T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

SEDİMAN TAŞINIM MODELLEMESİ VE YÖNETİMİ

Rouhollah NASIRZADEHDIZAJI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Mayıs, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Rouhollah NASIRZADEHDIZAJI tarafından, **Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ** danışmanlığında hazırlanan **"SEDİMAN TAŞINIM MODELLEMESİ VE YÖNETİMİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **13/05/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Mehmet Sedat KABDAŞLI İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Hafzüllah AKSOY İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Sezar GÜLBAZ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret

Sevgili aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

SEDİMAN TAŞINIM MODELLEMESİ VE YÖNETİMİ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FDK-2018-29656

TEŞEKKÜR

Toprak ve su kaynaklarının verimli bir şekilde geliştirilmesi ve yönetilmesine yönelik, yürütülen projelerin sürekliliğini sağlamak ve etkinliğini artırmak için erozyonun kontrol altına alınması ve her bir su havzası ve alt havzasında, akarsu ve yan kollarda sediman akışının sınırlandırılması veya azaltılması gerekmektedir. Sediman ve suda taşınan katı maddeler arazi kullanımı, havza zemin özellikleri, yağış şiddeti ve akımın sürükleme gücü ile orantılı bir şekilde artmaktadır. Bu artışın fazla olması havza içerisindeki su kalitesini düşürmekte, nehir havzasındaki baraj ve su tesisleri gibi su yapılarının tasarımında ve ömründe etkili olmaktadır. Bunun yanında sediman taşınımının gerçekleştiği akarsu üzerindeki sucul canlıların yaşam alanlarını kısıtlayarak, canlı popülasyonunun azalmasına sebebiyet vermektedir. Ayrıca sedimanın kıyı bölgelerindeki morfolojiye etkisinden dolayı gerçekleşecek bir deniz yapısının tasarımı üzerinde de etkili olmaktadır. Bu nedenle sediman taşınım modellemesi ve yönetimi oldukça önem arz etmektedir.

Bu hedef doğrultusunda tezimin şekillenmesinde emeği geçen, bilgi ve birikimlerini paylaşmaları ve desteklerden dolayı danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi. Dilek Eren AKYÜZ'e çok teşekkür ederim.

Tez izleme komitesi üyelerinden Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN'a ve Prof.

Dr. Mehmet Sedat KABDAŞLI'ya verdikleri bilgi ve önerileri için çok teşekkür ederim.

Mayıs 2022 Rouhollah NASIRZADEHDIZAJI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **iv**
TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xviii**
ABSTRACT ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **4**
2.1. SEDİMAN HAREKETİ 4
2.2. SEDİMAN KAYNAĞI 4
2.3. HİDROLOJİK MODELLEME 7
2.4. ÇALIŞMANIN LİTERATÜRDEKİ YERİ 10
3. YÖNTEM **14**
3.1. ÇALIŞMA ALANI 14
3.2. ARAZİ ÇALIŞMASI 16
3.3. SEDİMAN ÖLÇÜMLERİNİN LABORATUVAR ANALİZLERİ 19
3.4. MODELDE KULLANILAN VERİ SETLERİ 21
3.4.1. Topoğrafik Harita 22
3.4.2. Arazi kullanımı/örtü Haritası 23
3.4.3. Toprak Haritası 24
3.4.4. Hidrolojik ve Meteorolojik Veriler 25
3.5. YAĞIŞ-AKIŞ MODELİ 30
3.5.1. SWAT Hidrolojik Modeli 33
3.5.2. Modelin Kurulması 50
3.5.3. Optimizasyon Algoritmaları 52

3.5.4. Model Performans Değerlendirmesi 53
3.5.5. Dağıtımlı Hidrolojik Modelleme Yaklaşımı Kullanarak Orman Yangınlarının ve Yangınlardan Sonra Yanmış Alanların Tarım Alanlarına Dönüştürülmesinin Yüzeysel Akışı ve Sediman Yükleri Üzerindeki Potansiyel Etkilerinin Tahmin Edilmesi 55
3.6. DERE JEOMORFOLOJİSİNİN SEDİMAN KONTROLÜ VE YÖNETİMİNDEKİ ÖNEMİ 59
3.7. ORMAN YANGIN ÖNCESİ VE SONRASI EROZYON VE SEDİMAN KONTROLÜ VE YÖNETİMİ 67
3.7.1. TOHUMLAMA YÖNTEMİ 69
3.7.2. MALÇLAMA (TOPRAĞI KURU OT-SAMANLA ÖRTME) 69
3.7.3. EŞYÜKSELTİ EĞRİLER ŞEKLİNDE KÜTÜK TERASLARI 70
3.7.4. SAMAN BALYASI VE SAMAN ÖRGÜSÜ BARİYERLERİ 71
3.7.5. FİBER ROLLERİ 71
3.7.6. HENDEK DENETİM YÖNTEMİ 72
3.7.7. YANGIN ÖNLEME KORİDORU (FIREBREAK) 73
4. BULGULAR 75
4.1. MODEL SONUÇLARI 75
4.1.1. Hidrolojik Değerlendirme 75
4.1.2. Sediman Verimi Değerlendirmesi 77
4.1.3. SWAT Modeli Performansı 77
4.1.4. Orman Yangınlarının Akım ve Sediman Verimi Üzerindeki Etki ve Sonuçları 81
4.1.5. Ormansızlaşmanın Akım ve Sediman Verimi Üzerindeki Etkileri 89
4.1.6. DEMİS Modeli Uygulanarak Göksu ve Çanakdere-Sungurlu Havzalarının Sediman Verimlerinin Elde Edilmesi 94
4.1.7. Göksu ve Çanakdere Akarsularının Hidrolik ve Sediman Modeli 101
5. TARTIŞMA 106
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 112
KAYNAKLAR 114

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: İş akışına genel bakış. 13

Şekil 3.1: Çalışma alanı, Göksu ve Çanakdere nehirlerinin havzasının konum haritası. 15

Şekil 3.2: Çok amaçlı sediman numunesi alma düzeneği. 17

Şekil 3.3: Göksu ve Çanakdere havzalarında yer alan akım gözlem istasyonları ve su tesislerinin (Regülatörler) konumları..... 18

Şekil 3.4: Arazi çalışması sırasında elde edilen ölçümler ve görüntüler (Tarih: 24 Kasım 2018). 19

Şekil 3.5: Zemin laboratuvarında yapılan elek analizi. 20

Şekil 3.6: Örnek bir numune için elek analiz sonuç raporu. 21

Şekil 3.7: Göksu ve Çanakdere havza alanının Sayısal Yükseklik Modeli (DEM). 23

Şekil 3.8: Göksu ve Çanakdere havzasının arazi kullanımı/örtü haritası (CORINE, 2018). ... 24

Şekil 3.9: Göksu ve Çanakdere havzasının toprak haritası ve toprak tipi sınıflandırması (Cullu ve diğ., 2018). 25

Şekil 3.10: Göksu ölçüm istasyonunda ölçülen debilerin aylık ortalamaları (m^3/s). 26

Şekil 3.11: Göksu nehrindeki 1988-2017 yıllar arasındaki akım değişimi. 26

Şekil 3.12: Göksu akarsuyundaki değişimin aylık verim (ton/yıl/km^2) ortalamaları grafiği. .. 29

Şekil 3.13: Çanakdere akarsularındaki değişimin aylık verim (ton/yıl/km^2) ortalamaları..... 30

Şekil 3.14: Hidrolojik sistemin şematik temsili (Bayazıt, 1998). 31

Şekil 3.15: Havza temelli hidrolojik sistemin şeması (Cüceloğlu, 2013). 31

Şekil 3.16: Hidrolojik modellerinde mekânsal sınıflar (Jones, 1997). 34

Şekil 3.17: SWAT'ta kavramsal su dengesi modelinin şematik gösterimi. 35

Şekil 3.18: Green ve Ampt tarafından modellenen nem içeriği dağılımı ile tipik gözlemlenen dağılımın karşılaştırılması (Green ve Ampt, 1911). 36

Şekil 3.19: Akış ve sediman veriminin simülasyonu için SWAT metodolojisi (Gull ve diğ., 2017). 45

Şekil 3.20: Kararlı olmayan hidrolik (sağ) ve Quasi-kararlı olmayan sediman taşınım (sol) modellerinin dosya yapısı (HEC-RAS Users Manual'den alınmıştır). 47

Şekil 3.21: Girdi dosyasını oluşturmak için üretilen üçgenlenmiş düzensiz ağ model (TIN). Sol; Göksu havzasına ait eş yükselti eğrileri, sağ; elde edilen TIN modeli. 48

Şekil 3.22: HEC-GeoRAS'ın akış şeması (HEC-GeoRAS Users Manual'den alınmıştır). 49

Şekil 3.23: SWAT modelinin giriş ve yerleştirme sürecinin ana adımlar. 52

Şekil 3.24: Arazi örtüsü haritası (CORINE, 2018) (a) ve Göksu ve Çanakdere su havzasında simüle edilmiş yangınlardan etkilenen alanların farklı mikro havzalardaki yerleri: (b) %25, (c) %50 ve (d) %100. 57

Şekil 3.25: Yangın senaryolarında uygulanan iş akış şeması. 57

Şekil 3.26: Dere tipleri sınıflandırılmasının boyuna ve enine kesiti ve planı (Rosgen, 1996; www.cfpub.epa.gov, Erişim tarihi: 09 Aralık 2021). 61

Şekil 3.27: Doğanın farklı bölgelerinde farklı dere türleri, (Rosgen, 1996; www.cfpub.epa.gov, Erişim tarihi: 12 Aralık 2021). 63

Şekil 3.28: Hava fotoğrafı (solda) veya topoğrafik harita (sağda) üzerinde dere tipi belirlenmesi (www.cfpub.epa.gov, Erişim tarihi: 12 Aralık 2021). 64

Şekil 3.29: Vadilerin grafiksel şemaları (www.cfpub.epa.gov, Erişim tarihi: 18 Aralık 2021). 64

Şekil 3.30: Erozyonu önlemek için yanmış orman alanların üzerine saman serpimi (Moench ve Fusaro, 2002). 70

Şekil 3.31: Erozyonu önlemek için yanmış orman alanlarında uygulanan kütük teraslama (Moench ve Fusaro, 2002). 70

Şekil 3.32: Saman balyası ve saman örgüsü erozyon bariyerleri (Robichaud ve diğ., 2000). . 72

Şekil 3.33: (a) Hindistan cevizi kütüklerinden üretilen fiber rollerin erozyon ve sediman kontrolü için uygulanması, (b) erozyon ve sediman kontrolü için uygulanan hendek kontrol yöntemi. 73

Şekil 3.34: Orman yangın önleme koridoru (USDA, 2008). 74

Şekil 4.1: Akım (a ve b) ve sedimanın (c ve d) gözlemlenen ve simülasyonu arasındaki korelasyonu için sırasıyla 2005–2013 (kalibrasyon; a ve b) ve 2014–2017 (validasyon; b ve d) dağılım grafikleri. 78

Şekil 4.2: Akım kalibrasyonu için 2005–2013 arasında gözlemlenen ve simüle edilen aylık hidrografı. 79

Şekil 4.3: Akım validasyonu için 2014–2017 arasında gözlemlenen ve simüle edilen aylık hidrografı. 79

Şekil 4.4: Sediman kalibrasyonu için 2005–2013 arasında gözlemlenen ve simüle edilen aylık hidrografı. 80

Şekil 4.5: Sediman validasyonu için 2014–2017 arasında gözlemlenen ve simüle edilen aylık hidrografı. 80

Şekil 4.6: Aylık ölçülen akım ve askıdaki sediman arasındaki ilişki (2005-2017)..... 80

Şekil 4.7: Farklı senaryoların model çıktısına dayalı olarak, yıllık zaman adımlarında su dengesi bileşenlerinin özeti. 81

Şekil 4.8: Zaman adımında (2005-2017) yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası (senaryo 1-3) aylık ortalama ölçülen akım ve yüzeysel akışı arasındaki ilişki. 83

Şekil 4.9: Zaman adımında (2005-2017) yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası (senaryo 1-3) aylık ölçülen yağış ve askıdaki sediman arasındaki ilişki. 83

Şekil 4.10: Zaman adımında (2005-2017) yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası (senaryo 1-3) aylık ölçülen yağış ve askıdaki sediman arasındaki ilişki. 84

Şekil 4.11: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası (1-3) senaryolar için toplam yıllık su verimi miktarları. 84

Şekil 4.12: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için toplam yıllık sediman verimi miktarları. 85

Şekil 4.13: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için yüzey akışıyla taşınan sedimana eklenen toplam yıllık mineral fosfor miktarları. 86

Şekil 4.14: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için toplam yıllık sızıntı miktarları. 86

Şekil 4.15: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için toplam yıllık buharlaşma miktarları. 87

Şekil 4.16: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için toplam yıllık erozyon oranları miktarları..... 88

Şekil 4.17: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde mevcut durum ve ormansızlaşma sonrası (1-3) senaryoları için ilgili yıllara ait yıllık su verimlerinin toplam miktarları. 92

Şekil 4.18: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde mevcut ve ormansızlaşma sonrası (1-3) senaryolar için ilgili yıllara ait yıllık sediman verimlerinin toplam miktarları. .. 92

Şekil 4.19: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde mevcut ve ormansızlaşma sonrası (1-3) senaryolar için ilgili yıllara ait yıllık yüzeysel akışlarının toplam miktarları. 93

Şekil 4.20: Göksu havzası yağışın aşındırma gücü R-faktörü haritası (CEM, 2018). 95

Şekil 4.21: Göksu havzası toprağın erozyona duyarlılığı K-faktörü haritası (CEM, 2018). ...96

Şekil 4.22: Göksu havzası C-faktörü haritası (CEM, 2018). 96

Şekil 4.23: Göksu havzası su erozyonu haritası (CEM, 2018). 97

Şekil 4.24: Çanakdere havzası yağışın aşındırma gücü R-faktörü haritası (CEM, 2018).....98

Şekil 4.25: Çanakdere havzası toprağın erozyona duyarlılığı K-faktörü haritası (CEM, 2018). 99

Şekil 4.26: Çanakdere havzası C-faktörü haritası (CEM, 2018).....99

Şekil 4.27: Çanakdere havzası su erozyonu haritası (CEM, 2018).....100

Şekil 4.28: Göksu ve Çanakdere akarsularında pik debiye göre hidrolik model sonuçlarının görsel çıktıları. 102

Şekil 4.29: Göksu ve Çanakdere akarsularında model (yangın senaryolarından) pik debiye göre hidrolik model sonuçlarının görsel çıktıları. 102

Şekil 4.30: Göksu deresi için pik debiler (a ve b) ve model pik debilerine göre (c ve d) memba ve mansaptaki en kesitlerinde sediman boyuna kümülatif hacim değişimi (m^3). Boyuna kümülatif hacim değişimi (Long.Cum Vol.Change) 2756: 2756'ıncı en kesitteki sedimanın kümülatif boyuna hacim değişimi, VFS çok ince kum, FS: ince kum, MS: orta boylu kum, CS: iri kum, VCS: çok iri kum, VFG: çok ince çakıl, FG: ince çakıl, MG: orta boylu çakıl, CG: iri çakıl. 103

Şekil 4.31: Çanakdere deresi için pik debiler (a ve b) ve model pik debilerine göre (c ve d) memba ve mansaptaki en kesitlerinde sediman boyuna kümülatif hacim değişimi (m^3). Boyuna kümülatif hacim değişimi (Long.Cum Vol.Change) 3435: 3435'inci en kesitteki sedimanın kümülatif boyuna hacim değişimi, VFS: çok ince kum, FS: ince kum, MS: orta boylu kum, CS: iri kum, VCS: çok iri kum, VFG: çok ince çakıl, FG: ince çakıl, MG: orta boylu çakıl, CG: iri çakıl. 104

Şekil 4.32: Göksu ve Çanakdere derelerinin 2013-2017 yıllar arasında derelerin sediman kaynaklı en kesitlerin jeomorfolojisindeki değişim.....105

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Göksu istasyonu özet bilgileri. 27

Tablo 3.2: Çanakdere istasyonu özet bilgileri. 27

Tablo 3.3: Göksu sediman rölatif pik değerleri ($S_{ay}/Smax_{yıl}$)..... 28

Tablo 3.4: Çanakdere sediman rölatif pik değerleri ($S_{ay}/Smax_{yıl}$). 28

Tablo 3.5: Göksu ortalama sediman verimi değerleri (ton/yıl/km^2). 29

Tablo 3.6: Çanakdere ortalama sediman verimi değerleri (ton/yıl/km^2). 29

Tablo 3.7: Bu çalışmada kullanılan senaryoların açıklaması. Ortalama yanmış ve ormansızlaşma alanı, toplam su havzası alanına (%) göredir. 55

Tablo 3.8: CORINE arazi örtüsü sınıfları sınıflandırmasına ve kapsama alanı ve havza alanının yüzdesi ile ilgili SWAT'ın arazi örtüsü kodları için dönüştürülmüş arazi örtüsü sınıflarına dayalı olarak çalışma alanı için arazi kullanımı/örtüsü dağılımı. 56

Tablo 4.1: SWAT modeli hassasiyet analizinden elde edilen kalibrasyon ve nihai parametreler. 76

Tablo 4.2: 2005-2013 (kalibrasyon dönemi) ve 2014-2017 (doğrulama dönemi) SWAT Model simülasyonlarının performans ölçüm göstergelerinin özet istatistikleri ve belirsizlik analizi. 77

Tablo 4.3: Farklı senaryoların model çıktısına dayalı olarak, yıllık zaman adımlarında su dengesi bileşenlerinin bir özeti. 81

Tablo 4.4: 13 yıllık simülasyon döneminde (2005'ten 2017'ye) senaryolardan model çıktıları ve orman yangınlarına verilen ortalama hidrolojik tepkiler. 82

Tablo 4.5: Ormansızlaşma senaryolarının model çıktısına dayalı olarak, yıllık zaman adımlarında su dengesi bileşenlerinin bir özeti. 13 yıllık simülasyon döneminde (2005-2017) senaryolardan elde edilen model çıktıları ve ormansızlaşmaya karsı ortalama bir hidrolojik tepki. 90

Tablo 4.6: Çıktı özet dosyalarında gösterilen çıktı değişkenlerinin kısa bir açıklaması. 90

Tablo 4.7: Göksu havzası su erozyon model çıktıları (ÇEM, 2018). 97

Tablo 4.8: Çanakdere havzası su erozyonu model çıktıları (ÇEM, 2018)..... 100

Tablo 4.9: Kümülatif Boyuna Hacim Değişimi (m^3). Göksu ve Çanakdere dereleri için 2013-2015 yıllar arası sediman kümülatif hacim miktarlarındaki değişimi. 105

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

SW_t : Toprağın t zaman sonra su içeriği

SW_0 : Toprağın başlangıçtaki su içeriği

R_{day} : *i.* günde yağış miktarı

E_a : *i.* günde buharlaşma miktarı

W_{seep} : Sızma ve baypas akış miktarı

Q_{gw} : *t* zamanındaki taban akışı

Q_{surf} : Yüzeysel akış

I_a : Yüzeysel depolama

$f_{inf,t}$: *t* zamanındaki sızma oranı

$\Psi_{w,f}$: Islanma ön matris potansiyeli

$\Delta\theta v$: Islanma cephesinde hacimsel nem

q_{lat} : Yanal akış

α : Arazi eğimi

θ_d : Boşaltılabilir porozite

q_{peak} : Pik akış

K_{USLE} : USLE toprak aşındırma faktörü

C_{USLE} : USLE toprak örtüsü yönetim faktörü

P_{USLE} : USLE destek uygulama faktörü

LS_{USLE} : USLE topoğrafik faktör

$CFRG$: Kaba parça faktörü

$q_{ch,pk}$: Pik akış hızı

A_{ch} : Kanaldaki akış kesit alanı

p_{rf} : Pik ayarlama oran faktörü

q_{ch} : Kanaldaki ortalama akış hızı

$CONC_{sed,ch,mx}$: Su ile taşınabilen maksimum sediman konsantrasyonu

C_{sp} : Kullanıcı tarafından tanımlanan bir katsayı

$V_{ch,pk}$: Kanaldaki pik hız

$spexp$: Kullanıcı tarafından tanımlanan üstel sayı

sed_{ch} : Sediman miktarı

$sed_{ch,i}$: Başlangıçtaki sediman miktarı

sed_{dep} : Sediman birikimi

sed_{deg} : Nehirde sürüntü madde

sed_{out} : Nehirden taşınan sediman

sed_{ch} : Nehirde askıda sediman

V_{out} : Zaman adımı içerisindeki çıkış su hacmi

V_{ch} : Nehir elemanındaki su hacmi

μ_{mon} : Aylık ortalama yağış miktarı

σ_{mon} : Aylık ortalama yağışın standart sapması

SND_{day} : Günlük standart normal sapma

rnd_1 : Rastgele sayı

rnd_2 : Rastgele sayı

g_{mon} : Aydaki yağışın eğik katsayısı

$\chi_i(j)$: Maksimum sıcaklık kalıntıları

$\chi_{i-1}(j)$: Önceki günün kalıntıları

$\mathcal{E}_i(j)$: Bağımsız rastgele bileşenlerin bir matrisi

μrad_{mon} : Aylık ortalama güneş radyasyonu

$days_{tot}$: Aydaki toplam gün sayısı

$\mu ward_{mon}$: Ayın nemli günlerindeki ortalama günlük güneş radyasyonu

$days_{wet}$: Ayda toplam nemli gün sayısı

$\mu dard_{mon}$: Ayın ortalama kuru günlerdeki güneş ışınımı

$days_{dry}$: Aydaki kuru gün sayısı

Rh_{mon} : Aylık ortalama bağıl nem

e_{mon} : Doymuş buhar basıncı

e^0_{mon} : Aylık ortalama hava sıcaklığı

μ_{10m} : Günlük ortalama rüzgar hızı

μwnd_{mon} : Aylık ortalama rüzgar hızı

μtmp_{mon} : Ayın ortalama hava sıcaklığı

μmx_{mon} : Aylık maksimum sıcaklık

μmn_{mon} : Aylık minimum sıcaklık

$yt^M_{i,95\%}$: 95PPU'nun üst sınırı

$yt^M_{i,2.5\%}$: 95PPU'nun alt sınırı

δ_{obs} : Gözlemlenen verilerin standart sapması

w_j : Değişkenin ağırlığı

A_s : Alan başına hesaplanan toprak kaybı

V_ϕ : Akış hacmi

D_G : Ortalama parçacık boyutu

Q_P : Nehirdeki pik akış hızı

η : Sayısal yükselti modeli hücre boyutu

θ : Radyan cinsinden eğim dikliği

n : Manning pürüzlülük katsayısı

Z_s : Su yüzeyi yüksekliği

ρ : Su-sediman karışımının yoğunluğu

Kısaltmalar **Açıklama**

AGWA : Otomatik Mekansal Havza Değerlendirmesi

CBS : Coğrafi Bilgi Sistemi

CCFSR : İklim Tahmin Sistemi Yeniden Analizi

CN : Eğri Numarası

CORINE : Çevre Bilgilerinin Koordinasyonu

ÇEM : Çölleşme ve Erozyonla Mücadele

DEM : Sayısal Yükseklik Modeli

DEMİS : Dinamik Erozyon Modeli ve İzleme Sistemi

DSİ : Devlet Su İşleri

DTM : Sayısal Arazi Modeli

FAO : Gıda ve Tarım Örgütü

GPS : Küresel Konumlandırma Sistemi

GULE : Genelleştirilmiş Olasılık Belirsizlik Tahmini

HEC : Hidrolojik Mühendislik Merkezi

HRU : Hidrolojik Tepki Birimi

HYMO : Hidrolojik Modeller

MCMC : Markov Zinciri Monte Carlo

MGM : Meteoroloji Genel Müdürlüğü

MUSLE : Modifiye Edilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi

NSE : Nash-Sutcliffe Verimliliği

OM : Organik Madde

OMGİ : Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonları

ParaSol : Parametre Çözümü
PBIAS : Yüzdesel Sapma
PPU : Yüzdesel Tahmin Belirsizliği
QGIS : Quantum GIS
QSWAT : QGIS'in SWAT Eklentisi
RAS : Nehir Analiz Sistemi
RS : Uzaktan Algılama
RTC : Radyometrik Olarak Düzeltilmiş Yüzey
RUSLE : Revize Edilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi
SCS : Toprak Koruma Sistemi
SİO : Sediman İletim Oranı
SWAT : Toprak Su Değerlendirme Aracı
SWAT-CUP : SWAT Kalibrasyonu ve Belirsizlik Prosedürü
SUFI : Sıra Belirsizliği Uydurma
TIN : Üçgen Düzensiz Ağ
WGEN : Hava Veri Seti Üretimi
W3S : Su Veri Hizmeti

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SEDİMAN TAŞINIM MODELLEMESİ VE YÖNETİMİ

Rouhollah NASIRZADEHDIZAJI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ

Toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı için erozyonun önlenmesi, bir başka deyişle sediman akımının sınırlandırılması gereklidir. Sedimanın hareketi; toprağın rüzgâr, su ve diğer aşındırıcı etkiler nedeniyle yer kabuğundan ayrılması, başka bölgelere taşınması ve birikmesi ile oluşur. Çeşitli doğal veya yapay, doğrudan veya dolaylı etkenlerle oluşan sediman taşınımı; su kalitesini, sucul canlıların yaşamını, arazi kullanımını, su yapılarının ömürlerini (örneğin barajlar, iskeleler, dalgakıranlar) etkileyebilir. Ayrıca, sediman taşınımı havzanın hem morfolojik hem de ekolojik yapısında önemli değişikliklere neden olabileceğinden, havza yönetimi açısından da önemlidir. Bu yüzden sediman miktarı ve hareketini doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi, modellenmesi ve yönetilmesi çevresel sorunların sürdürülebilir bir yönetimle giderilebilmesi için gereklidir. Erozyon ve sediman hareketlerinde meydana gelen değişimlerin önemli bir nedeni doğal olaylar veya antropojenik faaliyetler sonucunda arazi kullanımda meydana gelen değişimlerdir. Buna ormanların bozulması, tarım arazisi haline dönüştürülmesi örnek olarak verilebilir. Bu tip doğal ortamlardaki bozulmalar hidrolojik parametrelerde ve süreçlerde de değişiklikler meydana getirmektedir. Bunların oluşturduğu en önemli fark yüzeysel akış miktarındaki artıştır. Bu yüzden özellikle nehirlerin mansap kısımlarında sediman miktarlarında da önemli derecede bir artış meydana gelir. Bu artış orman ekosistemlerinin bozulmasının en yaygın yolu olan orman yangınları ile daha fazla tetiklenir.

Bu tez çalışmasında arazi kullanımının yüzeysel akış ve toprak erozyonuna etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve sonuçlarını tahmin edilebilmesi için yayılımlı hidrolojik modelleme

yöntemleri kullanılmıştır. İstanbul'a su temin eden ve çok yakın bir konumda olan Göksu ve Çanakdere havzaları çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu havzalarda sürdürülebilir sediman yönetimi için SWAT (Toprak Su Değerlendirme Aracı) hidrolojik modeliyle yağış-akış ve sediman modelleri kurularak mevcut durum ve arazi değişiminin etkilerini ölçebilecek senaryolar oluşturulmuştur. Ölçüm verileri yardımıyla mevcut duruma göre çalıştırılan model kalibre edilmiştir (temel model). Daha sonra ise iki farklı senaryo grubu tasarlanarak çalışma alanındaki orman yangınlarından (3 senaryo) ve tarım arazilerindeki değişimden (3 senaryo) kaynaklanan arazi kullanımındaki değişikliğin sediman verimi ve taşınması üzerinde etkileri toplam 7 senaryo ile incelenmiştir.

Birinci senaryo grubunda farklı büyüklükteki orman yangınlarının akım ve sediman üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun için olası orman yangınlarının havza ölçeğinde sediman yükü üzerindeki etkisi, yanmış bölgelerin mekânsal konfigürasyonu ve modelin farklı parametrelerindeki değişiklikleri dikkate alınarak incelenip sonuçlar elde edilmiştir. Yangın sonrası koşullarda, su verimi 151,8 mm'den 256,6 mm'ye yaklaşık %70 artarken, sızma oranları yangın öncesi ile karşılaştırıldığında %37 azalma göstermektedir. Buna göre, yangın etkisinden sonraki su verimi artışı, daha çok yüzeysel akışın (%14,5) meydana gelmesine sebep olmuştur. Sonuçlara göre alt havzalarının hidrolojik ağına taşınan ve aşınan sediman miktarı, mevcut duruma göre 116,3 ile 196,2 ton ha^{-1} arasında değişmekte olup, yangın sonrası koşullar için yangının olmadığı duruma kıyasla yaklaşık 2 kat artarak 95,9 ton ha^{-1}'lik bir erozyon artışına karşılık gelmektedir.

İkinci senaryo grubunda ise ormansızlaşma (yangın sonrası veya orman ağaçlarının kesildiği) sonrasında orman alanlarının tarımsal faaliyetlere dönüştürülmesinin havzadaki sediman miktarlarında meydan getirdiği değişim araştırılmıştır. Orman arazilerini kuru tarıma dönüştürmek o bölgelerdeki toprağın yapısını değiştirerek dağılımını etkiler. Tarımsal faaliyetlerde erozyon ve toprağın aşınması, tarım alanında yüzeydeki toprağın su ve rüzgârın doğal fiziksel veya kimyasal kuvvetlerle veya çiftçilik faaliyetlerinden (örneğin sürme veya toprak işleme gibi) kaynaklı mekanik kuvvetler yoluyla meydana gelir. Arazi kullanımı değişikliklerinin, yani ormanların tarımsal faaliyetler için bozulmasının, alt havza ölçeğinde yüzeysel akış ve sediman verimi üzerindeki etkisi; arazi kullanımı değişikliğinden önceki sediman verimine kıyasla 3,5 kat artış göstermiştir. Sediman veriminde meydana gelen bu önemli artış; sediman kaynaklı azot ve fosfor miktarında, yangın öncesine kıyasla sırasıyla 2 kat ve 2,5 kat daha yükselmiştir. Su verimi ise yaklaşık 144 mm'den 179 mm'ye kadar artış göstermiştir başka bir ifadeyle yüzeysel akış %24 oranında artmıştır.

Tezin bir sonraki aşamasında ise SWAT hidrolojik modelinden elde edilen yağışın havzada oluşturduğu pik akım değerleri HEC-RAS hidrolik ve sediman modelinde girdi olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla arazideki değişikliğin nehirdeki akım ve sediman hareketi üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Başka bir değişle, olası arazi kullanımı/örtü değişikliklerinin akarsu akışı ve bunların sediman yükü üzerindeki etkilerini analiz etmek için hidrolik ve sediman modellerinden de faydalanılmıştır. Hidrolik model çıktılarından elde edilen sonuçlara göre taşkın yayılım alanı havzadaki akım istasyonlarından ölçülen en yüksek debilere göre 1,7 km^2 iken yangın senaryosundan elde edilen pik debilerde 2,15 km^2 olarak 0,4 km^2 lik artış göstermiştir. Sediman model sonuçlarına bakıldığında, akım ve sediman gözlem istasyonundan ölçülen pik debide membadan mansaba $219x10^3$ m^3, yangın sonrası model pik debisinde ise yaklaşık 30 kat kümülatif hacim miktarında artış olduğu bulunmuştur.

Göksu ve Çanakdere akarsuları üzerinde Sungurlu ve Osmangazi barajlarının yapılması planlandığından sediman kaynakları ve yönetimi ile ilgili önerilerin sunulması, sediman

miktarındaki değişiminin araştırılması ülke ekonomisi açısından da gerekli ve faydalıdır. Yönetim uygulamaları açısından, bu çalışmadaki bulgular Göksu ve Çanakdere nehirlerinin havzasındaki hidrolojik riskler ve çevre sorunlarının ele alınmasında bir altlık olarak kullanılabilir. Su havzalarının hidrolojik arazi kullanımı/örtü değişikliklerinin etkisinin değerlendirilmesi, değişikliklerin oluşturduğu yüzeysel akış ve erozyon miktarındaki artışı kontrol altına almada ve azaltmada kritik bir adımdır. Hidrolojik modellerin geliştirilmesi, toprak erozyonu ve sedimantasyonun olumsuz etkileriyle başa çıkmak için yönetim uygulamalarına etkin bir şekilde yardımcı olabilir. Bu modeller, arazideki değişikliklerin hidrolojik süreçler üzerindeki etkileri önceden belirlemesi sayesinde, karar vericiler oluşabilecek çevresel sorunların etkilerini sınırlandırma ve en uygun sorun azaltma yönetim planlamaları hazırlanmasında ve uygulanmasında yardımcı olabilmektedir.

Genel olarak, bu tezin literatüre toplam katkısı ana hatları ile aşağıda üç madde ile belirtilmiştir. 1) Literatürde çalışma alanında herhangi bir mevcut hidrolojik model çalışması bulunmamaktadır, bu tez kapsamındaki çalışmalar ve araştırmalar literatürdeki bu boşluğu dolduracaktır. 2) Çalışma alanında İstanbul'a su temin etmek için iki ana su regülatör yapısı bulunduğundan, havzadaki sediman kaynaklarının incelenmesi ve belirlenmesi karar vericiler için kritik öneme sahiptir. Sonuçlar, sediman taşınım miktarını azaltmak, su kalitesini iyileştirmek ve kaynak yönetimini sürdürmek için önerilerin formüle edilmesinde önemli ipuçları sağlar. 3) Su havzasındaki akarsular üzerinde Sungurlu ve Osmangazi Barajları olmak üzere iki baraj planlanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, baraj proje tasarımına ekonomi ve çevre açısından rehberlik edebilecektir. Bu nedenle havzalardaki sediman veriminin azaltılmasıyla barajların ömrü uzatılabilecek ve rezervuarlarda sediman depolanması için ayrılan ölü hacmi miktarı azaltılabilecektir.

Mayıs 2022 , 147 sayfa.

Anahtar kelimeler: Arazi kullanımı/örtü değişikliği, Orman yangınları, Ormansızlaşma, SWAT Hidrolojik modeli, HEC-RAS hidrolik ve sediman modeli, Erozyon, Sediman verimi, Havza yönetimi

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

SEDIMENT TRANSPORT MODELING AND MANAGEMENT

Rouhollah NASIRZADEHDIZAJI

Istanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Civil Engineering Programme

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dilek Eren AKYÜZ

Erosion and sedimentation issues and their impact on water resources and the environment are unavoidable and remain significant challenges for watershed management with high soil erosion rates. Erosion processes remove rock or soil and lead to the formation of mineral sediment. The sediment moves with water (i.e., surface runoff), wind, ice, and deposits in new locations by gravity acting on the particles. The water's kinetic energy causes to wash of sediments down from the surface into a stream and eventually to the river's delta. There are complex interactions on the scale of river sections and basins, which affect the movement of sediments and the generation of habitat types in the river. sediment can accumulate under, in, or around structures such as bridges, conduits, reservoirs, and water intakes. This process leads to cracks in the riverbed, severe stream instability, and ultimately abnormal flow around engineering structures such as bridge piers or culverts. Unlike frequent low-flow flood events, rare high-flow flood events can transport more sediment, leading to sudden sediment accumulation. Different phenomena such as ground deformations or landslides can also lead to the overrun of sediments in the river system and form an unexpected build-up of sediments deposition. In addition, sediment is also crucial in watershed management as it can lead to significant changes in the morphology and ecological structure of watersheds. Therefore, accurate estimations, modeling, and management of sediment load and transport are essential for solving environmental problems with sustainable management.

This thesis aims to conduct a sediment modeling study for sustainable sediment management in the Göksu and Çanakdere basins located in Istanbul and Kocaeli provinces. Different scenarios were carried out by establishing flow and sediment models. To this end, the SWAT hydrological model was used to simulate the impact of land use change on water and sediment yields in the basin. First, the model was developed according to the current situation and calibrated with the observed data for flow and sediment. Then, the impact of different land-use changes scenarios, such as forest fires (3 scenarios) and deforestation (3 scenarios), in the study area, on sediment loads was investigated. In addition, peak flow values obtained from the hydrological model were applied to the HEC-RAS hydraulic and sediment models to examine the effects of the land-use change on the hydraulic and sediment movement. Hence, the effects of the land-use change on the water and sediment movement were examined in this way.

In the first scenario group and post-fire conditions, water yield increased from 151.8 mm to 256.6 mm, an increase of about 70%, while permeability decreased by 37% compared to pre-fire. Therefore, the increase in water yield following the fire resulted in an increase in runoff (14.5%). According to the results, the amount of sediment transported, and the soil eroded into the hydrological network of its sub-basins ranged between 116.3- and 196.2-tons ha^{-1}, resulting in an almost 2-fold increase for post-fire conditions compared to the no-fire situation. This corresponds to an increased erosion rate of 95.9 tons ha^{-1}. In the second scenario group, there was a 3.5-fold increase in sediment yield after deforestation (and using these areas for agricultural activities) compared to before land-use change. After a significant increase in sediment yield, organic nitrogen and phosphorus were obtained to be 2 times and 2.5 times higher, respectively, than before the fire. Water yield increased from about 144 mm to 179 mm, resulting in a 24% increase in surface runoff. Based on the results obtained from the HEC-RAS hydraulic model, and according to the highest flow rates measured from the meteorological stations in the basin, the flooded area in the downstream areas was obtained as 1.7 km^2, while with the peak flow rates obtained from the fire scenarios, the flooded area has increased by 0.4 km^2 and reached to 2.15 km^2. When the sediment model results are examined, in the measured peak flow from the meteorological stations, an increase of $219x10^3$ m^3 from the upstream to the downstream in sediment cumulative volume has been obtained, and while in the peak flows after the fire events with maximum the burnt areas, the cumulative volume has increased about 30 times.

Therefore, with the help of the models and methods presented in this paper, it will be possible to estimate and mitigate environmental problems of different phenomena, such as wildfires or deforestation, before they arise in the future. In addition, by examining and identifying existing sediment resources within the watershed, recommendations can be made to reduce and manage sediment transport from identified sources. Since Sungurlu and Osmangazi dams are planned to be built on Göksu and Çanakdere rivers, it is necessary and beneficial for the country's economy to present suggestions about sediment sources and management to investigate the change in sediment. To this end, we investigated the potential of applying the SWAT hydrological model to examine the impact of land-use/cover changes on sediment loads.

The purpose of this study is to evaluate the hydrological consequences of possible land-use/cover changes and their effects on streamflow and use runoff and erosion models to analyze their respective impacts on sediment load. For this purpose, we designed land-use change (i.e., forest fires and deforestation) scenarios. To predict the hydrological response to the changes, we applied the rainfall-runoff model using the meteorological and basin characteristic data (land-use, soil, and topography). The model is calibrated using observed flow and suspended sediment concentration data.

In terms of management practices, the findings in this study can be used in dealing with hydrological risks and environmental issues in the Göksu and Çanakdere rivers' watershed. Assessing the impact of land-use/cover changes on the hydrological response of watersheds is a critical step in reducing the likelihood of excessive surface runoff and erosion rates after changes. The development of hydrological models can effectively help management practices deal with the adverse effects of land use/cover changes, such as soil erosion and sedimentation. The consequences of land use/cover changes on hydrological services can help decision-makers choose better post-changes mitigation and management plans to limit the impact of the land use/cover changes on the sediment load and its environmental issues.

In general, to demonstrate the total contribution of this thesis, we outline the following three main aspects. 1) There are no hydrological model studies available in the study area in the existing literature, and the current research will fill this gap in the literature. 2) Since there are two main water regulator stations to supply water to mega-city Istanbul, examining and identifying existing and possible sediment resources in the watershed is critical for decision-makers. The results provide essential clues in formulating recommendations to reduce sediment transport, improve water quality and maintain resource management. 3) Two dams, Sungurlu and Osmangazi Dams, are planned on the streams in the water basin. The results of this study will guide the economic and environmental design of the dam project. Therefore, reductions in sediment yield in their basins extend the life of dams and reduce the dead volume in reservoirs. By applying the rainfall-runoff model of the Göksu and Çanakdere Rivers basin, we designed scenarios similar to land use/cover change (forest fires and deforestation) previously observed in the basin to provide relevant mitigation strategies to deal with natural threats and hydrological risks.

May 2022, 147 pages.

Keywords: Land use/cover change, Forest fires, Deforestation, SWAT hydrological model, HEC-RAS hydraulic and sediment model, Erosion, sediment yield, Watershed management

1. GİRİŞ

Erozyon ve ilgili konular, su kaynaklarının yönetimi ve geliştirilmesinde her zaman önemli bir yere sahiptir. Buna rağmen sediman hareketinin ve miktarının hesaplanması ve yönetimi zordur. Bunun sebebi erozyonun oldukça karmaşık ve geri dönüşü olmayan bir sürece sahip olmasıdır. Toprak kaybı sebeplerinin belirlenmesi ve dolayısıyla erozyonun azaltılması özellikle şu açılardan önemlidir; ilk olarak tarımsal açıdan uzun vadede, özellikle eğilimli olan toprakların erozyondan dolayı taşınmasından toprağın kalitesini düşürür. Düşük kaliteli toprakta tarım ürünlerinin üretilmesi büyüme miktarını ve kalitesini doğrudan olumsuz şekilde etkiler. İkincisi, erozyondan kaynaklanan toprağın özellikle yağmurlardan dolayı sediman olarak taşınmasıdır. Bu sediman akarsulardaki su kalitesini düşürdüğü gibi mansapta birikmelere de sebep olur ve bunun sonucu olarak akarsuyun izlediği yolun değişmesine sebep olabilir. Bu değişim ise özellikle çıkış noktasına yakın bölgelerde taşkın veya sel oluşması halinde büyük can ve mal kaybına sebep olabilir. Sediman oluşumu alanları sediman modelleme aşamasında tespit edilerek bu tip olası alanları yapısal veya yapısal olmayan çözüm önerileri ile zararın en aza indirilmesi mümkün olabilir. Diğer bir deyişle bir afet döneminde örneğin sel veya orman yangınında erozyon ve sediman ektileri çalışma alanında hangi çevresel etkilere sebep olabileceğinin belirlenmesi can ve mal güvenliğini artıracaktır. Dolayısıyla kayıpların önüne geçmek, toprak ve su kaynaklarını geliştirmek ve sürdürülebilirliği artırmak için su havzaları ve derelerdeki erozyonu kontrol ederek sediman problemlerinin (sedimanın kaynağı, taşınımı ve birikimi) sınırlandırılması gerekmektedir.

Erozyon olaylarının hızlanmasına neden olan güçler arasında artan nüfus, gelişen teknoloji ve sanayi, tarım arazisi kazanmak için mevcut orman arazilerinin küçültülmesi, orman arazilerinden usulsüz faydalanmak, önemli ölçüde yangın ve otlatma yoluyla ormanların tahrip edilmesi, meralarda aşırı ve kontrolsüz hayvan otlatılması ve arazinin özelliklerine uygun olmayan ve herhangi bir koruyucu önlem alınmadan kullanması gibi etkenler sayılabilir (Dinçsoy, 2013). Arazi kullanımı/örtüsünün havza karakteristiği ve hidrolojik etkilerinin yanı sıra derelerde taşkın, su kalitesi ve sediman yönetimi üzerinde ve mansap dere ağızlarının hidrolik olarak önemli etkisi bulunmaktadır. Arazideki bitki örtüsü, toprak ve yüzeysel akışları arasında doğal bir denge sağlamaktadır. Bitki örtüsünün zarar görmesi ya da tahrip edilmesi

durumda aynı yağışlarda bile yüzeysel akışları artar, bunun sonucu olarak erozyon oranı da artacaktır.

Erozyonun şiddeti ve miktarı hakkında bilgi sahibi olmak, erozyonun çevresel ve ekonomik etkilerine karşı önlemlerin alınabilmesi açısında önem arz etmektedir. Böylece erozyon kaynaklarının ve dolayısıyla sediman problemlerinin belirlenmesi ile herbolojik (bitkisel) ve mekanik önlemleri içeren projeler daha başarılı bir şekilde uygulanabilir. Toprak erozyonundan kaynaklanan sediman miktarını tahmin etmek ve hesaplamak belli elementler ve etkenler bilindiği ve temel ihtiyaç olan verilerin mevcut olması durumunda belli hata payı ile mümkündür. Toprak kaybı ve sediman oranlarını modellemek ve hesaplamak için çeşitli yöntemler ve yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Bu tez çalışması için Göksu ve Çanakdere akarsularına ait iki havza çalışma alanı olarak seçilmiştir. Göksu ve Çanakdere havzalarında erozyon ve sediman taşınımının araştırılması önemlidir. Göksu ve Çanakdere akarsularının üzerinde mansaba yakın kısımlarında İstanbul'a su sağlamak için iki ana su regülatör tesisi bulunmaktadır. İstanbul'a su temini amacıyla yapılan bu yapıların ömürleri bitmeden kullanılamaz hale gelmemesi için de sediman miktarının sınırlandırılması gerekmektedir. Bu iki havza; İstanbul'un uzun vadeli içme suyu ihtiyacını karşılamak amacıyla planlanan Yeşilçay Projesini de içine almaktadır. Bu nedenle, Göksu ve Çanakdere akarsularının üzerinde Sungurlu ve Osmangazi barajlarının yapılması da planlanmaktadır. Havzadaki arazi kullanım türü ağırlıklı olarak tarım ve orman alanlarından oluşmaktadır. Bu havzalardaki akarsuların memba kısmında tarım alanları ve mansap kısımları ise ormanlarla çevrilidir. Bu yüzden, tarımsal faaliyetlerde veya orman alanlarındaki bir değişiklik havzayı önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, bu havzalarda arazi kullanımı/örtüsü değişiklikleri çevresel ve ekonomik olarak büyük etkilere sebep olacaktır. Bu nedenle, arazi kullanımı/örtüsü değişikliklerinden sonra havzadaki hidrolojik tepkileri, erozyon ve sediman üzerindeki etkilerin araştırılması sürdürülebilir yönetim açısından büyük önem arz etmektedir. Çalışma alanı olarak seçilen Göksu ve Çanakdere havzalarında böyle bir çalışma bulunmamaktadır. Böylece bu tez çalışmasından elde edilen sonuç ve çıktıları literatüre katkı sağlamaktadır.

Tez çalışmasının genel amacı; Göksu ve Çanakdere havzalarındaki sediman taşınım modellemesi, sediman taşınmasına sebep olan çevresel etkilerin incelenmesidir. Böylece bu havzalarda sediman taşınım yönetim planına katkı sunulacaktır. Çalışma kapsamında, arazi

kullanımı/örtü değişikliklerinin hidrolojik sonuçlarını ve bunların yüzeysel akışı, erozyon ve sediman yükü üzerindeki etkilerini, mevcut durum ve değişik senaryo grupları çerçevesinde değerlendirmek amacıyla yağış-akış ve sediman modeli kurulmuştur.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. SEDİMAN HAREKETİ

Organik ve organik olmayan madde, doğal dış kuvvetlerle örneğin su (yüzeysel akış), rüzgâr, buz veya yapay bir şekilde örneğin bir alet veya makine etkisiyle yerde sürüklenip askıda ve zeminde hareket eder. Parçacıklara etki eden yerçekimi ile yeni yerlerde biriktirilir. Doğal veya antropojenik yollarla oluşan bu işlem erozyon olarak adlandırılır ve erozyon da sedimanın meydana gelmesine sebep olmaktadır. Sedimanların hareketini ve nehirdeki habitat türlerinin oluşumunu etkileyen nehir bölümleri ve havzaları ölçeğinde karmaşık etkileşimler vardır (Bettess ve diğ., 2011; Gellis ve diğ., 2016). Su, sürekli olarak yataktan ve nehir kıyılarından toprağı aşındırır ve oluşan sedimanı havza boyunca memba ve havzanın çıkış kısmına taşır. Daha düşük enerjili düz alanlarda (örneğin, taşkın ovalarında veya köprüler gibi yapıların zayıf tasarımının çevresinde) çökelmektedir. Daha yüksek debi veya sel olayı meydana geldiğinde başka bir yere taşınır (SEPA, 2009). Diğer bir deyişle, suyun kinetik enerjisi, kum, silt veya çakıl gibi sedimanları bir dereden başka bir dereye ve sonunda nehir deltasında biriktirmesine neden olur.

Sediman, köprüler, kanallar, rezervuarlar ve su girişleri gibi yapıların altında, içinde veya çevresinde birikebilir. Bu birikim, nehir yatağında bir çatlak ve köprü ayakları veya menfezler gibi mühendislik yapılarının çevresinde olağandışı akıntılar oluşturarak önemli bir nehir kararsızlığı ve büyük bir erozyon oranı oluşturarak nehirdeki erozyon veya birikim oranında değişikliklere yol açar. Daha sık görülen düşük akışlı sel olaylarıyla karşılaştırıldığında, nadir görülen yüksek akışlı sel olayları daha fazla sediman taşıyarak ani sediman birikimine neden olur. Zemin deformasyonları veya toprak kaymaları gibi farklı olaylar da nehir sistemindeki sedimanların taşınmasına ve beklenmedik bir sediman birikiminin oluşmasına yol açabilir.

2.2. SEDİMAN KAYNAĞI

Doğal olarak oluşan sedimanın yanı sıra tarım, orman yangınları, ormansızlaşma, madencilik, kentleşme ve yol yapımı gibi faaliyetlerin toprak erozyonu ve dolayısıyla sediman oranları üzerindeki etkisi kaçınılmazdır (Amundson ve diğ., 2015; Hassan ve diğ., 2017).

Sedimantasyon ve erozyon miktarlarındaki değişikliklerin önemli bir nedeni arazideki değişimlerden kaynaklanan hidrolojik değişikliklerdir. Tarımsal faaliyetlerde, toprak erozyonu, su ve rüzgârın doğal fiziksel veya kimyasal kuvvetleriyle veya çiftçilik faaliyetleriyle birleşen kuvvetlerle (sürme ve toprak işleme gibi) ve tarlanın üst toprağının aşınması yoluyla meydana gelmektedir (Ritter, 2012). Dünyanın hızlı nüfus artışı, kentleşmeye ve değişen arazi kullanımına yol açmaktadır. Öte yandan, nüfus artışı birçok ülkede gıda talebinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle tarım sektörü, büyüyen topluluklar için yeterli gıda üretmek ve sağlamak için aşırı baskı altına alınıyor. Toprak erozyonu ile, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerine sahip su ve besin maddelerini depolama kapasitesinin azalması nedeniyle tarımsal amaçlı kullanılan en verimli ve değerli toprak kaybolmaktadır (Langdale ve diğ., 1992). Verimli üst toprağın kaybı, azalan toprak organik maddesi ve artan üretim maliyetleri nedeniyle mahsul veriminin düşmesine neden olur (Pimentel ve Burgess, 2013). Toprak erozyonunun etkisi sadece verimli toprakların kaybı değildir. Akarsularda ve nehirlerde kirlilik ve sedimantasyonun artmasına, su yollarının tıkamasına ve sucul canlılarının örneğin balık ve diğer türlerin azalmasına neden olur. Bozulmuş topraklar genellikle suyu tutamaz ve bu da selin şiddetini artırır. Bu nedenle, zengin organik maddeye sahip verimli üst toprağın kaybı, bozulmuş toprak yapısı ve besin maddelerinin azalması nedeniyle mahsul verim potansiyelini düşürür (Allison., 1973; Brevik, 2006; Wardle ve diğ., 2004). Tarım ürünlerine olan talep artışı, ormanları ve otlakları tarım arazilerine dönüştürülmesine sebep olur (Izquierdo ve Grau, 2009).

Ormanların çeşitli ekolojik ve hidrolojik faydaları vardır, örneğin sızma ve su tutulmasına katkıda bulunur. Bu nedenle, toprak kolonunda filtrasyon, su kalitesinin iyileştirilmesine yardımcı olur (Bredemeier, 2010). Ayrıca, orman örtüsü altında bitkilerin (ağaç vb.) ve bitki döküntülerinin (yaprak vb.) olması ve beraberinde azalan su verimi gibi etkileri sayesinde erozyon miktarında azalma meydana getirir ve dolayısıyla mevcut sediman ve taşkın tehlikelerinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum (arazideki değişim) hem toprak kalitesi hem de mansap su ortamlarının etkilenmesi anlamına gelir (Farley ve diğ., 2005; Owens ve diğ., 2005; Schüler, 2006). Ormanların yok edilmesi ve tarımsal faaliyetler için ormanların bozulması, orman kaynaklı yaprak çöpü ve bitki köklerinin kaybı yoluyla toprak erozyon oranlarında önemli bir artışa ve dolayısıyla sediman taşınımına yol açmaktadır. Yaprak çöpü ve toprak parçacıklarını yüzeyinde ve yer altında tutan bitki kökleri toprağı rüzgar ve su erozyonundan korumak için fayda sağlamaktadır (Avwunudiogba ve Hudson, 2014; Pimentel ve diğ., 1995; Wenger ve diğ., 2018). Orman arazilerini tarıma dönüştürülmesi, ormanın

bozulması ve ormansızlaşmanın neden olduğu etkiler toprağın yeniden dağılımına sebep olmaktadır. Ek olarak, bu faaliyetler ormanlarda bulunan bitki ve canlıların tür kaybına ve ekosistem fonksiyonlarının bozulmasına yol açarak karasal ekosistemlerini de negatif bir şekilde etkilemektedir (Maxwell ve diğ., 2016; Rocha-Santos ve diğ., 2016). Bu nedenle, hidrolojik süreçlerdeki değişiklikler yoluyla, ormanların tarım için bozulması ve yok edilmesi ve dolayısıyla sediman miktarının artması su kalitesinde ve akarsuyun özellikle çıkış noktalarında önemli mansap etkilerine neden olacaktır (Iwata ve diğ., 2003; Jenkins ve diğ., 2007; Pattanayak ve Wendland, 2007).

Orman ağaçlarının kesilmesine ek olarak, orman yangınları ormanların yok olmasının en yaygın sebebidir. Orman yangınları ya doğal kaynaklıdır ya da insan faaliyetlerinden kaynaklanır. Duruma bağlı olarak, doğal orman yangınlarına esas olarak yıldırım, volkanlar, meteorlar ve kömür damarı yangınları neden olur. Ancak, küresel ölçekte, orman yangınlarının sadece yaklaşık %4'ü doğal sebeplerden kaynaklanmaktadır. Diğer tüm durumlarda, insanlar doğrudan veya dolaylı olarak, kasten veya ihmalden kaynaklanan yangınlardan sorumludur (Hirschberger, 2017). Yangınların antropojenik nedenleri, orman yangınları ile en yüksek ilişkiyi oluşturan tarım ve çiftçiliktir (Juárez-Orozco ve diğ., 2017). Orman yangınları ekosistemleri ciddi şekilde etkiler, ormanların tamamen veya kısmen kaybolması nedeniyle, ormanların olumlu etkilerini örneğin, toprak erozyon koruması, toprak özelliklerinin zenginleştirilmesi (Certini, 2005), hidrofobikliğin azaltılması, sızma kapasitesinin arttırılması ve yüzey akışının azaltılması gibi etkilerini önemli bir şekilde değiştirmeye yol açar (Martin ve Moody, 2001). Ayrıca hem yamaçlarda hem de nehir aşağısındaki sucul canlıların yaşamına zarar verirler. Bu nedenle, orman yangınları daha yüksek toprak erozyonuna yol açar ve bitki örtüsünün ve döküntülerinin yanması, organik maddenin yok edilmesi (Fernández ve diğ., 2020; Vieira, 2015) ile toprağın su geçirmezliğinin ve erozyon oranının artmasına sebep olur (DeBano, 2000; Ice ve diğ., 2004).

Orman yangınları ormandaki bitki örtüsünün sağladığı faydaları örneğin yere ulaşan yağışın direk olarak yere ulaşımına engel olması, bitki örtüsünün tamponlama etkisinden dolayı yağış yoğunluğunun toprak üzerindeki etkilerini azaltması yoluyla toprak yapısının ve topraktaki boşlukların korunmasına yardımcı olması işlemlerini etkiler. Yamaç koşullarındaki bu değişiklikler, pik akım ve sedimantasyon oranlarını doğrudan etkiler. Bu nedenle, yangın sonrası, içme suyu temini için tasarlanmış rezervuarların kapasitesini azaltacak olan, akımın mansap kısmında sel oluşumu ve sediman taşınımıdır (Robichaud ve diğ., 2000). Orman

yangınları, bitki örtüsünün ve ağaçların yer yüzeyinde yok edilmesi, toprağı açığa çıkarır, yağmur damlalarının etkisiyle sedimanın sürüklenmesine neden olur, pürüzlülüğü azaltır, hidrolojik bağlantıyı değiştirir (Fernández ve diğ., 2020) ve yüzeysel akışının yamaçlardan daha hızlı akmasına neden olur. Hidrolojik değişiklikler, suyun yamaçlarda birikme ve sızma süresini kısaltır, bu da daha yüksek bir akış hızı ve daha yüksek sediman konsantrasyonu ve taşıma kapasitesi ile sonuçlanır (Canfield ve diğ., 2005).

2.3. HİDROLOJİK MODELLEME

Önceki çalışmalar, orman yangınlarının olumsuz etkilerini ve yüzeysel akışı ve sediman yükleri üzerindeki hidrolojik etkilerini değerlendirmiştir. Beaty (1994), 1974 ve 1982 yılları arasında iki arka arkaya olan orman yangınının nehir yatağındaki sediman taşınımı üzerindeki etkisini incelemiş ve yatak yükü taşınımının ilk orman yangınından sonra 20 kat, ikinci yangından sonra üç kat arttığını ve çözünmüş yükün baskın olduğu inceleme döneminde parçacık boyutlarının %87 artma eğiliminde olduğunu göstermiştir. ABD Tarım Bakanlığı Orman Servisi Yanık Alan Acil Onarımı (BAER), bir yangından sonra acil su havzası restorasyon için sel akışının (taşkınların), erozyonun ve alandaki hidrolojik hasarı azaltma ve önlemlerinde kullanmak amacıyla, BAER model üzerindeki çalışmalarda önemli ölçüde yatırım yapmıştır (Robichaud ve diğ., 2000). BAER modeli acil durum operasyonlarına göre bir orman yangınından sonra, erozyonu, sedimantasyon ve taşkınları azaltmak ve sedimanın hareketini ve su verimini ölçmek için tasarlanmıştır. Çeşitli araştırmalar, erozyon etkisinin yangından sonraki ilk yılda en belirgin olduğunu ve sonraki yıllarda istikrarlı bir şekilde azaldığını ve üç ila beş yıl içinde başlangıç değerlerine döndüğünü ortaya koymuştur (Ewing, 1996; Moody ve Martin, 2001; Robichaud ve diğ., 2000). Ryan ve diğ., (2011), kar erimesi akışı ve yaz fırtınaları sırasında toplam askıdaki sediman yükünün sırasıyla %54 ve %44 arttığı sonucuna varmıştır. Ryan ve diğ., (2011) araştırmalarında elde edilen sonuca göre yangın sonrası ilk yıldan sonraki yıllarda sedimanın yanmamış su havzalarında ve yangın öncesi dönemde gözlenen seviyelere geri dönmeye başladığı izlenmiştir.

Orman yangınlarının fiziksel, kimyasal, biyolojik, ekolojik, çevresel, sosyoekonomik ve hidrolojik etkileri çeşitli çalışmalarda incelenmiştir (Bivolarski, 2019; Carlucci ve diğ., 2019; Certini, 2005; Diaz, 2012; Ekinci, 2006; Gottfried ve diğ., 2003; Harrison ve diğ., 2009; Martinho, 2019; Nyamadzawo ve diğ., 2013; Rábade ve Aragoneses, 2008; Verma ve Jayakumar, 2012). Ancak, orman yangınlarının yüzeysel akışı ve erozyon-sedimantasyon

üzerindeki etkileri kavramını geliştirmek ve orman yangınlarının olumsuz sonuçlarına karşı ilgili azaltma stratejileri, hidrolojik uygulama potansiyeli ve sayısal modellerin kurulması kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır. Hidrolojik modellerde, model belirsizliğini değerlendirmek ve ölçmek, hidrolojik değişim tespiti değerlendirme açısından önemli bir unsurdur. Modellerin değişiklik tespitleri için kullanılmasındaki belirsizlikler, modelin fiziksel süreçleri temsil etme yeteneği veya girdi verilerinin kullanılabilirliği ve doğruluğudur. Havza tepkilerini etkileyen iklimsel ve fiziksel faktörlerin değişkenliği nedeniyle akım-sediman ilişkileri model hesaplamalarında doğru şekilde temsil edilemeyebilir (Surfleet ve diğ., 2012; Zégre ve diğ., 2010). Bu nedenle, model verimliliği, girdi verilerinin doğruluğuna bağlıdır. HBV-EC ve DHSVM modelleri, ilk iki hidrolojik model olarak, havza hidrolojisindeki değişiklik tespiti ve analizi gerçekleştirmek için yağmur göstergelerinden ve iklim verilerinden saatlik yağış kullanılarak uygulanmıştır (Bergström, 1976; Lindström ve diğ., 1997; Moore, 1993; Wigmosta ve diğ., 1994). Erozyon ve selin sorun olabileceği alanları belirlemek yangın sonrası havza değerlendirmesi, arazi yöneticilerinin tehlike ve afet zararlarını azaltma ve restorasyon metotlarını uygulamaya yardımcı olabilir. Hidrolojik değişimi incelemek, doğal karmaşıklık ve havzalardaki mekânsal ve topoğrafik değişiklikler nedeniyle, yayılımlı (distributed) yağış-akış modelleme yöntemlerini gerektir.

Otomatik Jeo-mekansal Havza Değerlendirme (AGWA) modeli, coğrafi bilgi sistemi (CBS) tabanlı bir erken yayılımlı hidrolojik modeli olarak Tucson, Arizona'nın kuzeyinde yangının akım ve erozyon üzerindeki potansiyel etkisini tahmin etmek ve yangından önce ve sonra akarsu havzasını değerlendirmek için geliştirilmiştir (Goodrich ve diğ., 2000). Elde edilen sonuçlar, yangından etkilenen alanın hidrolojik AGWA modelinin, iyileştirme çalışmalarını daha etkili bir şekilde hedeflemek için bir yangından sonra havzayı hızlı bir şekilde değerlendirme yeteneği sağladığını göstermiştir. Ancak, çoklu işlemleri gerçekleştirmek ve havza ölçekli değerlendirmeleri için AGWA modeline iki model; Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) (Arnold ve diğ., 1998) ve Kinematik Akış ve Erozyon Modeli (KINEROS2) (Smith ve diğ., 1990) entegre edilerek SWAT, bir yağış-akış modeli olarak sunulmuştur. SWAT, büyük (nehir havzası ölçeğinde) su havzalarında arazi örtüsünü, iklim değişikliğini ve yönetim uygulamalarını (örneğin tarım) değerlendirmek için kullanılan zamana bağlı bir simülasyon modelidir.

SWAT modeli, çeşitli yönetim kararlarının (örneğin arazi kullanımında yapılan değişiklikler veya su yapılarının inşa edilmesi gibi) etkilerini modelleme imkân sağlar. Bu modelin sediman

modellemesinde de başarılı olduğu dikkat çekmiştir. Büyük havzalarda sediman taşınımı hesaplamalarında doğruluğu artırmak için Vigiak ve diğ., (2017) tarafından önerilen bir prosedür yardımıyla havzada birden fazla veri istasyon için ortalama yıllık sediman konsantrasyonunu elde etmek için sediman parametrelerini sınırlandırılması ile sediman verilerinin birleşik kullanımına imkân sağlamıştır.

Bonumá ve diğ., (2014) tarafından yapılan sediman çökelmesinin eklenmesi ile modelin dik yamaçlara sahip havzalarda da sediman verimini hesaplayabilme yeteneği artırılmıştır. Böylece, modelin dik alanlardaki ve sediman birikim alanlarında sedimanın mekânsal dağılımını tahmin etme yeteneğini önemli ölçüde geliştirilmiştir. Danube havzasının memba kısmında, 1999-2009 yılları arasında sediman konsantrasyonlarının ve sediman verimlerinin modellenmesindeki başarı, Vigiak ve diğ., (2015) tarafından bir eşik alanının 3-Boyutlu (3-B) topoğrafya ayarlarının birleştirilmesi ile oluşturulan SWAT konfigürasyonu yoluyla artırılmıştır. Ayrıca ilgili çalışmada kullanılan çok-tipli ve çok-istasyonlu veri kalibrasyon metodu sayesinde sediman modellemesi daha da doğru bir şekilde yapılmıştır.

Kuzey Fas'ta bulunan Kalaya havzasında sediman verimini değerlendirmek için kullanılan SWAT modeli ile gelecekte yapılması planlanan barajın boyutlandırılması ve sel felaketleri riskinin yönetilmesi için gerekli olan bazı parametrelerin belirlemesinde başarılı sonuçlar vermiştir. Böylece bu modelleme çalışmaları, Kalaya nehri havzasında su kaynaklarının yönetimine ve ülkenin sürdürülebilir kalkınmasına büyük katkı sağlamıştır (Briak ve diğ., 2016). Ayrıca SWAT, Kuzey Afrika havzalarında rezervuar yönetimini geliştirmek amacıyla barajların yüzeysel suyuna, su-sediman depolama miktarına ve deniz akıntısına olan etkilerini belirlemede kullanılmış ve ölçüm verilerle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (Zettam ve diğ., 2017).

Bu çalışma kapsamında da yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı SWAT modeli ile Göksu ve Çanakdere havzaları akım ve sediman modellemesinde kullanılmıştır. Sediman sorunu dünyada önemli bir sorun olarak kabul edilmekle birlikte Türkiye'de daha önemli bir problemdir. Avrupa'da en yüksek su sebepli erozyona sahip olan Türkiye, akarsuların taşıdığı malzeme dünyada taşınan malzemenin 1/50'ine denk gelmektedir. Bir başka deyişle Türkiye'de erozyon Avrupa ortalamasının 17 ve Amerika ortalamasının ise 6 katıdır (www.cem.csb.gov.tr, Erişim tarihi: 10 Nisan 2018). Bu yüzden her yıl Türkiye'de 840 km^2 toprak kaybolmaktadır. Bu sayılar erozyon çalışmaya karar verilmesinin nedenidir ve akarsu havzalarında katı madde hareketinin

incelenmesi ve çevrenin korunması açısından erozyon miktarının tahmin edilmesi büyük önem taşır. Toprak erozyonunun neden olduğu sediman taşınımı, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerinde ciddi bir sorundur. Bu yüzden Türkiye'de bu konu ile ilgili bazı çalışmalar da yapılmıştır. Örneğin Ankara havzasında, akarsu ve sediman veriminin tahmini için SWAT modeli kullanılmıştır (Duru, 2015). İlgili çalışmanın genel amacı, SWAT'in performansını ve uygulanabilirliğini değerlendirmesinin yanında bir toprak erozyonu haritasının oluşturulması da hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar SWAT modelinin, hidrolojik ve sediman verimini tatmin etmede başarılı olduğunu göstermiştir. Bu yüzden su kaynaklarının planlaması için karar almada SWAT bir araç olarak kullanılabilir. Ayrıca başka bir çalışmada İstanbul ve çevresindeki havzalarda yüksek çözünürlüklü bir hidrolojik model kurularak su bütçe bileşenleri SWAT kullanılarak modellenmiştir (Cuceloglu ve diğ., 2017). Yapılan ilgili çalışma ile bölgedeki su kaynaklarının sürdürülebilir yönetim uygulamaları, iklim değişikliği ve su kalitesi ile ilgili çalışmalara destek sağlamaktadır.

2.4. ÇALIŞMANIN LİTERATÜRDEKİ YERİ

Diğer hidrolojik/toprak erozyonu modellerin, yangın sonrası yüzeysel akış ve toprak erozyonunu değerlendirmek için uzun süredir kullanılmasına rağmen, SWAT'ta modellenmeye başlanılması ancak son zamanlarda olmuştur. Bazı durumlarda, simülasyon yoluyla örneğin orman yangınlarından sonraki hidrolojik tepkilerin ve bunların geniş bir kentsel alanın su temini üzerindeki etkileri için incelemeler yapılmıştır (Carvalho-Santos ve diğ., 2019; Havel ve diğ., 2018; Rodrigues ve diğ., 2019; Soulis ve diğ., 2021). Orman yangınlarının su kalitesi üzerinde etkileri incelemek için bir arazi kullanımı güncelleme modeli ile yangın koşullarının farklı büyüklüklerinde ve mekânsal ölçekte anahtar model parametrelerini değiştirerek ve bunlardan etkilenen nehir deşarj modeli yapılmıştır (Basso ve diğ., 2020). En güncel çalışmalardan birisinde orman yangını senaryolar modellemesinde ve yangıların sediman yükleri üzerindeki etkisini araştırmak için SWAT model uygulanmıştır (Thomas ve diğ., 2021). Benzer şekilde, arazi kullanımı değişikliklerinin, örneğin ormansızlaşma ve tarım amaçlı ormanların bozulmasının yüzeysel akışı ve toprak erozyonu üzerindeki potansiyel etkilerini tahmin etmek için, yayılımlı hidrolojik modelleme yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği kaçınılmaz. Ormansızlaşma ve ormanların bozulmasının ekolojik, biyolojik, klimatolojik, biyoçeşitlilik, sosyo-ekonomik ve hidrolojik etkileri çeşitli çalışmalarda araştırılmış olsa da (Aliye ve diğ., 2014; Bonan, 1999; Chrisphine ve diğ., 2015; Hughes ve diğ., 2000; Li ve diğ., 2016; Symes ve diğ., 2018; Wilk ve diğ., 2001), bu değişikliklerin akım ve erozyon-sedimantasyon

üzerindeki etkileri kavramını geliştirmek ve ormanın bozulmasının olumsuz sonuçların elde etmek için, hidrolojik ve sayısal modellerin uygulama potansiyeli tam olarak araştırılmamıştır.

Önemi yukarıda açıklandığı gibi erozyona etki eden faktörler de bu çalışma kapsamında detaylı şekilde çalışma alanı bazında incelenmiştir. Literatüre göre erozyonun oluşmasına etki eden faktörler; iklim, toprak özellikleri, topoğrafya, bitki örtüsü özellikleri ve insan faktörü olmak üzere beş gruba ayrılır. Toprakta topaklaşma, bu topakların suya dayanıklılığı, gözeneklerin büyüklüğü, toprak içindeki kil, organik madde, katyon miktarı ve çeşidi gibi özellikler toprağın su tutma kapasitesini etkileyeceğinden erozyonun oluşmasında ve şiddetinde önemli bir rol oynar (www.tema.org.tr, Erişim tarihi: 25 Mart 2018).

Yapılan çalışmaya benzer bir çalışma Alakır Çayı havzasında da yapılmış ve bu havzadaki toprak kaybı ortaya konmuş ve toprak kaybındaki mekânsal farklılıklar üzerinde etkili olan faktörler vurgulanmıştır (Özşahin ve diğ., 2016). Alakır Çayı Havzası genelinde erozyonu önlemek veya asgari düzeye indirmek için bazı tedbirlerin alınması gerektiği ve öncelikle, hâlihazırdaki erozyon alanları erozyon kontrol sahaları olarak ilan edilip, denetim altına alınması gerektiği vurgulanmıştır ve dolayısıyla Alakır Çayı Havzasında arazi kullanımı değişikliğinin yapılması önerilmiştir. Arazi kullanımındaki değişim; yüzeysel akışı, su verimi, potansiyel buharlaşma, buharlaşma, akım ve sediman miktarı, organik N, organik P ve nitrat gibi parametrelerde de önemli değişimlere sebep olabileceği vurgulanmıştır.

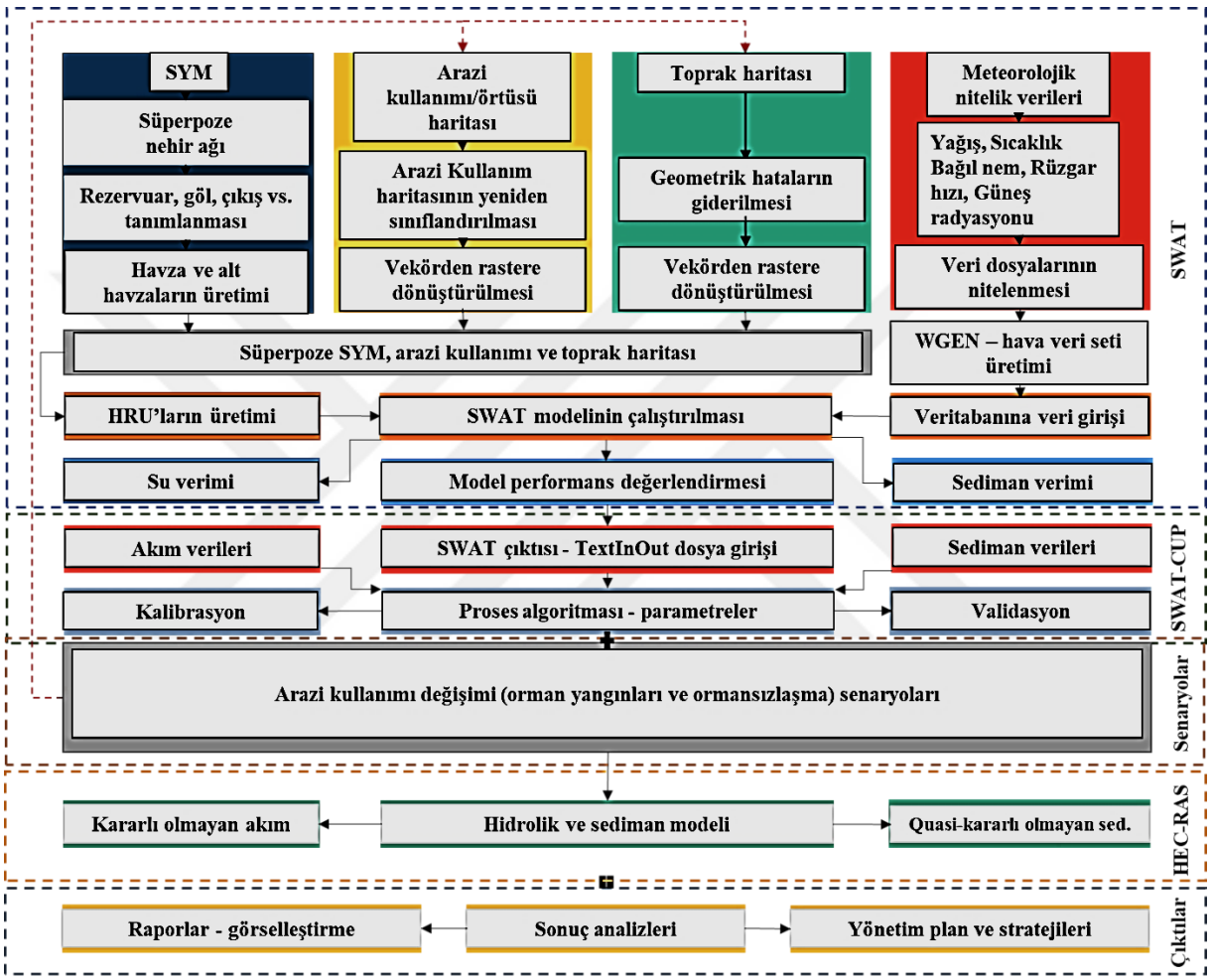
Seyhan, Demirköprü and Hirfanlı rezervuar havzası için sediman eğrilerinden elde edilen verilerin analizi ile sediman verimi tahmin edilmiştir (Kokpinar ve diğ., 2015). Ergene Nehri Havzalarında, doğrudan ölçülen verilerden yağış-akış-sedimantasyon ilişkisinin değerlendirilmesini mevcut arazi kullanımının ve toprak yetiştirme tekniklerinin sediman verimine etkisini ortaya koyarak sorunlara pratik çözümler sunulmuştur (Kocaman ve diğ., 2007). Yıllar arasında Ergene Havzasındaki arazi kullanımı ve arazi örtüsü üzerinde meydana gelen değişiklikler C faktörünü de yansıyacağı için dolaylı olarak toprak erozyonunu etkileyeceği tespit edilmiş ve sorgulanmıştır (Özşahin ve diğ., 2016). Çalışma sonuçları arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişiklikleri ile erozyon arasında kuvvetli ve kayda değer bir ilişkinin varlığını doğrulamıştır. Yerleşim alanlarının kontrolsüz büyüme sürecinin toprak erozyonunu azaltıcı yönde bir değişim olarak görünse bile tarımsal açıdan bazı temel problemleri de oluşturur. Fakat bilgimiz dahilinde çalışma alanı olarak seçtiğimiz Göksu ve Çanakdere Havzalarında böyle bir çalışma bulunmamaktadır. Bu iki havza; İstanbul'un uzun vadeli içme

suyu ihtiyacını karşılamak amacıyla planlanan Yeşilçay Projesinin de içinde yer almaktadır. Ayrıca bu iki havzada bulunan Göksu ve Çanakdere akarsuları üzerine yapılan iki regülatör (Sungurlu ve İsaköy Regülatörleri) ile alınan su İsaköy Pompa İstasyonu (Ertuğrul Gazi Pompa İstasyonu) ile 200 m terfi edilerek denge bacasına oradan da cazibe ile Darlık ve Kömürlük tünellerinden geçerek yaklaşık 51 km uzunluğundaki 3 m çapındaki isale hattıyla 500,000 m^3/gün kapasiteli Yeni Emirli arıtma tesisine (Yavuz Sultan Selim Arıtma Tesisi) iletilmektedir (Akbaş, 2005). Ayrıca bu iki regülatörlerin yerine yapılması planlanan ve planlama çalışmaları tamamlanmış olan İsaköy ile Sungurlu Barajları ihale aşamasındadır.

Bu tez çalışması, orman yangınlarının etkisinin yanı sıra tarım için ormanların bozulmasının ve ormanların yok edilmesinin (ormansızlaştırma) sediman yükü üzerindeki etkisini incelemek için SWAT hidrolojik modelinin uygulama potansiyeli araştırılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, orman yangınları ve ormansızlaştırmanın hidrolojik sonuçlarını ve akarsu akışı üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve farklı yangın ve ormansızlaştırma senaryoları altında sediman yükü üzerindeki etkilerini analiz etmek için akım ve erozyon modelleri kullanılmaktır.

Çalışmanın kavramsal diyagramı ve genel iş akış planı **Şekil 2.1**'de verilmiştir. Sayısal yükseklik modeli (DEM), arazi kullanımı ve toprak haritaları ve iklim verileri, SWAT modelinin ana girdileridir. Modeli çalıştırmak için, gereken mekânsal ve meteorolojik girdi verileri SWAT veri tabanında saklanır. SWAT modelinin çıktısı, otomatik kalibrasyon ve doğrulama programı için girdi veri dosyası olarak kullanılır. İşleme algoritmasının ve hassasiyet parametrelerinin seçimi ve gözlenen değişkenler (yani akım ve sediman), kalibrasyon ve doğrulama programını yürütmek için gerekli adımlardır. Model performansı, farklı hedef fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilir. Modelden elde edilen sonuçların analizi ve çıktıların sonradan işlenmesi hidroloji model sürecinin son adımıdır. Bir sonraki adımda arazi kullanımı/örtüsündeki değişikliğin hidroloji üzerindeki etkileri farklı orman yangınları ve ormansızlaşma senaryo grupları (her senaryo gurubu mevcut durum dahil olmak üzere 4 senaryodan oluşmaktadır) şeklinde incelenmiştir. Bu aşamada değişiklikler ve yeni parametreler modelin veri tabanına tanımlanarak model yeniden farklı senaryo grupları için çalıştırılmıştır. Model çıktıları her senaryo için ayı ayrı analiz edilerek elde edilen sonuçlar raporlanır, sonuçlar grafiksel çizelgeler ve tematik haritalar şeklinde sergilenmiştir. Bir sonraki işlemde senaryolar sonucunda elde edilen maksimum akım değerlerini ve tarihsel en yüksek debi değerlerini HEC-RAS modeli kullanılarak havzanın bir boyutlu hidrolik modeli yapılmıştır. Hidrolik model sonucundan çeşitli bilgiler örneğin dere ve enkesitlerdeki su

derinliği, taşkın yayılımı ve akım hızı gibi değerler elde edilip haritalanmıştır. Ardından havzanın sediman modeli yapılmıştır ve senaryolar sonucundan kaynaklanan sediman oranlarındaki değişiklikler analiz edilmiştir. Bu çalışma sunucunda senaryo bazlı arazi kullanımı/örtüsündeki değişikliğini hidroloji ve sediman üzerindeki etkileri ve yaratacağı tepkileri ortaya konulmuştur.



Şekil 2.1: İş akışına genel bakış.

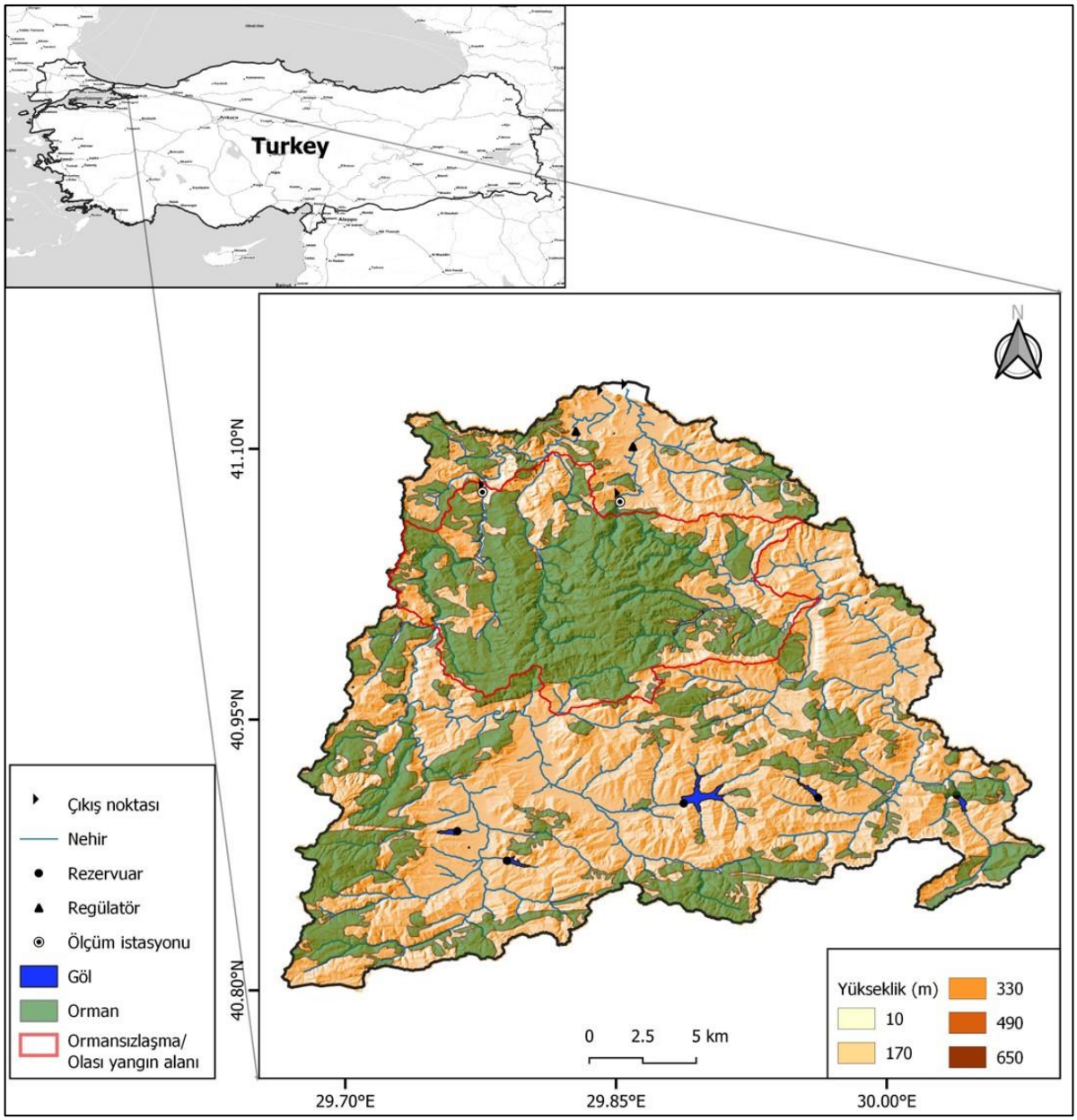
3. YÖNTEM

Bu tez kapsamında, orman yangınlarının ve ormansızlaşmanın akarsu deşarjı ve alt havza ölçeğinde sediman verimi üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Bunun için Göksu ve Çanakdere Nehirleri havzasının yağış-akış modelini uygulayarak, doğal tehditler ve hidrolojik risklerle başa çıkmak için ilgili azaltma stratejilerini sağlamak için havzada daha önce gözlemlenen yangınlara benzer orman yangını senaryoları tasarlanmıştır. Orman yangını senaryoları ölçülen verileri (yağış, akım ve askıdaki sediman konsantrasyonu) ve mevcut havza özelliklerini (arazi kullanımı, toprak ve topografya) kullanmak üzere tasarlanmıştır.

Bu çalışma orman alanlarındaki değişiminin yüzeysel akışı ve sediman üzerindeki etkilerini incelemek ve elde edilen sonuçların çalışma alanının sediman yönetimi ve dolayısıyla karar vericilerin havza yönetiminde de uygulanabilecek şekilde hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda, çalışma alanında arazi değişikliğinden dolayı sediman miktarı artması durumunda sedimanın su kalitesi, mevcutta bulunan su yapıları ve gelecekte yapılması planlanan barajlar üzerinde yaratacağı etkileri araştırmak için çeşitli arazi kullanımı/örtüsü değişimi senaryoları uygulanarak akım-sediman modelleri yapılmıştır.

3.1. ÇALIŞMA ALANI

Göksu ve Çanakdere Nehirleri'nin havzası (40° 59" K, 29° 51" D), yaklaşık 782 km^2'lik bir alana sahip olup, İstanbul'un kuzey-doğusunda ve Kocaeli ilinin batısında, Karadeniz'e kadar uzanır (**Şekil** 3.1). Karadeniz bölgesi, Balkanlar ve Anadolu'nun iklimi, havzanın iklim özelliklerini karakterize etmektedir. Çalışma alanındaki iki ana kol, sırasıyla toplam uzunluğu 122 ve 77 km olan Göksu ve Çanakdere'dir. Jeolojik tipler kil-kireçtaşı, kumlu kalker, kumtaşı ve kalkerdir (Citiroglu ve diğ., 2011). Topoğrafik desen (yükseklik), 1 ila 649 m arasında değişen, kısmen engebeli yüzeye sahiptir. Havzada yıllık sıcaklık 8°C ile 15°C arasında, yıllık yağış ise 350 ile 1400 mm arasında değişmektedir (Aksoy ve diğ., 2010). Havza, yıllık ortalama 815 mm yağış ve yaklaşık 14,8 °C yıllık ortalama sıcaklığa sahiptir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü; MGM, 2018).



Şekil 3.1: Çalışma alanı, Göksu ve Çanakdere nehirlerinin havzasının konum haritası.

Akım ve askıdaki sediman verileri, çalışma alanındaki gözlem istasyonlarından toplanan veriler olarak DSİ'den (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü) satın alınmıştır. Göksu-D02A004 (41° 04' 40" K, 29° 46' 34" D) ve Çanakdere-D02A149 (41° 04' 19" K, 29° 51' 08" D) akım ve sediman miktarını ölçmek için kullanılan iki istasyondur. Bu iki istasyondan veri toplamak için toplam yağış toplama alanı 782 km^2'dir. Havzadaki baskın arazi kullanım türü tarım (%55,2) ve (%43,6) ormandır. En büyük orman alanı, İstanbul ile Kocaeli ili arasındaki havzanın orta kesiminde olup, ağırlıklı olarak Saf Meşe Meşcereleri ormanlarını kapsamakta ve geri kalanı Karışık Meşcereler Ormanı türleridir (Atalay, 1986). Bu özellikler, alanın yanma olasılığını ve beklenen olası yangın davranışını etkiler. Ağaçların, çalıların, yanıcı bitki örtüsünün ve diğer

potansiyel yakıtların varlığı, topoğrafya ve iklim değişikliği etkileri, orman yangınları için uygun koşullar yaratan hayati faktörlerdir. Ayrıca havzanın tarımcılık için uygun iklim ve özelliklere sahip olma nedeniyle ormansızlaşmaya müsait olan bir bölgedir. Çalışma alanında yangına yol açan potansiyel çevresel faktörler nedeniyle hızla yayılabilir ve yayılmasını önlemek zor olabilir. Ek olarak, ormanlarla çevrili büyük nehirlerin, bir yangın olayından sonra su kalitesini ve sedimantasyon oranını önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle bu çalışmada orman yangını senaryosunun yangın yoğunluğunun çok yüksek olduğu değerlendirilmiştir. Yukarıda da bahsedildiği üzere yangından ve ormansızlaştırma nedeniyle arazi kullanımı/örtü değişikliklerinden dolayı bu arazilerin tarım çalışmaları ve tarımsal faaliyetler için dönüştürülmesi de söz konusu olup dolayısıyla bununla ilgili de farklı senaryolar belirlenmiştir.

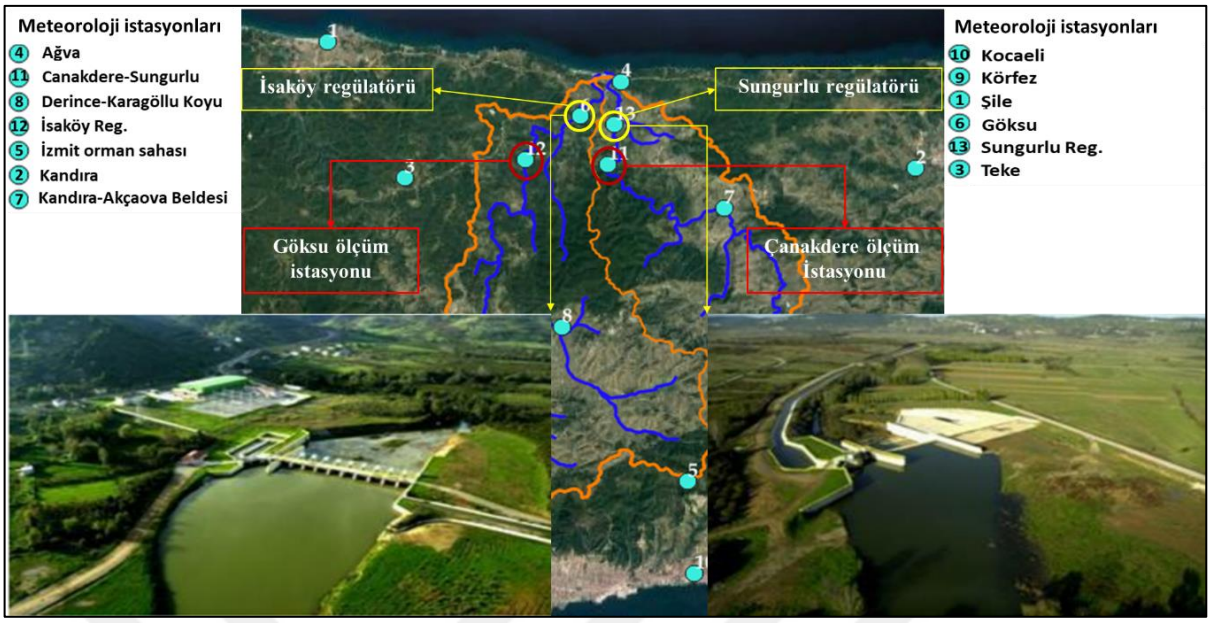
3.2. ARAZİ ÇALIŞMASI

Modelleme sürecinde gerekli parametrelerin belirlenmesi ve doğruluğunun artırılması, arazi kullanımı/örtü ve arazi yapısı hakkında ayrıntılı bilgi elde etmek için çalışma alanında planlı arazi çalışması yapılmıştır. Havzadaki tarımsal arazi kullanım faaliyetleri, havza topolojisi, topoğrafyası, toprak tipi ve jeomorfolojik özellikleri nedeniyle sediman oranları yüksektir.

Havzanın özellikleri belirlenerek mevcut durumu daha iyi yansıtması için arazi çalışmaları önem arz etmektedir. Ayrıca havzada sediman oluşumuna etki eden faktörler belirlenerek bunların etkisi ve önem düzeyi incelenmiştir. Günlük debi DSİ tarafından akım ve gözlem istasyonlarında otomatik olarak toplanmaktadır. **Şekil 3.2**'de gösterildiği gibi çok fonksiyonlu bir sediman toplama mekanizması dere yatağından sediman numunesi almak için tez çalışması kapsamında BAP doktora tezi projesinden satın alınmıştır. Alet akarsu yataklarında kullanarak dipten sediman numunelerin toplanarak partikül dağılımını ve çapını belirlemek için laboratuvar ortamında ıslak elek analizi yapılmıştır. Havza içerisinde yer alan su regülatörleri ve Göksu ve Çanakdere nehirlerin üzerinde bulunan DSİ akım ve sediman gözlem istasyonlarının konumları **Şekil 3.3**'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Çok amaçlı sediman numunesi alma düzeneği.



Şekil 3.3: Göksu ve Çanakdere havzalarında yer alan akım gözlem istasyonları ve su tesislerinin (Regülatörler) konumları.

Modelin oluşturulması için arazi çalışması yapılarak arazi kullanım ve yapısı hakkında detaylı bilgi toplanmıştır. Böylece modelleme sırasında ihtiyaç duyulan parametrelerinin belirlenmesindeki doğruluk artırılmıştır. Havzaların karakteristikleri belirlenerek oluşturulan modellerin daha gerçeği yansıtması için arazi çalışmalarının yapılması fayda sağlamaktadır. Arazi çalışmaların önemli amacı sediman ölçümlerinin yapılmasına dayanmaktadır. Daha önceden arazi çalışma rotası ve koordinatları hazırlandıktan sonra arazi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu arazi çalışmasında Göksu ve Çanakdere havzalarında arazi kullanımı ve arazi örtüsü karakteristiğini hassas bir şekilde incelenerek havzanın çeşitli bölgelerinde el GPS'i kullanılarak mekânsal bilgiler elde edilmiştir. **Şekil 3.4** arazi çalışmasında DSİ'nin Göksu istasyonu sediman numunesi, su sıcaklığı ve pH ölçümlerini göstermektedir. Arazi çalışmasında suda askıda sediman numunesi de alınmıştır.



Şekil 3.4: Arazi çalışması sırasında elde edilen ölçümler ve görüntüler (Tarih: 24 Kasım 2018).

3.3. SEDİMAN ÖLÇÜMLERİNİN LABORATUVAR ANALİZLERİ

Arazi çalışmasında derenin tabanından çok amaçlı sediman alma düzeneği kullanılarak alınan numunelerde; tane dağılımı ve çaplarını belirlemek için laboratuvar ortamında elek analizi yapılmıştır (**Şekil 3.5**). Elek analizi sediman numunesindeki tanelerin büyüklüklerine göre dağılım oranını, yani numune içerisinde hangi büyüklükte ne miktarda çakıl, kum, silt ve kil yüzdelerinin yer aldığını belirlemeye yarayan deneysel bir yöntemdir. Başka bir deyişle elek analizi deneyi ile çakıl, kum miktarları ve kil ile silt miktarı toplamı belirlenmiştir. Aynı zamanda kaba dane oranı ve ince dane oranları da elde edilmiştir. Elek analizi mekanik analiz ve ıslak analiz olmak üzere iki türdür. Mekanik analiz araziden alınan numunenin kurutulduktan sonra elek analizi yapılmasıdır. Islak analiz ise numune yıkanıp kurutulduktan sonra elek analizi yapılmasıdır. Elek analizi sonucunda numunenin No 200'lü eleğe kadar olan granülometri eğrisi elde edilmiştir. Granülometri eğrisinden kalan numunede ise hidrometre deneyinin

yapılmasına karar verilmiştir. Eğrinin genel eğilimi numunenin bileşimindeki dane çaplarını kapsar.



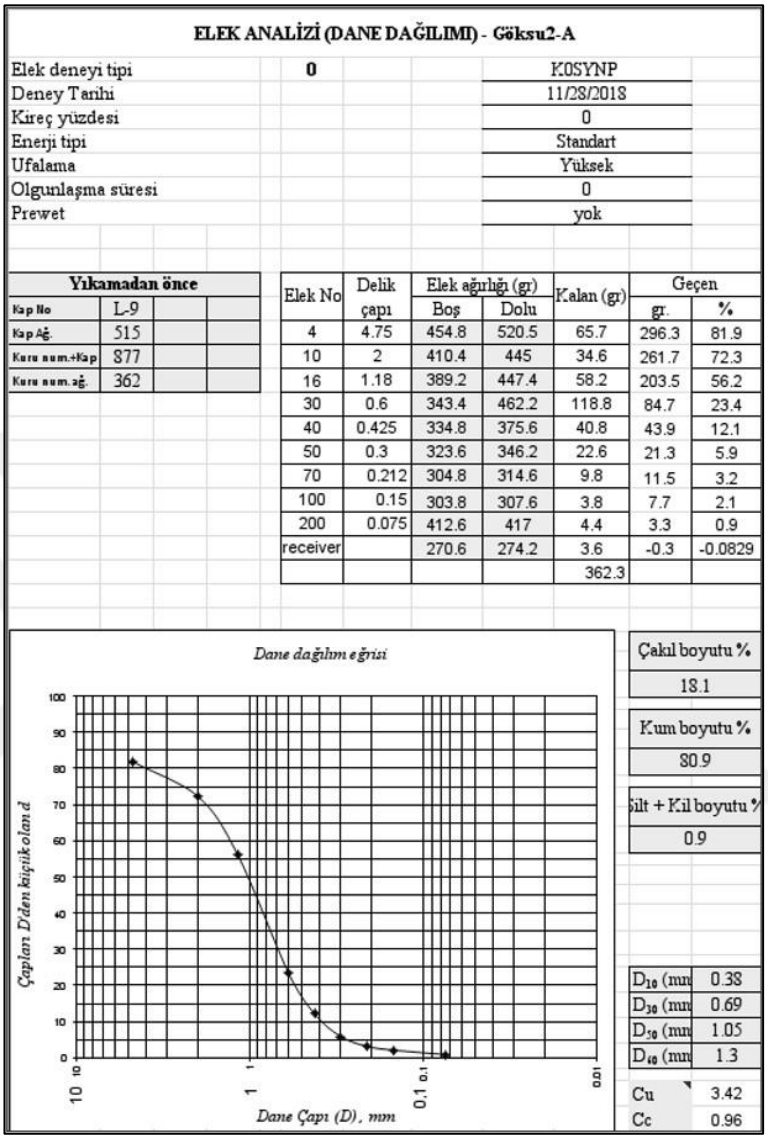
Şekil 3.5: Zemin laboratuvarında yapılan elek analizi.

Numunelerin granülometri özelliklerinden en önemlileri; danelerin %10'nun geçtiği efektif çap D10 ve %30 ile %60 geçtiği D30 ve D60 çaplarıdır (**Şekil 3.6**). Analiz sonucunda elekten geçen numune miktarı gram ve yüzde (%) cinsinden hesaplanmıştır (Denklem 3.1 ve Denklem 3.2).

Elekten geçen numune (g)=Ana numune–Elek üzerinde kalan (3.1)

Elekten geçen numune (%)= (Elekten geçen miktar / Ana numune) x 100 (3.2)

Bu sonuçlara göre çap ve elekten geçen numune (%) göre granülometri eğrisinin No 200 eleğine kadar çizimi yapılabilir. Elek analizi sonucuna göre çakıl, kum ve kil+silt yüzdeleri belirlenir.



ELEK ANALİZİ (DANE DAĞILIMI) - Göksu2-A

Elek deneyi tipi	0	K0SYNP
Deney Tarihi		11/28/2018
Kireç yüzdesi		0
Enerji tipi		Standart
Ufalama		Yüksek
Olgunlaşma süresi		0
Prewet		yok

Yıkamadan önce			
Kap No	L-9		
Kap Ağ.	515		
Kuru num.+Kap	877		
Kuru num.ağ.	362		

Elek No	Delik çapı	Elek ağırlığı (gr)		Kalan (gr)	Geçen	
		Boş	Dolu		gr.	%
4	4.75	454.8	520.5	65.7	296.3	81.9
10	2	410.4	445	34.6	261.7	72.3
16	1.18	389.2	447.4	58.2	203.5	56.2
30	0.6	343.4	462.2	118.8	84.7	23.4
40	0.425	334.8	375.6	40.8	43.9	12.1
50	0.3	323.6	346.2	22.6	21.3	5.9
70	0.212	304.8	314.6	9.8	11.5	3.2
100	0.15	303.8	307.6	3.8	7.7	2.1
200	0.075	412.6	417	4.4	3.3	0.9
receiver		270.6	274.2	3.6	-0.3	-0.0829
				362.3		

Çakıl boyutu %	18.1
Kum boyutu %	80.9
Silt + Kil boyutu %	0.9

D_{10} (mm	0.38
D_{30} (mm	0.69
D_{50} (mm	1.05
D_{60} (mm	1.3
Cu	3.42
Cc	0.96

Şekil 3.6: Örnek bir numune için elek analiz sonuç raporu.

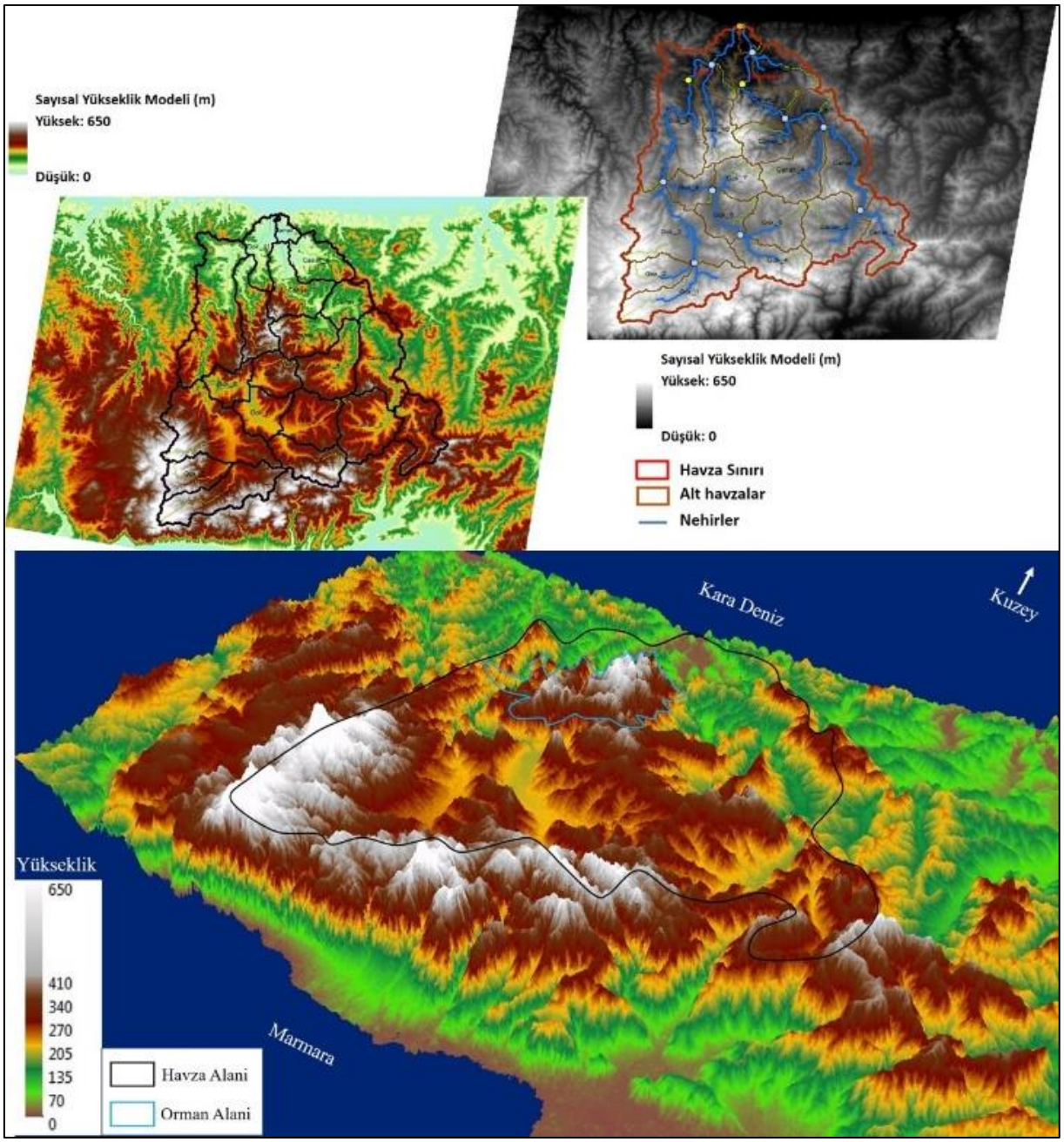
3.4. MODELDE KULLANILAN VERİ SETLERİ

Modelin kullandığı temel mekânsal girdi veri setleri, Sayısal Yükselme Modeli (DEM), akış ağı, arazi kullanımı/örtüsü verileri, toprak verileri ve iklim verileridir (Gull ve diğ., 2017). DEM, havzayı tanımlamak ve arazi yüzeyindeki drenaj modellerini analiz etmek ve eğim parametresini türetmek için kullanılmıştır. Akarsu ağı veri kümesi çalışma alanının DEM verisini kullanarak model tarafından sayısallaştırılır. Akış ağının konumunu tanımlamak için akış ağ veri kümesi DEM üzerine süperpoze yapılır. Arazi kullanımı, bir havzadaki yüzeysel

akışını, buharlaşma ve yüzey erozyonunu etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Havzanın hidrolojik modelinin kurulmasına birincil ve zorunlu girdi verilerini hazırlamak için kullanılan yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

3.4.1. Topoğrafik Harita

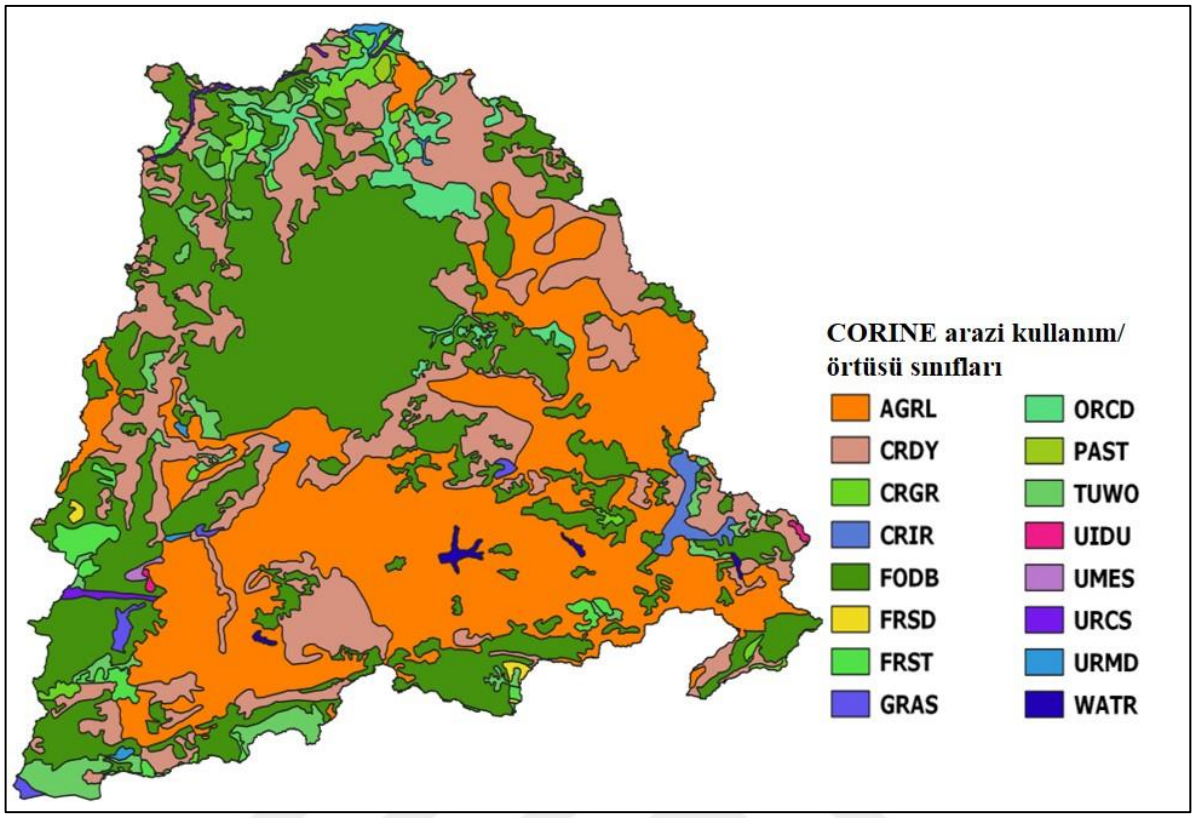
DEM (Sayısal Yükseklik Modeli), yükseklik, eğim ve bakı, akış yönünün çıkarılması, akış birikimi, akarsu ağı üretimi ve havza ve alt havza tanımlama süreci gibi arazi özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bu nedenle, DEM genellikle bir arazi yüzeyinin herhangi bir dijital temsilini ifade etmek için kullanılır ve dijital gösterimin en basit şeklidir. Karasal eğim, kanal eğimi ve nehir uzunluğu (hem birincil hem de yan nehirler) gibi topoğrafik parametreler de DEM'den türetilen ana jeomorfolojik parametrelerdir. Dolayısıyla, hidrolojik işlemede kullanılan uzaktan algılamadan (RS) türetilen DEM haritasının kalitesi, modelin doğruluğunu doğrudan etkiler. Bu nedenle bu çalışmada hidrolojik modelleme için GeoTIFF formatında 12,5 m (mekânsal çözünürlük) piksel aralığına sahip radyometrik arazi düzeltmeli (RTC) yüksek çözünürlüklü (RT1) DEM verileri (Alaska Satellite Facility [ASF]) (ASF, 2015) kullanılmıştır. Göksu ve Çanakdere havza alanının 1B ve 3B DEM'i, havza sınırı, alt havzalar **Şekil 3.7**'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Göksu ve Çanakdere havza alanının Sayısal Yükseklik Modeli (DEM).

3.4.2. Arazi kullanımı/örtü Haritası

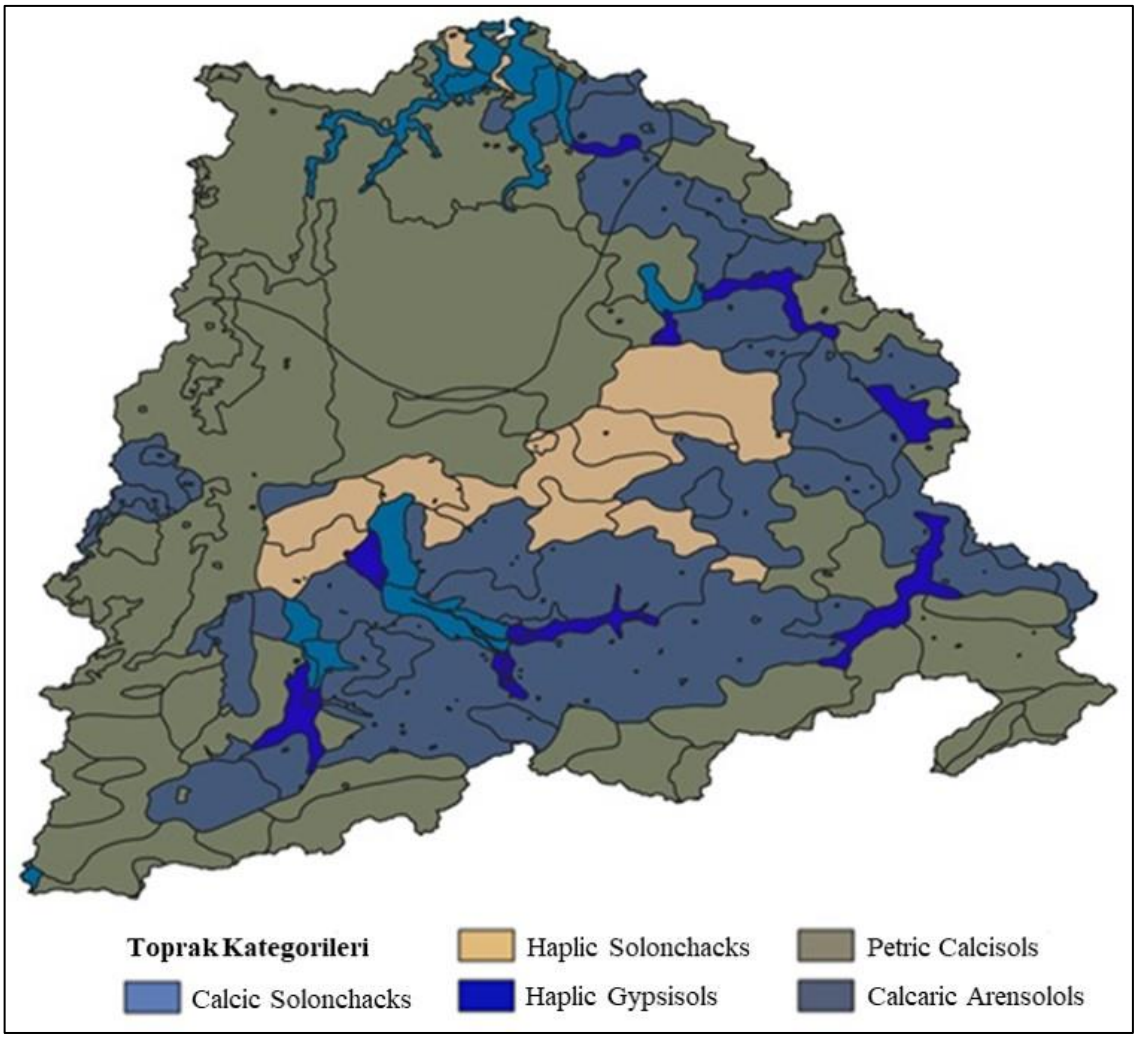
Arazi kullanımı, bir havzadaki kalıcı arazi kullanım türlerini tanımlar. Arazi kullanımı ve bitki örtüsü değişiklikleri su döngüsünü etkiler ve bunların etkisi bitki örtüsü yoğunluğunun ve bitki türlerinin morfolojisinin bir fonksiyonudur. Çalışma alanındaki arazi kullanımı/örtü tipi ağırlıklı olarak tarım ve orman arazisidir. Arazi kullanımı/örtü haritası, **Şekil 3.8**'de gösterildiği gibi, her bir alt havzanın hidrolojik yanıt birimlerini (Hydrologic Response Unit, HRU) oluşturmak için Avrupa Birliği Copernicus Arazi İzleme Servisi'nin CORINE Arazi Örtüsü (CLC, 2018) veri setinden faydalanarak bu HRU'lar elde edilmiştir.



Şekil 3.8: Göksu ve Çanakdere havzasının arazi kullanımı/örtü haritası (CORINE, 2018).

3.4.3. Toprak Haritası

Toprak haritası, toprak bilimciler, jeologlar, jeomorfologlar ve CBS uzmanlarından oluşan disiplinler arası bir ekip tarafından hazırlanan Türkiye veri setinin toprak haritasından elde edilmiştir (Cullu ve diğ., 2018). Çalışma alanındaki ana toprak türleri, Avrupa Komisyonu ve Avrupa Toprak Bürosu Ağı tarafından sağlanan toprak dokusu ve hidrolojik toprak gruplarına (FAO toprak sınıflandırması) göre cambisoller ve leptosoller toprak tipleri olarak yeniden sınıflandırılmıştır (Kük ve Burgess, 2010). Cambisol, Leptosoller ve Kastanozemler ile ilişkilidir ve genellikle Calcisollerin kuzey ucunda yer alır, geniş ormanlar ve bozkırlar tarafından kapsanmış yamaçlarda ve aşınmış arazilerde yarı kurak alanlarda yaygın olarak bulunur (Ntouros ve diğ., 2009). **Şekil 3.9**, çalışma alanındaki toprak haritasını ve toprak türlerini göstermektedir.

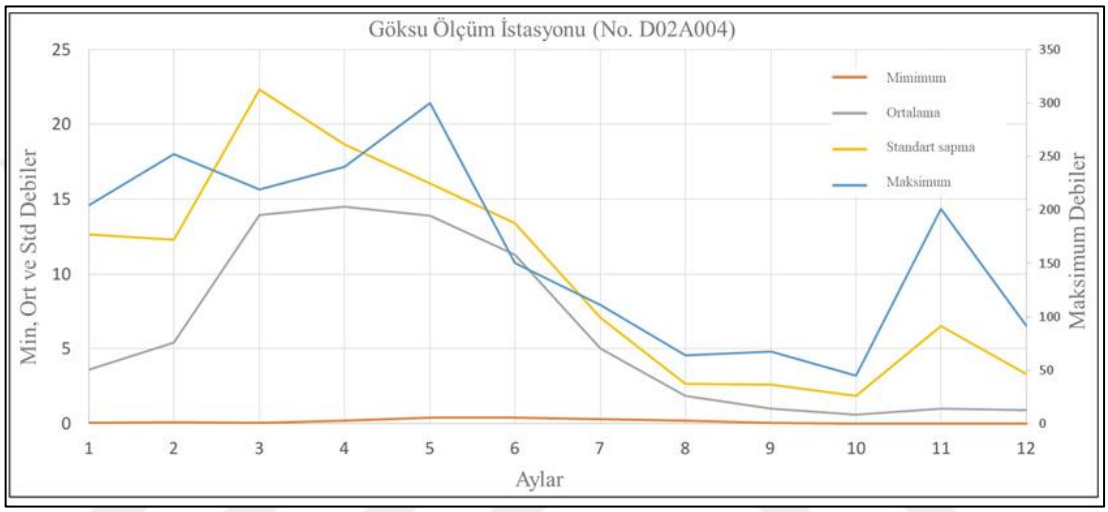


Şekil 3.9: Göksu ve Çanakdere havzasının toprak haritası ve toprak tipi sınıflandırması (Cullu ve diğ., 2018).

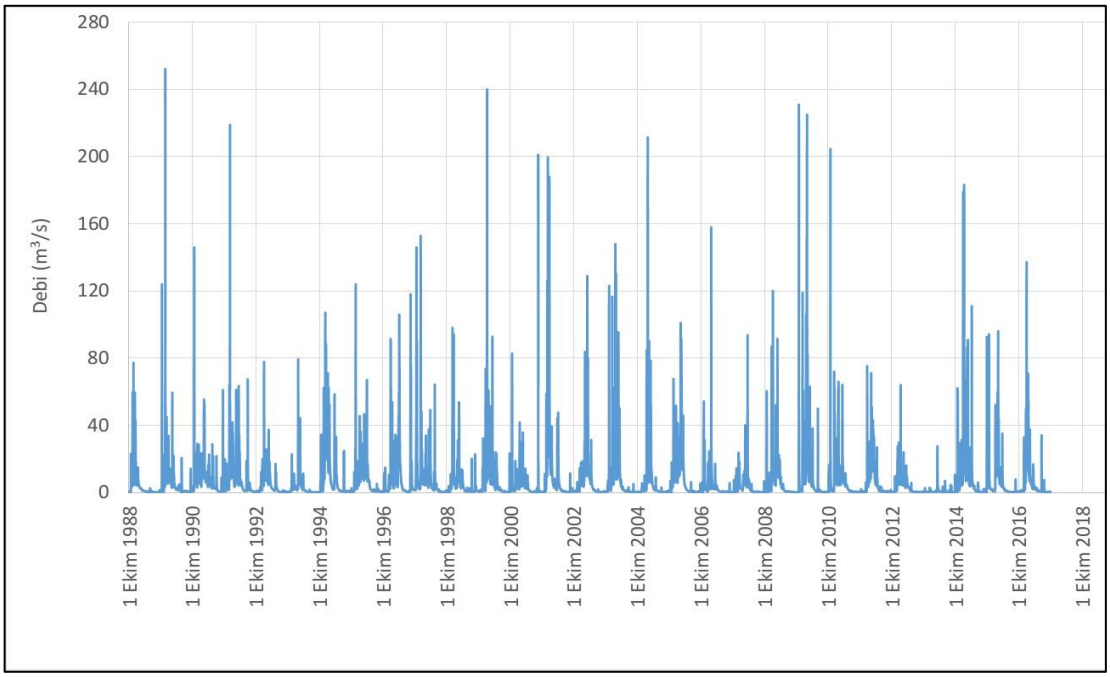
3.4.4. Hidrolojik ve Meteorolojik Veriler

Yağış-akış modelini kurulurken on üç hidrolojik yıl (2005-2017) kullanılmıştır. Sistem hidrolojisini elde etmek için iki su yılı (2005-2007) modelin ısınmasına (warm-up) süreci olarak kullanılmıştır; bu, kullanıcının başlangıç durum değişkenlerine ilişkin tahminlerinin etkilerini en aza indirmek için modelin birden çok kez tekrarlanmasını sağlar (Zhang ve diğ., 2008). Kalibrasyon için 7 yıllık (2007-2013) veriler ve doğrulama için ise 4 yıllık (2014-2017) veriler kullanılmıştır. Bu hidrolojik ve meteorolojik veriler DSİ ve MGM'den tez projesi kapsamında satın alınmıştır. Model girdileri için meteoroloji istasyonlarından günlük yağış, minimum-maksimum sıcaklık, bağıl nem, güneş radyasyonu ve rüzgâr hızını içeren iklim verileri kullanılmıştır. İklim Tahmin Sistemi Yeniden Analizi (CFSR) (www.swat.tamu.edu, Erişim tarihi: 12 Ocak 2018) ve Su için Dünya Hava Durumu Veri Servisi'nden (W3S) indirilen küresel hava durumu verileri (www.uoguelph.ca, Erişim tarihi: 15 Ocak 2018), temin edilen

meteorolojik verilerin doğruluğunu değerlendirmek için (Dile ve Srinivasan, 2014; Fuka ve diğ., 2013) ve bazı eksik olan verileri tamamlamak için bu veriler kullanılmıştır. Model kalibrasyonu ve doğrulaması için Göksu ve Çanakdere akım ölçüm istasyonlarından elde edilen ve gözlemlenen akım ve sediman veri setleri kullanılmıştır. **Şekil 3.10** Göksu akım gözlem istasyonunda elde edilen verilerden 1961-2017 yıllarını kapsayan ortalama bir yıla ait aylık minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma grafiğini göstermektedir. Ayrıca **Şekil 3.11**'de Göksu istasyonunun 1988-2017 yıllar arasındaki akımın değişimini göstermektedir.



Şekil 3.10: Göksu ölçüm istasyonunda ölçülen debilerin aylık ortalamaları (m^3/s).



Şekil 3.11: Göksu nehrindeki 1988-2017 yıllar arasındaki akım değişimi.

Çanakdere ve Göksu istasyonlarından 2013-2018 yıllar arasında taşınan sediman miktarı da DSİ'den satın alınmıştır. Alınan sediman ölçüm sırasındaki akımın hızını, sediman konsantrasyonunu içermektedir. **Tablo 3.1** ve **Tablo 3.2**'de Çanakdere ve Göksu istasyonlarına ait özet sediman bilgilerini göstermektedir.

Tablo 3.1: Göksu istasyonu özet bilgileri.

D02A004 Göksu Dere-Göksu - 1 -			
HAVZA NO VE ADI	: 02 MARMARA HAVZASI		
İSTASYON NO VE ADI	D02A004 GÖKSU DERE - GÖKSU		
YÜKSELTİSİ VE YERİ	18 m ; (29° 46' 34" D - 41° 04' 40" K) (Pafta F23-C4)		
Şile karayolunun 10. km'sindekiGöksu Köyü sapağından sapılarak, 3 km sonra köy çıkışındadır.			
AKIM VE SEDİMET YAĞIŞ ALANI	**Akım Yağ. A :** 395,0 km²	**Sediment Yağ. A** : 395,0 km2	
SEDİMENT GÖZLEM YILLARI	09.05.2013 - 16.07.2018 5 Yil	**Örnek Say**	75
ORT. SEDİMENT DANE DAĞILIMI	**Kil + Silt : %** 40,5	**Kum :%** 59,5	
ORT. SEDİMENT HACİM AĞIRLIĞ	$W_{50\ ortalama}$: 1,35 ton/m3		
UZUN YILLIK ORTALAMA	**Miktar :** 11.826 ton/yıl	**Verim :** 30 ton/yıl/km²	
SEDİMENT MİKTARI VE VERİMİ	**Miktar :** 8.786 m3/yıl	**Verim :** 22 m3/yıl/km²	
AÇIKLAMALAR	Sediment anahtar eğrisinin çizilmesinde,		
	tablonun sonunda yer alan istatistik hesaplarında,		
	gözlenen bütün veriler kullanılmıştır.		
Havza İçinde Bulunan Su Alanları	0.0km²		

Tablo 3.2: Çanakdere istasyonu özet bilgileri.

D02A149 Çanakdere-Sungurlu - 1			
HAVZA NO VE ADI	: 02 MARMARA HAVZASI		
İSTASYON NO VE ADI	D02A149 ÇANAKDERE - SUNGU		
YÜKSELTİSİ VE YERİ	16 m ; (29° 51' 08" D - 41° 04' 19" K) (Pafta F23-C4)		
İstanbul İli; Şile İlçesi, Ağva Bucağı'na bağlı Sungurlu Köyü'nün 2 km akış yukarısındadır.			
AKIM VE SEDİMET YAĞIŞ ALANI	**Akım Yağ. A :** 272,4km²	**Sediment Yağ. A** : 272,4 km2	
SEDİMENT GÖZLEM YILLARI	09.05.2013 - 16.07.2018 5Yil	**Örnek Say**	69
ORT. SEDİMENT DANE DAĞILIMI	**Kil + Silt : %** 19,8	**Kum :%** 80,2	
ORT. SEDİMENT HACİM AĞIRLIĞ	$W_{50\ ortalama}$: 1,42 ton/m3		
UZUN YILLIK ORTALAMA	**Miktar :** 10.840 ton/yıl	**Verim :** 28 ton/yıl/km²	
SEDİMENT MİKTARI VE VERİMİ	**Miktar :** 7.642 m3/yıl	**Verim :** 22 m3/yıl/km²	
AÇIKLAMALAR	Sediment anahtar eğrisinin çizilmesinde,		
	tablonun sonunda yer alan istatistik hesaplarında,		
	gözlenen bütün veriler kullanılmıştır.		
Havza İçinde Bulunan Su Alanları	0.0km²		

Göksu ve Çanakdere akım ve sediman bilgilerini kullanılarak sediman rölatif pik değerleri (m^3/s) hesaplanmıştır. Sediman rölatif pik değerleri **Tablo 3.3** ve **Tablo 3.4**'de verilmektedir.

Tablo 3.3: Göksu sediman rölatif pik değerleri ($S_{ay}/Smax_{yıl}$).

Ay/Yıl	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Ortalama
Ekim	0,08	-	0,65	0,01	0,01	-	0,18
Kasım	0,1	0,14	0,12	0,04	0,07	-	0,1
Aralık	0,14	0,56	0,02	0,38	0,03	-	0,22
Ocak	-	0,03	0,51	0,79	1	1	0,67
Şubat	-	0,05	1	0,8	0,1	0,21	0,43
Mart	-	1	0,28	1	0,03	0,14	0,49
Nisan	-	0,08	0,39	0,06	0,01	0,04	0,12
Mayıs	0,16	0,03	0,04	0,01	0,01	0,05	0,05
Haziran	0,05	0,28	0,01	0,03	0,09	0,03	0,08
Temmuz	1	0,07	0,1	0,02	0,01	0,01	0,2
Ağustos	0,08	0,14	0,03	0,17	0,01	-	0,09
Eylül	-	0,02	0,03	0,02	0,01	-	0,02

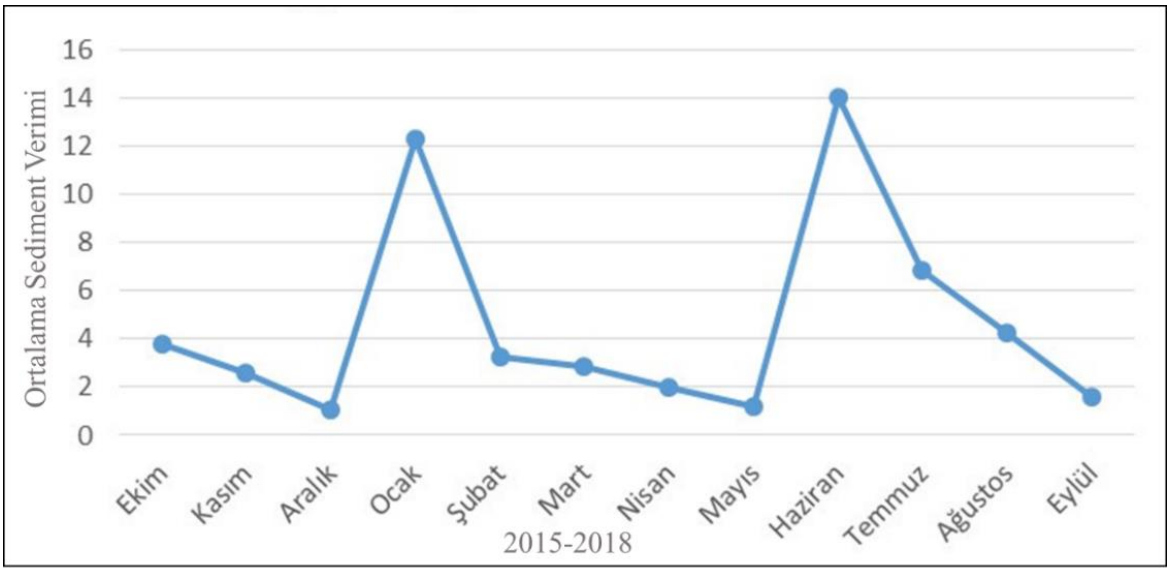
Tablo 3.4: Çanakdere sediman rölatif pik değerleri ($S_{ay}/Smax_{yıl}$).

Ay/Yıl	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Ortalama
Ekim	1	0,02	0,2	-	-	-	0,4
Kasım	0,35	0,13	0,04	0,09	0,01	-	0,12
Aralık	0,81	0,52	0,02	0,17	0,01	-	0,3
Ocak	-	0,02	1	0,28	0,01	0,65	0,4
Şubat	-	0,03	0,51	0,27	0	0,65	0,3
Mart	-	1	0,14	1	0	0,28	0,5
Nisan	-	0,08	0,19	0,02	0	0,13	0,08
Mayıs	0,12	0,09	0,04	0,01	0	0,8	0,17
Haziran	0,51	0,02	0,01	0,02	0,16	1	0,29
Temmuz	0,08	0,04	0,09	-	1	0,05	0,38
Ağustos	0,26	0,1	0,03	-	0	-	0,1
Eylül	-	0,01	0,04	0,07	0	-	0,03

Göksu istasyonu için en yüksek ortalama pik değeri Ocak ayına aittir. Ocak ayında iklimsel şartlardan dolayı ortalama pik değerin yüksek olmasına sebep olabileceği düşünülmektedir. Çanakdere istasyonu için en yüksek ortalama pik değeri Ekim ve Mart aylarına aittir. Çanakdere havzasının arazi kullanımın %65 tarım alanları olduğu için Ekim ayında ekim için toprak sürülmesi sebebi ile erozyon miktarının fazla olmasına sebep olduğu tahmin edilmektedir. Göksu ve Çanakdere akım ve sediman bilgilerini kullanılarak sediman verimi değerleri de hesaplanmıştır. Göksu istasyonu için en yüksek ortalama verimi (ton/yıl/km^2) değeri Ocak ve Haziran aylarına aittir. Sediman verimi değerleri **Tablo 3.5**'de ve elde edilen değişimin aylık verim ortalamaları grafiği **Şekil 3.12**'de verilmektedir.

Tablo 3.5: Göksu ortalama sediman verimi değerleri (ton/yıl/km^2).

	Eki.	Kas.	Ara.	Oca.	Şub.	Ma.	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.
Akım	13,8	14,1	14,1	178,3	45,1	32,5	10,1	2,2	13,9	4,2	4,3	1,4
Sed.	3,6	5,4	13,9	14,5	13,9	11,3	5	1,9	1	0,6	1	0,9
Verim	3,8	2,6	1	12,3	3,2	2,9	2	1,1	14	6,9	4,3	1,6

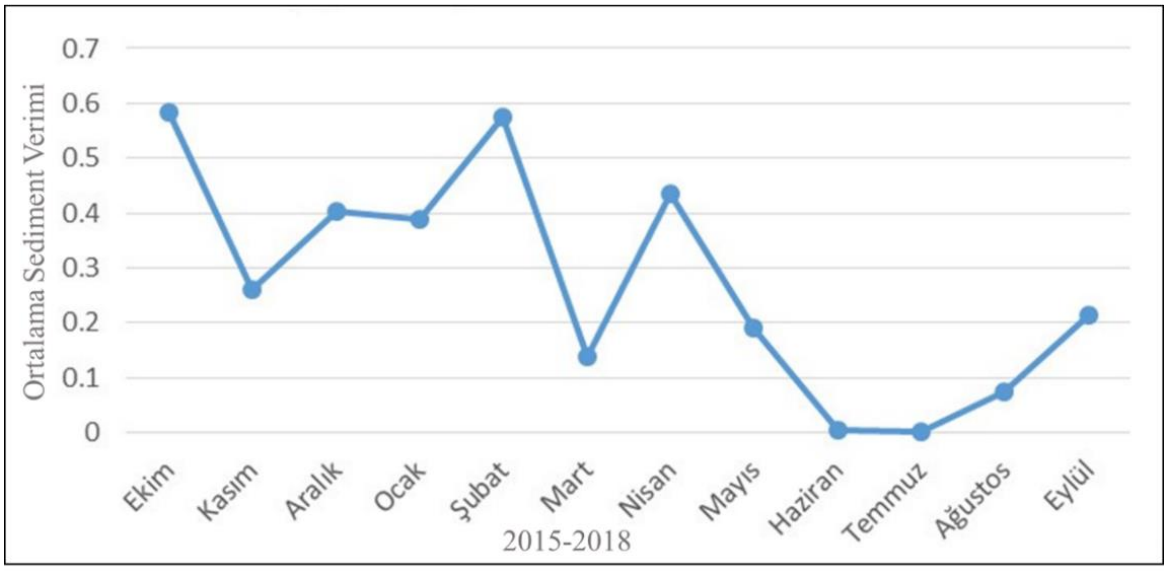


Şekil 3.12: Göksu akarsuyundaki değişimin aylık verim (ton/yıl/km^2) ortalamaları grafiği.

Çanakdere istasyonu için en yüksek verim ortalama değeri Ekim ve Şubat aylarına aittir. Sediman verimi değerleri **Tablo 3.6**'de ve elde edilen değişimin aylık verim ortalamaları grafiği **Şekil 3.13**'da verilmektedir.

Tablo 3.6: Çanakdere ortalama sediman verimi değerleri (ton/yıl/km^2).

	Eki.	Kas.	Ara.	Oca.	Şub.	Mar.	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.
Akım	3,6	3,8	8,8	11,2	10,5	6,6	2,9	1	0,7	0,6	0,3	0,7
Sed.	6,2	14,7	20,7	28,8	18,3	47,6	6,7	5,5	136,5	1650	4,1	3,3
Verim	0,6	0,3	0,4	0,4	0,6	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2



Şekil 3.13: Çanakdere akarsularındaki değişimin aylık verim (ton/yıl/km^2) ortalamaları.

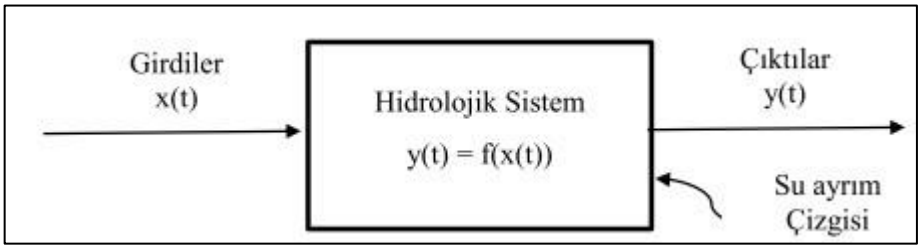
3.5. YAĞIŞ-AKIŞ MODELİ

Modelleme veya simülasyon, sorunu çözen bazı makul varsayımlar varsayılarak, işlem performansının veya gerçek sistemin taklitçisidir. Bu problem çözme veya gerçek süreç, kabul edilebilir ve ölçülebilir sonuçlara sahip olmalıdır. Bu nedenle, iyi bir modellemeye sahip olmak için, modeli yapılacak sistemin anlaşılması gerekir. Sistem bir nesne grubu olarak tanımlandıysa, belirli bir hedefe ulaşmak için bu nesnelerin birlikte birleştirilmesi gerekir. Örneğin, hidrolojik modelleme sistemi (yağışın akıntıya dönüşme süreci) havzada yağış ile başlar ve daha sonra çeşitli kayıp tiplerini (buharlaşma, perkülasyon, vb.) uyguladıktan sonra akışa geçen miktarı belirler.

Yağış-akış modellemesi, yağışın akışa dönüşüm sürecinin modellenmesini içerir. Genel olarak, her hidrolojik modelin iki ana bileşeni vardır. Birinci bileşende, yağışın hidrograf oluşum katkısı belirlenirken ikinci bileşende, su akışı dağılımı hidrograf profilini belirlemek için kullanılır. Bu nedenle, yağış-akış süreçleri yağmur (veya kar) simülasyonunu, havzadaki sızma, tutulma ve yağış kayıplarını ve nihayet, fazla suyun alanındaki eğilimini ve hareketini içerebilir oysa ilk üç işlem birinci bileşen ile ve son işlem ikinci bileşen ile ilgilidir.

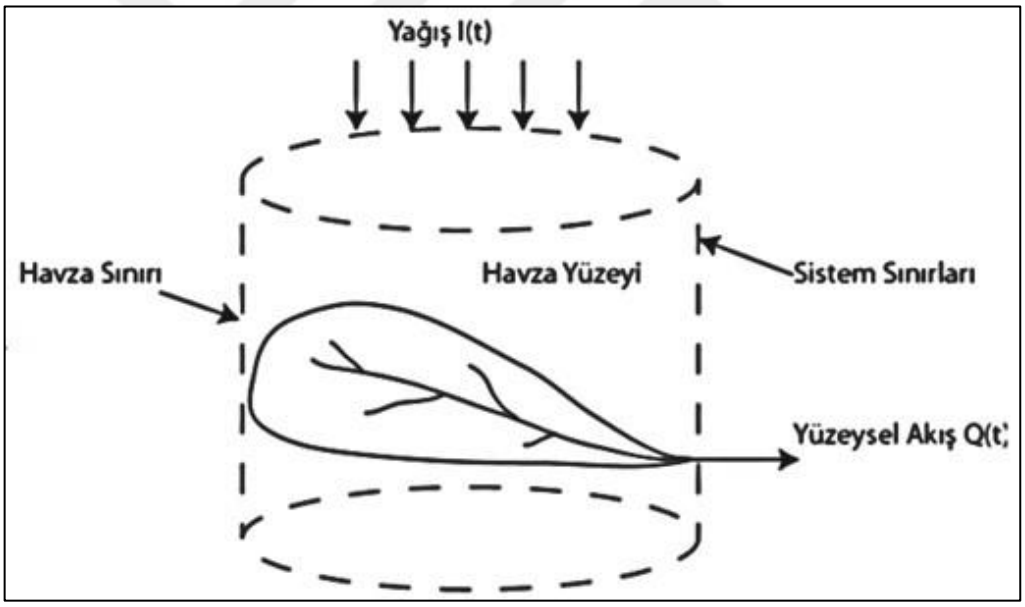
Hidrolojik (Yağış-akış) modeller, akarsu akışının güvenilir miktarının ve ilgili sedimanların yukarı bölgelerden mansap su yollarına, göllere ve rezervuarlara taşınmasının tahmini için sıklıkla uygulanır. Hidrolojik modelleme, yeryüzünde gerçekleşen hidrolojik süreçlerin fizik yasalarına dayandırılarak matematiksel modeller üzerine bazı basitleştirici kabuller yapılarak

oturtulması ve bu model çıktılarının yapılmış olan ölçümlerle karşılaştırılması esasına dayanır (Cüceloğlu, 2013). Hidrolojik modeller basit olarak üç bileşene sahiptir (**Şekil 3.14**). Bunlar girdiler, hidrolojik sistem ve çıktılar olarak gruplandırılabilir.



Şekil 3.14: Hidrolojik sistemin şematik temsili (Bayazıt, 1998).

Mühendislik hidrolojisi açısından hidrolojik çevrim, bir takım biriktirme sistemleri (hazneler) ile bunların arasındaki girdi-çıktı ilişkileri şeklinde gösterilebilir (Bayazıt, 1998). Biriktirme sistemleri ve bunlar arasındaki ilişkiler **Şekil 3.15**'de gösterilmektedir.



Şekil 3.15: Havza temelli hidrolojik sistemin şeması (Cüceloğlu, 2013).

Hidrolojik sisteme etki eden birçok bileşenin bir araya gelmesi ve bu bileşenlerin sistem üzerindeki etkileri modelleme çalışmaları içinde dönüşüm fonksiyonunu oluşturur. Bu anlamıyla dönüşüm fonksiyonu, hidrolojik olayın matematiksel olarak ifadesidir (Çelik, 2005). Hidrolojik modeller çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır ancak genel olarak aşağıda verilen konularda çok sık kullanılmaktadırlar, bunlar:

- Depolama tesislerinin planlanması, işletilmesi, geliştirilmesi gibi konularda ihtiyaç duyulan verinin geleceğe yönelik tahmin edilmesi,
- Ölçüm verisi bulunmayan havzalarda hidrolojik verinin üretilmesi,
- Havzalardaki arazi kullanımı değişikliği, iklim değişikliği gibi değişimlerin havzaya etkisinin ortaya konulması.

Katı maddelerin taşınması nehir başından sonuna kadar devamlı değişim göstermektedir. Erozyon ve sedimantasyon nehir boyunca her yerde oluşabilir (Mehmet ve Egemen, 2012). Nehirlerin eğimi fazla olan kısmı yani memba tarafında aşınma daha fazla meydana gelirken daha az eğimli olan mansap tarafında sedimantasyon meydana gelir.

Sediman kontrolü yapılması için akarsu üzerinde meydana gelecek sediman akımının tahmininin doğru yapılması önemlidir. Arazi kullanımı ve nehir havzasının yönetimi katı maddelerin taşınımının sınırlandırılmasında etkilidir. Suyun kalitesinin iyileştirilmesi, sucul canlıların yaşamını devam ettirmesi, su yapılarının (örneğin barajlar, iskeleler, dalgakıranlar vb.) tasarımının daha iyi yapılması ve ömürleri boyunca faaliyet gösterebilmeleri açısından sediman kontrolü oldukça önemlidir. Çünkü sedimantasyon kıyı veya havzanın morfolojik özelliklerinde önemli değişiklikler yapabilmektedir. Bu yüzden literatürde sediman taşınımı ve bunun sonucunda oluşan profiller ve profil özellikleri ile ilgili birçok teorik, deneysel ve modelleme çalışmaları yapılmıştır. Sediman yükünün ve taşınımının doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi ancak sediman modellenmesi ile mümkündür ve bu da temin edilen veri miktarına, uzunluğuna ve kalitesine bağlıdır. Bu verilerle önemli çevre problemlerinden biri olan erozyonun havzada meydana getireceği toprak kaybı ortaya konabilir. Böylece toprak kaybının zamansal ve mekânsal (spatio-temporal) farklılıklarının doğa ve insan kaynaklı nedenleri (litoloji, yağış, eğim, toprak ve zemin örtüsü gibi) belirlenebilir.

Sediman taşınımı modellemesi genel olarak iki fazlı akım modeli (Collisional teori ve K-C türbülans) ile yapılmaktadır. Bu modeller hem tabanda hem de su kolonundaki sediman taşınımını üç, iki veya bir boyutlu modellemeler yapılabilmektedir. Yönetim açısından, bir boyutlu modeli en uygulanabilir ve pratik yaklaşım olabilir ve bu yüzden, sediman taşınımı çalışmaları için en yaygın kullanılan yöntemdir. CCHE1D, yaygın olarak kullanılan ücretsiz bir boyutlu (1B) modellerinden biridir ve topoğrafik verileri işlemek ve model girdi verisi oluşturmak için CBS ile entegre edilebilir. Diğer mevcut bazı 1B modellerden HEC-RAS (SIAM), SAM, Mike 11, Fluvial12 ve GSTARS3'de sayılabilir. 2B modelde ise ortalama

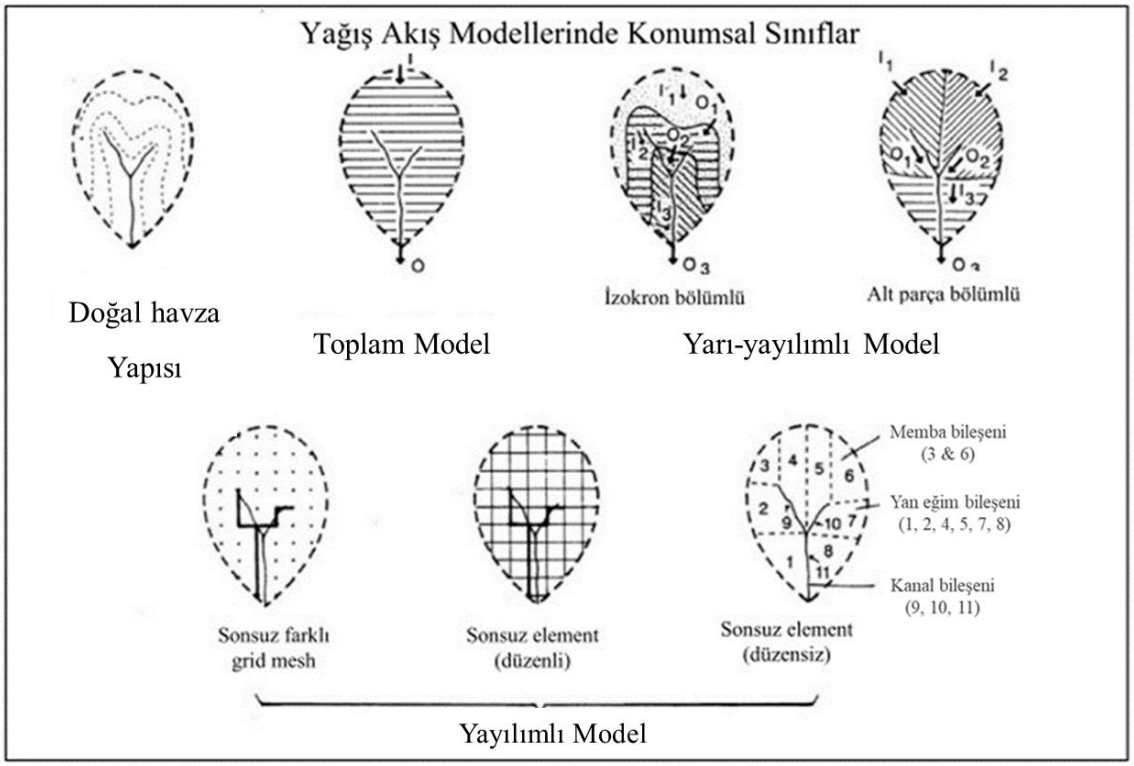
derinlik veya derinlik boyunca ortalama hidrodinamiğe göre havzanın morfolojisi tanımlanır (Abad ve diğ., 2008). 2B modellere örnek olarak CCHE2D, Mike 21C ve SED2D rasyonel esaslı yöntemi kullanmaktadır. Bu modeller akışın yanı sıra hem askıdaki hem de sürüntü maddesinin modellenmesi ile sediman taşınımını da dahil ederek doğal nehirler için yatak deformasyonunun hesaplanmasına izin verir. 3B sediman taşınımı modellemesinde veri toplama ve hesaplama aşamaları pahalı ve zahmetli olduğundan dolayı gerekli olmadıkça kullanılmamaktadır. CCHE3D, SWAT, EFDC, Delft3D ve Mike 3 gibi 3B modeller; akış, sediman taşınımı ve etkileşimlerinin modellenmesinde kullanılabilir. Bu modelleri birbirinden ayırmak için net bir sınır yoktur ve modellerin ortak özellikleri vardır. Sediman taşınım modellemesi üzerinde hala çalışılan, gri alanları olan karmaşık bir konudur. Bu çalışmada literatürde yaygın şekilde kullanılan SWAT modeli kullanılmaktadır.

SWAT modelinin yaygın olarak kullanılmasının sebepleri aşağıda kısaca özetlenmiştir (Abbaspour ve diğ., 2007; Iskender ve Sajikumar, 2016).

1.Su miktarı ve kalitesini beraberce hesaplayabilmesi,
2.Hidrolojik su döngüsünün bileşenlerini modelleyebilmesi,
3.Farklı yönetim uygulamalarının sonucu olarak havzada meydana gelebilecek akımı, sedimanı ve toprak erozyonunu tahmin edebilmesi,
4.Hesaplama verimliliğine sahip olması,
5.Uzun vadeli etkileri sürekli bir model olarak tahmin edebilmesidir.

3.5.1. SWAT Hidrolojik Modeli

Havzalarda senaryo bazlı geniş çerçevede hidrolojik modellemeye imkân veren SWAT (Soil Water Assessment Tool) modeli, toprak koruma sistemi (SCS) eğri numarası metodu kullanarak yağış-akış modellemesini gerçekleştirmektedir. Çeşitli hidrolik simülasyon modellerinin kategorisine göre, bu çalışmada SWAT modeli yarı yayılımlı (semi-distributed) bir model olarak kullanılmıştır. SWAT modeli, buharlaşma, akım (routing), kayıplar vb. gibi çeşitli bileşenleri hesaplamak için birkaç alt modele sahiptir ve bu özelliklerine sahip olmasından dolayı fiziksel-kavramsal model olarak adlandırılır. Zaman açısından SWAT, tek bir oluşum veya sürekli model olarak tanımlanmaktadır. Ancak, SWAT'ı sürekli bir model olarak düşünmek en iyisidir. Sonuçta, homojen hidrolojik tepki birimlerin (HRU'lar) kullanılması, onu yarı yayılımlı modeller alanına yerleştirir. Hidrolojik modellerin konumsal sınıflandırılması şematik olarak **Şekil 3.16**'de gösterilmektedir.



Şekil 3.16: Hidrolojik modellerinde mekânsal sınıflar (Jones, 1997).

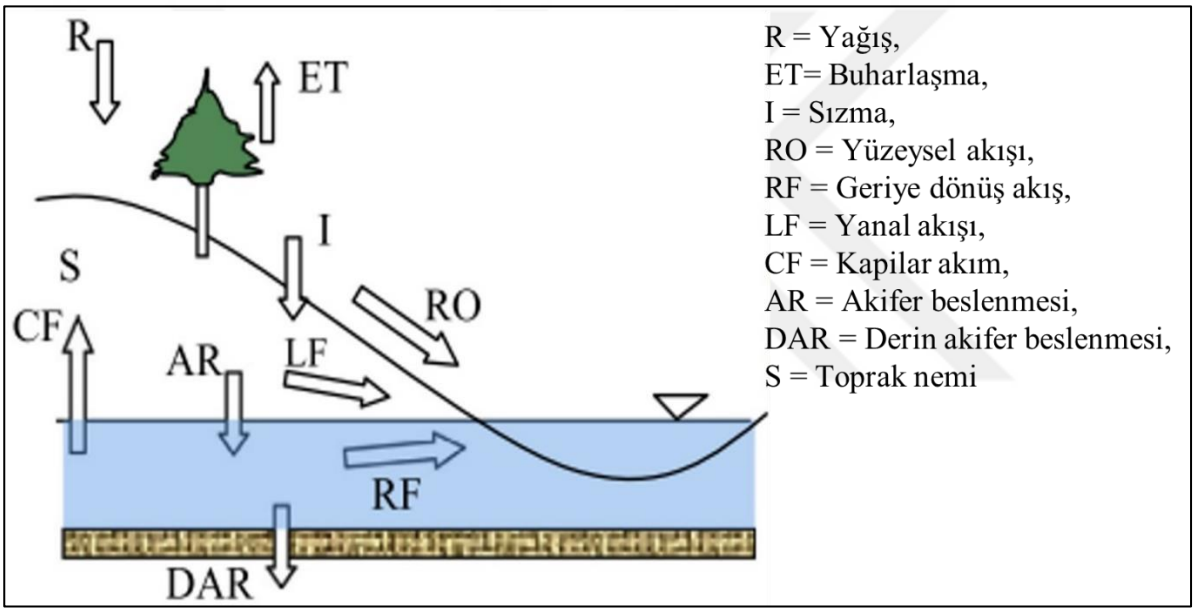
SWAT modeli çalışırken havzayı alt havzalara bölerek her bir alt havzayı akış kanalıyla birbirine bağlar. Bu alt havzalar, toprak tipi, arazi kullanımı/örtüsü ve eğim özelliklerinin aynı olduğu parçalara yani hidrolojik tepki birimlerine (Hydrologic Response Unit, HRU) bölünür. SWAT model yapısı iki farklı ölçekli hesap fazlarından oluşur: i) Arazi fazı; HRU seviyesinde, akımı, erozyonu ve topraktaki besin maddelerinin döngülerini hesaplar ve sonuçları alt havza düzeyinde toplar, ii) Akarsu fazı; akarsu boyunca suyun, sedimanın ve besin maddelerinin akış ağından havza çıkışına kadar olan taşınımlarını hesaplar (Neitsch ve diğ., 2011).

SWAT tarafından modellenen hidrolojik döngü, su dengesi denklemine dayanmaktadır (Denklem 3.3). Su dengesi, bitki büyümesini ve sediman, besinlerin, pestisitlerin ve patojenlerin hareketini etkilediği için SWAT'taki tüm süreçlerin arkasındaki itici güçtür. Su dengesi, günlük yağış, maksimum/minimum sıcaklık, güneş radyasyonu, rüzgâr hızı ve bağıl nem gibi iklimler tarafından yönlendirilen girdilerin bir fonksiyonudur. SWAT'ın simüle edilmiş hidrolojik süreçleri, gölgelik depolama, sızma, yüzeysel akışı, buharlaşma (ET), yanal akış, süzülme, yeraltı suyu akışı, kiremit (derin) drenajı, toprak profili içinde suyun yeniden dağıtımı, pompalanan tüketim kullanımı (varsa) ve yüzeysel sularından, göletlerden ve kollardan sızma yoluyla yeniden doldurmayı içerir. SWAT'ta kavramsal su dengesi modelinin

şematik gösterimi **Şekil 3.17**'da verilmiştir. Aynı HRU'daki tüm su dengesi süreçlerinin tutarlı olduğu kabul edilir.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}\left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}\right) \tag{3.3}$$

Bu denklemde SW_t, t zamanında (gün) toprağın nihai su içeriği (mm H_2O), yüzey akışı Q_{surf} (mm H_2O), buharlaşma, E_a (mm H_2O), toprak profili tabanından çıkan sızma ve baypas akışı, w_{seep} (mm H_2O) ve taban akışı, Q_{gw} (mm H_2O), i günündeki yağış, R_{day} (mm H_2O) miktarından çıkartılıp toprağın başlangıç su içeriği, SW_0 (mm H_2O) ile toplandıktan sonra elde edilmektedir (Neitsch ve diğ., 2011).



Şekil 3.17: SWAT'ta kavramsal su dengesi modelinin şematik gösterimi.

Hidrolojik döngünün arazi fazı; SWAT, yüzeysel akışını tahmin etmek için iki yöntem sunar: SCS (Toprak Koruma Hizmeti) eğrisi numarası (Denklem 3.4) veya Green-Ampt sızma metodunun modifikasyonu kullanılarak hesaplanmaktadır. SCS yönteminde, eğri numarası, toprağın nem içeriği ile doğrusal olmayan şekilde değişir. SCS eğri sayısı Denklemi (SCS, 1972):

$$Q_{surf} = \frac{\left(R_{day} - Ia\right)^2}{\left(R_{day} - Ia + S\right)} \tag{3.4}$$

bu denklemde Q_{surf} (mm H_2O), yüzeysel akışı oluşturan akış, R_{day} günlük yağış derinliği (mm H_2O), I_a (mm H_2O) yüzey depolama, durdurma ve sızıntıdan önce sızıntıyı içeren ilk

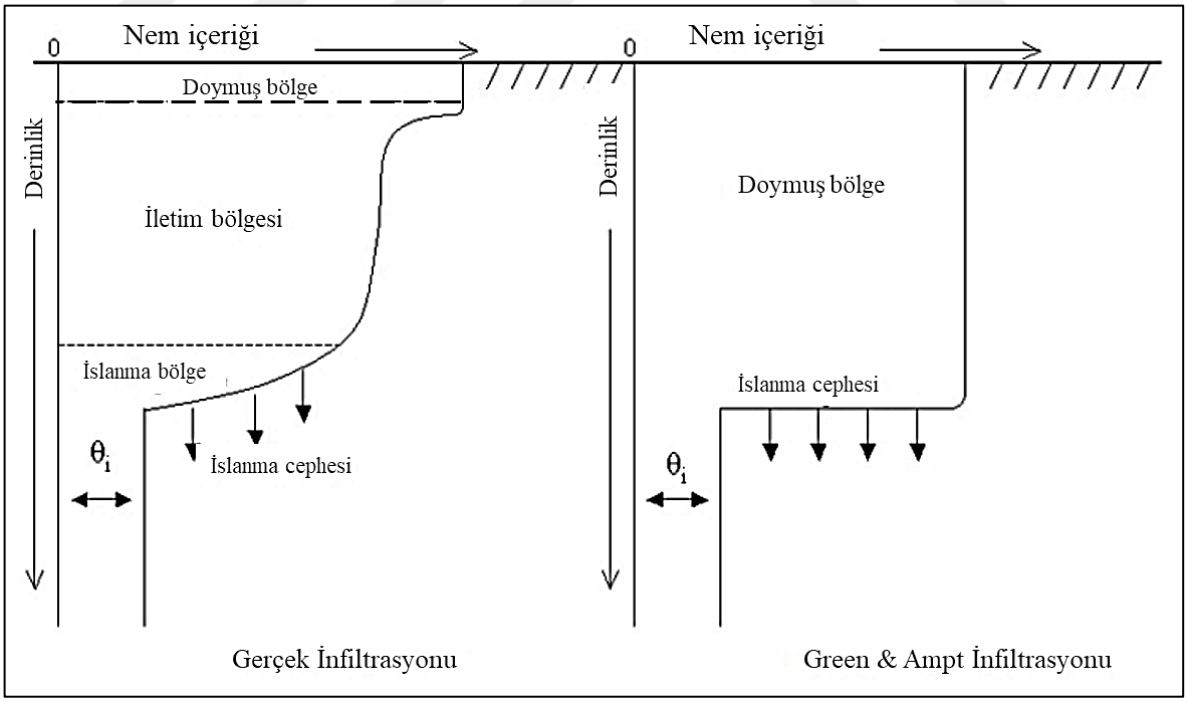
soyutlamalardır ve S (mm H_2O), tutma parametresidir. Tutma parametresi S hesaplaması Denklem 3.5 verilmiştir:

$$S = 25.4 \left(\frac{100}{CN} - 10\right) \tag{3.5}$$

burada S, doymuş kalınlık birim alanı başına düşen su miktarı (mm / gün); CN, günün eğri numarasıdır. İlk soyutlamalar Ia, genellikle 0.2S yaklaşmakta ve Denklem 3.5, Denklem 3.6 halinde olarak tahmin edilir:

$$Q_{surf} = \frac{\left(R_{day} - 0.2S\right)^2}{\left(R_{day} + 0.8S\right)} \tag{3.6}$$

Green ve Ampt (1911) yöntemi, saatlik yağış verilerini gerektirir ve sızma, ıslanan bölgenin emme kapasitesi ve etkin hidrolik iletkenliğin bir fonksiyonu olarak hesaplar. Green ve Ampt yöntemi, toprak profilinin homojen olduğunu ve önceki nemin profilde homojen olarak dağıldığını varsayar. Su toprağa sızdıkça, model ıslak alan cephesinin üzerindeki toprağın tamamen doymuş olduğunu ve ıslak alan cephesinde nem içeriğinin keskin bir şekilde kırıldığını varsayar. **Şekil 3.18**, Green ve Ampt denklemi ile modellenen derinlikteki nem dağılımı ile gerçekte meydana gelenler arasındaki fark grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.18: Green ve Ampt tarafından modellenen nem içeriği dağılımı ile tipik gözlemlenen dağılımın karşılaştırılması (Green ve Ampt, 1911).

Mein ve Larson (1973), Green and Ampt denklemini kullanarak sızma ile havuzlama süresini belirlemek için bir metodoloji geliştirmişler. Green-Ampt Mein-Larson fazla yağış yöntemi, yüzeysel akışını belirlemek için alternatif bir seçenek sağlamak üzere SWAT içerisine dahil edilmiştir. Bu yöntem, kullanıcı tarafından sağlanan günlük (saatlik) yağış verilerini gerektirir. Green-Ampt Mein-Larson sızma oranı Denklem 3.7'i kullanılarak tanımlanır.

$$f_{inf,t} = K_\theta \cdot \left(1 + \frac{\Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{f_{inf,t}}\right) \tag{3.7}$$

Burada $f_{inf,t}$, t (mm/s) zamanındaki sızma hızı, K_θ etkili hidrolik iletkenliği (mm/s), Ψ_{wf} ıslanan bölgenin emme kapasitesi (mm), ve $\Delta\theta_v$ (mm/mm), ıslanan bölgenin boyunca nem içeriğinin değişimdir.

Pik akışı tahminleri rasyonel yöntemin bir modifikasyonu ile yapılır (Chow ve diğ., 1988). Kısacası, Rasyonel metot (Denklem 3.8), eğer şiddeti i olan bir yağış anında aniden başlayıp sonsuza kadar devam edeceği, akış oranı tüm alt havzaların çıkışta akışa katkıda bulunduğu zaman, konsantrasyon zamanı, tc'ye kadar artması fikrine dayanır.

$$q_{peak} = \frac{C.i.Area}{3.6} \tag{3.8}$$

Burada q_{peak}, pik akış ($m^3\ s^{-1}$), *C* akış katsayısı, *i* yağış şiddeti (mm/s), Area, alan (km^2) ve 3.6 dönüşüm faktörüdür.

Her bir toprak tabakasında yanal akışı öngörmek için kinematik bir depolama modeli kullanılır. Yanal yüzeyaltı akışı, yüzeyin altında, ancak kayaların su ile doyurulduğu bölgenin üzerinde bulunan akarsu katkısıdır. Yanal akış Denklem 3.9 kullanarak tahmin edilir.

$$q_{lat} = 0.024\ \frac{(2S.SC.sin\alpha)}{\theta_d L} \tag{3.9}$$

Burada q_{lat}, yanal akış (mm/gün); S, doymuş kalınlık birim alan başına (mm/gün) boşaltılabilir toprak hacmi; SC, doymuş hidrolik iletkenlik (mm/s); L, akış uzunluğu (m), α, arazi eğimi ve θ_d, boşaltılabilir porozitedir.

Model iletkenlik, eğim ve toprak su içeriğindeki değişimi açıklar. Sığ akiferin depolanmasıyla toplam akışa yeraltı suyu akış katkısı simüle edilmektedir (Arnold ve Allen, 1996).

Model, potansiyel buharlaşmanı tahmin etmek için üç seçenek sunmaktadır: Hargreaves (Hargreaves ve Samani, 1985), Priestley-Taylor (Priestley ve Taylor, 1972) ve Penman-Monteith (Monteith, 1965). Penman-Monteith yöntemi, güneş radyasyonu, hava sıcaklığı ve bağıl nem girdisini gerektirir. Priestley-Taylor yöntemi güneş radyasyonu ve hava sıcaklığı gerektirirken Hargreaves yöntemi model girdisi olarak yalnızca hava sıcaklığı gerektirir (Briak ve diğ., 2016; Yebdri ve diğ., 2007). SWAT'ta sediman verimi, Williams ve Berndt (1977) tarafından geliştirilen modifiye edilmiş toprak kaybı denklemi (MUSLE) ile tahmin edilmektedir. Modifiye edilmiş evrensel toprak kaybı Denklem 3.10 (Williams, 1975):

$$Sed = 11.8.\left(Q_{surf}.q_{peak}.area_{hru}\right)^{0.56}.K_{USLE}.C_{USLE}.P_{USLE}.LS_{USLE}.CFRG \qquad (3.10)$$

burada Sed belirli bir günde sediman verimi (metrik ton) olduğunda, Q_{surf} yüzeysel akış hacmi (mm H_2O/ha), q_{peak} pik akış (m^3/s), area, HRU'nun alanı (ha), K_{USLE} USLE toprak aşındırma faktörü (0,013 metrik ton m^2 saat/(m^3-metrik ton cm)), C_{USLE} USLE toprak örtüsü ve yönetim faktörü, P_{USLE} USLE destek uygulama faktörü, LS_{USLE} USLE topografik faktörü ve CFRG kaba parça faktörüdür.

SWAT, alt havza ölçeğinde tahmin edilen erozyon oranını simüle etmek için MUSLE Denklemini kullanır. MUSLE, akış, toprak tipi, arazi kullanımı, topografya ve arazi yönetimi uygulamaları dahil olmak üzere birçok faktörü birleştirir. USLE, Williams (1975) tarafından toprak kaybı (MUSLE) oluşturmak için R-faktörünü bir akış faktörü ile değiştirerek modifiye edilmiştir. Evrensel toprak kaybı denklemi, yer koruma planlamasında arazi toprak kaybını tahmin etmek için geliştirilmiştir ve su havzalarından gelen sediman verimini tahmin etmek için de kullanılmaktadır. Akarsu havzalarındaki erozyon ve katı madde hareketi için geliştirilen USLE, ABD'den toplanan veri kümesine dayanan ampirik bir model olarak kullanılmaktadır (Wiishmeier ve Smith, 1978) (Denklem 3.11).

$$A = R.K.L.S.C.P \qquad (3.11)$$

Bu denklemde:

A = Beklenen yıllık toprak kaybı (ton ha^{-1} $yıl^{-1}$);

R = Yağışın Aşındırma Enerjisi Faktörü (MJ mm ha^{-1} $saat^{-1}$ $yıl^{-1}$);

K = Toprakta aşınabilirlik / Toprak erozyon duyarlılık etmeni (ton ha saat ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1});

L = Eğim uzunluğu çarpanı;

S = Eğim dikliği çarpanı (boyutsuz) tanımlayan topoğrafik faktörler;

C = Bitki Örtüsü ve Arazi Kullanım Faktörü;
P = Toprak ve Su Koruma Faaliyetleri Faktörü olarak tanımlanmaktadır.

Yağışın aşındırma enerjisi faktörü (R), Denklem 3.12 yardımıyla çalışma alanındaki yağışlarının aşındırma gücü haritasından elde edilmektedir.

$$R = 0.029(1 - 0.72e^{0.05I}) \tag{3.12}$$

Burada, R, 1cm lik yağmurun kinetik enerjisi (jul/m^2) ve I, yağış şiddeti (cm/sa)'dir.

Toprak aşınabilirlik Faktörü (K), Denklem 3.13'teki eşitlik (Torri ve diğ., 1997) yardımıyla elde edilmektedir.

$$K_T = 0.0293(0.65 - D_G + 0.24D_G^2).exp\left\{-0.0021\frac{OM}{C} - 0.00037\left(\frac{OM}{C}\right)^2 - 4.02C + 1.72C^2\right\} \tag{3.13}$$

Bu denklemde C, toprak kil içeriği, D_G geometrik Naper logaritması ortalama parçacık boyutu ve OM, organik madde içeriğidir.

Eğim dikliği ve uzunluğu faktörü (LS) Sayısal Yükselti Modeli kullanılarak Denklem 3.14 yardımıyla elde edilmiştir.

$$LS = \left(\frac{X\eta}{22.13}\right)^{0.4}.\left(\frac{sin\,\theta}{0.0896}\right)^{1.3} \tag{3.14}$$

Burada, X akış birikimi, η, kullanılan sayısal yükselti modeli hücre boyutu ve θ, radyan cinsinden eğim dikliğidir.

Bitki örtüsü ve arazi kullanım faktörünü (C), elde edilmesinde CORINE (bölüm 3.4.2'de açıklanmıştır) verisini kullanılmaktadır.

Renard ve diğ., (1994) USLE denklemini Revize Edilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (RUSLE) olarak yenilemiştir. RUSLE ve USLE arasında bazı farklılıklar vardır. Örneğin, USLE, ABD'deki belirli coğrafi alanlar için uzun vadeli ortalama yağış koşullarına dayanırken, RUSLE daha fazla hava istasyonundan alınan verilere dayanmaktadır ve bu nedenle herhangi bir veri için daha kesindir. RUSLE, suyun yüzeye çarpan düz eğimlerde yağmur damlası etkisinin etkisini yansıtmak için R düzeltmesini hesaplar. USLE, toprak dokusuna, organik

madde içeriğine, geçirgenliğe ve diğer doğal toprak tipi faktörlerine dayanmaktadır. USLE gibi ancak donma ve çözülme, toprak nemi ve toprak konsolidasyonu gibi mevsimsel değişiklikleri hesaba katacak şekilde ayarlanmıştır. USLE, arazi kullanımından bağımsız olarak eğimin uzunluğuna ve dikliğine dayanmaktadır. RUSLE, yivlerin oluklar arasındaki aşınmaya oranına dayalı yeni denklemler atayarak USLE'yi değiştirir ve karmaşık eğimleri içermektedir.

USLE, Williams (1975) tarafından toprak kaybı Modifiye edilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (MUSLE) oluşturmak için R faktörünü bir akış faktörü ile değiştirerek modifiye edilmiştir. MUSLE'ın ana amacı, USLE'nin sınırlamalarının üstesinden gelmektir. Bu sınırlamalar, yeni ortamlara daha az adaptasyon kabiliyetini, sahaya özgü (havza ölçeğine uygun olmayan) ve tepelere ve nehirlere ve rezervuarlara doğru kirlilik taşınmasına ilişkin olarak tepenin yamacının alt kısımlarında biriktirmeyi hesaba katmamaktadır. MUSLE Denklemi 3.15:

$$A_s = 11.8.\left(V_{\emptyset}.Q_{\rho}\right).K.L.S.C.P \qquad (3.15)$$

Bu denklemde:

A_S = Alan başına hesaplanan toprak kaybı,

$V_{\emptyset}.Q_{\rho}$= $V_{\emptyset}$, akış hacmi (m^3) ve Q_{ρ}, nehirdeki pik akış hızıdır (m^3/s),

L ve S = Tepenin eğim uzunluğunu ve tepe eğim dikliğini (boyutsuz) tanımlayan topoğrafik faktörler,

K = Toprakta aşınabilirlik (Mg ha sa ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}), ve

C ve P = Örtü ve arazi kullanımına göre tanımlanan parametreleri ifade etmektedir.

Özellikle kent dışı arazi kullanım türleri için HRU sediman verimleri MUSLE ile tahmin edilmektedir (Williams, 1975).

Hidrolojik döngünün akarsu fazında; SWAT, su ve sediman, besin ve pestisitleri ana kanala yüklediğinde, yükler hidrolojik modellerdeki (HYMO) benzer bir yönetmelik yapısı kullanarak su havzasının akış ağı üzerinden yönlendirilir (Williams ve Hann, 1972). Ana kanalda yönlendirme, dört bileşene ayrılabilir: su, sediman, besin maddeleri ve organik kimyasallar olarak belirlenmektedir. Akış, Williams ve Rust (1969) tarafından geliştirilen metodu bir değişken depolama katsayısı yöntemi olarak veya Muskingum yönlendirme metodunu kullanılarak kanaldan yönlendirilir. Kanaldaki sediman taşınması, iki sürecin, biriktirme ve kazılmanın eş zamanlı çalışmasıyla kontrol edilir. SWAT'in önceki versiyonları, kanallardaki

birikimi/deposition tahmin etmek için akım gücü kullanmıştır (Arnold ve diğ., 1995). Bagnold (1977), su yoğunluğunun, akış oranının ve su yüzey eğiminin ürünü olarak akış gücünü tanımlamıştır. (Williams, 1980), Bagnold'un akış gücü tanımını, birikimi belirlemek için kanal eğiminin ve hızının bir fonksiyonu bir yöntem olarak geliştirmiştir. SWAT'in yeni versiyonunda, denklemler sadeleştirilmiş ve bir nehir segmentinden taşınabilecek maksimum sediman miktarı en yüksek kanal hızının bir fonksiyonudur. En yüksek kanal hızı, $V_{ch,pk}$, Denklem (3. kullanarak hesaplanır:

$$V_{ch,pk} = \frac{q_{ch,pk}}{A_{ch}} \tag{3.16}$$

$q_{ch,pk}$, pik akış hızı (m^3/s) ve A_{ch}, kanaldaki (m^2) akış kesit alanıdır. Pik akış oranı Denklem 3.17' kullanılarak tanımlanır.

$$q_{ch,pk} = prf.q_{ch} \tag{3.17}$$

Burada *prf*, pik ayarlama oranı faktörü ve q_{ch}, ortalama akış hızıdır (m^3/s).

Kanla segmentinden taşınabilecek maksimum sediman miktarı Denklem 3.18'i kullanarak hesaplanır:

$$CONC_{sed,ch,mx} = \left(C_{sp}.V_{ch,pk}\right)^{spexp} \tag{3.18}$$

burada $\mathrm{CONC_{sed,ch,mx}}$, su ile taşınabilen en yüksek sediman konsantrasyonu (ton/m^3 veya kg/L), $\mathrm{C_{sp}}$ kullanıcı tarafından tanımlanan bir katsayı, $\mathrm{V_{ch,pk}}$ pik kanal hızı (m/s) ve spexp, kullanıcı tarafından tanımlanan bir katsayıdır. Biriktirme ve birikme miktarı hesaplandıktan sonra, ulaşılan sedimanın nihai miktarı Denklem 3.19'u kullanarak belirlenir:

$$sed_{ch} = sed_{ch,i} - sed_{dep} + sed_{\mathrm{deg}} \tag{3.19}$$

burada, $\mathrm{sed_{ch}}$, ulaşılan sediman miktarı (metrik ton), $\mathrm{sed_{ch,i,}}$ zaman periyodunun başlangıcındaki askıda bulunan sediman (metrik ton) miktarı, $\mathrm{sed_{dep}}$, ulaşılan çökeltinin miktarı ve $\mathrm{sed_{deg}}$ nehir segmentinde yeniden yapılandırılan sediman miktarıdır (metrik ton). Nehir dışından taşınan sediman miktarı Denklem 3.20'yi kullanarak hesaplanır:

$$sed_{out} = sed_{ch} . \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad (3.20)$$

bu denklemde, sed_{out}, nehirden taşınan sediman miktarının (metrik ton), sed_{ch} nehirde askıda kalan sediman miktarı (metrik ton), V_{out} zaman adımı sırasında çıkış hacmi (m^3 H_2O) ve V_{ch} nehir segmentindeki su hacmidir (m^3 H_2O).

İklim girdileri; SWAT'ta modellenen iklimsel süreçler yağış, hava sıcaklığı, toprak sıcaklığı ve güneş radyasyonundan oluşmaktadır. Yağış miktarlarının dağılımı tanımlamak için çok sayıda olasılık dağılım fonksiyonu kullanılmıştır. SWAT kullanıcıya iki seçenek sunar: eğik dağılım ve üstel dağılım. Nicks (1974) tarafından önerilen eğik dağılım, yamuk dağılımı temel alır, Schaake ve Fiering (1967) tarafından tipik akışı oluşturmak için kullanılan eğimli dağılımdır. Nemli bir günde yağış miktarını hesaplamak için kullanılan Denklem ((3.):

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2\sigma_{mon} . \left[\frac{\left[\left(SND_{day} - \frac{g_{mon}}{6} \right) . \left(\frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{mon}} \right] \quad (3.21)$$

burada, R_{day}, belirli bir günde yağış miktarı (mm H_2O), $\mu_{mon,}$ortalama günlük yağış (mm H_2O), $\sigma_{mon,}$ aydaki günlük standart sapma yağışı (mm H_2O), $SND_{day,}$ günlük hesaplanan standart normal sapma ve g_{mon}, aydaki günlük yağışlar için eğik katsayısıdır. Günlük standart normal sapma Denklem (3. kullanarak hesaplanır:

$$SND_{day} = \cos(6.283 . rnd_2) . \sqrt{-2ln(rnd_1)} \quad (3.22)$$

burada, rnd_1 ve rnd_2'nin 0,0 ve 1,0 arasında rasgele sayılardır.

Üstel dağılım, eğik dağılımına bir alternatif sağlar. Bu dağılım daha az veri girdisi gerektirir ve en çok yağış olayları ile ilgili sınırlı verilerin bulunduğu alanlarda kullanılır. Günlük yağışlar, üstel dağılımla Denklem (3. kullanılarak hesaplanır:

$$R_{day} = \mu_{mon} . \left(-ln(rnd_1) \right)^{rexp} \quad (3.23)$$

bu denklemde, R_{day} (mm H_2O), belirli bir günde yağış miktarı, $\mu_{mon,}$ (mm H_2O) ay için ortalama günlük yağış, rnd_1 0,0 ve 1,0 arasında rastgele bir sayı ve *rexp* 1,0 ile 2,0 arasında ayarlanması gereken bir üssüdür. rexp'nin değeri arttıkça, yıl boyunca aşırı yağış olaylarının sayısı da artacaktır.

Maksimum ve minimum sıcaklık ve güneş radyasyonu için günlük değerler üretmek için kullanılan prosedür Matalas (1967) tarafından sunulan sabit zayıf üretim sürecine dayanmaktadır. Maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık ve güneş radyasyon için katıntı günlük değerlerin hesaplanması gereklidir. Kalıntıları hesaplamak için kullanılan Denklem (3.:

$$\chi_i(j) = A\chi_{i-1}(j) + B\varepsilon_i(j) \tag{3.24}$$

bu denklemde, $\chi_i(j)$, i gün için bir 3*1 bir matrisdir; maksimum sıcaklık kalıntıları (j = 1), minimum sıcaklık (j = 2) ve güneş radyasyonu (j = 3) kalıntıları olan matris elementleridir, $\chi_{i-1}(j)$, 3*1 önceki günün kalıntıları bir matrisi, $\varepsilon_i(j)$, 3*1 bağımsız rasgele bileşenlerin bir matrisi ve A ve B, 3*1 matris ki elemanları yeni dizilerin istenen seri-korelasyon ve çapraz-bağıntı katsayılarına sahip olacak şekilde tanımlanır.

Süreklilik denklemi günlük ortalama güneş radyasyonu ile ilgilidir. Islak veya kuru koşullarda ay için ortalama günlük güneş ışınımına göre ayarlanmış Denklem (3.2:

$$\mu rad_{mon}.days_{tot} = \mu Ward_{mon}.days_{wet} + \mu Dard_{mon}.days_{dry} \tag{3.25}$$

burada, μrad_{mon} ortalama günlük güneş radyasyonu (MJ m^{-2}), $days_{tot}$, aydaki toplam gün sayısı, $\mu Ward_{mon}$, ayın nemli günlerde ortalama günlük güneş radyasyonu (MJ m^{-2}), $days_{wet,}$ ayda toplam nemli gün sayısı, $\mu Dard_{mon}$, ayın ortalama günlük güneş kuru gün radyasyonu (MJ m^{-2}) ve $days_{dry}$, aydaki kuru gün sayısıdır.

SWAT, potansiyel buharlaşma hesaplamak için Penman-Monteith denklemini kullandığında bağıntılı nem ve rüzgâr hızı hesaplaması gerekiyor. Ayrıca, bitki büyümesi üzerindeki buhar basıncı açığını hesaplamak için kullanılır. Günlük ortalama bağıl nem değerleri, ortalama aylık bağıl nemi kullanılarak üçgen bir dağılımdan hesaplanır. Bu yöntem, EPIC modeli için Williams (1990) tarafından geliştirilmiştir. Bağıl nem, gerçek buhar basıncına oran olarak belirli bir sıcaklıkta doyma buharı basıncından tanımlanır (Denklem (3.):

$$Rh_{mon} = \frac{e_{mon}}{e^0_{mon}} \tag{3.26}$$

burada, Rh_{mon}, aylık ortalama bağıl nem, e_{mon} aylık ortalama sıcaklıkta (kPa) gerçek buhar basıncı ve aylık ortalama sıcaklıktaki (kPa) doymuş buhar basıncıdır. Doymuş buhar basıncı, e^0_{mon}, aylık ortalama hava sıcaklığı Denklem (3. ile ilgilidir:

$$e^0_{mon} = exp\left[\frac{16.78\mu tmp_{mon} - 116.9}{\mu tmp_{mon} + 273.3}\right] \quad (3.27)$$

burada $e^0_{mon,}$ ortalama aylık sıcaklıktaki (kPa) doymuş buhar basıncı, ve μtmp_{mon}, ayın ortalama hava sıcaklığıdır (C°). Aylık ortalama hava sıcaklığı, ortalama maksimum aylık sıcaklık ortalaması μmx_{mon}, ve ortalama minimum aylık sıcaklık, μmn_{mon} alınarak hesaplanır.

Çiy noktası (dew point) sıcaklığı, gerçek buharın basıncı atmosferdeki doymuş buhar basıncına eşittir. Gerçek buhar basıncı Denklem (3.'i kullanarak hesaplanabilir:

$$e^0_{mon} = exp\left[\frac{16.78\mu dew_{mon} - 116.9}{\mu dew_{mon} + 273.3}\right] \quad (3.1)$$

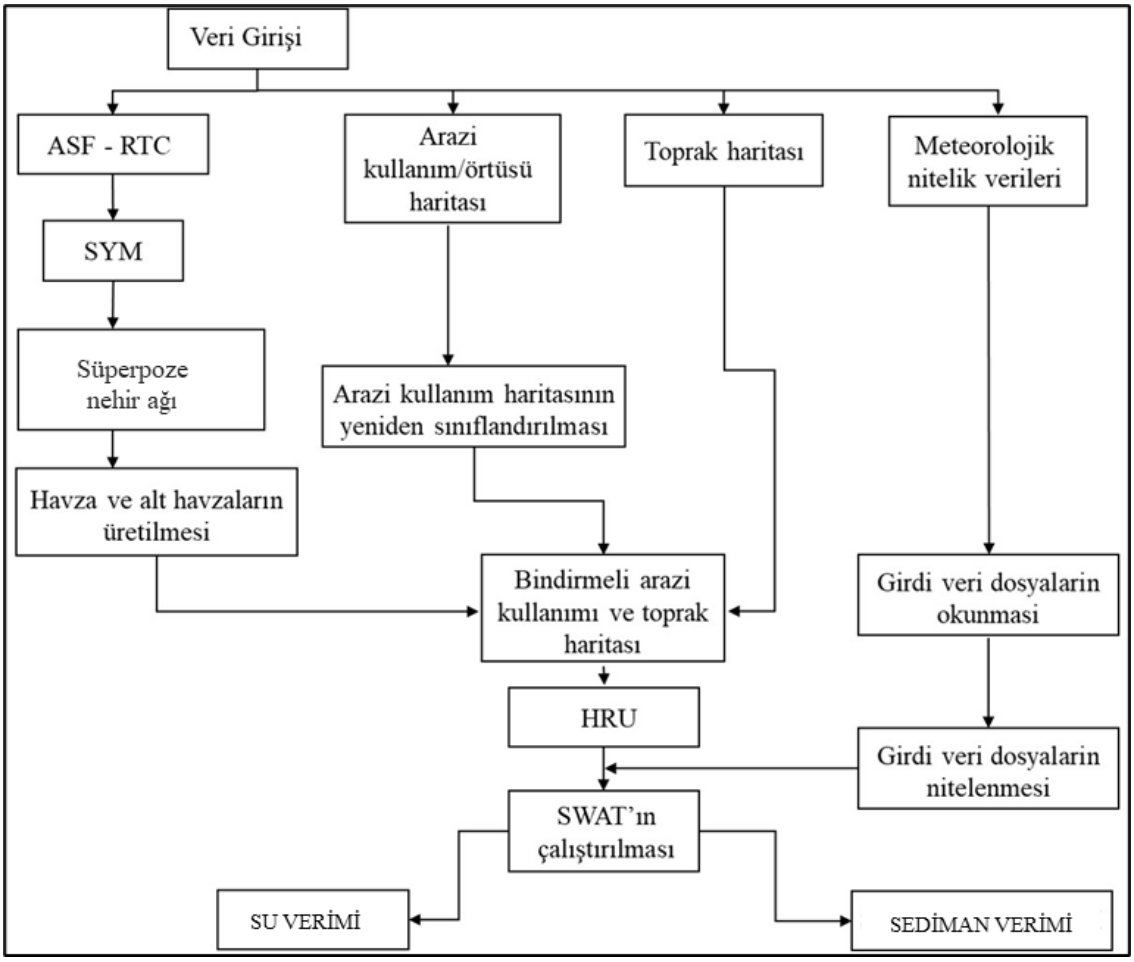
burada e^0_{mon}, ayın ortalama sıcaklığındaki (kPa) gerçek buhar basıncı, ve μdew_{mon}, aylık ortalama şebnem noktası sıcaklığıdır (C°).

SWAT'ta modifiye bir üstel denklem kullanarak günlük ortalama rüzgâr hızı oluşturulur (Denklem (3.):

$$\mu_{10m} = \mu wnd_{mon}.\left(-ln(rnd_1)\right)^{0.3} \quad (3.2)$$

burada, μ_{10m}, günlük ortalama rüzgar hızı (m s^{-1}), μwnd_{mon}, aylık ortalama rüzgar hız (m s^{-1}) ve rnd_1 0,0 ve 1,0 arasında rastgele bir sayıdır.

Potansiyel buharlaşmanı hesaplamak için kullanılan yönteme bağlı olarak rüzgâr hızı ve bağıl nem de modellenebilir. SWAT yağış, maksimum ve minimum sıcaklık, güneş radyasyonu, bağıl nem ve rüzgâr hızının günlük değerlerini gerektirir. SWAT, iklim verilerini oluşturmak veya ölçülen kayıtlardaki boşlukları doldurmak için WGEN hava durumu jeneratör modelini (Sharpley ve Williams, 1990) içerir. SWAT simülasyon akış şeması **Şekil 3.19**'da gösterilmiştir.



Şekil 3.19: Akış ve sediman veriminin simülasyonu için SWAT metodolojisi (Gull ve diğ., 2017).

Akarsularda akımın herhangi bir noktasında eğer bir kesitteki akım karakteristikleri (örneğin, hız büyüklüğü veya yönü) zamana bağlı olarak değişiyorsa $^{\partial E}/_{\partial t} \neq 0$ (saniyede akan akim miktarının sabit olmadığı bir akış), bu akıma karasız denir. Kararlı olmayan akım için, sistemin dış sınırları konumdaki sınır koşullarının girmesi ve simülasyon başlangıcında başlangıç akış koşulların ayarlamaları gerekir.

Bu çalışmada ABD Ordusu Mühendisler Birliği (the US Army Corps of Engineers) tarafından geliştirildi HEC-RAS'ın Quasi-kararlı olmayan sediman (Quasi-unsteady sediman) yöntemi sediman modellemesi için kullanılmıştır. HEC-RAS, sediman verisi olan ve sediman verisi olmayan karar olmayan akış simülasyonları çalıştırabilir. Doğru, kalibre edilmiş, kararlı olmayan hidrolik model oluşturmak, kararlı sediman taşınım modellemesinin ilk adımıdır. HEC-RAS tek boyutlu sediman taşıma modeli genellikle kararlı olmayan akış varsayımını benimsemiştir, ancak kararlı olmayan akışlarda akış özellikleri ile sediman taşıma hızı arasında mekânsal ve zamansal bir gecikmeye sahip bir şekilde çalışmaktadır.

Akım alanındaki herhangi bir noktadaki kesit alanı (A), derinlik (h), hız (u), basınç (p) gibi akım ile viskozite, sıcaklık, özgül ağırlık gibi akışkan karakteristikleri (E); zamanın (t) ve bulunduğu yerin (konumun, noktanın) (x, y, z) bir fonksiyonudur (Denklem 3.30):

$$E = f(t, x, y, z) = f(t, s) \tag{3.30}$$

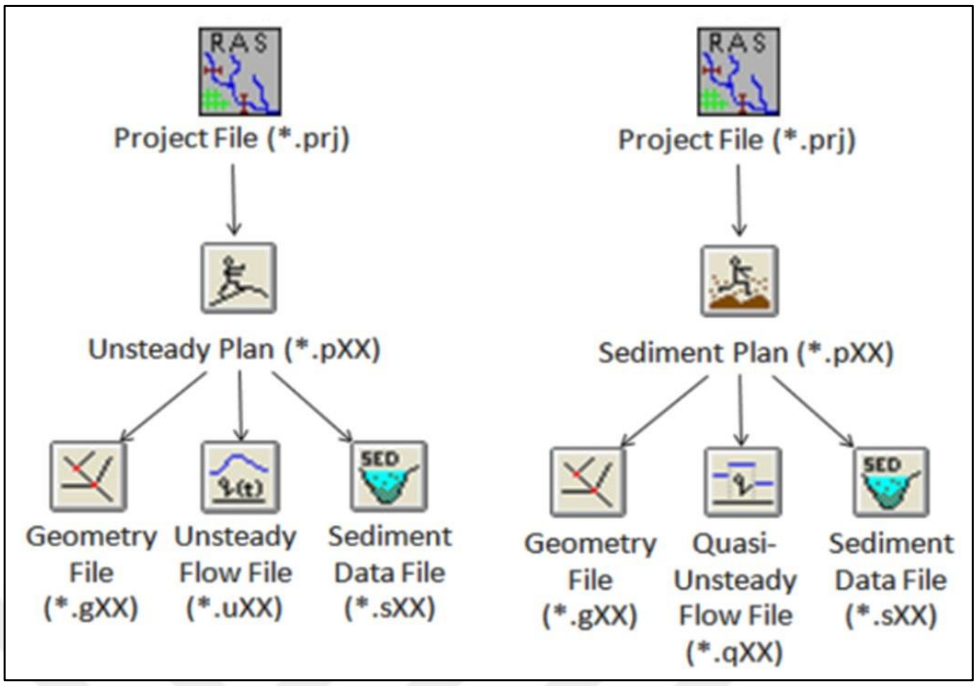
Bu model için, sığ ve karar olmayan açık kanal akışını temsil etmek için kullanılabilen ana denklem Saint-Venant denklemleridir (Zhang ve Duan, 2011). Birinci denklem (Denklem 3.31) süreklilik denklemini temsil ettiği ve ikinci denklem (Denklem 3.32) momentum denklemini gösterdiği Saint-Venant denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Q)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_b A_b)}{\partial t} = 0 \tag{3.31}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Q) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho \frac{Q^2}{A}\right) + \rho g A \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \rho g \frac{n^2 Q|Q|}{AR^{4/3}} = 0 \tag{3.32}$$

Burada t zaman, x boyuna koordinat, ρ su-sediman karışımının yoğunluğu, A kesitsel akış alanı, Q debi, g yerçekimi ivmesi, Z_s su yüzeyi yüksekliği, n Manning pürüzlülüğü ve R hidrolik yarıçaptır.

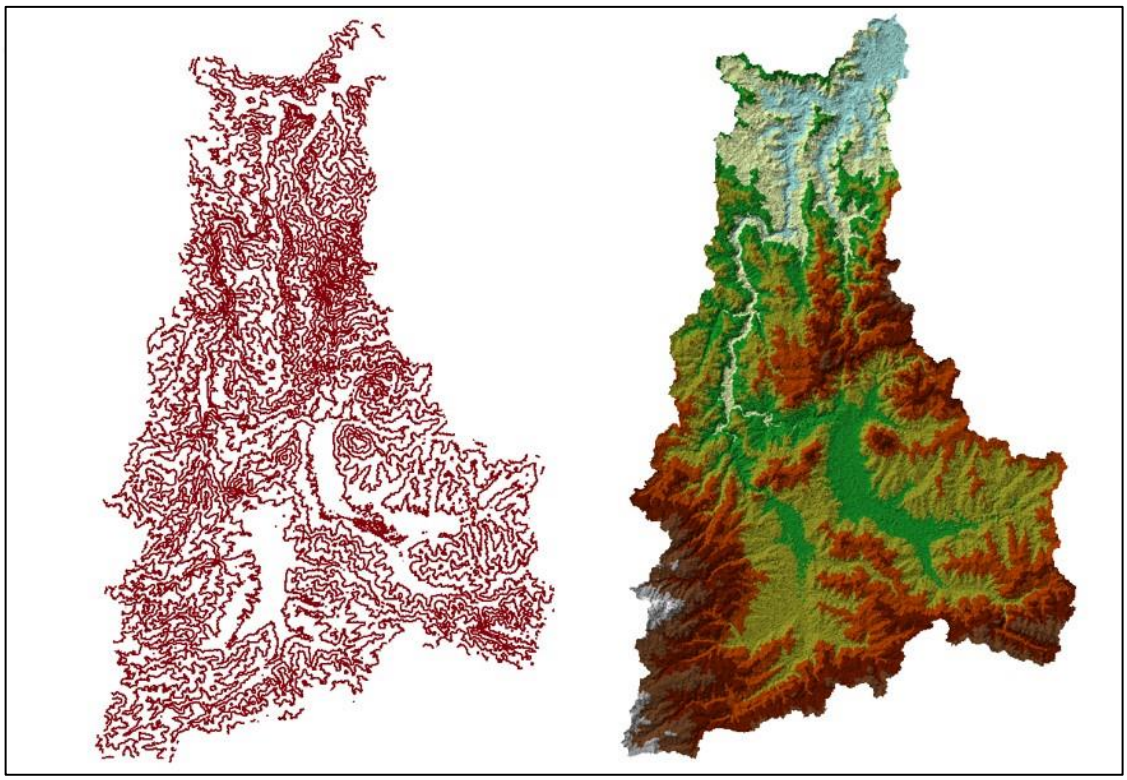
HEC-RAS'ta sediman modellemesinde başlangıç koşullar ve taşıma parametreleri için farklı taşınım fonksiyonu (örneğin, Laursen, Ackers-White, Engelund-Hansen veya Yang), sıralama (Sorting) yöntemi (örneğin, Thomas veya Copeland) ve Düşme hızı (Fall velocity) yöntemini kullanılmaktadır. HEC-RAS hidrolik ve sediman modellerinde girilmesi gereken veri dosya yapılarının kavramsal diyagramları **Şekil 3.20**'da gösterilmektedir.



Şekil 3.20: Kararlı olmayan hidrolik (sağ) ve Quasi-kararlı olmayan sediman taşınım (sol) modellerinin dosya yapısı (HEC-RAS Users Manual'den alınmıştır).

Hidrolik modelleme, HEC-GeoRAS (HEC, 2005) coğrafi verileri işlemek için özel olarak tasarlanmış CBS araçları setlerinde biri olarak kullanılmaktadır. HEC-GeoRAS, HEC-RAS CBS girdi dosyasını hazırlayarak nehir sistemi, istasyon tanımlayıcılarını içeren en kesik çizgiler, nehir kıyı istasyonları, sol ve sağ kıyıları, ana kanal, akıntı yönündeki nehrin uzunluğu ve kesitsel pürüzlülük katsayılarını bir geometrik veri dosyası olarak oluşturur ve elde edilen sonuçların RAS'tan görüntülenmesini sağlar. Bu dosyalar (geometrik veriler), veri kümelerinden (CBS Katmanları) ve Sayısal Arazi Modelinden (DTM) elde edilen verilerden oluşturulur. HEC-GeoRAS, üçgen biçimli düzensiz bir ağ (TIN) veya bir GRID (şebeke) ile temsil edilen bir DTM gerektirir. Katmanlar ve DTM, toplu olarak RAS katmanları olarak adlandırılır. HEC-RAS'ta hidrolik hesaplamalar yapılmadan önce, geometrik veriler girilmeli ve tamamlanmalı ve sonra akış verileri girilmelidir. Hidrolik hesaplamalar yapıldıktan sonra, elde edilen su yüzeyi ve HEC-RAS'dan gelen hız sonuçları ve diğer çıktı dosyaları, mekânsal analiz için HEC-GeoRAS kullanılarak CBS arayüzü çalışma alanına geri alınabilir. CBS verileri, özel formatlanmış bir CBS veri değişim dosyası (*.sdf) kullanılarak HEC-RAS ve ArcGIS arasında aktarılır. Girdi dosyasını oluşturmak için, nehir sisteminin mevcut bir sayısal arazi modeli, TIN veya GRID biçiminde olması gerekir. Örnek olarak Göksu havzasına ait eş yükselti eğrilerinden üretilen üçgen düzensiz ağ (Triangulated Irregular Network-TIN) verisi **Şekil 3.21**'te gösterilmektedir.

HEC-RAS için geometrik veriler geliştirmeye bir seri uygun nokta, çizgi ve poligon katmanları oluşturulur. Oluşturulan çizgi katmanları, burada RAS katmanları olarak adlandırılan akım merkez çizgisi, akım yolu merkez çizgileri, ana kanal kıyıları ve en kesit çizgileridir. HEC-RAS'a verileri girildikten sonra ve ek geometrik veriler elde etmek için ekstra RAS Katmanları oluşturulabilir / kullanılabilir. Bu katmanlar arasında arazi kullanımı (Manning'in n değerleri için), etkili olmayan akım alanları, köprüler/menfezler ve depolama alanları gibi katmanlardan oluşabilir. HEC-RAS simülasyonlarından elde edilen su yüzeyi profili verileri, HEC-GeoRAS tarafından CBS analizleri için işlenebilmektedir. HEC-GeoRAS'in işleme adımlarına genel bir bakışı ve sürecinin genel bir diyagramı **Şekil 3.22**'de gösterilmektedir.

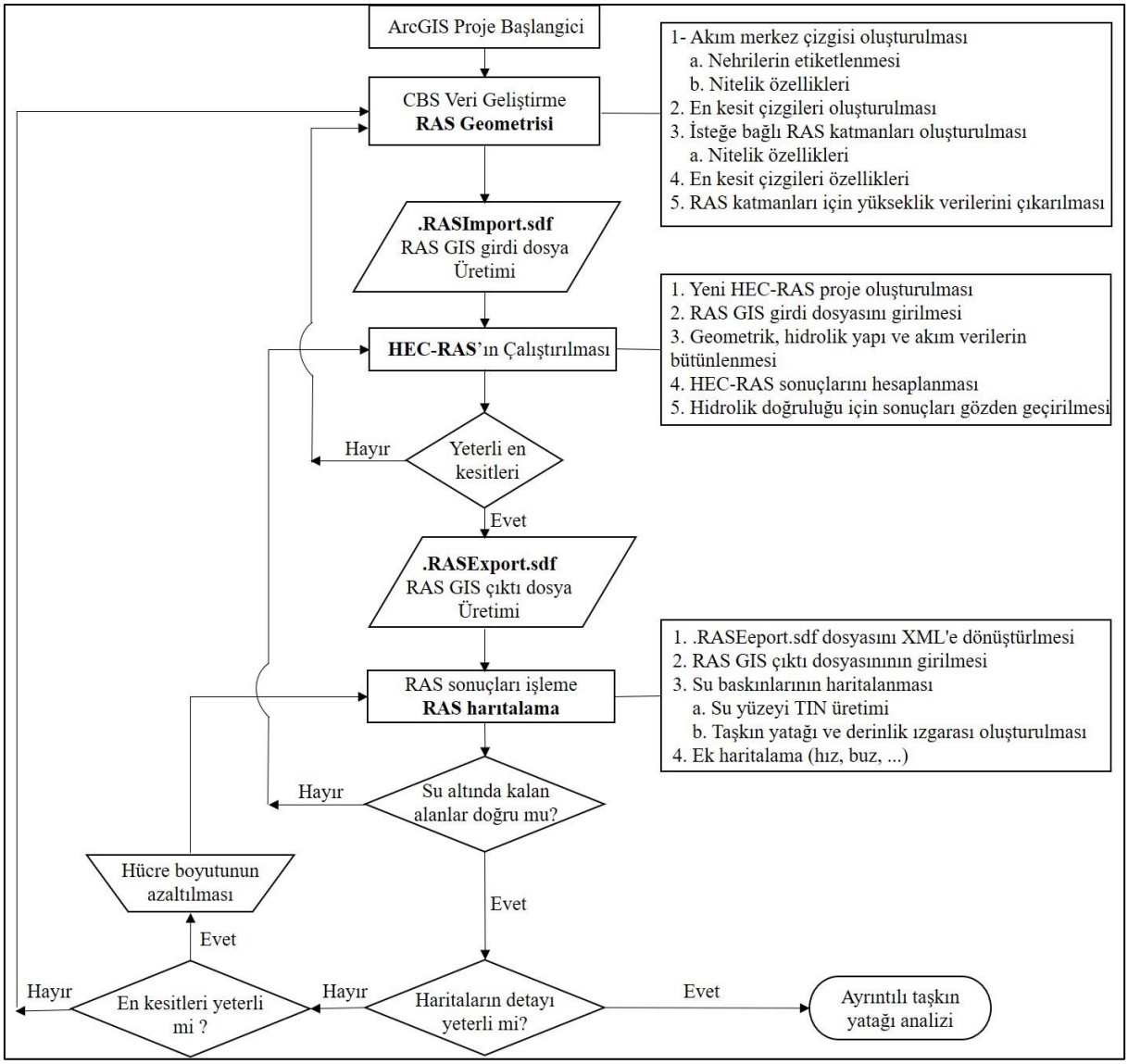


Şekil 3.21: Girdi dosyasını oluşturmak için üretilen üçgenlenmiş düzensiz ağ model (TIN). Sol; Göksu havzasına ait eş yükselti eğrileri, sağ; elde edilen TIN modeli.

HEC-GeoRAS'ta sayısallaştırılan hidrolik veriler HEC-RAS'ta enkesitlerde düzenleme işlemleri yapılmış ve Manning pürüzlülük katsayısı, nehir içinde 0,03, nehir kıyılarında ise 0,075 seçilerek modele girilmiştir (Sönmez ve Demir, 2016). Tüm geometrik veriler girildikten sonra, sürekli akım verilerinin girilmesi gerekir. Bunun için hesaplanacak profil sayısı, pik akım verileri (her nehri ve her profil için en az bir akım) ve gerekli sınır koşulları bilgilerin girilmesi gerekmektedir. Akış verileri, her akım için membadan mansaba doğru girilmelidir. En azından

nehir sistemindeki her akım için bir debi değeri girilmelidir. Bir nehirin membada bir akış değeri girildiğinde, içinde başka bir akış değeriyle karşılaşılana kadar akış sabit kalır.

HEC-RAS'ın güncel versiyonlarında HEC-GeoRAS'ta yapılan CBS ön işlemleri artık yeni eklenen RAS Mapper kısmında herhangi bir CBS yazılımı veya arayüzü kullanmaya gerek kalmadan yapılabilmektedir.



Şekil 3.22: HEC-GeoRAS'ın akış şeması (HEC-GeoRAS Users Manual'den alınmıştır).

Hidrolik model sonucundan taşkın derinliği, yayılımı ve hızı haritaları kullanılarak nehirlerde ve kıyılarda meydana gelen taşkın tehlike alanları iki senaryo için tespit edilmiştir. İlk senaryoda yangın ve ormansızlaşma olaylarından önceki (mevcut) duruma göre akım gözlem istasyonlarında ölçülen en yüksek pik debileri kullanılarak taşkın modeli yapılmıştır. Ardından

ikinci senaryo olarak yangın ve ormansızlaşma senaryoları sonucunda elde edilen en yüksek pik debiler sırasıyla Göksu ve Çanakdere havzaları için kullanılarak model çalıştırılmıştır.

3.5.2. Modelin Kurulması

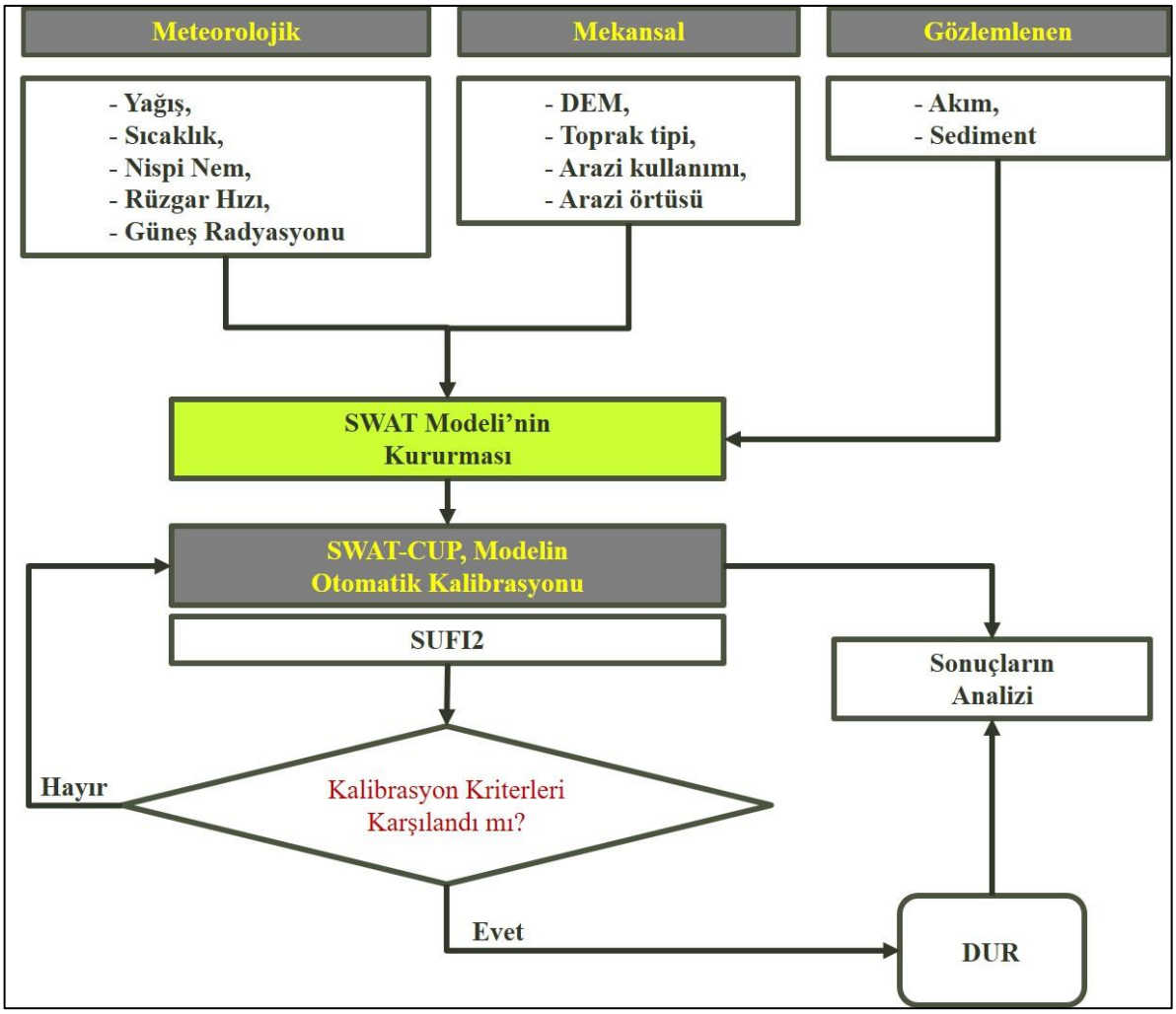
Fiziksel tabanlı bir hidrolojik model olarak SWAT, toprak, arazi kullanımı/örtü, topoğrafya, nehir ağları ve rezervuarlar gibi birincil akış-sediman verimi temel özelliklerinin mekânsal değişkenliğini temsil etmek için büyük miktarda girdi verisi gerektirir. Sonuçlarda parametre belirsizliği problemlerinden kaçınmak, veri ve hesaplama kaynaklarının mevcudiyetine bağlı olmak için model, sediman verimi ve erozyonun dağılım özelliklerini türetmek ve yüzeysel akışı ve sediman yönlendirme sürecinin hassas parametrelerini temel almak üzere kurulmuştur. DEM verisi, havzayı tanımlamak ve arazi yüzeyindeki drenaj modellerini analiz etmek ve eğim parametresini türetmek için kullanılmıştır. Akım ağının konumunu tanımlamak için akım ağı veri kümesi DEM üzerine bindirilir. Arazi kullanımı, bir havzadaki yüzey akışını, buharlaşma ve yüzey erozyonunu etkileyen en önemli faktörlerden biridir. SWAT tarafından önceden tanımlanmış arazi kullanım türleri dört harfli kodlar, SWAT veri tabanındaki parametrelere karşılık gelmek için arazi kullanımı / örtüsü haritası yeniden sınıflandırılmalıdır.

SWAT modeli, toprak tabakası, mevcut su içeriği, hidrolik iletkenlik, yığış yoğunluğu ve farklı toprak katmanları için organik karbon içeriği gibi farklı toprak dokusal ve fiziksel-kimyasal özellikler gerektirir. Vektör formatında toprak verisi durumunda SWAT modeli giriş parametreleri için bir grid formatına dönüştürülür. Havzanın hidrolojik koşullarını simüle etmek için SWAT modeli tarafından meteorolojik veriler gereklidir. Meteorolojik veriler yağış, maksimum ve minimum sıcaklık, rüzgâr hızı ve güneş radyasyon verileridir. Bu modelde arazi kullanımı, toprak ve eğim gridleri süperpoze yani üst üste bindirilmektedir. Çoklu HRU tanımlarında, her bir alt havzadaki küçük arazi kullanımlarını, toprakları veya eğim sınıflarını ortadan kaldırmak için bir eşik seviyesi kullanılır. Hidrolojik veriler, duyarlılık analizi, kalibrasyon ve modelin doğrulanması için gereklidir. Arazi kullanımları, eşik seviyesinden daha azını kapsayan toprak veya eğim sınıfları elimine edilmiş ve kalan arazi kullanımı, toprak veya eğim sınıfı alanı yeniden paylaştırılır, böylece alt havzalardaki arazi alanının %100'ü modellenmektedir.

SWAT için gereken iklim değişkenleri, günlük yağış, maksimum ve minimum hava sıcaklığı, güneş radyasyonu, rüzgâr hızı ve bağıntılı nemdir. Bu veriler uygun .dbase (veritabanı) formatında hazırlanmalı ve modele aktarılmalıdır. SWAT bir karmaşık model olarak ve birçok

parametrelerden dolayı manuel kalibrasyonu güçtür. Bu nedenle, simüle edilmiş ve ölçülen veriler arasında iyi bir uyum elde etmek için optimize edilmiş parametrelerin sayısını sınırlamak için duyarlılık analizi yapılmalıdır. SWAT modelinde hassasiyet analizi yapmak için yerleşik bir araç bulunur ve önerilen parametre değişiklikleri aralığı sağlar. SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures; Abbaspour ve diğ., 2000) aracı (SWAT Kalibrasyon ve Belirsizlik Prosedürleri), SWAT modelinin kalibrasyon, doğrulama ve duyarlılık analizini gerçekleştirmek için QSWAT (QGIS, 2021) ile arabirim oluşturan bir programdır. SWAT modelinin QGIS ortamında QSWAT kalibrasyon fonksiyonlarının sınırlarını karşılayacak şekilde kalibre edilmesi için daha fazla esneklik ve performans sağlamak üzere tasarlanmıştır. SWAT-CUP modelinin yürütülmesi, SWAT modeli tarafından üretilen çıktı dosyalarının QSWAT'de kullanılmasını içerir (Abbaspour ve diğ., 2007).

Model, çalışma alanının mevcut hidrolojik ve çevresel koşullarına uyarlanmıştır. Toprak tipi, arazi kullanımı/örtüsünü içeren fiziksel değişkenler, yağış, sıcaklık (maksimum-minimum), rüzgâr hızı, bağıl nem ve güneş radyasyonu dahil iklim değişkenleri ve türetilen veriler daha sonra SWAT'nin coğrafi bilgi sistemi platformuyla uyumlu hidrolojik işlemleri tanımlayan denklemlerdeki parametreleri belirlemek için kullanılmıştır (Neitsch ve diğ., 2011). Giriş ve yerleştirme işleminin ana adımları **Şekil** 3.23'te gösterilmektedir.



Şekil 3.23: SWAT modelinin giriş ve yerleştirme sürecinin ana adımlar.

3.5.3. Optimizasyon Algoritmaları

Hidrolojik simülasyonlardaki önemli belirsizlikler nedeniyle model belirsizliklerinin tanımı ve nicelleştirilmesi birçok çalışmanın konusu haline gelmiştir. Bu belirsizlikleri azaltmak için Genelleştirilmiş Olabilirlik Belirsizlik Tahmini (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation – GLUE: Beven ve Binley, 1992), Parametre Çözümü (Parameter Solution – ParaSol: Van Griensven ve Meixner, 2006), Ardışıklı Belirsizlik Kurma (Sequence Uncertainty Fitting - SUFI-2: Abbaspour ve diğ., 2007, 2004) ve Markov Zinciri Monte Carlo (Markov Chain Monte Carlo – MCMC: Kuczera ve Parent, 1998; Marshall ve diğ., 2004; Vrugt ve diğ., 2003; Yang ve diğ., 2007) uygulanmaktadır. Farklı optimizasyon algoritmaları farklı kalibre edilmiş parametre aralıklarında birleşir ve her biri parametre uzaylarında farklı konumlarda aşağı yukarı aynı deşarj sonuçlarıyla farklı bir çözüm bulur (Yang ve diğ., 2007). Bu çalışmada, su dengesi modellemesinde birçok parametrenin bulunması ve birleştirilmiş kalibrasyon-belirsizlik analizini uygulama kabiliyetine sahip olması nedeniyle SWAT modelini kalibre

etmek için SUFI-2 algoritması kullanılmıştır. Parametre belirsizliği, SUFI-2'de girdi yağış verilerinin belirsizliği, arazi kullanımı ve toprak türleri, parametreler ve gözlem verileri gibi tüm girdi ve çıktı kaynakları temel alınarak hesaplanır. Simülasyon belirsizliği %95 Tahmin Belirsizliği (95 PPU) ile ölçülür ve "p-faktörü" olarak adlandırılır. 95PPU, Latin hiperküp örnekleme yönteminden elde edilen çıktı değişkeninin kümülatif dağılım fonksiyonunun %2,5 (Lower95PPU) ve %97,5 (Upper95PPU) seviyelerinde hesaplanır ve çok kötü simülasyonların %5'ine izin verilmez. %95 olasılık bandının göreli genişliği, "r-faktörü" değeridir. 1'in p-faktörü ve 0'ın r-faktörü, tam olarak ölçülen verilere karşılık gelen simülasyonlardır (Arnold ve diğ., 2012). p-faktörü ve r-faktörü, Denklem 3.33'ü kullanılarak hesaplanır (Luo ve diğ., 2012).

$$r - factor = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(yt_{i,95\%}^{M} - yt_{i,2.5\%}^{M}\right)}{\delta_{obs}} \tag{3.33}$$

Burada $yt_{i,95\%}^{M}$ ve $yt_{i,2.5\%}^{M}$ sırasıyla 95PPU'nun üst ve alt sınırı ve δ_{obs}, gözlemlenen verilerin standart sapmasıdır.

3.5.4. Model Performans Değerlendirmesi

Model değerlendirmesi, modeli sınırlamak ve belirli bir süre boyunca arazi ve akarsu fazlarının daha sağlam karakterizasyonlarını elde etmek için gözlemlenen ve simüle edilen akış ve sediman yüklerinin bir karşılaştırmasıyla kalibrasyon ve doğrulamaya dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Süreç tabanlı yayılımlı hidrolojik modellerin kalibrasyonu ve doğrulanması, karmaşıklığı desteklemek için yüksek veri gereksinimleri, veri toplamadaki zorluk, gözlemlenen verilerin kıtlığı ve sınırlı kaynaklar nedeniyle genellikle zordur. Model performansını belirlemek için hedef fonksiyonları olarak hata istatistiklerine dayalı üç model değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, (1) determinasyon katsayısı (the coefficient of determination - R^2), (2) Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (Nash–Sutcliffe efficiency coefficient - NSE) ve (3) Sapma Yüzdesi (Percent bias - PBIAS) istatistiksel ve grafiksel model değerlendirme teknikleri kullanılmıştır (Moriasi ve diğ., 2007).

(1) Determinasyon katsayısı (R^2): standart bir regresyon olarak, simüle edilen ve ölçülen değerler arasındaki paralellik derecesini gösterir. R^2, 0 ile 1 arasında olup, gözlemlenen verilerdeki varyans oranını tanımlar. Değer ne kadar yüksek olursa, hata varyansı o kadar küçük olur.

(2) Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (NSE): ölçülen veri varyansına kıyasla gürültünün (artık veya uyuşmazlığın büyüklüğü) göreli kapsamını belirten normalleştirilmiş bir istatistikdir

(Nash ve Sutcliffe, 1970). NSE, grafikte çizilen gözlemlenen verilerle simüle edilen verilerin 1:1 çizgisine ne kadar yakın olduğunu gösterir. NSE aralığı -∞ ile 1 arasındadır, burada NSE = 1 mümkün olan en iyi değerdir. 0 ile 1 arasındaki değerler genellikle kabul edilebilir performans seviyeleri olarak kabul edilirken, ≤ 0 değerleri, ortalama gözlemlenen değerin benzetilmiş değerden daha iyi tahmin edilen bir değer olduğunu ve benzetilmiş değer kabul edilemez performansı gösterir.

(3) Sapma Yüzdesi (PBIAS): simüle edilen verilerin ölçülen verilerden daha büyük veya daha küçük olma ortalama eğilimini değerlendirir. Optimum PBIAS değeri 0'dır; Pozitif bir değer, modelin küçümsemeye eğilimli olduğunu ve negatif bir değer, modelin fazla tahmin etmeye eğilimli olduğunu gösterir (Gupta ve diğ., 1999). Bu nedenle, PBIAS'ın değeri ne kadar düşükse, model simülasyonu o kadar doğru olur. R^2, NSE ve PBIAS değerleri sırasıyla Denklemler (3.34-(3.36 ile belirlenir.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)\right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \tag{3.34}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \tag{3.35}$$

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_{m,i}} \tag{3.36}$$

Burada Q, bir değişkendir (örneğin akım), m ve s ölçülen veya simüle edileni temsil eder ve i, i'inci ölçülen veya simüle edilen veridir. Birden fazla değişken varsa, hedef fonksiyonları Denklem 3.37 ile Denklem 3.39 olarak tanımlanır.

$$g = \sum_j w_j \, R_j^2 \tag{3.37}$$

$$g = \sum_j w_j \, NS_j \tag{3.38}$$

$$g = \sum_j w_j \, PBIAS_j \tag{3.39}$$

Burada w_j, j'inci değişkenin ağırlığıdır.

3.5.5. Dağıtımlı Hidrolojik Modelleme Yaklaşımı Kullanarak Orman Yangınlarının ve Yangınlardan Sonra Yanmış Alanların Tarım Alanlarına Dönüştürülmesinin Yüzeysel Akışı ve Sediman Yükleri Üzerindeki Potansiyel Etkilerinin Tahmin Edilmesi

Hidrolojik modelleme iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama, 2005-2017 döneminde orman yangını olmayan mevcut arazi kullanımı ve meteorolojik verilere dayalı olarak modelin kalibre edildiği ve doğrulandığı temel senaryoya karşılık gelir. Temel senaryoda model parametreleri değişmemektedir. Çalışmanın ikinci aşamasında, yangınların akış ve sediman oranları üzerindeki etkisini analiz etmek için farklı orman yangını senaryoları (**Tablo 3.7**) gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.7: Bu çalışmada kullanılan senaryoların açıklaması. Ortalama yanmış ve ormansızlaşma alanı, toplam su havzası alanına (%) göredir.

Senaryolar	Orman Yamaları Durumu	Ara. Kul. Deg. [1] Or. Yan.[1]	Yan. ve Boz. Or. Alan. (ha)[2]	Ort. Yan. ve Boz. Top. Hav. Alan.[3] (%)
Mevcut	Arazi kullanımında değişiklik yok	-	-	-
1. Senaryo	Meralar + ağaçlık + karışık orman	25	2939,9	3,5
2. Senaryo	Karışık orman + geniş yapraklı orman	50	5879,8	7,4
3. Senaryo	Geniş yapraklı orman	100	11759,6	14,7

[1]Arazi Kullanım Değişimi (Orman Yangınları) (%). [2]Yanmış ve Bozulmuş Orman Alanı (ha). [3]Yanmış ve Bozulmuş Toplam Havza Alanına (%).

Bu senaryolarda, modelde kullanılmak üzere %25, %50 ve %100 yanmış orman alanlarına sahip homojen orman yamaları tanımlanmıştır. Bu adımda, orman yangınlarının etkilerini değerlendirmek için arazi kullanım türü ve CN (eğri numarası) değeri gibi bazı model girdileri değiştirilmiştir.

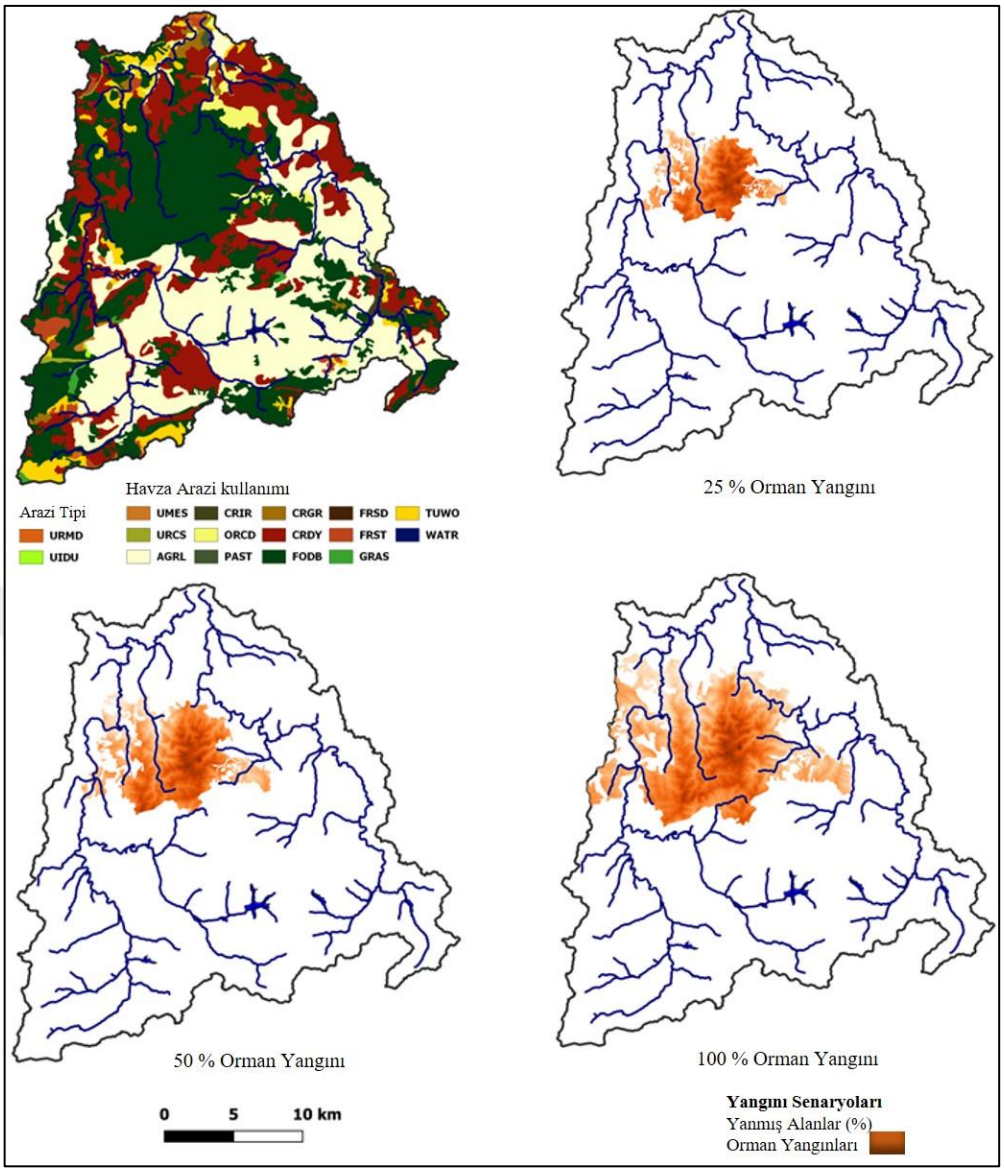
Bu çalışmada **Şekil 3.24 (a)**'da gösterildiği üzere, arazi kullanımı/örtüsü 16 kategoriye ayrılarak SWAT'ın arazi kullanımı sınıflandırma koduna dönüştürülmüştür. Kullanılan arazi kullanımı tablosu (lookup table) **Tablo 3.8**'de verilmiştir. Orman yamaları **Tablo 3.7**'de tanımlanan senaryolara göre tanımlanmış ve simüle edilmiş, bu da **Şekil** 3.24'de (b, c ve d) gösterildiği gibi Göksu ve Çanakdere havzasında simüle edilmiş yangınlardan etkilenen farklı mikro havzaların yanık konumları ve alanları ile sonuçlanmıştır. İncelenen senaryolara göre, ortaya çıkan yanmış alan 3000 ila 12000 hektara yaklaşıyor, bu da sırasıyla en küçük yanmış yamadan (yani, senaryo 1) en büyük yanmış yamaya (yani, senaryo 3) kadar uzanan modele karşılık geliyor. Etkilemiş olan orman yangınları tüm havza alanının ortalama %8,5'ini ve %15'ine denk gelmektedir.

Tablo 3.8: CORINE arazi örtüsü sınıfları sınıflandırmasına ve kapsama alanı ve havza alanının yüzdesi ile ilgili SWAT'ın arazi örtüsü kodları için dönüştürülmüş arazi örtüsü sınıflarına dayalı olarak çalışma alanı için arazi kullanımı/örtüsü dağılımı.

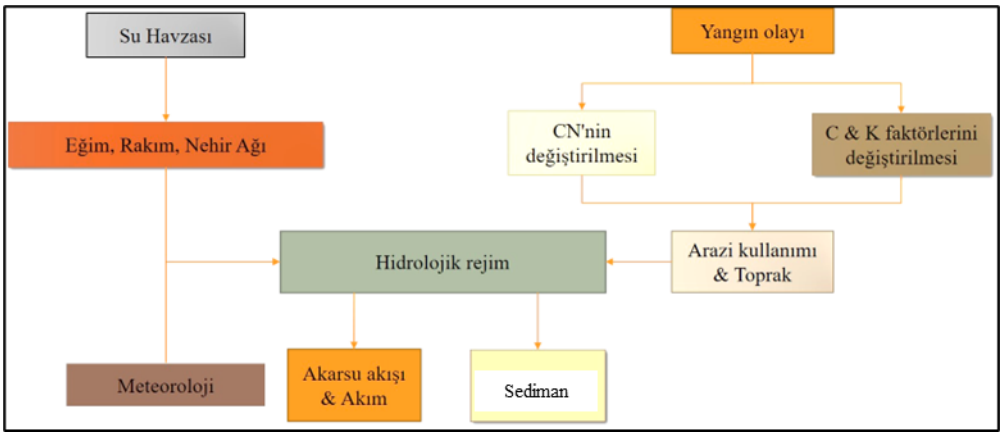
CORINE	SWAT	Arazi Kullanımı	Arazi	
ID	Kodu	Açıklama	(ha)	(%)
112	URMD	Kesintili kentsel doku	178,8	0,23
121	URMD	Endüstriyel üniteler	62,2	0,08
131	UMES	Maden siteleri	62,2	0,08
133	URCS	İnşaat siteleri	266,5	0,34
211	AGRL	Yağmurla beslenen ekilebilir arazi	26130,5	33,1
213	CRIR	Kalıcı sulanan arazi	477,7	0,60
222	ORCD	Meyve ağaçları ve meyve bahçeleri	1763	2,23
231	PAST	Meralar	69,5	0,09
242	CRGR	Karma tarım dokuları	961,1	1,22
243	CRDY	Tarım arazisi	16686	21,1
311	FODB	Yaprak döken orman	27975,6	35,4
312	FRSD	Yaprak dökmeyen orman	118,7	0,15
313	FRST	Karışık orman	1128,8	1,43
321	GRAS	Otlaklar	277,2	0,35
324	TUWO	Ağaçlık-çalı	2604,8	3,30
512	WATR	Su alanları	0,2	0,25

Orman yangınlarının akım ve sediman üzerindeki etkisini değerlendirmek için yangın sonrası senaryo analizi yapmak için arazi kullanım tipi, CN (eğri numarası) değeri ve toprak aşınabilirlik faktörü (K-faktörü) gibi bazı model girdileri değiştirilmiştir. Yangın senaryolarında uygulanan iş akış şeması **Şekil 3.25**'de gösterilmiştir.

CN yöntemi genellikle hidrolojide arazi kullanımına ve toprak tipine bağlı olarak aşırı yağıştan kaynaklanan yüzeysel akışı veya sızıntıyı tahmin etmek için kullanılır ve yangın sonrası gelişmiş hidrolojik tepkiyi ele almak için kullanılır (Rodrigues ve diğ., 2019). Benzer şekilde, K-faktörü, toprağın bir dış kuvvet veya enerji tarafından erozyona karşı hassasiyetini tahmin etmek için kullanılır (Renard ve diğ., 1997). Yanmış yamalar (SWAT kodundaki FODB arazi kullanım sınıfı, BARR yanmış alan sınıfı olarak değiştirilmiştir, **Tablo 3.8**) ve yanmış alan dağılımı ile örtüşen araziler için K-faktörü, 0,016 arttırılmıştır. Daha sonra K faktörü değeri için SWAT birimine dönüştürüldüğünde 0,1317'ye bölünmüştür (Fernández ve diğ., 2010). Havel ve diğ., (2018) tavsiyelerine göre, CN yanmış alanlar için 15 arttırılmıştır. Bu değişiklikler, yeni arazi kullanımı ve toprak sınıfları oluşturmak için SWAT veri tabanına tanıtılmalıdır. Son olarak, farklı orman yangını senaryolarına göre akış ve sediman miktarını değerlendirmek için model her senaryo için yeni girdiler ve parametrelerle yeniden çalıştırılmıştır.



Şekil 3.24: Arazi örtüsü haritası (CORINE, 2018) (a) ve Göksu ve Çanakdere su havzasında simüle edilmiş yangınlardan etkilenen alanların farklı mikro havzalardaki yerleri: (b) %25, (c) %50 ve (d) %100.



Şekil 3.25: Yangın senaryolarında uygulanan iş akış şeması.

Ormanların tarım ve tarımsal faaliyetler için bozulması, orman kaynaklı yaprak çöpü ve bitki köklerinin kaybı yoluyla toprak erozyon oranlarında önemli bir artışa yol açar. Yaprak çöpleri ve bitkilerin rolü, yapıların aşağıdaki toprağı rüzgar ve su erozyonuna engel olmak ve toprak yüzeyinde ve altında tutan bitki kökleri vasıtasıyla toprak parçacıklarını erozyondan korumaktır (Avwunudiogba ve Hudson, 2014; Pimentel ve diğ., 1995; Wenger ve diğ., 2018). Orman arazilerini kuru tarıma dönüştürerek orman bozulması ve ormansızlaşmanın neden olduğu toprak yeniden dağılımını etkileyerek yer değiştirmesine sebep olur. Ek olarak, bu faaliyetler tür kaybına ve ekosistem fonksiyonlarının bozulmasına neden olarak karasal ekosistemleri etkileyebilmektedir (Maxwell ve diğ., 2016; Rocha-Santos ve diğ., 2016). Bu nedenle, hidrolojik süreçlerdeki değişiklikler yoluyla, ormanların tarım için bozulması veya orman yangınlarından sonra yanmış orman alanlarını kuru tarım faaliyetlerine dönüştürülmesi, sediman miktarında bir artışla su kalitesini etkilemekle birlikte nehir ağzı ve mansap kısmındaki ortamlarında (örneğin balık veya sucul canlıların yaşadığı ortamları) önemli etkilerine neden olur (Iwata ve diğ., 2003; Jenkins ve diğ., 2007; Pattanayak ve Wendland, 2007).

Arazi kullanımı değişikliklerinin, örneğin ormansızlaşma ve tarım amaçlı ormanların bozulmasının yüzeysel akışı ve toprak erozyonu üzerindeki potansiyel etkilerini tahmin etmek, dağıtımlı hidrolojik modelleme yöntemlerinin geliştirilmesini yoluyla yapılabilmektedir. Akış ve erozyon-sedimantasyon üzerindeki ormansızlaşma etkilerinin kavranmasını geliştirmek ve ormanın bozulmasının olumsuz sonuçlarına karşı ilgili azaltma stratejilerini planlamak için, hidrolojik ve sayısal modellerin uygulama potansiyelinin kapsamlı bir şekilde araştırılması gerektiği önceki bölümlerde vurgulanmıştır. Tezin bu bölümünde, tarım için ormanların bozulmasının sediman yükü üzerindeki etkisini incelemek için yangın senaryolarına benzer şekilde SWAT hidrolojik modelini uygulama potansiyelini araştırılmıştır. Bu çalışmanın amacı, olası ormansızlaşmaların hidrolojik sonuçlarını ve bunların akarsu akışı üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve bunların sediman yükü üzerindeki etkilerini analiz etmek için akış ve erozyon modellerini kullanmaktır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında, arazi kullanımı değişikliklerinin, yani ormanların tarımsal faaliyetler için bozulmasının havza ölçeğinde yüzeysel akışı ve sediman verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla arazi kullanım değişikliği (ormansızlaşma) senaryoları tasarlanmıştır. Değişikliklere verilen hidrolojik tepkiyi tahmin etmek için meteorolojik ve havza karakteristik verilerini (arazi kullanımı, toprak ve topografya) kullanarak yağış-akış modelini uygulanmıştır. Model, gözlemlenen akış ve asılı sediman konsantrasyonu verileri kullanılarak kalibre edilmiştir. Dolayısıyla, yönetim

uygulamaları açısından, bu çalışmadaki bulgular Göksu ve Çanakdere nehirlerinin havzasındaki hidrolojik riskler ve çevre sorunlarının ele alınmasında kullanılabilir.

Bölgede tarım alanlarından sonra ormanlar en yaygın olan alanlarıdır. Havzanın çoğu tarımsal faaliyetlere ayrıldığından ve gıda kaynakları sağlamak için hızla artan tarım ürünlerine ihtiyaç duyulduğundan, çalışma alanında ormansızlaşma ve ormanların tarım arazisine dönüştürülmesi bir olasılıktır. Orman yangınları, ormanları yok etmenin ve ormanları tarım arazisine dönüştürmenin her zaman en yaygın yöntemi olmuştur. Karasal yönetimi tarımsal faaliyetlerin yönetiminde, erozyon, tarımsal kirleticiler ve su kalitesi kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır. Tarımsal amaçlı arazi kullanımındaki değişiklikler, havzanın hidrolojik tepkisini de etkilemektedir. Ormansızlaşmanın (yani farklı orman yangını senaryolarından sonra) havzada su verimi, erozyon ve sediman yükü üzerindeki etkisini incelemek için temel (ormansızlaşma öncesi) ve ormansızlaşma sonrası senaryolar belirlenmiştir. Bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama, temel senaryoya karşılık gelir. Model, 2005'ten 2017'ye değişmeyen mevcut arazi kullanımı ve meteorolojik verilere dayalı olarak kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. İlk senaryo için ilgili yağış olayı özellikleri ve model parametreleri değişmemiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, orman yangınları (orman yangını senaryoları) nedeniyle tahrip olan ve sulanmayan (kuru) ekilebilir alana dönüştürülen orman yamalarının, arazi kullanım değişikliğinin etkilerinin analiz edilmesi ve modelde kullanılmak üzere tanımlanması ve akış oranları ve sediman akışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Önerilen senaryolarda, modelde kullanılmak üzere %25, %50 ve %100 yanmış orman alanlarına sahip homojen orman yamaları tanımlanmıştır (**Tablo 3.7**). Bu adımda arazi kullanım haritası değiştirilir ve ormansızlaşma sonrası senaryolarda model girdisi olarak kullanılır.

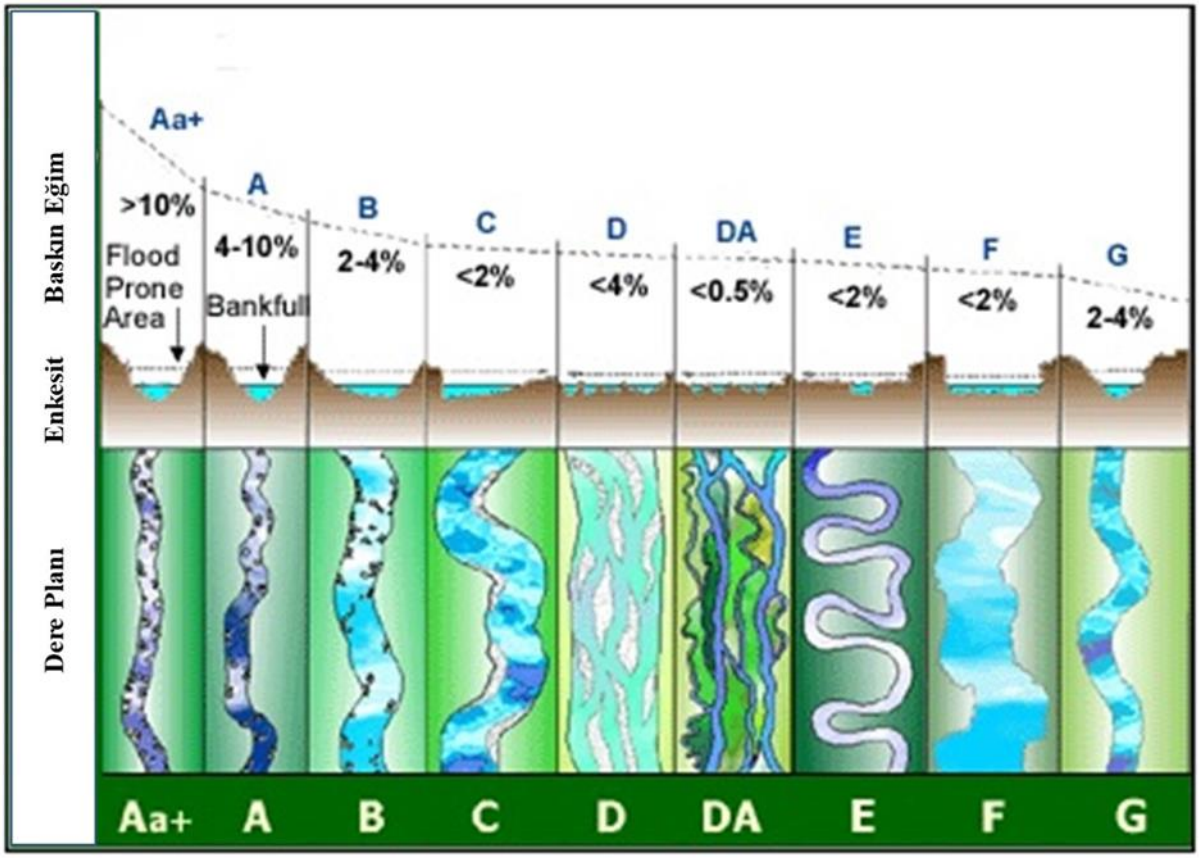
3.6. DERE JEOMORFOLOJİSİNİN SEDİMAN KONTROLÜ VE YÖNETİMİNDEKİ ÖNEMİ

Dere jeomorfolojisi, nehirlerin fiziksel şekilleri, su ve sediman taşıma süreçleri ve oluşturdukları yeryüzü şekilleri arasındaki etkileşimlerinin incelenmesi sediman kontrolü bakımından önemlidir. Nehir geometrisi zaman içinde değişme biçimleri, özellikle su akışının sediman (kir, kum, çakıl) hareketiyle ve devrilmiş ağaçlar ve dallar gibi döküntülerle nasıl etkileşime girdiği incelenmelidir. Nehir, suyun yanı sıra sediman ve döküntüleri taşır ve akarken, çevrelerindeki bölgelere kuvvet uygular veya malzeme bırakırlar. Bir nehirdeki su yol alırken yatağındaki ve kıyısındaki kayaları, kumları ve siltleri iter. Çoğu zaman bu çökeltilerin

bir kısmını yerinden oynatır ve onları kanala ve mansaba taşır. Su hızlı ve hacimli olduğunda, nehir aşınabilir ve çok fazla sediman ve daha büyük parçalar taşıyabilir. Bir nehir yavaşladığında veya sığlaştığında sediman çöker. Akış gücü ne kadar yüksek olursa, akışın hareket ettirebileceği malzeme boyutu o kadar büyük olur. Akış gücü, bir akıştan (deşarj) akan su miktarı ve bu suyun aktığı hız ile belirlenir. Genellikle dik kanallar, büyük malzemeleri aşındıran güçlü akışlar içerir. Düşük eğimli kanallar, ince malzemeleri biriktiren düşük güçlü akışlara sahiptir.

Dolayısıyla, arazi kullanımı/örtüsündeki değişimden (orman yangınları veya ormansızlaşma) kaynaklı sedimanın kontrolü ve yönetimi dışında dere ve nehire taşınan ve akarsularda hareket eden sedimanın de mansapta yaratacağı negatif etkileri önlemek için kontrol ve yönetilmesi önemlidir. Bu yüzden arazilerindeki değişim olan havzaların dere jeomorfolojisini dikkate alarak sediman kontrolü tedbirleri ve yönetim metotları uygulanmalıdır. **Şekil 3.26** yeryüzü şekli ve dere morfolojisinden kaynaklanan akarsu özelliklerine dayanan nehir sınıflarının diyagramını (Rosgen, 1996) göstermektedir. Bu diyagram, dere (akarsu yolları) sınıflandırmasındaki dokuz ana akarsu türünün her birinin boyuna (yandan görüldüğü gibi), enine kesit (kıyıdan kıyıya) ve plan (yukarıdan görüldüğü gibi) görünümlerini karşılaştırır.

Dere türü "Aa+" çok dik (>%10), yataksız, düşük genişlik/derinlik oranına sahip ve tamamen sınırlı (kıyı olarak sınırlı). Yatak biçimleri tipik olarak oluklar, moloz akışları ve şelaleler içeren bir basamak/havuz morfolojisidir. "Aa+" akarsu türleri genellikle enkaz çığ arazilerinde, buzul oluşumları ve dış akıntı terasları gibi derin çökelme bölgelerinde veya yapısal olarak kontrol edilen veya faylardan, eklemlerden veya diğer yapısal temas bölgelerinden etkilenen yer şekillerinde ortaya çıkar. "Aa+", doğası gereği dik kanal eğimleri ve dar/derin kanal kesitleri nedeniyle genellikle yüksek enerji/yüksek sediman besleme sistemleri olarak tanımlanabilir.



Şekil 3.26: Dere tipleri sınıflandırılmasının boyuna ve enine kesiti ve planı (Rosgen, 1996; www.cfpub.epa.gov, Erişim tarihi: 09 Aralık 2021).

Dere tipi "A", ilişkili yer şekilleri ve kanal özellikleri açısından "Aa+"ya benzer. Bunun istisnası, kanal eğimlerinin yüzde 4 ila 10 arasında değişmesi ve tam dolu aşamadaki akış akışlarının tipik olarak, eşlik eden dalma veya oyulma havuzları ile basamak/havuzlar olarak tanımlanmasıdır. Normalde, "A" akarsu türleri, doğal kanal diklikleri nedeniyle yüksek bir sediman taşıma potansiyeli ve nispeten düşük bir kanal içi sediman depolama kapasitesi sergileyen vadi türleri içinde bulunur. Büyük organik enkaz akışı, "A" dere türlerinin yatak biçimini ve genel kanal stabilitesini belirlemede önemli bir rol oynayabilir. "C" dere türleri, alüvyon çökeliminden oluşan dar ve geniş vadilerde bulunur.

"C" tipi kanallar iyi gelişmiş bir taşkın yatağına sahiptir, %2 veya daha az kanal eğimi ile nispeten kıvrımlıdır ve bir oluk/havuz konfigürasyonunu gösteren bir yatak biçimi morfolojisine sahiptir. Özellikle aktif olan "C" dere tiplerinde, kanal yükselme/çukurlanma ve yanal genişleme süreçleri, doğal olarak akarsu kıyılarının doğal stabilitesini, mevcut memba havzası koşullarına ve akıntı ve sediman rejimine bağlıdır.

"D" dere tipi, çok yüksek bir kanal genişliği/derinlik oranına sahip örgülü veya çubuk örgülü bir model sergileyen ve genellikle ilgili vadi eğimi ile aynı olan bir kanal eğimi sergileyen çok kanallı bir sistem olarak benzersiz bir şekilde yapılandırılır. "D" tipi akarsu kanalları, dik çökelme yelpazeleri, dik buzul vadileri, buzul taşkın vadileri, geniş alüvyonlu dağ vadileri ve deltalardan oluşan yer şekillerinde ve ilgili vadi tiplerinde bulunur. Çok geniş ve sığ "D" akarsu tipleri derin kazılmasa da yanal olarak daha dar veya sınırlı vadilerde tutulabilirler. Banka erozyon oranları karakteristik olarak yüksektir ve menderes genişliği oranları çok düşüktür. Sediman oranı genellikle sınırsızdır ve yatak özellikleri, yerel yatak oyulması ve sediman birikiminin bir yakınsama/uzaklaşma sürecinin sonucudur. Çoklu kanal özellikleri, akış olayları sırasında sık sık pozisyon değiştiren çeşitli çubuk türleri ve bitkisiz adalar dizisi olarak görüntülenir.

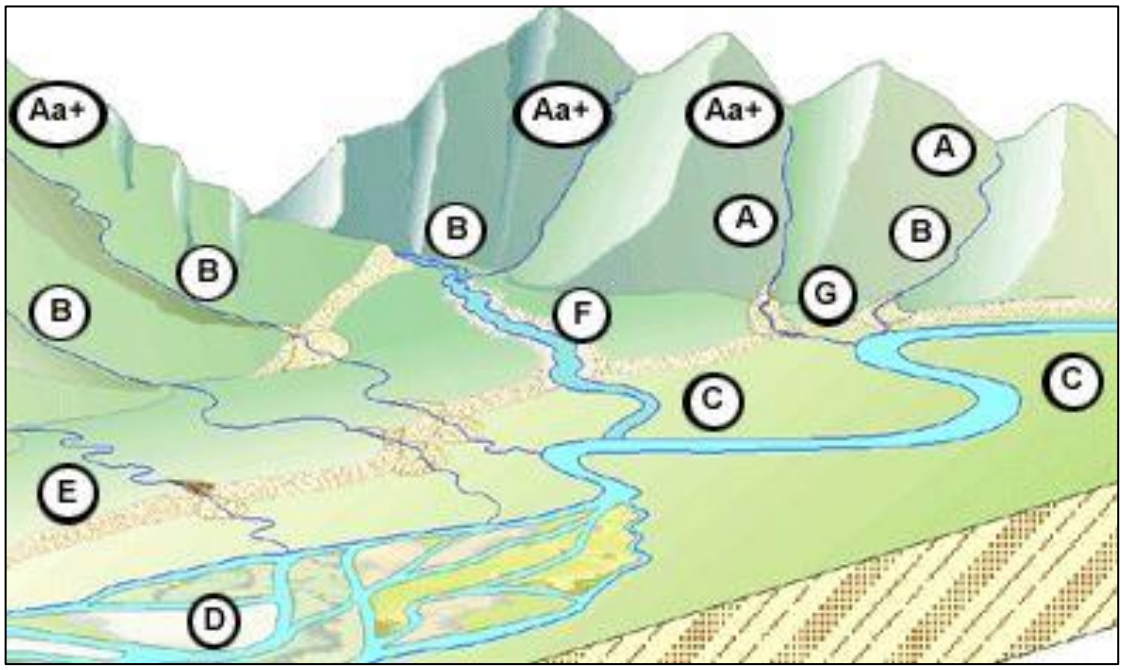
"DA" dere tipi, çok düşük akış gradyanına sahip çok kanallı bir dere sistemidir ve her bir bireysel kanalın banka tam genişliği oldukça değişken olarak belirtilmiştir. Akarsu bankaları genellikle yoğun köklü bitki türlerini destekleyen ince taneli yapışkan banka malzemeleriyle inşa edilir ve son derece kararlıdır. Kanal eğimleri çok yumuşaktır ve genellikle .0001'de veya daha az bulunur. Bu çok kararlı akarsu dere türleri için yatak yükünün toplam sediman yüküne oranı çok düşüktür.

"E" tipi akarsu dereleri, kavramsal olarak akarsu süreci ve morfolojisi açısından evrimsel olarak belirlenmiştir. "E" akış tipi, doğal bir dinamik sistem evrimi dizisinden geçen belirli alüvyon akışları için kanal stabilitesinin ve akarsu proses verimliliğinin gelişimsel "son noktasını" temsil eder. "E" dere türleri, taşkın yatağı ve düşük kanal genişlik/derinlik özelliklerinin korunması koşuluyla oldukça kararlı sistemler olarak kabul edilirken, bozulmaya karşı çok hassastırlar ve nispeten kısa zaman dilimlerinde hızla ayarlanabilir ve diğer akarsu türlerine dönüştürülebilirler.

"F" akarsu türleri, erken dönem jeomorfologları tarafından tanımlanan klasik "değişmez, kıvrımlı" kanallardır. Genellikle, sürekli olarak genişliğini artıran bir kanalın ve vadi sınırları içinde işlevsel bir taşkın yatağının yeniden kurulması için çalıştığı gözlemlenir. "F" akıntı kanalları, çok yüksek sediman oranı ve depolama kapasiteleri sağlarken, çok yüksek kıyı erozyon ve yanal genişleme oranlarına da sahipler.

"G" veya "oluk" dere türü, sabit, dar ve derin, düşük ila orta derecede kıvrımlı basamak/havuz kanalıdır. "G" kanalları daha hafif eğimlerle ilişkilendirilebilmede, kanal eğimleri genellikle

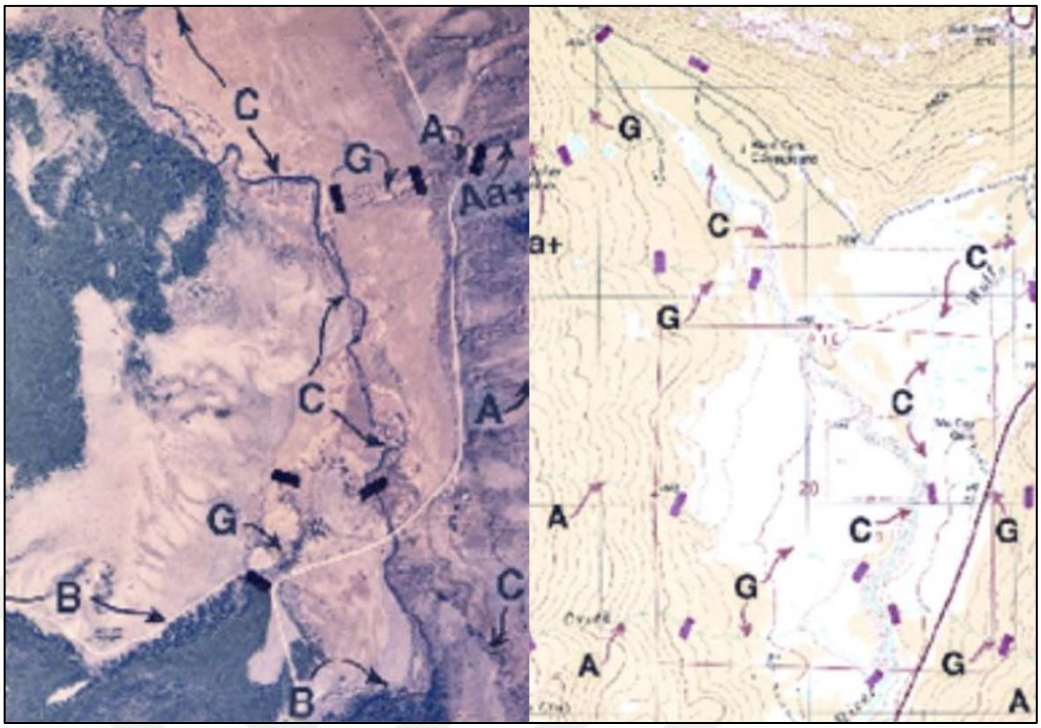
0.02'den daha diktir. "G" tipi kanallar, alüvyon yelpazeleri, enkaz konileri, çayırlar veya eski kalıntı kanalları içindeki kanalları içerecek şekilde çeşitli arazi tiplerinde bulunur. Kaya malzemesi içeren kanallar dışında, "G" dere türleri çok yüksek banka erozyon ve yüksek sedimantasyon oranlarına sahiptir. Orta ila dik kanal eğimleri, düşük kanal genişlik/derinlik oranları ve yüksek sediman kaynağı sergileyen "G" akarsu tipi, yüksek yatak yükü ve asılı sediman taşıma oranları üretir. **Şekil 3.27**, yukarıda bahsedilen ve doğanın farklı bölgelerinde farklı dere tiplerini göstermektedir.



Şekil 3.27: Doğanın farklı bölgelerinde farklı dere türleri, (Rosgen, 1996; www.cfpub.epa.gov, Erişim tarihi: 12 Aralık 2021).

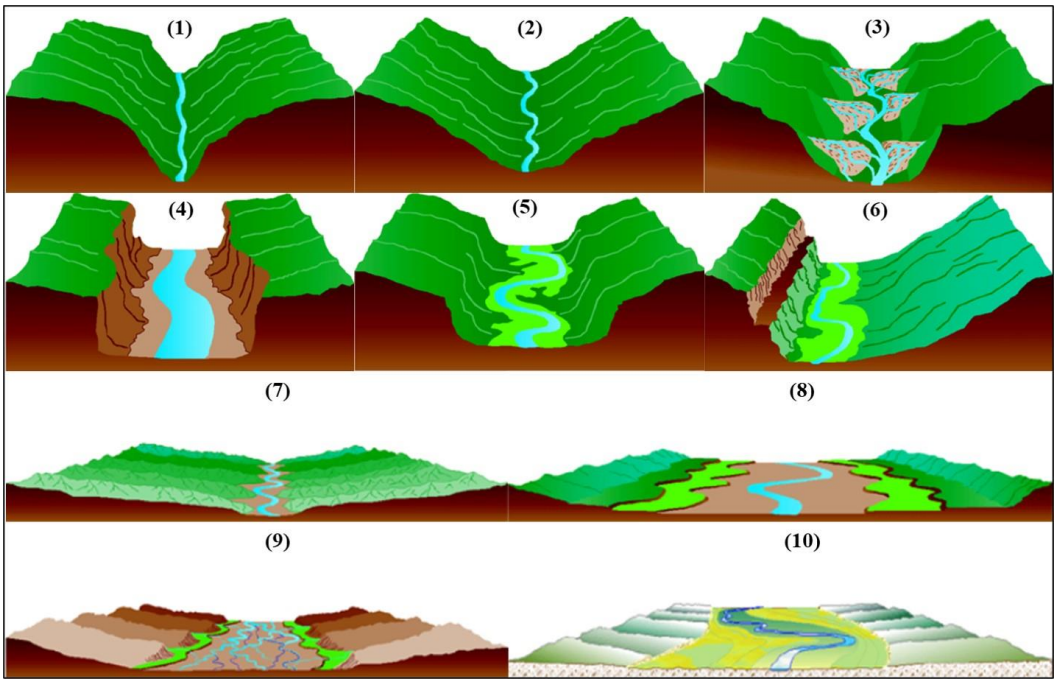
Uygun çalışma yöntemleri ile, dere sınıflandırması, topoğrafik haritalar ve hava fotoğrafları gibi yaygın bilgi kaynakları üzerinde tanımlanabilir (**Şekil 3.28**).

Vadi türlerinin ve ilgili yer şekillerinin belirlenmesi, nehir morfolojisinin ilk göstergesi için temel sağlayabilir. Örneğin, nehir kırıntıları ve yüksek oranda parçalanmış akarsu yamaçları, dik, dar, derin oyulmuş, erozyona uğramış A ve G dere tiplerinin göstergesidir. Düşük yükselti kabartması sergileyen yer şekilleri içindeki dar, sınırlı kanyonlar ve derin geçitler, karakteristik olarak "F" akış tiplerini içerir. İyi gelişmiş taşkın yataklarına sahip geniş alüvyon vadileri genellikle "C" ve "E" dere türlerinin varlığına işaret eder. Yumuşak arazi özellikleri, dar vadiler ve kolüvyal eğimlerden oluşan kriyoplanlı yaylalar, normal olarak hem orta genişlik/derinlik oranı hem de hendek bakımından nispeten kararlı "B" dere türleri sergiler.



Şekil 3.28: Hava fotoğrafı (solda) veya topoğrafik harita (sağda) üzerinde dere tipi belirlenmesi (www.cfpub.epa.gov, Erişim tarihi: 12 Aralık 2021).

Bitkili, hafif eğimli göl çayırları tipik olarak kıvrımlı "E" ve "C" akıntı tiplerini içerir ve buzul taşkın vadileri veya ovaları genellikle iyi gelişmiş, örgülü veya "D" akıntı tipleri sergiler. **Şekil 3.29** çeşitli 10 vadi tipini göstermektedir.



Şekil 3.29: Vadilerin grafiksel şemaları (www.cfpub.epa.gov, Erişim tarihi: 18 Aralık 2021).

Tip 1 vadi V şeklindedir, sınırlandırılmıştır ve genellikle yapısal olarak kontrol edilir ve/veya faylarla ilişkilidir. Yükseklik kabartması yüksektir, vadi tabanı eğimleri %2'den fazladır ve yer şekilleri dik, buzulla aşınmış araziler ve/veya yüksek oranda parçalanmış akarsu yamaçları olabilir. Vadi malzemeleri, ana kayadan, kolüvyum, heyelan enkazı, buzul sedimanler ve diğer benzer çökelme malzemeleri olarak oluşan kalıntı topraklara kadar değişir. Vadi Tip 1'de yaygın olarak gözlenen akarsu tipleri, tipik olarak kademeli yatak özellikleri sergileyen daha dik kanal eğimlerine sahip basamak/havuz kanalları olan "A" ve "G" tiplerini içerir. Akarsu kanalı erozyon süreçleri, çok düşük ve kararlı ile yüksek oranda aşınabilir arasında değişir ve enkaz taşkınları veya çığlar üretir. Bazı hidrofizyografik bölgelerdeki "A" akarsu türleri genellikle kar çığlarının başlangıç veya iletim bölgeleridir.

Vadi tipi 2, orta düzeyde rölyef, nispeten sabit, orta derecede yan eğim eğimleri ve ana materyalden (artık topraklar), alüvyondan ve kolüvyondan gelişen topraklarla genellikle %4'ten az olan vadi tabanı eğimleri sergiler. Vadi tip 2'de en yaygın olarak bulunan akarsu tipi, düşük sediman oranı ve normalde hızlı olarak tanımlanan yatak özellikleri ile genellikle kararlı akarsu türleri olan "B" türleridir. Daha az yaygın olan, genellikle dengesiz koşullar altında gözlenen "G" akış türleridir.

Vadi tipi 3, esas olarak, karakteristik döküntü-kolüvyal konileri veya alüvyon yelpazesi yer şekilleri ve orta derecede dik veya %2'den fazla vadi tabanı eğimleri ile doğada çökelmedir. Vadi tip 3'te normal olarak meydana gelen dere (akarsu) türleri "A", "B", "G" ve "D" türleridir. Alüvyal veya kolüvyal yelpazelerde daha az yaygın olan "B" akıntı tipi, öncelikle nehir kenarı bitki örtüsünün drenaj yolu boyunca iyi kurulduğu yerlerde meydana gelir. "D" akış tipinin çoklu dağıtım kanallarına benzer şekilde, aktif olarak yüksek yatak yükü taşımacılığının mevcudiyetinde çok az yerleşik nehir kenarı bitki örtüsünün olduğu yerlerde "G" akışı türü hakimdir.

Vadi tipi 4, genellikle %2'den daha az olan vadi tabanı eğimleri ve hafif yükselti kabartmalı kanyonlar ve geçitler olarak doğrudan gözlemlenen klasik kıvrımlı, yerleşik veya derin oyulmuş ve sınırlı yer şekillerinden oluşur. Vadi tipi 4, genellikle yapısal olarak kontrol edilir ve çok aşınmış malzemelerde kesilir. Bu akarsu türleri genellikle tektonik olarak "yükselen" vadilerle de ilişkilendirilir. "F" akarsu tipi en çok vadi tipi 4'te bulunur, ancak vadi tabanının genişliğinin hem kanalı hem de taşkın yatağını barındırdığı yerlerde, "C" kanalları sıklıkla

gözlenir. Akarsu kenarı malzemelerine bağlı olarak, sediman kaynağı genellikle orta ila yüksek arasındadır.

Vadi tipi 5, geniş, "U" şeklinde ve vadi tabanı eğimlerinin genellikle yüzde 4'ten az olduğu bir buzul temizleme işleminin ürünüdür. Topraklar, holosen döneminden günümüze kadar moren (buzultaş) veya daha yeni alüvyon olarak biriken malzemelerden elde edilir. Yer şekilleri yerel olarak yanal ve uç morenleri, alüvyal terasları ve taşkın yataklarını içerir. Buzul-akarsu birikintileri gibi derin, kaba buzul birikimi, yapısal olarak kontrol edilen erişimlerin üzerinde buzul-göl birikiminin daha ince boyutlu karışımı ile yaygındır. Vadi tipi 5'te en sık görülen akış türleri "C", "D" ve "G" dir.

Fay hattı vadisi olarak adlandırılan vadi tip 6, yapısal olarak faylarla kontrol edilir ve kolüvyal eğim oluşturma süreçleri tarafından yönetilir. Vadi tabanındaki eğimler orta düzeydedir, genellikle yüzde 4'ten azdır. Bazı alüvyonlar, geniş kolüvyal çökellerin ortasında oluşur ve akarsu desenleri, sınırlı, yanal olarak vadi tarafından kontrol edilir. Sediman oranı düşüktür. Akarsu türleri ağırlıklı olarak "B" türleridir ve daha geniş ve düz vadi erişimlerinde daha az "C" ve "F" türleri vardır. Dengesizlik koşulları altında, "G" akış türleri gözlenir.

Vadi tipi 7, oldukça parçalanmış akarsu eğimleri, yüksek drenaj yoğunluğu ve çok yüksek bir sediman kaynağı ile dik ila orta derecede dik bir arazi biçiminden oluşur. Akarsular karakteristik olarak ya kolüvyonda ve alüvyonda ya da artık topraklarda derin oyulmuştur. Kalıntı topraklar genellikle sedimantasyona düşkün olan kayaçlardan elde edilir. Bu yüksek oranda parçalara ayrılmış şevlerle ilişkili çökelme toprakları, genellikle eolyen kum ve/veya deniz çökeltileri olabilir. Vadi tip 7'de bulunan akarsu türlerinin çoğu, orta ila dik eğimlere sahip kanallar olan "A" ve "G" türleridir, aktif yanal ve dikey yığılma süreçleri nedeniyle yerleşik (derin kesik), sınırlı ve kararlı olmayandır.

Vadi tipi 8, geniş vadiler boyunca yanal olarak konumlanmış birden fazla nehir teraslarının mevcudiyeti ile en kolay şekilde, yumuşak, vadi aşağı yükseklik kabartmasıyla tanımlanır. Alüvyal teraslar ve taşkın yatakları, yüksek sediman kaynağı üreten baskın çökelme yer şekilleridir. Bu vadilerde buzul terasları da oluşabilir, ancak mevcut nehrin üzerinde alüvyal (Holosen) teraslardan çok daha yüksekte bulunur. Topraklar, ağırlıklı olarak birleşik nehir ve göl çökelme süreçlerinden kaynaklanan alüvyon üzerinde gelişir. Bir oluk/havuz yatağı biçimi geliştiren hafifçe yerleşik, kıvrımlı kanallara sahip olan "C" veya "E" akış türleri, normal olarak

tip 6 vadisinde görülür. Ancak yerel akarsu ve nehir kıyısı koşullarına bağlı olarak "D", "F" ve "G" akarsu türleri de bulunabilir.

Vadi tipi 9, geniş, orta ila hafif eğimlerde, toprakların buzul, alüvyon ve/veya deniz birikintilerinden türediği buzul taşkın düzlükleri ve/veya kumullar olarak gözlenir. Gelişmiş yer şekillerinin çökelme doğası nedeniyle, sediman oranı yüksektir ve yaygın olarak meydana gelen "C" ve "D" akıntı türleri, yüksek yanal göç oranlarıyla ilişkilidir.

Vadi tipi 10 çok geniş ve hafif eğimlidir, çok hafif yükseklik kabartması olan geniş taşkın ovaları ile ilişkilidir ve çoğunlukla hem nehir hem de göl çökelme süreçlerinden kaynaklanan alüvyon malzemeleriyle inşa edilmiştir. Topraklar öncelikle alüvyondur ve daha az yaygın olmakla birlikte, eolian birikiminden de türetilebilir. Vadi tipi 10 olarak yaygın olarak gözlemlenen yer şekilleri, turba bataklıkları ve geniş sulak alanlar sergileyebilen kıyı ovaları, geniş göl ve/veya alüvyon düzlükleridir. Akış türleri "C", "E" ve "DA" en yaygın olarak gözlemlenenlerdir, ancak birçok durumda akışların "kanallaştırıldığı" veya yerel taban seviyesinin değiştirildiği "G" ve "F" akışları türleri bulunur.

Bu nedenle, dere ve akarsu yollarında sediman kontrolü ve sürdürülebilir yönetimi için derelerin geometri ve jeomorfolojisi hakkında gereken bilgiler edinmelidir. Bu da yukarıda bahsedildiği gibi bölgedeki dere tipi ve sınıflarını doğru şekilde analiz ve kategorize edilmesinden elde edilebilmesi mümkündür.

3.7. ORMAN YANGIN ÖNCESİ VE SONRASI EROZYON VE SEDİMAN KONTROLÜ VE YÖNETİMİ

Ülkedeki orman yangınlarının çoğu, enkaz, kundakçılık, kamp ateşleri, atılan odun külleri ve ekipmanın uygunsuz şekilde yakılmasından kaynaklanan insan kaynaklıdır. Orman yangınlarının önüne geçmek için herhangi bir tedbirin uygulanmasından önce orman alanlarında özellikle orman yangını mevsiminde belli bir yöntemlerle vatandaşları uyarmak ve bilinçlerini artırmasıyla başlamaktadır. Bunun için ilgili kurumlar tarafından özellikle ormanlardaki kamp alanlarında yangın uyarı tabloların kurulması, sigara içilmesi yasak bölgelerin belirlenmesi, eğitim amaçlı yangın riskleri ve etkilerini tanıtmak için eğitim broşürlerinin orman bölgesine yakın yaşayan vatandaşlar veya seyahat eden turistler arasında dağıtılması, kamp alanlarının çevresinde yangına karşı güvenli bölge oluşturun, yangına yetenekli olan orman bölgelerinde yanıcı bitki örtüsünü ve döküntüleri temizlenmesi, koru ve

yakacak odunları yangın olma ihtimali olan bölgesinde saklanmaması gibi çeşitli işlemler uygulanmalıdır.

Ayrıca aşırı yangın tehlikesinin erken uyarı sistemin kullanılması yangın yöneticilerinin orman yangını felaketlerini azaltması veya önlemesi için kritik öneme sahiptir. Yangın tehlikesi ve erken uyarı sistemleri, yangın yönetimi gereksinimlerine bağlı olarak küresel ve yerel düzeylerde çalışabilir. Erken uyarı, uzaktan algılama yangın etkinliği ile güçlendirilen ve erken yangın alarm sistemlerinde bilgi sağlayan tahmini yangın havası kullanılarak sağlanır. Son 24 saatte kutup yörüngeli uydular tarafından tespit edilen aktif yangın konumlarının tahmin haritaları üzerine yerleştirilmesine olanak sağlar. Bu, yangın yöneticilerinin ve karar vericilerin, orman yangınlarının veya arazi kullanımı yangınlarının halihazırda yanmakta olduğu yerlerde yangın havası gelişimini değerlendirmelerini sağlar (www.un-spider.org, Erişim tarihi: 15 Aralık 2021).

Orman yangınlarından kaçınmak çeşitli yollarla sağlanabilir, ancak sonuçta farklı önlemlerin bir kombinasyonu en iyi korumayı sunar. Yukarıda verilen önerilere eke olarak orman yangınlarını önlemek için teknik önlemlerde kritik önem arz etmektedir. Su çıkarma noktaları, yangın söndürme rezervuarları, iyi yol altyapısı, makine, ekipman ve iletişim aracı, hava ve uydu gözlemleri, işleyen bir izleme sistemi ve deneyimli bir yangınla mücadele ekibi yangınları önlemek veya yangınların dağılımını sınırlamasında başarının anahtarıdır.

Orman yangın sorası yangın etkilerini azaltmak tedbirleri ise ormanların konumu, topoğrafyası, jeolojisi, orman ağaç tipleri ve çeşitleri, bölgenin iklimi, su havzasındaki ormanlarla ana akarsular arasındaki bağlantı ve ilişkileri vs. parametrelere göre değişik yangın sonrası önlemler uygulanmaktadır. Ayrıca orman yangınların yaratacağı çevresel problemleri türüne göre (örneğin su kalitesi, rüzgarlarda küllerin ve toprağın bölgedeki yaratacağı sorunlar vs.) de yangın sonrası yönetim stratejileri ve planlamaları değişmektedir. Dolayısıyla, bu tez kapsamında çalışmanın yukarıda bahsedilen amacı doğrultusunda yönetim planları ve stratejileri açısında orman yangınların yüzeysel akış ve sediman yükü üzerindeki etkileri dikkate alınıp incelenmiştir.

Herhangi bir büyüklükteki bir orman yangınından sonra, takip eden haftalarda, aylarda ve yıllarda erozyon kontrolünün azaltılması düşünülmelidir. Orman yangınlarının çevreledikleri arazilerde yarattığı etkileri azaltmak gereklidir. Yüksek yoğunluklu bir orman yangınının ardından, erozyon oranı artabilir ve harap olan alt yapı nedeniyle yıllarca dengesiz kalabilir. Bir

yangından sonraki ilk büyük fırtına, odun külü veya yüzeyde yanmış malzemelerin külü, devrilmiş ağaçlar, dallar ve daha ağır maddelerle birlikte yakındaki su yollarına itecek bir enkaz akışına neden olacaktır. Bu, bir orman yangını sonrasında havzanın hidrolojisindeki değişikliğin bir sonucu olarak gerçekleşir; yüksek yoğunluklu yangınlar, üst toprakların hidrofobik hale gelmesine, suyu itmesine ve yüzey akışının artmasına neden olur. Olası yangın sonrası erozyonu azaltmak için çeşitli erozyon kontrolü yöntemleri, koruma ihtiyacı olan aşağı havza kaynaklarına sahip, yüksek oranda aşınabilir alanlara uygulanır. Yangın sonrası erozyon oranları genellikle iyileşmenin her yılı için bir büyüklük sırasına göre düştüğü için, bir yangından sonraki ilk veya iki yıl boyunca etkili erozyon azaltma işlemlerine en çok ihtiyaç duyulur. Yangın sonrası değerlendirme ve ormancılık yönetimi için erozyon ve sediman kontrolü için aşağıda bazı yöntemler verilmiştir.

3.7.1. TOHUMLAMA YÖNTEMİ

Bir orman yangınından sonraki ilk adım, ciddi şekilde yanmış alanlarda çimlerin yeniden tohumlanmasıdır (Moench ve Fusaro, 2002). Yanığın şiddetine bağlı olarak birçok bitkinin yangından sonra iyileşebileceğini unutmamalıdır. Yanmış alan koşullarında test edildiğini için sertifikalı tohumun kullanılması tavsiye edilir. Ekilecek tohum türü seçimi bir alandan diğerine değişmektedir. Tohum türü seçiminde yanmış ormanın toprak tipine, yüksekliğe, bakı ve eğime ve konuma bağlıdır. Yangın sonrası yangının negatif etkilerini azaltmak için ve tohumlama yönteminden hızı yararlanmak için çeşitli tohum ekim ipuçlarında faydalanmak avantajlar sağlanmaktadır. Yabani otlar, bir yangından sonra toprakların yeniden stabilasyonu için önerilen ilk bitkiler arasındadır. Ancak, eğer yabancı otlar zararlı olarak listelenirse örneğin mansap veya tarım alanlarına yayılabilmesi ve yerli bitkilerin yerini alıp vahşi yaşam habitatını ve bitki üretkenliğini ve çeşitliliğini azaltma durumunda ve kontrol maliyetlerine neden olmasından kontrol edilmelidir. Zararlı yabani otların kontrolü en iyi, kimyasal, biyolojik, mekanik ve kültürel kontrolleri içeren entegre bir haşere yönetim sistemi aracılığıyla gerçekleştirilir.

3.7.2. MALÇLAMA (TOPRAĞI KURU OT-SAMANLA ÖRTME)

Saman, erozyonu azaltmak ve yeniden bitkilendirme ve tohum çimlenmesi için uygun bir ortam yaratmak için tohumlanmış alanlar üzerinde koruyucu bir örtü sağlar (**Şekil 3.30**) (Moench ve Fusaro, 2002). Mümkünse, saman toprağa kıvrılmalı, plastik ağ ile kaplanmalı veya bir yapışkan madde ile püskürtülmelidir. Saman, yeniden ekilen bölümün tamamını kapsamalı ve rüzgâr ve su hasarını önlemek için hasarsız alana uzanmalıdır. Zararlı yabani otların yayılmasını

önlemek için yalnızca yabani ot içermeyen sertifikalı saman kullanılır. Saman, 5-8 cm lik bir eşit kalınlıkta uygulanmalıdır. Uygun yoğunlukta uygulandığında toprak yüzeyinin yüzde 20 ila 40'ı görülebilir.



Şekil 3.30: Erozyonu önlemek için yanmış orman alanların üzerine saman serpimi (Moench ve Fusaro, 2002).

3.7.3. EŞYÜKSELTİ EĞRİLER ŞEKLİNDE KÜTÜK TERASLARI

Kütük terasları, şiddetli yağmur fırtınalarından akıntıya karşı bir bariyer sağlar (**Şekil 3.31**). Ölü ağaçlar devrilir, dalları kesilir ve eğim yönüne dik kontur üzerine yerleştirilir.



Şekil 3.31: Erozyonu önlemek için yanmış orman alanlarında uygulanan kütük teraslama (Moench ve Fusaro, 2002).

Kütükler birbirini izleyecek şekilde değişken olarak yerleştirilir, böylece akışın artık izleyecek düz bir yokuş aşağı yolu kalmaz. Su, kütükler arasında gidip gelmeye zorlanır, bu da akışın hızını azaltır ve suyun toprağa sızması için zaman tanır. Bu bariyerler, hidrofobik topraklar, düşük zemin örtüsü yoğunluğu ve ciddi şekilde yanmış alanlar için etkili, birinci yıl kontrol tedbiri olarak uygulanmaktadır. Kütükler 15 ila 20 cm çapında ve 3 ila 9 m uzunluk arasında olmalıdır.

3.7.4. SAMAN BALYASI VE SAMAN ÖRGÜSÜ BARİYERLERİ

Kütüklerle karşılaştırıldığında, saman erozyonu bariyerleri, esnek olma ve zemin yüzeyine daha iyi uyum sağlama avantajıdır. Bariyerler genellikle az şiddette yüzeysel akışının meydana geldiği alanlara veya küçük miktarlarda asılı sediman tutmak için eğimin yan taraflarına yerleştirilir (Robichaud, ve diğ., 2000). Bu bariyerler, kütüğün kıt olduklarında veya mevcut olmadığında da kütüklerin yerini alabilir. Hasır veya tahta artıkları ile doldurulmuş metalik ağ veya naylon yünden, akışı tutan ve akış hızını azaltan gözenekli yapılardan oluşan bir dış iskeletten yapılmıştır. Uygulama şekli, kütük erozyon bariyerlerine benzer. Bu yapılar tipik olarak 0,25 m çapındadır. Her bir uçtaki 0,6 m, sedimanı tutma kapasitesini artırmak için yukarı ve eğimin tepesine doğru katlanabilir. Bu tekniğin amacı, sediman girdilerini azaltmaktır. Bu bariyerlerin ömrü 1 ile 10 yıl arasında sürebilmektedir. Ancak, genellikle ilk birkaç fırtınayı doldururlar, bu nedenle etkinlikleri hızla azalır ve yüksek akışlarda patlayabilirler. Bu nedenle kullanımları kısa ömürlüdür. Bu tür bir teknik, yalnızca bir havzanın küçük bir kısmı yanmış veya yangının yoğunluğunun düşük olduğu yerlerde uygulanmaktadır. Dere akışına bir bariyer oluşturmak ve sedimanı tutmak için kanala dört veya beş saman balyası yerleştirilir. Drenaj alanı sınırlandırılmalı ve bariyer, su derinliği hiçbir noktada yaklaşık 30 cm'yi geçmeyecek şekilde yerleştirilmelidir (**Şekil 3.32**).

3.7.5. FİBER ROLLERİ

Fiber rolleri çoğu bölgede erozyon oranını yavaşlatan faydalı bir araçlardır. Terasladığında, bu fiber roller (**Şekil 3.33 (a)**), yüzey boyunca kolay akış yollarını bloke ederek su akışının hız kazanmasını önler. Hindistan cevizi kütüklerinden üretilen Fiber roller sedimanı tutar ve filtrasyon sağlar. Yangın sonrası erozyon kontrolü için bu ürünleri kullanmanın önemli bir yararı, parçalanmak ve yeni bitki büyümesinin kök salmasına yardımcı olmak için yerinde bırakılabilmesidir. Hindistan cevizi hasırları, sığ akışı sırasında sedimanı tutar ve küllerin yayılması veya yüzeydeki toprağın daha fazla aşınmasını önlemeye yardımcı olur. Hindistan cevizi hasırları, su akışıyla akıp gitmek yerine siyah kül, üst toprak ve diğer partiküllerin liflerde

tutulmasına yardımcı olur. Hindistan cevizi kütükleri ve dallarına benzer şekilde, yeni bitki yaşamı tohumlanabilir veya biyolojik olarak parçalanabilen hindistan cevizi hasırlarında doğal büyümenin kök salmasına izin verilebilir, bu da bunu erozyon endişelerine uzun vadeli bir çözüm haline getirir. Kütükler su akışını yavaşlatacağından, filtrasyon sağlayacağından ve lifli keçeler sedimanı tutacağından ve dengesiz toprakların bitişik su kütlelerine akmasını önlemesine yardımcı olmaktadır. Hindistan cevizi fiber roller, tepeler, nehir kenarı, kanal ve şev stabilizasyonu, kıyı şeritleri koruması, restorasyon projelerinde, stabilizasyon alanlarında ve inşaat şantiyelerinde ve diğer erozyona eğilimli alanlar için tamamen biyolojik olarak parçalanabilen bir erozyon kontrol seçeneği olarak kütükler etkin bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 3.32: Saman balyası ve saman örgüsü erozyon bariyerleri (Robichaud ve diğ., 2000).

3.7.6. HENDEK DENETİM YÖNTEMİ

Hendek denetim yöntemi suyun bir alandan akma hızını yavaşlatır. Hendek denetimi (**Şekil 3.33 (b)**), risk altındaki bir su havzasında daha yüksek noktalara yerleştirilir böylelikle akış hızlarında bir düşüş sağlayıp sediman ve döküntü ile kirlenmiş akış için bir ilk filtre işlemini sağlamaktadır. Bir fırtınanın ardından yanmış bir arazi alanından sediman ve külleri filtrelerken, karadaki akışı durdurmak için birden fazla hendek kontrolü art arda kullanılabilir. Bu yöntem su akışını yavaşlatmak için su seviyesi ile yükselen mini bir kontrol baraj duvarı gibi çalışır. Askıdaki sedimanların yerleşmesini sağlar ve zararlı maddelerin filtrelenmesine yardımcı olup sediman akışını engelleyip erozyonu kontrol sağalar. Hendek tasarımı, su akışını yavaşlatmak için bir menfez veya diğer akış alanlarından geçen bir kumaş filtre torbasına

sahiptir. Kendiliğinden yükselen tasarım, hendeğin su akışını genişletmesine ve etkin bir şekilde barındırmasına olanak tanır. Akış olmadığında, ünite neredeyse düz durur. Geotekstil kumaşı, kirleticileri filtreleyip, döküntüleri ve sedimanın su yollarına girmeden önce durdurur.



Şekil 3.33: (a) Hindistan cevizi kütüklerinden üretilen fiber rollerin erozyon ve sediman kontrolü için uygulanması, **(b)** erozyon ve sediman kontrolü için uygulanan hendek kontrol yöntemi.

3.7.7. YANGIN ÖNLEME KORİDORU (FIREBREAK)

Yangın önleme koridoru, orman yangınlarının ilerlemesini önlemek ve yangınlarla mücadele etmek için ormanın iç bölgelerine erişim sağlamak ve orman yangınlarının yayılmasını önlemek, yangını uzaklaştırılmasına ve yönetilmesine izin vermek üzere tasarlanmış, kalıcı veya geçici bir çıplak, sürülmüş veya bitki örtüsü şeridir (USDA, 2008). Yangın önleme şeritleri, olası bir yangını kontrol altına almak için yeterli uzunluk ve genişlikte olması gerekir. Orman yangını geçmişi ve davranışı bilgisi, şeritin yerini belirlemede yardımcı olur. Yangın önleyici şeritlerin eğimli zeminlere kurulacağı tasarıma erozyon kontrol önlemleri dahil edilmelidir. Acil durumlarda erişimi engelleyebilecek yangın bariyerinin zarar görmemesi için araç erişimi mümkün olduğunca sınırlandırılmalıdır. Bir yangın önleme, en az 5 ila 6 m genişliğinde olmalı ya da en yakın yüzey bitki örtüsünün (ağaç) yüksekliğinin iki ila üç katı genişliğinde olmalıdır ancak bu genişlik 20 m fazla olmamalıdır (Demir ve diğ., 2009). Yangın önleme koridorları, 250 ila 600 m aralıklarla sırt tepelerinde, eş yükseklik eğrileri üzerinde ve ormanın içinden yerleştirilmelidir (**Şekil 3.34**). Yüksek riskli alanlarda veya öngörülen yanmayı kontrol etmek amacıyla daha yakın mesafe kullanılabilir. Bu koridorlar, orman arazisi sınırlarına, orman arazisi mülkiyet sınırlarına bitişik olan kamu yollarına, orman yollarına ve demiryollarına paralel ve gerektiğinde ormanların içinde yapılmalıdır.



Şekil 3.34: Orman yangın önleme koridoru (USDA, 2008).

Yukarıda bahsedilen orman yangın öncesi ve sorası yangın yönetimleri örneklerine ek olarak literatürde birçok başka farklı yöntemlerde mevcut ve uygulanmaktadır. Ayrıca, yangın yönetiminde doğal bariyerler de yöntemlerde içinde yer almaktadır. Doğal bariyerler arasında göller, akarsular, göletler, yollar, ekili alanlar, meralar vs. bulunmaktadır.

4. BULGULAR

4.1. MODEL SONUÇLARI

4.1.1. Hidrolojik Değerlendirme

Bu çalışmada Göksu ve Çanakdere havzalarındaki akım ve sediman simülasyonunda 13 yıllık verilere dayanarak SWAT modeli çalıştırılmış ve model performansı değerlendirilmiştir. SWAT-CUP (SWAT Kalibrasyon ve Belirsizlik Prosedürleri: Abbaspour ve diğ., 2007) (kapsamındaki Sequential Uncertainty Fitting 2: Abbaspor ve diğ., 2000) yöntemi kullanılarak modelin otokalibrasyonu, validasyonu ve belirsizlik analizi aylık periyotlar için yapılmıştır. Parametreleri ön çalıştırmalar yoluyla elde edilen en iyi değerlere sabitleyerek, modelin %95 tahmin belirsizliği (95PPU) içindeki ölçülen verilerin çoğu tekrarlı süreçle saptanmıştır. Bu çalışmada, parametre tahmin sürecinde 13 duyarlılık parametresi değerlendirilmiştir. Değişkenler (akım ve sediman) için, parametreler, açıklamalar, belirsizlik aralıkları ve uygun değerler **Tablo 4.1**'de verilmiştir. Model 2005'ten 2013'e kadar gözlemlenen akım verilerini kullanılarak kalibre edilmiştir ve 2014'ten 2017'ye doğrulanmıştır. Verilerin kalibrasyon ve validasyon için seçilmesi konusunda dikkat edilmesi gereken husus kalibrasyon ve validasyon için belirlenen yıllardaki veriler arasında korelasyon ve tutarlılık olmasıdır. Başka bir deyişle, seçilen yılların kuru (yağış az olan yıl) ve yaş (yağış çok olan yıl) yılları olduğu dikkate alınmalıdır. Bunun için kalibrasyon ve validasyon verilerinin arasında verilerin ortalaması ve standart sapma değerleri oldukça kalibrasyon ve validasyon da yakın seçilmelidir. Kalibrasyon için modelin ısınma süresi olarak (warm-up) iki yıl kullanılmıştır. Akım kalibrasyonunun her iterasyon için 2000 simülasyon şeklinde çalıştırılmıştır. Her iterasyon sonra, programın önerdiği değerlere ve başlangıç sınırlarına göre parametre aralığı değiştirilerek ve daraltılarak tekrar çalıştırılmıştır (Abbaspour ve diğ., 2007, 2004).

Model kalibrasyonunda, modelin son simülasyonundan makul akış parametreleri ve bunların değer aralıkları elde edildikten sonra, modelin kalibre edilmiş parametrelerle performansını değerlendirmek ve model doğrulaması için değerler herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır.

Tablo 4.1: SWAT modeli hassasiyet analizinden elde edilen kalibrasyon ve nihai parametreler.

Değisken	Parametre	Açıklama	Birim	Önerilen Aralıklar	Kalibrasyon Aralığı	Uyumlu Değer	Sıra
	v__ALPHA BF.gw	Taban akım alfa [1]	gün	0,01–1	(0,46 – 0,55)	0,51	2
	r__CN2.mgt	SCS Eğri No.[2]	-	35–92	(-0,039 –	-0,018	1
	v__GW_DELAY.gw	Yeraltı suyu [3]	gün	0–1000	(287,9 – 507,8)	490,5	3
	v__GWQMN.gw	Eşik derinlik[4]	mm	0–2000	(566,7 –	861,1	4
	r__SOL_AWC().sol	Mevcut su kap.[5]	mm H_2O	0,1–0,5	(0,23 – 0,48)	0,36	5
	v__CH_N2.rte	Manning değer[6]	-	0–0,15	(0,06 – 0,12)	0,09	6
Akım	r__SOL_Z().sol	Toprak derinlik [7]	mm	-0,8–0,8	(-0,61 – -0,07)	-0,37	7
	r__SOL_K().sol	Doymuş Toprak [8]	mm s^{-1}	0–1	(0,06 – 0,27)	0,13	8
	v__REVAPMN.gw	Eşik derinlik[9]	mm	0–500	(331,6 – 484,8)	430,4	9
	v__GW_REVAP.gw	Yeraltı suyu [10]	-	0,02–0,2	(0,08 – 0,13)	0,11	10
	v__ESCO.hru	Toprak buhar.[11]	-	0,1–1	(0,56 – 0,89)	0,59	11
	v__CH_K2.rte	Kanal hidroligi[12]	-	-20–20	(-11,6 – 5,3)	-2,7	12
	r__ OV N.hru	Pürüzlülük [13]	mm s^{-1}	-0,1–1	(-0,03 – 0,8)	0,7	13
	v__SPEXP.bsn	Eksponent param.[14]	-	0–1,5	(1,18 – 1,36)	1,19	2
	v__CH_COV1.rte	Aşınabilirlik fak.[15]	-	0–1	(0,27 – 0,37)	0,36	1
	r__RSDIN.hru	Kalıntı örtüsü [16]	Kg/ha	0–8000	(3.953,1 –	6.160,9	7
	v__SPCON.bsn	Doğrusal parametre [17]	-	0,0001–0,01	(0,006 – 0,01)	0,0074	4
	a__USLE_K().sol	Toprak erozyonu [18]	-	0–1	(0,15 – 0,48)	0,29	5
Sediman	a__USLE_P.mgt	USLE denk.[19]	-	0–1	(0,36 – 0,79)	0,43	6
	r__CH_COV2.rte	Kanal faktörü [20]	-	0–1	(0,19 – 0,64)	0,37	9
	r__BİOMİX.mgt	Biyolojik verim.[21]	-	-0,5–0	(-0,38 –-0,027)	-0,33	8
	r__SOL_AWC().sol	Mevcut su kap.[22]	mm H_2O	0–1	(0,63 – 0,8)	0,71	10
	r__SLSUBBSN.hru	Orta. eğim [23]	m	-0,8–0	(-0,79 – -0,36)	-0,80	3

[*] Değişiklik türü: (v) mutlak değişim, (r) bağıl değişim, (a) ek değer değişimi.[1] Taban akımı alfa faktörü (gün). [2] SCS eğri numarası. [3] Yeraltı suyu gecikmesi (gün). [4] Sığ akiferde dönüs akışının gerçekleşmesi için gereken su eşik derinliği (mm). [5] Toprak tabakasının mevcut su kapasitesi (mm mm [1]). [6] Ana kanal Manning'in değeri. [7] Toprak yüzeyinden tabakanın dibine kadar olan derinlik (mm). [8] Doymuş toprağa hidrolik iletkenlik (mm h [1]). [9] Sığ akiferde reap'in gerçekleşmesi için gerekli olan eşik su derinliği (mm). [10] Yeraltı suyu revap katsayısı. [11] Toprak buharlaşma telafi faktörü. [12] Etkin kanal hidrolik iletkenliği (mm h ')). [13] Karada Manning pürüzlülüğü. [14] Kanal sediman yönlendirmesini hesaplamak için üs parametresi. [15] Kanal aşınabilirlik faktörü. [16] İlk kalıntı örtüsü (kg/ha). [17] Kanal sediman yönlendirmesini hesaplamak için doğrusal parametre. [18] USLE'de toprak aşınabilirlik faktörü. [19] USLE denklemi destek parametresi. [20] Kanal örtü faktörü. [21] Biyolojik karıştırma verimliliği. [22] Toprak tabakasının mevcut su kapasitesi (mm mm [1]). [23] Ortalama eğim uzunluğu (m).

Model doğrulamasında, kalibrasyon aşamasında kullanılmayan başka bir dönemde (2014-2017) havzanın hidrolojik fonksiyonlarını simüle etmek için aynı hidrolojik parametreler ve değer aralıkları kullanılmıştır. Duyarlılık analizi sonuçları, hidrolojik parametrelerin en hassas parametresinin SCS akış eğrisi sayısı (CN2) olduğunu göstermiştir. İkinci hassas parametre grubu, taban akım alfa faktörü (ALPHA_BF), yeraltı suyu gecikmesi (GW_DELAY) ve sığ akiferdeki eşik su derinliği (GWQMN)'idi. Toprak tabakasının mevcut su kapasitesi (SOL_AWC), ana kanal için Manning değeri (CH_N2), toprak yüzeyinden tabakanın dibine kadar olan derinlik (Soil_Z) ve toprağa doymuş hidrolik iletkenlik (Soil_K) bir sonraki hassas parametreler olarak tanımlanmıştır.

4.1.2. Sediman Verimi Değerlendirmesi

Sediman model kalibrasyonu ve doğrulaması için iki istasyonda ölçülen askıdaki sediman değerleri kullanılmaktadır. Akım kalibrasyon ve doğrulamasına benzer şekilde uygulandığı gibi, gözlemlenen askıdaki sediman verileri sediman kalibrasyonunu ve doğrulaması için iki kısma ayrılarak: sırasıyla 2005'ten 2013'e ve 2014'ten 2017'ye kullanılmıştır. SWAT-CUP'ta birkaç simülasyondan sonra elde edilen SWAT parametrelerinin kabul edilebilir aralıkları ve bu çalışma için seçilen değerler **Tablo 4.1**'de gösterilmiştir. Sediman parametreleri duyarlılık analizi, en önemli parametrelerin kanal aşınabilirlik (erodibilite) faktörü (CH_COV1) olduğunu, ardından kanal sediman yönlendirmesini hesaplamak için üs parametreyi (SPEXP), ortalama eğim uzunluğunu (SLSUBBSN), kanal sediman yönlendirmesini hesaplamak için doğrusal parametreyi (SPCON), USLE'deki toprak aşınabilirlik faktörü (USLE_K) ve USLE destek uygulama faktörü (USLE_P) olarak göstermektedir.

4.1.3. SWAT Modeli Performansı

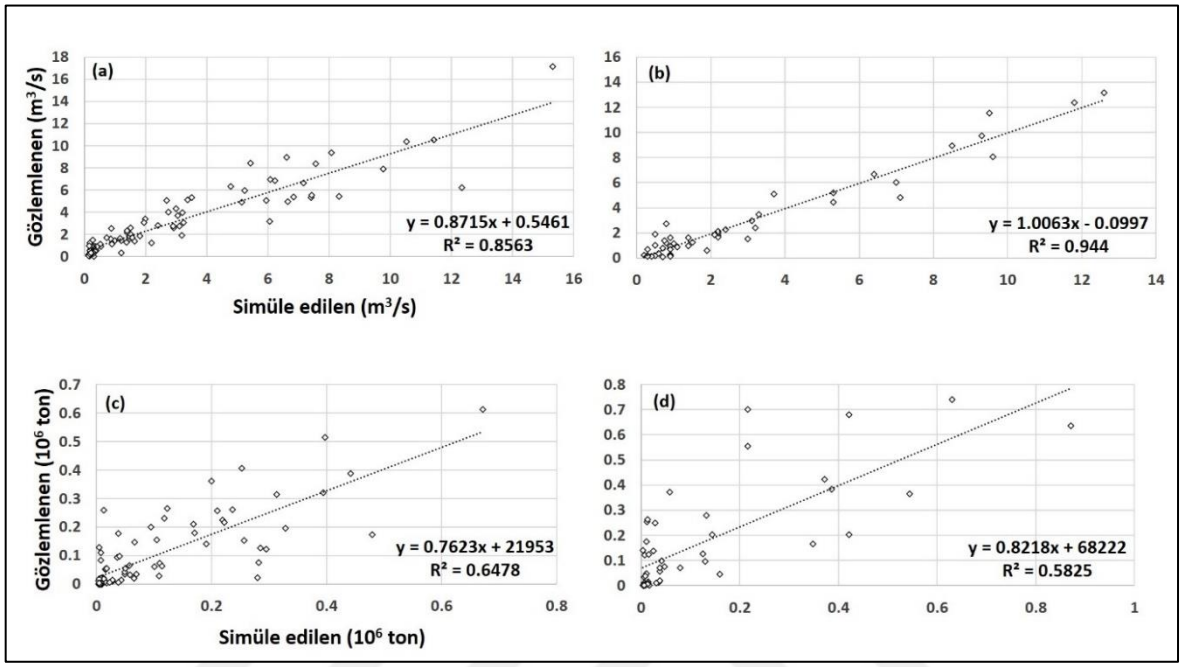
Daha önce belirlendiği gibi, bu çalışmada, SWAT Modeli performans değerlendirmesi için istatistiksel ve grafiksel model değerlendirme teknikleri olarak determinasyon katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (NSE) ve yüzde sapmak (PBIAS) kullanılmıştır. Akım ve sediman için NSE değerleri kalibrasyon için sırasıyla 0,85 ve 0,63 ve doğrulama süreleri için 0,94 ve 0,42 olarak elde edilmiştir. Akım ve sediman yüklerinin model tahminleri, kalibrasyon periyotları için sırasıyla determinasyon katsayısı (R^2 = 0,86 ve R^2 = 0,65) ve PBIAS (-5,8 ve 1,3) açısından da değerlendirilmiştir. Akım modeli iyi performans göstermesine rağmen, doğrulama periyodu sırasında ölçülen ve simüle edilen sediman konsantrasyonları arasındaki tutarlılık tatmin edici değildir (NSE <0,5). Ancak doğrulama dönemi için akım modelinin daha yüksek performans değerleri (R^2 = 0,94) ve iyi sediman modeli performansı (R^2 = 0,58) elde edilmiştir. Model simülasyonlarının performansı, Denklem 3.34 ile Denklem 3.36'den elde edilen istatistiksel ölçeklere dayalı olarak belirlenerek sonuçlar **Tablo 4.2**'de gösterilmektedir.

Tablo 4.2: 2005-2013 (kalibrasyon dönemi) ve 2014-2017 (doğrulama dönemi) SWAT Model simülasyonlarının performans ölçüm göstergelerinin özet istatistikleri ve belirsizlik analizi.

	Akım					Sediman				
Değe. İsta.[1]	p-faktör	r-faktör	R^2	NSE	PBIAS	p-faktör	r-faktör	R^2	NSE	PBIAS
Kal.[2]	0,74	0,57	0,86	0,85	-5,8	0,49	0,42	0,65	0,63	1,3
Val.[3]	0,73	54	0,94	0,94	0,3	0,42	0,48	0,58	0,42	-38,9

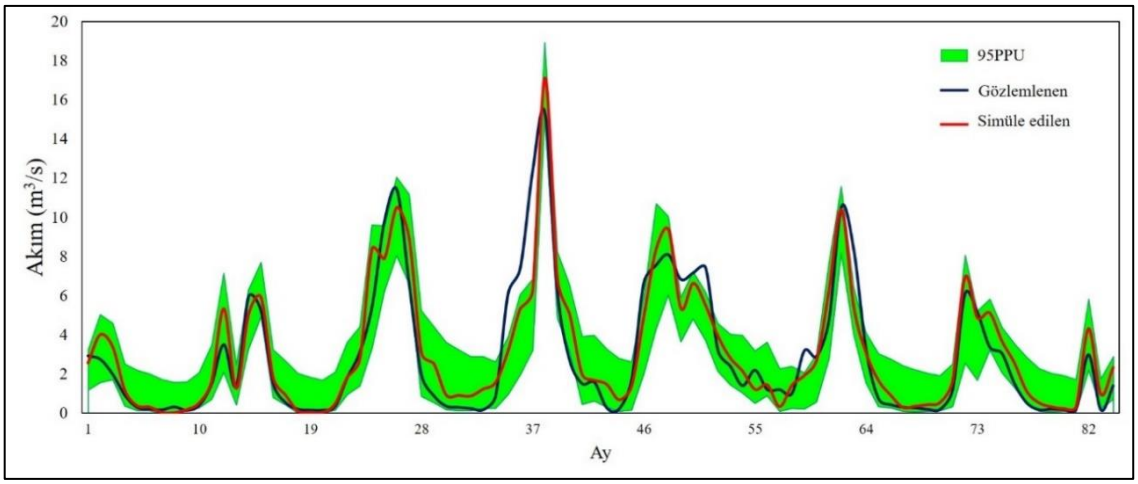
[1]Değerlendirme İstatistikleri. [2]Kalibrasyon. [3]Validasyon.

Akım ve sediman arasındaki korelasyonları belirlemek için kalibrasyon ve validasyon periyotları sırasında akım ve sediman simülasyonları ve gözlemler için dağılım grafiği ve elde edilen R^2 değerleri **Şekil 4.1**'de gösterilmektedir.

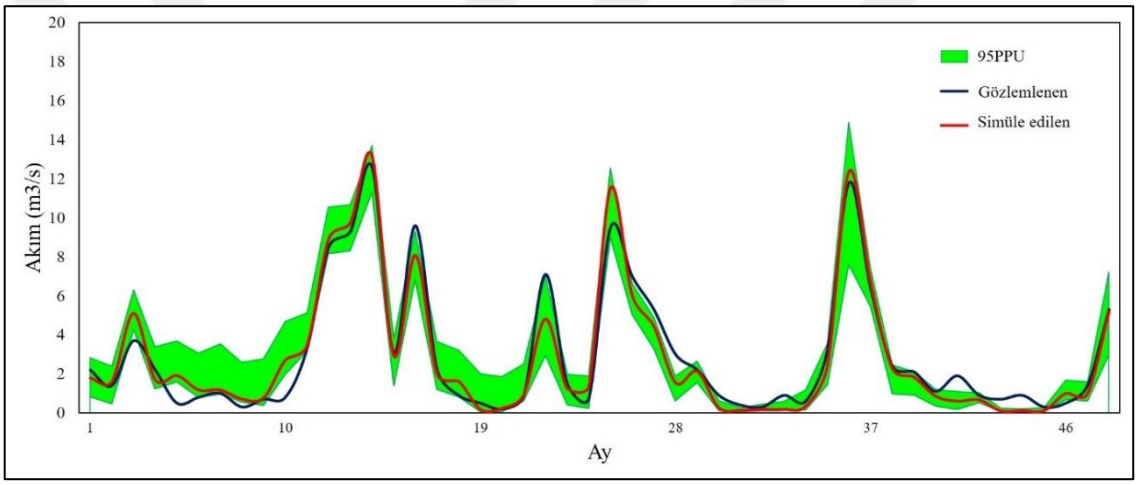


Şekil 4.1: Akım (a ve b) ve sedimanın (c ve d) gözlemlenen ve simülasyonu arasındaki korelasyonu için sırasıyla 2005–2013 (kalibrasyon; a ve b) ve 2014–2017 (validasyon; b ve d) dağılım grafikleri.

Nicel istatistiklere (**Tablo 4.2**) ek olarak, **Şekil 4.2** ile **Şekil 4.5** ayrıca kalibrasyon ve belirsizlik analizinin grafik temsillerinin sezgisel bir karşılaştırmasını sağlar ve ölçülen verilerle en iyi simüle edilmiş akım ve sediman verimini ve model tarafından tahmin edilen %95 belirsizlik alanını göstermektedir. SWAT modelinin havzadaki kalibrasyonu ve validasyonu, SUFI-2 yöntemi ile hidrometrik istasyonlardan alınan aylık debiler ve sediman konsantrasyon kayıtları için simüle edilen değerlerin 13 yıllık periyotta akım ve sediman konsantrasyonları ile karşılaştırılarak yapılmıştır (**Şekil 4.6**). Sonuçlar, modelin akım ve sediman konsantrasyonunu başarılı bir şekilde simüle ettiğini göstermektedir.

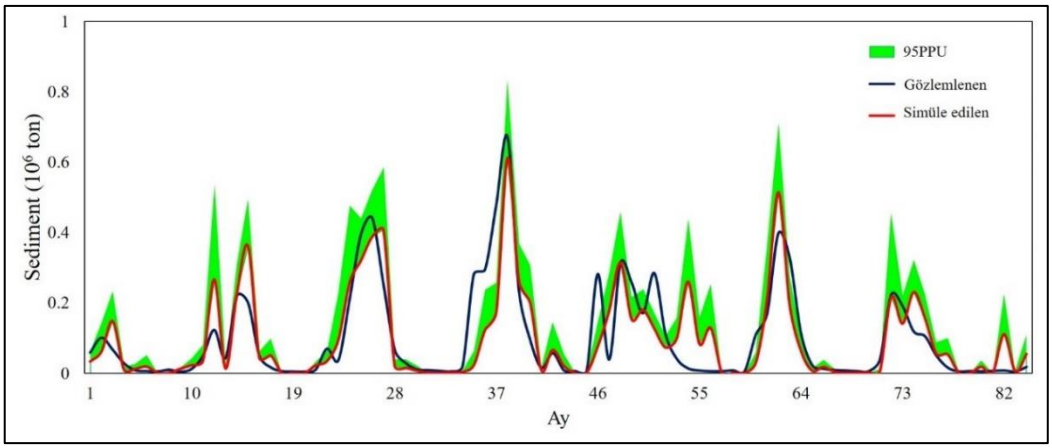


Şekil 4.2: Akım kalibrasyonu için 2005–2013 arasında gözlemlenen ve simüle edilen aylık hidrografı.

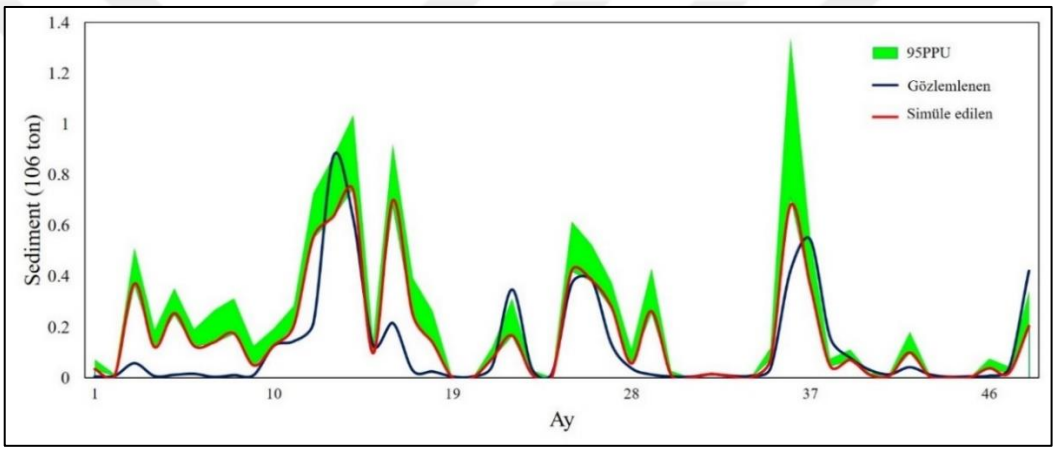


Şekil 4.3: Akım validasyonu için 2014–2017 arasında gözlemlenen ve simüle edilen aylık hidrografı.

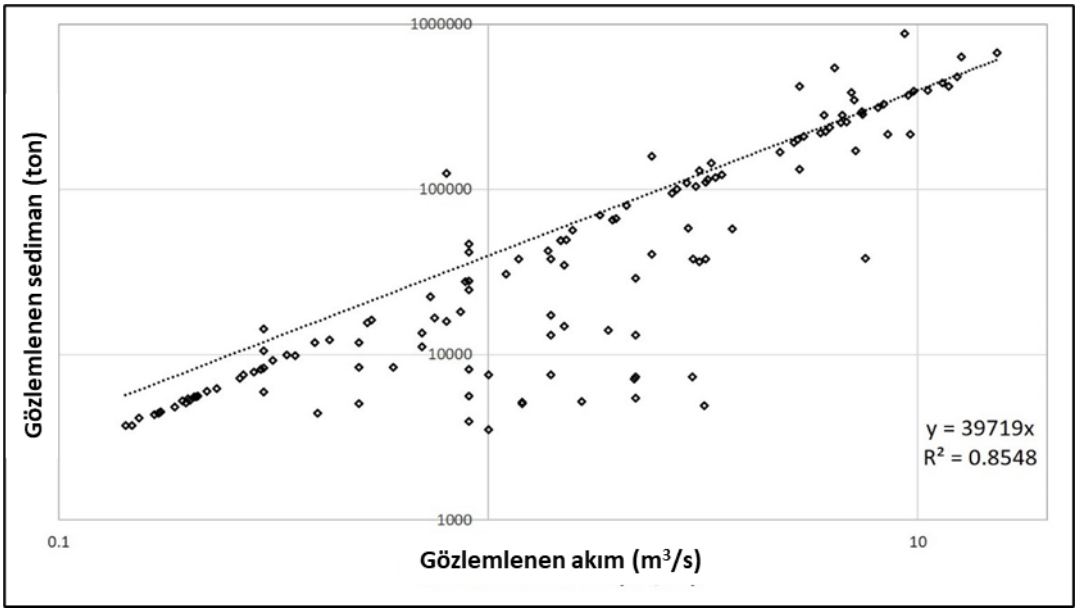
Aylık ölçülen akım ile askıdaki sediman (2005-2017) arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için lineer regresyon analizi yapılmıştır. Ölçülen aylık sediman konsantrasyonu değerleri arasındaki boşluğun, enterpolasyon yöntemi uygulanarak ve lineer regresyon modelinde bağımlı değişken olarak sediman ile bağımsız değişken olarak akım arasındaki ilişki bulunarak doldurulduğunu belirtmekte fayda var. **Şekil 4.6**, 0.85'lik bir determinasyon katsayısı ile ölçülen aylık akış ile askıdaki sediman arasındaki yüksek korelasyonu göstermektedir.



Şekil 4.4: Sediman kalibrasyonu için 2005–2013 arasında gözlemlenen ve simüle edilen aylık hidrografı.



Şekil 4.5: Sediman validasyonu için 2014–2017 arasında gözlemlenen ve simüle edilen aylık hidrografı.



Şekil 4.6: Aylık ölçülen akım ve askıdaki sediman arasındaki ilişki (2005-2017).

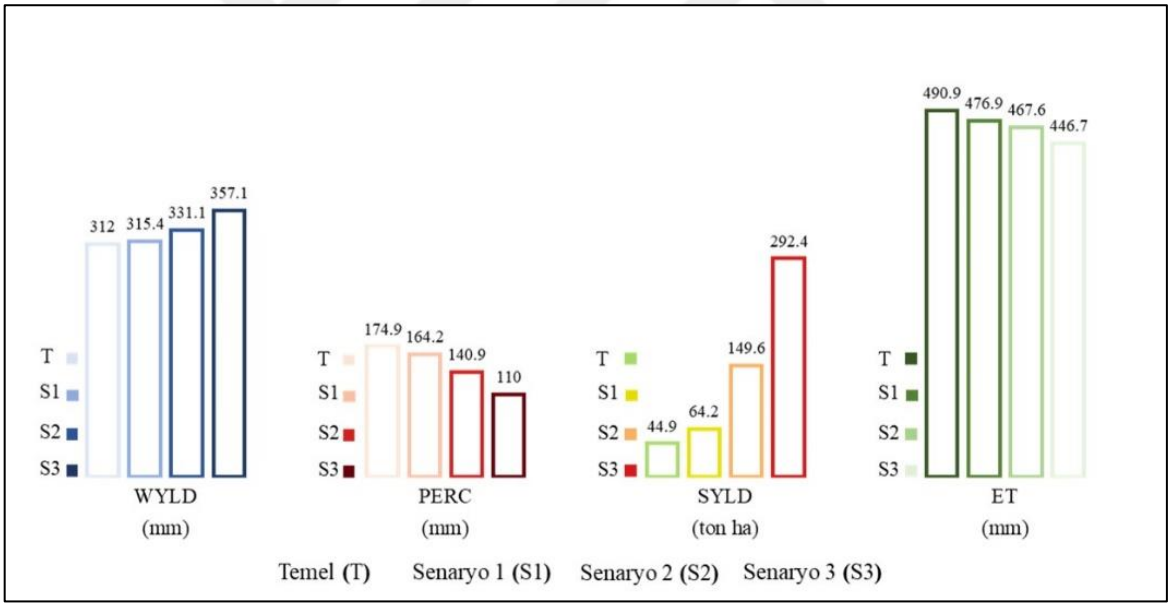
4.1.4. Orman Yangınlarının Akım ve Sediman Verimi Üzerindeki Etki ve Sonuçları

Bölüm 3.5.5'te açıklandığı şekilde değişikler yapıldıktan sonra model çalıştırılmıştır ve model çıktıları elde edilmiştir. Tüm senaryoların model sonuçlarına dayalı olarak, su dengesi bileşenleri yıllık zaman adımına göre **Tablo 4.3**'te özetlenmiştir. **Tablo 4.3**'e ek olarak yıllık zaman adımında, su dengesi bileşenleri, **Şekil 4.7**'de gösterildiği gibi tüm senaryoların model sonuçlarına göre özetlenmiştir.

Tablo 4.3: Farklı senaryoların model çıktısına dayalı olarak, yıllık zaman adımlarında su dengesi bileşenlerinin bir özeti.

Parametre Senaryolar	PREC (mm)	WYLD (mm)	SYLD (t ha^{-1})	ET (mm)	PERC (mm)
Temel	826,7	312,0	44,9	490,9	174,9
1. Senaryo	826,7	315,4	64,2	476,9	164,2
2. Senaryo	826,7	331,1	149,6	467,6	140,9
3. Senaryo	826,7	357,1	292,4	446,7	110,0

*Tablodaki değerler çalışma alanına ait yanmış alt havzalar için verilmiştir. Tabloda kısaltmaların anlamları: PREC: yağış (mm), WYLD: su verimi (mm), ET: buharlaşma (mm), PERC: perkülasyon (mm) ve SYLD: sediman verimi (ton ha^{-1}).



Şekil 4.7: Farklı senaryoların model çıktısına dayalı olarak, yıllık zaman adımlarında su dengesi bileşenlerinin özeti.

Model çıktısı, senaryo 3'te, orman yangınları olmayan durumla (temel senaryo) kıyaslandığında, yanmış alt havzanın ortalama yıllık toplam su veriminin (yani toplam yüzeysel akış, yanal akış ve taban akışı miktarı) %14,5 arttığını göstermektedir. Su verimindeki artışın ardından ve aşırı yüzeysel akışının yüksek aşındırıcı özelliği nedeniyle orman yangını sonrası sediman verimi, yangın öncesi sediman verimine göre 1,5 ila 3,5 kat artmıştır. Senaryo 3'te sediman verimi, orman yangını öncesi ve mevcut durumun 6,5 katına çıktığını göstermektedir.

Buna karşılık, ağaçların ve bitki örtüsünün yerden kaldırılması nedeniyle orman yangınından sonra daha az buharlaşma ve sızma meydana gelmektedir. Bu değişim, yanmış alanlarda CN değerinin arttırılmasıyla elde edilen orman yangını sonrası toprak geçirgenliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, toprak daha az geçirgendir ve yangın sonrası senaryolardaki pik akışların artmasından kaynaklanan daha az sızma meydana gelmektedir. Seçilen alt havzaları maksimum yanmış alan ile yangın sonrası senaryoda buharlaşma ve sızma değerlerindeki düşüşler sırasıyla %9 ve %37 olarak elde edilmiştir. Mevcut durum (orman yangını öncesi) ve yangın senaryolarının simülasyon çıktısı, çalışma alanının seçilen alt havzaları için simülasyon süresi boyunca yangının neden olduğu ortalama yıllık hidrolojik bütçedeki değişikliği ölçmek için daha fazla analiz yapılarak karşılaştırılmıştır. Seçilen alt havzalar için farklı parametrelerin analiz sonuçları ve istatistik değerleri **Tablo 4.4**'de verilmiştir.

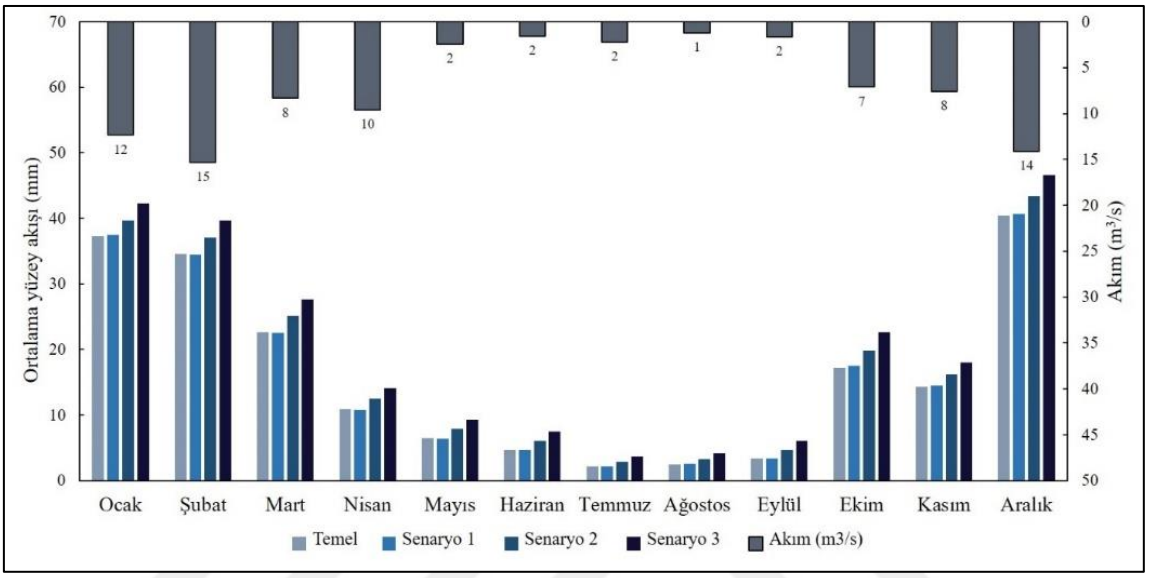
Tablo 4.4: 13 yıllık simülasyon döneminde (2005'ten 2017'ye) senaryolardan model çıktıları ve orman yangınlarına verilen ortalama hidrolojik tepkiler.

Parametre Senaryolar	SEDP (kg ha^{-1})	SED IN (10^6 ton)	SURQ (mm)	SURQ CNT (mm)	USLE (t ha^{-1})	BIOM (t ha^{-1})	LAI
Temel	2,65	0,04	151,8	154,1	100,3	34,4	9,9
1. Senaryo	2,98	0,09	152,7	156,2	116,3	32,2	8,9
2. Senaryo	3,40	0,26	197,5	187,3	140,7	30,9	8,3
3. Senaryo	4,37	0,47	256,6	230,7	196,2	23,7	4,0

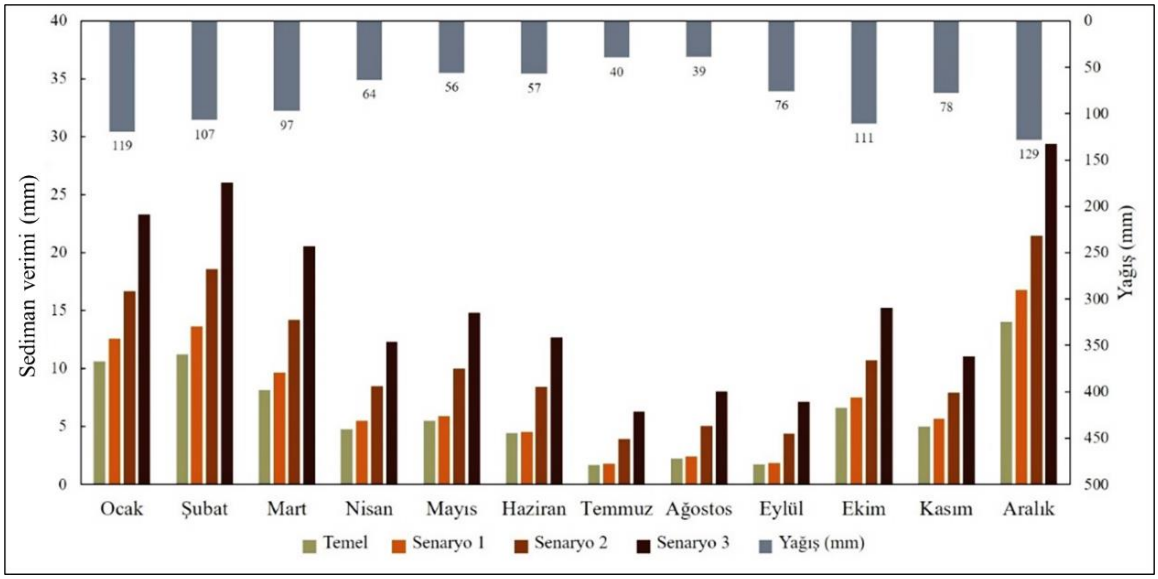
*Tablodaki değerler çalışma alanına ait yanmış alt havzalar için verilmiştir. : SEDP: sedimandaki mineral fosfor (kg ha^{-1}), SED_IN: ulaşılan sediman (10^6 ton), SURQ: yüzey akısı (mm), SURQ_CNT: yüzey akısı katkısı akış akısına (mm), USLE: toprak kaybı (ton ha^{-1}), BIOM: biokütle (ton ha^{-1}), LAI: Yaprak alan indeksi.

Sonuçlar, yangın sonrası dönemlerde hidrolojik bütçenin alt havzalar ve tüm havza ölçeğinde önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Mevcut durum senaryosu ile karşılaştırıldığında, zaman adımı içinde büyük miktarda toprak kaybı ve akıntıya taşınan sediman miktarında önemli bir artış gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak, toplam biokütle (yüzey örtüsü ve kökler) ve yaprak alanı indeksi, yangın sonrası senaryolarda keskin bir şekilde düşerek, buharlaşma-terlemeyi ve onun azalmasını doğrudan etkilemektedir. Yağış, yüzeysel akışı, akım ve sediman oranları, birbirleriyle doğrusal etkileşime sahip model değişkenlerdir. Orman yangınları, arazi kullanımı/örtü türlerinde (yani ormanların çıplak araziye dönüştürülmesi) değişiklikleri zorunlu kılar ve model değişkenlerini farklı şekilde etkiler. Yangın toprak üzerindeki ağaçlar ve bitki örtüsünü kaldırır (yok eder), yerdeki yağmur damlalarının hızlı bir şekilde hareket etmesine ve yüzey akışına dönüşmesine yardımcı olur, aşağı akışa hareket ederken toprağı bozar ve bozulmuş toprağı (yani sedimanı) taşır, nehir yatağına çökeltir veya denize boşaltır. Havza için aylık ölçülen yağış miktarı ile yangın öncesi (temel veya mevcut model) ve yangın sonrası

(senaryo 1 ila 3) yüzeysel akışı, yağış ve sediman konsantrasyonu arasındaki ilişki **Şekil 4.8** ve **Şekil 4.9**'da gösterilmektedir. Sonuçlar, yanmış orman alanının genişlemesinin akım oranlarını ve sediman verimini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Daha büyük yangınlar, akış oranı ve şiddetini arttırır ve aynı zamanda, toprağın hidrolik iletkenliğini azaltarak, dolayısıyla yüzeysel akışını artırarak, topraktaki suyun sızma/tutma oranlarını azaltır.

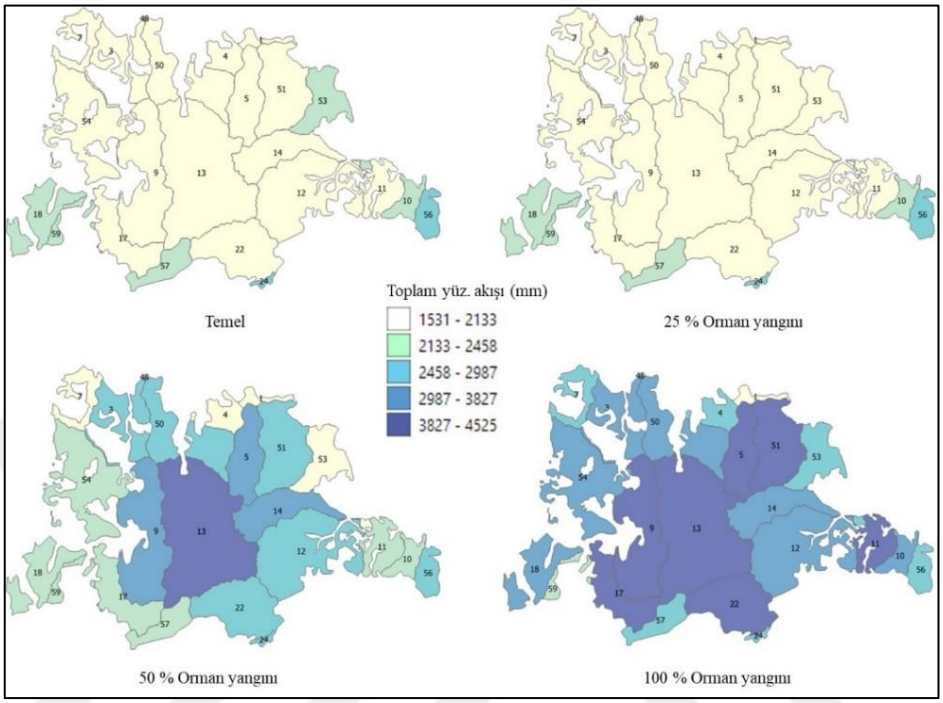


Şekil 4.8: Zaman adımında (2005-2017) yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası (senaryo 1-3) aylık ortalama ölçülen akım ve yüzeysel akışı arasındaki ilişki.

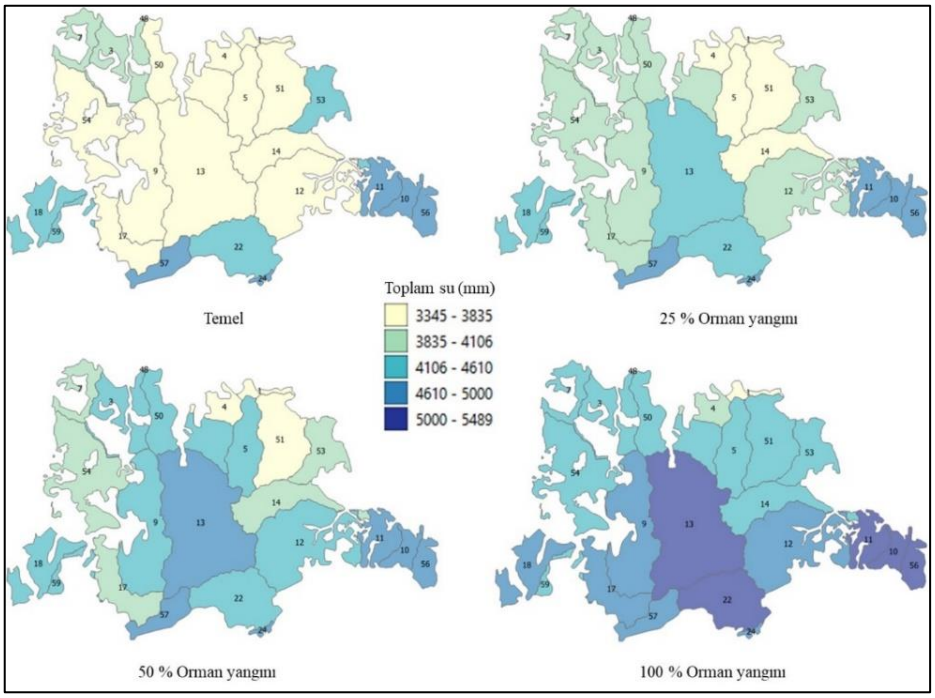


Şekil 4.9: Zaman adımında (2005-2017) yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası (senaryo 1-3) aylık ölçülen yağış ve askıdaki sediman arasındaki ilişki.

Şekil 4.10 ve **Şekil 4.11**, seçilen alt havzalarda, yanmış senaryolardan (1-3) önce (temel) ve sonrasında alt havzaları terk eden ve akarsu akışına katkıda bulunan toplam yıllık su miktarlarının (su verimi) mekânsal dağılımını göstermektedir.

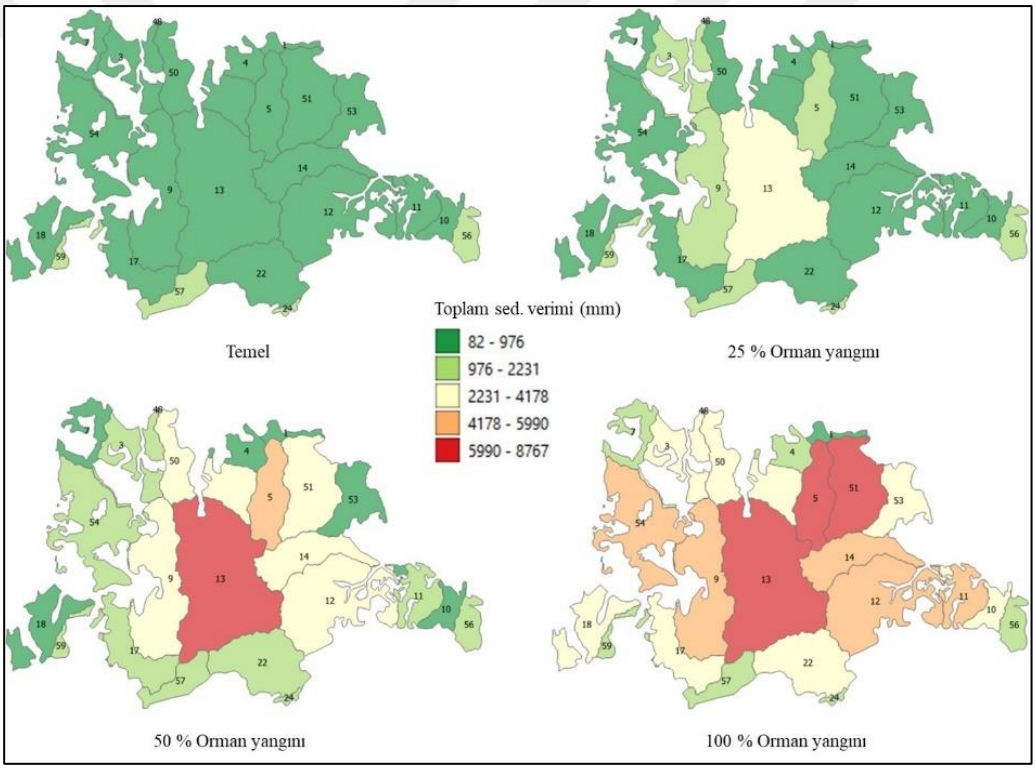


Şekil 4.10: Zaman adımında (2005-2017) yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası (senaryo 1- 3) aylık ölçülen yağış ve askıdaki sediman arasındaki ilişki.

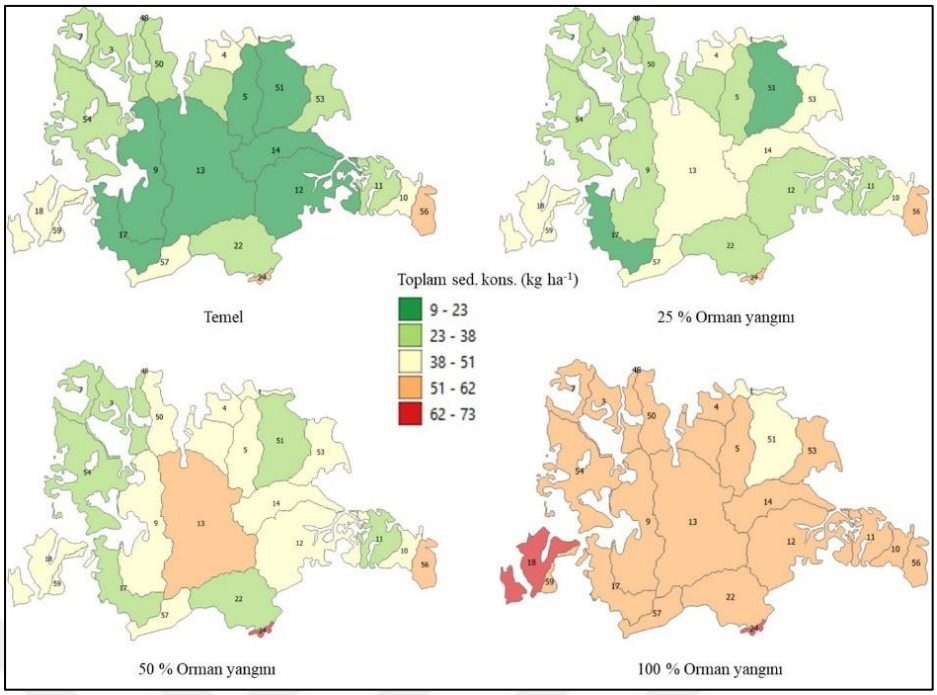


Şekil 4.11: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası (1-3) senaryolar için toplam yıllık su verimi miktarları.

Yanan alanın giderek artması, akış oranlarında kademeli bir artışı beraberinde getirir ve yangın, seçilen ormanın önemli bir bölümünü bozduğunda ve toprak bitki örtüsünün kaldırılmasıyla maksimum akış meydana gelmesini sağlamaktadır. Yangın sonrası koşullarda, yüzeysel akışı 151,8 mm'den 256,6 mm'ye yaklaşık %70 artarken, sızma oranları temel senaryo ile karşılaştırıldığında %37 azalma göstermektedir. Buna göre, yangın etkisinden sonraki su verimi artışı, daha yüksek yüzeysel akışının (%14,5) bir sonucudur. **Şekil 4.12** ve **Şekil 4.13**, alt havzalardan taşınan toplam sediman (sediman verimi) ve yanmış senaryolardan önce (temel) ve sonrasında (1-3) zaman adımı içinde seçilen alt havzalar için yüzeysel akışıyla akarsuya taşınan sedimana bağlanan mineral fosforun toplam yıllık miktarlarının mekânsal dağılımını göstermektedir.

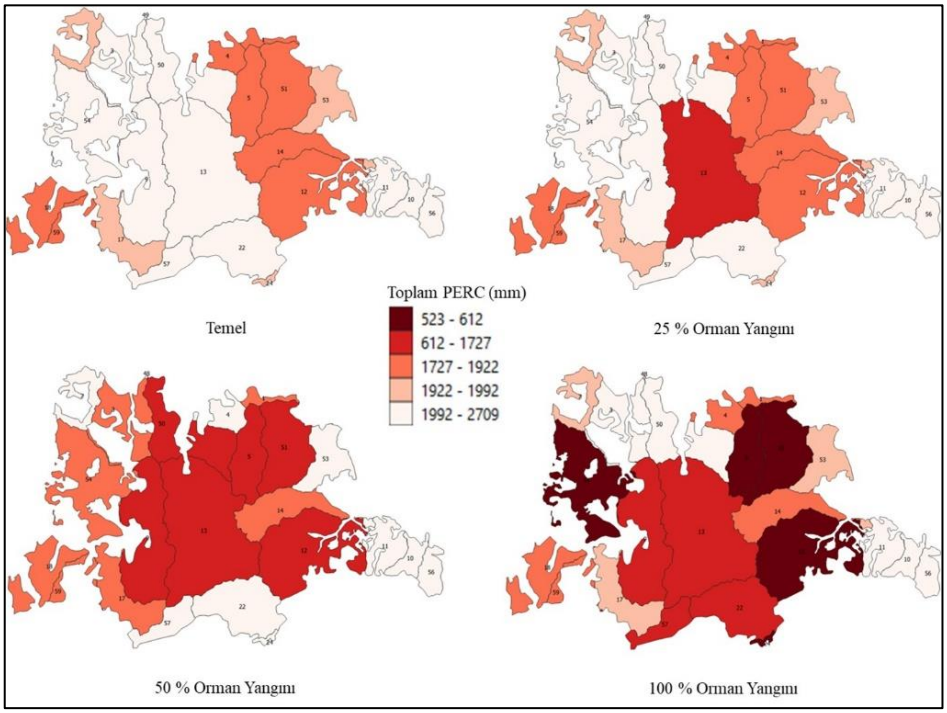


Şekil 4.12: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için toplam yıllık sediman verimi miktarları.

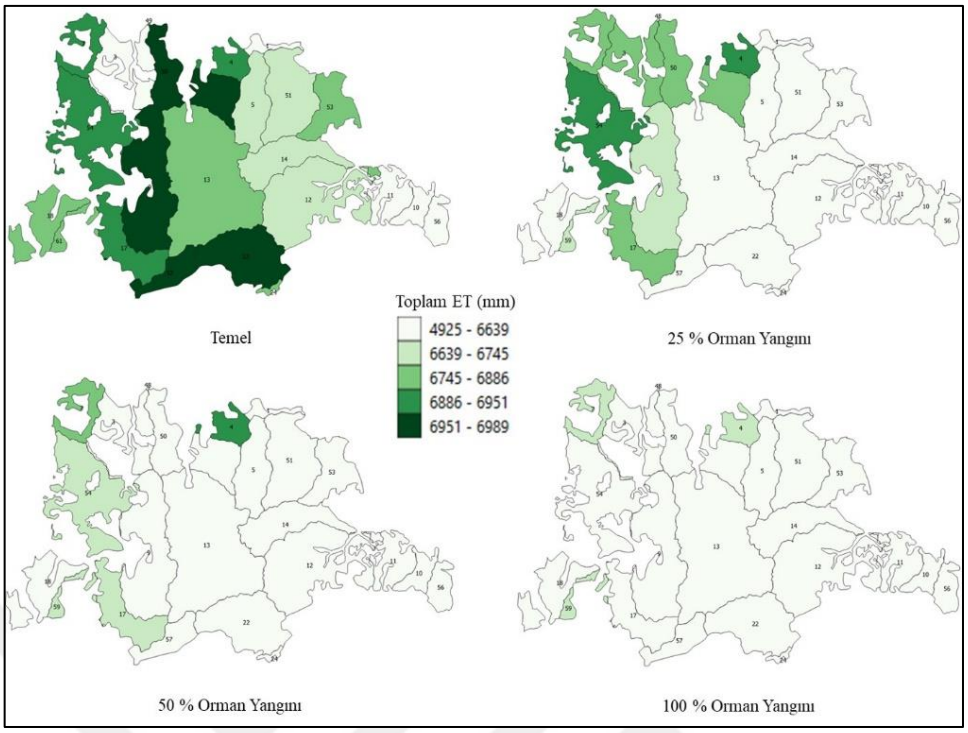


Şekil 4.13: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için yüzey akışıyla taşınan sedimana eklenen toplam yıllık mineral fosfor miktarları.

Şekil 4.14 ve **Şekil 4.15**, seçilen alt havzalar için yangın senaryolarından önce (temel) ve sonrasında (senaryo 1 ila 3) toplam yıllık sızma ve buharlaşma miktarlarının zaman adımı içinde mekânsal dağılımını göstermektedir.

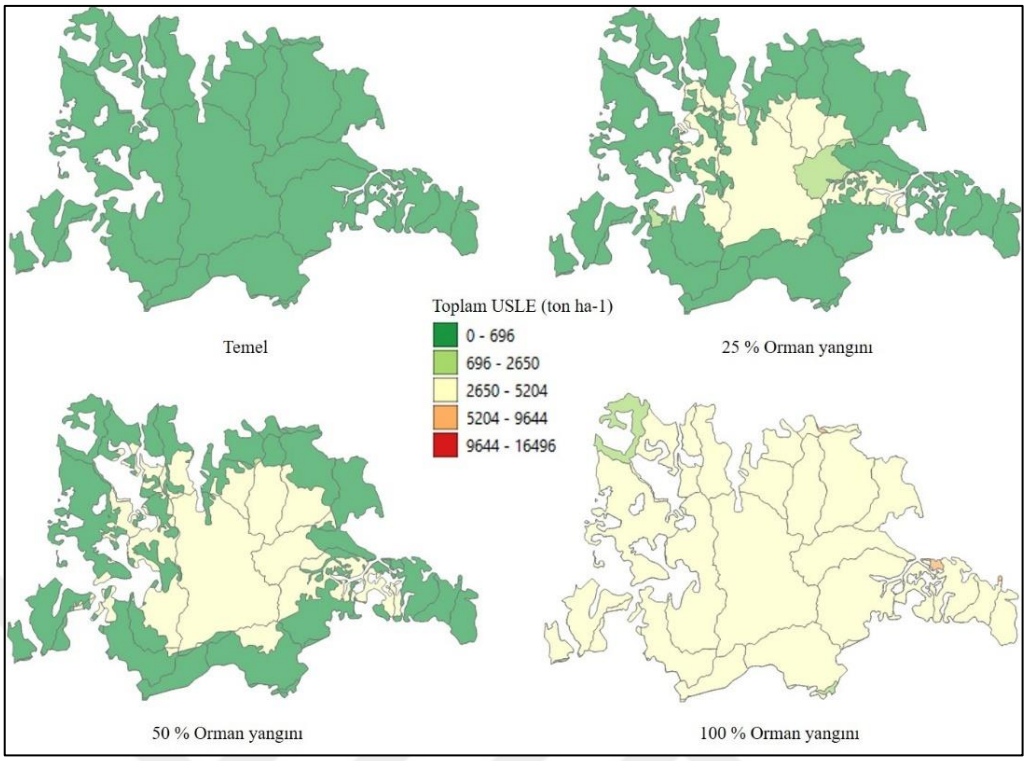


Şekil 4.14: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için toplam yıllık sızıntı miktarları.



Şekil 4.15: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için toplam yıllık buharlaşma miktarları.

Alt havzalarının hidrolojik ağına taşınan ve aşınan sediman miktarı, 116,3 ve 196,2 ton ha^{-1} arasında değişmekte olup, yangın sonrası koşullar için yangının olmadığı duruma kıyasla neredeyse iki kat artışla sonuçlanmıştır. Bu da 95,9 ton ha^{-1}'lik bir erozyon oranı artışına karşılık gelmektedir. Erozyon oranı ve sediman verimi analizi, çok yüksek toprak kaybı olan alanların belirlenmesine olanak tanır. En yüksek sedimantasyon oranları, özellikle 5, 13 ve 51 alt havzalarında tahmin edilmiştir. Toprak tipi veya arazi topografyası (dik yamaçlardaki arazi) bu toprak kaybını etkiler ve yüksek akış koşullarında toprak erozyonunu ve dolayısıyla sediman miktarını arttırır. Yangın sonrası senaryo analizine göre, hemen hemen tüm dağıtım alanlarının sedimantasyon oranı çok yüksektir; bu, seçilen alt havzanın toprak erozyonunun önemli bir sorun olduğu farklı alanlara sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yangın sonrası senaryolarda, erozyon oranları, tolere edilebilir toprak kaybı sınırının (Verheijen ve diğerleri, 2009) üzerinde olacaktır ve bu nedenle, uzun vadeli sürdürülebilirlik eksikliğinin bir göstergesidir ve bu da arazi bozulmasına neden olabilir. Ayrıca havzada erozyon oranları muhtemelen toprak oluşum oranlarından daha yüksek olacaktır. **Şekil 4.16**, Göksu ve Çanakdere Havzasında seçilen ve orman alanlarına denk gelen alt havzalarda 2005–2017 döneminde SWAT ile simüle edilen toplam yıllık toprak erozyonunun mekânsal dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.16: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde yangın öncesi (temel) ve yangın sonrası senaryolar (1-3) için toplam yıllık erozyon oranları miktarları.

Sonuçlara dayalı olarak, yangın sonrası senaryoda model, yangın sonrası arazi kullanımı/örtüsündeki değişiklikler ve artan yüzeysel akışı nedeniyle toprak kaybı ve sedimantasyonun artacağını tahmin etmektedir. Sonuçlar, orman yangınları meydana geldiğinde daha büyük erozyon riski olan havzadaki riskli alanların belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Buna göre, orman yangınlarının sediman yükleri üzerindeki etkilerini araştırmak ve daha genel olarak yangınların çevresel, sosyo-ekonomik veya hidrolojik konular üzerindeki olumsuz etkilerinin hafifletme stratejilerini planlamak için, bu çalışmada kullanılan hidrolojik model gibi bir hidrolojik model etkili olmasıyla birlikte ormanları yoğun yangın etkilerinden korumak için karar vericiler için yöntem ve yardımcı araç olabilir. Model, yangından korunma bölgeleri tasarlamak veya yangının sediman yükü üzerindeki etkisini sınırlamak için bir yangından sonra kolay seçenekli hidrolik koruma önlemlerinin (doğrusal bitkisel filtre gibi) yerleştirilmesinin etkisini incelemek için kullanılabilir.

Bu bölümdeki çalışma, olası orman yangınlarının su havzası ölçeğinde sediman yükü üzerindeki etkisini, yanmış yamaların mekânsal konfigürasyonunu ve modelin farklı parametrelerindeki değişiklikleri dikkate alarak incelemiştir. Model, farklı yanma senaryolarına göre havzadaki sediman yükü değişimlerini dikkate almak için gerçek sonuçlar çıkarmasının

yanında, orman yangınları gibi ekolojik bozulmaların ve bunların sediman üzerindeki hidrolojik sonuçlarının birleşik etkilerini araştırmak için ek araştırmalara olarak gelecekteki iklim koşulları altında (iklim modeli/senaryolar) da incelenebilir.

Bu bölümdeki çalışma sonuçları 'Ecological Modelling' uluslararası dergisinde makale olarak yayınlanmıştır (Nasirzadehdizaji ve Akyuz, 2022).

4.1.5. Ormansızlaşmanın Akım ve Sediman Verimi Üzerindeki Etkileri

İncelenen senaryolara göre, ortaya çıkan orman yanmış alanları ve bu alanların tarım arazisine dönüştürülmesi, sırasıyla küçük ormansızlaşmadan (senaryo 1) büyük ormansızlaşmaya (senaryo 3) kadar model uygulamasına karşılık gelen 3500 ila 11000 hektar arasında yaklaşmaktadır. Tasarlanan senaryolara göre, orman yangınları sonrası ortalama ormansızlaşma yüzdesi %8'dir ve maksimum miktar havzanın toplam alanının %14'üne kadardır. Orman yangınları ve tarımsal faaliyetler için değişen arazi kullanım tipi nedeniyle ormansızlaşmanın etkileri ve bunun akım ve sediman üzerindeki etkisi, girdi verilerinin modelde arazi kullanım tipini değiştirilerek değerlendirilmiştir. Bu amaçla, orman parçaları (yani, **Tablo 3.8**'de gösterildiği gibi SWAT kodundaki FODB arazi kullanım türü) ve ormansızlaştırma için dikkate alınan alanla örtüşen araziler ve bunun mekânsal dağılımı her senaryo için (1 ila 3 senaryoları) sulanmayan ekilebilir araziler için değiştirilmiştir (yani, SWAT kodundaki AGRL arazi kullanım türü olarak değiştirilmiştir). Bu değişiklikler, yeni arazi kullanım kategorileri oluşturmak için SWAT veri tabanına dahil edilmiştir. Son olarak, akım ve sediman verimini değerlendirmek için yeni girdiler ve parametreler kullanılarak model her senaryo için yeniden çalıştırılmıştır. Su dengesi bileşenleri için tüm senaryoların model sonuçları, **Tablo 4.5**'de gösterildiği gibi yıllık zaman adımına göre özetlenmiştir. Her SWAT simülasyonunda, HRU çıktı dosyası (output.hru), alt havza çıktı dosyası (output.sub) ve ana kanal veya nehir bölümü çıktı dosyası (output.rch) gibi farklı çıktı dosyaları oluşturulmuştur. **Tablo 4.6**'daki çıktı özet dosyalarında gösterilen çıktı değişkenlerinin kısa bir açıklamasını sağlamaktadır. Bu tabloda, HRU'lar (HRU), alt havzalar (SUB) ve akışlardan (RCH) alınan çıktı özet dosyaları, çalışma alanında seçilen alt havzanın ormansızlaşma senaryoları için tüm simülasyon dönemi boyunca (13 yıllık) ortalama miktarlarını sağlamaktadır. Model çıktıları, temel senaryo ile karşılaştırıldığında, farklı senaryoların değerlerindeki varyasyonlar aralığında, ormansızlaşma alt havzaların ortalama yıllık toplam su veriminin (yani toplam yüzeysel akışı, yanal akış ve taban akışı miktarı) %3-%10 arttırmış olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.5: Ormansızlaşma senaryolarının model çıktısına dayalı olarak, yıllık zaman adımlarında su dengesi bileşenlerinin bir özeti. 13 yıllık simülasyon döneminde (2005-2017) senaryolardan elde edilen model çıktıları ve ormansızlaşmaya karsı ortalama bir hidrolojik tepki.

Çıktılar	Değişkenler	Mevcut	1. Senaryo	2. Senaryo	3. Senaryo	Değişiklikler (%)
	SYLD	758	863	896	1135	14-50
	SEDP	44	46	47	54	4-23
	USLE	1.163	1.247	1.299	1.557	7-34
HRU	ORGN	237	260	264	311	10-31
	ORGP	40	46	47	56	13-39
	LAI [1]	123	120	119	93	2-24
	WYLD	3.897	4.003	4.074	4.265	3-10
	SURQ	1.877	1.997	2.082	2.325	6-24
	SYLD	381	741	949	1.702	95-347
SUB	SEDP	28	39	46	70	40-153
	ORGN	159	239	292	458	50-188
	ORGP	26	44	56	91	70-254
	ET [2]	6.502	6.421	6.351	6.167	1-5
	SED IN	0,51	1,13	1,38	2,25	121-341
	TOT_N	2,6	2,66	2,79	3,28	2-26
RCH	TOT_P	0,87	0,89	0,94	1,1	2-27
	DISOX [3]	1,02	0,90	0,87	0,85	11-17

[1] Mevcut ve senaryolardaki tüm değerler 10^6 ile çarpılır. [2] Ters orantı var. [3] Tablodaki değerler, çalışma alanının seçilen alt havzası için verilmiştir.

Tablo 4.6: Çıktı özet dosyalarında gösterilen çıktı değişkenlerinin kısa bir açıklaması.

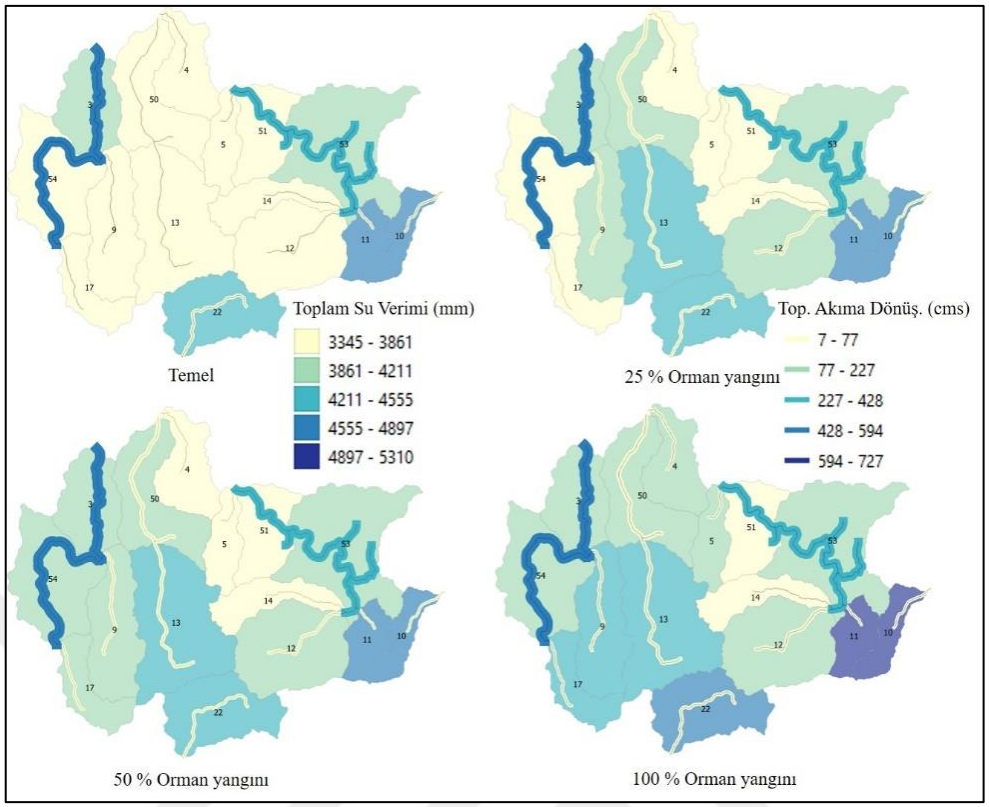
Çıktılar	Değişken adı	Açıklama
	SYLD	Sediman verimi (metrik ton/ha)
	SEDP	Sedimana emilen mineral fosfor (kg P/ha)
	USLE	USLE[1] denklemi ile hesaplanan toprak kaybı (metrik ton/ha)
HRU	ORGN	Organik azotun HRU'dan nehir alanına taşınan miktarı (kg N/ha)
	ORGP	Sediman ile taşınan organik fosfor miktarı (kg P/ha)
	LAI	Zaman dilimi sonunda yaprak alan indeksi
	WYLD	Su verimi, alt havzadan çıkan toplam net su miktarı (mm H_2O)
	SURQ	Dönem boyunca yüzey akısının akıma olan katkısı (mm H_2O)
	SYLD	Alt havzadan sediman verimi (metrik ton/ha)
SUB	SEDP	Sedimana bağlı mineral fosfor (kg P/ha)
	ORGN	Organik azotun alt havzalardan nehir alanına taşınan miktarı (kg N/ha)
	ORGP	Sediman ile taşınan organik fosfor (kg P/ha)
	ET	Zaman adımı sırasında alt havza gerçek buharlaşma terlemesi (mm)
	SED IN	Dönem boyunca su ile taşınan sediman (metrik ton)
	TOT_N	Toplam yüzey akışı azotu (kg)
RCH	TOT_P	Toplam yüzey akışı fosforu (kg)
	DISOX	Çözünmüş oksijenin periyot boyunca nehire taşınması (kg O_2)

[1] Evrensel Toprak Kaybı Denklemidir.

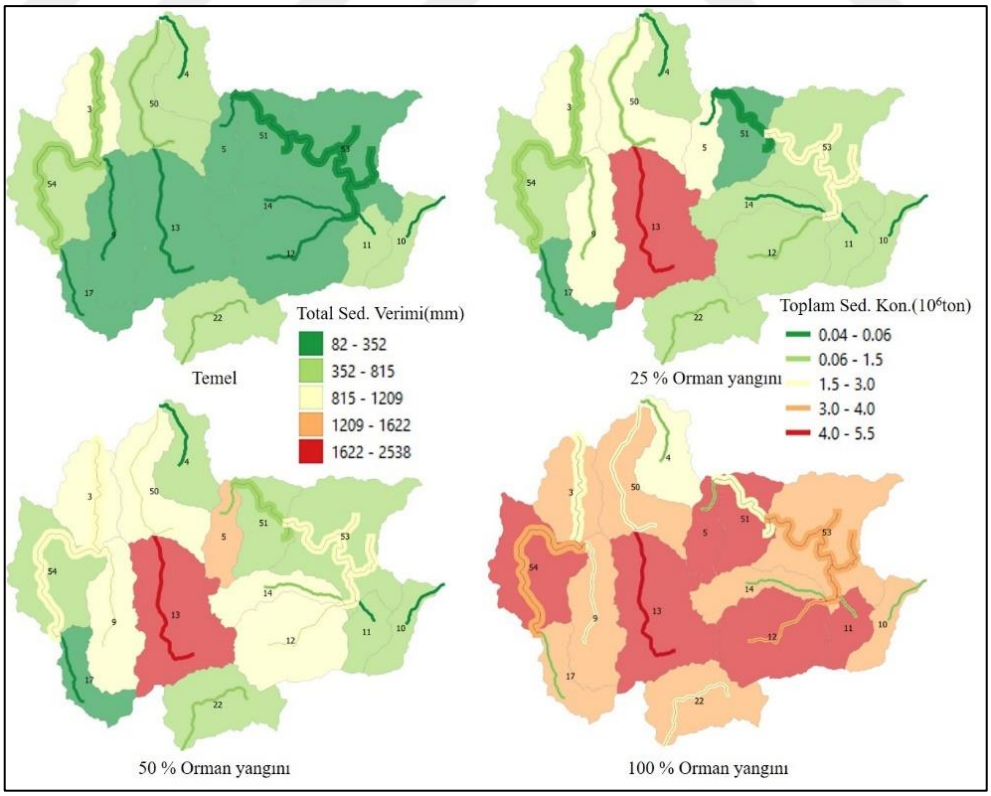
Su verimindeki artışı ardından aşırı yüzeysel akışının aşındırıcılık özelliğinin yüksek olması nedeniyle, çiftçilik, diskaro, tırmık gibi tarıma yönelik arazi hazırlama işlemleri, böylece orman yangınlarından sonra tarım arazisine dönüşümün, arazi kullanımı değişikliğinden önceki

sediman verimine kıyasla 3,5 kat artış ve dolayısıyla önemli bir değişime sahip olduğunu göstermektedir. Sediman veriminde önemli bir artıştan sonra, organik azot ve fosfor, özellikle Senaryo 3'te, temel senaryoya göre sırasıyla 2 kat ve 2,5 kat daha yüksek olduğu önemli ölçüde artan iki bileşenin olduğu elde edilmiştir. Bu, arazi kullanımının tarım arazilerine dönüştürülmesinden (ormansızlaşma) etkilenen Azot ve Fosfor döngüsünün girdileri ve çıktıları üzerindeki dengesizlikten kaynaklanabilir ve çöp ayrışması ve toprak mineralizasyonundan kaynaklanan Azot ve Fosfor kaynaklarının birikmesine ve artmasına neden olabilir (Aber, 1992; Watson ve diğ., 2000). Buna karşılık, seçilen alt havzalarda buharlaşma ve yaprak alanı indeksi, ormansızlaşma ve ağaçların ve bitki örtüsünün yerden kaldırılması nedeniyle sırasıyla %5 ve %24 oranında azalmıştır. Buna uygun olarak, nehire taşınan toplam azot, fosfor ve sediman, ormansızlaşma sonrası senaryoda önemli bir artışını göstermektedir.

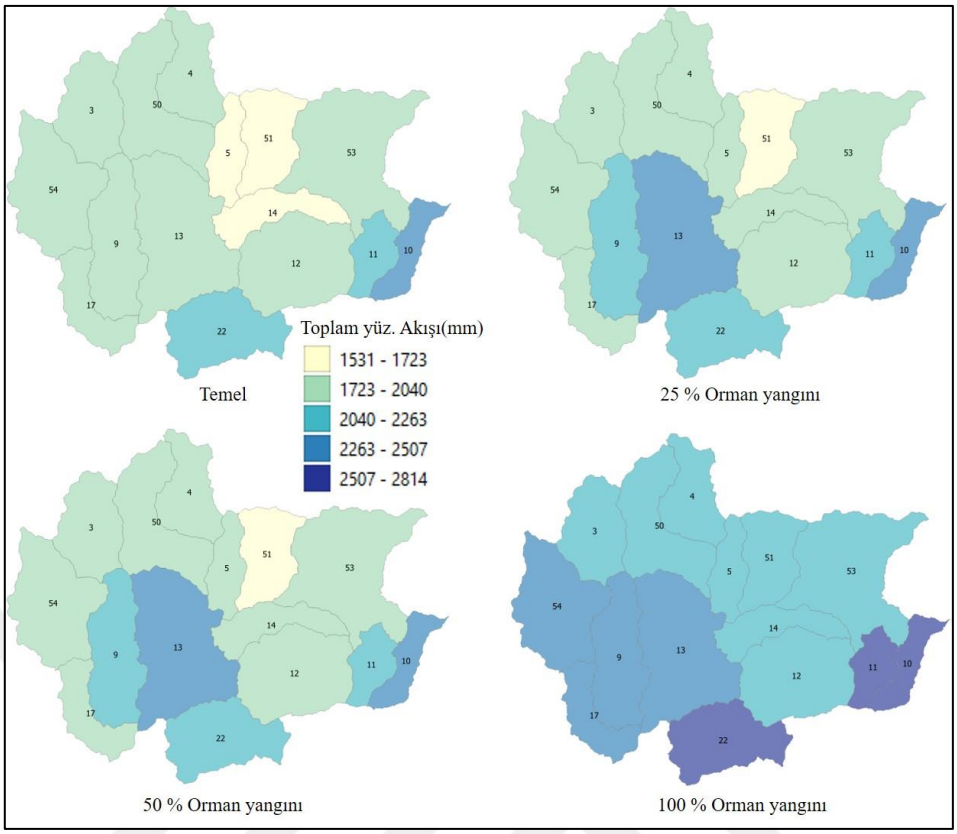
Zaman adımı sırasında erişilemeyen çözünmüş oksijen miktarı ters orantı göstererek temel senaryoya kıyasla ormansızlaşmadan sonra %11-%17 arasında bir azalma modellenmiştir. Nicel istatistiklere (**Tablo 4.5**) ek olarak, **Şekil 4.17** ve **Şekil 4.18** ayrıca grafik temsillerin sezgisel bir karşılaştırmasını ve yıllık toplam su ve sediman verimi miktarının mekânsal dağılımını sağlamaktadır. Ayrıca toplam yüzeysel akışı seçilen alt havzalarda zaman adımı içinde ormansızlaşma öncesi (temel) ve ormansızlaşma sonrası (senaryo 1-3) senaryolardaki **Şekil 4.19**'de gösterilmektedir. Not olarak modelin havza tanımlama aşamasında her bir alt havzanın kendisine atanan benzersiz bir numarası olduğunu belirlemekte fayda var.



Şekil 4.17: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde mevcut durum ve ormansızlaşma sonrası (1-3) senaryoları için ilgili yıllara ait yıllık su verimlerinin toplam miktarları.



Şekil 4.18: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde mevcut ve ormansızlaşma sonrası (1-3) senaryolar için ilgili yıllara ait yıllık sediman verimlerinin toplam miktarları.



Şekil 4.19: Zaman adımında (2005-2017) alt havza ölçeğinde mevcut ve ormansızlaşma sonrası (1-3) senaryolar için ilgili yıllara ait yıllık yüzeysel akışlarının toplam miktarları.

Ormansızlaşma alanındaki kademeli artış, yıllık ortalama akış oranlarında kademeli bir artışı beraberinde getirmekte ve maksimum yüzeysel akışı senaryo 3'te ormansızlaşmanın en yüksek mekânsal dağılımına sahip, yüzeysel akışının temel senaryoya göre %24 ve yaklaşık 144 mm'den 179 mm'ye kadar arttığı meydana gelmiştir. Ormanların bozulması ve tarım arazisine dönüştürülmesi sonucunda, simülasyon zaman adımı sırasında meydana gelen yüzeysel akışının akarsu akışına yüksek katkısı ve akarsuya taşınan sediman miktarında önemli bir artış gözlenmesi, büyük miktarda toprak kaybının olduğunu göstermektedir. HRU'lardan aşınan ve seçilen alt havzaların hidrolojik ağına taşınan sediman miktarı 64.3 ila 87.3 ton ha^{-1} arasında değişiklik göstermektedir. Ormansızlaşma sonrası koşullar, temel senaryo ile karşılaştırıldığında, 29 ton ha^{-1}'lik bir erozyon oranı artışına karşılık gelen neredeyse %50'lik bir artışla sonuçlanmaktadır. Buna göre, ormansızlaşmanın en yüksek dağılımına sahip senaryo (senaryo 3) arasındaki USLE denklemi ile hesaplanan HRU'lardan kaynaklanan toprak kaybı, zaman adımı için 89,5'ten 119,8 (ton)'a değişmiş ve %34 artış göstermektedir.

Erozyon oranları ve sediman verimi analizi, çok yüksek toprak kayıplarına sahip alanların ve bunların mekânsal dağılımının belirlenmesine olanak tanır. En yüksek sedimantasyon oranları

özellikle seçilen alanın 5, 11-13, 51 ve 54. alt havzalarında tahmin edilmiştir. Alandaki toprak tipi ve arazi topografyası (dik yamaçlardaki arazi) gibi farklı parametreler erozyon sürecini ve toprak kaybını etkileyebilir ve yüksek akış koşullarında toprak erozyon hızının artmasına ve toprak kaybına neden olabilir. Ormansızlaşma sonrası senaryolar analizine göre, hemen hemen tüm yayılış alanlarının sedimantasyon oranı çok yüksektir ve erozyon oranları tolere edilebilir toprak kayıpları sınırının (Verheijen ve diğ., 2009) üzerinde olacağını göstermektedir. Bu, seçilen alt havzalarının toprak erozyonunun önemli bir sorun olduğu farklı alanlara sahip olduğunu ve arazi bozulmasının havzadaki toprak oluşum oranlarından muhtemelen daha yüksek olacağını göstermektedir.

Model tahminleri ve çıktıları, ormansızlaşma nedeniyle arazi kullanımı/arazi örtüsündeki değişikliklerden sonra yüksek bir toprak kaybı, sedimantasyon ve yüzeysel akışında bir artış olasılığının olduğunu göstermektedir. Hidrolojik ve sediman modelinin çıktıları, arazinin erozyona ve toprak kaybına karşı duyarlılığı açısından sorunlar olduğunu ve arazi kullanımı/örtü değişiklikleri meydana geldiğinde havzada daha büyük erozyon riski altında olan alanların belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılan yöntem, karar vericiler için yardımcı olabilir ve ormanların orman yangınları veya ormansızlaşma gibi yoğun etkilerden korunmasına yönelik etkin bir yaklaşım sağlamaktadır.

Ormansızlaşmanın akım ve sediman verimi üzerindeki etkileri çalışma sonuçları 'International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences' dergisinde makale olarak yayınlanmıştır (Nasirzadehdizaji ve Akyuz, 2022).

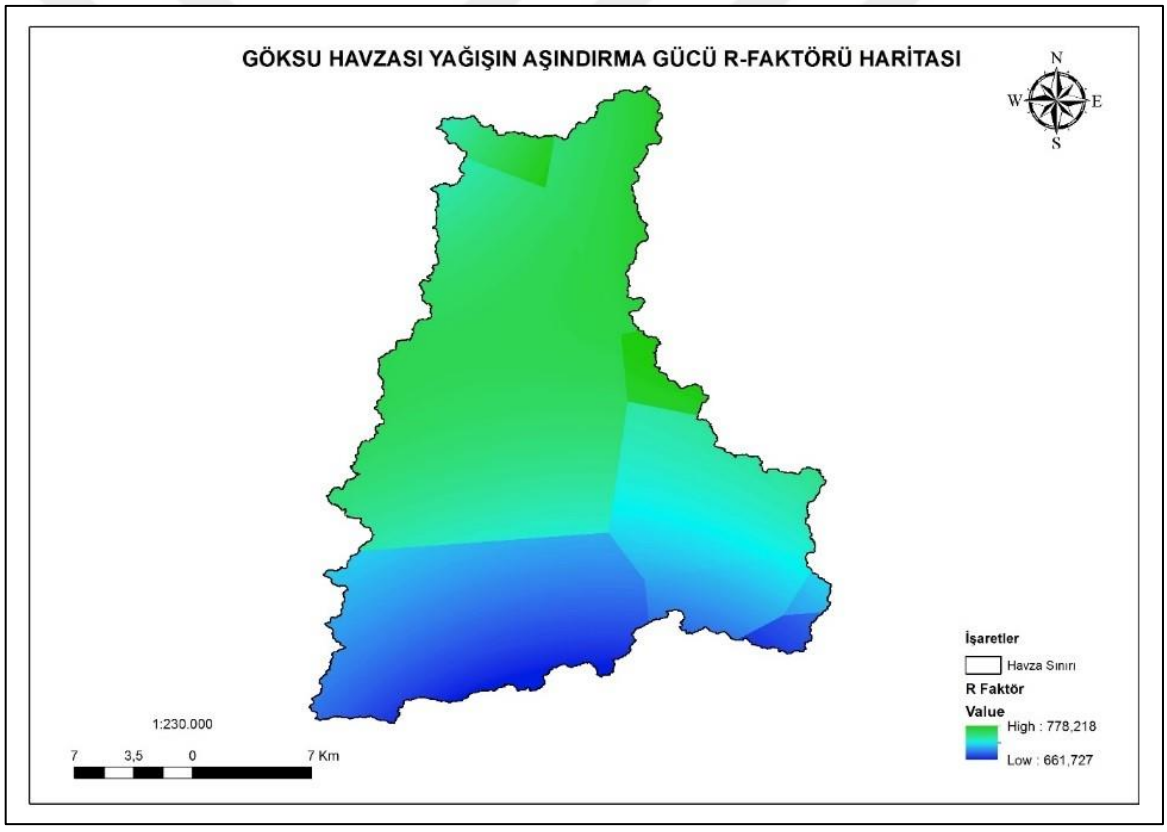
4.1.6. DEMİS Modeli Uygulanarak Göksu ve Çanakdere-Sungurlu Havzalarının Sediman Verimlerinin Elde Edilmesi

Göksu ve Çanakdere-Sungurlu havzalarında akarsulara ulaşan toprak kayıpları haritası YETKE/RUSLE (Yenilenmiş Evrensel Toprak Kayıpları Eşitliği / Revised Universal Soil Loss Equation) modeli ile hesaplanmaktadır. Dinamik Erozyon Modeli ve İzleme Sistemi (DEMİS) ismi ile geliştirilen model; dinamik bir yapıya kavuşturulması ve yıllar arası izleme ve raporlama yapılmasına imkân verdiğinden dolayı SWAT modeline alternatif olarak çalışma havzaları için kullanılmıştır. Bu model, Çölleşme ve Erozyon ile Mücadele (ÇEM) Genel Müdürlüğü ve Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi (CEM, 2018) ile Türkiye'nin su erozyonunu tahmin etmek için geliştirilmiştir. DEMİS, RUSLE yöntemini kullanan CBS tabanlı bir dinamik modeldir. Çalışma alanları için model ve model sonuçları Çölleşme ve Erozyon ile Mücadele tarafından bu tez çalışması kapsamında temin edilmiştir.

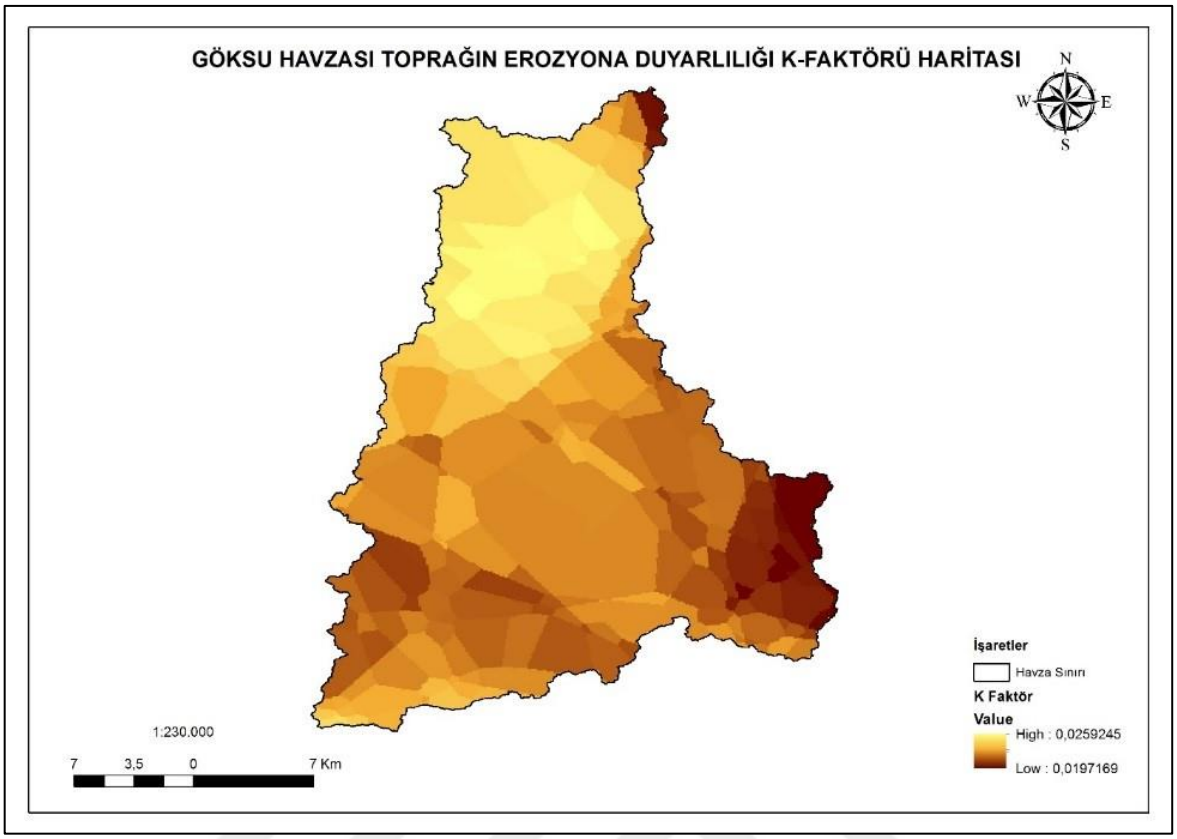
Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü tarafından Türkiye'de toprak kayıplarının ortaya konulmasında Revize Edilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (RUSLE) (Denklem 3.11) erozyon tahmin metodu olarak kullanılmaktadır.

Göksu ve Çanakdere-Sungurlu havzalarının drenaj alanları DEMİS modeli ve elde edilen erozyon durumu kullanılarak incelenmiştir.

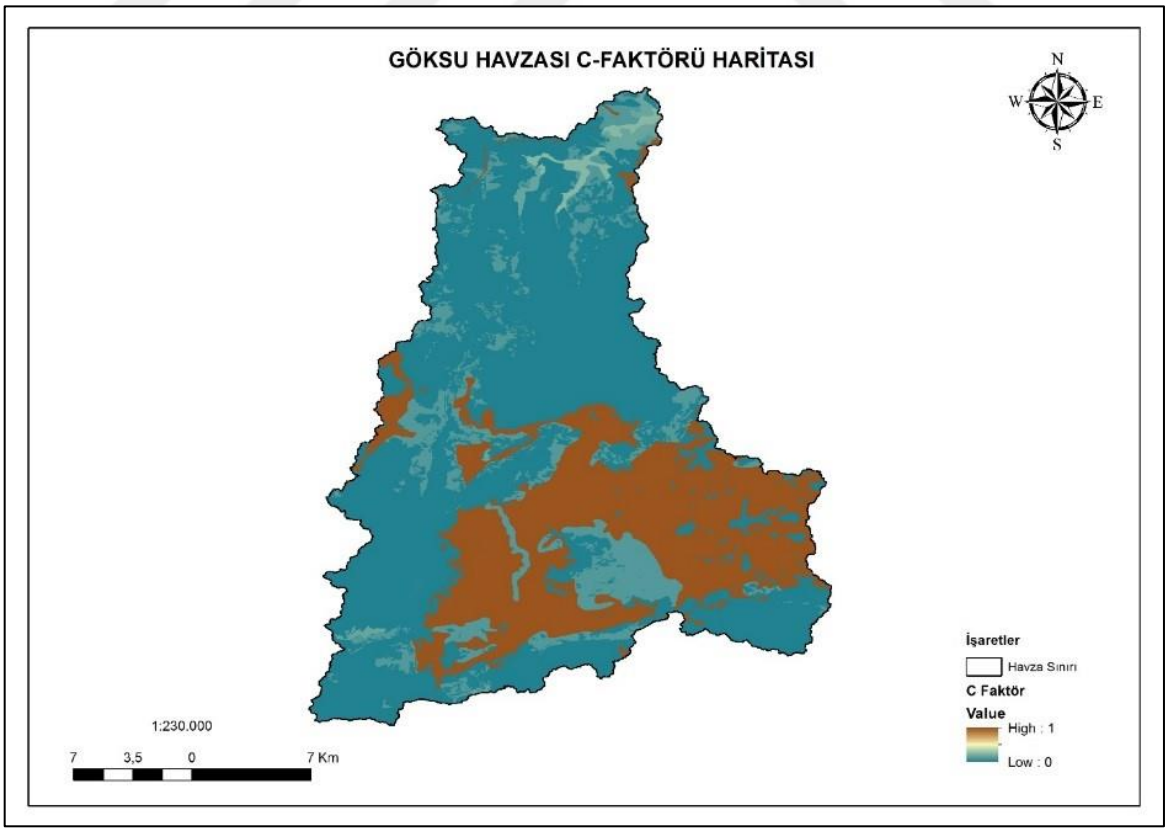
DEMİS sediman model çalışma sonucunda temin edilen rapora (CEM, 2018) göre Göksu su havzası için R-faktörü, toprağın erozyon duyarlığı K-faktörü ve C-faktörü ve su erozyonu haritaları ve elde edilen bulgular **Şekil 4.20** ile **Şekil 4.23**'de ve model çıktıları **Tablo 4.7**'de verilmiştir.



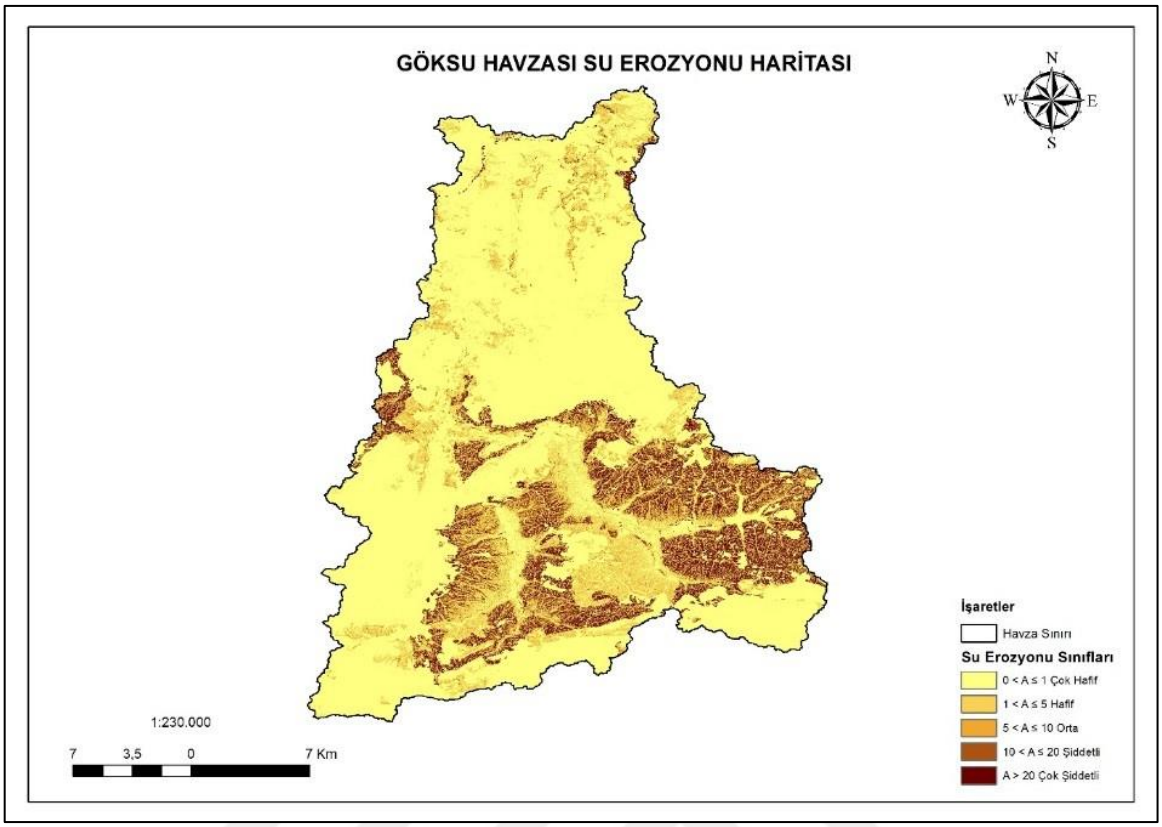
Şekil 4.20: Göksu havzası yağışın aşındırma gücü R-faktörü haritası (CEM, 2018).



Şekil 4.21: Göksu havzası toprağın erozyona duyarlılığı K-faktörü haritası (CEM, 2018).



Şekil 4.22: Göksu havzası C-faktörü haritası (CEM, 2018).



Şekil 4.23: Göksu havzası su erozyonu haritası (CEM, 2018).

Tablo 4.7: Göksu havzası su erozyon model çıktıları (ÇEM, 2018).

Göksu Havzası	Sınıflar	Piksel Sayısı (10*10m)	Alan (m^2)	Alan (ha)	Maximum Toprak Kaybı (ton/yıl)
1	1	3.387.393	338.739.300	33.873,9	33.873,9
2	2	162.644	16.264.400	1.626,4	3.252,9
3	4	222.264	22.226.400	2.222,6	8.890,6
4	8	261.833	26.183.300	2.618,3	20.946,6
5	16	309.433	30.943.300	3.094,3	49.509,3
6	30	270.762	27.076.200	2.707,6	81.228,6
7	60	154.822	15.482.200	1.548,2	92.893,2
8	120	27.465	2.746.500	274,65	32.958,0
9	300	2.402	240.200	24,02	7.206,0
10	753	178	17.800	1,78	1.340,3
			479.919.600	47.991,96	332.099,43

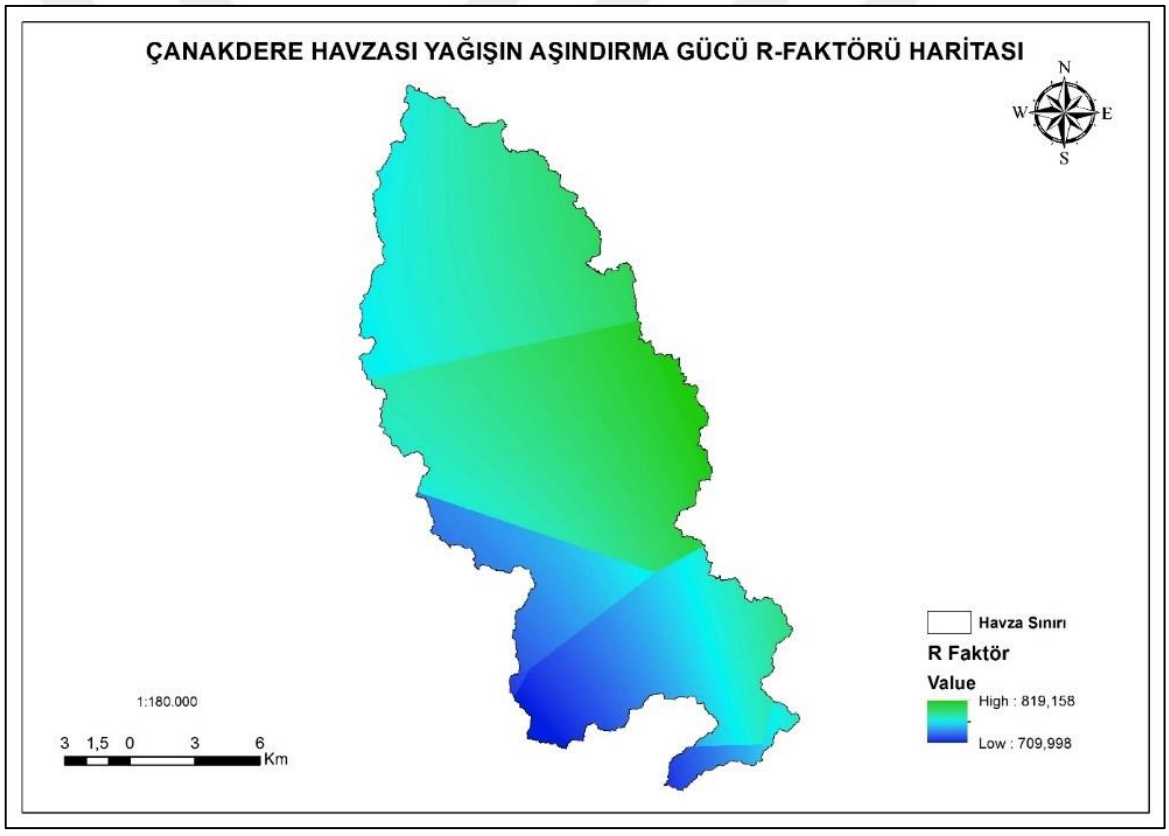
Göksu Havzası Drenaj Alanı (ha)	47.991,96

Göksu Havzası	Çok Hafif	Hafif	Orta	Şiddetli	Çok Şiddetli	TOPLAM
Sınıflar	1	5	10	20	20>	
Alan (ha)	33.874	4.653	2.758	3.186	3.521	47.991,96
Yüzde(%)	70,58	9,70	5,75	6,64	7,34	100

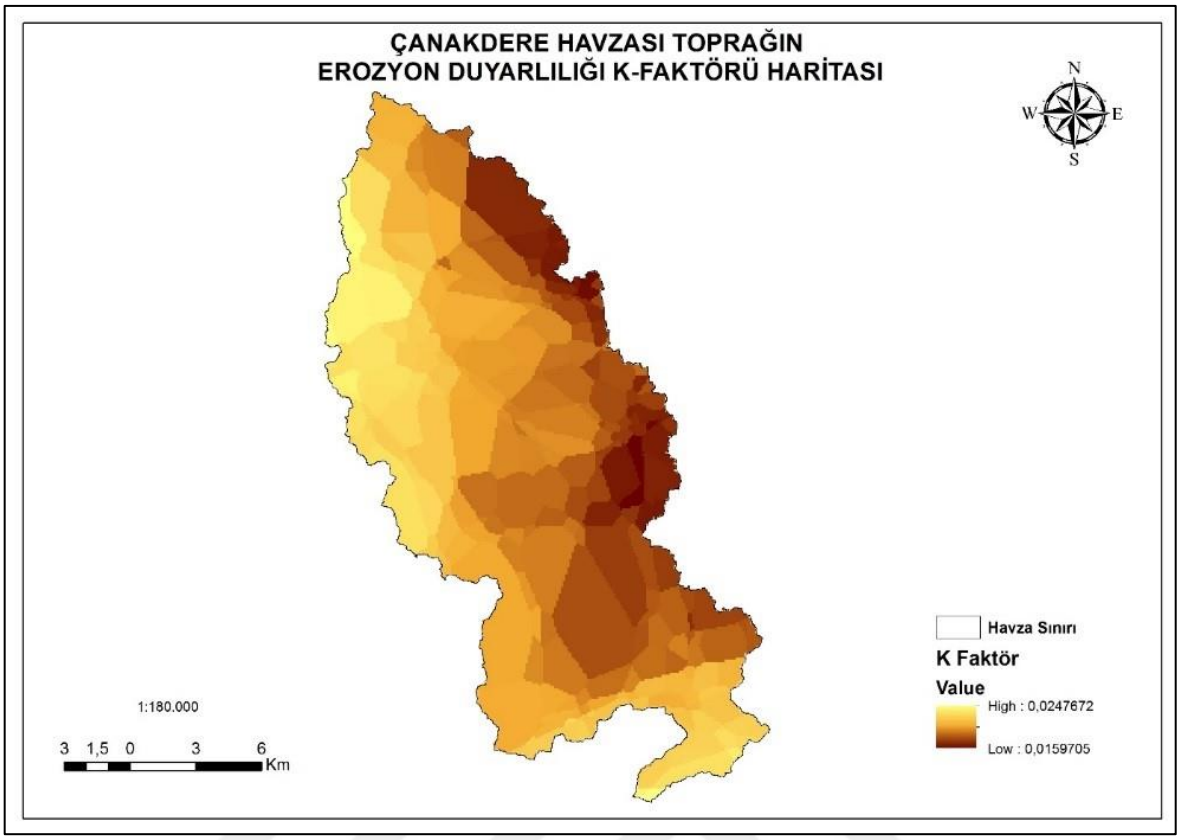
Çalışma alanının %70,58'inde çok hafif, %9,70'inde hafif, %5,76'sında orta, %6,64'ünde şiddetli ve %7,34'ünde çok şiddetli erozyon görülmektedir.

Göksu havzası drenaj alanında yılda 332.099,43 ton toprak su erozyonu sonucu yer değiştirmektedir. Bu da birim alanda 6,92 ton $yıl^{-1}$ ha^{-1} toprağın suyun aşındırma gücü ile aşınmaktadır.

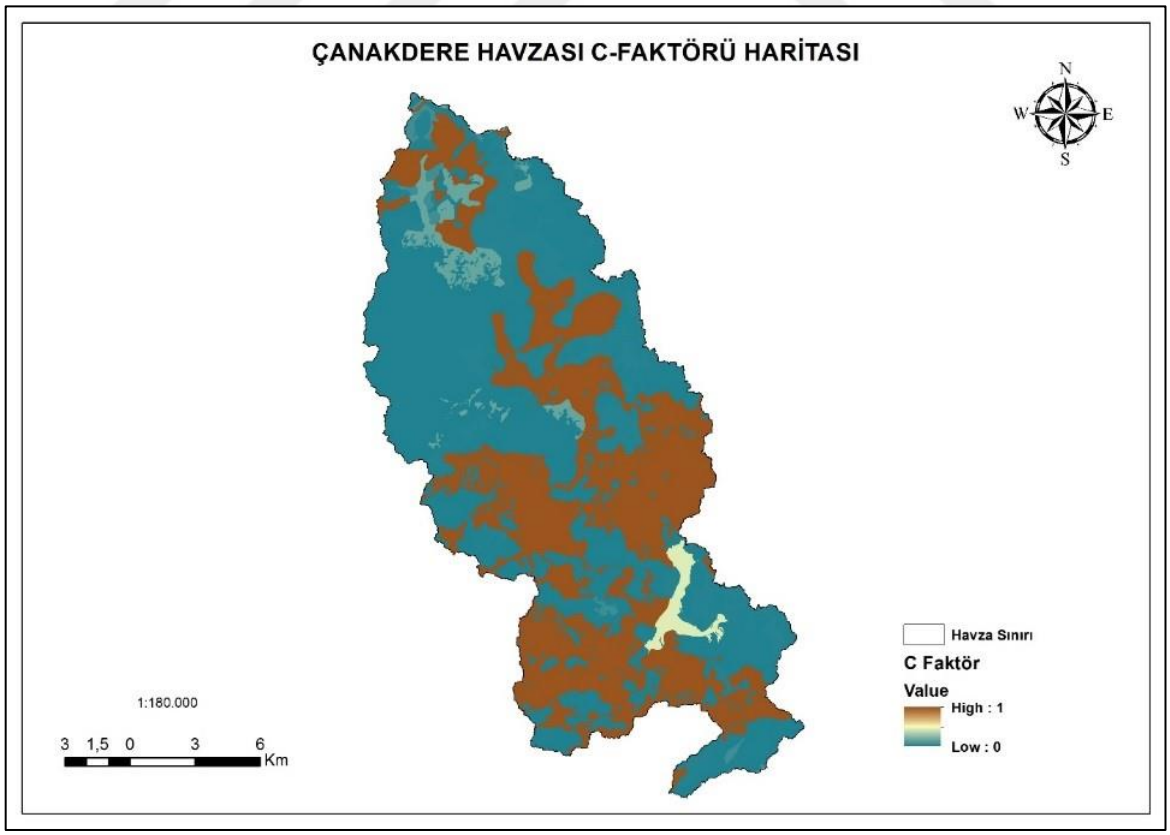
DEMİS sediman model çalışma sonucunda temin edilen rapora (CEM, 2018) göre Çanakdere su havzası için R-faktörü, toprağın erozyon duyarlığı K-faktörü C-faktörü ve su erozyonu haritaları ve elde edilen bulgular **Şekil 4.24** ile **Şekil 4.27**'de ve model çıktıları **Tablo 4.8**'da verilmiştir.



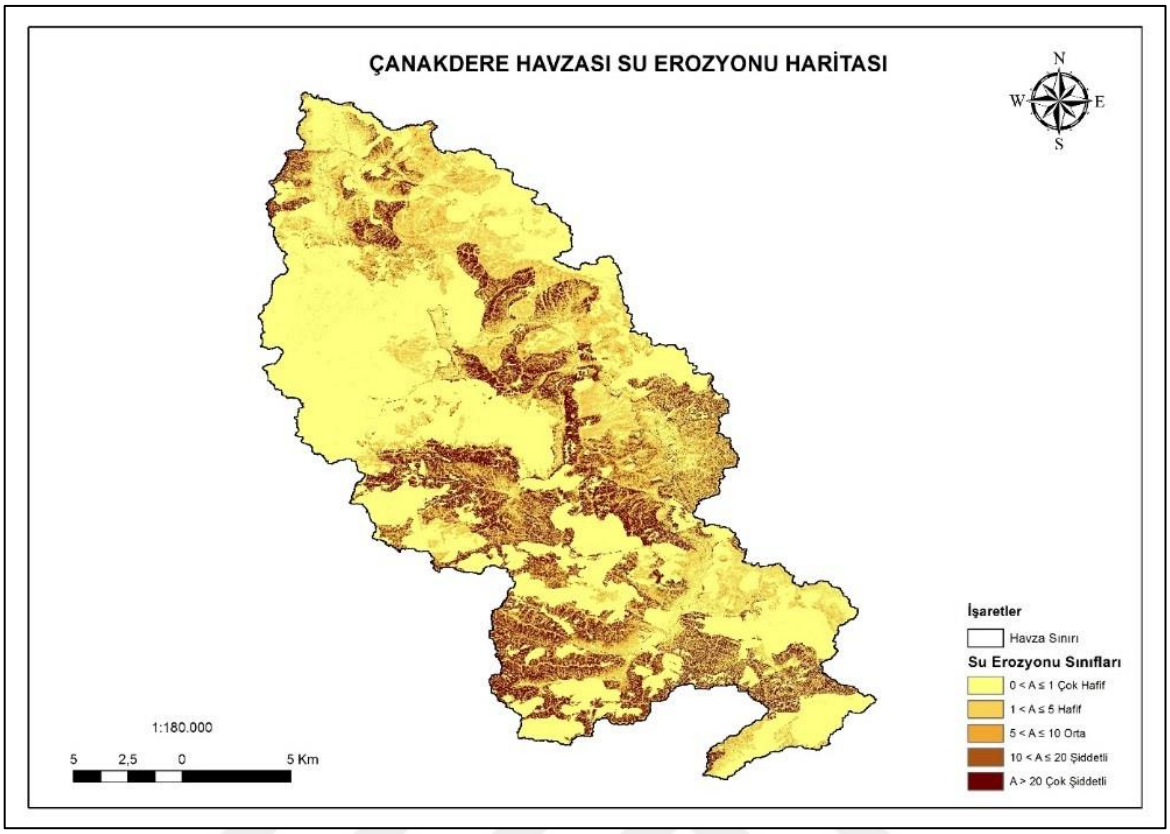
Şekil 4.24: Çanakdere havzası yağışın aşındırma gücü R-faktörü haritası (CEM, 2018).



Şekil 4.25: Çanakdere havzası toprağın erozyona duyarlılığı K-faktörü haritası (CEM, 2018).



Şekil 4.26: Çanakdere havzası C-faktörü haritası (CEM, 2018).



Şekil 4.27: Çanakdere havzası su erozyonu haritası (CEM, 2018).

Tablo 4.8: Çanakdere havzası su erozyonu model çıktıları (ÇEM, 2018).

Çanakdere Havzası	Sınıflar	Piksel Sayısı (10*10m)	Alan (m^2)	Alan (ha)	Maximum Toprak Kaybı (ton/yıl)
1	1	2.009.820	200.982.000	20.098,2	20.098,2
2	2	129.979	12.997.900	1.299,8	2.599,6
3	4	192.784	19.278.400	1.927,8	7.711,4
4	8	235.870	23.587.000	2.358,7	18.869,6
5	16	271.751	27.175.100	2.717,5	43.480,2
6	30	239.053	23.905.300	2.390,5	71.715,9
7	60	152.890	15.289.000	1.528,9	91.734,0
8	120	34.788	3.478.800	347,88	41.745,6
9	300	2.646	264.600	26,46	7.938,0
			326.958.100	32.695,8	305.892,40

Çanakdere Havzası Drenaj Alanı (ha)	32.695,81

Çanakdere Havzası	Çok Hafif	Hafif	Orta	Şiddetli	Çok Şiddetli	TOPLAM
Sınıflar	1	5	10	20	20+	
Alan (ha)	20.098	3.949	2484	2.775	3.390	32695,81
Yüzde(%)	61,47	12,08	7,60	8,49	10,37	100

Çalışma alanının %61,47'sinde çok hafif, %12,08'inde hafif, %7,6'sında orta, %8,49'unda şiddetli ve %10,37'sinde çok şiddetli erozyon görülmektedir.

Çanakdere havzası drenaj alanında yılda 305.892,4 ton toprak su erozyonu sonucu yer değiştirmektedir. Bu da birim alanda 9,35 ton $yıl^{-1}$ ha^{-1} toprağın suyun aşındırma gücü etkisi ile harekete geçtiği anlamına gelmektedir.

Sediman taşınımını etkileyen faktörlerinin (jeolojik, topoğrafik ve klimatolojik) çok fazla ve bunların birbirleriyle olan ilişkilerinin karmaşık oluşu nedeniyle sediman miktarının taşındığı her hangi bir akarsuyunda analitik olarak hesaplanabilmesi oldukça zordur (Aksu ve Uçan, 2012). Sediman verimi hesaplamak için geliştirilmiş birçok farklı tahmin metotları ve yöntemleri bulunmakla birlikte, mümkün olduğu kadar uzun vadeli ölçüm sonuçlarından yararlanılması daha güvenli bir yoldur.

4.1.7. Göksu ve Çanakdere Akarsularının Hidrolik ve Sediman Modeli

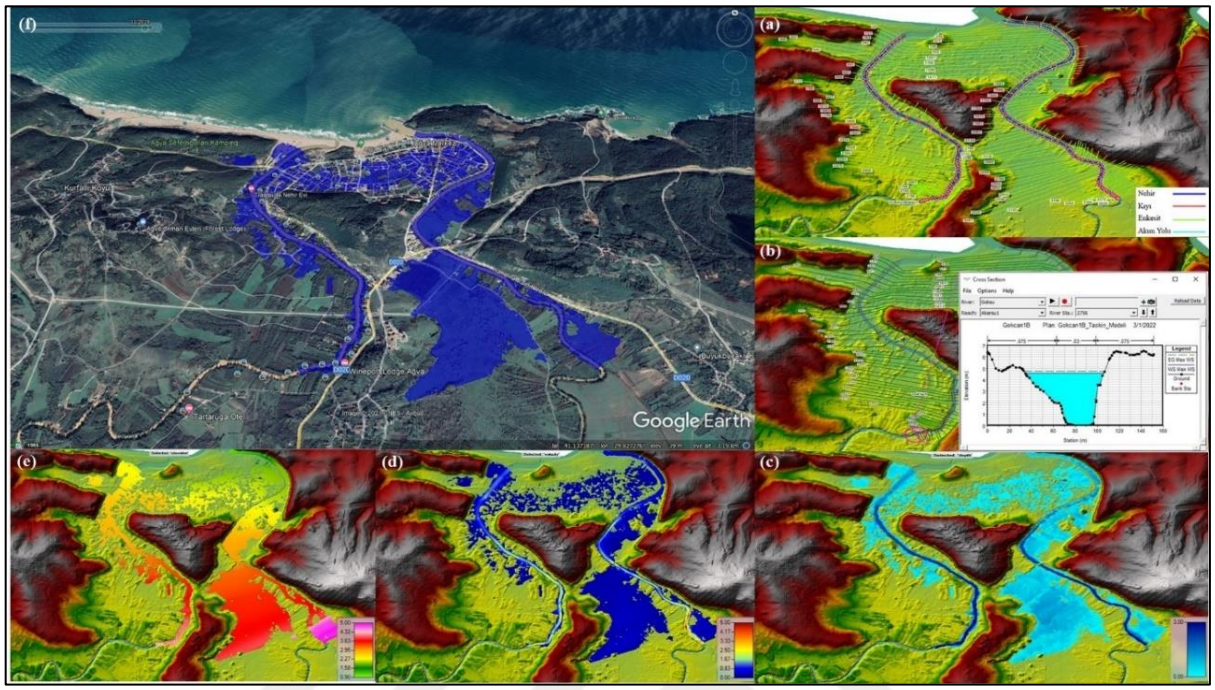
Bu bölümde Göksu ve Çanakdere havzalarında yer alan Göksu ve Çanakdere akarsularının hidrolik ve sediman modeli havzalarda yer alan akım gözlem istasyonları verilerinden elde edilen en yüksek pik debi verileri (300 m^3/s ve 150 m^3/s) ve yangın senaryoları sonucunda elde edilen en yüksek pik debi değerlerine (700 m^3/s ve 450 m^3/s) göre sırasıyla Göksu ve Çanakdere akarsuları için kullanılarak iki taşkın senaryoları şeklinde yapılmıştır. Bu çalışmada hidrolik modeli karasız akım ve sediman modeli ise Quasi-Kararlı olmayan Sediman yöntemlerini kullanılarak yapılmıştır.

4.1.7.1. Hidrolik Modelinden Elde Edilen Sonuçlar

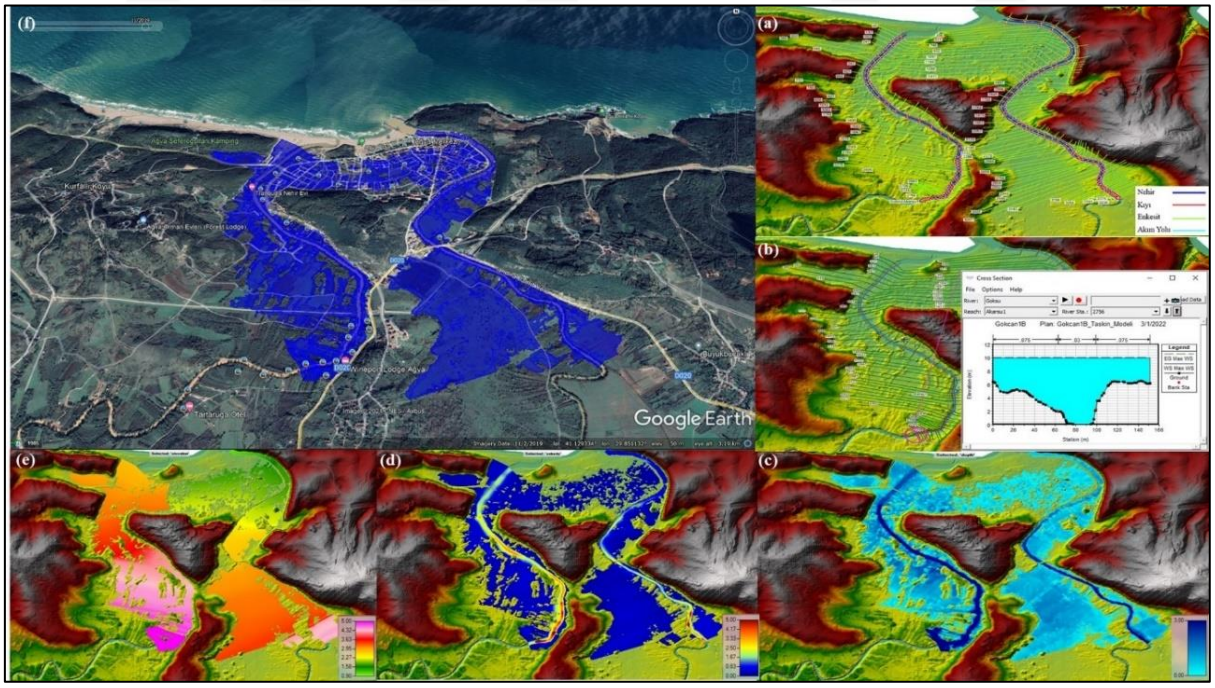
Hidrolik model analizleri sonucunda Göksu ve Çanakdere model alanının yangın senaryosundan elde edilen pik debi ile tarihsel pik debiler göre taşkın yayılım alanında %27 artış göstermektedir. Taşkın yayılım alanı tarihsel pik debilere göre 1.7 km^2 iken yangın senaryosundan elde edilen pik debilerde 2,15 km^2 olarak 0,4 km^2 lik bir artış göstermektedir. Mevcut durumu ve yangın senaryosu için Göksu ve Çanakdere nehirlerinin çıkış noktası (mansap) ve Ağva bölgesinde Kara denize deşarj noktasına yakın alanda pik debilere göre model sonuçları görsel olarak **Şekil 4.28** ve **Şekil 4.29**'da verilmiştir.

Şekil 4.28 ve **Şekil 4.29**'da bölüm (a)'da derelere ait nehir, kıyı, akım yolu ve en kesit çizgilerinden oluşman geometrik verilerini, (b) örnek bir nehir en kesitteki su seviyesinin

profilini, (c) taşkın derinliğini, (d) su taşınım hızını, (e) su yüzey yüksekliği ve (f) ise bölgedeki taşkın yayılım alanlarını her iki taşkın senaryoları için göstermektedir.



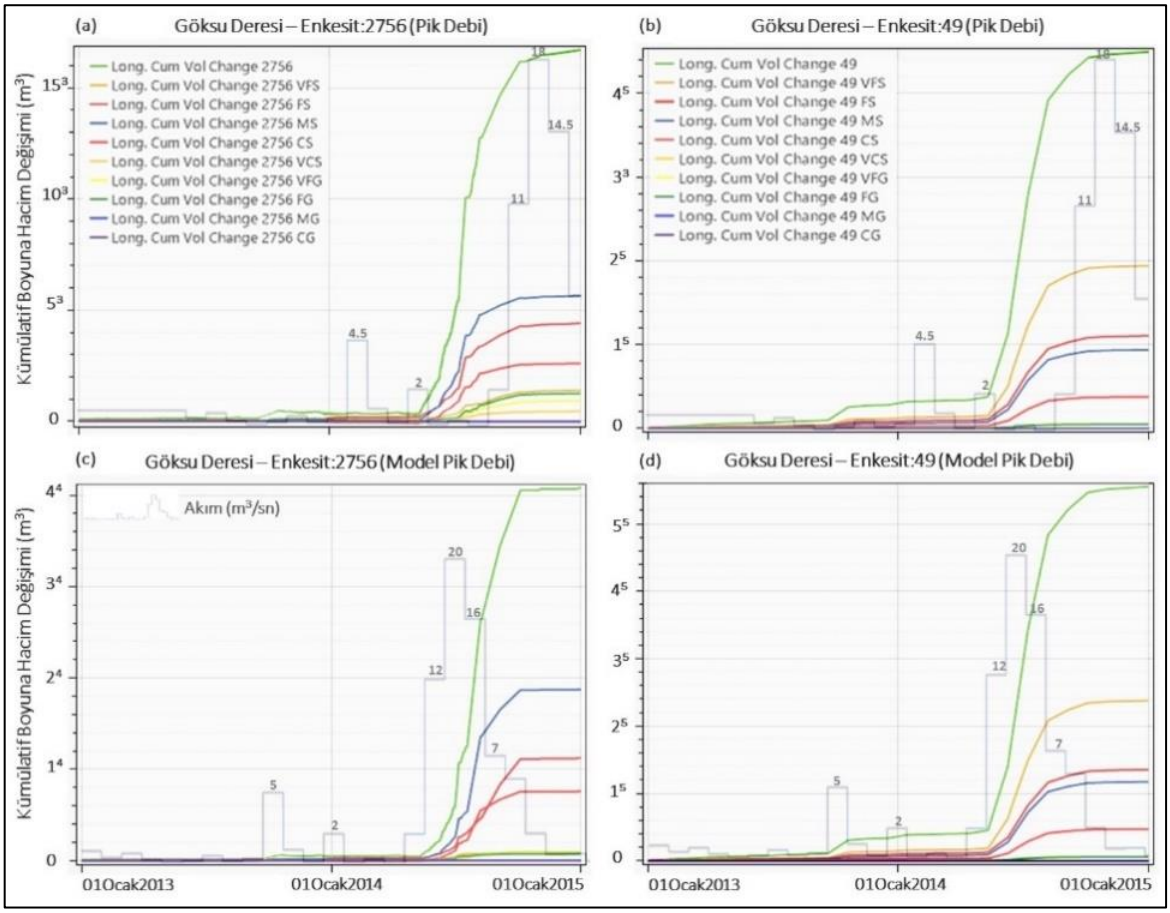
Şekil 4.28: Göksu ve Çanakdere akarsularında pik debiye göre hidrolik model sonuçlarının görsel çıktıları.



Şekil 4.29: Göksu ve Çanakdere akarsularında model (yangın senaryolarından) pik debiye göre hidrolik model sonuçlarının görsel çıktıları.

4.1.7.2. Sediman Modelinden Elde Edilen Sonuçlar

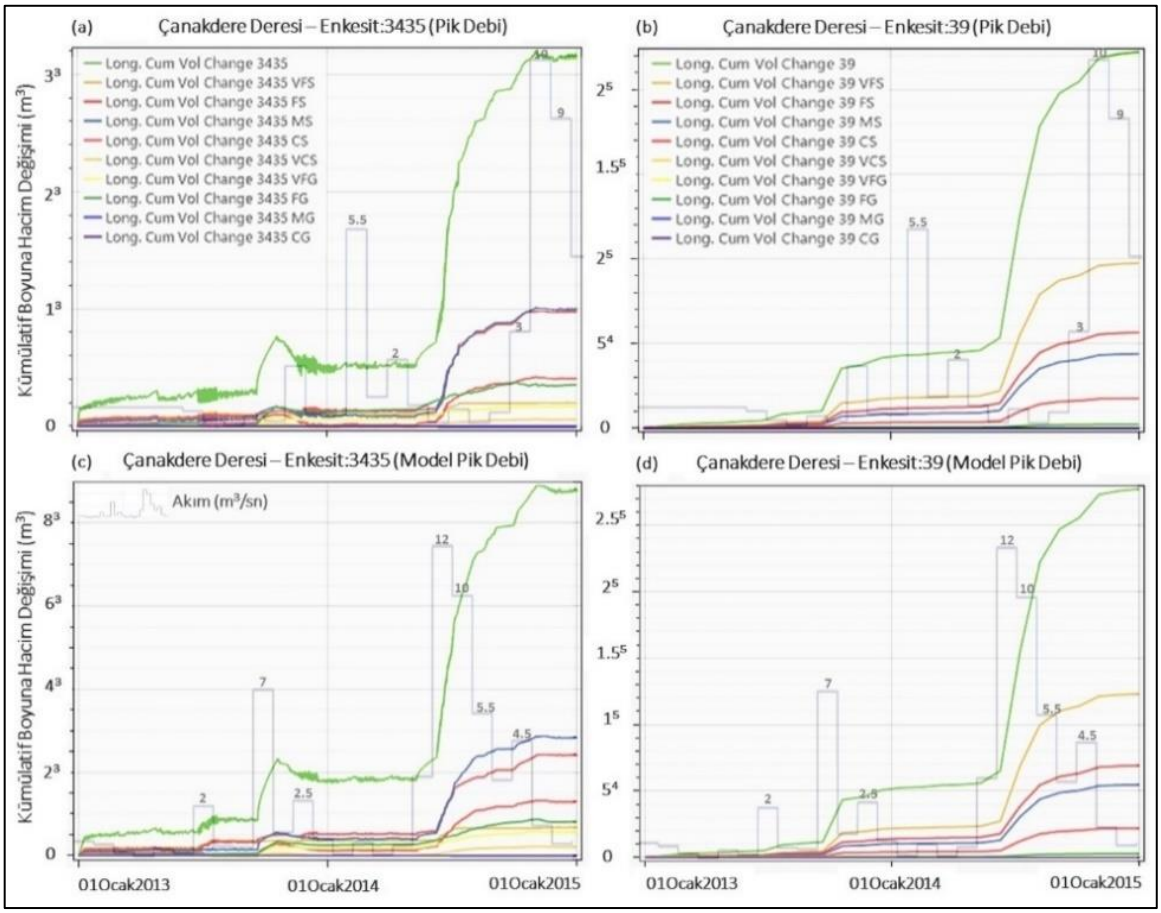
Göksu ve Çanakdere nehirlerinin çıkış noktası (mansap) ve Ağva bölgesinde Kara denize deşarj noktasına yakın alanda pik debilere göre Ocak 2013 ile Ocak 2015 yılları arasında tek boyutlu sediman model sonuçlarından elde edilen grafiksel analizler **Şekil 4.30** ve **Şekil 4.31**'de verilmiştir. Grafiklerde pik debi Göksu ve Çanakdere nehirlerinde bulunan akım gözlem istasyonlarında 2015 su yılına kadar kaydedilmiş en çok yüksek akım debilerini ifade ederken model pik debileri yangın ve ormansızlaşma senaryoları hidroloji model sonuçlarından tahmin edilen en çok akım miktarını m^3/s cinsinden ifade etmektedir.



Şekil 4.30: Göksu deresi için pik debiler (a ve b) ve model pik debilerine göre (c ve d) memba ve mansaptaki en kesitlerinde sediman boyuna kümülatif hacim değişimi (m^3). Boyuna kümülatif hacim değişimi (Long.Cum Vol.Change) 2756: 2756'ıncı en kesitteki sedimanın kümülatif boyuna hacim değişimi, VFS çok ince kum, FS: ince kum, MS: orta boylu kum, CS: iri kum, VCS: çok iri kum, VFG: çok ince çakıl, FG: ince çakıl, MG: orta boylu çakıl, CG: iri çakıl.

Verilen grafiklerde Göksu ve Çanakdere derelerinde tarihsel ve model pik debilerine göre (açık mavi akım çizgileri) memba ve mansaptaki en kesitlerinde sediman kümülatif boyuna hacim değişimi (yeşil çizgi) incelenmiştir. Ayrıca arazi çalışmaları sırasında Göksu ve Çanakdere

akarsularının nehir yatağından alınan sediman numunelerinin laboratuvar ortamında ıslak elek analizlerinden elde edilen dane boyutları ve sınıfları değerleri sediman modeline girildiğinden dolayı model çıktısında daneciklerin sınıflarına göre de boyuna kümülatif hacim değişimi hesaplanmıştır.



Şekil 4.31: Çanakdere deresi için pik debiler (a ve b) ve model pik debilerine göre (c ve d) memba ve mansaptaki en kesitlerinde sediman boyuna kümülatif hacim değişimi (m^3). Boyuna kümülatif hacim değişimi (Long.Cum Vol.Change) 3435: 3435'inci en kesitteki sedimanın kümülatif boyuna hacim değişimi, VFS: çok ince kum, FS: ince kum, MS: orta boylu kum, CS: iri kum, VCS: çok iri kum, VFG: çok ince çakıl, FG: ince çakıl, MG: orta boylu çakıl, CG: iri çakıl.

Sediman model analizleri sonuçlarına göre Göksu deresinde pik debi senaryosunda nehirin memba kısmında (enkesit no. 2756) kümülatif boyuna hacim miktarı $16{,}7x10^3$ (m^3) olarak hesaplanmıştır. Oysa mansap kısmında (enkesit no. 49) $449x10^3$ (m^3) elde edilmiştir ki buda $432x10^3$ (m^3) kümülatif hacim miktarı da artışı göstermektedir. Bu değerler model pik debileri (yanı yangın senaryolarından %14,5 akım miktarı artması durumunda ve bu miktarın istasyonlardan ölçülen en çok akım debi miktarı artırıldığı durumda) senaryosuna göre sediman mansap kısmında memba ile kıyaslandığında $514x10^3$ (m^3) kümülatif hacim miktarı elde edilmiştir (%1260 artış). Çanakdere deresinde ise nehirin memba kısmında (enkesit no. 3435)

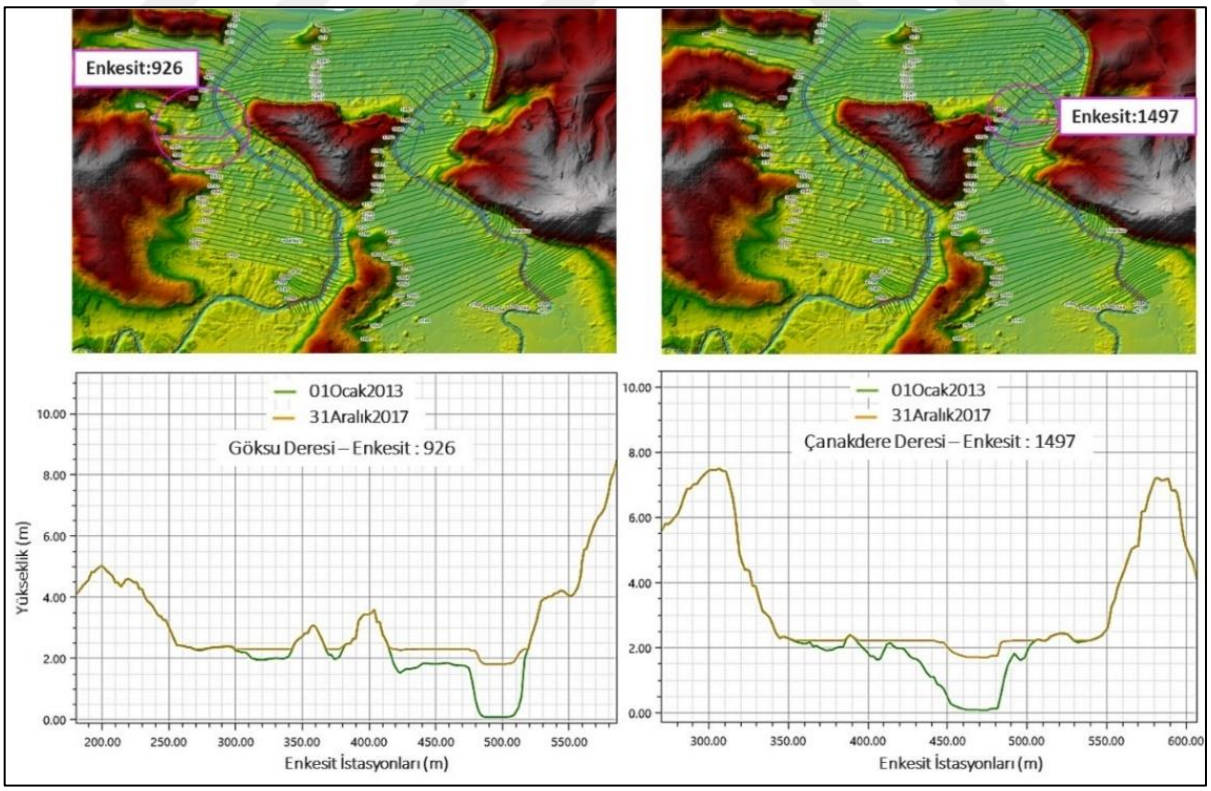
sediman kümülatif hacim miktarı mansap kısmı ile (enkesit no. 49) kıyaslandığında pik ve model pik debilerine göre ciddi artışı göstermektedir. Pik debide membadan mansaba 219x10^3 (m^3), model pik debisinde ise yaklaşık 30 kat kümülatif hacim miktarında artış elde edilmiştir. Göksu ve Çanakdere dereleri için sediman kümülatif hacim miktarları **Tablo 4.9**'da verilmiştir.

Tablo 4.9: Kümülatif Boyuna Hacim Değişimi (m^3). Göksu ve Çanakdere dereleri için 2013-2015 yıllar arası sediman kümülatif hacim miktarlarındaki değişimi.

	Ölçülen Pik Debi'ye göre		Model Pik Debi'ye göre	
Dere Adı	Memba[1]	Mansap[2]	Memba[3]	Mansap[4]
Göksu	16,7x10^3	449x10^3	40,8x10^3	555x10^3
Çanakdere	3,13x10^3	222x10^3	8,84x10^3	277x10^3

[1] Enkesit No. 2756 [2] Enkesit No. 49 [3] Enkesit No. 3435 [4] Enkesit No. 39

Sediman model analizleri sonucunda ayrıca sediman birikimi veya erozyondan kaynaklı derelerin jeomorfolojik değişimi konusunda da bilgi elde edilmektedir. Dere tabanı veya derenin taşkın yatağındaki jeomorfolojik değişiklikleri incelemek için dere en kesitlerini kullanılarak en kesitlerinde yüksekliği enkesit istasyonlarına göre elde edilir. Göksu ve Çanakdere derelerinin 2013-2017 yıllar arasında model pik debilerine göre derelerin sediman kaynaklı jeomorfolojisindeki değişimi örnek en kesitlerinde **Şekil 4.32**'de göstermektedir.



Şekil 4.32: Göksu ve Çanakdere derelerinin 2013-2017 yıllar arasında derelerin sediman kaynaklı en kesitlerin jeomorfolojisindeki değişim.

5. TARTIŞMA

Toprak kaybının sebeplerinin belirlenmesi ve dolayısıyla erozyonu azaltmak için çözüm bulunması iki açıdan önemlidir. İlk olarak tarımsal açısından bakıldığında; uzun vadede, özellikle eğilimli olan toprakların erozyondan dolayı taşınmasından toprağın kalitesi düşecektir. Düşük kaliteli toprakta tarım ürünlerinin üretilmesi büyüme miktarını ve kalitesini doğrudan olumsuz etkileyecektir. İkincisi, erozyondan kaynaklanan toprağın özellikle yağmurlardan dolayı sediman olarak akarsulara taşınmasıdır. Bu akarsulardaki su kalitesini düşürdüğü gibi mansapta birikmelere sebep olacaktır. Sediman birikimi akarsuyun havza içinde yönünün değişmesine sebep olabilir. Bu yön değişimi ise özellikle çıkış noktasına yakın bölgelerde bir taşkın veya sel sürecinde büyük can ve mal kaybına sebep olabilir. Sediman birikim noktaları sediman modelleme aşamasında tespit edilerek bu tip olası noktalara yapısal veya yapısal olmayan çözüm önerileri ile zararın en aza indirilmesi mümkün olabilir. Diğer bir deyişle bir afet döneminde örneğin sel veya orman yangınında erozyon ve sediman ektileri çalışma alanında hangi çevresel etkilere sebep olabileceği belirlenmesi can ve mal güvenliğini artıracaktır.

Yer kabuğundan ayrılan toprak tanecikleri ve dolayısıyla oluşan sedimanları genel olarak birkaç şekilde yer değiştirir, hareket eder ve bir yerden başka bir yere (genelde havzada membadan mansaba ve çıkış noktasına doğru) taşınır. Bunda ek olarak, oluşan sedimanların taşınım şekilleri mevsimsel olarak da değişmektedir. Örneğin ilkbahar yağmur oranı yüksek olduğundan yüzeysel akışlarda artmakta olup sediman hareketi oranı da artacaktır. Yaz aylarında yağışların yok veya çok az olduğu ve yüzeyin kuru olduğu için çok ince toprak tanecikleri ve sedimanları rüzgârın etkisinden dolayı bir yerden başka bir yer taşınır. Sonbahar ve kış aylarında, yüzeydeki su içermiş olan topraklar donarak buza dönüşüyor ve sonra buzların erimesi yoluyla fiziksel veya kimyasal olarak parçalanmasından ve mekanik kuvvetlerin etkilerinden dolayı bir yerden başka bir yere taşınmaktadır. Yüzeydeki erozyon ve sediman oluşumuna ek olarak şiddetli yağmurlarda nehir ve akarsularında artan akımlardan dolayı taşınan su hacmi ve hızı da artacaktır. Buda nehirlerin jeomorfolojisine bağlı olarak nehir kıyıları veya kanal tabanından suyun aşındırma ve kazandırdığı kinetik enerjisinden dolayı toprağın (kum, silt veya çakıl vb.) aşınmasına ve sedimanların bir dereden başka bir dereye

taşınmasına ve sonunda nehir deltasında biriktirmesine neden olur. Bu nedenle, erozyon ve toprak kabı ve dolaysıyla sediman oluşumunu engellemek veya azaltmak için hem yüzey hem de nehir ve kanallarda erozyon yönetim planları ve stratejileri uygulanmalıdır.

Bir havzadaki hidrolojik süreçleri tahmin etmek için en yaygın kullanılan metotlardan biri yağış-akış modellerin uygulanmasıdır. Yağış-akış modellerini kullanarak arazi yüzeyindeki değişikliklerden kaynaklanan hidrolojik değişikliklerin hesaplanması sağlanmaktadır. Hidrolojik modeller büyük veya küçük ölçekte ve farklı zaman periyotlarında (yıllık, aylık, günlük veya saatlik) uygulanabilmektedir. Bu modellerden elde edilen sonuçların dikkati modelde kullanılan verilerin kalitesine bağlıdır. Örneğin bir havzanın topoğrafyasını iyi bir şekilde modele tanıtmak için kullanılan yüzey yükseklik modeli (DEM) veri çözünürlüğü yüksek seçilmelidir. Ayrıca yüksek çözünürlüklü bir DEM verisi modelin hazadaki dereler ve nehir ağlarının gerçekteki konumuna yakın veya örtüşmesine yardımcı olabilmektedir. Toprak tipi ve arazi örtüsü verilerinin yüksek çözünürlüğü modelin gerçek durumunun yansıtılmasında fayda sağlayacaktır. Aynı şekilde meteorolojik verilerinin de hatalı olmaması ve sürekliliği havzanın iklim özelliklerini doğru temsil edilmesinde yararlı olmaktadır.

Yağış-akış modelleri bir havzanın mevcut durumdaki hidrolojik süreçleri hakkında bilgi ve farkındalık sağladığı dışında havzanın gelecekteki olası olaylara karşıda fikirlerin üretilmesinde ve negatif etkileri engellemek veya azaltmakta büyük avantajlar sunmaktadır. Başka bir deyişle Yağış-akış modelleri modeldeki parametrelerin değiştirilmesi yoluyla bir havzanın gelecekteki hidrolojik durumunu önceden tahmin etmesinde yardımcı olmaktadır. Örneğin iklim değişikliğinden kaynaklanan meteorolojik değişikliklerin belli yöntemlerle elde edilen iklim modelleri sonuçlarını kullanarak veya arazi örtüsünde meydana gelen değişiklikleri (örneğin şehirleştirme) hidrolojik modele tanımlandıktan sonra bu değişikliklerin yaratacağı etkiler ile ilgili fikirler sağlayabilmektedir. Bu değişikliklerin havzada yaratacağı etkiler örneğin su kalitesi üzerinde, yüzeysel akışlarda, su ve sediman veriminde, toprak kaybı, tarımsal alanlarda ise nitrojen ve fosfor ve diğer kirleticileri gibi meydana gelen etkilerinden önemli ve faydalı bilgi elde etmeye olanak sağlayacaktır.

Bir havzadaki hidrolojik süreçlerindeki değişikliklerden dolayı birçok çevresel ve ekolojik sorunlar ortaya çıkabilir. Bu sorunlar, yüzeysel akışların artması ve bir şiddetli yağışlar sonucunda meydana gelecek sel ve taşkınlar, şehir alanlarında araçlar veya yüzeydeki diğer kirletici maddelerin bu taşkınlarla akarsulara taşınması ve dolayısıyla suyun kirlenmesi ve sucul

canlıların yaşamını tehlikeye salmak şeklinde örnek verilebilir. Bu sorunlardan erozyon ve sediman olayına bakıldığında bu konuyu arazi fazı ve akarsu fazı şeklinde iki farklı kategoride incelenmelidir. Bu sediman azaltma stratejileri kaynağa göre farklılık gösterdiğinden ve farklı yönetim yaklaşımları gerektirdiğinden, arazide oluşan sedimanı kanallara göre ayır ayrı ele alınması önemlidir.

Arazi fazı, havza veya alt havza düzeyinde arazi yüzeyindeki sedimanın oluşumuna sebep olan nedenler dikkate alınarak incelenmektedir. Bu tez çalışmasında arazi örtüsü/kullanımındaki değişimi olarak orman yangınları ve yanmış alanların tarım alanlarına dönüştürülmesi arazi fazı kapsamında incelenmiştir. Arazi fazındaki sedimanın oluşumuna sebep olan ve dikkate alınması gereken diğer önemli nedenleri ise tarımsal faaliyetleri ve şehirleştirmedir. Yetersiz arazi yönetimi uygulamaları ile tarımsal faaliyetleri yoğunlaştırma, toprak erozyonunu hızlandırır ve sedimanın akarsu ağına taşınmasını artırır. Tarımsal ve hayvancılık için kullanılan araziler, tarımsal faaliyet olarak kategorize edilir ve bu araziler çiftçilik ve toprak işleme gibi faaliyetlerden dolayı erozyon ve sedimantasyona maruz olan alanlardır. Tarım ve hayvancılıktan kaynaklanan kirleticiler arasında sediman, besinler, patojenler, böcek ilaçları, metaller ve tuzlar bulunur. Tarımsal su kirliliğinin en yaygın kaynağı, tarlalardan yıkanan topraklardır. Yağmur suyu toprak parçacıklarını (sedimanı) taşır ve onları yakındaki göllere veya akarsulara boşaltır. Çok fazla sediman suyu bulanıklaştırabilir ve su bitkilerine ulaşan güneş ışığı miktarını azaltabilir. Ayrıca balıkların solungaçlarını tıkayabilir veya balık larvalarını boğabilir. Ek olarak, gübreler (fosfor, azot ve potasyum gibi), böcek ilaçları ve ağır metaller gibi diğer kirleticiler genellikle toprak parçacıklarına yapışır ve su kütlelerine karışarak algalelerin hızlı büyümesine ve bu şekilde çoğu su yaşamı için ölümcül olan oksijenin tükenmesine neden olur. Bu nedenle sorumlu kurumlar tarafından tarımsal faaliyetler olarak kabul edilen tüm işlemler için yönetim ve koruma planı veya erozyon ve sedimantasyon kontrol planı hazırlanmalı ve uygulanmalıdır. Koruma planının unsurları, uygun yönetim ve/veya yapısal en iyi yönetim uygulamalarını içermeli ve planların uygulanmasından arazi sahibi sorumlu olmalı.

Şehirleştirilme sonucunda, inşaat şantiyelerinde (bina, yol, maden ocakları gibi) kazı çalışmalarından kaynaklanan toprağın saha dışına ağır makine ve ekipmanlar, rüzgâr veya su yoluyla taşınma nedeniyle sedimantasyon konusunda karşılaşılan en kritik çevresel sorunlardan biridir. Her ne kadarda inşaat sahalarındaki erozyon bir su havzasında sadece nispeten küçük bir arazi alanını etkilese de ancak, önemli bir sediman kaynağıdır, çünkü toprak yapısının

oldukça bozuk olan bu arazilerde erozyon potansiyeli genellikle tarım arazilerindekinden 100 kat daha fazladır. Kentsel alanlarda, inşaat sahaları genellikle çevreye büyük miktarlarda beton ve toksik yapı malzemeleri taşınmasına sebep olur. Kötü hava koşullarında, bu parçacıklar yakındaki kanallara taşıdığında ve kentsel kanalizasyonlarında sediman birikmesi durumunda, şiddetti yağışlarda esnasında sel riskini ciddi bir şekilde artırır ve toplum için yıkıcı olabilir. İnşaat çalışmalarından kaynaklanan erozyon ve sedimanı önlemek veya azaltmak için farklı erozyon kontrol yöntemleri ve taktikler bu tür çalışma sahalarında uygulanması gerekmektedir. İnşaat aşamaları, erozyonu azaltmak için yararlı bir yoldur. İnşaat aşaması, proje devam ederken arazinin kasıtlı olarak, her seferinde bir alan temizlendiği zamandır. Tüm sahayı temizlemenin aksine, evreleme daha geniş alanların çıplak kalmasını ve erozyona maruz kalmasını önler. Erozyonun azaltılmasına yönelik bir diğer taktik, kazıları minimum yağış olduğunda planlamak ve toprağı uzun süre açıkta bırakmamak için verimli bir şekilde kazmaktır. İnşaat sahaları ve şantiyelerde toprağın yer değiştirmesini azaltmak için bozulmuş toprağı belli materyallerle ve yöntemlerle kapatmak veya toprak sıkışmasını azaltmak için ağır ekipman ve makinelerin mümkün olduğu kadarıyla kullanılmasını sınırlamak şeklinde olabilir. Bunlara ek olarak inşaat alanlarında sedimanı kontrol etmek için farklı metotlarda örneğin şantiyelerde sediman tutma havuzları, çakıl giriş kapısı, silt çitleri gibi yöntemler kullanılabilir. Aslında, erozyonun önlenmesi, erozyonu kontrol etmenin en iyi ve en kolay yolu olduğundan, inşaat planının bir parçası olmalıdır.

Doğal nedenlerden veya antropojenik faaliyetlerden kaynaklı söz konusu olan erozyon ve sediman olayı her havzada değişik parametrelere ve yaratacağı sorunlara göre farklı şekilde incelenmeli ve yönetilmelidir. Başka bir deyişle, erozyon ve sediman kontrolü ve yönetimi ilk olarak bir havzadaki baskın olduğu arazi örtüsü/kullanımın türüne göre ve sonra o havzanın topoğrafik özellikleri ve iklim durumuna göre ele alınmalıdır. Örneğin bir havzada eğer tarımsal faaliyetler baskınsa taşınan sedimanın su kalitesi üzerindeki etkisi dikkate alınmalı. Eğer orman alanıysa ormanların bozulmasından dolayı sediman verimi artışının su yapıları üzerindeki etkileri ele alınmalı. Havzanın dominant arazi kullanımı kentsel alanlarsa bu alanlarda şehirleştirme ve inşaat çalışmalarından kaynaklanan sedimanın ve kirletici maddelerin kanalizasyon sistemine taşınmasıyla tıkanarak taşkına ve öte yandan şiddeti yağışlarda yüzeysel akışlardan dolayı otopark gibi alanlardan kirletici maddelerin akarsulara taşınmasının can ve mal kaybına olası sağlayacağı gibi faktörleri güz önüne alarak gelecekteki olası sorunları engellemek veya azaltmak için erozyon ve sediman kontrolü ve yönetimi yapılmalıdır.

Dolayısıyla, erozyon ve sediman sorunlarıyla karşı karşıya kalmamak için gelecekte olası değişiklikleri modellerden faydalanarak ön görülmesi sürdürülebilir havza yönetiminde kara vericilere ve yönetim açısından büyük faydalar ve avantajlar sağlayacaktır.

Göksu ve Çanakdere havzalarını kapsayan hidrolojik ve sediman taşınım modellerinin yangın ve ormansızlaşma senaryoların sonucu incelendiğinde, 13'üncü alt havza sediman taşınımında en riskli alandır. Bu alt havzanın toprak dokusu ince taneli olup çok eğimli topoğrafyaya sahiptir. Dolayısıyla, toprak tipi veya arazi topografyası (dik yamaçlardaki arazi) alt havzadaki toprak kaybını artırır. Ayrıca yüksek akış koşullarında toprak erozyonunu ve dolayısıyla sediman taşınım miktarı da artar. Bu yüzden bu alt havzada herhangi bir yangın olmadan gerekli önlemler alınarak erozyondan korunmalıdır. Bunu sağlamak için bu alt havzadaki ormanlık alan diğer ormanlık alanlardan daha sert tedbirlerle korunmalıdır. Elde edilen sonuçlar, bir yangın olayından önce karar vericiler için erozyon potansiyeli kritik düzeyde yüksek olan alan veya alt havzaları netleştirir. Bu sayede uygulanacak yangın önleme yöntemleri ile olası çevresel, ekolojik ve ekonomik problemlerin önüne geçilebilecektir.

Böylece bu havzalarda sediman taşınım yönetim planına katkı sunulacaktır. Böyle bir katkı sürdürülebilir bir yönetim için önemlidir. Üstelik çalışma alanı olarak seçilen havzalarda yakın bir zamanda yapılacak olan barajlar göz önüne alındığında bu çalışma daha önemli ve hayati hale gelmektedir. Ayrıca İstanbul'a su temini amacıyla yapılan yapıların ömürleri bitmeden kullanılamaz hale gelmemesi için de sediman miktarının sınırlandırılması gerekmektedir. Bu da ancak bu havzalardaki sediman kaynaklarının tespiti, sınırlandırılması için çözüm önerileri ile mümkündür. Çünkü sediman birikimi için barajda ayrılan ölü hacim baraj boyutunu ve ömrünü etkilemektedir. Sediman taşınımı sadece barajların yapıldığı yerde ve havzadan ayrı olarak ele alınamaz örneğin ortalama 1 cm tarıma elverişli toprak 100-1000 yıl arasında oluştuğu düşünüldüğünde, dolayısıyla tüm havzada sürdürülebilir bir sediman yönetim politikasının benimsenmesi gereklidir ki bu ancak modelleme çalışmalarının ışığı altında oluşturulabilir. Bu yüzden bu çalışmada, sediman taşınımı DSİ tarafından ölçülen Göksu ve Çanakdere akarsularındaki iki istasyondan elde edilen akım ve sediman verilerinden yararlanılarak modellenmektir. Yapılan modelin oluşturulması için çeşitli arazi ziyaretleri yapılarak arazi kullanım ve yapısı hakkında detaylı bilgi toplanmıştır. Böylece modelleme sırasında ihtiyaç duyulan parametrelerinin belirlenmesindeki doğruluk artırılmıştır. Ayrıca havzalarda sediman oluşumunu etkileyen faktörler belirlenerek etkileri ve önem dereceleri araştırılmıştır. Literatüre göre bu faktörlerden bazıları; havzanın alan büyüklüğü, topoğrafyası,

arazi kullanım türü ve yüzdesi, arazinin toprak tipi, havzadaki bitki örtüsü ve vejetasyonların karakteristikleri, havzanın meteorolojik özellikleri, kanal geometrisi, akım hızı, taşkın yatağı ve çatallaşma oranı olarak sayılabilir. Bu çalışma sonucunda sediman taşınımında hangi faktörün daha etkili ve önemli olduğu tespit edilmektedir. Ayrıca bu tez çalışmasında orman yangınlarından sonra yangınların özellikle yüzeysel akışı, erozyon ve sediman üzerindeki negatif etkilerini azaltması ve iyileştirme planları ve stratejileri olarak ve dünya çapında da bu tür olayların yönetiminde uygulanan bazı yönetim önerileri de sunulmuştur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışma kapsamında, orman yangınları ve yangınlar sonrası ve yangınlardan dolayı ağaçların yok edilmesi ve bu alanların tarımsal faaliyetler için kullanılması durumunda hidrolojik sonuçlarını ve akarsu akışı ve sedimantasyon oranları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için SWAT yağış-akış modelini uygulama potansiyeli araştırılmıştır. Bunun için, mevcut durum (temel veya yangın öncesi) ve farklı yangın ve ormansızlaştırma senaryolar tasarlanarak bu senaryoların sediman yükü üzerindeki ilgili etkilerini analiz etmek için akış ve erozyon modelleri uygulanmaktadır. Model, temel senaryo için alt havza ölçeğinde yangın sonrası değişiklikleri tahmin etmek için belirlenen periyotlarda istasyonlarda akım ve askıda sediman konsantrasyonu gözlemleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Modelin akım ve sediman için kalibrasyon aşamasında tahminleri ve performansı NSE'ye göre yüksek çıkmış ve hedef fonksiyonları sırasıyla 0,85 ve 0,63 olarak elde edilmiştir. Duyarlılık analizi sonuçları, hidrolojik ve sediman değişkenlerinin en hassas parametresinin sırasıyla SCS akış eğrisi sayısı (CN2) ve kanal aşınabilirlik faktörü (CH_COV1) olduğunu göstermiştir. Orman yangınları için model, literatürde belirtildiği gibi arazi kullanım tipi, CN değeri ve toprak aşınabilirlik faktörü (soil erodibility factor) değiştirilerek uygulanmıştır. Farklı yangın sonrası senaryolara göre, orman yangını sonrası seçilen alt havzalardaki hidrolojik ve sediman miktarındaki değişimler, yangın öncesi mevcut durum senaryosunda elde edilen değerlerle karşılaştırıldı. Yangın öncesi senaryo ile karşılaştırıldığında, yangın sonrası senaryoda seçilen alt havzalarının toplam su ve sediman verimi ve toprak erozyonu oranı önemli ölçüde arttığını göstermiştir. En yüksek yangın mekansal dağılımına sahip orman yangını senaryosunda, aşırı yüzeysel akışının (yangın sonrası %14,5 artış) yüksek aşındırıcılığı nedeniyle sediman verimi 6,5 kat arttığını model tahmin etmiştir. Buna ek olarak hidrolik modelinde yangın sonrası Yağış-akış modeli sonucunda elde edilen akım miktarındaki artış oranı havzadaki akım gözlem istasyonları verilerinde saptanan en yüksek debi miktarına eklendiği zaman membadan mansaba doğru taşınan sedimanın kümülatif hacim miktarında ciddi artışlar meydana geldiği gösterilmiştir. Yangının bir sonucu, yangında kaynaklanan bitki örtüsünün yerden kaldırılması, yüzeysel akışının artmasına ve dolayısıyla dereye sediman taşınmasına neden olduğu bu çalışma kapsamında kanıtlanmıştır.

Göksu ve Çanakdere su havzalarının hidrolojik tepkisi üzerindeki arazi kullanımı/örtü değişiklikleri ve ormansızlaşmanın etkisinin değerlendirilmesi, ormansızlaşma sonrasında yüzeysel akışı ve erozyon oranları üzerindeki etkileri de benzer şekilde bu tez çalışması kapsamında incelenmiştir. Hidrolojik modellerin geliştirilmesi, toprak erozyonu ve sedimantasyon gibi ormansızlaşmanın olumsuz etkileriyle başa çıkmak için yönetim uygulamalarına etkin bir şekilde yardımcı olabilir. Bu çalışma, arazi kullanımı/örtü değişikliklerinin (yani ormansızlaşma) hidrolojik sonuçlarını ve bunların yüzeysel akışı, erozyon, temel ve ormansızlaşma sonrası senaryolar altındaki sediman yükü üzerindeki etkilerini değerlendirmek için SWAT yağış-akış modelinin uygulanabilirliğini araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, en yüksek mekansal dağılıma sahip ormansızlaşma senaryosunda seçilen alt havzalar için toplam yüzeysel akışı ve sediman veriminin, ormansızlaşma sonrası aşırı yüzey akışının (%24 artış) yüksek erozivitesi nedeniyle sediman veriminin 3,5 kat arttığını göstermiştir. Buna karşılık, ormansızlaştırma durumunda (senaryo 1 ile 3) ağaçların ve bitki örtüsünün kaldırılması nedeniyle, buharlaşma, yaprak alan indeksi ve nehire taşınan çözünmüş oksijen ters oranlar göstermiş ve değerler, mevcut duruma göre sırasıyla %5, %24 ve %17 azalmıştır. Ayrıca, hidrolik model çıktılarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde taşkın yayılım alanı havzadaki akım istasyonlarından ölçülen en yüksek debilere göre 1.7 km^2 iken yangın senaryosundan elde edilen pik debilerde 2,15 km^2 olarak 0,4 km^2 lik bir artış göstermiştir. Sediman model sonuçlarına bakıldığında ölçülen pik debide membadan mansaba kümülatif sediman hacim $219x10^3$ (m^3), yangın sonrası pik debisinde ise yaklaşık 30 kat kümülatif hacim miktarında artış elde edilmiştir.

Bu çalışma, farklı senaryolar altında orman yangınları ve ormansızlaşmanın sediman yükü üzerindeki etkisini analiz etmek için hidrolojik ve erozyon modellerinin potansiyel kullanımını önermektedir. Orman yangınlarının ve ormansızlaşmanın hidrolojik faydaları üzerindeki sonuçları, karar vericilerin, orman bozulmasının sediman yükü ve çevresel sorunları üzerindeki etkisini sınırlamak için yangın sonrası ormansızlaşmayı azaltma planlarını daha iyi seçmelerine yardımcı ve olanak sağlayacaktır. İklim modeli simülasyonlarına göre iklim değişikliği altında gelecekteki büyük yangınların hidrolojik etkileri, havzadaki orman yangınlarından sonra meydana gelebilecek hidrolojik ve sedimantolojik değişikliklerin kapsamını tahmin etmek için daha fazla çalışma olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Abad, J.D., Buscaglia, G.C., Garcia, M.H., 2008. 2D stream hydrodynamic, sediment transport and bed morphology model for engineering applications. *Hydrol. Process*. 22, 1443–1459.

Abbaspour, K.C., Vejdani, M, Haghighat, S., 2000. SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 43(5), 1596-1602. https://doi.org/10.13031/2013.3000.

Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., van Genuchten, M.T., 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zo. J.* 3, 1340–1352.

Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R., 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol*. 333, 413–430.

Aber, J.D., 1992. Nitrogen cycling and nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *Trends Ecol. Evol*. 7, 220–224.

Akbaş, A., 2005. *İstanbul Su Kaynaklarının İncelenmesi Yeşilçay ve Melen Sistemlerinin Ekonomik Yönden Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri.

Aksoy, E., Panagos, P., Montanarella, L., Jones, A., 2010. Integration of the Soil Database of Turkey, *Earth*.

Aksu, N., Uçan, K., 2012. Hurman Çayı Havzasında Ölçülen ve Ampirik Yöntemlerle Hesaplanan Sediman Verimlerinin Karşılaştırılması. *KSU J. Nat. Sci*. 15.

Aliye, A., Modibbo, N., Medugu, N., Ayo, O., 2014. Impacts of Deforestation on Socio-Economic Development of Akwanga Nasarawa State. *Int. J. Sci. Environ. Technol*. 3, 403–416.

Allison., F.E., 1973. *Soil Organic Matter and Its Role in Crop Production*.

Amundson, R., Berhe, A.., Hopmans, J.., Olson, C., Sztein, A.E., Sparks, D.., 2015. Soil and human security in the 21st century. *Science* (80-.). 348.

Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Griensven, A. Van, 2012. SWAT: Model Use, Calibration, And Validation. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 55, 1491–1508.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assesment Part I: Model development. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 34, 73–89.

Arnold, J.G. and Allen, P.M., 1996, Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds, *Journal of hydrology*, 176(1-4), pp.57-77.

Arnold, J.G., Williams, J.R., Maidment, D.R., 1995. Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins. *J. Hydraul. Eng.* 121, 171–183.

ASF, 2015. ALOS PALSAR - Radiometric Terrain Correction | *ASF. Alaska Satell. Facil. - Prod. Guid.* 12.

Atalay, I.,1986, Vegetation formations of Turkey. *Travaux - Institut de Geographie de Reims*, 65–66, 17–30, https://doi.org/10.3406/tigr.1986.1183.

Avwunudiogba, A., Hudson, P.F., 2014. A Review of Soil Erosion Models with Special Reference to the needs of Humid Tropical Mountainous Environments. *Eur. J. Sustain. Dev.* 3, 299–310.

Bagnold, R.A., 1977. Bed load transport by natural rivers, *Water resources research*, 13(2), pp.303-312.

Basso, M., Vieira, D.C.S., Ramos, T.B., Mateus, M., 2020. Assessing the adequacy of SWAT model to simulate postfire effects on the watershed hydrological regime and water quality. *L. Degrad. Dev.* 31, 619–631.

Bayazıt, M. 1998. *Hidrolojik Modeller*. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Beaty, K.G., 1994. Sediment transport in a small stream following two successive forest fires. *Can. J. Fish. Aquat. Sci*. 51, 2723–2733.

Bergström, S., 1976. Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. *Smhi RHO* 7, 134.

Bettess, R., Fisher, K., Hardwick, M., Holmes, N., Mant, J., Sayers, P., Sear, D., Thorne, C., 2011. *Key Recommendations for Channel management*.

Beven, K., Binley, A., 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrol. Process. 6, 279–298.

Bivolarski, B., 2019. Environmental and Social Economic Consequences of Forest Fires on the Territory of Stara Zagora Region. *Trakia J. Sci.* 17, 158–164.

Bonan, G.B., 1999. Frost Followed the Plow: Impacts of Deforestation on the Climate of the United States. *Ecol. Appl.* 9, 1305.

Bonumá, N.B., Rossi, C.G., Arnold, J.G., Reichert, J.M., Minella, J.P., Allen, P.M., Volk, M., 2014. Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified SWAT Model. *J. Environ. Qual.* 43, 55.

Bredemeier, M., 2010. Forest, climate and water issues in Europe. *Ecohydrology.* 130, 126.

Brevik, E.C., 2006. Soil health and productivity. Soils, Plant Growth Crop Prod. *Encycl. Life Support Syst. I*.

Briak, H., Moussadek, R., Aboumaria, K., Mrabet, R., 2016. Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 4, 177–185.

Canfield, H.E., Goodrich, D.C., Burns, I.S., 2005. Selection of parameters values to model post-fire runoff and sediment transport at the watershed scale in southwestern forests. Proc. 2005 Watershed Manag. *Conf. - Manag. Watersheds Hum. Nat. Impacts Eng. Ecol. Econ. Challenges* 561–572.

Carlucci, M., Zambon, I., Colantoni, A., Salvati, L., 2019. Socioeconomic development, demographic dynamics and forest fires in Italy, 1961-2017: A time-series analysis. *Sustain.* 11.

Carvalho-Santos, C., Marcos, B., Nunes, J.P., Regos, A., Palazzi, E., Terzago, S., Monteiro, A.T., Honrado, J.P., 2019. Hydrological impacts of large fires and future climate: Modeling approach supported by satellite data. *Remote Sens.* 11.

CEM, 2018. Dynamic Erosion Model and Monitoring System (DEMIS) at the National Scale in Turkey. *Repub. Turkey Minist. Agric. For. Gen. Dir. Combat. Desertif. Erosion, Turkey* (in Turkish).

ÇEM, 2018, Türkiye'de Erozyon, https://cem.csb.gov.tr/turkiye-de-erozyon, [Erişim tarihi: 10 Nisan 2018].

Certini, G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia* 143, 1–10.

CFSR, *2018, Global Weather Data for SWAT*, https://swat.tamu.edu/data/cfsr, [Ziyaret tarihi: 12 Ocak 2018].

Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W., 1988. *Applied hydrology McGraw-Hill International editions*, New York, USA.

Chrisphine, O., Maryanne, O., Boitt, K.M., 2015. Assessment of Hydrological Impacts of Mau Forest, Kenya. *J. Waste Water Treat. Anal.* 07, 1–7.

Citiroglu, H., Barut, I., Zuran, A., 2011. Groundwater vulnerability assessment in the Loussi polje area, N Peloponessus: the PRESK method, *Advances in the Research of Aquatic Environment.*

CLC, 2018. CLC 2018. Eur. Union, Copernicus L. Monit. Serv. 2018, *Eur. Environ. Agency*.

Cüceloğlu, G., 2013. *Darlık Havzasının Model Destekli Hidrolojik Analizi*. İstanbul Tek. Üniversitesi- Yüksek Lisans, Fen Bilimleri.

Cuceloglu, G., Abbaspour, K.C., Ozturk, I., 2017. Assessing the water-resources potential of Istanbul by using a soil and water assessment tool (SWAT) hydrological model. *Water* (Switzerland) 9.

Cullu, M.A., Gunal, H., Akca, E., Kapur, S., 2018. *Soil Geography. In: Encyclopedia of Environmental Change.* The Soils of Turkey. World Soils Book Series. Springer, Cham, pp. 105–109.

DeBano, L.F., 2000. The role of fire and soil heating on water repellency. Soil Water Repellency Occur. *Consequences, Amelior*. 232, 193–202.

Demir, M., Kucukosmanoglu, A., Hasdemir, M., Acar, H. and Ozturk, T., 2009. Assessment of forest roads and firebreaks in Turkey. *African Journal of Biotechnology*, 8(18).

Diaz, J.M., 2012. Economic impacts of wildfire. *South. Fire Exch*. 498, 2012–2017.

Dile, Y.T., Srinivasan, R., 2014. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: An application in the blue nile river basin. *J. Am. Water Resour. Assoc*. 50, 1226–1241.

Dinçsoy, Y., 2013. Erosion and Sediment Control. *Gt. Work. Urban Water Resour*. 761–811.

Duru, U., 2015. *Modeling Sediment Yield And Deposition Using The Swat Model*. PhD Thesis. Department of Geosciences.

Ekinci, H., 2006. Effect of Forest Fire on Some Physical , Chemical and Biological Properties of Soil in Çanakkale , Turkey. *Int. J. Agric. Biol*. 8, 102–106.

EPA. 2021, *Watershed Academy Web-Fundamentals of Rosgen Stream Classification System*, https://cfpub.epa.gov/watertrain/moduleFrame.cfm?parent_object_id=1199, [Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2021].

Ewing, R., 1996. Postfire suspended sediment from Yellowstone National Park, *Wyoming. Water Resour. Bull*. 32, 605–627.

Farley, K., Jobbágy, E., Jackson, R., 2005. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Glob. Chang. Biol*. 11, 1565–1576.

Fernández, C., Fernández-Alonso, J.M., Vega, J.A., 2020. Exploring the effect of hydrological connectivity and soil burn severity on sediment yield after wildfire and mulching, *Land Degradation and Development.*

Fernández, Vega, J.A., Vieira, D.C.S., 2010. Assessing soil erosion after fire and rehabilitation treatments in NW Spain: Performance of rusle and revised Morgan-Morgan-Finney models. *L. Degrad. Dev*. 21, 58–67.

Fuka, D.R., Walter, M.T., Macalister, C., Degaetano, A.T., Steenhuis, T.S., Easton, Z.M., 2013. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrol. Process*. 28, 5613–5623.

Gellis, A., Fitzpatrick, F., Schubauer-Berigan, J., 2016. A Manual to Identify Sources of Fluvial Sediment. *U.S. Environ. Prot. Agency, Washington*, DC, EPA/600/R1, 106.

Goodrich, D.C., Canfield, H.E., Burns, I.S., Semmens, D.J., Miller, S.N., Hernandez, M., Levick, L.R., Guertin, D.P., Kepner, W.G., 2000. *Rapid Post-Fire Hydrologic Watershed Assessment using the AGWA GIS-based Hydrologic Modeling Tool*. Introduction.

Gottfried, G.J., Neary, D.G., Baker, M.B., Ffolliott, P.F., 2003. Impacts of wildfires on hydrologic processes in forest ecosystems: Two case studies. *First Interag. Conf. Res. Watersheds. Dep. Agric. Agric. Res. Serv*. 668–673.

Green, H., Ampt, G.A., 1911. Studies on soil physics: Part II — the permeability of an ideal soil to air and water. *J. Agric. Sci*. 4, 11–24.

Gull, S., MA, A., Dar, A.M., 2017. Prediction of Stream Flow and Sediment Yield of Lolab Watershed Using SWAT Model. *Hydrol. Curr. Res*. 08, 1–9.

Gupta, H.V., Soroosh, S., Yapo, P.O., 1999. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *J. Hydrol. Eng*. 4, 135–143.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference Crop Evapotranspiration From Ambient Air Temperature. *Pap. - Am. Soc. Agric. Eng*.

Harrison, M.E., Page, S.E., Limin, S.H., 2009. The global impact of Indonesian forest fires. *Biologist* 56, 156–163.

Hassan, M.A., Roberge, L., Church, M., More, M., Donner, S.D., Leach, J., Ali, K.F., 2017. What are the contemporary sources of sediment in the Mississippi River? *Geophys. Res. Lett.* 44, 8919–8924.

Havel, A., Tasdighi, A., Arabi, M., 2018. Assessing the hydrologic response to wildfires in mountainous regions. *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 22, 2527–2550.

HEC, 2005. *HEC-GeoRAS User's Manual: An Extension for Support of HEC-RAS Using ArcGIS*. US Army Corps of Engineering Hydrologic Engineering Center, Davis.

Hirschberger, P., 2017. *Causes and effects of global forest fires*. WWF Deutschland, Berlin.

Hughes, R.., Kauffman, J.., Jarmaillo, V.., 2000. Ecosystem-Scale Impacts of Deforestation and Land Use in a Humid Tropical Region of Mexico. *Ecol. Appl*. 10, 515.

Ice, G.G., Neary, D.G., Adams, P.W., 2004. Effects of Wildfire on Soils and Watershed Processes. *J. For*. 4–8.

Iskender, I., Sajikumar, N., 2016. Evaluation of Surface Runoff Estimation in Ungauged Watersheds Using SWAT and GIUH. *Procedia Technol.* 24, 109–115.

Iwata, T., Nakano, S., Inoue, M., 2003. Impacts of past riparian deforestation on stream communities in a tropical rain forest in Borneo. *Ecol. Appl.* 13, 461–473.

Izquierdo, A.E., Grau, H.R., 2009. Agriculture adjustment, land-use transition and protected areas in Northwestern Argentina. *J. Environ. Manage*. 90, 858–865.

Jenkins, A.P., Jupiter, S.D., Qauqau, I., Atherton, J., 2007. The importance of ecosystem-based management for conserving aquatic migratory pathways on tropical high islands: a case study from Fiji. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst*. 656, 636–656.

Jones, J, 1997. A new approach to linear filteriňg and prediction problems, Global Hydroloğy, Harlow: Pearson Education Limited. Kalman, R., *Journal of Basic Engineering*, 35-45.

Juárez-Orozco, S., Siebe, C., Fernández, D., 2017. Causes and Effects of Forest Fires in Tropical Rainforests: A Bibliometric Approach. *Trop. Conserv. Sci.* 10.

Kocaman, I., Konukcu, F., Istanbulluoglu, A., 2007. Research on the sedimentation and erosion problem of the Ergene River Basin in Western Turkey and precautions to control it. *Eurasıan Soıl Sci.* 40, 1110–1116.

Kokpinar, M.A., Altan-sakarya, A.B., Kumcu, S.Y., 2015. Assessment of sediment yield estimations for large watershed areas : a case study for the Seyhan , Demirköprü and Hirfanlı reservoirs in Turkey. *Hydrol. Sci. J.* 60, 2189–2203.

Kuczera, G., Parent, E., 1998. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm. *J. Hydrol*. 211, 69–85.

Kük, M., Burgess, P., 2010. The Pressures on, and the Responses to, the State of Soil and Water Resources of Turkey. *Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Derg*. 199–211.

Langdale, G.W., West, L.T., Bruce, R.R., Miller, W.P., Thomas, A.W., 1992. Restoration of eroded soil with conservation tillage. *Soil Technol*. 5, 81–90.

Li, Y., Zhao, M., Mildrexler, D.J., Motesharrei, S., Mu, Q., Kalnay, E., Zhao, F., Li, S., Wang, K., 2016. Potential and actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature. *J. Geophys. Res*. 121, 14372–14386.

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Marir Gardelin, 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *J. Hydrol*. 272.

Luo, P., Takara, K., HE, B., Cao, W., Yamashıkı, Y., Nover, D., 2012. Calibration and Uncertainty Analysis of Swat Model in a Japanese River Catchment. *J. Japan Soc. Civ. Eng. Ser. B1 (Hydraulic Eng.)* 67, I_61-I_66.

Marshall, L., Nott, D., Sharma, A., 2004. A comparative study of Markov chain Monte Carlo methods for conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resour. Res*. 40.

Martin, D.A., Moody, J.A., 2001. Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrol. Process.* 15, 2893–2903.

Martinho, V.J.P.D., 2019. Socioeconomic impacts of forest fires upon Portugal: An analysis for the agricultural and forestry sectors. *Sustain*. 11.

Matalas, N.C., 1967. Mathematical assessment of synthetic hydroloğy, *Water Resources Research*, 3(4), pp.937-945.

Maxwell, S.L., Fuller, R.A., Brooks, T.M., Watson, J.E.M., 2016. Biodiversity: The ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature*, 536, 143–145.

Mein, R.G. and Larson, C.L., 1973. Modeliğ infiltration duriğ a steady rain, *Water resources research*, 9(2), pp.384-394.

Mehmet, B., Egemen, A., 2012. River sediment transport and coastal erosion in the Southeastern Black Sea Rivers. *J. Hydrol. Hydromech*. 4, 299–308.

Moench, R. and Fusaro, J., 2002. *Soil erosion control after wildfire*. Colorado State University Cooperative Extension.

Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology.* 19, pp. 205-234.

Moody, J.A., Martin, D.A., 2001. Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado front range. Earth Surf. Process. *Landforms* 26, 1049–1070.

Moore, R.D., 1993. Application of a conceptual streamflow model in a glacierized drainage basin. *J. Hydrol.* 150, 151–168.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., M. W. Van Liew, R. L. Bingner, Harmel, R.D., T. L. Veith, 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng*. 50, 885–900.

Nash, J.E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol*. 10, 282–290.

Nasirzadehdizaji, R., Akyuz, D.E., 2022, Application of SWAT Hydrological Model to Assess the Impacts of Land Use Changes on Sediment Loads, International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences, 6 (1), 108-120. doi: https://doi.org/10.31015/jaefs.2022.1.15.

Nasirzadehdizaji, R., Akyuz, D.E., 2022, Predicting the potential impact of forest fires on runoff and sediment loads using a distributed hydrological modelling approach, Journal of Ecological Modelling, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2022.109959.

Neitsch, S.., Arnold, J.., Kiniry, J.., Williams, J.., 2011. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resour. Inst*. 1–647.

Nicks, A.D., 1974. Stochastic ğeneration of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall, *symp. statistical hydrology (pp. 154-171), USDA Washington, DC.*

Ntouros, K.D., Gitas, I.Z., Silleos, G.N., 2009. Mapping agricultural crops with EO-1 Hyperion data. In: WHISPERS ’09 - *1st Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing.*

Nyamadzawo, G., Gwenzi, W., Kanda, A., Kundhlande, A., Masona, C., 2013. Understanding the causes, socio-economic and environmental impacts, and management of veld fires in tropical Zimbabwe. *Fire Sci. Rev*. 2, 2.

Owens, P.N., Batalla, R.J., Collins, A.J., Gomez, B., Hicks, D.M., Horowitz, A.J., Kondolf, G.M., Marden, M., Page, M.J., Peacock, D.H., Petticrew, E.L., Salomons, W., Trustrum, N.A., 2005. Fine-grained sediment in river systems: Environmental significance and management issues. *River Res. Appl*. 21, 693–717.

Özşahin, E., 2016. Alakır Çayı Havzasında (Antalya) Toprak Kaybının Mekânsal Dağılışı ve Etkili Faktörler. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 13, 123–134.

Pattanayak, S.K., Wendland, K.J., 2007. Nature’s care: Diarrhea, watershed protection, and biodiversity conservation in Flores, Indonesia. Biodivers. *Conserv*. 16, 2801–2819.

Pimentel, D., Burgess, M., 2013. Soil erosion threatens food production. *Agric.* 3, 443–463.

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R., 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* (80-.). 267, 1117–1123.

Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Mon. Weather Rev*. 100, 81–92.

QGIS Development Team, 2021. *QGIS Desktop 3.16 User Guide*, 1335.

Rábade, J.M., Aragoneses, C., 2008. Social Impact of Large-Scale Forest Fires. Proc. *Second Int. Symp. Fire Econ. Planning, Policy A Glob. View* 19–22.

Renard, K.G., Foster, G.R., Yoder, D.C. and McCool, D.K., 1994, RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future, *Journal of soil and water conservation*, 49(3), pp.213-220.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.., 1997. Predicting Soil Erosion By Water: A guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Research Service*.

Ritter, J., 2012. Wind Erosion - Causes and Effects. *ProEnvironment/ProMediu* 12, 1–8.

Robichaud, P.R., Beyers, J.L., Neary, D.G., Station, R.M.R., 2000. *Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments.*

Rocha-Santos, L., Pessoa, M.S., Cassano, C.R., Talora, D.C., Orihuela, R.L.L., Mariano-Neto, E., Morante-Filho, J.C., Faria, D., Cazetta, E., 2016. The shrinkage of a forest: Landscape-scale deforestation leading to overall changes in local forest structure. *Biol. Conserv*. 196, 1–9.

Rodrigues, E.L., Jacobi, C.M., Figueira, J.E.C., 2019. Wildfires and their impact on the water supply of a large neotropical metropolis: A simulation approach. *Sci. Total Environ*. 651, 1261.

Rosgen, D.L. and Silvey, H.L., 1996. Applied river morphology (Vol. 1481). *Pagosa Springs, CO: Wildland Hydrology*.

Ryan, S.E., Dwire, K.A., Dixon, M.K., 2011. Impacts of wildfire on runoff and sediment loads at Little Granite Creek, western Wyoming. *Geomorphology*, 129, 113–130.

Schaake Jr, J.C. and Fiering, M.B., 1967. Simulation of a national flood insurance fund, *Water Resources Research*, 3(4), pp.913-929.

Schüler, G., 2006. Identification of flood-generating forest areas and forestry measures for water retention. *For. Snow Landsc. Res*. 80, 99–114.

SEPA, S.E.P.A., 2009. Engineering in the water environment good practice guide: Riparian vegetation management. *Scottish Environ. Prot. Agency*, 47.

Sharpley, A.N. and Williams, J.R., 1990. EPIC, *Erosion/Productivity impact calculator: 1. Model documentation. 2. User manual.*

Smith, D.., Goodrich, D.., Woolhiser, R.., 1990. *A Kinematic Runoff and Erosion Model: Doc. User manual*. 130.

Sönmez, O., Demir, F., 2016. Determination of Flood Risk in Agva Ağva ’ nın Taşkın Riskinin Belirlenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 2017, 105-112 105

Soulis, K.X., Generali, K.A., Papadaki, C., Theodoropoulos, C., Psomiadis, E., 2021. Article hydrological response of natural mediterranean watersheds to forest fires. *Hydrology* 8, 1–23.

Surfleet, C.G., Dietterick, B., Skaugset, A., 2014. Change detection of storm runoff and sediment yield using hydrologic models following wildfire in a coastal redwood forest, California. *Can. J. For. Res*. 44, 572–581.

Surfleet, C.G., Skaugset, A., Dietterick, B., 2012. An Approach to Study the Effect of Harvest and Wildfire on Watershed Hydrology and Sediment Yield in a Coast Redwood Forest. *Proc. Coast Redw. For. a Chang. Calif. A Symp. Sci. Manag. Albany, CA. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR*-238 238, 205–212.

Symes, W.S., Edwards, D.P., Miettinen, J., Rheindt, F.E., Carrasco, L.R., 2018. Combined impacts of deforestation and wildlife trade on tropical biodiversity are severely underestimated. *Nat. Commun*. 9.

TEMA, 2018, *Türkiye Erozynla Mücadele*, http://www.tema.org.tr/web_14966-2_1/index.aspx, [Ziyaret tarihi: 25 Mart 2018].

Thomas, G., Rosalie, V., Olivier, C., Anna Maria, D.G., Antonio, L.P., 2021. Modelling forest fire and firebreak scenarios in a mediterranean mountainous catchment: Impacts on sediment loads. *J. Environ. Manage*. 289, 112497.

Torri, D., Poesen, J. and Borselli, L., 1997. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor usinğ a global datase. *Catena*, 31(1-2), pp.1-22.

United Nations, 2021, *The Global Early Warning System for Wildland Fires (Global EWS)*, https://www.un-spider.org/global-early-warning-system-wildland-fires-global-ews, [Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2021].

USDA, 2008. *Natural Resources Conservation Service, Firebreak Practice Introduction*.

Van Griensven, A., Meixner, T., 2006. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water Sci. Technol*. 53, 51–59.

Verheijen, F.G.A., Jones, R.J.A., Rickson, R.J., Smith, C.J., 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Rev*. 94, 23–38.

Verma, S., Jayakumar, S., 2012. Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A Review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 2(3):168-176.

Vieira, D.C.S., 2015. Understanding and modelling hydrological and soil erosion processes in burnt forest catchments. *Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento*.

Vigiak, O., Malagó, A., Bouraoui, F., Vanmaercke, M., Obreja, F., Poesen, J., Habersack, H., Fehér, J., Grošelj, S., 2017. Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT. *Sci. Total Environ*. 599–600, 992–1012.

Vigiak, O., Malagó, A., Bouraoui, F., Vanmaercke, M., Poesen, J., 2015. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. *Sci. Total Environ*. 538, 855–875.

Vrugt, J.A., Gupta, H. V., Bouten, W., Sorooshian, S., 2003. A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resour. Res*. 39.

Wardle, D.A., Bardgett, R.D., Klironomos, J.N., Setälä, H., Van Der Putten, W.H., Wall, D.H., 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science* (80-.). 304, 1629–1633.

Watson, R., Noble, R., Bolin, B., Ravindranath, N., Verardo, D., Dokken, D., 2000. Land-use Change, and Forestry. A Special Report of the IPCC, *Piblished for the International Panel on Climate Change, Cambridge University Press*.

Wenger, A.S., Atkinson, S., Santini, T., Falinski, K., Hutley, N., Albert, S., Horning, N., Watson, J.E.M., Mumby, P.J., Jupiter, S.D., 2018. Predicting the impact of logging activities on soil erosion and water quality in steep, forested tropical islands. *Environ. Res. Lett*. 13.

Wigmosta, M.S., Vail, L.W., Lettenmaier, D.P., 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resour. Res*.

Wilk, J., Andersson, L., Plermkamon, V., 2001. Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in Northeast Thailand. *Hydrol. Process*. 15, 2729–2748.

Williams, J.R., Hann, R.W., 1972. Hymo, A problem-oriented computer language for building hydrologic models. *Water Resour. Res*. 8, 79–86.

Williams, P.F. and Rust, B.R., 1969. The sedimentology of a braided river. *Journal of Sedimentary Research*, 39(2).

Williams, J.R., 1975. Use of the Modified Universal Soil Loss Equation for average annual sediment yield estimates on small rangeland drainage basins. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. *U.S. Dept. Agrie*., pp 244-252.

Williams, J.R. and Berndt, H.D., 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Transactions of the ASAE*, 20(6), pp.1100-1104.

Wishmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. *USDA Ağricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook*, 537.

W3S, 2018, *University of Guelph*, https://www.uoguelph.ca/watershed/w3s/, [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2018].

Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Yang, H., 2007. Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference. *J. Hydrol.* 340, 167.

Yebdri, D., Errih, M., Hamlet, A., Tidjani, A.E., 2007. The water resources management study of the Wadi Tafna Basin (Algeria) using the SWAT model. *African Water J.* 1.

Zégre, N., Skaugset, A.E., Som, N.A., McDonnell, J.J., Ganio, L.M., 2010. In lieu of the paired catchment approach: Hydrologic model change detection at the catchment scale. *Water Resour. Res.* 46, 1–20.

Zettam, A., Taleb, A., Sauvage, S., Boithias, L., Belaidi, N., Sánchez-Pérez, J.M., 2017. Modelling hydrology and sediment transport in a semi-arid and anthropized catchment using the swat model: The case of the Tafna River (Northwest Algeria). *Water* (Switzerland) 9.

Zhang, X., Srinivasan, R., Van Liew, M., 2008. Multi-site calibration of the SWAT model for hydrologic modeling. *Trans. ASABE*, 51, 2039–2049.

Zhanğ, S., and Duan, J.G, 2011. 1D Finite Volume Model of Unsteady Flow Over Mobile Bed. *Journal of Hydrology*, 405(2011):57-68.