	Mera	0,02	488,43	1,34
11	Karışık kültür alanları	0,12	1925,24	5,29
12	Doğal bitki örtüsü bulunan tarım alanları	0,12	4228,33	11,63
14	Geniş yapraklı orman	0,003	3573,71	9,83
15	İne yapraklı Orman	0,003	1851,80	5,09
16	Karışık Orman	0,003	2133,02	5,87
17	Doğal çayır	0,08	3870,28	10,64
18	Bitki Değişim Alanları	0,05	4810,73	13,23
19	Sahil	0	35,39	0,10
20	Çıplak Kayalık	0	223,96	0,62
21	Seyrek bitki örtüsü alanları	0,45	3687,12	10,14
22	Su kütleleri	0	49,59	0,14
23	Sürekli kentsel doku	0	25,30	0,07
24	Havaalanı	0	11,12	0,03
27	Spor ve eğlence tesisleri	0,005	1,63	0,00
28	Pirinç tarlaları	0,01	9,25	0,03
30	Karasal bataklıklar	0,05	7,84	0,02
31	Tuz bataklığı	0,05	7,66	0,02
32	Sulak alanlar	0	219,62	0,60
33	Deniz veya okyanus	0	2,34	0,01

Çizelge 4. Alt Havzalar Sediment Verimi (ton yıl⁻¹)Table 4. Sediment yield of basins (ton year⁻¹).

Alt Havza	Mevcut Dönem	RCP 4.5 2050	RCP4.5 2070	RCP8.5 2050	RCP8.5 2070
Aşağı Yeşilirmak	67339,57	64287,32	59185,33	57345,16	54399,27
Aşağı Kelkit	75637,75	74632,02	69919,16	67495,81	65477,10
Karakaş	104166,28	100746,90	97373,76	93835,20	90377,94
Orta Yeşilirmak	136861,39	127012,92	119097,87	113200,05	110300,17
Tozanlı	126573,28	137531,92	130312,03	127047,69	124468,21
Tersakan	144551,72	141932,42	132395,25	126342,37	122372,54
Orta Kelkit	183148,78	184433,46	173604,87	167970,58	165609,81
Çorum	351219,12	352968,70	332561,05	316943,52	309860,30
Çekerek	485580,13	490507,19	460725,71	444294,66	433604,12
Yukarı Yeşilirmak	615429,33	621996,50	597492,99	575389,71	564050,30
Yukarı Kelkit	1723070,50	1766896,71	1649710,32	1604456,16	1600348,23
Toplam Değişim	4013577,85	4062946,07 + %1,28	3822378,30-%4,07	3694320,90-%7,95	3640867,99-%9,28

Çizelge 5. Alt Havzalar Sediment Tutunma miktarları (ton yıl⁻¹).Table 5. Lower Basins Sediment Retention Amounts (ton year⁻¹)

Alt Havza	Mevcut Dönem	RCP4.5 2050	RCP4.5 2070	RCP8.5 2050	RCP8.5 2070
Aşağı Yeşilirmak	2759365,14	2663843,87	2472030,68	2381291,14	2274579,35
Aşağı Kelkit	2349360,11	2333478,37	2158086,25	2073896,69	2018904,73
Karakaş	4030959,74	3899747,96	3679870,38	3547184,12	3414211,98
Tozanlı	2485101,02	2483048,60	2249804,09	2201017,01	2149308,26
Orta Yeşilirmak	2920124,38	2929926,43	2724829,23	2595059,70	2526177,68
Tersakan	1437319,68	1417708,11	1310210,80	1248003,79	1209925,41
Orta Kelkit	3312540,06	3321542,35	3042599,70	2946652,14	2896458,28
Çorum	2707055,14	2707912,74	2479154,62	2370959,30	2314696,54
Çekerek	4140099,4	4164816,99	3794541,89	3680434,29	3585340,97
Yukarı Yeşilirmak	11013317,3	11104814,51	10283967,97	9928842,82	9711703,58
Yukarı Kelkit	13917324	14277735,95	12963972,30	12626270,36	12597812,24
Toplam Değişim	51072565,95	51304575,87 + %0,45	47159067,92-%7,66	45599611,36-%10,71	44699119,03-%12,47

Küresel İklim Modeli

Genel Dolaşım Modelleri (GMD), araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan iklim tahmin yöntemlerinden bir tanesidir (Niu ve Feng, 2021). İklim modelleri, gözlemsel verilerle açıklanan atmosferik dolaşımdaki değişikliklerin analizine ve gelecekteki senaryolar temelinde evrimlerinin projelendirilmesine imkân tanımaktadır. GDM'nin birçok versiyonu bulunmaktadır ve bu modeller arasında iklim değişikliğini tahmin etmede en etkili setlerden birisi Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi 5. Aşama (CMIP5) iklim model serileridir (Brun ve ark., 2020). Bu serilerden Jeofiziksel Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı'nda (GFDL) iklim değişkenini tahmin etmek için üretilen Jeofiziksel Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı İklim Modeli Sürüm III (GFDL-CM3) adlı model sıcaklık ve yağış gibi iklimsel özellikleri gerçek değerlere yakın olarak tahmin edebilen en doğru küresel iklim modellerinden birisidir (Delworth ve ark., 2020). Bu iklim modeli Hükümetler Arası İklim Değişim Paneli Beşinci raporunda (IPCC- AR5) tanımlanan dört ana sera gazı emisyon içeriklerine dayalı olarak Temsili konsantrasyon Yolları (RCP) isimli senaryolara ayrılmaktadır. Bu dört ana senaryo RCP2,6, RCP4,5, RCP6 RCP8,5 olarak sınıflandırılmaktadır ve bu senaryolara göre 21.yy'ın sonuna doğru Dünya sıcaklığının 0,3°C ile 4,8°C arasında artması tahmin edilmektedir (Rodrigues ve ark., 2020). Bu araştırmada Yeşilirmak Havzasında gelecek 2050 ve 2070 yıllarındaki yağış miktarlarının tahmin edilmesi ve InVEST model

kullanılarak sediment tahminlerinin yapılabilmesi için RCP 4.5 ve RCP 8.5 iklim senaryosu kullanılmıştır. RCP 4.5 senaryosunda sera gazı emisyonlarını azaltmak için çok çeşitli teknolojiler ve politikalar kullanıldığından ve ışınımsal zorlama seviyesinin 2100 yılına kadar 4,5 W/m³ te sabitlenmesine neden olduğu için stabilizasyon senaryosu olarak adlandırılır. RCP8.5 emisyon senaryosu ise 2100 yılında ışınımsal zorlamama olarak 8,5 W/m³ ulaşılacağı ve böylelikle sera gazı emisyonlarının ve konsantrasyonun artmasına neden olacaktır. Bu senaryoya göre, sıcaklık keskin bir şekilde artacak ve önümüzdeki yıllarda yağışlarda önemli bir azalma beklenmelidir. Genel olarak GDM 'lerinin çözünürlükleri bölgesel iklim koşullarını üretmek için yeterli değildir. Bu nedenle bu araştırmada yüksek çözünürlüklü küresel iklim senaryoları CHELSA veri tabanından elde edilmiştir. Yanlılık düzeltmeleri bulunan ve 1 km çözünürlüklü küresel iklim modelleri veri tabanından GFDL-CM3 modelinin RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarının 2050 ve 2070 yıllarına ait yağış haritaları <https://chelsa-climate.org> internet adresinden indirilmiştir. CBS yazılımında havza sınırları haritası ile çalışma alanına ait küresel iklim değişikliği haritaları analizlere hazır hale getirilmiştir. Ardından deneysel R faktörü denklem eşitliği (9) kullanılarak gelecek yıllara ait yağış erozivite faktörü grid haritaları hesaplanmıştır. Bu haritalar InVEST modele dâhil edilerek gelecek dönemlere ait sediment verim ve sediment tutunma alanları belirlenmiştir.

Bulgular ve Tartışma

InVEST Model Girdi Parametreleri

InVEST SİO modeli için gerekli uzaysal parametrelerden havza ve alt havza sınırları haritası ArcGIS yazılımının hidroloji analiz aracı ile belirlenmiştir ve 11 adet alt havza oluşturulmuştur (Çizelge 1). Havza da en fazla alan kaplayan alt havza Yukarı Kelkit Havzası (8338 km²), en az alan kaplayan ise Yeşilirmak'ın üst kollarından olan Tozanlı Havzasıdır (663,54 km²).

Model için gerekli olan bir diğer parametre K faktör uzaysal haritasıdır. FAO/UNESCO Dünya Toprak Gruplarına göre havzada yedi farklı toprak grubu belirlenmiştir (Çizelge 2). Havza da Calcic Cambisols, Orthic Acrisols, Lithosols, Haplic Kastanozems, Calcic Xerosols, Eutric Cambisols, Calcic Kastanozems toprak tipleri bulunmaktadır ve bu grupların K faktör değerleri 0,15 ile 0,046 ton ha hr (Mj ha mm)⁻¹ arasında değişen değerler almaktadır. Araştırma alanında en fazla alan kaplayan toprak grubu %31,52 ile Calcic Cambisols toprak sınıfıdır ve bu sınıf 0,018 ton ha hr (Mj ha mm)⁻¹ değerini almıştır. Yüksek K-faktörü değerleri, toprak parçasının yağış ve/veya yüzeysel akıştan kaynaklanan erozyona karşı daha savunmasız olduğunu göstermektedir (Ganasri ve Ramesh, 2016).

Havza da CORINE veri tabanına ait kullanım sınıflarına ve C faktör değerlerine ait bilgiler Çizelge 3 'te verilmiştir. Havzanın geneline bakıldığında tarım arazileri ile ormanlık alanlar ve doğal otlaklar havzanın neredeyse yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Alansal olarak sultanmayan tarım arazileri sınıfının (%13,67) en fazla yer kapladığı belirlenmiştir. Kullanım tiplerine ait C faktör değerleri ise 0 ile 0,45 arasında değişen değerler almıştır. Teng ve ark. (2018)' e göre C faktörün 1'e eşit olması, yüzeyde örtü bulunmadığını ve yüzeyin çorak ve çıplak arazi olarak kabul edildiğini gösterirken, C' nin sifıra yakın (0) değerlerinin çok güçlü örtü etkilerini ve iyi korunmuş toprağı göstermekte olduğunu bildirmektedir. Çizelge 3 aynı zamanda model de gerekli girdilerden olan biyofiziksel tabloyu oluşturmaktadır.

CHELSEA yıllık toplam yağış haritası R faktörün hesaplanması için kullanılmıştır. Bu haritaya göre Yeşilirmak havzasında yağışlar 403-778 mm arasında ve ortalama olarak 515 mm dir (Şekil 2b). Deneysel R faktör denklemi uygulanarak hesaplanan R faktör haritası ise 18,68-230,56 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ arasında ve ortalama 54,67 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ olarak hesaplanmıştır (Şekil 3e). Havza genelinde güneyden kuzeye doğru yağışların artış göstermesi sebebiyle havzanın kuzey kesimlerinde R faktör değerlerinin daha yüksek değerler aldığı görülmüştür.

Küresel İklim Modeline Göre Gelecekteki Yağış Erozivitesi

GFDL-CM3 modelinin RCP4.5 ve 8.5 senaryoları gelecekteki (2050 ve 2070) yağış erozivitesini belirlemek için kullanılmıştır. CM3 modelinin senaryolarına ve farklı yıllarına göre elde edilen R faktör haritaları Şekil 3' te verilmiştir. RCP 4.5 senaryosunun 2050 yılına ait R faktör haritası 18,92- 219,89 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ arasında değişmekte ve ortalama 54,87 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ dir. Aynı senaryonun 2070 yılı ise 17,40 – 204,12 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ arasında ve ortalama 50,91 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ olarak belirlenmiştir. RCP

8.5 senaryosunun 2050 yılı R faktör değerleri 16,83 ile 197,89 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ arasında iken ortalama 49,11 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ dir. 2070 yılının R faktör değerleri ise 16,38 ile 188,86 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ arasında ve ortalama 48,09 Mj mm ha⁻¹ hr⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Havzada mevcut dönem R faktör ortalaması incelendiğinde RCP 4.5 senaryosunun 2050 yılında %2,4, 2070 yılında ise %9,5 'lik, RCP 8.5 2050 yılı için %12, 2070 yılı için ise %14'lük bir azalma öngörülmektedir. Bu durum, GDM' nin genel çoğunluğunda Türkiye'de 2070 yılına kadar yağışların 30=11 mm azalış öngörüsünden kaynaklanabilir (Berberoğlu ve ark., 2020).

Yeşilirmak Havzasında Mevcut ve Gelecek Dönem (2050-2070) Sediment Verimi

Sediment verimi akışa ulaşan grid verim haritasının her pikselinden ihraç edilen toplam sediment miktarıdır. InVEST SİO model ile belirlenen sediment veriminin uzaysal dağılım haritaları Şekil 4'te verilmiştir. Mevcut dönem elde edilen sediment verim miktarı havza genelinde ortalama olarak 0,07 ton/ha olarak hesaplanmıştır. 2050 yılında RCP 4.5 senaryosunda ortalama verim 0,07 ton/ha, RCP8.5 senaryosuna göre ise 0,066 ton/ha olarak belirlenmiştir. 2070 yılında ise RCP4.5 senaryosuna göre havzada ortalama sediment verimi 0,069 ton/ha iken RCP8.5 senaryosunda verim 0,065 ton/ha olarak belirlenmiştir. Havzanın tamamında sediment verimi toplam 4.013 milyon ton olarak belirlenmiştir. Senaryolara göre ortalama sediment verimlerinde düşük de olsa bir azalma eğilimi dikkat çekmektedir. Yalnızca RCP 4.5 senaryosunda 2050 yılında havzada toplam sediment veriminde %1,28'lik bir artış görülürken, aynı senaryo 2070 yılında %4,07'lik bir azalma beklenmektedir. RCP 8.5 senaryosuna göre 2050 yılında %7,95, 2070 yılında ise %9,28'lik bir azalma öngörülmektedir. Alt havza düzeyinde ise sediment veriminin en fazla olduğu havza Yukarı Kelkit Havzasıdır (Çizelge 4). Bu alt havzada toplam sediment verimi mevcut dönemde 1.723 milyon ton olarak belirlenmiştir. Havzanın diğer alt havzalara göre daha yüksek sediment verimine sahip olması hem en yüksek yüz ölçüme sahip olması hem de bu alt havzanın topografik olarak daha yüksek olması ve buna bağlı olarak eğim değerlerinin daha yüksek olmasından ileri gelmektedir. Havza ekosistemlerinde müdahale yöntemleri için en iyi yol havzanın alt havza düzeyinde önceliklendirilmesidir (Kanth ve Zahoor-ul, 2010). Önceliklendirme ile müdahalelerin en kritik alt havzada başlanması sağlanarak daha etkili bir koruma planlaması hazırlanabilir. Bu bakımdan sediment veriminin en yüksek olduğu Yukarı Kelkit ve Yukarı Yeşilirmak Havzalarına öncelik verilerek koruma stratejilerinin hazırlanmasına dikkat etmek daha faydalı planlamaları ortaya koyacaktır.

Yeşilirmak Havzasında Mevcut ve Gelecek Dönem (2050-2070) Sediment Tutma Kapasitesi

Çizelge 5 ve Şekil 5 alt havzaların farklı dönem ve farklı senaryolara göre sediment tutma miktarlarını göstermektedir. Havzanın genelinde toplam tutulan sediment miktarı mevcut dönem yağışlarına göre yaklaşık 51 milyon ton olarak belirlenmiştir. Küresel iklim senaryolarından RCP 4.5 2050 yılında toplam miktar yalnızca %0,45 düzeyinde artış gösterirken aynı senaryoya

göre 2070 yılında %7,66 düzeyinde toplam sediment tutma miktarında azalma öngörülmüştür. Daha karamsar olan RCP8.5 senaryosu 2050 yılında %10,71, 2070 yılında ise %12,47 düzeyinde azalma öngörmektedir. Alt havzalar kendi aralarında incelendiğinde en fazla sediment tutma kapasitesine sahip olan Yukarı Kelkit havzasıdır. En az sediment tutma kapasitesine sahip olan ise Aşağı Yeşilirmak Havzasıdır.

RCP 4.5 senaryosunun 2050 yılı hariç diğer senaryolar ve yıllarda sediment tutma kapasitesi her alt havza da azalış şeklinde öngörülmektedir. Yeşilirmak Havzasının sediment tutma kapasitesinin tahmini, havzadaki mevcut bitki örtüsü ve yönetim uygulamaları nedeniyle havzanın aşağı ekosisteminde büyük çevre sorunları oluşturabilecek büyük hacimli sedimentlerin korunduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sediment tutma miktarları verim oranından daha büyüktür. Bu durum, havzanın yüksek sediment verimine sahip olduğunu fakat bunun büyük bir kısmının mevcut bitki örtüsü ve topografik şartlardan dolayı tutulduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, iklim değişikliğinin gelecek yıllarda sediment verimi ve sediment tutunma kapasiteleri üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olacağını göstermektedir. En çarpıcı azalış etkisinin 2070 'li yıllarda RCP 8.5 senaryosunda öngörülmüştür.

Sonuçlar

Bu araştırma son yıllarda sıklıkla kullanılmaya başlanılan InVEST Sediment İletim Modeli ve GFDL-CM3 küresel iklim modelini entegre ederek uzun vadeli yağış değişikliklerinin Yeşilirmak Havzasında sediment verimi ve sediment tutma kapasitesi üzerindeki potansiyel etkisini incelemiştir. Elde edilen bulgular Yeşilirmak havzasında mevcut dönem de (1979-2013) sediment veriminin yılda toplam yaklaşık olarak 4 milyon ton/yıl dolaylarında olduğunu ve küresel iklim değişikliğine bağlı olarak gelecek dönemlerde daha da azalacağını göstermektedir. En çarpıcı sediment veriminde azalma RCP 8.5 senaryosunun 2070 yıllarına ait projeksiyonunda öngörülmüştür. Bu senaryoya göre sediment veriminde havza genelinde %9,28 düzeyinde azalma beklenmektedir. Sediment tutma kapasitesi ise mevcut dönemde havza genelinde yaklaşık 51 milyon ton/yıl olarak hesaplanmış ve yine RCP 8.5 senaryosunun 2070 yılında en fazla azalma dikkat çekmiştir (%12,47). Alt havza düzeyinde ise sediment veriminde ve sediment tutunma kapasitesinde Yukarı Kelkit havzası değerlerin en yüksek olduğu (sırasıyla 1723070.50 ton/yıl ve 13917324 ton/yıl) havza olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular havza genelinde gelecek dönemler içinde toprak erozyonuna bağlı olarak sediment veriminde azalma öngörülmektedir. Bu durum özellikle havzanın aşağı kesimlerindeki su kaynaklarının ve rezervuarların su kalitesine olumlu yönde yansıtacaktır. Aynı zamanda azalma öngörülen sediment verimi tarım topraklarının verimliliği için önemlidir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, iklim değişikliğinin toprak erozyonu üzerine gelecekteki değişikliklerin tahmin edilmesine katkıda bulunabileceğini açıkça göstermektedir. Ayrıca InVEST model yaklaşımı, karar alıcıların gelecekteki iklim değişikliğine ve çevreye uyum sağlama ile ilgili stratejilerin hazırlanmasına olanak sağlaması açısından önemli olduğunu göstermiştir.

Kaynaklar

- Aneseyee AB, Soromessa T, Elias E. 2020. The effect of land use/land cover changes on ecosystem services valuation of Winike watershed, Omo Gibe basin, Ethiopia. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(10): 2608-2627.
- Bangash RF, Passuello A, Sanchez-Canales M, Terrado M, López A, Elorza FJ, Schuhmacher, M. 2013. Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of the Total Environment*, 458: 246-255.
- Berberoglu S, Cilek A, Kirkby M, Irvine B, Donmez C. 2020. Spatial and temporal evaluation of soil erosion in Türkiye under climate change scenarios using the Pan-European Soil Erosion Risk Assessment (PESERA) model. *Environmental monitoring and assessment*, 192(8): 1-22.
- Borrelli P, Robinson DA, Panagos P, Lugato E, Yang JE, Alewell C, Ballabio C. 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36): 21994-22001.
- Borselli L, Cassi P, Torri D. 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena* 75: 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Bouguerra S, Jebari S. 2017. Identification and prioritization of sub-watersheds for land and water management using InVEST SDR model: Rmelriver basin, Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(15): 1-9.
- Brooks KN, Ffolliott PF, Gregersen HM, DeBano LF. 2013. *Hydrology and the management of watersheds - fourth edition* (Oxford, UK: John Wiley and Sons, Inc.).
- Brun P, Thuiller W, Chauvier Y, Pellissier L, Wüest RO, Wang Z, Zimmermann NE. 2020. Model complexity affects species distribution projections under climate change. *Journal of Biogeography*, 47(1): 130-142.
- Chapman S, Birch CE, Galdos MV, Pope E, Davie J, Bradshaw C, Marsham JH. 2021. Assessing the impact of climate change on soil erosion in East Africa using a convection-permitting climate model. *Environmental Research Letters*, 16(8): 084006.
- Das S, Bora PK, Das R. 2022. Estimation of slope length gradient (LS) factor for the sub-watershed areas of Juri River in Tripura. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(1): 1171-1177.
- De Hipt FO, Dieckrueger B, Steup G, Yira Y, Hoffmann T, Rode M. 2018. Modeling the impact of climate change on water resources and soil erosion in a tropical catchment in Burkina Faso, West Africa. *Catena*, 163: 63-77.
- Delworth TL, Cooke WF, Adcroft A, Bushuk M, Chen JH, Dunne KA, Zhao M. 2020. SPEAR: The next generation GFDL modeling system for seasonal to multidecadal prediction and projection. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(3): e2019MS001895.
- Duulatov E, Chen X, Amanambu AC, Ochege FU, Orozbaev R, Issanova G, Omurakunova G. 2019. Projected rainfall erosivity over Central Asia based on CMIP5 climate models. *Water*, 11(5): 897.
- 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
- Fan J, Motamedi A, Galoie M. 2021. Impact of C factor of USLE technique on the accuracy of soil erosion modeling in elevated mountainous area (case study: the Tibetan plateau). *Environment, Development and Sustainability*, 23(8): 12615-12630.
- Ganasri BP, 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.

- Hamel P, Chaplin-Kramer R, Sim S, Mueller C. 2015. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. *Science of the Total Environment*, 524: 166-177.
- Haregeweyn N, Melesse B, Tsunekawa A, Tsubo M, Meshesha D, Balana BB. 2012. Reservoir sedimentation and its mitigating strategies: a case study of Angereb reservoir (NW Ethiopia). *J Soils Sediments* 12(2):291-305.
- Hassen EE, Assen M. 2018. Land use/cover dynamics and its drivers in Gelda catchment, Lake Tana watershed, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 6(1): 1-13.
- Housseyn B, Nekkache GA, Kamel K, Hamza B, Salah-Eddine T. 2021. Estimation of soil losses using RUSLE model and GIS tools: Case study of the Mellah catchment, Northeast of Algeria. *Revista Romana de Inginerie Civila*, 12(3): 266-289.
- Issaka S, Ashraf MA. 2017. Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. *Geo Ecol Landscapes* 1(1):1-11.
- Kanth TA, Zahoor-ul H. 2010. Prioritization of watersheds in Wular catchment for sustainable development and management of natural resources. *Recent Research in Science and Technology* 2(4):12-16
- Khan M, Sharma A, Goyal MK. 2019. Assessment of future water provisioning and sediment load under climate and LULC change scenarios in a peninsular river basin, India. *Hydrological Sciences Journal*, 64(4): 405-419.
- Kilic OM, Gunal H. 2021. Spatial-temporal changes in rainfall erosivity in Türkiye using CMIP5 global climate change scenario. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(12): 1-13.
- Li Z, Fang H. 2016. Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 163: 94-117.
- Lexartza-Artza I, Wainwright J. 2011. Making connections: changing sediment sources and sinks in an upland catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36: 1090-104
- Mullan D, Favis-Mortlock D, Fealy R. 2012. Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156: 18-30.
- Niu WJ, Feng ZK. 2021. Evaluating the performances of several artificial intelligence methods in forecasting daily streamflow time series for sustainable water resources management. *Sustain Cities Soc*; 64:102562.
- Panagos P, Borrelli P, Meusburger K, Van der Zanden EH, Poesen J, Alewell C. 2015. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environ Sci Policy* 51:23-34
- Renard KG, Foster GR, Weesies G, McCool D, Yoder D. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) vol 703. United States Department of Agriculture Washington, DC.
- Rhodes CJ. 2014. Soil erosion, climate change and global food security: challenges and strategies. *Science progress*, 97(2): 97-153.
- Rodrigues JA, Viola MR, Alvarenga LA, de Mello CR, Chou SC, de Oliveira VA, Morais MA. 2020. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. *International Journal of Climatology*, 40(5): 2511-2526.
- Roose E. 1996. *Land Husbandry: Components and Strategy*. Vol. 70. FAO, Rome. Available from: <http://www.fao.org/docrep/T1765E/t1765e0e.htm>. [Last accessed on 2021 Jul 10].
- Shabani F, Kumar L, Esmaeili A. 2014. Improvement to the prediction of the USLE K factor. *Geomorphology*, vol. 204, pp. 229-234. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.008>
- Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wood SA, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim CK, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl AL, Rogers L, Bierbower W, Denu D, Douglass J. 2018. InVEST 3.50.post225+h6aabb7740548 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Teng H, Liang Z, Chen S, Liu Y, Rossel RAV, Chappell A, Shi Z. 2018. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models. *Science of the Total Environment*, 635: 673-686.
- Tosic R, Dragicevic S, Kostadinov S, Dragovic N. 2011. Assessment Of Soil Erosion Potential by The Usle Method: Case Study, Republic of Srpska- Bih. *Fresenius Environmental Bulletin*, 20(8), 1910-1917.
- Uzuner Ç, Dengiz O. 2020. Desertification risk assessment in Türkiye based on environmentally sensitive areas. *Ecological Indicators*, 114: 106295. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106295>.
- Vigerstol KL, Aukema JE. 2011. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of environmental management*, 92(10): 2403-2409.
- Vigiak O, Borselli L, Newham L, McInnes J, Roberts A. 2012. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology* 138:74-88
- Wu GL, Liu YF, Cui Z, Liu Y, Shi ZH, Yin R, Kardol P. 2020. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 57(5): 875-885.
- Yang D, Kanae S, Oki T, Koike T, Musiak K. 2003. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological processes*, 17(14): 2913-2928.
- Yılman FE, Ozsayar M, Kaya P, Aydin S, Erpul G, Bayramin I. 2006. Determining relationship of RUSLE-R factor with total annual rainfall amount and MFI on a national scale in Türkiye. 18th International Soil Meeting (ISM) on "Soil Sustaining Life on Earth, Managing Soil and Technology", May 22 -26, 2006 Sanlurfa - Türkiye, Proceedings, Volume 1: 402 - 409.