Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2026; 12(1): 200–215, DOI: 10.21324/dacd.1800957

Arhavi Kapisre Deresi Havzası'nda GeoWEPP Erozyon Tahmin Modeli ile Erozyon Tespiti

Cengizhan Yıldırım[1,*], Mustafa Tüfekçioğlu[2], Olgun Yağcı[1]

[1]Artvin Çoruh Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Orman Mühendisliği A.B.D., 08100, Artvin.
[2]Artvin Çoruh Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, 08100, Artvin.

Özet

Günümüzde, erozyonun miktarını, şiddetini ve havza ölçeğinde nerelerde nasıl gerçekleştiğini tahmin etmek ve uygulanacak kontrol müdahalelerinin zamanında planlanması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada GeoWEPP erozyon tahmin modeli çalıştırılarak Arhavi Kapisre Deresi Havzası'nda (AKDH) erozyon ile meydana gelen toprak kaybı, sediment verimi ve birim alandaki toprak kaybı hesaplanmıştır. Toplamda 29913,9 ha olan çalışma alanı 17 alt havzaya bölümlendirilerek, her bir alt havza için model ayrı ayrı çalıştırılmıştır. AKDH'de 20 yıllık simülasyona göre toplam yıllık sediment verimi 26846,8 ton/yıl ve ortalama birim alandaki sediment verimi ise 1,057 ton/ha/yıl'dır. 17 alt havzanın ortalama sediment iletim oranı (SİO) ise 0,205'dir. Yamaçlarda (yüzeyde) görülen toplam yıllık erozyon miktarı 8648,6 ton/yıl ve 17 alt havzanın birim alandaki yıllık ortalama yamaç toprak kaybı 0,08 ton/ha/yıl, kanallarda görülen toplam yıllık erozyon miktarı 170466,7 ton/yıl ve 17 alt havzanın birim alandaki yıllık ortalama kanal erozyonu toprak kaybı 0,97 ton/ha/yıl olarak bulunmuştur. En yüksek erozyon miktarı 18739,8 (%69,8) ton/yıl ile Mera alt havzasında, en düşük erozyon miktarı 123,9 (%0,5) ton/yıl ile Gürgencik (Orman alanı) Alt Havzası'nda tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda tarım ve mera alanlarının erozyona çok daha duyarlı olduğu ve ayrıca havza kanal sisteminde gerçekleşen erozyonun ise yamaç (yüzey) erozyonuna göre çok daha fazla (yaklaşık 12 kat) sediment ürettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler

Toprak Erozyonu, CBS, Sediment Verimi, Yamaç ve Kanal Erozyonu

Application of the GeoWEPP Model for Soil Erosion Estimation in the Arhavi Kapisre Creek Basin

Abstract

Estimating the amount, severity and spatial distribution of erosion at the watershed scale, as well as timely planning of appropriate control measures, is of great importance today. In this study, the GeoWEPP erosion prediction model was applied to estimate soil loss, sediment yield, and soil loss per unit area in the Arhavi Kapisre Creek Basin (AKCB). The study area, covering 29,913.9 ha, was divided into 17 sub-watersheds, and the model was run separately for each. Based on a 20-year simulation, the total annual sediment yield was 26,846.8 tons/year, with an average sediment yield per unit area of 1.057 tons/ha/year. The mean sediment delivery ratio (SDR) of the 17 sub-watersheds was calculated as 0.205. The total annual surface (hillslope) erosion was 8,648.6 tons/year, with an average per unit area of 0.08 tons/ha/year, while total channel erosion reached 170,466.7 tons/year, corresponding to 0.97 tons/ha/year. The highest erosion occurred in the Mera sub-watershed with 18,739.8 tons/year (69.8%), whereas the lowest erosion was recorded in the Gürgencik sub-watershed (forest area) with 123.9 tons/year (0.5%). The findings indicate that agricultural and pasture areas are significantly more susceptible to erosion, and that channel erosion produces substantially more sediment (about 12 times) compared to surface erosion.

Keywords

Soil Erosion, GIS, Sediment Yield, Hillslope and Channel Erosion

1. Giriş

Toprak ve su ekosistemimizi oluşturan iki önemli doğal kaynaktır. Bu kaynakların yapısındaki bozulmalar yaşanılan çevrenin kalitesini doğrudan etkilemektedir (Narimani vd., 2017). Özellikle ülkemizde bu bozulmaya sebep olan en önemli faktör yağışın etkisiyle gerçekleşen toprak erozyonudur. Her yıl milyonlarca ton verimli toprak, ülkemizde çeşitli erozyon türleri (su, rüzgâr, kütle/yerçekimi vb.) vasıtasıyla kaybolmaktadır. Bu erozyon çeşitlerinden su erozyonu ülkemizde %90 etki oranı ile en fazla toprak kaybına neden olan erozyon çeşididir. Dinamik Erozyon Modeli ve İzleme Sistemi (DEMİS) sonucu elde edilen verilere göre ülkemizde her yıl maksimum 642 milyon ton toprak su erozyonu sonucu harekete geçerek kaynağından uzaklaşmakta ve toprak verimliliğini azaltmaktadır.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (462) 2154131, Faks: +90 (462) 2151034
E-posta: cengizhanxyildirim@hotmail.com (Yıldırım C.), mtufekcioglu61@gmail.com (Tüfekçioğlu M.), olgun.yagci95@gmail.com (Yağcı O.)

Gönderim Tarihi / Received : 10/10/2025
Kabul Tarihi / Accepted : 09/12/2025

Ortalama hektarda ise 8,24 ton toprak her yıl su erozyonu sonucu yer değiştirmektedir. Bu miktar ülkemiz yüzölçümünün % 60,28'sinde çok hafif, % 19,13'ünde hafif, % 7,93'ünde orta, % 5,97'sinde şiddetli ve % 6,7'sinde çok şiddetli olarak dağılım göstermektedir (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2018). Bu bulguları destekler nitelikte; Değerliyurt (2013)'un Hatay Arsuz Çayı Havzası'nda RUSLE modeliyle üretilen duyarlılık haritası, alanın %4.12'sinin şiddetli ve çok şiddetli erozyona maruz kaldığını göstermektedir. Bulgular, erozyon şiddetinin hem düz tarım arazilerinde hem de bitki örtüsünün seyrek olduğu eğimli yamaçlarda arttığını ortaya koymuştur. Saha gözlemleri, özellikle tarım alanlarında erozyonun belirgin fiziksel etkiler yarattığını doğrulamaktadır. Havza düzeyindeki ayrıntılı çalışmalar da bu genel durumu desteklemektedir. Örneğin, Doğu Karadeniz havzalarından Şavşat Veliköy'de (Artvin) yapılan bir RUSLE modelleme çalışmasında, yıllık ortalama sediment veriminin 3,9 ton/ha/yıl olduğu ve havzanın %8,2'sinin erozyon potansiyelinin yüksek ve ya çok yüksek olduğu rapor edilmiştir (Tufekçioğlu vd., 2018). Yapılan bu iki çalışma, toprak erozyonunun yalnızca bir çevre sorunu olmadığını, aynı zamanda tarımsal verimliliği, su kalitesini ve biyolojik çeşitliliği doğrudan tehdit eden, ülke ekonomisi için sürdürülebilir bir kalkınma önündeki en kritik engellerden biri olduğunu göstermektedir.

Doğu Karadeniz Bölgesi, Türkiye'de en fazla yağış alan dağlık bir coğrafya olması sebebiyle erozyon, heyelan, kaya düşmesi ve taşkın gibi doğal afetlere sıklıkla maruz kalmaktadır (Gelişli vd. 2011; Ersoy vd. 2019; Tüfekçioğlu & Yavuz 2016; Dağ vd., 2020). Bu durum, toprağın verimliliğini kaybetmesine yol açmaktadır. Türkiye genelindeki oranlardan farklı olarak, bölgede meydana gelen doğal afetlerin neredeyse tamamına yakınını (%95) taşkın ve heyelan olayları oluşturmakta ve bölgenin afet karakterini şekillendirmektedir (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020). Orman ve mera arazi kullanımlarının çoğunu oluşturduğu görülen, sarp ve dik yamaçlarda tarımsal faaliyetlerin uygulanması erozyonun görülmesindeki en önemli faktörlerden biridir. Artan Dünya nüfusu da göz önünde bulundurulduğunda toprağın yönetimi ve korunması yolu izlenerek erozyon ile aktif mücadele edinilmesi gerekmektedir. İnsan nüfusunun artışıyla birlikte gıda ihtiyacındaki yükselişte göz önünde bulundurulduğunda, erozyon sonucu verimsizleşen ya da azalan tarım alanlarının varlığı ve korunması ülkemiz gıda güvenliğinin sağlanması açısından çok önem ihtiva eder. Çıkabilecek bu sorunların sonucunda verimli tarım arazilerinin azalması ve ürün çeşitliliği, miktarı ve kalitesinde ciddi azalmalar meydana getirecektir. Düşen verimlilikle birlikte artan kimyasal kullanımı, aşırı gübreleme gibi durumlarda kullanılan toprağın kalitesini düşürecek yönde sonuçlar doğurmaktadır (Cure, 2022).

Bütün bu sorunlarla mücadele etmenin yolu toprak kayıplarının bütün havza genelinde nerede ve nasıl gerçekleştiğinin bilinmesinden geçmektedir. Buna karşın çalışma alanımız gibi büyük havzalarda bu tür çalışmaların sürdürülebilmesi oldukça zordur. Bu yüzden, havzada yüzeysel akış ve sediment birikimini belirleme yöntemleri basit yöntemlerden, karmaşık yöntemlere kadar değişiklik gösterir (Puno, 2014). Takriben daha küçük havzalarda, araziden alınan su örneklerinin laboratuvarda incelenmesi gibi klasik ve basit yöntem ile toprak kayıpları hesaplanabilirken, daha büyük havzalarda basit yöntemler işlevsiz ya da yetersiz kalmaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA), erozyonun meydana gelmesindeki doğal ve beşeri faktörlerin incelenmesinde literatüre farklılıklar katmıştır. Bu çalışma da kullanılan GeoWEPP (Geospatial Interface for the Water Erosion Prediction Project; Su Erozyon Tahmin Projesi) modeli de bu teknolojik gelişmeler sayesinde ortaya çıkmış erozyon tahmin modellerinden önemli bir tanesidir (Flanagan & Livingston, 1995). RUSLE ve benzeri ampirik modellerle kıyaslandığında GeoWEPP, süreç odaklı bir yaklaşım sunarak yüzeysel akış ve sediment taşınımını mekânsal olarak daha gerçekçi biçimde temsil etmektedir. GeoWEPP'te kullanılan veri setleri; arazi örtüsü, arazi kullanımı, eğim, iklim koşulları, toprak özellikleri ve arazi yönetimi bilgilerini içeren girdi dosyalarından oluşmaktadır (Dursun & Babalık, 2023). "The Water Erosion Prediction Project" (WEPP) toprak özellikleri, iklim, bitki örtüsü ve topoğrafik durum gibi erozyona sebep olan etmenleri esas alarak, erozyon ve toprak kaybını belirlemek için oluşturulmuştur (Flanagan & Livingston, 1995). WEPP modeli, infiltrasyon, yüzeysel akış, erozyon ve depolama miktarlarını hesaplayan, süreç odaklı bir modeldir. Bu özelliği nedeniyle, erozyon ve sediment verimini değerlendirebilmek için yüksek çözünürlüklü ve detaylı girdi verilerine ihtiyaç duyar. Model, erozyonun mekansal dağılımını ortaya koymanın yanı sıra debi, yağış rejimi ve sediment iletim oranı (SİO) gibi hidrolojik faktörlerin analizine de olanak tanır. WEPP yazılımının CBS ile entegre edilmiş hali olan GeoWEPP (Flanagan & Nearing, 1995), geniş havzalardaki toprak ve su erozyonunun tahmininde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, geniş bir alanı kapsayan araştırma sahasında erozyon değerlendirmesini daha hızlı ve ekonomik bir şekilde yapabilmek amacıyla GeoWEPP modelinin kullanımı tercih edilmiştir.

Çalışma alanı Arhavi Kapisre Deresi Havzası (AKDH) ülkemizin Doğu Karadeniz bölgesinde yer alan diğer bölgelere oranla barındırdığı yüksek erozyon riskinin yanında doğal afetlerin de sıklıkla görüldüğü bir havza özelliğindedir (Görüm vd., 2025; Anılan vd., 2016). Çalışma alanı olan Kapisre Deresi'nde 22 Temmuz 2021 tarihinde sabaha karşı başlayan yağış ile metrekareye ortalama 174 mm yağmur yağması sonucu büyük bir sel felaketi gerçekleşmiştir. Binlerce insanın hayatını olumsuz etkileyen bu felaket, havzanın taşıdığı risk faktörlerinin ne denli önem taşıdığının bir örneğidir.

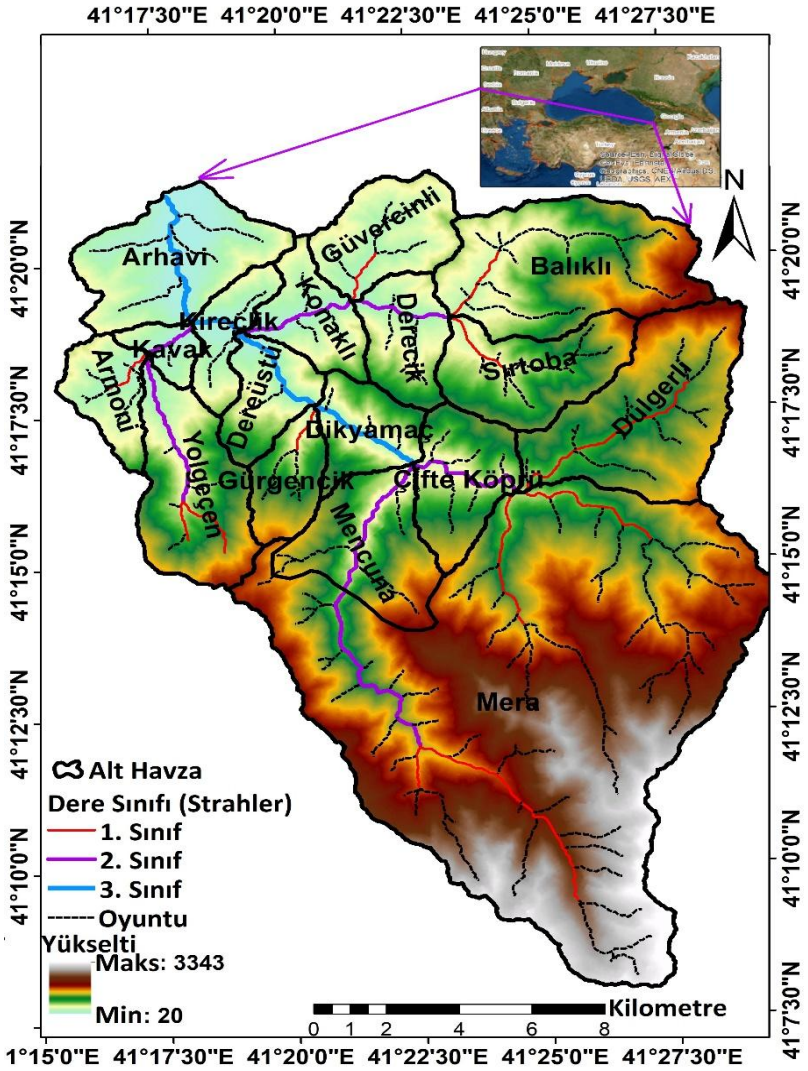
Bu çalışmanın amacı, yoğun yağış, engebeli topoğrafya ve hassas arazi kullanımı gibi faktörler nedeniyle yüksek erozyon riski taşıyan Arhavi Kapisre Deresi Havzası'nda, GeoWEPP yazılımı ile havza ölçeğinde toprak erozyonu ve sediment verimini modellemek ve niceliksel olarak havza ve alt havzalar bazında tahmin etmektir. Söz konusu modelleme çalışması, havzadaki erozyonun miktar ve dağılımını, çeşidini (yamaç ve kanal) ve hangi spesifik alt havzalarda daha şiddetli gerçekleştiğini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Modelleme sonucunda elde edilecek olan yıllık erozyon miktarı, sediment verimi ve yüzeysel akış miktarı gibi veriler, erozyonun en yoğun yaşandığı kritik alanların tespit edilmesine olanak sağlayacaktır.

Bu bulgular, havzada yapılacak arazi yönetimi uygulamaları, sürdürülebilir ormancılık faaliyetleri ve olası toprak koruma, sel/taşkın kontrol projeleri için bilimsel veriye dayalı bir altyapı oluşturacak, böylece erozyonun olumsuz etkilerinin azaltılması ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı için etkin bir planlama ve karar destek aracı sunacaktır. Havzada erozyona duyarlı alanlarda uygulanacak önlemler, verimli toprakların korunmasını sağlayarak gelecek nesillere aktarılması büyük öneme sahiptir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanının Coğrafi Konumu ve Özellikleri

AKDH, Türkiye'nin kuzeydoğusunda, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Artvin iline bağlı önemli bir sahil yerleşimidir. İlçe, Karadeniz'e kıyısı bulunan dar bir kıyı şeridi ile hemen gerisinde yükselen dik ve engebeli dağlık bir topoğrafyaya sahiptir. Alan 41°10′ 00″ ile 41°22′ 30″ kuzey enlemleri, 41°17′ 00″ ile 41°27′ 30″ doğu boylamları arasında yer almaktadır. Çalışma kapsamında, uydu görüntüleri ve bölgeye ait topoğrafik paftalar yardımı ile oluşturulan, bölgeye ait arazi kullanımı haritasından elde edilen sonuçlara göre AKDH; toplam 29913,89 hektardan oluşmaktadır. Yaklaşık 26 bin hektarı orman ve mera alanlarından, kalan kısımları da tarım ve yerleşim alanlarından oluşmaktadır. Tarım alanlarının çoğunluğu çaylık ve fındıklık alanlardan oluşmaktadır. Havzanın tamamı neredeyse Artvin il sınırları içerisinde olup batı sınırları Rize ilinin Fındıklı ilçesi ile paylaşılmaktadır. Kuzey şeridini Karadeniz sahili ve Hopa ilçesi, doğusunu Murgul, güney şeridi Arhavi ilçe sınırları ve batısını Rize ili Fındıklı ilçesi oluşturmaktadır (Şekil 1). AKDH'nın yükseltisi 20 ila 3343 m arasında değişmekte olup, ortalama deniz seviyesinden yüksekliği 1672 m'dir. Ortalama eğimi %53 olup yıllık ortalama yağış ise yaklaşık 2000 mm'dir. Verilere bakıldığında çalışma alanının yüksek dağlık bir arazide yer aldığı görülmektedir. Bölge, aynı zamanda yoğun yağış sonucu sıklıkla yamaç erozyonu, heyelan ve taşkın gibi doğal süreçlere maruz kalmaktadır (Yavuz vd., 2023; Uzuner & Selim, 2019).



Şekil 1: Çalışma alanının genel konumu

Çalışma Alanının İklimi: Arhavi, Karadeniz'e ait nemli havanın etkisi altında bulunmakta ve yüksek bir arazi yapısına sahip olduğu için sık sık yağış görülmekte ve sis oluşmaktadır (Yüksek & Ölmez, 2002). Bölgede en düşük sıcaklık değerleri kış aylarında (Ocak-Şubat), en yüksek değerler ise yaz aylarında (Temmuz-Ağustos) gözlenmektedir.

Arhavi, Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki konumu itibarıyla ılıman okyanusal iklim özellikleri sergilemektedir. İlçenin iklimi, yüksek ve yıl boyu dengeli dağılıma sahip yağış miktarı, nispi nem ve ılıman sıcaklık değerleri ile karakterizedir. Yazları serin ve yağışlı, kışları ise ılık ve yağışlı geçen Arhavi'de kar yağışı sahilde nadir görülmekte, ancak yüksek kesimlerde etkili olmaktadır. Yıllık ortalama sıcaklık 14-15°C civarında seyretmekte, en soğuk ay ortalaması Ocak'ta ~7°C, en sıcak ay ortalaması ise Ağustos'ta ~23°C olarak ölçülmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2025). Bölge, dağların hâkim rüzgâr yönüne dik uzanması ve engebeli yapısı nedeniyle Türkiye'nin en yüksek yıllık yağış miktarlarından birini (2000 mm'nin üzerinde) alır; yağış rejimi düzenli olup, her mevsim yağış görülmektedir. Bu yoğun yağış, güçlü yüzey akışı ve beraberinde önemli bir çevre sorunu olan toprak erozyonu riskini de kaçınılmaz kılmaktadır.

Arhavi bölgesinde, çalışma alanında uygulanacak erozyon tahmin modelinde kullanılması için referans alınan 2019-2021 yılları arası yağış ve sıcaklık verileri Tablo 1'de gösterilmiştir. 3 yılın yıllık ortalama toplam yağış miktarı 2265 mm'dir. Verilerin alındığı istasyon ismi ARHAVİ, numarası 18554 ve rakımı 290 m'dir.

Tablo 1: Arhavi'de 2019-2021 ortalama sıcaklık (maksimum/minimum) ve yağış

	Ocak	*Şubat*	*Mart*	*Nisan*	*Mayıs*	*Haziran*	*Temmuz*	*Ağustos*	*Eylül*	*Ekim*	*Kasım*	*Aralık*
Ort. Maks. Sıcaklık (°C)	12	10,7	11,8	15,6	21,4	24,7	26,1	25,8	23,4	20,6	16,6	14,7
Ort. Min. Sıcaklık (°C)	4,5	3,6	4,7	7,7	12,5	17	18,8	18,8	16,2	13,1	9,1	7
Ort. Yağış (mm)	105,4	132,5	137,6	71,4	85,9	77	376,6	193,5	276,6	223,1	314,4	340,7

Çalışma Alanının Bitki Örtüsü ve Toprak Yapısı: Arhavi, yoğun yağış ve belirgin topoğrafya ile şekillenen zengin ve katmanlı bir bitki örtüsüne sahiptir. Kıyı kesimlerinden itibaren, geniş yapraklı nemli ormanlar hâkim olup, alanın egemen ağaç türleri başta sarıçam *(Pinus sylvestris L.*) olmak üzere, sakallı kızılağaç (*Alnus glutinosa subsp. barbata*), Anadolu kestanesi (*Castanea sativa*) ve seyrek olarak da yaşlı kayın ormanları görülmektedir. Alanda çok sayıda Kolşik kökenli relik tür yayılış göstermektedir (Eminağaoğlu, 2015). Kızılağaç (*Alnus glutinosa*), Arhavi ve genel olarak Doğu Karadeniz bölgesinin vejetasyonunda kritik bir role sahip olan karakteristik bir ağaç türüdür. Kızılağaç, Arhavi'deki bitki örtüsünün ayrılmaz bir parçasıdır. Yüksek rakımlı alanlarda Orman Gülü (*Rhododendron ponticum*) ve Likarpa (*Vaccinium arctostaphylos)* gibi yoğun çalı formasyonları ve mera alanlarında turbalıklar yaygındır (Kurdoğlu & Akbulut, 2015).

AKDH; toplam 29913,89 hektar alandan oluşup, % 7,81'lik (2336,3 ha) alan çaylık, % 4,71'lik (1409 ha) alan fındıklık, % 56,22'lik (16817,6 ha) alan orman, % 30,58'lik (9147,6 ha) alan mera ve % 0,67'lik alan diğer arazi kullanımlarından oluşmaktadır (Yağcı, 2024).

Jeolojik yapı Ardeşen-Fındıklı-Arhavi-Hopa arasındaki kıyı şeridi ve gerisinde güneye doğru hızla yükselti kazanarak akarsularla derin şekilde platolarda ve dağlık arazilerde çeşitli jeolojik devirlere ait tortul, volkanik ve derinlik kayaçlarından meydana gelmektedir. Büyük Toprak Grubu (BTG) kapsamında Artvin için değerlendirilecek olunursa, toprak grubunun neredeyse yarısı (%49.65) kahverengi orman toprağı (M), ilçe bazında değerlendirildiğinde, Arhavi'nin %84.24'ünün kırmızı-sarı podzolik topraklardan (P) oluştuğu tespit edilmiştir (Yavuz Özalp vd., 2013).

2.2. GeoWEPP ile Erozyon Tahmini

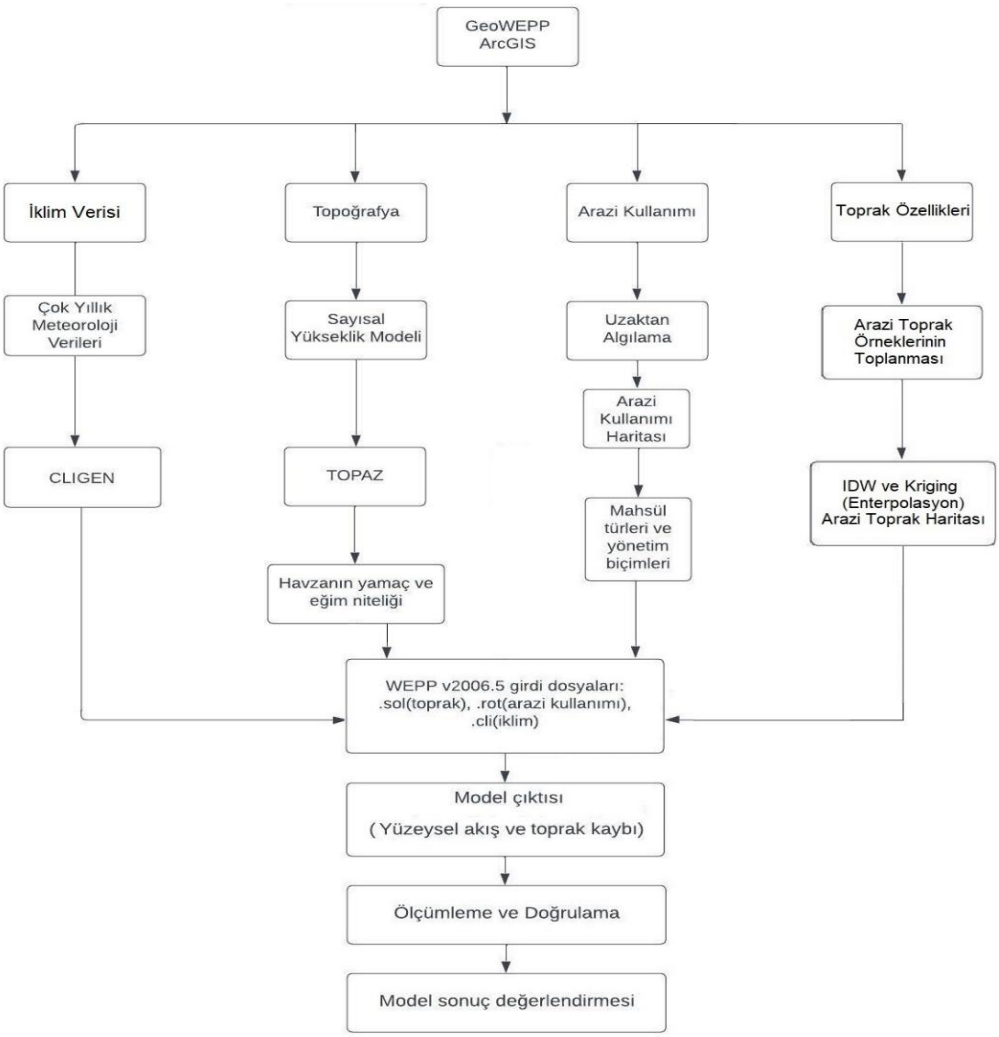
CBS, coğrafi verileri elde etmek, biriktirmek, soruşturmak, analiz etmek ve görüntülemek için kullanılan bilgisayar tabanlı sistemdir (Chang, 2019). GeoWEPP erozyon modelinin yürütülmesi çalışmasında, modelin alt yapısını oluşturan, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), arazi kullanım şekilleri haritası, dere ağı, bakı haritası, toprak haritası, alt havza bölümleri verilerinin bilgisayara girilmesi ve değerlendirilmesinde CBS yazılımı olan ve ESRI (Environmental System Research Institute) tarafından geliştirilen ArcGIS yazılımı kullanılmıştır.

WEPP modeli, hidroloji, erozyon mekaniği, bitki gelişimi ve kanal hidrolojisi esasları üzerine kurulmuş, toprak erozyonunu ve yamaçlardan ve alt havzalardan sediment iletimini tahmin etmeye yönelik sürece dayalı, yeni bir erozyon tahmin modelidir (Flanagan & Nearing, 1995). WEPP modeli, yamaç ve havza ölçeğindeki erozyonu tahmin etmek için hidroloji, bitki örtüsü ve erozyon mekaniğini birleştiren WEPP yamaç modelinin bir uzantısıdır. Modele etki eden toplam dokuz bileşen; iklim oluşumu, kış süreci, sulama, hidroloji, toprak, bitki gelişimi, ayrışma, yüzeysel akış, erozyon ve depolamadır. Model, topoğrafya, toprak tür ve niteliği, tarım ve arazi kullanım koşullarındaki mekânsal ve zamansal değişkenlikleri dikkate almaktadır (Singh vd., 2020) (Şekil 2).

WEPP modelinin sahip olduğu bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda; küresel ve ülkemizde sıkça kullanılan bir program olma özelliği taşımaktadır.

Ayrıca CBS ve UA tekniklerinin WEPP modeli ile bütünleştirilebilmesi, kullanıcıların bu modeli kullanmasındaki önemli sebeplerden biridir. Diğer erozyon modellerindeki parametrelere oranla modelin sunduğu zengin ve geliştirilmiş parametreler WEPP modelini öne çıkaran önemli bir özellik olarak değerlendirilmektedir.

GeoWEPP, CBS'nin gelişmiş özelliklerinin WEPP v2006.5 modeliyle entegre edilmesiyle geliştirilmiş bir ara yüzdür (Renschler, 2003). Bu entegrasyon sayesinde, arazi girdi parametreleri coğrafi referanslı SYM ve topoğrafik haritalardan türetilebilmektedir (Zhang vd., 2014). CBS'nin sağladığı olanaklar, arazideki karmaşık topoğrafik yapının belirlenmesine imkân tanımaktadır (Flanagan & Livingston, 1995). GeoWEPP ara yüzünün geliştirilmesi sürecinde WEPP modeli, ArcGIS ve topoğrafik parametrelerin otomatik çıkarımını sağlayan Topographic Parameterization (TOPAZ) yazılımıyla entegre edilerek büyük havzalardaki karmaşık verilerin daha etkin yönetilmesi amaçlanmıştır (Garbrecht & Martz, 1999; González vd., 2016; Flanagan vd., 2013). TOPAZ'ın sunduğu havzaları yamaçlara bölme, drenaj ağı oluşturma ve akış yönlerini belirleme gibi özellikler, büyük ölçekli havzalarda erozyon tahmin modellemesini mümkün kılmıştır. Nihayetinde, CBS ve TOPAZ'ın WEPP modeliyle bütünleştirilmesiyle oluşturulan GeoWEPP, havzalardaki erozyon değerlerinin hem harita hem de grafik formatında görselleştirilmesine ve analiz edilmesine olanak sağlamıştır (Martz & Garbrecht, 1993; Lyon, 2003).



Şekil 2: GeoWEPP'in modelleme tekniği şeması

2.3. GeoWEPP Altlık Veri Girişleri

Sayısal Yükselti, Eğim ve Bakı Haritası; F46b4, F46b3, F46c1 ve F46c2 1/25.000 ölçekli memleket paftaları sayısallaştırılarak eş yükselti eğrileri verileri elde edilmiştir. CBS yardımıyla eş yükseklik eğrileri ile oluşturulan sayısal yükseklik modeli (SYM) yardımıyla eğim ve bakı haritaları oluşturulmuştur.

Arazi Kullanım Haritası; Havzada mevcut her farklı arazi kullanım tipi için ayrı birer (.rot) uzantılı text formatında arazi kullanım dosyaları oluşturulmuştur. Çalışma alanı arazi kullanımı bakımından düşük çeşitlilikte bir yapıya sahiptir. Havzada en yaygın arazi yapısı ormanlardan oluşup, bunu sırasıyla mera, çay, fındık ve kentsel yapı arazi kullanım türleri takip etmektedir. Özellikle çaylık ve fındıklık alanlar güncel uydu görüntüleri kullanılarak revize edilmiştir.

Her alt havza için özel "landcov" (description) ve "landcovdb" (database) dosyalarına ihtiyaç duymaktadır. "Landcov" (description) uzaktan algılama ve örneklendirme ile oluşturulup, arazilerin kullanımına ait bilgiler içermektedir. "Landcovdb" (database) WEPP'in veri setinde bulunan U.S. Department of Agriculture (USDA) bünyesinde belirlenen kayıtlı verilerden oluşup, mevcut çalışma alanındaki arazi kullanımına en uygun olan veri tipleri (tarım, orman ve mera gibi) kullanılmıştır. Arazi kullanımlarının içeriklerinde ağaç veya ot boyutları, türleri gibi bilgiler mevcuttur.

Toprak Sınıfları Haritası; Havzadaki her farklı toprak türünün diğerlerinden farklı hidrolojik ve fiziksel özellikler taşımaktadır. Bu nedenle WEPP modeli üzerinden havzadaki mevcut farklı toprak türlerinin her biri için ayrı toprak dosyaları üretilmiştir. Çalışma alanında kum, kil, toz ve organik madde içeriği, katyon değişim kapasitesi ve albedosu, formüller veya WEPP modelinin istenildiği durumda kendisinin de hesaplayabileceği rill ve interril erodibilitiler, kesme direnci ve hidrolik iletkenlik değerleri, WEPP modeli üzerinden (.sol) uzantısını taşıyan toprak dosyasının oluşturan veriler olarak hazırlanmıştır. WEPP ortamında üretilen (.sol) uzantılı toprak dosyaları, ArcGIS ortamında oluşturulan raster formatındaki toprak haritasındaki karşılığı olan piksellerle eşleştirilmesi gerekmektedir. Bunu sağlamak için programın yürütülmesinden önce, çalışılan her havzaya özel "soildb" (database) ve "soilmap" (description) olmak üzere iki adet text dosyası kullanılmıştır.

Alt Havzaların Bölümlendirilmesi; Araştırma alanında alt havzalar dere, tepe ve sırt sınırları dikkate alınarak ArcGIS Hydro kullanılarak oluşturulmuştur. Belirlenen alt havzalar sınırları içerisinde, arazi kullanım türü, toprak özellikleri, hidrografik özellikleri, bitki örtüsü, iklimi bakımından birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Böylelikle bu alt havzalarda, görülen bu farklılıkların erozyon üzerinde görülebilecek etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Alt havzalar/alanlar toplam 17 adettir. Dere ağı, kadastral paftaların ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin üzerinden sayısallaştırılarak oluşturulmuştur.

İklim Verileri; Çalışma alanının 2019-2020-2021 yılların ait 3 yıllık iklim verileri Artvin Meteoroloji İstasyonu'ndan alınmıştır. Yıllara ait toplam yağış miktarları sırasıyla; 2019 yılı 1821,9 mm, 2020 yılı 2239,2 mm ve sel felaketinin gerçekleştiği 2021 yılında 2733,9 mm'dir. Kullanılan iklim verileri oluştururken birden fazla yılın değerleri, özellikle yaşanan sel felaketi nedeniyle normale oranla yaklaşık 600 mm daha fazla yağışın görüldüğü 2021 yılı da, dâhil edilerek havzanın ortalama iklim profili belirlenmesi amaçlanmıştır. Havzadaki iklim verileri, CLIGEN programı kullanılarak hazırlanmıştır. Bu program, özellikle WEPP modeli için gerekli olan yağış, sıcaklık, rüzgâr ve diğer meteorolojik parametreleri oluşturmak üzere kullanılmıştır. Veriler günlük formatta programa girilmiştir. CLIGEN bu verileri aylık ortalamalara dönüştürmektedir. İklim dosyası içeriği, bölgenin yükseltisi, enlem ve boylamları, aylık yağışın yağışlı gün sayısı oranı (Mean P), aylık yağışın standart sapması (S. DEV. P), aylık yağışın çarpıklığı (SKEW P), yağışsız günü takip eden yağışlı gün (P(W/D)) ve yağışlı günü izleyen yağışlı gün sayıları (P(W/W)), aylık ortalama max. (TMAX AV) ve min. sıcaklık değerleri (TMIN AV), aylık maksimum (SD TMAX) ve minimum sıcaklık değerlerinin standart sapması (SD TMIN), günlük ortalama global güneş radyasyonu ve standart sapmaları (SOL.RAD / SD SOL), en büyük yağış değerleri (30 dakikalık ve 6 saatlik, MX .5 P), günlük ortalama nem (DEW PT), ortalama saatlik rüzgar hızı ve yönü, aylık yönlere göre esme sayısı verilerinden oluşmaktadır.

Bahsi geçen bütün bu değerler WEPP'in tanıdığı (.par) uzantılı text dosyasının içeriğini oluşturmaktadır. Oluşturulan (.par) dosyası WEPP üzerinden "Add Climate Location" seçeneği kullanarak, GeoWEPP'in yürütülmesi aşamasında kullanacağı cligen (.cli) uzantılı iklim dosyası oluşturulmuştur. Cligen dosyası; verilerin girildiği par dosyasını kullanarak GeoWEPP tarafından üretilen 30 yıllık iklim verisine dönüşmektedir.

2.4. GeoWEPP'in Yürütülmesi

Model programı öncesinde belirlenen her 17 alt havza için ayrı ayrı çalıştırılmıştır. DEM, arazi kullanımı ve toprak haritaları öncelikle "Polygon to Raster" komutu ile poligon formatından 30x30 hücre boyutunda raster formatına, raster formatına dönüştürülen DEM, arazi kullanımı ve toprak haritası altlıkları "Extract by Mask" seçeneği ile her alt havza için ayrı ayrı kayıt edilmiştir. Ayrılan her bir alt havzaya ait altlık haritalar GeoWEPP'in istediği ASCII formatında "Raster to ASCII" komutu ile çevrilmiştir. Daha önce toprak sınıfları ve arazi kullanımları için her havza özelinde ayrı ayrı oluşturulmuş "description" ve "database" dosyaları bu ekranda programa tanımlandırılması yapılmıştır.

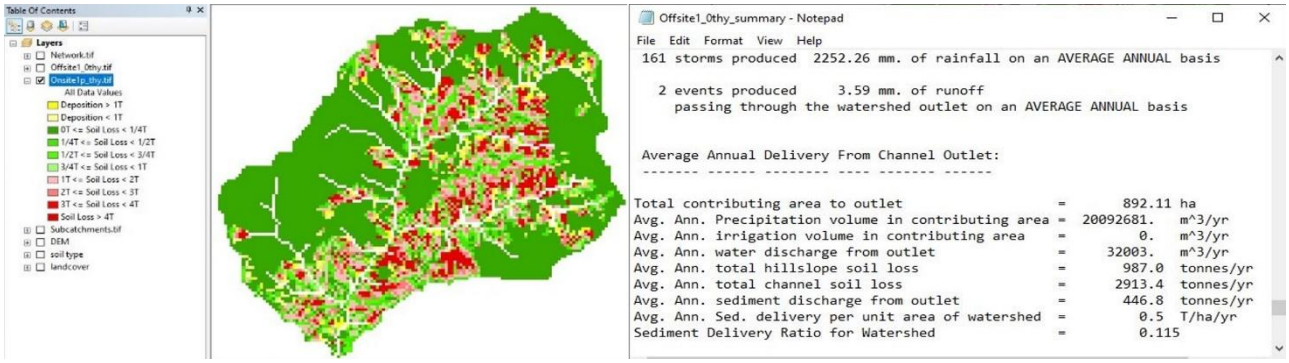
Verilerin dosya konumları tanımlandıktan sonra projenin ismi belirlenir ve "Start Processing" komutu ile GeoWEPP modeli ArcGIS ortamına aktarılır. Bu komuttan sonra artık seçilen alt havzanın DEM, toprak, arazi kullanım haritaları ve verileri ArcGIS ortamında GeoWEPP modeli tarafından toprak kayıplarının, sediment depolanmasının, yamaç ve derelerde meydana gelen toprak kayıplarının hesaplanmasında kullanımı için hazır hale getirilmiştir.

Program çalıştırılırken kullanılan Critical Source Area (CSA) ve Minimum Source Channel Length (MSCL) kavramları arazinin hidrografisini ve kanal ağını etkileyen iki parametredir. TOPAZ; çizeceği dere ağının yoğunluğunu bu iki parametre için belirlenen değerler doğrultusunda oluşturacaktır. Bu çalışmada GeoWEPP'in varsayılan değerleri olan CSA 5 hektar, MSCL 100 metre değerleri kullanılmıştır (Erdoğan Yüksel, 2015; Dursun & Babalık, 2023).

Drenaj ağı belirlendikten sonra havzanın memba (çıkış) noktasına ait piksel tespit edilir ve "Specify the Outlet Point Watershed" komutu bu piksel seçilerek GeoWEPP'e çıkış noktası tanıtılır. Buna göre GeoWEPP çalışılan alanı "subcathment" olarak adlandırdığı alt havzalara bölümlendirir. Oluşan havzaların sayısı, farklı CSA değerinin girilmesi sonucunda değişen drenaj ağına bağlı olarak, değişiklik gösterebilir (Yıldırım, 2019).

Modelin çalışacağı arazinin toprak sınıfları, arazi kullanımı, yükseltisi ve drenaj ağı faktörleri belirlendikten sonraki adım iklim parametrelerinin tanıtılmasıdır. WEPP ortamında oluşturulan iklim dosyaları bu kısımda modele tanımlanarak işleme devam edilir. Bunun için ArcGIS, GeoWEPP modülü içerisinde yer alan "Get the erosion pattern in the watershed" komutu kullanılır. Komut sonrasında ekrana gelen "WEPP Climate Selection" penceresinde, ülke kısmına TURKEY, istasyon kısmına .par uzantılı ARHAVİ TUR ve son olarak hazırladığımız .cli uzantılı iklim dosyaları tanımlanır.

Arazi ve toprak verilerinin kontrolleri yapıldıktan sonra artık GeoWEPP erozyon modelinin yürütülmesi için son adıma geçilir. Son pencerede daha öncesinde girilmiş olan arazi yönetimi, toprak sınıfları, drenaj ağı ve iklim dosyalarında değişiklik yapılması seçeneği bulunmaktadır. Simülasyonun kaç yıllık yapılacağı seçildikten sonra "Run WEPP" komutu ile erozyon tahmin modeli başlatılmıştır. Simülasyon 20 yıllık ve 1 yıllık olarak çalıştırılmıştır. Ancak 1 yıllık simülasyon sonuçları kayda değer bulunamadığı (sıfıra yakın) için paylaşılmamıştır. Simülasyon sonunda her alt havzanın toprak kaybı haritası ve miktarları bir tablo şeklinde sonuçlandırılır (Şekil 3). 17 Alt havzanın sonuçları toplanarak tüm havza için sonuç değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3: Güvercinli alt havzası'nda GeoWEPP sonuçları

SİO, yamaçlarda ve kanallarda görülen toplam erozyon miktarlarının toplam sediment verimine (ton/yıl) bölünmesiyle hesaplanır. SİO kısaca havzadaki erozyona uğrayan toprak miktarının hangi oranla havzadan tahliye edildiği (sediment verimi) anlamına gelir. Toplam sediment veriminin (ton/yıl) toplam çalışma alanına (ha) bölünmesiyle birim alan sediment verimi (ton/ha/yıl) hesaplanmaktadır. Birim alandaki sediment verimi hesaplanırken kullanılan alan verisi, GeoWEPP'in çalıştığı her alanda kırpma işlemi sonucunda ortaya çıkan alan değeridir. Bu çalışmada toplam alan 29913,89 hektar olmasına rağmen, GeoWEPP raster formatında çalışması dolayısıyla ve 30 metrelik piksel boyutları sebebiyle alt havzaların sınırlarında kırpmalara ve neticesinde alansal azalmalara sebebiyet vermiştir. Bu nedenle GeoWEPP sonuçlarında kalan alan miktarı 25192,76 hektar olarak hesaplanmıştır.

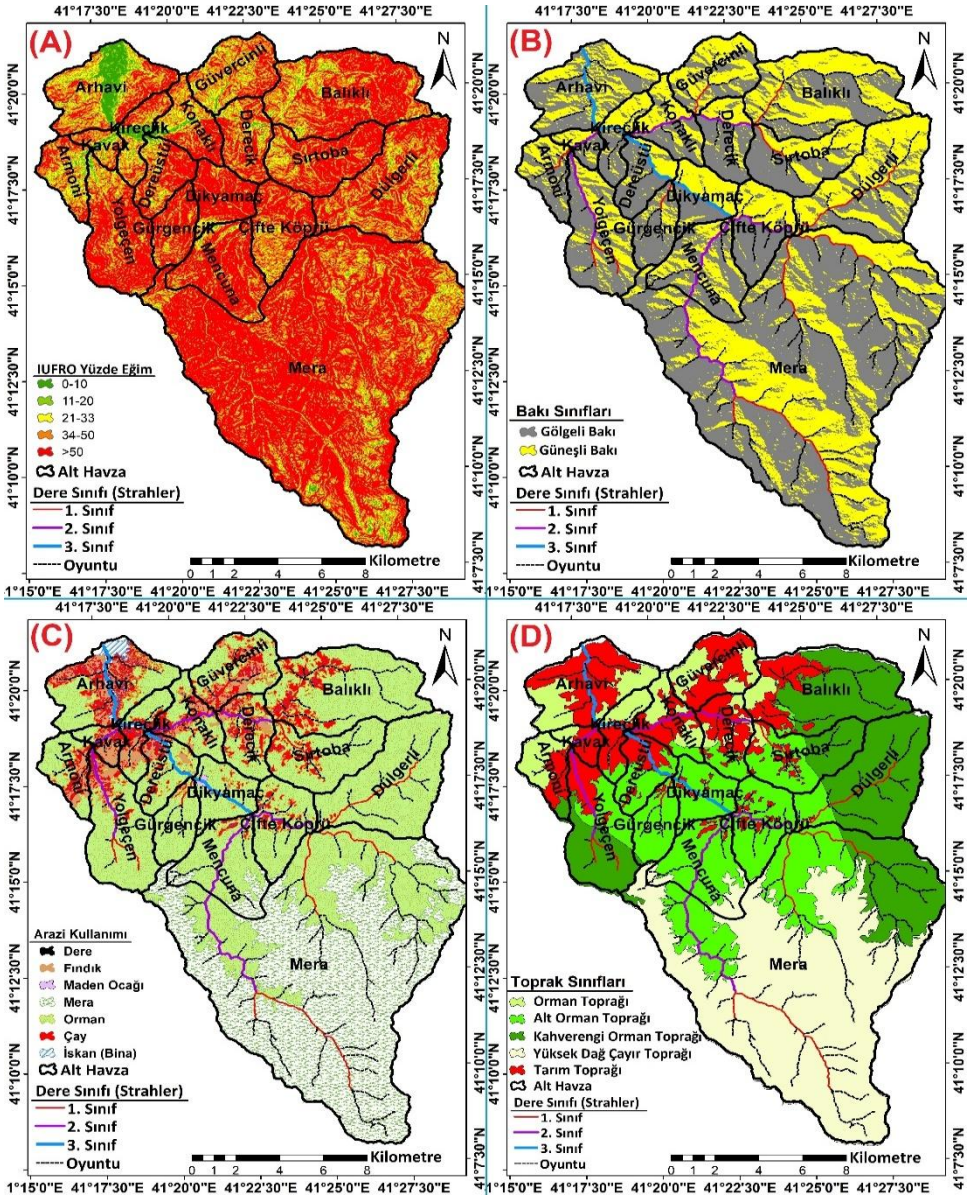
2.5. GeoWEPP Modeli için Üretilen Altlık Haritalar

Sayısal Yükseklik Modeli ile elde edilen Eğim ve Bakı Haritaları; Havza alanında ortalama eğim %53 olarak bulunmuştur. Eğim haritası üzerinde AKDH'nin eğim oranları IUFRO (International Union of Forest Research Organizations) eğim sınıflarına göre incelendiğinde %46,89 oranında çok dik (>%50), %30,07 oranında dik (%34-50), %14,65 oranında orta (%21-33), %5,56 oranında hafif (%11-10) ve %2,79 oranında düz (%0-10) eğime sahiptir (Şekil 4A). Böylelikle havzanın genelinin (%76,96) dik ve sarp/çok dik bir arazi yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bu yapı tarımsal faaliyetlerin kapsadığı alan ve çeşitliliğinde önemli oranda kısıtlayıcı bir rol oynamaktadır. Bu yüzden alanda hakîm olan tarımsal faaliyetler sadece çay ve fındık olarak öne çıkmaktadır.

AKDH'nin fizyolojik özelliklerinden bakı durumu değerlendirildiğinde; %43,93 gölgeli bakı ve %56,07 güneşli bakı oranları ile birbirine neredeyse eşit değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu yüzden havzada baskın bir bakı karakteristiği görülmemektedir (Şekil 4B). Havzanın bakı durumu doğrudan program tarafından kullanılmasa da, dolaylı olarak (rüzgâr verisindeki yönler dolayısıyla) etki gösterebilmektedir.

Elde Edilen Toprak Sınıfları ve Arazi Kullanım Haritaları; Güncel uydu görüntüleri kullanılarak arazi kullanımları tespit edilmiştir (Yağcı, 2024). ArcGIS ortamında hazırlanan arazi kullanımında %7,81'lik (2336,3 ha) alan çaylık, %4,71'lik (1409 ha) alan fındıklık, %56,22'lik (16817,6 ha) alan orman, %30,58'lik (9147,6 ha) alan mera ve %0,67'lik alan diğer arazi kullanımları şeklindedir (Şekil 4C). Toprak verileri ise bu çalışmayla birlikte havzada eşgüdümlü olarak yürütülen diğer bir çalışmadan elde edilmiştir (Yıldırım, 2025; Duman vd., 2023). Toprak verilerinin toplanması hususunda çalışma alanın tamamın karakteristik özelliklerinin örneklerini barındıran arazi kullanım şekilleri ve coğrafik koşullar göz önünde tutulmuştur. Havzanın baskın tarımsal arazi kullanımı olan çay ve fındık parsellerinden 33'er adet toplam 66 örnek, ormanlardan 66 adet ve meralardan 22 adet örnek olacak şekilde toplamda 154 farklı noktadan 0-15 cm (üst) ve 15-30 cm (alt) olmak üzere 2 derinlik kademesinde 308 adet toprak örneği toplanmış ve programa girilmiştir. Toplanan örneklerin laboratuvar analizleri sonucunda elde edilen kum, kil, toz, organik madde, toprak hacmi ve taşlılık gibi sonuçları erozyon tahmin modelinin girdi verilerinden biri olan toprak dosyasının hazırlanılışında kullanılmıştır.

308 toprak örneğinin laboratuvar analizleri sonucunda elde edilen ortalama kum, kil ve toz oranı sırasıyla; %72,9, %13,4 ve %13,7'dir. Bu harita oluşturulurken; alandan toplanan toprak verileri, mevcut olan bitki örtüsü altlığı ve yükselti aralıkları dikkate alınarak ArcGIS ortamında tamamlanmıştır (Şekil 4D). Her toprak sınıfı için ayrı oluşturulan dosyalarda; konum olarak her bir sınıfın içine düşen toprak örneklerinin ortalamaları programa girişte kullanılmıştır. Havzada %8,06 orman toprağı, %24,84 alt orman toprağı, %22,53 kahverengi orman toprağı, %29,72 yüksek dağ çayır toprağı ve %14,82 tarım toprağı mevcuttur. Her alt havza için toprak verisi ve haritası ayrıca hazırlanmış ve yürütülmüştür.



Şekil 4: AKDH Sırasıyla: a) IUFRO eğim sınıfları, b) bakı, c) arazi kullanımı, d) toprak sınıfı haritaları

3. Bulgular ve Tartışma

GeoWEPP Programı Erozyon Sonuçları; 2019, 2020 ve 2021 yıllarına ait Arhavi iklim verileri kullanılarak oluşturulan iklim dosyası, toprak dosyası ve USDA (United States Department of Agriculture) bünyesinde kabul edilen, mevcut çalışma alanındaki arazi kullanımına en uygun olan arazi kullanım tipleri ile oluşturulan arazi kullanım dosyası ile GeoWEPP yazılımı kullanılarak AKDH'de 20 yıllık erozyon tahmin simülasyonu yürütülmüştür. Toplam yamaç ve kanal sayısı, bu yamaç (hillslope) ve kanallarda (channel) meydana gelen erozyon miktarları, SİO, toplam sediment verimi, simülasyonun yürütüldüğü toplam alan ve birim alandaki sediment verimi Tablo 2'de gösterilmiştir.

SİO ve birim alan sediment veriminin 17 alt havzadaki değerlerinin ortalaması ve 17 alandaki toplam toprak kaybı bazındaki hesaplanan değerler ayrıca belirtilmiştir (Tablo 2). Yürütülen simülasyonun sonuçlarına ait erozyon risk haritası Şekil 5'te sunulmuştur.

Tablo 2: 20 yıllık erozyon simülasyonu tahmin değerleri

Alt Havza Adı	*Toplam Yamaç & Kanal Sayısı*	*Yamaç Erozyonu (ton/yıl)*	*Kanal Erozyonu (ton/yıl)*	*Sediment İletim Oranı*	*Toplam Sediment Verimi (ton/yıl)*	*Alan (ha)*	*Birim Alan Sediment Verimi (ton/ha/yıl)*
Arhavi	226 & 9	1243,5	965,9	0,34	751,9	1227,4	0,61
Armoni	105 & 4	288,6	1632,5	0,32	611,5	499,8	1,23
Balıklı	394 & 170	802,2	6020,5	0,36	2493,6	2091,9	1,17
Çifteköprü	155 & 66	283,6	3440,9	0,09	333,4	849,9	0,39
Derecik	104 & 45	963,2	1725,1	0,22	600,2	659,9	0,90
Dereüstü	94 & 41	678,5	856,5	0,11	173,3	574,7	0,29
Dikyamaç	121 & 53	1016,8	206,4	0,23	276,3	590,0	0,48
Dülgerli	345 & 157	0	1502,1	0,31	461,6	1969,2	0,24
Gürgencik	85 & 37	0	181,1	0,68	123,9	508,2	0,24
Güvercinli	193 & 83	987,0	2913,4	0,11	446,8	892,1	0,48
Kavak	44 & 18	356,8	403,5	0,24	183,7	191,9	0,95
Kireçlik	78 & 34	431,7	109,7	0,61	329,0	407,0	0,81
Konaklı	101 & 42	528,2	553,3	0,21	222,7	596,8	0,38
Mençuna	152 & 67	109,2	2866,0	0,06	168,0	866,4	0,21
Mera	1449 & 640	94,2	142680,6	0,13	18739,8	10847,2	1,71
Sırtoba	183 & 80	355,6	2812,0	0,12	388,6	1100,2	0,35
Yolgeçen	244 & 110	509,5	1597,2	0,26	542,5	1320,2	0,41
Bütün Alan Toplam	***5522 & 2425***	***8648,6***	***170466,7***	***------***	***26846,8***	***25192,8***	***------***
Ortalama				***0,259***			***0,639***
Alan Ağırlıklı Ortalamalar				***0,205***			***1,057***

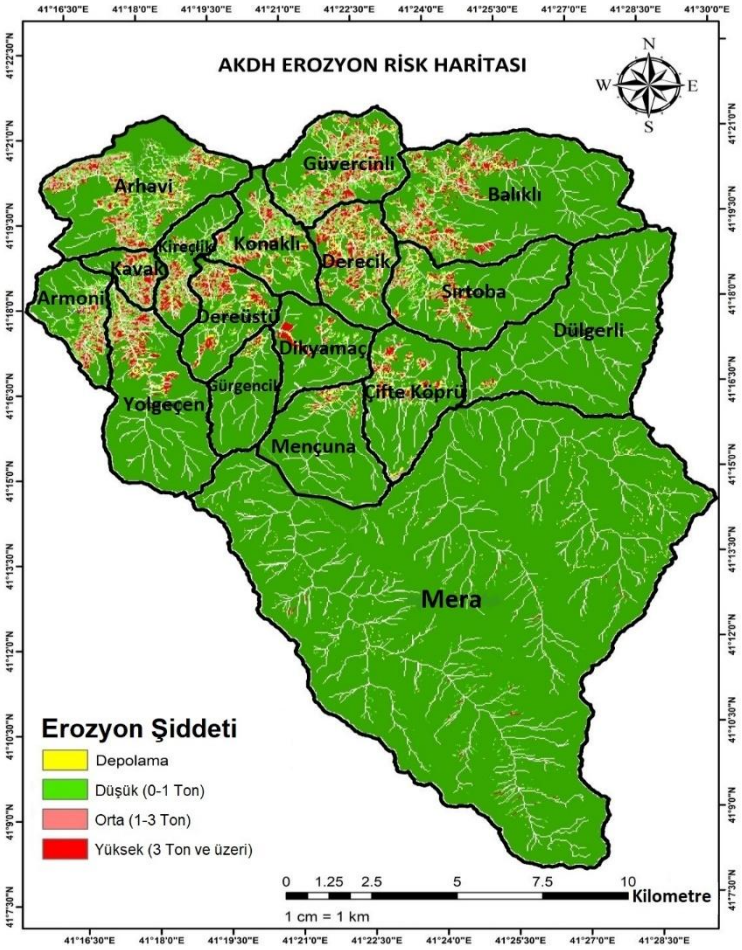
GeoWEPP modeli ile yapılan 20 yıllık simülasyon sonuçları, AKDH ve 17 alt havzaları arasında erozyon ve sediment dinamiği açısından kayda değer farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur (Tablo 2). Model havzada toplamda 5522 adet yamaç ve 2425 adet kanal tespit etmiştir. Model yamaçlardan 1297 ton/yıl, kanallardan 25570 ton/yıl ve havza bazında toplam yıllık sediment verimini 26846,8 ton/yıl olarak hesaplamıştır. Havza geneli için birim alanda 1,057 ton/ha/yıl sediment üretildiği tespit edilmiştir. Model ile tahmin edilen toplam erozyonun %4,8'ini (8648,6 ton/yıl) yamaç erozyonu, %95,2'sini ise (170466,7 ton/yıl) ise kanal (şev ve taban) erozyonunun oluşturduğu belirlenmiştir. Bu durum, havzanın sediment veriminde kanal yapısındaki aşınma ve değişim baskın bir rol oynadığını göstermektedir. Havzanın ormanlık ve mera alanı toplam yüzdesinin (%86,8) fazla oluşu yamaç erozyonunu önemli derecede düşük tuttuğu söylenebilir (%4,8). Alt havzalar ölçeğinde ise en yüksek sediment verimi 18739,8 ton/yıl ile Mera Alt Havzası'ndan kaynaklanmış olup, bu değer havzada üretilen toplam sedimentinin yaklaşık %69,8'ine tekabül etmektedir. Nitekim Mera Alt Havzasının (10847,2 ha) diğer alt havzalara oranla çok daha büyük oluşu bu sonuçta etkin rol oynayan faktörlerdendir.

Çalışmanın uygulandığı 17 alt havzanın ortalama SİO 0,259 ve birim alan ortalama sediment verimi 0,639 ton/ha/yıl iken, tüm havzadaki toprak kayıplarının alan ağırlıklı (alt havza alanlarına göre) ortalamaları incelendiğinde SİO 0,205 ve birim alanda görülen sediment verimi ise 1,057 ton/ha/yıl olarak hesaplanmıştır. Sediment veriminin alt havzalar bazında değişkenlik göstermesi, arazi kullanım türü, topoğrafya, iklim ve toprak özelliklerindeki farklılıklar gibi havza karakteristiklerinin erozyon süreçleri üzerinde belirleyici olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca, alan ağırlıklı ortalama SİO'nın 0,205 olması, erozyonla yamaçlardan (yüzeyden) aşınan toprağın önemli bir kısmının sediment üretimi oluşturmadığını havza içerisinde depolandığını (0,795) göstermektedir. Bu durum havzadaki yoğun bitki örtüsünün varlığına bağlı olarak yamaç erozyonuyla gerçekleşen toprak kaybını da minimal düzeyde tutmuştur. Modelde en düşük SİO 0,06 ile Mençuna Alt Havzasında, en yüksek SİO 0,68 ile Gürgencik alanında görülmüştür. Gürgencik'teki toplam toprak erozyonunun büyük çoğunluğu (%68.41'i) havzadan tahliyesi gerçekleştiği için SİO da yüksek çıkmaktadır. Mera'da ise gerçekleşen toplam erozyonun sadece %13.12'si havzadan tahliye edildiği için de SİO düşük çıkmıştır.

Model simülasyonu birim alan bazında, 1,71 ton/ha/yıl sediment verimi ile Mera Alt Havzası'nın en yüksek toprak kaybına maruz kaldığını ortaya koymuştur. Bu değer, havzadaki diğer alt havza değerlerinden oldukça yüksektir. Buna karşılık, en düşük birim alan sediment veriminin ise 0,21 ton/ha/yıl ile Mençuna Alt Havzası'nda gerçekleştiği belirlenmiştir. Bunu takiben en düşük değerler ise 0,24 ton/ha/yıl ile Dülgerli ve Gürgencik Alt Havzaları'nda gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar, Mera Alt Havzasının özellikle kanal erozyon (142680,6 ton/yıl) kontrolü açısından mutlak öncelikli alt havza olduğunu, Mençuna, Dülgerli ve Gürgencik gibi alt havzalarının ise nispeten daha stabil ve düşük erozyona sahip riskli bir yapı sergilediğini göstermektedir.

Birim alan bazında (ton/ha/yıl) sediment verimi alt havzalar için değerlendirildiğinde arazi kullanımının yamaç ve kanal erozyonu ile gerçekleşen toprak kaybına olan etkisini de göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bu çalışmada Balıklı ve Dülgerli Alt Havzaları alansal olarak birbirlerine oldukça benzer iki havza olup, arazi kullanımı açısından farklılık göstermektedirler. Balıklı havza alanının %15,63'lük kısmında tarımsal faaliyetler yürütülürken, Dülgerli'nin %99,79'u ormanlardan oluşmaktadır (Şekil 4C). Bu durum Balıklı'da yüksek yamaç (802,2 ton/yıl) ve kanal erozyonu (6020,5 ton/yıl) oluştururken, Dülgerli'de çok daha düşük kanal (1502,1 ton/yıl) ve yamaç erozyonu (0 ton/yıl) oluşturmaktadır. Nitekim üretilen erozyon risk haritasında da (Şekil 5) bu ortaya çıkan toprak kayıpları Balıklı Alt Havzası'nda yoğun bir şekilde tespit edilmiştir. Erozyon risk haritasında 1 ton ve üzeri yüksek erozyonun yaşandığı alanlar toplam havza alanının yaklaşık %2,97'lik kısmına denk gelmektedir. Mera Alt Havzası'na (Şekil 5) bakıldığında erozyon riski belirgin olarak tespit edilememektedir. Bunun sebebi erozyon risk haritasının daha çok yamaç erozyonu olan alanları belirgin olarak göstermesidir. Mera Alt Havzası'nda 94,2 ton/yıllık yamaç erozyonu miktarı görülürken kanallarda ise bu değer 142680,6 ton/yıl olarak görülmektedir. Diğer yandan Gürgencik ve Yolgeçen Alt Havzalarını değerlendirecek olursak; Gürgencik %90 üzeri orman alanlarına sahip bir havza olması dolayısıyla haritada en düşük risk alanına sahip alt havzalardan biridir (Şekil 5 & Tablo 2). Yolgeçen Alt Havzasının ise belirgin bir şekilde membasının orman olması dolayısıyla daha düşük risk faktörü taşıdığı görülmektedir. Yolgeçen Alt Havzasının düşük rakımlı mansap kısımlarında ise çay ve fındık tarımının yapıldığı alanlar eğim faktörüyle birlikte yüksek risk taşıyan alanlar olarak haritada tespit edilmiştir (Şekil 5). Yukarıda verilen bilgiler ve karşılaştırmalar ışığında özetleyecek olursak; model ile tahmin edilen erozyon riski sahadaki gerçeklik ile örtüşmekte ve özellikle tarımsal faaliyetler neticesinde ortaya çıkan yamaç erozyonun mekânsal dağılımı önemli düzeyde tespit edilmiştir.



Şekil 5: 20 Yıllık simülasyonun erozyon risk haritası

AKDH'ndaki alt havzalar çoğunlukla dik veya çok dik eğimli alanlardan oluşmaktadır (Tablo 3). Bu yapısından ötürü alt havzalardaki yamaçlar yüksek seviyede erozyon riski taşımaktadır. Bununla beraber eğimin önemli düzeyde yüksek olduğu bu yamaçlarda tarım faaliyetlerinin uygulanması ile doğal bitki örtüsünün tahrip edilmesi sonucu toprağın infiltrasyonun azalması ve yüzeysel akışın artması gibi olumsuzluklar sonucunda toprak kaybı daha da artmaktadır.

Tablo 3'te görüldüğü üzere tarım faaliyetlerinin yoğun olarak sürdürüldüğü Arhavi (%44,8) merkez alanı 0,34 ton/ha/yıl toprak kaybı değeri ile toplamda en fazla yamaç erozyonun görüldüğü alanlardan biridir. Kireçlik ve Kavak Alt Havzaları en fazla tarım (%44,4 ve %71,93) arazi kullanımına sahip olup beraberinde en yüksek yamaç toprak kayıplarına (0,65 ve 0,45 ton/ha/yıl) sahiptir (Tablo 3). Yamaç erozyonun en az görüldüğü bölgeler sırasıyla Gürgencik, Dülgerli ve Mera alt havzalarıdır. Bu alt havzaların ortalama %51'lik kısmı çok dik (>%50) eğime sahiptir. Geriye kalan kısımlarında dik ve orta eğime sahip olmasından ve alanda tarım faaliyetleri neredeyse hiç görülmemesinden dolayı 3 alt havzada (Mera, Dülgerli ve Gürgencik) toplam yamaç erozyonu 94,20 ton/yıl ile diğer alanlara göre düşük bir değere sahip olup genellikle kanallarda toprak kayıpları yaşanan alt havzalardır (Tablo 3 & Şekil 5). Bu durum yamaçlarda meydana gelen erozyon miktarının, yamaçlardaki yüksek eğim ve mevcut tarım faaliyetlerinden dolayı arttığını ve modelinde bu sonucu alt havzalar bazında önemli derecede tespit ettiği gözlemlenmiştir.

Tablo 3: 20 Yıllık simülasyon sonucunda yamaç toprak kaybının arazi kullanımı ve eğimle ilişkisi

Alt Havza Adı	*Alandaki Tarım Arazi Kullanımı Oranı (%)*	*IUFRO'ya Göre Alandaki Baskın Eğim Sınıfı*	*Eğim Sınıfının Toplam Alana Oranı (%)*	*Birim Alan Yamaç Toprak Kaybı (ton/ha/yıl)*	*Birim Alan Kanal Toprak Kaybı (ton/ha/yıl)*
Arhavi	44,84	%34-50	27,66	0,34	0,27
Dikyamaç	4,18	>%50	65,59	0,40	0,08
Güvercinli	46,34	%34-50	40,85	0,12	0,36
Derecik	43,26	>%50	37,06	0,32	0,58
Balıklı	16,83	>%50	47,54	0,14	1,04
Derüstü	30,12	>%50	43,78	0,13	0,16
Konaklı	38,84	>%50	33,55	0,19	0,19
Yolgeçen	16,71	>%50	54,20	0,10	0,31
Kireçlik	44,46	%34-50	35,46	0,65	0,16
Kavak	71,93	%34-50	40,21	0,45	0,50
Sırtoba	12,15	>%50	54,54	0,04	0,31
Armoni	38,24	%34-50	37,27	0,18	1,05
Çifteköprü	9,49	>%50	40,86	0,03	0,36
Mençuna	3,71	>%50	59,33	0,01	0,20
Mera	0,00	>%50	56,97	0,00	1,71
Dülgerli	0,21	>%50	41,85	0,00	0,24
Gürgencik	2,15	>%50	55,41	0,00	0,24
Ortalama	-------	--------	--------	*0,18*	*0,46*
Ağırlıklı Ort.	-------	-------	-------	***0,08***	***0,97***

Yıldırım (2025)'ın AKDH'da "yüzeysel akış parselleri" kurularak gerçekleştirilen bir erozyon çalışmasında; fındık, çay, alt orman, üst orman ve mera arazi kullanımlarının yamaç erozyonu üzerindeki etkisini ölçmeye çalışmıştır. Çalışmadan elde edilen verilere göre havzada 2022 yılında 136 ton (0,0112 ton/ha/yıl), 2023 yılında ise 152 ton (0,0166 ton/ha/yıl) yamaç erozyonu (ortalama 0,014 ton/ha/yıl) tespit edilmiştir. Çalışmamızda ise GeoWEPP modeliyle 0,08 ton/ha/yıl yamaç erozyonu (Tablo 3) tespit edilmiş olup arazi ölçümlerine göre biraz daha yüksek bir değer tahmin edilmiştir. GeoWEPP modelinin ürettiği sonuçlar havzadan çıkan nihai değerleri (sediment verimi) göstermekte olup, arazi ölçümleri (erozyon parsel verileri) ise yalnızca belli boyuttaki (10 x 2,5 m) parseller üzerinde ölçülen erozyon miktarının tüm havza alanına doğrusal aplikasyonunu ifade etmektedir. Bu sebeple aradaki farkın erozyon parsellerindeki topografik ve hidrolojik süreçlerin ölçek farklılığından kaynaklanan SİO daha düşük tahmin edilmesiyle ilintilidir. Diğer bir ifadeyle tüm havza sediment veriminin tespitinde parsel (küçük) ölçeği üzerinden yapılan ve tüm havzaya atfedilen hesaplamalar modeldeki süreç temelli ve havza (büyük) ölçeğine kıyasla topografik ve hidrolojik süreç çıktılarını (birim alan sediment verimini) tahmin edilmesi gereken değerlerden daha düşük tahmin etmektedir. Bu sebeple erozyon parselleriyle sahada hesaplanan yamaç erozyon değeri model verisine oranla 4,8 kat daha azdır, buda beklenen bir durumdur.

Yine aynı saha çalışmasında AKDH'de 2021, 2022 ve 2023 yılları arasında "erozyon çubuk yöntemiyle", kanal ve oyuntu şevlerinden kaybolan toprak miktarı ölçülmüştür. AKDH'nda uygulanan erozyon çubuk yöntemine göre, 2021 yılında 3,55 ton/ha/yıl, 2022 yılında 0,77 ton/ha/yıl, 2023 yılında ise 0,52 ton/ha/yıl toprak kaybı görülmüştür. Bu üç yılda şevlerden ortalama 1,61 ton/ha/yıl toprak kaybı hesaplanmıştır (Yıldırım, 2025). Bu çalışmadaki GeoWEPP sonuçlarına göre kanal ve oyuntularda 20 yıllık simülasyon neticesinde 0,97 ton/ha/yıl erozyon (Tablo 3) bulunmuştur. Bulunan sonuçların farkına göre, kanal ve oyuntularda 0,64 ton/ha/yıl depolama olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir ifadeyle erozyon çubuk yöntemine göre hesaplanan kanal ve oyuntu erozyonu model tahmininden yaklaşık 1,6 kat daha fazladır çünkü şev kaynaklı kanallardaki tüm sediment mansaba ulaşamamakta bir kısmı kanal sisteminde depolanmaktadır.

AKDH'da yapılan bu çalışmada, GeoWEPP model simülasyonu ile arazi ölçümleri karşılaştırıldığında, sonuçların makul bir aralık içinde olduğu çok önemli izah edilemeyecek bir farkın olmadığı görünmektedir. Ayrıca, GeoWEPP modeli, havzadaki erozyonun mekânsal dağılımını genel hatlarıyla yakalayabilmiştir. Diğer taraftan GeoWEPP'in bir bilgisayar yazılımı olduğu gerçeği her zaman göz önünde bulundurulmalıdır çünkü model süreç analizlerinin ortaya koyduğu etki ve etkileşimin tespiti ve yapılacak olan saha çalışmalarıyla model kalibrasyonunun iyileştirilmesi, üretilecek sonuçların doğruluk oranını önemli düzeyde artıracaktır. GeoWEPP, arazi çalışmalarına oranla çok daha hızlı sonuçlar veren daha ekonomik bir yöntem olup, ayrıca arazi ve model sonuçları arasındaki fark değerlerinin birbirine çok da uzak sonuçlar vermediğini de düşünürsek, AKDH gibi büyük havzalarda erozyon tahmininde kullanılması iyi bir tercih olacaktır. Modelin ülkemizde daha yaygın kullanılması ve modelin kullandığı altlık verilerini (iklim, arazi, toprak) oluşturan veri tabanının genişletilmesi ile modelden daha güvenilir ve doğru sonuçların alınması mümkündür. Çalışmada varılan sonuçlar ve çıkarımlar gelecekte yapılacak olan GeoWEPP erozyon çalışmalarının daha anlamlı sonuçlar verebilmesi adına önemli bir altlık olacaktır.

Bu çalışmada elde edilen toprak kaybı ve birim alandaki sediment verimi sonuçları, ülkemizde ve diğer ülkelerdeki farklı havzalarda bulunan GeoWEPP sonuçlarıyla benzerlik göstermekle birlikte genelde onlara göre daha düşük tespit edilmiştir. Yüksel vd. (2008) GeoWEPP modeli kullanılarak yapmış oldukları çalışmada, havzanın sediment üretimini 6,95 ton/ha/yıl olarak hesaplamışlardır. Çalışmalarına konu olan havzanın alanı toplam 490 ha olmak üzere, 175 ha orman arazisi (%35,7), 165 ha mera (%33,7) ve 150 ha tarım (%30,6) arazilerinden oluşmaktadır. Havzanın ortalama yüksekliği 957 m, ortalama eğimi %34 olup yıllık ortalama yağış ise 730 mm'dir. Bizim çalışmamıza göre yüksek sediment veriminin tahmin edildiği bu havzada düşük yağış ve eğim değerlerine rağmen düşük orman alanı ve yüksek tarım alanı yüzdesinin etkisi ortaya çıkan sonucu kısmen de olsa açıklayabilmektedir.

Erdoğan Yüksel (2015), Artvin Borçka Barajı yağış havzasında yaptığı GeoWEPP çalışmasında birim alan sediment verimi 4,16 ton/ha/yıl ve toplam yıllık sediment miktarını ise 360431,7 ton olarak tespit etmiştir. Borçka Barajı Havzası'nın yıllık ortalama yağış miktarı 698,7 mm olup alanı 86576.83 ha'dır. Arazi kullanımları ise; %56,42 orman, %16,39 mera, %14,49 milli park, %7,71 ziraat ve %4,99'u diğer alanlardan oluşmaktadır. Havzanın ortalama yükseltisi 1362 metre olup ortalama eğimi ise %56,28'dir. AKDH'de ortalama birim alandaki sediment verimi 1,057 ton/ha/yıl iken, Borçka havzasında bu değer 4,16 ton/ha/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlar Borçka Baraj havzasının birim alanından yaklaşık 4 kat daha fazla sediment üretimi gerçekleştiğini göstermektedir. Bunun sebepleri model programında kullanılan altlık haritaların özellikleri, hidrolojik süreçlerin program tarafından farklı hesaplanması, modelin kalibrasyon süreci, toprak özelliklerindeki farklılık ve infiltrasyon gibi faktörlerin oluşturabileceği etki olabilir.

Aydın (2009), Gümüşhane-Torul bölgesinde gerçekleştirilen araştırmada, ortalama yükseltisi 1710 m ve ortalama eğimi %71.43 olan 8177 hektarlık bir alanda GeoWEPP modelini uygulamıştır. Havzanın arazi kullanım türlerine göre sediment verimleri incelendiğinde; 5647,91 hektarlık (%69,7) orman alanında yıllık 10494,04 ton (1,86 ton/ha/yıl), 1649,56 hektarlık (%20,17) mera alanında 12630,18 ton (7,66 ton/ha/yıl) ve son olarak 880,39 hektarlık (%10,77) tarım alanında ise 10108,18 ton (11,48 ton/ha/yıl) sediment taşınımı tespit edilmiştir. Çalışmasında özellikle tarım ve mera alanlarında birim alanda oldukça yüksek sediment üretimi belirlenmiş olup, orman alanlarının ise daha düşük sediment verimine sahip olduğu görülmektedir. Bu eğilime AKDH'de bakılacak olursa en yüksek tarım arazi kullanımının olduğu Kavak (%71,9), Güvercinli (%46,3) ve Kireçlik (%44,4) alt havzalarında sırasıyla 0,95, 0,48 ve 0,81 ton/ha/yıl sediment verimi bulunmuştur. Mera alanlarının en fazla olduğu Mera Alt Havzası'nda ise 1,71 ton/ha/yıl sediment verimi bulunmuştur. Orman alanlarının fazla olduğu Dülgerli, Gürgencik ve Yolgeçen alt havzalarında ise sırasıyla 0,24, 0,24 ve 0,41 ton/ha/yıl sediment verimi bulunmuştur. Genel itibariyle bakıldığında benzer şekilde tarım ve mera alanlarında; orman alanlarından daha fazla sediment verimi tespit edilmiştir. Ancak iki çalışma arasında sediment üretim düzeyleri açısından büyük farklar bulunmaktadır; Gümüşhane–Torul havzasındaki çok yüksek ortalama eğim (%71,43) ve yükselti (1710 m), alanın erozyon potansiyelini önemli ölçüde artırmış ve tarım ile mera alanlarında birim alan sediment veriminin AKDH'de rapor edilen değerlerin oldukça üzerine çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca Gümüşhane–Torul havzasının daha sınırlı bir alana sahip olmasına rağmen (8177 ha) toplam sediment miktarlarının yüksek olması, topoğrafik yapıdaki sarplık ve arazi kullanım deseni içinde tarım–mera payının erozyon üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Bu karşılaştırma genel olarak eğim, arazi kullanım türü ve topoğrafyanın sediment üretimindeki etkisinin havza ölçeğinde tutarlı bir şekilde ortaya çıktığını göstermektedir.

Maalim vd. (2013), Minnesota (ABD) eyaleti sınırları içerisinde bulunan 4.400.000 hektardan oluşan Minnesota Havzasının 12 adet bölümünün biri olan ve havzanın %7'sini oluşturan, toplam 288000 hektar alanı kapsayan Le Sueur Nehri Havzası'nda, 30 yıllık simülasyonun WEPP modeli ile elde edilen sediment verimi sırasıyla, tarım arazilerinde 2,15 ton/ha; işlenmemiş tarım arazilerinde 0,46 ton/ha; yerleşim öncesi tarım arazilerinde 0,13 ton/ha olarak belirlemiştir. Bulunan sonuçlar tarım alanlarında yapılan işlemler arttıkça sediment verimininde arttığı yönündedir. AKDH'de tarım alanlarının yüksek olduğu Güvercinli Alt Havzası'nı ele aldığımızda 0,48 ton/ha/yıl sediment verimi olduğunu ve bu değerin işlenmemiş tarım arazileri 0,46 ton/ha değeriyle benzer olduğu söylenebilir.

Singh vd. (2020), Yapmış oldukları çalışma Hindistan, Uttarakhand eyaletinin Dehradun bölgesinde 57 hektarlık bir alandan oluşmaktadır. Havza alanı, 920 ila 1480 metre arasında değişen bir yüksekliğe sahip olup orta derecede dik eğimli arazilerden oluşmaktadır. Ortalama yıllık yağış 1858 mm'dir. Arazi kullanımı ise %28,8'i orman, %21,8 çalılık, %21,1 pirinç tarlaları, %28,2 mısır tarlalarından oluşmakta olup GeoWEPP modeli ile simüle edilerek gözlemlenen birim alandaki sediment verimi 2,53 ton/ha/yıl olarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada birim alandaki sediment veriminin 2,53 ton/ha/yıl olarak belirlenmesi, AKDH'sında elde edilen 1,057 ton/ha/yıl'lık sediment veriminden yüksektir. Bölgenin 920–1480 m arasındaki yükseltisi ve 1858 mm gibi oldukça yüksek yıllık yağış miktarı, sedimenti harekete geçiren yüzey akışını güçlendiren başlıca faktörler olarak değerlendirilebilir. Ayrıca arazi kullanım dağılımında tarla tarımının (pirinç ve mısır toplam %49,3) geniş yer kaplaması, özellikle yıllık ekim yapılan alanların erozyona karşı daha hassas olması nedeniyle sediment üretimini artıran bir başka unsur olarak öne çıkmaktadır. Orman alanlarının sadece %28,8 gibi sınırlı bir paya sahip olması, bu alanda daha yüksek sediment üretimiyle ilişkilendirilebilir.

Erdoğan Yüksel vd. (2016), Kokolet Deresi Havzası'nda (2889,63 ha) yapılan çalışmada orman alanları toplam alanın %71,22'sine tekabül ederken mera alanları %22,24 (902,07 ha) ve tarım alanları ise %5,51'lik bir paya sahiptir. Havzanın ortalama eğimi yaklaşık %65,04 olup %97,43'ünü çok sarp veya dik eğimlerin oluşturduğu belirlenmiştir. Yapılan GeoWEPP simülasyonuna göre yamaçlardaki ve kanallardaki toprak kayıpları sırasıyla 9341,2 ton/yıl ve 12216,1 ton/yıl olmak üzere havzadaki toplam toprak kaybı 23559 ton olarak belirlenmiştir. Havzanın birim alan sediment verimi ise 2.52 ton/ha/yıl'dır. Kokolet Havzası'nda birim alan sediment verimi 2,52 ton/ha/yıl olarak belirlenmiş olup, bu değer Arhavi Kapisre Deresi Havzası'nda hesaplanan 1,057 ton/ha/yıl'lık sediment veriminin yaklaşık 2,3 katıdır. Farkın temel nedenleri arasında Kokolet Havzası'nın çok daha dik topoğrafyaya sahip olması dikkati çekmektedir; ortalama eğim %65,04 olup havzanın %97,43'ü çok sarp veya sarp eğimli alanlardan oluşmaktadır. Buna karşılık AKDH'de geniş orman alanlarına rağmen sedimentin büyük bölümünün kanal süreçlerinden üretildiği görülmektedir (kanallarda 0,97 ton/ha/yıl), Kokolet Havzası'nda ise hem yamaç (3,23 ton/ha/yıl) hem de kanal süreçlerinin (4,23 ton/ha/yıl) toplam sediment üretimine güçlü katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Farkın sebepleri arasında GeoWEPP yürütülmesi sürecinde kullanılan altlık haritalar, hidrolojik süreçler, toprak özellikleri ve kalibrasyon sebepleri aranabilir. Arazi kullanım dağılımları da havzalar arasındaki farkların açıklanmasında önemlidir; Kokolet'te orman alanları %71,22 ile geniş yer kaplamakta, mera ve tarım alanlarının payı sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık AKDH'de mera alanlarının payı (%30,58) çok daha yüksektir ve bu durum özellikle hayvancılık yapılan, yüzey korumasının zayıf olduğu alanlarda yüzeysel akışların ve buna bağlı kanallardaki sediment üretiminin artmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir.

Yüksel vd. (2007), 11531 hektarlık Ayvalı Baraj Havzası'nda (Kahramanmaraş) yaptıkları çalışmada tahmin edilen yıllık erozyon değerlerini; 6984 ha orman alanı için 9035,06 ton/yıl (1,32 ton/ha/yıl), 1688 ha mera alanlarında 7910,31 ton/yıl (4,69 ton/ha/yıl), 2859 ha tarımsal alanlarda 68589,62 ton/yıl (23,95 ton/ha/yıl) olarak tespit etmişlerdir. Havzanın ortalama eğimi %35 ve ortalama yağışı 552,42 mm'dir. AKDH'de benzer şekilde baskın arazi kullanım türünün orman olduğu alanların; tarım alanlarına göre sediment verimi değerleri düşüktür. Örnek olarak Dülgerli ve Gürgencik Alt Havzaları %90 üzeri orman bulunan alt havzalardır. Bu havzaların her ikisinde de 0,24 ton/ha/yıl sediment verimi bulunmuştur. Tarımın yüksek olduğu Kavak ve Derecik gibi Alt Havzalarda bulunan değerlerle (0,95 ve 0,90 ton/ha/yıl) kıyaslandığında tarım alanlarında daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Yüksel vd. (2017)'nin tarım alanlarında bulmuş olduğu 23,95 ton/ha/yıl sediment verimi çalışmamız sonuçlarına göre oldukça yüksek olup hidrolojik prosesler, toprak özellikleri ve programa girilen veriler ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Yıldırım ve Tüfekçioğlu (2024), Erzurum Olur Mikrohavzası'nda GeoWEPP çalışması yapmıştır. Olur Mikrohavzası 37517 hektar alana sahip olup ortalama eğimi %28 ve yıllık ortalama yağışı ise 426,9 mm'dir. Alanın %45,1'i mera, 18,8'i orman, %22,15'i ise tarım ve çıplak alanlardan oluşmaktadır. Olur Mikrohavzası'nda GeoWEPP modeli 2 farklı şekilde çalıştırılmıştır; Yalnızca 2018 yılına ait iklim ve yağış verisi (561,1 mm) ile 20 yıllık simülasyon için ise uzun süreli ortalama yağış verisi (426,9 mm) kullanılmıştır. Havza için tahmin edilen sediment verimi 2018'de 89124 ton/yıl, birim alandaki sediment verimi ortalama 2,80 ton/ha/yıl olup 20 yıllık simülasyon sonucunda ise 9501 ton/yıl (0,27 ton/ha/yıl) erozyon hesaplamıştır. Böylelikle iklim verisinin simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Bizim sonuçlarımıza kıyasla Olur'da yamaç erozyonu yüksek bulunmuştur. Bunun ana sebebi Olur Mikrohavzası'nda bulunan çıplak alanların yoğunluğu olabilir. Arhavi'de ise yüksek yağış dolayısıyla kanal erozyonu daha yüksek olup, yoğun bitki örtüsü sebebiyle ise yamaç erozyonu daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

Dursun ve Babalık (2023), tarafından Burdur Gölü Havzası'na ait 7550 ha'dan oluşan bir alt havzada gerçekleştirilen çalışmada, geotekstil denemeleri kullanılarak toprak kayıpları ölçülmüş ve elde edilen veriler GeoWEPP modeli ile kıyaslanmıştır. Çalışmada tarım, orman ve mera alanlarında kurulan deneme parselleri aracılığıyla toprak kayıpları ve sediment değerleri belirlenmiştir. Havzanın ortalama eğimi %14,04 olup; %65,2 orman, %11,7 mera ve %22'si tarım alanlarından oluşmaktadır. Bu model havzada yapılan ölçümler sonucunda geotekstil parsellerdeki toplam erozyon birinci yılda 3,17 ton/ha/yıl, ikinci yılda 2,56 ton/ha/yıl olarak hesaplanmıştır. GeoWEPP modeli ile ise yıllık ortalama toprak kaybı 16,70 ton/ha/yıl ve yıllık ortalama sediment verimi 0,36 ton/ha/yıl olarak tahmin edilmiştir. Bu değerler, AKDH'deki birim alan sediment verimi ile karşılaştırıldığında, GeoWEPP tahmini açısından benzer bir düzeye sahiptir (AKDH ortalama sediment verimi 1,057 ton/ha/yıl). Burdur Gölü Havzası'nda geotekstil yersel ölçümleri modele göre daha yüksek bulunmuştur. Bu sebeple model kalibrasyonunun önemi ön plana çıkmaktadır. Burdur Gölü Havzası'nın daha düşük eğim değerine (%14,04), yoğun orman alanları (%65,2) ve Arhavi'ye göre düşük yağış iklim verisi GeoWEPP sonuçlarının düşük bulunmasında bir faktör olabilir. AKDH'de 2000 mm ve üzeri yüksek yağış miktarını içeren iklim verisi ve havzanın çoğunluğunun sarp ve dik yamaçlardan oluşması, sonuçların Burdur Gölü Havzası'na göre fazla çıkmasına sebep olarak gösterilebilir.

4. Sonuç

GeoWEPP modeli ile 20 yıllık simülasyon sonucunda AKDH'sına ait 17 alt havzadaki sediment verimleri en az; orman alanlarının yoğun olduğu Gürgencik Alt Havzası'nda (123,9 ton/yıl), en fazla ise; Mera Alt Havzası'nda (18739,8 ton/yıl) gerçekleşmiştir. Birim alan sediment verimleri ise 0,21 ton/ha/yıl (Mençuna) ila 1,71 ton/ha/yıl (Mera) arasında değişim göstermiştir. AKDH'nin tamamında toplam yıllık sediment verimi 26846,8 ton/yıl olarak tahmin edilmiştir. Alt havzaların alan ağırlıklı SİO 0,205 iken birim alandaki alan ağırlıklı sediment verimi ise 1,057 ton/ha/yıl'dır. Yamaçlarda görülen toplam yıllık ortalama toprak kaybı 8648,6 ton/yıl (%4,83), iken kanallarda görülen toplam yıllık ortalama toprak kaybı ise 170466,7 ton/yıl (%95,17) olarak bulunmuştur. Özellikle mera alanlarındaki kanal ve oyuntu derelerinin sediment verimine olan etkisi yamaç erozyonuna oranla çok daha yüksektir.

GeoWEPP model çıktıları, AKDH'nda yapılan saha çalışma sonuçları (yüzeysel akış erozyon parselleri ve erozyon çubukları ile kanal-oyuntu erozyonu ölçümleri) ile kıyaslandığında büyük oranda benzerlik görülmüştür (kanal/oyuntu saha verisi 1,61 ton/ha/yıl; model verisi 0,97 ton/ha/yıl, yamaç erozyonu saha verisi 0,014 ton/ha/yıl; model verisi 0,08 ton/ha/yıl). Modelin kalibrasyonunda arazi verisinin kullanılmasının önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır. Ayrıca, modelde kullanılan altlık haritalar ve verilerin uygun ve doğru kullanımı bu noktada büyük önem arz etmektedir. Sahadaki direkt ölçümler ile model çıktıları arasındaki paralellik olduğu düşünüldüğünde GeoWEPP ekonomik bağlamda ucuz ve kısa zamanda doğruluk oranı yüksek büyük işler başarabildiğini söyleyebiliriz. Model ayrıca çalışma havzasında erozyon riski taşıyan bölgeleri doğru bir şekilde tespit etmiş olup bu alanlarda dikkatli davranılması ve gerekli önlemlerin alınması erozyonun ilerlemesi ve kontrol altına alınması açısından önemlidir.

AKDH'sındaki erozyonun oluşumunda rol oynayan önemli doğal faktörler; yüksek yağış miktarı, doğal bitki örtüsünün değiştirilmesi ve havzanın topoğrafik özellikleridir. Bu faktörlere istinaden, özellikle eğimin ve yükseltinin fazla olduğu 2000 m üzeri mera alanlarındaki hayvancılık faaliyetleri, bitki örtüsü olmayan çıplak veya tarım alanlardaki hatalı tarımsal uygulamalar, yanlış ve ya hatalı arazi kullanım tercihleri erozyon riskini önemli derecede arttırdığı tespit edilmiştir. Özellikle kanallarda meydana gelen erozyonun yamaç erozyonuna göre yaklaşık 12 kat yüksek olması, yüksek rakım ve buna bağlı aşırı ve şiddetli yağış, kanallarda ani debi artışı ve yamaçlardaki sık bitki örtüsünün bir sonucudur. Arhavi'deki yüksek eğimli tarım alanlarında erozyon ve heyelan riski yüksek olduğundan, uygun arazi yönetim seçimi ve erozyon kontrol önlemleri dikkate alınmalıdır.

Özellikle mera alanlarında planlı ve sınırlı otlatmayla birlikte arazideki bitki örtüsünün korunması ve sürdürülebilir kullanımı önemli ölçüde sağlanabilecektir. Arazinin dik ve sarp yapısından ötürü, tarıma uygun olmayan yerlerde uygulanan tarımsal faaliyetlerin önüne geçilebilmesi için, yöre halkını farklı tarım türlerine teşvikin sağlanması gerekmektedir. Özellikle çaylık ve yüksek eğimli alanlarda aşırı yağışla tetiklenen heyelanlar sıkça yaşandığından, tarımsal faaliyetlerin ve yerleşim yerlerinin bu tür riskli alanlardan uzak tutulması gerekmektedir.

Teşekkür

Avrupa Birliği tarafından, Avrupa Komşuluk Aracı ve aralarında Türkiye'nin de bulunduğu katılımcı ülkeler üzerinden finanse edilen "Karadeniz Havzası Sınır Ötesi İşbirliği 2014-2020" programı başlığı altında yapılan BSB963 kodlu "Protect Streams 4 Sea" isimli projesine katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2020). *2019 Yılı Doğa Kaynaklı Olay İstatistikleri*. AFAD. https://afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/e_Kutuphane/Kurumsal-Raporlar/2019yilidogakaynakliolayistatistikleri.pdf

Anılan, T., Yüksek, Ö., Kankal, M. (2016, 21–24 Kasım). *Doğu Karadeniz Havzası'nda Yapay Sinir Ağları ile Bölgesel Taşkın Frekans Analizi* [Bildiri sunumu]. 4. Ulusal Taşkın Sempozyumu, Rize, Türkiye.

Aydın, M. (2009). Gümüşhane-Torul Barajı Yağış Havzasında Arazi Kullanımına Göre WEPP Modeli İle Toprak Kayıplarının Belirlenmesi ve Alınması Gereken Önlemler. *Kastamonu Üniversitesi, Orman Fakültesi Dergisi*, *9*(1), 5465.

Chang K. (2019). *Introduction to Geographic Information Systems* (9th edition). McGraw-Hill.

Cure B. (2022). Effect of Chemical and Organic Fertilizers on the Environment. *Journal of Biosystems Engineering 3*(2), 98–107.

Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü. (2018). *DEMİS Türkiye Su Erozyonu İstatistikleri, Teknik Özet*. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.

Dağ, S., Akgün, A., Kaya, A., Alemdağ, S., & Bostancı, H. T. (2020). Medium scale earthflow susceptibility modelling by remote sensing and geographical information systems based multivariate statistics approach: an example from Northeastern Turkey. *Environmental Earth Sciences*, *79*, 1–21.

Değerliyurt, M. (2013). Arsuz Çayı Havzası'nın Erozyon Duyarlılık Analizi. *International Journal of Social Science*, *6*(7), 321–344.

Duman, A., Yildirim, C., Tufekcioglu, M., Tufekcioglu, & A., Satiral, C. (2023). Variation in Certain Soil Properties Based on Land Use Type, and Elevation in Arhavi Sub-Basin, Artvin, Turkiye. *Sustainability*, 15, Article 9114. https://doi.org/10.3390/su15119114

Dursun, İ., & Babalık A.A. (2023). *Burdur Gölü Havzasına Ait Bir Alt Havzada GeoWEPP ve Geotekstil Yöntemi Kullanılarak Erozyon Durumunun Belirlenmesi*. Duvar Yayınları.

Eminağaoğlu, Ö. (Ed.), (2015). *Artvin'in Doğal Bitkileri*. Promat.

Erdoğan Yüksel, E. (2015). *Borçka Barajı Yağış Havzası'nda Meydana Gelen Toprak Erozyonu ve Sediment Veriminin WEPP Erozyon Tahmin Modeli ve CBS Teknikleri Kullanılarak Belirlenmesi* [Doktora Tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi], YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Erdoğan Yüksel, E., Özalp, M., & Yıldırımer, S. (2016). Using A Geospatial Interface (GeoWEPP) To Predict Soil Loss, Runoff and Sediment Yield of Kokolet Creek Watershed. *International Journal of Ecosystems and Ecology Sciences (IJEES), 6*(3), 437–442.

Ersoy, H., Karahan, M., Gelişli, K., Akgün, A., Anılan, T., Sünnetci, M. O., & Yahşi, B. K. (2019). Modelling of the landslide-induced impulse waves in the Artvin Dam reservoir by empirical approach and 3D numerical simulation. *Engineering Geology*, *249*, 112–128.

Flanagan, D. C. & Livingston, S. J. (1995). *WEPP User Summary (USDA-Water Erosion Prediction Project)*. National Soil Erosion Research Laboratory, Report No:11, USA.

Flanagan, D., Frankenberger, J. R., Cochrane, T. A., Renschler, C. S., & Elliot, W. J. (2011). Geospatial application of the water erosion prediction project (WEPP) model. *Transactions of the ASABE,* 56, 591–601.

Flanagan, D. C. & Nearing, M. A. (1995). *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, NSERL Report No. 10. West Lafayette, Indiana, USA.

Garbrecht, J., & Martz, L. W. (1999). *Topaz: An Automated Digital Landscape Analysis Tool for Topographic Evaluation, Drainage Identification, Watershet Segmentation and Subcatchment Parameterization*. USDA-ARS Publication, No. GRL 9-I, USA.

Gelişli, K., Seren, A., Çataklı, A., Babacan, A., Ersoy, H., & Kandemir, R. (2011). The Sumela Monastery slope in Macka, Trabzon, Northeast Turkey: rock mass properties and stability assessment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *70*, 577–583.

González V. I., Carkovic A. B., Lobo G. P., Flanagan D. C., & Bonilla C. A. (2016). Spatial discretization of large watersheds and its influence on the estimation of hillslope sediment yield. *Hydrological Processes*, *30*(1), Article 30. https://doi.org/10.1002/hyp.10559.

Görüm, T., Yılmaz, A., Tanyaş, H., Akgün, A., Akbaş, A., Karabacak, F., Coşkun, S., Uçar, T., Fidan, S., Kılıçaslan, H., & Tatar, O. (2025). *8 Aralık 2024 Güngören, Arhavi (Artvin) Moloz Çığının Oluşum Dinamiği ve Alanın Heyelan Tehlike ve Risk Bakımından Değerlendirmesi,* https://doi.org/10.5281/zenodo.14625940

Kurdoğlu, O., & Akbulut, S. (2015). Türkiye'de Acil ve Öncelikle Korunması Gereken Bir Alan: Kamilet ve Durguna Vadileri (Arhavi) ve Koruma Gerekçeleri. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, *15*(2), 279–296.

Lyon, J. G. (2003). *GIS for Water Resources and Watershed Management*. Taylor&Francis.

Maalim, F. K., Melesse, A. M., Belmont, P., & Gran, K. B. (2013). Modeling the İmpact of Land Use Changes on Runoff and Sediment Yield in the Le Sueur Watershed, Minnesota Using GeoWEPP. *Catena*, *107*, 35–45.

Martz, L. W., & Garbrecht, J. (1993). Automated Extraction of Drainage Network and Watershed Data from Digital Elevation Models. *Journal of the American Water Resources Association*, *29*(6), 901–908.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2025). *Meteorolojik Veri-Bilgi Sunum ve Satış Sistemi – MEVBİS*. https://mevbis.mgm.gov.tr/

Narimani, R., Erfanian, M., Nazarnejad, H., & Mahmodzadeh, A. (2017). Evaluating the Impact of Management Scenarios and Land Use Changes on Annual Surface Runoff and Sediment Yield Using the Geowepp: A Case Study from the Lighvanchai Watershed, Iran. *Environmental Earth Sciences*, *76*, Article 353. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6694-6

Puno, G. R. (2014). Runoff and Sediment Yield Modeling Using GeoWEPP in Mapawa Catchment. *CMU Journal of Science*, *18*, 49–70.

Renschler, C. S. (2003). Designing Geo-Spatial Interfaces to Scale Process Models: The GeoWEPP Approach. *Hydrological Processes*, *17*, 1005–1017.

Singh, A. K., Kumar, S., & Naithani, S. (2020). Modelling runoff and sediment yield using Geowepp: a study in a watershed of Lesser Himalayan Landscape, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, *7*, 2089–2100.

Tufekcioglu, M., Yavuz, M., Vatandaslar, C., Dinc, M., Duman, A., & Tufekcioglu, A. (2018). Çoruh Nehri Havzası'nda Bulunan Veliköy Alt Havzası'nın Yüzey Erozyon Riskinin Belirlenmesi ve Haritalandırılması. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *4*(2), 210–220.

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.

Uzuner, M., & Selim, H. H. (2019). Arhavi-Hopa (Artvin) civarında oluşan doğal afetlerin nedenleri ve gayrimenkul sektöründeki yansımaları. *Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 2*(1), 61–74.

Yağcı, O. (2024). *Arhavi Kapisre Deresi Havzasında WEPP erozyon tahmin modeli ile erozyon tespiti.* [Yüksek lisans tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi.

Yavuz Özalp, A., Akıncı, H., Temuçin, S. (2013). Artvin ili arazisinin topografik ve bazı fiziksel özelliklerinin tespiti ve bu özelliklerin arazi örtüsü ile ilişkisinin incelenmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, *14*(2), 292–309.

Yavuz, M., Koutalakis, P., Diaconu, D. C., Gkiatas, G., Zaimes, G. N., Tufekcioglu, M., Marinescu, M. (2023). Identification of Streamside Landslides with the Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Greece, Romania, and Turkey. *Remote Sensing, 15*, Article 1006. https://doi.org/10.3390/rs15041006

Yıldırım, C. (2019). *Çoruh Nehri Havzası'na Bağlı Olur Mikrohavzası'ndaki Sediment Üretiminin Erozyon Çubuk Yöntemi, Askıda Katı Madde Ölçümü ve GeoWEPP Tahmin Modeli ile Belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi.

Yıldırım, C. (2025). *Arhavi Kapisre Deresi Havzası'nda Gerçekleşen Yüzey, Kanal ve Oyuntu Erozyonu Miktarlarının Tespiti ve Bazı Su Kalitesi Parametrelerinin Ölçümü* [Doktora Tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi], YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi.

Yıldırım, C., & Tufekçioğlu, M. (2024). Soil losses from Olur micro-catchment in the Çoruh River Basin using GeoWEPP model. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*, *14*(3), 23–34. https://doi.org/10.31407/ijees14.304

Yüksek, T., & Ölmez, Z. (2002). Artvin yöresinin iklim, toprak yapısı, orman alanları, ağaç serveti ve ormancılık çalışmalarıyla ilgili genel bir değerlendirme. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, *3*(1), 50–62.

Yüksel, A., Akay, A. E., Gundogan, R., Reis, M., & Cetiner, M. (2008). Application of GeoWEPP for determining sediment yield and runoff in the Orcan Creek Watershed in Kahramanmaras, Turkey. *Sensors*, *8*, 1222–1236.

Yüksel, A., Akay, A. E., Reis, M., & Gündoğan, R. (2007, March 22–24). *Using the WEPP Model to Predict Sedimet Yield in a Sample Watershed in Kahramanmaras Region* [Conference Presentation]. International Congress on River Basin Management, Antalya, Türkiye.

Zhang, X., Yu, G. Q., Li, Z. B., & Li, P. (2014). Experimental study on slope runoff, erosion and sediment under different vegetation types. *Water Resources Management*, *28*(11), 2415–2433. https://doi.org/10.1007/s11269-014-0603-5