

**AŞAĞI PORSUK ÇAYI HAVZASINDA
ASKIDA KATI MADDE TAŞINIMININ
BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ**

Ömer GÜNGÖR
Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Ocak - 2011

Bu tez çalışması 108Y091 No'lu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ömer Güngör'ün "**Aşağı Porsuk Çayı Havzasında Askıda Katı Madde Taşımının Belirlenmesi ve Modellenmesi**" başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 28.12.2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yard.Doç.Dr. SERDAR GÖNCÜ
Üye	: Prof.Dr. ERDEM AHMET ALBEK
Üye	: Yard.Doç.Dr. ALİ ARDA ŞORMAN

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AŞAĞI PORSUK ÇAYI HAVZASINDA ASKIDA KATI MADDE TAŞINIMININ BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

Ömer GÜNGÖR

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Yard. Doç. Dr. Serdar GÖNCÜ
2011, 96 sayfa**

Toprak erozyonu ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan bakıldığında önemli bir problemdir. Türkiye’de yılda yaklaşık olarak 450 milyon ton sedimentin askı malzemesi olarak akarsularda taşındığı bilinmektedir. Çeşitli aktiviteler sonucunda oluşan sedimentin başlıca kaynakları; tarım alanları, kentsel alanlar, inşaat çalışmaları, kıyı erozyonu, akarsu yatağı ıslah çalışmaları, karayolu çalışmaları, taş ve kömür ocaklarıdır.

Bu çalışmada, Batı İç Anadolu bölgesinde yer alan Aşağı Porsuk Çayı havzasında akım ve sedimentin modellenmesi için Birleşik Devletler Tarım Bakanlığı Tarımsal Araştırma Servisi (USDA-ARS) tarafından geliştirilen SWAT modeli kullanılmıştır. Bu çalışma iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümü hidrolojik modelin ele alınması, ikinci kısım ise noktasal ve noktasal olmayan sediment kaynaklarının etkisinin incelenmesidir. Model sonucunda 1978-2009 arası 32 yıllık zaman periyodunda havza üzerine düşen yağışın %25’inin akarsuyu beslediği ve sediment veriminin yılda 2 ton/ha olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Askıda katı madde, SWAT, Porsuk Çayı, Hidrolojik model

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DETERMINATION AND MODELING OF SUSPENDED SOLIDS TRANSPORT IN THE LOWER PORSUK STREAM WATERSHED

Ömer GÜNGÖR

Anadolu University
Graduate School of Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Assist.Prof. Dr. Serdar GÖNCÜ
2011, 96 pages

Soil erosion is an important problem when economic, social and environmental aspects are considered. Amount of sediment carried in suspended form with streams is known to be about 450 million tons per year in Turkey. The major sources of sediment include agricultural areas, urban areas, construction works, streambank erosion, stream bed restoration, highway construction, quarry and strip mines.

In this study, the model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) developed by the United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service (USDA-ARS) has been used to model runoff and sediment in the Lower Porsuk Stream Watershed in western Inner Anatolia. The study has two major parts. The first part deals with the hydrologic model and the second part identifies the effects of point and non point sediment sources. Model results indicate that on the average 25% of the annual precipitation over the watershed contributed to streamflow during the 32 year period from 1978 to 2009 and produces a sediment yield 2 ton/ha per year.

Keywords: Suspended solid, SWAT, Porsuk Stream, Hydrologic model

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması TÜBİTAK ÇAYDAG 108Y091 nolu “Aşağı Porsuk Çayı Havzasında İklim Değişikliğinin Hidrolojik Çevrime ve Su Kalitesine Etkilerinin HSPF Modeli Kullanılarak İncelenmesi ve En İyi Su Yönetimi Stratejilerinin Belirlenmesi” adlı proje desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın başından sonuna kadar her aşamasında bilgi, öneri, hoşgörü ve yardımlarıyla bana her zaman destek olan, her konudaki tecrübelerini benimle paylaşarak gelişmemde büyük katkı sağlayan, olaylara yaklaşımını ve iş ahlakını her zaman örnek alacağım, çalışmanın ortaya çıkmasında çok büyük emeği olan danışman hocam. Yard. Doç. Dr. Serdar GÖNCÜ’ye,

Yüksek lisansa başlamamda büyük pay sahibi, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak her zaman benim yanımda olan, fikir ve önerileriyle çalışmayı yönlendiren, bende yarattığı etkiyle ufkumu genişleten ve bana güven veren değerli hocam Prof Dr. Erdem Ahmek ALBEK’e

Bu süreçte yanımda olarak bana destek veren ve yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşlarıma,

Her zaman maddi manevi benim yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, hayatımın sonuna kadar minnettar kalacağım aileme

en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ömer GÜNGÖR

Ocak 2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. AKARSULARDA ASKIDA KATI MADDE TAŞINIMI	2
2.1. Akarsularda Katı Madde Hareketinin Sınıflandırılması	2
2.2. Katı Madde Özellikleri.....	4
2.3. Yatakta Hareketin Başlaması	7
2.3.1. Yatakta Bir Taneyi Etkileyen Kuvvetler.....	7
2.3.2. Kritik Kayma Gerilmesi.....	8
2.3.3. Kritik Hız	8
2.4. Askıda Katı Madde Debi İlişkisi.....	9
3. KİRLLETİCİ KAYNAK TİPLERİ	11
3.1. Sediment ve AKM Kaynakları.....	11
3.2. Erozyon	12
3.2.1. Erozyon Tipleri	12
3.2.2. Erozyon Üzerinde Rol Oynayan Faktörler.....	16
3.2.3. Erozyonun Çevresel Etkileri	18
4. SWAT MODELİ	21
4.1. SWAT Modelinin Tarihçesi.....	21
4.2. Hidroloji	22

4.3. İklim.....	25
4.4. Sediment.....	28
5. YAPILAN ÇALIŞMALAR	33
5.1. Sediment Taşınımı İle İlgili Çalışmalar	33
5.2. SWAT İle İlgili Çalışmalar	35
6. ÇALIŞMA ALANI	40
6.1. Bölgenin ve Çalışma Alanının Tanıtımı	40
6.1.1. İklim	42
6.1.2. Toprak Yapısı.....	44
6.1.3. Arazi Kullanımı.....	44
6.2. Meteorolojik Veriler.....	46
6.3. Havzada Yürütülen Çalışmalar	47
7. ArcSWAT PROGRAMI	54
7.1. Model Girdilerinin Oluşturulması.....	55
7.1.1. Sayısal Yükseklik Haritası (DEM)	55
7.1.2. Toprak Haritası	56
7.1.3. Arazi Kullanım Haritası	60
7.1.4. Meteorolojik Veriler.....	63
7.2. Duyarlılık Analizi.....	64
7.3. Model Kalibrasyonu.....	66
8. MODEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	70
8.1. Hidrolojik Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi	72
8.2. Sediment Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	80
9. TARTIŞMA ve ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Tabandaki sürüntü ve sıçrama hareketi	3
2.2. Bir akarsu kesitindeki hız ve katı madde konsantrasyonu dağılımı	4
2.3. Yatak yüzeyindeki bir taneyi etkileyen kuvvetler	7
2.4. Katı madde anahtar eğrileri	10
4.1. SWAT modelindeki su hareketinin şematik gösteri	23
4.2. SCS eğri numarası metodundaki yağış-yüzeysel akış ilişkisi	25
6.1. Çalışma alanı	42
6.2. Çalışma alanı büyük toprak grupları	45
6.3. Eskişehir ili arazi varlığı ve dağılımı.....	45
6.4. Çalışma alanı arazi kullanımı	46
6.5. Meteoroloji istasyonları	47
6.6. Ölçüm istasyonları	48
6.7. Eskişehir Ovası sulama şebekesi vaziyet planı.....	49
6.8. DSİ ve EİEİ akım ve su kalitesi gözlem istasyonları	50
6.9. Sulama kuyuları.....	51
6.10. Fidanlık istasyonunda örnek alma ve akım ölçüm çalışmaları.....	52
7.1. Aşağı Porsuk Havzası sayısal yükseklik haritası.....	55
7.2. Çalışma alanı alt havzalar	56
7.3. Aşağı Porsuk Havzası toprak grupları	59
7.4. Aşağı Porsuk Havzası arazi kullanımı.....	61
7.5. SWAT ve SWAT-CUP arasındaki ilişki	67
8.1. DSİ ve EİEİ'ye ait akım gözlem istasyonlarının zamansal değişimi	70
8.2. Ölçüm istasyonlarındaki askıda katı madde sonuçları	71
8.3. Hidrolojik döngüdeki temel bileşenlere ait 1978-2009 yılları arası ortalama sonuçlar.....	72
8.4. Eşenkara kalibrasyon dönemi sonuçları	74
8.5. Eşenkara istasyonu için aylık model ve gözlem sonuçları	75
8.6. Eskişehir istasyonu için aylık model ve gözlem sonuçları	75

8.7. Sarısu karışımı öncesi aylık model sonuçları ile Eskişehir istasyonun karşılaştırılması.....	76
8.8. Yeşildon istasyonu için aylık model ve gözlem sonuçları.....	78
8.9. Kıranharmanı ve Sazılar istasyonu için aylık model ve gözlem sonuçları.....	79
8.10. Örnekleme noktalarındaki askıda katı madde ve bulanıklık arasındaki lineer ve üssel ilişki	81
8.11. Tüm ölçümlerde askıda katı madde bulanıklık arasındaki lineer ve üssel ilişki	82
8.12. Fidanlık istasyonu model ve gözlem sonuçları.....	83
8.13. Karahöyük istasyonu model ve gözlem sonuçları	84
8.14. Yunusemre istasyonu model ve gözlem sonuçları	85
8.15. Sediment veriminin zamansal değişimi.....	86
8.16. Alt havzalara ait ortalama sediment verimi	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Çaplarına göre danelerin sınıflandırılması	5
2.2. Sediment yığınlarının porozitelerinin değişim bölgeleri.....	6
3.1. Okyanuslara ve denizlere taşınan yıllık AKM kaynakları ve miktarları.	11
3.2. Yağış şiddeti gruplarıyla erozyon arasındaki ilişkiler.....	17
4.1. Hidrolik iletkenlik-geçirimsizlik sınıfı	31
4.2. Konturlama için eğim ve uzunluk limitlerindeki P_{USLE} değerleri	32
6.1. Porsuk çayına karışan kolların aralarındaki ve membaya uzaklıkları	41
6.2. Yağış şiddeti indisine göre iklim ve bitki örtüsü	43
6.3. Meteoroloji istasyonu bilgileri	47
6.4. DSİ ve EİEİ akım gözlem istasyonları hakkında bilgi.....	50
6.5. Kuyulardan sulama amaçlı kullanılan yıllık su miktarı	51
6.6. Laboratuvarında gerçekleştirilen analizler ve ayrıntıları	53
7.1. Alt havzalara ait bilgiler.....	56
7.2. Temin edilen toprak ve sayısal hizmet harita bilgileri	57
7.3. Büyük toprak grubu ve toprak özellikleri kombinasyonu	58
7.4. Büyük toprak gruplarının yaklaşık karşılıkları	58
7.5. Yeni Amerikan toprak sınıflandırma sistemi sıralarının, Eski Amerikan sisteminin büyük gruplarıyla ilişkisi	59
7.6. Hidrolojik toprak gurubuna karşılık gelen hidrolik iletkenlik değerleri .	60
7.7. Eskişehir’de ekilen tarım ürünlerine ait bilgiler	61
7.8. Eskişehir’deki ormanlara ait bilgiler	62
7.9. Bitki türüne bağlı maksimum gölge kapasitesi	62
7.10. Eskişehir meteoroloji istasyonu değerlendirme sonuçları	63
7.11. Duyarlılık analizinde kullanılan parametrelere ait bilgiler	65
7.12. Duyarlılık analizi sonuçları	66
7.13. Kalibrasyonda kullanılan parametrelere ait değişim aralıkları	68
7.14. Kalibrasyonda elde edilen parametre değerleri.....	69
8.1. DSİ ve EİEİ’ye ait akım gözlem istasyonlarının istatistiksel değerlendirilmesi.....	71

8.2. Eşenkara istasyonu için yıllık F testi sonuçları.....	74
8.3. Eşenkara istasyonu için yıllık t testi sonuçları.....	74
8.4. Akım değerlendirme sonuçları.....	80
8.5. Askıda katı madde ve bulanıklığa ilişkin bilgiler.....	80
8.6. AKM değerlendirme sonuçları.....	86

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AKM	:Askıda Katı Madde
AnnAGNPS	:Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution
CREAMS	:Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems
DEM	:Digital Elevation Model
DSİ	:Devlet Su İşleri
DMİ	:Devlet Meteoroloji İşleri
EİEİ	:Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EPIC	:Erosion Productivity Impact Calculator
FAO/UNESCO	:Food and Agricultural Organization/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Gıda ve Tarım Örgütü/Bileşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü
GLEAMS	:Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System
HRU's	:Hydrological Response Units, Hidrolojik etki birimleri
KHGM	:Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü
KOİ	:Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MUSLE	:Modified Universal Soil Loss Equation, Geliştirilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi
ROTO	:Routing Outputs to Outlet
SCS	:Soil Conservation Service, Toprak Koruma Servisi
SWAT	:Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	:Soil and Water Assessment Tool-Calibration and Uncertainty Procedures
SWRRB	:Simulator for Water Resources in Rural Basins
USDA-ARS	:United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service, Birleşik Devletler Tarım Bakanlığı-Tarımsal Araştırma Servisi

USEPA	:United States Environmental Protection Agency, Birleşik Devletler Çevre Koruma Örgütü
USLE	:Universal Soil Loss Equation, Evrensel Toprak Kaybı Denklemi
Watem/SEDEM	:Water and Tillage Erosion Model/Sediment Delivery Model

1. GİRİŞ

Su kaynakları, yenilenebilir olmakla birlikte aslında sınırlı doğal kaynaklardandır. Günümüzdeki en önemli problemlerden biri, bu kaynakların etkin bir şekilde kullanılamamasıdır. Suya olan talebin günden güne artması, sanayileşme, kentleşme, nüfusun artışı, yanlış uygulanan tarım teknikleri gibi insan kökenli etkenlerin yanı sıra, iklim değişimi, erozyon gibi doğal etkenler su kaynakları ve dolayısıyla havzalar üzerinde yoğun bir baskı oluşturmaktadırlar. Bu baskının en aza indirilebilmesi için, hidrolojik sistemi etkileyen tüm süreçlerin bir bütün olarak ortaya konması ve doğru bir şekilde anlaşılması önemli bir noktadır. Bu amaçla daha sağlıklı ve verimli su kaynakları yönetimine olanak sağlayabilmek için öncelikli olarak, su sistemlerinin havza boyutunda ele alınması, katılımcı, bütüncül ve uzun vadeli bir yaklaşım, suyun miktarı ve kalitesi için gerekli kriterlerin göz önünde bulundurulduğu havza yönetim planlarına gereksinim duyulmaktadır.

Ülkemiz özellikle iklimi, topoğrafik yapısı, arazi kullanımı ve genel özellikleri itibarıyla erozyona karşı çok duyarlı bir yapıya sahiptir. Türkiye'deki erozyonla ilgili olarak sorunsuz olduğu söylenebilecek arazi %14 olmasına rağmen, şiddetli ve çok şiddetli erozyon riski olarak sınıflandırılan arazi oranı ise %59'dur. İşlemeli tarımın yapıldığı 27,7 milyon hektar arazi değerlendirildiğinde yaklaşık %60'lık bölümünde temel sorunun erozyon olduğu ortaya konmuştur (Parlak, 2005). Bu nedenle ülke genelinde erozyon sonucu yüzeysel sulara taşınan toprakların su kalitesi üzerinde olumsuz etkileri bir gerçektir.

Toprak ve su varlığının kaybına yol açan çevresel baskılar son derece önemli olmasına rağmen Türkiye'de bu çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, baskının yoğun olarak hissedildiği Aşağı Porsuk Çayı havzasında SWAT model programı kullanılarak havza, hidrolojik açıdan ve taşınan askıda sediment miktarı açısından incelenmiştir. Bu sayede çalışmanın, Aşağı Porsuk Çayı havzasında toprak ve su kaynaklarının daha iyi bir şekilde yönetilebilmesi için atılması gereken adımlara yol gösterici olabileceği düşünülmektedir.

2. AKARSULARDA KATI MADDE TAŞINIMI

Akarsularda çakıl, kum, silt, kil gibi katı madde tanelerinden oluşan bir yatak üzerindeki su akımı yataktaki taneleri harekete geçirebilir. Sökülüp taşınan katı madde (sediment) miktarı akım ve sediment özelliklerine bağlıdır. Tanelerin hareketi de akımı etkilediğinden sıvı veya katı fazlardan oluşan bu iki fazlı hareketin incelenmesi sabit yataklı bir açık kanaldaki akıma göre çok daha zordur.

Akarsulardan yararlanmak ya da olabilecek zararları önlemek amacıyla akarsu yataklarında yapılacak bir değişikliğin etkilerinin önceden kestirilmesi, akarsuların çeşitli maksatlarla düzenlenmesi ve istenen durumda tutulması için gereklidir. Bu da ancak doğada akarsuyun uyduğu kurallara karşı gelmeyecek şekilde yapılabilir. Akarsular profillerini, kesitlerini ve izledikleri yolu taşıdıkları sedimente göre belirler. Taşkın kontrolü, akarsularda ulaşım, erozyonun önlenmesi, sulama kanallarının tasarımı, akarsuların kirlenmesi, akarsularda canlıların yaşamı, çevre estetiği, barajların yakınında yatakta değişimlerin belirlenmesi, hidroelektrik tesislerinde akarsudan su alma ve giren taneleri çökeltmek ayırma, rekreasyon gibi konularla ilgili çeşitli problemleri çözmek için akarsuyun debi-seviye ilişkisinin ve belli bir debide taşınacak sediment miktarının bilinmesi gerekir (Bayazıt ve Avcı, 2010).

2.1. Akarsularda Katı Madde Hareketinin Sınıflandırılması

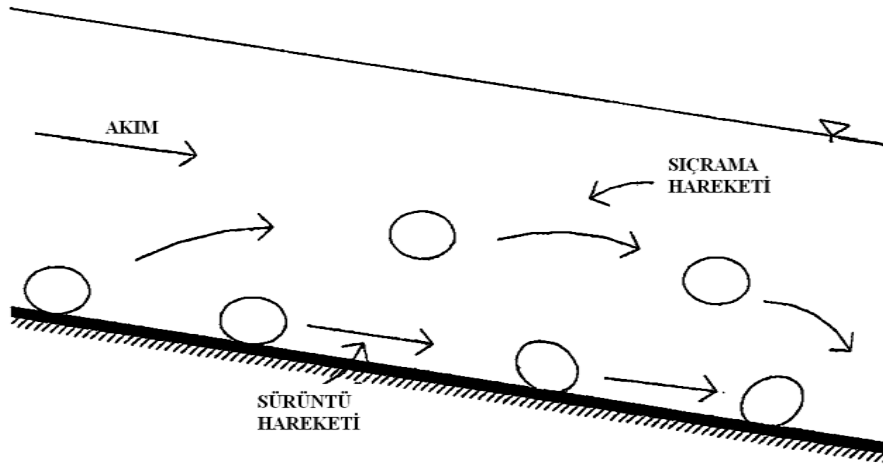
Akarsularda taşınan katı maddeler hareket şekline göre sürüntü ve askı hareketi, malzemenin kaynağına göre ise taban (yatak) ve aşınma malzemesi olarak iki şekilde sınıflandırılır (Kayaalp, 2003).

Akarsunun taban kısmında hareket eden maddelere sürüntü maddesi, yüzerek hareket eden maddeler ise askıda katı madde olarak adlandırılmaktadırlar. Birim zaman içerisinde birim kesitten geçen toplam katı madde debisi Denklem (2.1)'deki şekilde hesaplanabilir.

$$Q_T = Q_s + Q_a \quad (2.1)$$

Burada Q_T , toplam katı madde debisini (kg/s); Q_s , sürüntü maddesi debisini (kg/s); Q_a , askıda katı madde debisini (kg/s) göstermektedir.

Sürüntü hareketi: Akarsuyun hızının artmasıyla tabandaki kayma gerilmeleri de artacağından tanelerin bazılarının harekete geçtikleri görülür. Bu hareket düşük hızlarda tanelerin taban üzerinde kayma ve yuvarlanması şeklinde olur. Buna sürüntü hareketi denir. Akım hızının daha da artmasıyla bazı taneler kısa bir süre için yataktan ayrılıp küçük sıçramalar yaparlar, buna sıçrama hareketi denir. Sıçramanın başlama nedeni tane yakınında basıncın değişmesi yada başka bir tanenin çarpması olabilir. Sıçrama hareketi göz önünde bulundurulacak kadar önemli değildir.

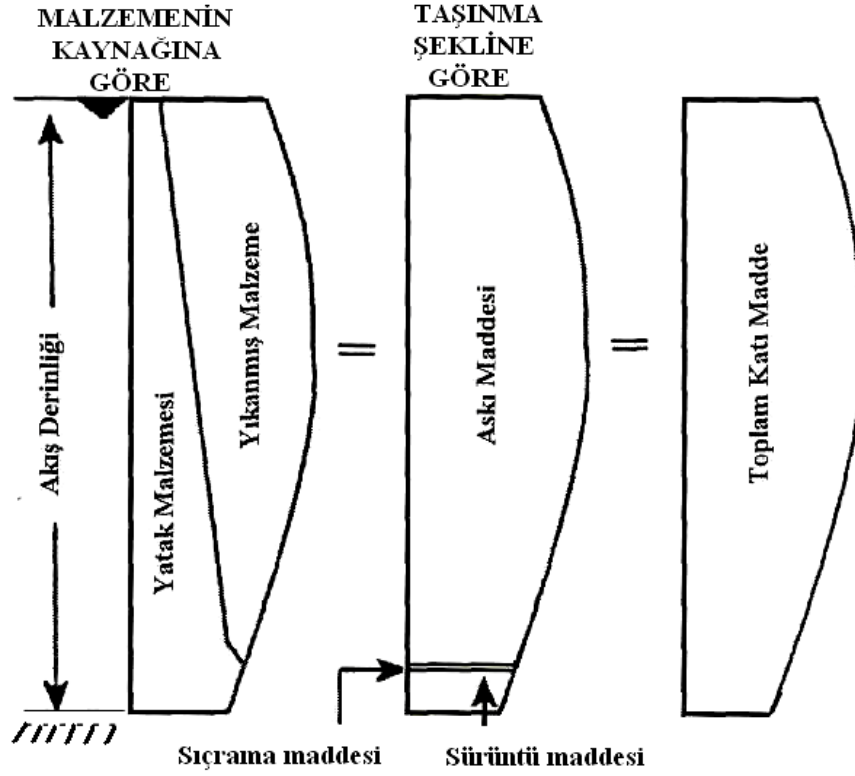


Şekil 2.1. Tabandaki sürüntü ve sıçrama hareketi (Kayaalp, 2003)

Askı hareketi: Yüksek hızlarda tanelerin hareketi daha da şiddetlenir, bazı taneler akımın yukarıya yönelmiş düşey türbülans hızı bileşenlerinin etkisiyle akışkan ortamı içinde, tabandan uzakta hareketlerine devam ederler. Buna askı hareketi denilir.

Malzemenin kaynağına göre sınıflandırma ise şu şekilde yapılır.

- Yatak malzemesi
- Yıkanmış malzeme



Şekil 2.2. Katı maddelerin sınıflandırılmasında geçen terimler ve bunların su derinliğine göre durumları (Erkek ve Ağırlioğlu, 1993)

Yatak malzemesi hareketli bir tabanı oluşturan malzemedir. Yıkanmış malzeme ise çoğunluğu havza erozyonundan gelen ve yatak malzemesinden daha ince olan malzemedir (Erkek ve Ağırlioğlu, 1993).

2.2. Katı Madde Özellikleri

Hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz maddeler akarsu morfolojisinin oluşmasında etkili olur. Kohezyonsuz parçacıklar arasında fiziksel ve kimyasal bir etkileşim olmamasına karşılık, kohezyonlu parçacıklarda daneler arasında fiziksel ve kimyasal etkileşimler önemli rol oynar. Özellikle kil içerikli akarsu şevlerinin aşınmasındaki hareketin başlamasında ve taşınma olayında kimyasal etkiler ağırlık kazanır.

Dane çapı: Katı maddelerin en önemli özelliklerinden biri danenin büyüklüğü ve çapıdır. Bir danenin çapı için çeşitli tanımlar yapılabilir. Bunların içinde en yaygın kullanılanlar şunlardır:

- Elek çapı: parçacığın geçebildiği elek çapı,
- Anma çapı: parçacığın hacmine eşit bir kürenin çapı,
- Katı madde çapı: aynı akışkan içindeki çökme hızı ve özgül ağırlığı parçacığına eşit olan küre çapı,

Parçacıkların çaplarına göre sınıflandırılması Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Çaplarına göre danelerin sınıflandırılması

Adı	Çapı	Adı	Çapı
Kil	< 2 µm	İri kum	0,6 – 2 mm
İnce silt	2 – 6 µm	İnce çakıl	2 – 6 mm
Orta silt	6 – 20 µm	Orta çakıl	6 – 20 mm
İri silt	20 – 60 µm	İri çakıl	20 – 60 mm
İnce kum	60 – 200 µm	Taş	60 – 200 mm
Orta kum	200 – 600 µm	Kaya	> 200 mm

Dane yoğunluğu ve porozite: Sediment tanelerinin yoğunluğu oluştukları kayanın cinsine bağlı olarak 2,1 ile 2,8 ton/m³ arasında değişmektedir. Kayalarda en çok kuvars minerali olduğundan dolayı genellikle bu değer 2,65 ton/m³ olarak kabul edilmektedir. Bir sediment yığımında tanelerin kendi hacimlerinin yığının hacmine oranı, yığındaki boşluklar nedeniyle daima 1’den küçüktür, kum ve çakıl için 0,5 ile 0,7 arasında değişir. Bu sebeple yığının yoğunluğu tanelerin yoğunluğundan daha küçüktür. Çizelge 2.2’de tane sınıflarına göre porozitenin değişim bölgeleri gösterilmektedir (Bayazıt ve Avcı, 2010).

Dane Biçimi: dane biçimini karakterize eden 3 temel parametre vardır.

- Biçim faktörü: $B.F. = \frac{c}{\sqrt{a \times b}}$ şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikte; a, b, c, sırasıyla parçacığın birbirine dik eksenler üzerindeki en uzun, orta ve en kısa boyutlarını ifade eder. Biçim faktörü çökme hızının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

- Küresellik: Parçacığın hacmine eşit bir kürenin yüzey alanının, parçacığın yüzey alanına oranı olarak tanımlanır.
- Yuvarlaklık: Parçacığın ortalama eğrilik yarıçapının, parçacığın izdüşüm alanı içine çizilen bir dairenin yarıçapına oranını ifade eden bir değerdir.

Çizelge 2.2. Sediment yığınlarının porozitelerinin değişim bölgeleri (Bayazit ve Avcı, 2010)

Sediment Sınıfı	Porozite (%)
Kaba kum	39 – 41
Orta kum	41 – 48
İnce kum	44 – 49
Kumlu lem	50 – 54

Danenin çökme hızı: Bir parçacığın su içinde çökme hızı, askı maddesi hareketinin incelenmesinde ve akarsudaki yığılma problemlerinde önemli rol oynamaktadır. Çökmeye hem parçacığın hem de akımın özellikleri etki etmektedir. Parçacığın biçimi, özgül ağırlığı ile akımın rejimi, askı maddesi konsantrasyonu, suyun sıcaklığı gibi değişkenler çökme hızına etki eden faktörlerdir. Bu faktörler yardımıyla çökme hızını hesaplamada kullanılan ifade Denklem (2.2)'de verilmiştir (Erkek ve Ağralıoğlu, 1993).

$$W = \left[\frac{4}{3} \times \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \times g \times \frac{D}{C_D} \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

Burada W , çökme hızı (m/s); C_D , parçacığın sürüklenme katsayısı; γ , Suyun özgül ağırlığı (gr/cm³); γ_s , Parçacığın özgül ağırlığı (ton/m³); D , Parçacığın ortalama çapı (mm); g , Yerçekimi ivmesi (m/s²); şeklinde ifade edilir.

Granülometri: Bir sediment örneğinde farklı büyüklüklerde taneler bir arada bulunduğundan tane büyüklüklerinin dağılımını bilmek gerekir. Bu dağılım tane çaplarının kümülatif frekans eğrileri sayesinde gösterilir. Bunun için yatay eksen tane büyüklüğü, dikey eksen belli bir çaptan küçük (ya da büyük) tanelerin yüzde olarak ağırlığı işaretlenir.

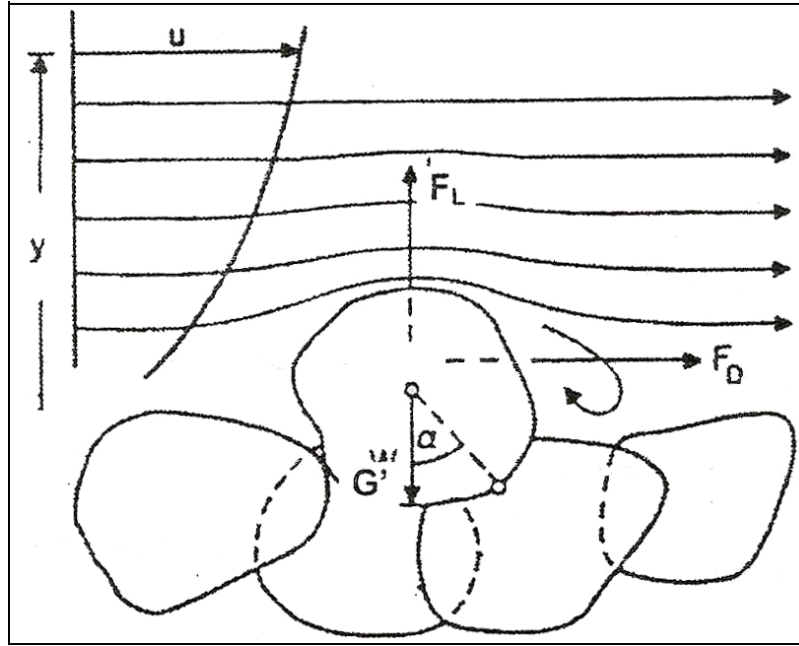
2.3. Yatakta Hareketin Başlaması

2.3.1. Yataktaki Bir Taneyi Etkileyen Kuvvetler

Yoğunlukları suyun yoğunluğundan büyük olan katı madde tanelerinden oluşan bir yatak üzerinde yer alan akım tanelere bazı kuvvetler etki ettirir. Bu hidrodinamik kuvvetlerin bileşkesinin taneyi yerinde tutmaya çalışan kuvvetlerin bileşkesine eşit bir değere ulaşması durumuna kritik durum ya da hareketin başlaması adı verilir. Hareketin başladığı koşulların belirlenmesi kararlı kesit hesabında, oyulma ve yığılmaların incelenmesinde ve sediment hareketi açısından önem taşımaktadır.

Yatağın akımla temas eden üst yüzeyindeki bir sediment tanesini etkileyen bazı kuvvetler vardır. Bu kuvvetler;

1. Tanenin su altındaki ağırlığı, (G)
2. Hidrodinamik sürüklenme kuvveti, (F_D)
3. Hidrodinamik kaldırma kuvveti, (F_L)
4. Taneyle temasta olan diğer tanelerin etkilediği reaksiyon kuvvetleri, (R)



Şekil 2.3. Yatak yüzeyindeki bir taneyi etkileyen kuvvetler (Bayazıt ve Avcı, 2010)

2.3.2. Kritik Kayma Gerilmesi

Yataktaki bir tanenin harekete başladığı akım koşullarını ifade etmek için en çok kullanılan akım değişkeni τ_o yatak kayma gerilmesinin τ_c kritik değeridir. Yatakta hareketin başlaması stokastik bir olay olduğundan yatak yüzeyindeki taneler üniform büyüklükte olsalar da, biçimleri, konumları ve dolayısıyla içsel sürtünme açıları farklı olduğu için kritik durumu belirlemek kolay değildir (Bayazıt, 2010). Katı madde üzerinde etkisi olan suyun kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti parçacık etrafında akım oluştururlar. Bu iki kuvvet arasındaki farktan dolayı da kayma gerilmesi meydana gelir. Akarsularda katı maddenin harekete başlamasını sağlayan tabandaki kayma Denklem (2.3)'deki gibi hesaplanmaktadır (Erkek ve Ağırlioğlu, 1993).

$$\tau = \gamma \times R \times J \quad (2.3)$$

Burada; τ , Kayma gerilmesi (kg/m^2); γ , Suyun özgül ağırlığı (kg/m^3); R , Hidrolik yarıçap (m); J , Hidrolik eğim (m/m); şeklinde ifade edilir.

Akarsu genişliğinin derinliğe oranının 30'dan yüksek olduğu yerlerde hidrolik yarıçap değerinin yerine su derinliği kabul edilebilir (Erkek ve Ağırlioğlu, 1993).

2.3.3. Kritik Hız

Yataktaki tanelerin harekete geçmesi yatak kayma gerilmesine bağlı olmakla birlikte pratikte akımın ortalama hızını kullanmak daha elverişli olduğu için V_c kritik hızı içinde denklemler türetilmiştir. Bu eşitliklerde D dane çapına ek olarak, derinlik - dane çapı ya da hidrolik yarıçap – dane çapı oranlarının da dikkate alındığı görülür. Kritik hızın bu oranlara bağlı olmasının temel nedeni V ortalama hızında h derinliği arttıkça yatak yakınındaki hızın azalmasından ötürü derin akımlarda kritik hızın daha büyük olmasıdır.

V_c kritik hız farklı durumlar için çeşitli eşitliklerle ifade edilmiştir. Kritik hız için $h > 1$ m olan akımlarda ve 0,5 mm'den daha büyük dane çapları için:

Mavis ve Laushey'e göre

$$V_c = 0,22D^{0,5} \quad (2.4)$$

Goncharov'a göre;

$$V_c = \sqrt{\frac{2g\gamma_s D}{\alpha}} \log \frac{8,8h}{D} \quad (2.5)$$

Levy'ye göre;

$$V_c = \sqrt{gD} 1,4 \log \frac{12R}{D_{90}} \quad R/D_{90} > 60 \quad (2.6)$$

$$V_c = \sqrt{gD} \left(1,04 + 0,87 \log \frac{10R}{D_{90}} \right) \quad R/D_{90} = 10 - 40 \quad (2.7)$$

Shamov'a göre;

$$V_c = \sqrt{gD} 1,47 (h/D)^{1/6} \quad (2.8)$$

Yang'a göre;

$$V_c / W = \frac{2,5}{\log \left(\frac{u^* D}{\nu} \right) - 0,06} + 0,66 \quad 1,2 < \frac{u^* D}{\nu} < 70 \quad (2.9)$$

$$V_c / W = 2,05 \quad \frac{u^* D}{\nu} \geq 70 \quad (2.10)$$

Bu denklemlerde, V_c , Kritik hız (m/s); D , Dane çapı (mm); g , Yerçekimi ivmesi (m/s^2); γ , Suyun özgül ağırlığı (gr/cm^3); α , Farklı hızlarda danelerin yatakta hareketsiz kalması için bir katsayı; h , Su derinliği (m); R , Hidrolik yarıçap (m); D_{90} , Malzemenin %90'nını geçiren çap (mm); W , Çökelme hızı (m/s); u , Akarsunun hızı (m/s); ν , Kinematik viskozite (m^2/s); şeklinde ifade edilmektedir.

2.4. Askıda Katı Madde Debi İlişkisi

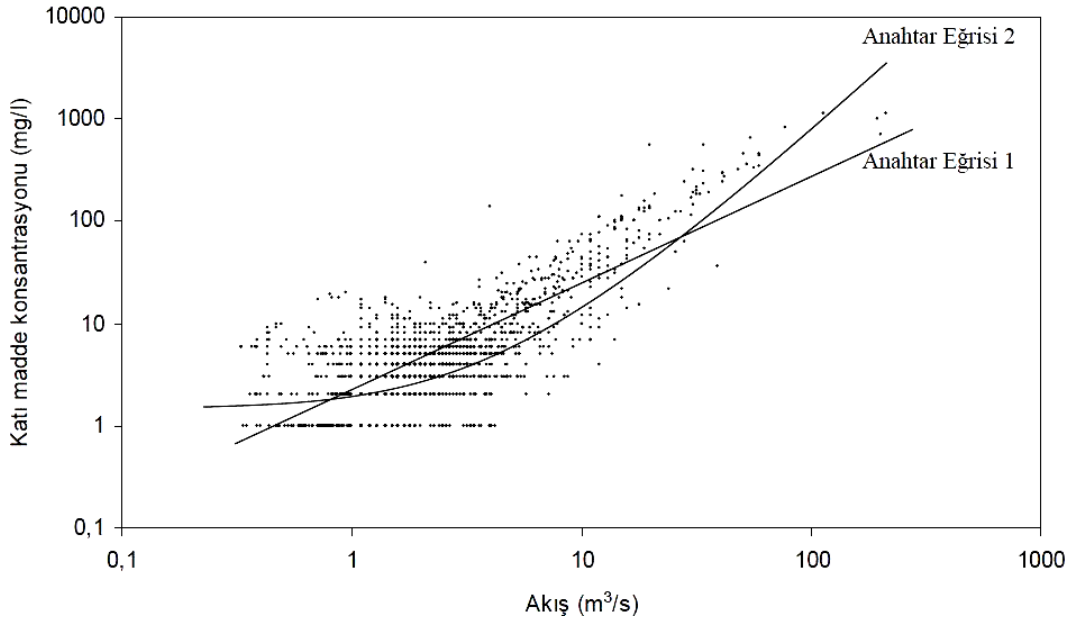
Birçok su kalitesi bileşeni ile debi arasında ilişki bulunmaktadır. Askıda katı madde (AKM) ile debi arasında da böyle bir ilişki mevcuttur. Büyük bir bölümü yaygın kaynaklardan akarsulara ulaşan AKM havza üzerine düşen yağış ve bu yağış sonucu oluşan yüzeysel akış ile akarsulara taşınmaktadır.

Ülkemizdeki akarsuların su rejimleri düzenli olmadığı ve buldukları arazi eğimlerini yüksek olduğu düşünüldüğünde taşıdıkları AKM miktarları da bu oranda fazladır (Baylar ve ark., 1999). Su kalitesi bileşenleri ile akarsu debisi arasında ilişkileri modelleyen çeşitli matematiksel bağıntılar vardır. Bu su kalitesi bileşenlerinden olan askıda katı madde ve debi arasındaki ilişki Denklem (2.11)'deki bağıntıyla ifade edilir (Ferguson, 1987). Yine aynı şekilde askıda katı madde ile debi arasındaki farklı bir ilişki de Denklem (2.12)'de gösterilmektedir (Kişi ve ark., 2003).

$$S = aQ^b \quad (2.11)$$

$$\log S = a + b * \log Q + c * (\log Q)^2 \quad (2.12)$$

Burada; S, Katı madde konsantrasyonu (mg/l); Q, debi (m³/s); a,b ve c, nehrin akım karakteristiğine bağlı olarak değişen katsayılar şeklinde ifade edilir.



Şekil 2.4. Katı madde anahtar eğrileri (Kişi ve ark., 2003)

3. KİRLLETİCİ KAYNAK TIPLERİ

3.1. Sediment ve AKM Kaynakları

Küresel iklim değişikliği ile beraber ortaya çıkan yağış rejimindeki düzensizlikler dünyanın bazı bölgelerinde de erozyon miktarını arttırmıştır. Bu risk ülkemizde dünya ortalamasından 4 kat, Avrupa ortalamasından 17 kat daha fazla miktardaki toprağı akarsular vasıtasıyla sürükleyerek baraj, göl ve denizlere taşınmasına neden olmaktadır (Kalkan, 2009). Türkiye’de yaklaşık olarak yılda 450 milyon ton sedimentin askı malzemesi olarak taşındığı bilinmektedir. Ülkemizdeki bu durum, tarım ekonomisi için çok önemli kaynaklardan biri olan toprağın üst tabakasının yok olmasına ve büyük ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Bunun bir sonucu olarak çıplaklaşan ve çoraklaşan ülke topraklarında erozyon ve sedimentasyon olayları ile birlikte çevre kirliliği sorunu da gündeme gelmiş bulunmaktadır (Kişi ve ark. 2003). Aynı zamanda nehirlerde bulunan askıda katı maddeler denize döküldükleri bölgelerde kıyı şeklinde de değişime sebep olarak ayrıca öneme sahiptirler. Askıda katı madde bünyesinde bulundurduğu besin tuzları, hidrofobik organik mikro kirleticileri ve ağır metalleri de beraberinde taşımaktadır. Buna bağlı olarak birçok kirletici materyal açık sulara taşınma riski altındadırlar. Çizelge 3.1.’de askıda katı maddenin okyanusa ve denizlere taşınma kaynakları gösterilmektedir (Süzal ve Bizsel 2008).

Çizelge 3.1. Okyanuslara ve denizlere taşınan yıllık AKM kaynakları ve miktarları (Süzal ve Bizsel, 2008)

AKM kaynakları	Miktar (ton/yıl)
Nehirler ile	$18,3 \times 10^9$
Kıyısız erozyonla	$0,25 \times 10^9$
Biojenik sedimentasyon yoluyla	
CaCO ₃	$1,4 \times 10^9$
SiO ₂	$0,49 \times 10^9$
Rüzgarların taşıdığı tozlar ile	$0,6 \times 10^9$
Yer altı suları ile	$<0,48 \times 10^9$

Akarsulara değişik kaynaklardan sediment ulaşır. Doğal ve yapay sediment kaynakları olmak üzere iki grup altında toplanabilecek kaynaklar arasında; yüzey, parmak, oyuntu erozyonları, akarsu yatağı ve kıyı erozyonu, toprak kaymaları, tarımsal işlemler, çeşitli amaçlar için yapılan inşaatlar, akarsu yatağı ıslah çalışmaları, maden ve taş ocağı kalıntıları, akarsu yatağından kumçakıl alınması vb. faaliyetler sayılabilir. Bu kaynaklar arasında özellikle erozyon ve sedimentasyon birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de önemli sorunlardan birisini oluşturmaktadır.

3.2. Erozyon

Erozyon çok farklı şekilde tanımlanan bir kavramdır. Genel olarak yer kabuğunu oluşturan kayalar öncelikle akarsular ve daha farklı dış etmenler tarafından aşındırılır ve bu aşınma sonucu oluşan taşınma olayına erozyon denmektedir. Bir başka tanımda ise erozyon, toprağın su, rüzgar, su dalgası ve buzul gibi etmenlerin etkisi ile aşınması ve bir yerden diğer bir yere taşınması olarak adlandırılmaktadır. Bu tanımda belirtilen etmenlere göre erozyon o etmenin ismi ile tanımlanmaktadır. Yani suyun oluşturduğu erozyona su erozyonu, rüzgarın etkisiyle ortaya çıkan erozyona da rüzgar erozyonu denilmektedir (Barut, 2010). Az önce bahsedilen etmenlere bağlı olarak aşınan katı maddelerin akarsulara ulaşması da havza erozyonudur. Bu süreç yağmur damlalarının yere düşmesi ile birlikte başlamaktadır. Düşen bu damlaların sahip olduğu enerji sayesinde topraktan küçük parçaları koparır, bu kopan parçalar yüzeysel akışa geçen su ile taşınmaya başlarlar (Doğan, 2008).

3.2.1. Erozyon Tipleri

Toprak erozyonunun aktif kuvvetleri su ve rüzgardır. Doğadaki etkileri farklı olsa da arazinin yüzeyinden toprağın taşındığı bir gerçektir. Yağışın az olduğu yerlerde rüzgar erozyonu, yağışın fazla olduğu yerlerde de su erozyonu daha etkili olmaktadır. Hem su hem de rüzgar erozyonunun etki dereceleri toprak

yüzeyinden akan suyun ve rüzgarın şiddetine bağlı olarak artar. Her iki erozyon çeşidinde de doğal bitki örtüsünün tahribatı söz konusudur.

Su erozyonu ve çeşitleri: Toprağın yağmur suları ile hareketine su erozyonu adı verilir. Açık olan arazi yüzeyine yağın şiddetli yağışlar veya karların ani erimeleri sonucunda meydana gelmektedir. Bu erozyon tipinde arazinin eğim durumu, toprak tipi, bitki örtüsü yoğunluğu, yağışın miktarı ve şiddeti önemlidir. Genel olarak su erozyonu dört farklı şekilde gerçekleşmektedir.

Yağmur damlası erozyonu: Su erozyonun bir tipi olan yağmur damlası erozyonu yağmur damlalarının sürülmüş veya bitki örtüsü bulunmayan toprak yüzeyine şiddetli vurması sonucunda oluşur. Toprağa düşen yağmur damlaları toprak zerrecelerini 1-1,5 cm çapında bir daire içerisinde etrafa ve aşağı yukarı 60cm yukarıya doğru sıçratır. Eğimli arazilerde zerreceleri aşağıya doğru sıçrattığı için toprağın ince materyali yamaçların etek kısımlarında toplanır ve tarlalarda verimsiz iri parçalar kalır. Ayrıca toprağın çarpan yağmur damlaları toprağı parçalayarak toprak materyalini yüzey akış suyu ile taşımaya etkili olur. Yağışlı devrede, toprağa düşen yağmur damlaları, toprağın kuru olduğu anlarda toprak tarafından absorbe edilir. Daha sonra toprağın ıslanması ile toprak üzerine düşen yağmur damlaları toprağı sıçratır. Sıçrayan bu su çamur içerir, oluşan çamurlu su toprak içine nüfus ederek boşlukları doldurur ve bu boşluklar tıkanır. Yağmur damlalarının toprak yüzeyine yaptığı devamlı darbeler sonucunda toprak yüzü sıkışır ve toprak kuruduğu zaman yüzeyinde bir tür kaymak tabakası oluşur. Oluşan bu kaymak tabakası suyun toprak içine nüfusunu önlediği gibi topraktaki hava sirkülasyonuna da engel olur. Kaymak tabakası zararlı bir tabaka olup tohumların çimlenmesini ve toprak yüzeyine de çıkmasının önler. İşte yağmur damlalarının meydana getirmiş olduğu bu erozyon tipine balçık erozyonu da denilir. Yağışın devamlı olması halinde toprak materyali yüzey akış suyu ile arazinin yüzeyinden fazlaca taşınmaya başlar. İşte bu dönem yüzey erozyonunun başlangıç evresidir.

Yüzey erozyonu: Toprağın ince bir tabaka halinde toprak yüzeyinden ayrılması olayına yüzey erozyonu denir. Bu erozyon tarla içerisinde ve genellikle eğimli sahalarda meydana gelir. Şiddetli bir yağış sonucunda toprak tarafından tutulamayan su eğime bağlı olarak akar ve beraberinde toprağın ince materyalini

de taşıyarak yüzey erozyonunu oluşturur. Koyu renkli üst toprak erozyonunun ayrılması ile arazide açık renkli alt toprak kısmının topoğrafya yüzeyine çıktığı görülür. Toprağın taşınması bu tip erozyon şeklinde gayet yavaş olarak devam eder ve toprak erozyonu hakkında bilgi sahibi olmayan çiftçiler için olay toprak renginin değişmesi gibi basit bir olay olarak görülür. Çiftçiler bu tip erozyonun tehlikesini tarlalarında verimsiz alt toprak kısmının lekeler halinde yahut ana kayanın ortaya çıkmasına veya sürüm esnasında pulluğun sert tabakaya değmesine kadar erozyonun tehlikesini anlayamazlar. Erozyon yönünden herhangi bir koruma tedbiri alınmamış araziler tabaka erozyonu yönünden çok hassastırlar. Bu gibi arazilerde iklimin toprak karakterleri ile arazinin eğiminin etkisi büyüktür. Bol yağışlı bölgelerde orta veya fazla eğimli araziler bu tip erozyondan fazlaca zarar görürler. Organik madde yönünden fakir, tek katmanlı topraklar ile ince tekstürlü topraklar kolayca taşınırlar. Bitki örtüsünden yoksun her türlü arazide yüzey erozyonu ortaya çıkar. Toprak koruma önlemleri alınmamış, geçirgen olmayan sert killi tabakalar içeren topraklar yüzey erozyonundan en fazla etkilenen topraklardır.

Oluk erozyonu: Bu tip erozyonda arazi yüzeyinden küçük kanallar meydana gelir. Oluşan kanallar genellikle yüzeysel olup arazinin sürülmesi sırasında ortadan kaybolur. Oluk erozyonu yüzey erozyonu ile oyuntu erozyonu arasında kalan bir devredir. Diğer bir deyişle yüzey erozyonun ilerlemiş bir devresidir. %3-5 den fazla olan eğimli arazilerde ve yeni sürülmüş topraklarda oluk erozyonu daha yaygın olarak görülmektedir.

Oyuntu veya sel yarıntısı erozyonu: Bu tip erozyon şeklinde sel sularının yoğun olması hallerinde eğimli sahalarda küçük çapta oyuntular oluşur. Zamanında önlem alınmazsa açılan oyuklar derinleşmeye başlar ve tarım aletlerinin kullanılması imkânsız hale gelir. Oyuntu erozyonu açıkta kalan doğal drenaj kanallarından bazen hayvanların gidip gelmeleri sonucunda açtıkları izlerden, ormanlarda toprakların sürüklenmesi sırasında meydana gelen oluklardan, alttan oyulmuş teraslardan, şekil ve yönleri yeteri kadar dikkat ve özenle yapılmamış hendekler boyunca eş yükselti eğrilerine paralel ekim ve sürüm yapılmamış arazilerde belirtilen erozyon tipi meydana gelir. Oyuntu erozyonu ile meydana gelen toprak kayıpları sonucunda araziye tarım makineleri

ile işlemek oldukça güçtür. Oyuntu erozyonu V tipi ve U tipi oyuntular olmak üzere iki grupta toplanırlar. Bu farklı iki grup erozyon şekli toprağın alt toprak kısmının karakteri ile ilişkilidir. Bu karakterler erozyonun şekli üzerinde etkili olur. Eğer toprak materyali kolaylıkla aşınıyorsa meydana gelen oyuntuların duvarları diktir. Eğer alt toprak kısmındaki tabakalar erozyona dayanıklı ise oluşan oyuntuların duvarları hafif eğimlidir.

Rüzgâr erozyonu: Rüzgârın toprak materyalini taşıma gücü suya nazaran düşüktür. Rüzgârla taşınan genellikle küçük olan toprak parçacıkları rüzgârın şiddetine bağlı olarak bir yerden bir yere hareket ederler. Heterojen karakterli bir toprak materyali üzerinde esen rüzgârlar ince materyali beraberlerinde sürüklerler ve bir yerde biriktirirler. Taşınan toprağın miktarı, taneciklerin boyutları, rüzgârın şiddeti, taneciklerin yoğunluğu ve şekli ile ilgilidir. Rüzgâr erozyonu kurak bölgelerde bitkisiz çıplak sahalarda topoğrafik durumu düz veya hafif eğimli olan arazilerde etkisini gösterir. Esen şiddetli rüzgârlar ince toprak materyalini kendi doğrultusunda sürükleyerek büyük bir toz kümesi şeklinde taşırlar. Taşınan materyaller bitki örtüsünün bulunduğu yerlere yığılır ve buralarda küçük tepecikler meydana gelir. Kurak ve yarı kurak bölgelerde toprakların çoğu tek tane katmanlı olup bu durum doğal veya tarımsal durumdan da ileri gelir. Kumlu topraklarda organik ve inorganik kolloidlerin az oluşu nedeniyle tanecikler arasındaki kohezyon kuvveti zayıftır. Bu durumdaki topraklar kuru oldukları zaman rüzgâr erozyonuna maruz kalırlar. Rüzgâr erozyonu ile taşınan ince materyal, topraklarının verimlilik gücünü azalttığı gibi, bu materyallerin bir yerde yığılması sonucunda da tarım altına alınmış arazilerde tahribata yol açar.

Akarsu erozyonu: Akarsuların genellikle aktıkları yataklarında taşıdıkları suyla orantılı olarak aşındırma yaparlar. Aşındırdıkları bu materyalleri de yine güçleri oranlarında taşıyarak biriktirebilirler. Akarsuyun havzası içinde çeşitli boyuttaki ve esas akarsu boyunda meydana gelen erozyon genellikle yerel karakterdedir. Bu erozyon türü ayrıca akarsuyun taşıdığı su miktarına, havzadaki iklim koşulları, özellikle yağış rejimine bağlıdır. Düzensiz rejimli akarsuların kenarlarında taşkın zamanlarında sık sık erozyon olayı meydana gelmekte ve büyük oranda toprak kütlesi alttan oyulmak suretiyle taşınmaktadır. Ancak akarsu erozyonunun en karakteristik özelliği olayın yalnızca fazla su taşıdığı taşkın

anında olmasıdır. Bilindiği gibi akarsu zaman zaman menderesler çizerek akar. Bu akış sırasında çoğu kez büyük su kütlesi güçlü bir şekilde akarsu yatağının bir tarafına çarpar. Bu çarpış anında da o kesimde tahribat yapar. Yön değiştiren su kütlesi daha ileride yatağın bir başka kesimine vurunca tekrar tahribat yapar ve bu şekilde hareketine uygun olarak yalnızca yatağı boyunca tahribat yaparak erozyona neden olabilir (Mater, 1995).

3.2.2. Erozyon Üzerinde Rol Oynayan Faktörler

Toprak erozyonu üzerinde rol oynayan faktörler iki gruba ayrılabilir. Bunlardan birincisi “doğal faktörler”, diğeri ise “antropojen faktörler” olarak adlandırılan ve insan etkisinden kaynaklanan faktörlerdir.

Doğal faktörler olarak arazinin topoğrafik, toprak, iklim ve bitki örtüsü gibi özellikleri sayılabilir. Yapılan araştırmalarda elde edilen sonuçlara göre arazinin topoğrafik özelliklerinden olan eğim ile erozyon şiddeti arasında pozitif ilişkiler söz konusudur. Bu ilişkinin derecesi, yağış karakteristiklerine, toprak özelliklerine ve arazinin bitki örtüsü koşullarına göre değişmektedir. Düz veya eğimi %8’i geçmeyen topraklarda hiçbir koruyucu önlem alınmadan tarım yapılabilir. Bunun üstünde eğime sahip olan alanlarda bazı tedbirler alınması gerekmektedir. Bunun üst sınırı ise %24’tür. Yamaçların eğimi ve yamaç uzunluğu artığı durumda yüzeysel akış ve miktarı artacağından toprağın erozyona karşı direncide azalacaktır.

Toprak özellikleri ile erozyon ilişkisinin araştırıldığı çalışmalarda toprağın kırıntı büyüklüğü, dayanıklılığı, su geçirgenliği üzerinde rol oynayan her faktör veya bunların kombinasyonu toprağın erozyon eğilimini belirlediği görülmüştür. Bu çalışmalarda diğere doğal koşulların benzer olduğu durumlarda bile tekstür, katman yapısı, sıkışma ve toprağın ince ve kaba çakıl içeriği bakımından farklı olan topraklarda farklı derecelerde erozyona uğradığı görülmüştür.

Erozyon üzerinde etkili diğere bir faktör olan iklim öğeleri sıcaklık, yağışlar ve rüzgârdır. Bunların miktarları, şiddetleri, yıl içindeki dağılımı erozyon üzerinde değişik etkilere sahiptir. Uzun süreli bol yağışlar ve kısa süreli sağanak halindeki şiddetli yağışlar erozyonla kaybedilen toprak miktarını artırır. Rüzgarın

hızı, süresi ve yönü erozyon üzerinde önemli rol oynar. Birim zamanda düşen yağış miktarı ne kadar yüksek olursa, özellikle çıplak topraklarda, toprak kırıntılarını parçalama ve küçük parçaları sıçratarak harekete geçirme ve taşıma o derece çok olur. Yapılan bir araştırmada 183 yağış olayı incelenmiş, her yağış olayı için 5 dakikada düşen şiddetli yağışa göre 5 tane yağış şiddet grubu ayrılmış ve bunların 1 saatte taşıdığı toprak miktarları hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Yağış şiddeti gruplarıyla erozyon arasındaki ilişkiler (Leibendgut, 1975)

Yağış şiddeti grupları (mm / 5 dakika)	Erozyonla taşınan toprak Ton/saat/km ²
0-25	372
26-51	595
52-101	1101
102-178	3609
229-254	4793

Çizelge 3.2’deki sonuçlardan da anlaşılacağı gibi yağışın şiddetinin yani birim zamandaki yağış miktarında artış olduğun taşınan toprak miktarının da arttığı gözlenmiştir. Bunun temel nedeni yağışların şiddetli olması nedeniyle toprak kırıntılarını parçalamaları ve yüzeysel akışla taşınmasıdır. Ayrıca diğer bir önemli nokta, yağışın şiddetli oluşu nedeniyle bu suların toprak içine geçmesine zaman bulamadan yüzeysel akışa geçmesidir.

Erozyonda etkili olan diğer bir hususda bitki örtüsüdür. Bitki örtüsü erozyona en etkili bir şekilde engel olan doğal bir faktördür. Toprağı sıkı bir şekilde örten bitki örtüsü, yağmur taneciklerinin doğrudan doğruya toprağa çarpıp toprak kırıntılarının parçalamasını ve önce tanelerden oluşan toprak tabakasının hareketini engeller. Bitkiler, eğim yönünde akan yüzeysel akış sularının hızını ve miktarını yaprak ve dal gövdeleriyle azaltarak, toprak taşıma gücünü zayıflatır. Ayrıca bitki toplulukları rüzgârın hızını da azaltarak rüzgar erozyonu sonucu toprağın aşınarak taşınma etkisini de azaltır (Çepel, 1997).

Antropojen kaynak olarak adlandırılan insan kaynaklı etkiler, erozyon üzerine hem yapıcı, hem de yıkıcı olabilir. Fakat insanların erozyon üzerindeki

etkileri çoğunlukla olumsuz yöndedir. İnsanlar tarafından bataklıkların kurutulması, ormanların tahrip edilmesi, diğer doğal kaynakların plansız bir şekilde aşırı kullanılmaları erozyonu tetiklemektedir. Dolayısıyla hızlandırılmış erozyon üzerinde en etkili faktörlerin başında insan gelmektedir. İnsanların bu olumsuz etkileri, hatalı teknik uygulamaların sonucudur. Bu uygulamaların başında yanlış tarım işletmeciliği, arazi yetenek sınıflarına uygun olmayan topraklardan yararlanma, doğal bitki örtüsünü tahrip etme ve hızlı nüfus artışının sürmesi gösterilebilir.

3.2.3. Erozyonun Çevresel Etkileri

1930'lerden beri yapılan çalışmalar, pek çok akarsudaki askıda madde yükünün, havzadaki arazi kullanımının değişmesine bağlı olarak önemli ölçüde arttığını ortaya koymuştur. Toprak erozyonu yaygın kaynak kirliliğinin en önemli nedenidir ve sediment de en çok görülebilen kirleticidir. Erozyonun ve bunun bir sonucu olan sedimentasyonun çevresel etkileri şu şekilde sıralanabilir:

- Alıcı sularda yüksek miktarlardaki sediment yükünün etkileri, su habitatının kısmen veya tamamen bozulması şeklindedir. Özellikle yavaş akımlı sularda yüksek miktardaki sediment yükü, taban faunasını ve florasını örter ve balıkların beslenme alanlarını bozar. Sediment, doğrudan balık ve diğer sucul ekosistem bileşenlerine zarar verdiği gibi besin kaynaklarını da tahrip eder.
- Yüksek miktarlardaki sedimentasyon rezervuarların depolama kapasitelerinin çok çabuk azalmasına ve normal biyolojik hayatı engelleyen taban birikintilerinin artmasına neden olur.
- Sediment ile taşınan besin maddeleri yosun patlamalarına ve dolayısıyla ötrofikasyona neden olur.
- Sediment (özellikle ince taneli sediment), organik bileşenler, metaller, amonyum iyonu, fosfat ve pek çok organik toksik bileşenler için birincil taşıyıcıdır. Örneğin aldrin ve dieldrin gibi pestisitler, DDT ve PCB'ler gibi organik klorlu bileşikler, suda çok az çözünmelerine karşın askıdaki sedimente çok kolay absorbe olurlar.

- Şehir havzalarının hidrolojisinin değişiminden kaynaklanan akarsu kenarlarındaki alanların erozyonu, su ve yaban hayatı için habitat oluşturan akarsu kenarlarındaki bitki ortamının bozulmasına neden olur.
- Sediment nedeniyle oluşan bulanıklık, nehirlerde fotosentez miktarının düşmesine neden olur. Bunun sonucu olarak, habitatta ve besin kaynaklarında azalma görülür.

Bununla birlikte, özellikle kil ve organik partiküllerden oluşan ince sedimentlerin, kirleticileri adsorbe ederek ve biyolojik olarak kullanılamaz hale getirerek bir miktar faydalı olduğu da göz ardı edilmemelidir.

İnsanlar tarafından yapılan çeşitli faaliyetler sonucu meydana gelen erozyon ve bunun sonucu ortaya çıkan sediment yükünü üreten etkenler:

- Tarımsal etkinlikler, geniş alanlardan kaynaklandığı ve toprağı sürme ve işleme sırasında erozyona açık bir hale getirdiği için en önemli sediment kaynaklarından.
- Şehirselle erozyon diğer bir sediment kaynağıdır. Genellikle inşaat alanlarından, yollardan ve geçirgen olmayan alanlardan kaynaklanır.
- Karayolu erozyonu, yol yapımı sırasında geniş alanların kazılması ve bitki örtüsünün kalkması ile ortaya çıkar.
- Silvikültürel (orman yönetimi) erozyon, temizlik kesimi çalışmalarında, gerekli yolların inşası sırasında ve kereste taşınımı esnasında ortaya çıkmaktadır. Ancak geride önemli ölçüde bitkisel kalıntı bırakıldığı için tarım arazilerine göre daha az erozyona neden olur.
- Madenlerden kaynaklanan erozyon da miktar ve tip olarak inşaat sahalarına benzer tarzda erozyona yol açar. Yol yapımı ve maden sahasının açılması için bitki örtüsünün ortadan kaldırılması kadar, madencilik sürecinin kendisi de büyük bir erozyon kaynağıdır.
- Akarsu kenarı, kanal ve kıyılardaki erozyon yoğun su akışı ve dalga hareketleri nedeniyle oluşur. Bazı nehirlerde kıyı ve kanal erozyonundan kaynaklanan sediment yükü oldukça fazladır.

Kaynağında oluşan sediment, gerek kalite gerekse miktar bakımından alıcı su kütesinden ölçülen sediment ile aynı değildir. Kaynakla alıcı su arasındaki uzaklık, bitki örtüsü, sahanın eğim ve pürüzlülük özellikleri ile yüzeysel akış

sırasındaki havuzlaşma ve depolama özellikleri kaynaktan alıcı suya sediment taşınımını etkileyen faktörler arasında sayılabilir. Erozyon aynı zamanda doğal olarak ta oluştuğundan, sediment yüklerinin tamamen kontrolü ve sulardan uzaklaştırılması gerçekçi değildir (Albek, 2001).

Erozyonla birlikte kaybolan toprakların miktarlarının tahmin edilebilmesi için yaygın bir şekilde kullanılan matematiksel modellerden birisi Evrensel Toprak Kaybı Denklemidir (USLE). Wischmeier ve Smith (1978) tarafından tarım arazilerinde kullanılmak üzere geliştirilen eşitlik, günümüze kadar bazı revizyonlara uğramıştır. Çalışma içerisinde “4.4. Sediment” başlığı içerisinde bu konu ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

4. SWAT Modeli

4.1. SWAT Modelinin Tarihçesi

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) büyük ve karmaşık havzalarda tarımsal faaliyetler sonucu oluşan kirliliğin su, sediment ve gübre verimi üzerine uzun dönem etkilerinin tahmin edilmesi için USDA-ARS tarafından geliştirilmiş fiziksel bir modeldir. ARS tarafından geliştirilen CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System), EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) gibi noktasal olmayan kaynaklı kirliliğin havzalar üzerine olan etkisini simüle eden çeşitli modellerin birleştirilmesi sonucu SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) ortaya çıkmıştır.

SWRRB modeli CREAMS modelindeki günlük yağış hidroloji modelinin modifikasyonu ile oluşmuştur. Bu modelin CREAMS'ten temel olarak bazı farkları vardır. Bunlar; havza su veriminin tahmini için birbirinden farklı alt havzalarda eş zamanlı olarak hesaplamalara izin verecek şekilde genişletilmiş olması, yer altı suyu ve geri akış bileşenleri eklenmiş olması, su ve sediment verimi üzerine rezervuarların etkilerinin hesaplanması için rezervuar depolama bileşenleri eklenmiş olması, zamansal ve mekansal olarak iklimi temsil eden ve uzun dönem simülasyona olanak sağlayan yağış, güneş ışınması ve sıcaklık gibi verilerden oluşan bir hava simülasyon modeli eklenmiş olması, pik debiyi tahmin edebilmek için yöntem geliştirilmiş olması, bitki büyümesindeki yıllık değişikliği görebilmek için EPIC bitki büyüme modeli eklenmiş olması, basit bir taşkın bileşeni eklenmiş olması, göller, rezervuarlar, akarsular ve derelerdeki sedimentin hareketini simüle etmek için sediment taşınım bileşenlerinin eklenmiş olması ve iletim kaybı hesaplarının dahil edilmiş olmasıdır.

Pik debinin tahmini için SCS (Soil Conservation Service) metodu ve geliştirilen sediment verimi eşitlikleriyle havza yönetim problemlerine karşı SWRRB'ün yetenekleri de genişlemiştir. SWRRB havzayı 10 alt havzaya bölmeye izin verebilen bir programdır. Büyük havzalardaki akışı simüle etme ihtiyacı ROTO (Routing Outputs to Outlet) denilen bir programın geliştirilmesine

imkan sağlamıştır. ROTO kanal ve rezervuarlar boyunca öteleme yapabilen bir program olmasından dolayı SWRRB'deki alt havza sorununu da ortadan kaldırmıştır. SWRRB'ün bağımsız olarak çalışması ve oradan elde edilen girdilerin ROTO tarafından kullanılma ihtiyacı SWRRB ve ROTO'nun birleşmesine ve SWAT modelinin oluşmasını sağlamıştır (Neitsch ve ark., 2005). Günümüzde kullanılan en son versiyon SWAT2009'dur.

4.2. Hidroloji

SWAT modelindeki hidrolojik döngüde temel alınan su dengesi eşitliği Denklem (4.1)'deki gibidir.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte;

SW_t : Toprağın su içeriği (mm),

SW_0 : Başlangıçtaki toprağın su içeriği (mm),

R_{day} : Yağış miktarı (mm),

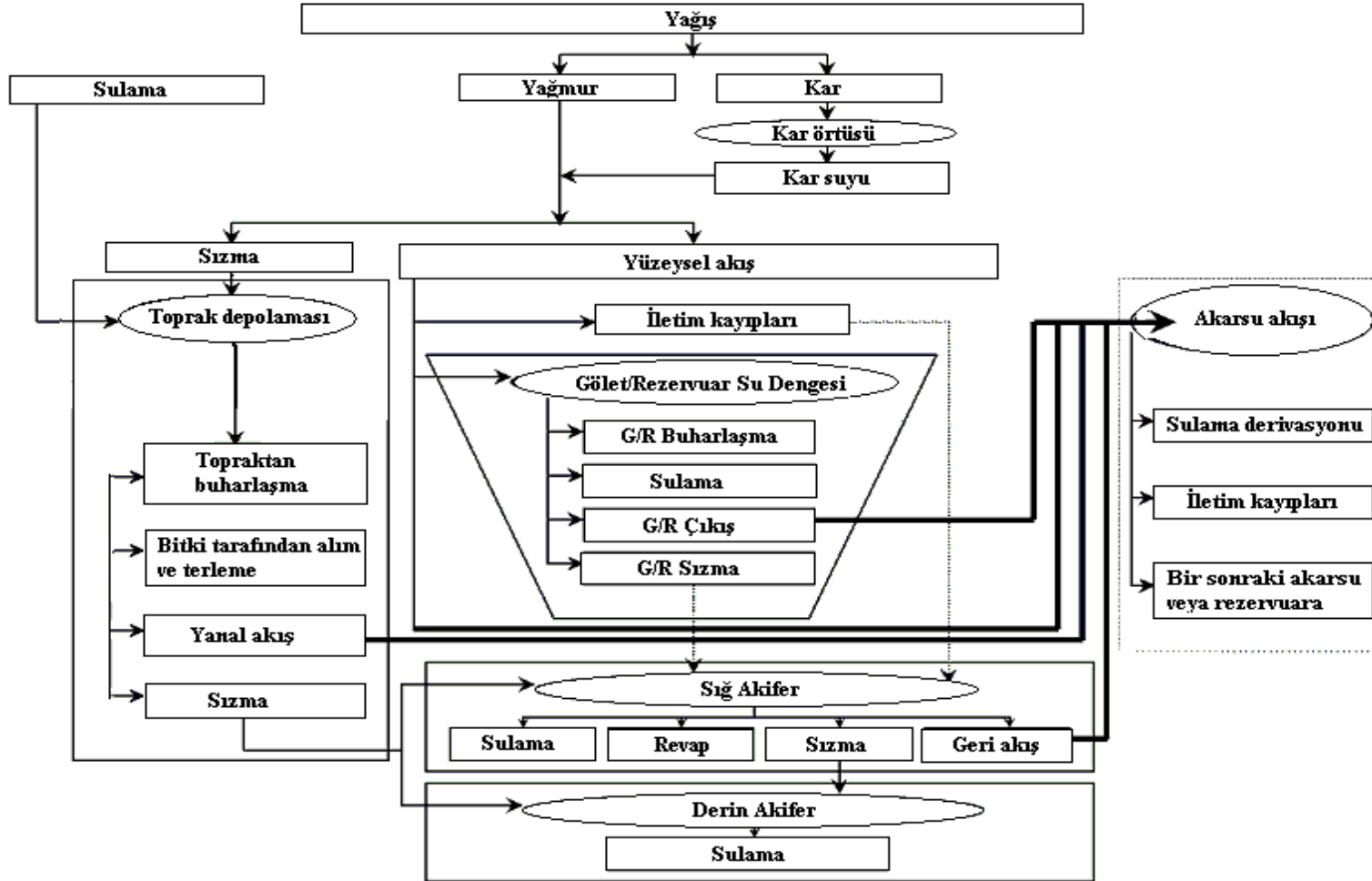
Q_{surf} : Yüzeysel akışa geçen su miktarı (mm),

E_a : Buharlaşma ve terleme (mm),

w_{seep} : Sızan su miktarı (mm),

Q_{gw} : Geri akış su miktarı (mm),

Modelde bitki ve toprak çeşitliliğine göre buharlaşma ve terlemedeki farklılık, havzanın alt birimlere ayrılmasını gerektirir. Bunun için arazi kullanım sınıfları, toprak tipleri ve eğim sınıflarının kombinasyonlarından oluşan, her bir alt havzayı daha ayrıntılı bir şekilde incelemeye olanak sunan hidrolojik etki birimleri (HRU) kullanılmaktadır. Bu sayede her bir HRU'daki yüzeysel akış miktarını ve havzanın bütündeki toplam su miktarını tahmini gerçekleştirir. SWAT'ın yapısında suyun hareketinin şematik yapısı Şekil 4.1.'de gösterilmektedir (Neitsch ve ark., 2005).



Şekil 4.1. SWAT modelindeki su hareketinin şematik gösteri

Yüzeysel akış: Yüzeysel akış toprağa uygulanan suyun hızının, sızma hızından daha yüksek olduğu durumda oluşmaktadır. Genelde kuru bir topraktaki sızma hızı çok yüksektir. Fakat, toprak suyu doymaya başladıkça bu oran da gittikçe düşer ve bir süre sonra da yüzeysel akış başlar.

SWAT modelinde yüzeysel akışın tahmini için SCS eğri numarası tekniği kullanılmaktadır. SCS eğri numarası eşitliği 1950'lerde kullanılmaya başlanan ampirik bir modeldir. Farklı arazi kullanım sınıfları ve toprak tiplerine sahip alanlarda yüzeysel akışın tahmini için uzun zamanlı çalışmalardan sonra Denklem(4.2)'deki eşitliğe ulaşılmıştır.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0,2S)^2}{(R_{day} + 0,8S)} \quad (4.2)$$

Bu eşitlikte;

Q_{surf} : Yüzeysel akışa geçen su miktarı (mm),

R_{day} : Günlük yağış miktarı (mm),

S : Tutulma parametresi (mm),

Denklem (4.2)'de de görüldüğü gibi günlük yağış miktarı $0,2S$ 'den küçük olduğu durumda yüzeysel akış oluşmamaktadır. Eşitlikteki tutulma parametresi de topraktaki su içeriğini etkileyen, toprak yapısı, arazi kullanımı ve eğim gibi arazi özelliklerine bağlı olarak farklılık gösteren bir değişkendir. SCS eğri numarası metodundan oluşturulan yüzeysel akış ile yağış arasındaki ilişki Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Pik yüzeysel akış : Pik debi, sağanak yağışların gerçekleştiği dönemlerde meydana gelmektedir. Bu sağanak yağışlar yüksek miktarlarda sediment taşınımına yol açar. SWAT modeli pik yüzeysel akışı hesaplamak için geliştirilmiş rasyonel yöntemi (Rational Method) kullanır. Bu yöntem sulama kanalları ve taşkın kontrol sistemlerinin tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile pik debi Denklem (4.3)'deki şekilde hesaplanmaktadır.

$$q_{peak} = \frac{C \times i \times Area}{3,6} \quad (4.3)$$

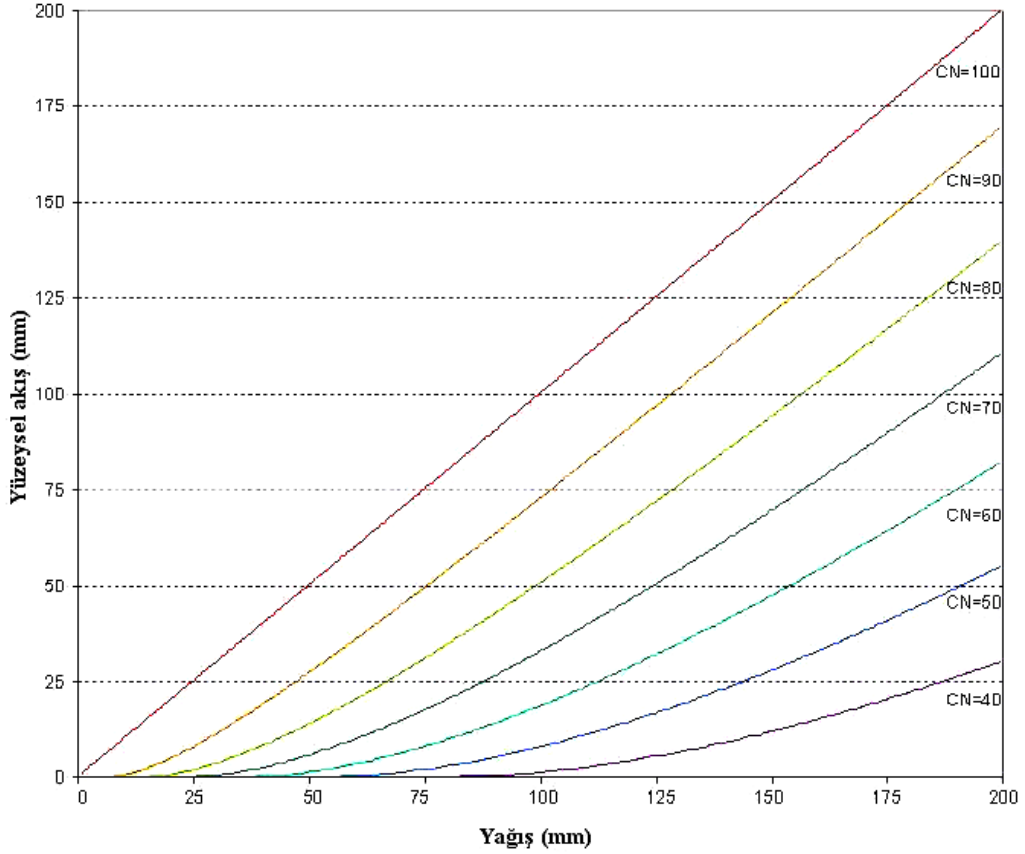
Bu eşitlikte;

q_{peak} : Pik debi (m^3/s),

C : Yüzeysel akış katsayısı,

i : Yağış yoğunluğu (mm/hr),

$Area$: Havza alanı (km^2),



Şekil 4.2. SCS eğri numarası metodundaki yağış-yüzeysel akış ilişkisi

4.3. İklim

Havzadaki hidrolojik döngüyü belirleyen önemli bileşenlerden biri meteorolojik verilerdir. SWAT için gerekli olan meteorolojik veriler günlük yağış, maksimum ve minimum hava sıcaklığı, güneş ışınması, rüzgar hızı ve bağıl nemdir. Model bu değişkenlerin bazılarını ölçülen gerçek verilerden simüle etme kabiliyetine de sahiptir. Örneğin yağış tahminini gerçekleştirebilmek için, nem,

sıcaklık ve solar radyasyon gibi meteorolojik değişkenleri dikkate almaktadır. (Neitsch ve ark., 2005).

Yağış: Programın kullandığı yağış modeli Nicks (1974) tarafından geliştirilen birinci dereceden bir Markov zinciridir. Model yağış ihtimalini belirlemek için bir önceki günün ıslak veya kuru geçip geçmediğini inceler. Eğer yağış miktarı 0,1mm'den büyük ise, o gün ıslak gün olarak kabul edilir. Verilen bir ıslak/kuru durumda model, yağışın meydana gelip gelemeyeceğini stokastik olarak belirler. Bunu gerçekleştirirken model 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı üretir, bu rastgele üretilen sayı uygun olan ıslak-kuru gün ihtimali ile karşılaştırılır, eğer bu ihtimal rastgele atanan sayıya eşit veya küçük ise gün ıslak, daha büyükse gün kuru olarak varsayılır. Bir ıslak gün ihtimali, ay içerisindeki ıslak gün sayısına bağlı olarak belirlenir. Islak gün ihtimali Denklem (4.4)'deki gibi ifade edilir. Ayrıca günlük ortalama hava sıcaklığı kullanılarak da yağışın yağmur veya kar olarak düştüğü belirlenir.

$$PW = \frac{NWD}{ND} \quad (4.4)$$

Bu eşitlikte;

PW : Islak gün ihtimali,

NWD : Islak gün sayısı,

ND : Bir aydaki gün sayısı,

Hava Sıcaklığı ve Güneş Işıması: Günlük maksimum ve minimum hava sıcaklığı ve solar radyasyon düzeltilmiş bir ıslak-kuru durum için normal dağılımdan türetilir. Aynı zamanda türetilen hava sıcaklığından da toprak ve su sıcaklığı da belirlenebilmektedir. Her bir ay için günlük maksimum sıcaklık ve solar radyasyon ıslak ve kuru gün ihtimaline göre farklılık göstermektedir. Düzeltme faktörü, özellikle yağışlı günler halinde sıcaklık ve radyasyondaki sapmaları minimum seviyeye düşürmek için kullanılır. Sapmalar, kuru günlerde yağışlı günlerin aksine daha küçüktür. Hava sıcaklığı ve solar radyasyonun hesaplanabilmesi için uzun dönem süregelen standart sapma değerlerinin de hesaplanması gerekmektedir. Günlük maksimum, minimum hava sıcaklığı ve

solar radyasyon Denklem (4.5), Denklem (4.6), Denklem (4.7)'de ifade edilen şekilde üretilirler.

$$T_{mx} = \mu mx_{mon} + X_i(1) \cdot \sigma mx_{mon} \quad (4.5)$$

$$T_{mn} = \mu mn_{mon} + X_i(2) \cdot \sigma mn_{mon} \quad (4.6)$$

$$H_{day} = \mu rad_{mon} + X_i(3) \cdot \sigma rad_{mon} \quad (4.7)$$

Bu eşitliklerde;

T_{mx} : Günlük maksimum sıcaklık,

μmx_{mon} : Ay içerisindeki ortalama maksimum sıcaklık,

$X_i(1)$: Günlük maksimum sıcaklık kalıntısı,

σmx_{mon} : Ay içerisindeki maksimum sıcaklıkların standart sapması,

T_{mn} : Günlük minimum sıcaklık,

μmn_{mon} : Ay içerisindeki ortalama minimum sıcaklık,

$X_i(2)$: Günlük minimum sıcaklık kalıntısı,

σmn_{mon} : Ay içerisindeki minimum sıcaklıkların standart sapması

H_{day} : Günlük solar radyasyon,

μrad_{mon} : Ay içerisindeki ortalama solar radyasyon,

$X_i(3)$: Günlük solar radyasyon kalıntısı,

σrad_{mon} : Ay içerisindeki solar radyasyonun standart sapması,

Bağıl Nem: Bağıl nem herhangi bir sıcaklıktaki var olan nemin o sıcaklıktaki doymuş buhar basıncına oranını ifade eder. SWAT model programı için bu değişken, Penman-Monteith eşitliği ile potansiyel evapotranspirasyonun hesaplanması için gerekmektedir. Günlük ortalama bağıl nem değeri üçgen dağılım yöntemini kullanarak aylık ortalama bağıl nem, ay içerisindeki maksimum bağıl nem, ay içerisindeki minimum bağıl nem ve 0-1 aralığında rastgele bir sayı yardımıyla Denklem (4.8)'deki gibi ifade edilir.

$$R_h = R_{hmon} \cdot \frac{R_{hUmon} - (R_{hUmon} - R_{hmon}) \cdot \left[\frac{R_{hUmon}(1 - rnd_1) - R_{hLmon}(1 - rnd_1)}{R_{hUmon} - R_{hmon}} \right]^{0.5}}{R_{hmon,mean}} \quad (4.8)$$

Bu eşitlikte;

- R_h : Ortalama bağıl nem,
 R_{hmon} : Ay içerisindeki ortalama bağıl nem,
 R_{hUmon} : Ay içerisindeki maksimum bağıl nem,
 R_{hLmon} : Ay içerisindeki minimum bağıl nem,
 $R_{hmon,mean}$: R_{hmon} , R_{hUmon} , R_{hLmon} değerlerinin ortalaması,
 rnd_1 : 0-1 aralığında rastgele bir sayı,

Rüzgâr Hızı: Rüzgar hızı da bağıl nemde olduğu gibi Penman Monteith eşitliği ile potansiyel evapotranspirasyonun hesaplanmasında kullanılır. Günlük ortalama rüzgar hızı SWAT içerisinde geliştirilmiş üssel bir eşitlikle hesaplanmaktadır. Bu eşitlik Denklem (4.9)'daki şekilde ifade edilir.

$$\mu_{10m} = \mu w nd_{mon} \cdot (-\ln(rnd_1))^{0.3} \quad (4.9)$$

Bu eşitlikte;

- μ_{10m} : Ortalama rüzgar hızı (m/s),
 $\mu w nd_{mon}$: Aylık ortalama rüzgar hızı (m/s),
 rnd_1 : 0-1 aralığında rastgele bir sayı,

4.4. Sediment

Erozyon, genel olarak zamanla toprağın aşınmasıdır. Yüzeysel akışın ve yağmur damlalarının sahip olduğu kuvvet tarafından toprakta gerçekleşen kopma, taşınma ve birikim olaylarını içermektedir ve havzalar için önemli bir sorundur (Neitsch ve ark., 2005). Bu nedenle Birleşik Devletler Tarım Bakanlığı Toprak Bölümü tarafından erozyonla taşınan toprak miktarının tahmin edilmesi için Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (USLE) geliştirilmiştir. Bu eşitlik su

erozyonunun yol açtığı toprak kayıplarını tahmin için yaygın bir şekilde kullanılan matematiksel bir modeldir. Bu modelin ortaya çıkarılması sırasında Amerika Birleşik Devletlerinin doğusunda 10000'den fazla tarım arazisi üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Kinnell, 2000). Ayrıca son 20 yılda Güney Amerika'da erozyon ile ilgili yapılan birçok çalışmada USLE eşitliğinden yararlanılmıştır (Chou, 2009). Eşitlik üzerinde bazı değişikliklerle 1975 yılında Geliştirilmiş Evrensel Toprak Kaybı Eşitliği (MUSLE) oluşturulmuştur. USLE ile MUSLE arasındaki temel fark USLE'de sadece yağışın neden olduğu erozyon dikkate alınırken, MUSLE'de buna ek olarak yüzeysel akış etkisinin de model içerisine eklenmiştir. Özellikle USLE ile karşılaştırıldığında MUSLE'de anlık sağanak yağışlara bağlı olarak sediment taşınımının daha güvenilir bir şekilde tahmin edildiği ortaya konmuştur (Shen ve ark., 2009).

SWAT modeli de su erozyonuna bağlı olarak taşınan toprak miktarını belirlemede MUSLE eşitliğini (Williams, 1995) kullanmaktadır. Bu eşitlik Denklem (4.10)'daki şekilde ifade edilmektedir.

$$sed = 11,8(Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (4.10)$$

Bu eşitlikte;

sed : Sediment verimi (ton),

Q_{surf} : Yüzeysel akış (mm/ha),

q_{peak} : Pik yüzeysel akış (m^3/s),

$area_{hru}$: HRU alanı (ha),

K_{USLE} : Toprak erodibilite faktörü,

C_{USLE} : Bitki örtüsü ve yönetim faktörü,

P_{USLE} : Toprak koruma faktörü,

LS_{USLE} : Topoğrafik faktör,

$CFRG$: Topraktaki kayalarla ilgili faktör,

Toprak Erodibilite Faktörü (K_{USLE}): Bu faktör toprak yapısına göre değişkenlik göstermektedir. Bazı toprak türlerinde MUSLE'de bahsedilen diğer

bütün faktörler aynı iken, toprak erodibilite faktöründeki farklılığın erozyon üzerinde büyük etkileri gözlenmiştir. K_{USLE} faktörünün ölçümü zaman alıcı ve masraflıdır. Bu yüzden silt ve ince taneli kum içeriğinin %70'in altında olduğu topraklarda bu faktörün belirlenmesi için Wischmeier ve diğ. (1971) tarafından K_{USLE} 'nin hesaplanabilmesi için bazı eşitlikler ortaya konmuştur. Bu eşitlikler Denklem (4.11), (4.12) ve (4.13)'deki eşitlik gösterilmektedir.

$$K_{USLE} = \frac{0,00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3,25 \cdot (c_{soilstr} - 2) + 2,5 \cdot (c_{perm} - 3)}{100} \quad (4.11)$$

$$M = (m_{silt} + m_{vfs}) \cdot (100 - m_c) \quad (4.12)$$

$$OM = 1,72 \cdot orgC \quad (4.13)$$

Bu eşitliklerde;

M : Parçacık boyutuyla ilgili parametre,

OM : Organik madde içeriği,

$c_{soilstr}$: Toprak yapısı ile ilgili kod,

c_{perm} : Geçirimsizlik sınıfı,

m_{silt} : % silt içeriği,

m_{vfs} : % kum içeriği,

m_c : % kil içeriği,

$orgC$: % organik karbon içeriği,

c_{perm} (geçirimsizlik sınıfı), toprak profilindeki en düşük hidrolik iletkenlik temeli alınarak belirlenir. Hidrolik iletkenlik değerine karşılık gelen geçirimsizlik sınıfları Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Bitki Örtüsü ve Yönetim Faktörü (C_{USLE}): Ekilen tarım arazisi üzerinde yapılan çapa, sürme gibi tarımsal aktivitelerden kaynaklanan toprak kaybının, arazinin nadasa bırakıldığı durumlardaki toprak kaybına olan oranı olarak açıklanır. Tarım arazisinde bulunan bitkiler, yağmur damlalarının hızlarını azaltarak toprağa ulaşmasını engellemesi sonucu erozyon etkisini de

azaltmaktadır. Ayrıca toprak üzerinde bulunan bitki kalıntıları da bu etkinin azalmasında oldukça etkilidir. Örneğin, aynı alanı kaplayan bitki kalıntısı ve bitki gölgesi kıyaslandığında bitki kalınlarının daha etkin olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bitki kalıntıları yüzeysel akışa engel olarak akışın hızını ve toprağı taşıma kapasitesine de engel olmaktadır.

Çizelge 4.1. Hidrolik iletkenlik-geçirimsizlik sınıfı

Geçirimsizlik sınıfı	Hidrolik iletkenlik (mm/sa)
1	> 150
2	50-150
3	15-50
4	5-15
5	1-5
6	<1

Model tarafından kullanılan C_{USLE} faktörü, bitki örtüsünün büyüme süreci boyunca değıştiğı için günlük olarak hesaplanmaktadır. Faktörün hesaplanabilmesi için gerekli olan eşitlikler Denklem (4.14) ve Denklem (4.15)'te gösterilmektedir.

$$C_{USLE} = \exp([\ln(0,8) - \ln(C_{USLE, mn})] \cdot \exp[-0,00115 \cdot rsd_{surf}]) + \ln[C_{USLE, mn}] \quad (4.14)$$

$$C_{USLE, mn} = 1,463 \ln[C_{USLE, aa}] + 0,1034 \quad (4.15)$$

Bu eşitliklerde;

$C_{USLE, mn}$: Bitki örtüsü için minimum faktör değeri,

rsd_{surf} : Toprak yüzeyinde bulunan kalıntı miktarı (kg/ha),

$C_{USLE, aa}$: Bitki örtüsü için yıllık ortalama C faktör değeri,

Toprak Koruma Faktörü (P_{USLE}): Araziye uygulanan konturlayarak sürme, teraslama, kontur şerit ekimi gibi destek uygulamalar sonucu oluşan toprak kaybı için ifade edilir. Konturlayarak sürme ve ekim işlemi, düşük ve orta seviye yoğunluktaki sağanıklarda, toprağı erozyona karşı hemen hemen tam olarak korumaktadır. Bu işlem eğimin %3-8 aralığında en etkin şekilde

uygulanabilmektedir. Konturlama için toprak koruma faktörü, eğim ve eğim uzunluğuna göre değişmekte olup bu değerler Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Konturlama için eğim ve uzunluk limitlerindeki P_{USLE} değerleri

Arazi eğimi (%)	P_{USLE}	Maksimum uzunluk (m)
1-2	0,6	122
3-5	0,5	91
6-8	0,5	61
9-12	0,6	37
13-16	0,7	24
17-20	0,8	18
21-25	0,9	15

Topoğrafik (L_{USLE}) ve Kaya (CFRG) Faktörü: Arazi eğiminin neden olduğu toprak kaybını açıklayan topoğrafik faktör Denklem (4.16), toprakta bulunan kayalarla ilgili olan *CFRG* ise Denklem (4.17)'deki gibi hesaplanır.

$$L_{USLE} = \left(\frac{L_{hill}}{22.1} \right)^m \cdot (65.41 \cdot \sin^2(\alpha_{hill}) + 4.56 \cdot \sin \alpha_{hill} + 0.065) \quad (4.16)$$

$$CFRG = \exp(-0.053 \cdot rock) \quad (4.17)$$

Bu eşitliklerde;

L_{hill} : Eğim uzunluğu (m),

α_{hill} : Eğim açısı,

rock : En üst toprak katmanındaki kaya yüzdesi,

5. YAPILAN ÇALIŞMALAR

5.1. Sediment İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Noktasal olmayan kirletici kaynaklarından akarsulara ve dolayısıyla rezervuarlara taşınan sediment büyük problemlere yol açmaktadır. Çek Cumhuriyeti'nde Krasa ve ark. (2005), Vrchlice rezervuarındaki sediment miktarını belirleyebilmek için Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (USLE) ve Watem/SEDEM adlı bir model kullanarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Ölçülen yıllık sediment verimlerinin 0,40-0,45 ton/ha-yıl arasında değiştiği belirlenirken USLE ve Watem/SEDEM'e göre sırasıyla bu oranı 0,36 ile 0,34 ton/ha-yıl olarak bularak tatmin edici sonuçlar bulduklarını vurgulamışlardır.

Akarsularda taşınan sediment miktarlarını belirleyebilmek için akarsu debisi ile taşınan askıda sediment miktarı arasındaki ilişkinin araştırıldığı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Achite ve Quillon (2007), Cezayir'de Akdeniz iklimine sahip, yıllık ortalama 250mm yağış, ortalama debisi $1\text{m}^3/\text{s}$ olan, yarı kurak sayılabilecek Wadi Abd havzasında böyle bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, seçilen istasyonda eş zamanlı olarak 1432 tane askıda sediment (C) ve debi (Q) ölçümleri gerçekleştirilerek aralarındaki ilişkiyi ve bu ölçümler sırasında görülen 138 taşkın olayını da ayrıca incelemişlerdir. Araştırılan C-Q ilişkisinin yanı sıra askıda sediment debisi ile akarsu debisi arasındaki ilişki irdelenmiştir. Sonuç olarak C-Q arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu bulunmuştur. Ayrıca sediment taşınımını önleyici yönde yapılacak faaliyetlerde, yarı kurak bölgelerin yüksek erozyon riskine sahip olduğuna da vurgu yapılmıştır.

İç Anadolu bölgesinde yer alan Seydi Suyu'nda Albek ve ark. (2004), su kalitesinin izlenmesi ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada askıda katı madde derişimlerini farklı iki istasyonda 1999-2000 su yılları süresince aylık ölçümler yaparak incelemişlerdir. Sonuçlara göre her iki istasyondaki askıda katı madde sonuçlarının, yaz aylarında kışa göre daha yüksek değerlere sahip olduğunu tespit ederek bunun yaz aylarında barajdan bırakılan su miktarının artmasıyla akarsu yatağındaki birikmiş sedimentin kalkması ve kıyı erozyonuna bağlı olduğuna vurgu yapmışlardır. Albek (2001), yapmış olduğu

doktora çalışmasında HSPF modeli kullanarak Seydi Suyu havzasında sediment taşınımının modellenmesi için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada farklı senaryolarla ilerisi için olası durumlar karşısında havzanın vereceği tepkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Havza üzerindeki bitki örtüsünün arttırılması ve konturlama, teraslama gibi tarımsal uygulamaların etkileri de incelenmiştir. Sonuç olarak bitki örtüsünün ve tarımsal faaliyetlerin düzenlenmesi sonucunda erozyonun %30'lara varan değerlerde azaltılabileceğini saptamıştır. Albek ve Göncü (2005), yaptıkları başka bir çalışmada Türkiye'nin seçilmiş bazı akarsularında debi ve askıda katı madde derişimlerinin 20. yüzyılın son çeyreğinde gözlenen eğilimleri incelemişlerdir. Aylık debi değerleri için 16 farklı istasyonda yapılan analizlerde 6 istasyonun anlamlı eğilimlere sahip olduğu, bunlardan 4 tanesinde eğilimin azalma yönünde olduğunu tespit etmişlerdir. Aylık olarak askıda katı madde derişimlerinde ise, 16 istasyondan, 9 istasyonun anlamlı eğilime sahip olduğu bulunurken, bu istasyonların tümünün azalma eğiliminde olduklarını saptamışlardır. Debi ile askıda katı madde arasındaki ilişki düşünüldüğünde bazı akarsuların havzalarında, debiden bağımsız birtakım süreçlerin askıda katı maddeyi etkilediği, topoğrafik özellikler, bitki örtüsü ve arazi kullanımı incelenerek bu süreçlerin belirlenebileceğine dikkat çekmişlerdir. Albek (2002) yaptığı bir başka çalışmada Porsuk çayı üzerinde bulunan Beşdeğirmen su kalitesi gözlem istasyonunun 1983-2000 yılları arasındaki debi ve yedi su kalitesi parametresinin eğilimlerini incelemek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak akarsuyun kalitesinin askıda katı madde için daha iyiye gittiğini tespit etmiştir.

Sediment taşınımları için arazi kullanımı çok önemlidir. Yıllar içerisindeki arazi sınıflarındaki bu değişimler akarsulara taşınan sediment miktarlarını da etkilemektedir. Özellikle havzalar içerisindeki tarım arazileri önemli sediment kaynaklarıdır. Çek Cumhuriyeti'nde Rompaey ve ark. (2007), bununla ilgili bir çalışma gerçekleştirilmişler. Genel olarak Çek Cumhuriyeti'nde 1990 ile 2000 yılları arasında tarım arazileri terk edilerek bu araziler mera olarak kullanılmaya başlandığı belirtilmiştir. Bu da ülke genelindeki mera arazilerinin %150 oranında artış göstermesine neden olmuştur. Sonuç olarak yapılan çalışmada ekilebilir

tarım arazilerindeki %5'lik bir artışın %15 oranında toprak erozyonu hızında azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir.

Arazi kullanımıyla ilgili olarak yapılan bir başka çalışmada ise Romero ve ark. (2008), çorak arazilerde yağış, yüzeysel akış ve askıda sediment konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi incelemek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla özellikle Ekim 2005 ile Nisan 2007 arasında yağışların gerçekleştiği dönemlerde askıda sediment ve debi ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Ölçüm sonuçlarında çoğunlukla askıda sediment konsantrasyonlarının 100g/l'nin üstünde olduğu, hatta 1200g/l değerlerine bile ulaşıldığı gözlenerek havzalardaki çorak alanlara dikkat çekmişlerdir.

Havza içerisinde akarsularla taşınan sediment miktarının büyük bir kısmı kısa zamanlar içerisinde gerçekleşen taşkın olayları sonucu taşınır. Öztürk ve ark. (2001), Sakarya havzasında havza koruma ve rezervuar planlama çalışmalarında kullanılmaya hazır kolay ve çabuk veri elde etmek için taşınan askıda sediment miktarının tahmin edilmesini amaçlamak için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Havzadan elde edilmiş mevcut sediment verileri ve taşkın debileri kullanılarak taşkın olayları sırasında taşınan sediment miktarları incelenmiş, yıllık sediment miktarı ve o yıldaki önemli taşkınlar sırasında taşınan sediment miktarı arasında ilişkiler geliştirmeye çalışmışlardır. Çalışmada her sediment gözlem istasyonu için birikimli taşınan sediment eğrilerini belirleyerek 45 adet regresyon eşitliği üretmişlerdir. Sonuç olarak yıl içerisindeki ortalama en büyük taşkınla sediment yükünün %18,3-50,3' ünün, en büyük iki taşkınla 27,1-64'ünün, en büyük üç taşkınla 32,1-69,5'inin, en büyük dört taşkınla 35,5-71,5'inin ve en büyük beş taşkınla da 37,2-76,7'sinin taşındığını gözlemlemişlerdir. Yine İtalya'da Lenzi ve Marchi (2000), 1991 ve 1996 yılları arasında Rio Cordon havzasında gerçekleşen yedi taşkın olayını incelemişler ve Eylül 1994'te gerçekleşen taşkınla yıllık sediment yükünün %40'nın bu taşkın sırasında taşındığına vurgu yapmışlardır.

5.2. SWAT İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Ullrich ve Volk (2009) Almanya'nın Saksonya eyaletinde yer alan 315km²'lik Parthe havzasında SWAT model programı kullanılarak tarım

arazilerinde yapılan uygulamaların su kalitesi ve miktarına ilişkin etkilerinin tahmini üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada ayrıca havzadaki tarım arazilerinde ekilen şeker pancarı, kış ve ilkbahar arpası gibi farklı tarım ürünlerinin ihtiyaç duyduğu su miktarları belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun sonucuna göre kış arpasının yaklaşık olarak ilkbahar arpasının yarısı kadar suya ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır. Toprağın geleneksel yöntemlerle sürüldüğü durumdaki sediment yükünün ise 0,173 ton/ha ile en fazla şeker pancarında olduğu gözlenmiş, bunu sırasıyla 0,037 ton/ha ve 0,001 ton/ha ile ilkbahar ve kış arpasının takip ettiği belirtilmiştir.

Bouraoui ve ark. (2005) Tunus'un kuzeyinde, özellikle tarım faaliyetlerinin yoğunlaştığı ve buna bağlı olarak sulamanın artış gösterdiği bir bölge olan Medjerda nehri havzasında SWAT modeli yardımıyla havzanın hem hidrolojik olarak, hem de bazı su kalitesi bileşenleri açısından modellenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma sırasında farklı senaryolar üretilmiş ve bunun sonuçları değerlendirilmiştir. Noktasal kaynakların etkilerinin araştırıldığı bir senaryo da mevcuttur. 219000 kişinin yaşadığı bölgede sadece 49000 kişilik arıtma kapasitesine sahip atıksu arıtma tesisi mevcuttur. Buradaki varsayım tesisin kapasitesinin 170000 kişi daha arttırılıp bölge nüfusuna ulaşması ve aynı verimle çalışması durumunda azot ve fosfor yükünün nasıl değişeceği. Sonuç olarak fosfor yükünün özellikle yaz aylarında %80 oranında, ortalama olarak ise %50 oranında azaldığı, amonyaktaki azalma oranının ise yaz aylarında %60'lara kadar ulaştığı, yıl içerisinde ortalama olarak %25 oranında kaldığı belirlenmiştir.

İran'da SWAT model programı Ghaffari ve ark. (2010), arazi kullanımındaki değişimin hidrolojik simülasyona olan etkilerini belirlemek için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada havzada bulunan mera alanlarının %34,5'inin azaldığı ve bu alanların % 13,9'u maki, %12,1'nin yağmur sularıyla sulanan tarım arazisi, %5,5'nin çıplak arazi, %2,2'sinin sulama yapılan tarım arazisi ve %0,7'lik alanında kentsel alana dönüştüğü kabul edilmiştir. Bunun sonucunda yüzeysel akış miktarında %33 lük bir artış, yer altı suyunda ise %22'lik bir azalma tespit edilmiştir.

Rostamian ve ark. (2008), İran'da iki farklı havzada SWAT programı kullanarak yüzeysel akış ve sedimentin modellenmesi ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmişler. Çalışmada tahmin edilen yüzeysel akış değerlerinin sedimente oranla daha iyi sonuç verdiği anlaşılmıştır. Havza içerisinde bulunan dağlık bölgelere düşen karın erime sürecinin tam olarak karakterize edilememesi sonucu bazı dönemlerde yüzeysel akışın tahmininde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılıkların olduğu pik yüzeysel akış debilerinden sediment değerlerinin de etkilendiği düşünülmüştür.

Amerika'da küçük ölçekli bir havzada Green ve ark. (2008), SWAT 2005 kullanarak hidrolojik kalibrasyon üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada SWAT modelinin çok fazla gerçek girdi verisine ihtiyaç duyan fiziksel bir model olduğu, bunun da kalibrasyon sürecini zorlaştırdığı vurgulanmıştır. Bu nedenle parametrelerin kalibre edilebilmesi için iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Bunlardan ilki parametrelerin kalibrasyonu için 5 yıllık bir dönem, ikincisinde ise 1 yıllık bir dönem göz önünde bulundurulmuş ve bu senaryolar hem manuel hem de otomatik kalibrasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hem manuel hem de otomatik kalibrasyonun 5 yıllık dönemde daha iyi sonuçlar verdiği ve ayrıca her iki senaryo içinde otomatik kalibrasyon sonuçlarının, manuel kalibrasyona göre daha iyi olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda hidrolojik kalibrasyon için en duyarlı parametrelerin de eğri numarası (CN2), ve toprak buharlaşma dengeleme faktörü (ESCO) olduğu tespit edilmiştir.

Geza ve McCray (2008), tarafından farklı çözünürlükteki toprak verilerinin hidrojik ve su kalitesi tahminlerine olan etkilerini belirlemek için SWAT modeli ile bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada iki farklı çözünürlükte toprak verisi göz önünde bulundurulmuş, bunların ilkinde 51 adet toprak türünden toplam 1301 HRU ile, diğerinde ise 3 adet toprak türünden toplam 261 HRU ile model çalıştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 1301 HRU ve 261 HRU için sırasıyla R^2 değeri 0,74-0,61, Nash-Sutcliffe değeri ise 0,70-0,60 olarak bulunmuştur.

Mulungu ve Mkhanda (2005), tarafından Tanzanya'da yapılan bir çalışmada, havza hidrolojik olarak modellenmeye çalışılmıştır. Burada 1x1 km çözünürlükte sayısal yükseklik haritaları, United States Geological Survey

(USGS)'den temin edilmiş arazi kullanımı ve toprak haritaları kullanılmıştır. Çalışmada 1976-1980 aralığında kalibrasyon, 1981-1983 yılları arasında da validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda kalibrasyon için Nash-Sutcliffe değeri 0,14, validasyon için ise bu değer 0,36 olarak bulunmuş. Yine Mulungu ve Munishi (2005), bu çalışmaya ek olarak başka bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada 90m çözünürlükte sayısal yükseklik haritası, LandSat TM uydusundan alınan 30m çözünürlükteki arazi kullanımı haritası ve ISRIC World Soil Information Database'den temin edilen toprak haritaları kullanılmış ve aynı kalibrasyon, validasyon dönemlerinde model sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlara göre kalibrasyon dönemindeki Nash-Sutcliffe değeri 0,14, validasyon için ise bu değer 0,41 olarak tespit edilmiştir. Tahmin edilen değerler ile gözlem değerleri arasında büyük farklar her iki çalışmada da gözlenmiş ve bunun nedeninin sayısal yükseklik, arazi kullanımı, toprak haritalarının çözünürlüğünden çok diğer faktörlerin etkili olduğu öngörülmüştür.

Sediment çalışmalarında oldukça sık ve etkin bir şekilde kullanılan AnnAGNPS ve SWAT modellerinin karşılaştırmak için Kliment ve ark. (2008), bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma için Çek Cumhuriyeti'nin kuzeybatısında tarım arazilerinin yoğun olduğu, 374km²'lik gibi çok büyük sayılmayacak Blánka havzası seçilmiştir. Her iki model için de 1995-2004 yılları arasındaki zaman periyodunda çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk 5 yıl kalibrasyon, ikinci 5 yıllık periyot ise validasyon için kullanılmıştır. Uzun dönem simülasyonlarda SWAT modelinin AnnAGNPS'ye göre hidrolojik durumu daha iyi temsil ettiği, fakat kısa dönemde gerçekleşen yağış olayları özellikle de sağanak yağış dönemlerinde AnnAGNPS'nin SWAT'a göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Ayrıca 10 senelik periyot içerisinde tarım arazilerinin bir kısmı mera olarak kullanılmaya başlanmış bu da her iki programın arazi kullanımındaki değişimin etkilerini test edebilmek için bir fırsat oluşturmuştur. Bunun sonucunda arazi kullanımındaki değişimin sediment yükünü %10-%30 oranında azalttığı ve her iki modelinde arazi kullanımındaki değişimlere oldukça duyarlı olduğu belirlenmiştir.

Hidrolojik modeller için en önemli bileşenlerden birisi meteorolojik verilerdir. Özellikle iklim değişikliği çalışmalarında, belli başlı iklim araştırma

merkezlerinden elde edilen iklim veri setleri yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kapsamda Çin’de Xu ve ark. (2010), Xiangxi nehrinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada meteorolojik veriler, iki kaynaktan temin edilmiştir. Bunlardan ilki bölgede bulunan Xingsan meteoroloji istasyonundaki günlük gözlem değerleri, diğeri ise, East Anglia Üniversitesi İklim Araştırma Biriminden temin edilen (0,5° x 0,5°) çözünürlüklü meteorolojik veriler kullanılmıştır. Bu verilerden özellikle yağış incelendiğinde yıllık ortalama yağış miktarında 1003mm ve 1052mm gibi büyük bir fark olmadığı gözlenmesine rağmen, bölgedeki istasyon ve küresel veriler arasında yıllık ortalama yağışlı gün sayısının 136’ya 112 olarak farklılık gösterdiği gözlenmiştir. Sonrasında gerçekleştirilen duyarlılık analizinde hidrolojik parametreler önem derecelerine göre 1. olan en önemli, 2-6 arası önemli olarak sınıflandırılmış ve burada her iki durumda da ilk altı parametrenin sırasıyla CN2, CANMX, SOL_AWC, SOL_Z, ESCO ve BIOMIX olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak ise, İklim Araştırma Biriminden alınan verilerin kullanıldığı hidrolojik modelin kalibrasyon sonucunun diğerine göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

SWAT modelinin çok büyük ölçekli havzalarda nasıl sonuçlar verdiğine dair bazı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Rossi ve ark. (2009), Laos, Vietnam, Tayland, Kamboçya ve Çin’in güneyini de içine alan, 629520 km²’lik çok büyük bir alanı kapsayan Aşağı Mekong Nehri havzasının hidrolojisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadaki Mekong Nehri Havzası, halen SWAT modelinin hidrolojik açıdan başarı ile uygulanabildiği en büyük havzadır. Çalışmada 1985-1992 yılları arasında kalibrasyon, 1993-2000 yılları arasında da validasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçta günlük ve aylık olarak Nash-Sutcliffe değeri genel olarak 0,8 ile 1 arasında olan oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada karşılaşılan tek sorun ise havzanın büyüklüğüne bağlı olarak çalışma için zaman ve bilgisayar gereksinimi olduğuna vurgu yapılmıştır.

6. ÇALIŞMA ALANI

6.1. Bölge ve Çalışma Alanının Tanıtımı

Porsuk Çayı Kütahya'nın güneyinden Murat dağı yamaçlarından doğar, Kütahya'yı geçtikten sonra Eskişehir ili sınırlarına İncesu Köyü'nün kuzey batısında yer alan Kalburcu Çiftlikleri mevkiinde dahil olur, havzanın en önemli yapısı Eskişehir'in 25km batısındaki Porsuk barajıdır. Porsuk Çayı İl içinde önce soldan Kunduzlar Çayını sonradan Kargın Deresi'ni alır. Eskişehir'in 8 km güneybatısında yer alan orman fidanlığından sonra eğimi hayli azalır ve bu durum Sakarya'ya karışincaya kadar devam eder. Şehrin batısında Ertuğrulgazi Mahallesi yakınında soldan Sarısu olarak batı-doğu yönünde şehrin ortasından akmaya devam eder. İl merkezinden sonra Sakarya'ya karışincaya kadar Porsuk'a katılan kollar kısa, debisi zayıf ve önemsizdir. Bunların birkaçı hariç tamamı ovanın kuzey ve güneyindeki yükseltilerden inen geçici sulardır. Şehri geçtikten sonra soldan Şeker Fabrikası Çiftliğinden Keskin-Muttalip derelerini alır Sakarya'ya kavuşmadan önce İlören kuzeyinden sağdan Sivrihisar dağları içinden gelen Pürtek Çayını da alır. Kıranharman köyü yakınlarında 676 metre kotunda Sakarya nehrine dökülür (Anonim 2, 2007). Porsuk çayının yan kolları ve kaynağına olan uzaklıkları Çizelge 6.1.'de verilmiştir. Çalışma alanı Aşağı Porsuk Havzasını kapsayıp Uludere ve sonrasındaki yan kolların katıldığı alan içerisindedir.

Porsuk Çayının uzunluğu yaklaşık 460 km, drenaj alanı ise 11325 km²'dir. Porsuk Çayı Kütahya ve Eskişehir için hem kullanma suyu hem de sulama amaçlı kullanıldığı için büyük bir öneme sahiptir (Albek, 2003). Buna rağmen yıllardır evsel ve çeşitli endüstriyel tesislere ait atıksular arıtım uygulanmaksızın Porsuk çayına deşarj edilmiştir. Bu nedenlerden dolayı Porsuk barajı hiperötrotfik göl haline dönüşmüştür (Albek, 2002). Son yıllarda arıtma tesisleri faaliyet içinde olsalar da, verimli bir şekilde çalıştıkları söylenememektedir. Porsuk Havzasının en önemli yapısı bir bakıma havzası ikiye bölen Porsuk Barajı'dır.1966 yılında yapımına başlanmış ve 1972 yılında tamamlanmıştır. Porsuk Barajı başlıca üç amaç için inşa edilmiştir (Anonim 2, 2007).

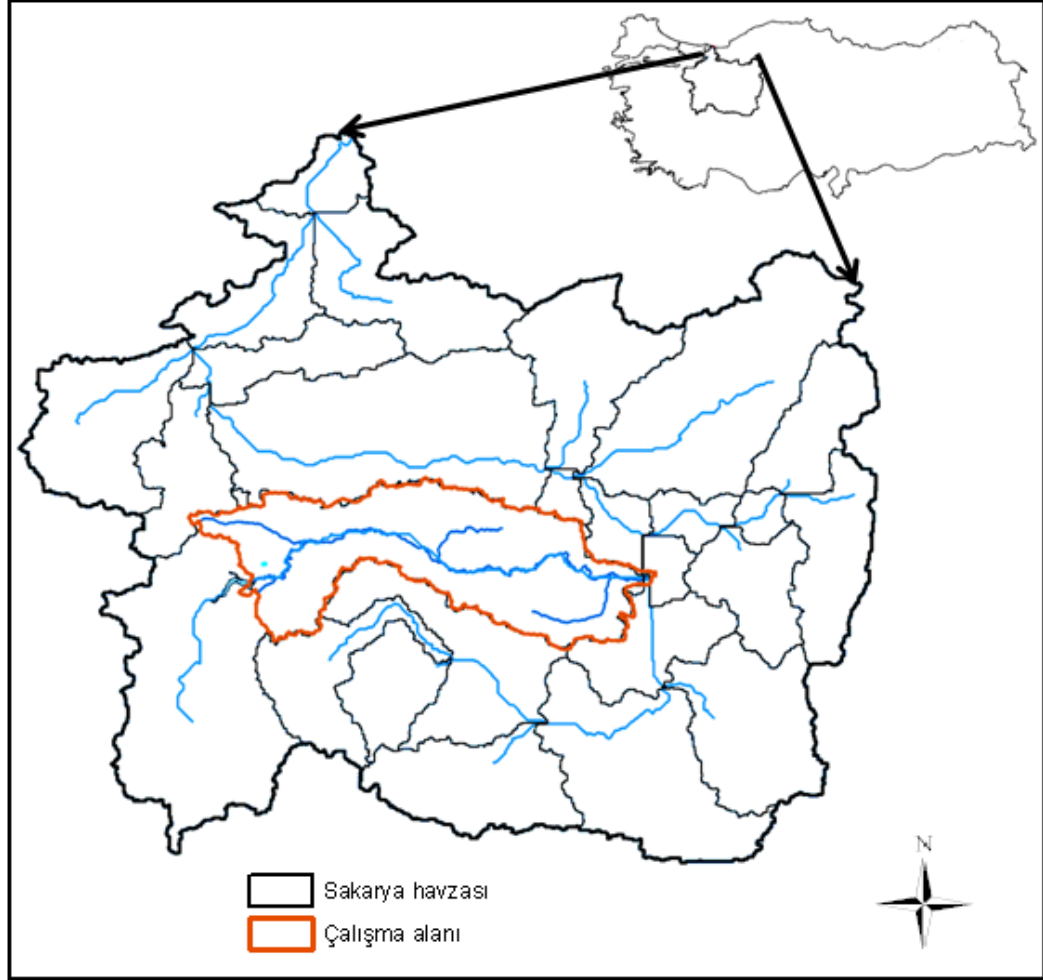
- Eskişehir ilinin taşkından korunması,
- Eskişehir ve Alpu ovalarının sulanması,
- Eskişehir ilinin içme ve kullanma suyu teminidir.

Çizelge 6.1. Porsuk çayına karışan kolların aralarındaki ve membaya uzaklıkları (Koyuncu, 2007)

Membadan uzaklık (km)	Ara mesafeler (km)	Akarsu yankolları
00,00	00,00	← Porsuk membası
77,00	77,00	← Kocaçay ve Avşar deresi
92,90	15,90	← Yağcılar deresi
95,90	3,00	← Kureyşler deresi, Gelinkaya kaynakları
113,70	17,80	← Söğütözü deresi
117,90	4,20	← Porsuk kaynakları
133,40	15,50	← Candraz deresi
149,50	16,10	← Felent çayı
153,10	3,60	← Tügsaş, Çalça, Kümaş
160,80	7,70	← Güvez deresi, Beşdeğirmen
171,60	10,80	← Uludere
174,60	3,00	← Ilıca deresi
214,50	39,90	← Kargın deresi
219,00	4,50	← Yayla suyu (Uluçayı deresi)
230,20	11,20	← Musaözü deresi
235,20	5,00	← Eşenkara deresi
246,00	10,80	← Sarısu
260,60	14,60	← Sarısungur deresi
438,40	177,80	← Pürtek çayı
459,70	21,30	← Sakarya deresi

Porsuk Havzasında yoğun bir şekilde tarım, madencilik, hayvancılık faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra çeşitli sanayi kuruluşları ve Eskişehir ile Kütahya kentleri havza üzerinde yoğun bir çevresel baskı oluşturmaktadır. Bu nedenle Porsuk Çayı yoğun bir kirlenmeye maruz kalmakta, bu da kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Hissedilen çevresel baskıların ortaya konması için çalışma alanı olarak Porsuk Havzasının bir bölümü olan Aşağı Porsuk Çayı havzası seçilmiştir. Çalışma alanı 564910 hektar olup,

havzanın minimum kotu 674 metre, maksimum kotu da 1776 metredir. Çalışma alanı Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Çalışma alanı

6.1.1. İklim

Çalışma alanı yazların sıcak ve kurak, kışların ise soğuk ve yağışlı olduğu tipik bir karasal iklim özelliğine sahiptir. Ege ve Marmara bölgelerine yakınlığı nedeniyle bu bölgelerin iklim etkileri de hissedilmektedir. Genellikle Eskişehir’de kışlar parçalı bulutlu, kar yağışlı, baharlar orta derecede yağışlı, yazlar ise az bulutlu ve açık geçer. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nden temin edilen veriler incelendiğinde Eskişehir için uzun yıllar (1975-2009) ortalama sıcaklık 10,6 °C değerindedir. Uzun yıllara ait günlük ortalama sıcaklık verileri

incelendiğın de en düşük sıcaklık 2006 yılında -22 °C, en yüksek sıcaklık ise yine 2006 yılında 29 °C olarak kaydedilmiştir. Uzun yıllar (1975-2009) ortalama toplam yağış miktarı ise 347 mm'dir.

Çalışma alanının iklimi ve bitki örtüsünü belirlemek için yağış şiddeti indisi belirlenmiştir. Bunun için Denklem (6.1.)'deki eşitlik kullanılmıştır (Erinç,1957). Yağış şiddeti indisi, yıllık ortalama maksimum sıcaklık ve yıllık ortalama yağışa bağlı olarak değişim gösteren bir değişken olup, bir yerin yağış miktarı ile kaybedilen su miktarı arasındaki ilişkiyi ortaya koyar. Yağış şiddeti indisinin iklim ve bitki örtüsüne göre değişimi Çizelge 6.2'de gösterilmektedir.

$$I_m = \frac{P}{T_{om}} \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte;

I_m : Yağış şiddeti indisi,

P : Yıllık ortalama yağış (mm),

T_{om} : Yıllık ortalama maksimum sıcaklık (°C).

Çalışma alanındaki yağış şiddeti indisinin belirlenmesi için havzayı büyük oranda etkileyen Eskişehir meteoroloji istasyonu incelenmiştir. Eskişehir meteoroloji istasyonunda gözlenen yıllık ortalama sıcaklık 17,2 °C, yıllık ortalama yağış ise 347 mm buna bağlı olarak da yağış şiddeti indisi 20,2'dir. Sonuç olarak Eskişehir meteoroloji istasyonu sonuçlarına göre iklim tipi yarı kurak, bitki örtüsü ise step olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan diğer istasyonlar "6.2. Meteorolojik Veriler" adlı başlıkta anlatılmıştır.

Çizelge 6.2. Yağış şiddeti indisine göre iklim ve bitki örtüsü

İndis	İklim tipi	Bitki örtüsü tipi
$I < 8$	Tam kurak	Çöl
$8 < I < 15$	Kurak	Çölümsü step
$15 < I < 23$	Yarı kurak	Step
$23 < I < 40$	Yarı nemli	Kurak muntika ormanı
$40 < I < 55$	Nemli	Nemli orman
$I > 55$	Çok nemli	Kurak orman

6.1.2. Toprak Yapısı

Eskişehir'in büyük bir kısmı İç Anadolu Bölgesinin Yukarı Sakarya Bölümünde yer alır. İl arazisinde orta derecede yüksek sayılabilen dağlar görülür. Başlıca düzlükler ise Porsuk Çayı ile Sakarya Vadisinin yukarı çevresinde bulunmaktadır. Dağlar ve ovalar arasında dik vadi yamaçlarının yardığı hafif dalgalı yaylalar bulunur. Sakarya Vadisi sarp kısmı incelmış, geniş yüzü doğuya dönük bir yarımada gibi il topraklarını kuşatır. Yarımada ortasında Sakarya'ya ters yönde (Batı-Doğu) akan Porsuk Çayı vadisi geçer. Porsuk ile Sakarya'nın yukarı kısmı arasında da Sivrihisar kütlesi yer alır. Batıda Bozdağ ile devam eden Sündiken Dağları vardır. Bu dağların metamorfik sişt ve mermerleşmiş kireç taşından oluşmuş bir eksenidir. Sivrihisar kütlesi Güneydoğu-Kuzeybatı doğrultusunda uzanır.

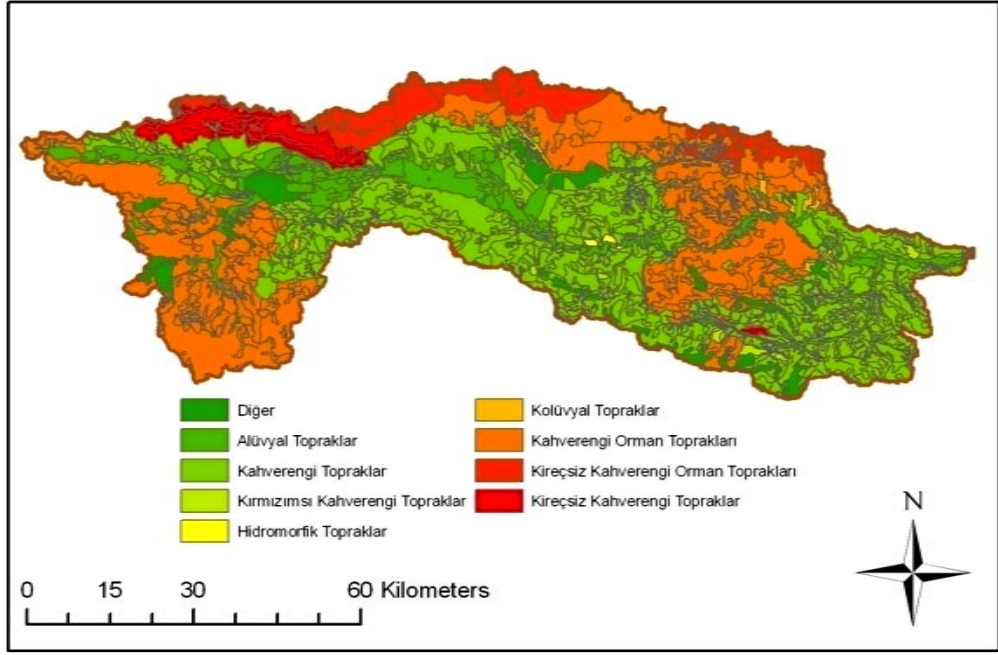
Kütahya sınırı üzerinde Türkmen Dağı, güneybatıda ise Bayat yaylası yer alır. En önemli düzlüğünü Porsuk Çayı boyunca doğuya, Sarısu vadisi boyunca batıya doğru uzanan Eskişehir ovası oluşturmaktadır.

Çalışma alanı içerisinde tespit edilen 8 adet büyük toprak grubu vardır. Buna göre % 37,7 ile en fazla kahverengi topraklar, % 18,7 ile kahverengi orman toprakları ve %17,90 ile alüvyal topraklar bulunmaktadır. Şekil 6.2.'de çalışma alanında yer alan büyük toprak grupları gösterilmektedir (Anonim 2, 2007).

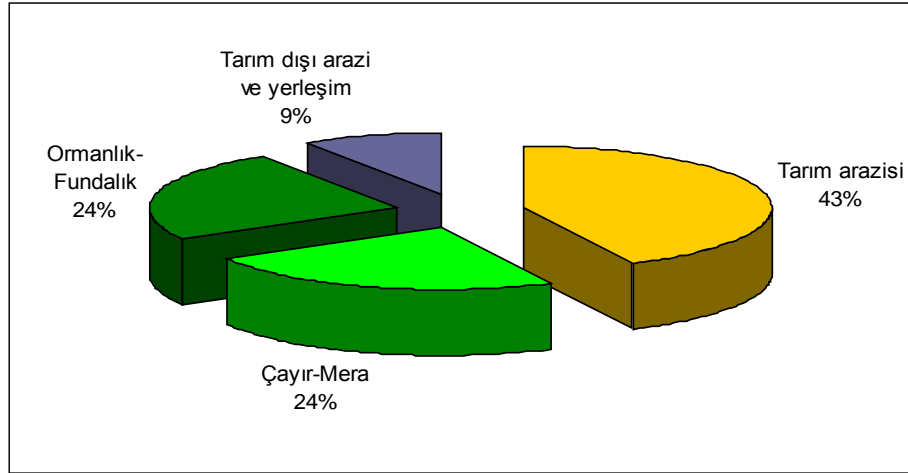
İlin değişik topografyası, iklimi ve jeolojik yapı farklılıkları ile bitki örtüsündeki çeşitlilik, değişik özelliklere sahip toprakların oluşumuna neden olmuştur.

6.1.3. Arazi Kullanımı

Tipik bir karasal iklime sahip olan Eskişehir çevresinde daha çok tahıl (Buğday, Arpa) ile Şeker Pancarı tarımı uygulanmaktadır. Bir mikroklima bölgesi olan Sarıcakaya ve Mihalgazi İlçelerinde ise Eskişehir ve civar illerin ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde sebzeçilik ve seracılık faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Eskişehir'e ait arazi kullanımı ve bu arazilerin dağılımları Şekil 6.3.'de gösterilmektedir.

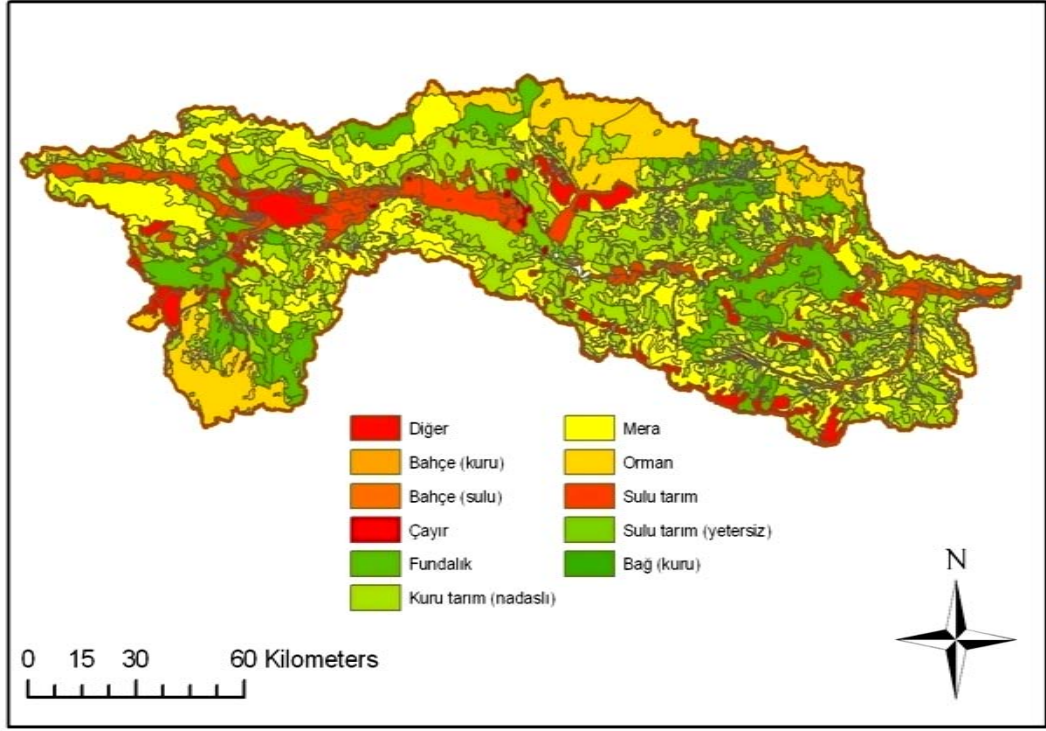


Şekil 6.2. Çalışma alanı büyük toprak grupları (KHGM, 2009)



Şekil 6.3. Eskişehir ili arazi varlığı ve dağılımı (Anonim 1, 2007)

Çalışma alanı içerisindeki arazi kullanımı ve bunların dağılımı Eskişehir ili ile yakınlık göstermektedir. Çalışma alanının %49,3'lük gibi büyük bir bölümünü tarım arazileri oluşturmaktadır. Daha sonra bu alanı %22,2 ile mera takip etmektedir. Çalışma alanına ait arazi kullanım haritası Şekil 6.4'te gösterilmektedir.



Şekil 6.4. Çalışma alanı arazi kullanımı (KHGM, 2009)

6.2. Meteorolojik Veriler

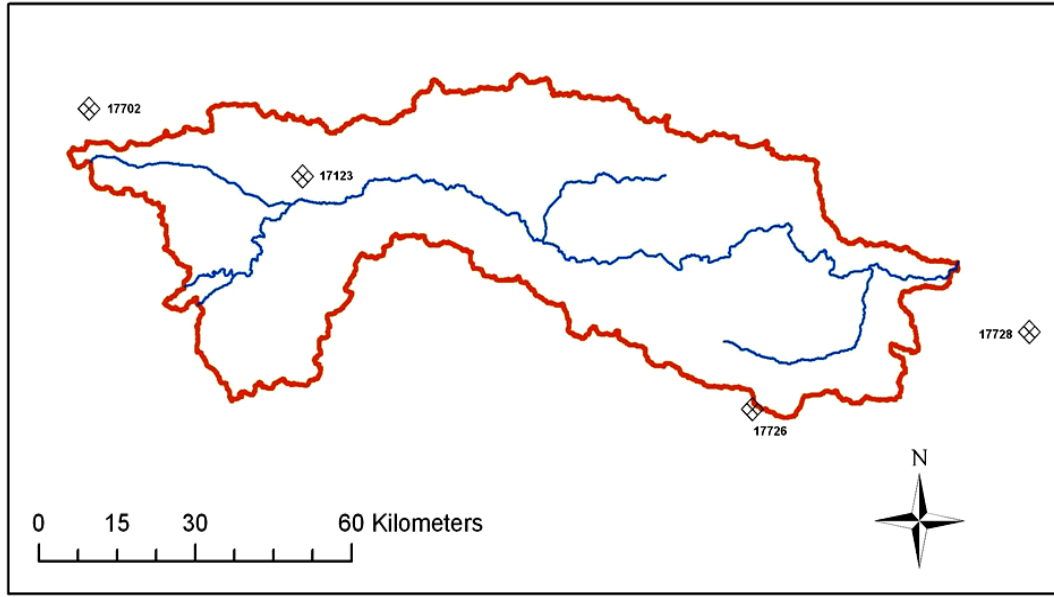
SWAT modeli tarafından hidrolojik süreçlerin oluşturulması için bazı meteorolojik zaman serilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için model programın kullanabileceği şekilde 1975'den 2009 yılı sonuna kadar 35 yıllık bir dönemi kapsayacak, meteorolojik zaman serileri hazırlanmıştır. Hidrolojik modelin gerçekleştirilebilmesi için altı farklı meteorolojik zaman serisine ihtiyaç duyulmuştur. Bunlar,

- En yüksek sıcaklık, ($^{\circ}\text{C}$)
- En düşük sıcaklık, ($^{\circ}\text{C}$)
- Yağış, (mm)
- Nem, (%)
- Güneş ışıması, (cal/cm^2)
- Rüzgar hızı, (m/s)

Çalışma alanındaki meteorolojik durumun ortaya konabilmesi için 4 adet meteoroloji istasyonunun verileri kullanılmıştır. Bu meteoroloji istasyonlarına ait bilgiler Çizelge 6.3.'te istasyonların konumları Şekil 6.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Meteoroloji istasyonu bilgileri

İstasyon No	İstasyon Adı	Enlem (K)	Boylam (D)	Kot (m)
17702	Bozüyük	39,55	30,02	754
17123	Eskişehir Anadolu	39,49	30,31	787
17728	Polatlı	39,35	32,09	886
17726	Sivrihisar	39,27	31,32	1070



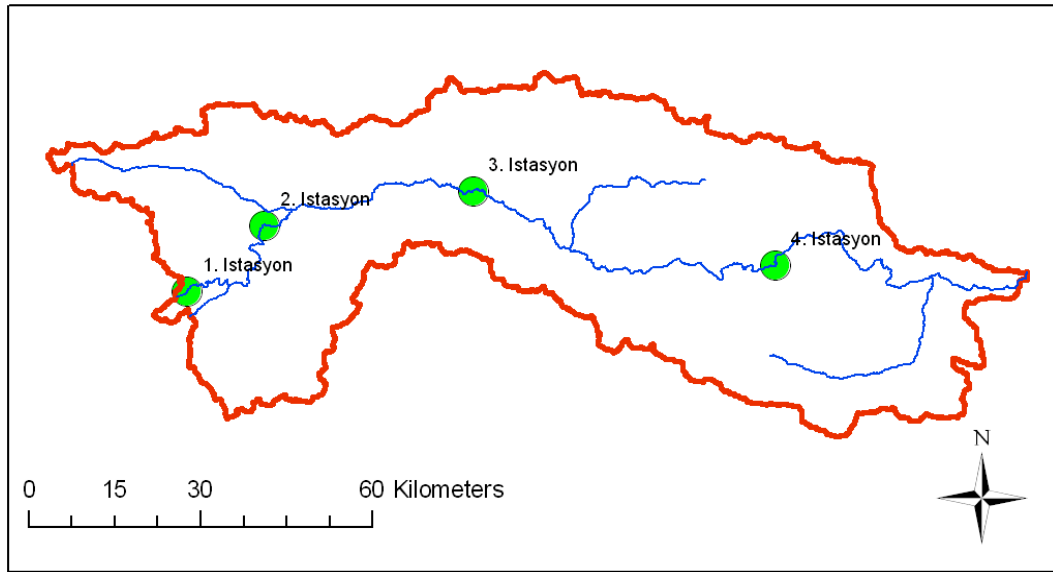
Şekil 6.5. Meteoroloji istasyonları

6.3. Havzada Yürütülen Çalışmalar

Bu çalışma 108Y091 kodlu “Aşağı Porsuk Çayı Havzasında İklim Değişikliğinin Hidrolojik Çevrime ve Su Kalitesine Etkilerinin HSPF Modeli Kullanılarak İncelenmesi ve En İyi Su Yönetimi Stratejilerinin Belirlenmesi” adlı

TÜBİTAK projesi kapsamında yapılan akım ve su kalitesi gözlem çalışmaları ile de desteklenmiştir.

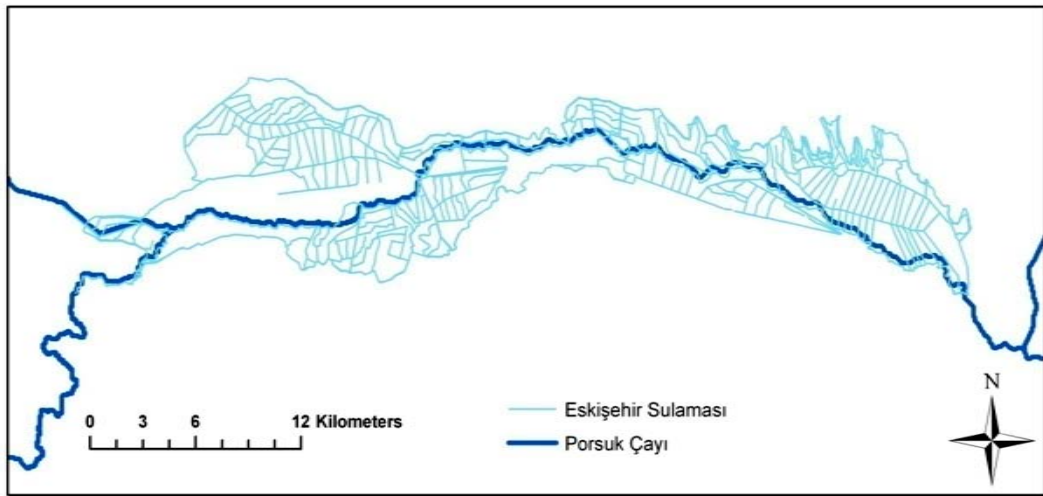
Öncelikli olarak Porsuk Çayı üzerinde istasyon belirleme çalışmaları yapılmıştır. Veri alımına uygun ve Porsuk Havzasının modellenmesine olanak tanıyacak istasyon yerlerinin seçimi amacıyla gerek harita üzerinde gerekse araziye gidilerek uygun istasyonlar aranmıştır. İstasyon seçiminde hem tüm bölgeyi tanımlayabilecek kadar istasyon bulmak hem de gereksiz zaman ve iş gücü kaybına neden olmamak amacıyla istasyon sayısı önem taşımaktadır. Aynı zamanda istasyonların ulaşım kolaylığı, seçilen istasyonların veri alımına ve debi ölçümlerine müsait olması gibi koşullar da göz önünde bulundurulmalıdır. Yapılan incelemeler sonucunda Porsuk Baraj çıkışı ilk istasyon olarak belirlenmiştir. Çalışma alanı olarak belirlenmiş olan bölge baraj çıkışından itibaren modelleneceğinden bu noktanın örneklenmesine gerek duyulmuştur. Seçilen ikinci istasyon Eskişehir Orman Fidanlık Müdürlüğü sınırları içerisindeki köprü'nün üzerindedir. Eskişehir'in kent merkezinin etkisinin modele yansımaları istenildiğinden şehre giriş noktasının da örneklenmesi önemlidir. Eskişehir kent merkezinin çıkışında belirlenen üçüncü istasyon Eskişehir Alpu karayolu üzerinde Karahöyük köyü mevkiinde bulunmaktadır. Son istasyon ise Porsuk Çayının Sakarya Nehrine karışmadan önce Yunus Emre mevkiinde bulunmaktadır. Belirlenen gözlem istasyonlarının konumları Şekil 6.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Ölçüm istasyonları

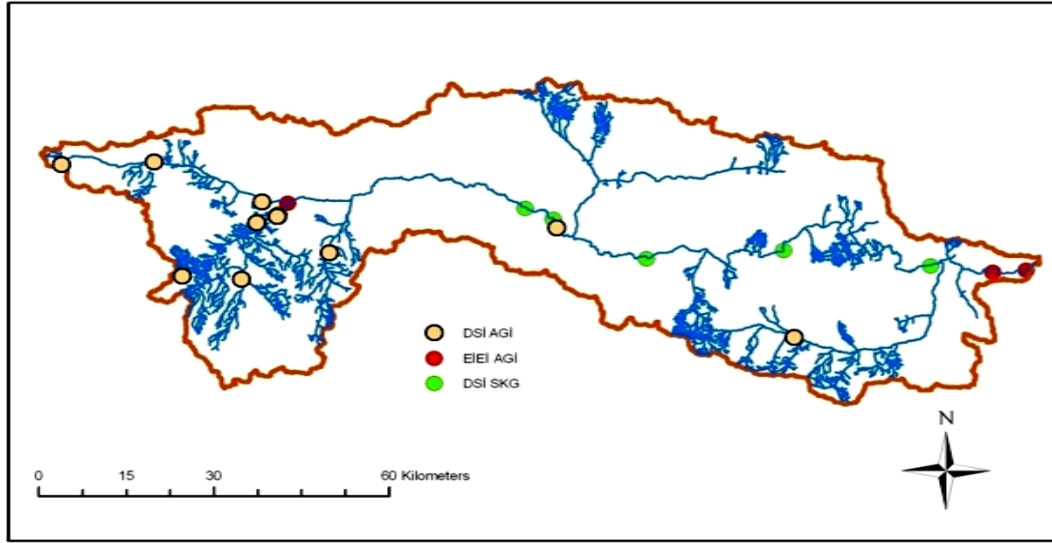
İstasyonlar belirlendikten sonra örnekleme çalışmaları yapılmıştır. Belirlenen dört istasyona her ay gidilerek bazı parametreler için yerinde ölçümler yapılmış, ölçümlerin laboratuvarda yapılması gereken parametreler için ise gerekli koruyucu önlemler altında alınan numuneler, analizlerin yapılması için laboratuvara getirilmiştir. Örnekleme çalışmaları 2008 Ekim ayı itibariyle belirli periyotlarda akarsuyun izlenebilmesi için her ayın 15'ine gelecek şekilde gerçekleştirilerek, çalışmalar 2009 ve 2010 su yılının tamamında devam etmiştir.

Eskişehir ovası tarım faaliyetlerinin oldukça yaygın bir şekilde gerçekleştirildiği bir alandır. Ovadaki tarım arazilerinin sulanabilmesi için DSİ tarafından işletilen açık kanal şeklinde sulama şebekesi yer almaktadır. Sulama sezonu sayılan Mayıs ayından başlayarak Eylül sonuna kadar Porsuk barajından kontrollü bir şekilde bu kanallara su aktarılmaktadır. Eskişehir içme suyu arıtma tesisinden hemen sonra yer alan, Karacahöyük regülâtöründe sağ sahil ve sol sahil kanallarına ayrılarak Eskişehir ovasının tarımsal su ihtiyacını karşıladıktan sonra Alpu ilçesi Yeşildon mevkiinde yakınlarında bu kanal tekrar Porsuk çayı ile birleşmektedir. Çalışma alanı içerisinde yer alan bu şebeke, sulama sezonunda kanallara aktarılan su ile havzanın hidrolojisi üzerinde büyük etki yaratmaktadır. Bu kapsamda Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü III. Bölge Müdürlüğü'nden Eskişehir ovası sulama şebekesi vaziyet planı temin edilmiştir. Sonrasında paftalar tarayıcı yardımıyla elektronik ortama aktarılmış, ardından ArcGIS 9.2 yazılımı kullanılarak haritası oluşturulmuştur. (Bkz. Şekil 6.7)



Şekil 6.7. Eskişehir Ovası sulama şebekesi vaziyet planı

Çalışma kapsamında kurulan su kalitesi istasyonlarının yanı sıra kalibrasyon sırasında kullanılmak üzere Devlet Su İşleri (DSİ) ve Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) kurumlarından akım gözlem istasyonları, su kalitesi gözlem istasyonları, Porsuk Barajı ve Dodurga Barajına ait akım verileri temin edilmiştir. Verilerin temin edildiği istasyonların çalışma alanındaki konumları Şekil 6.8.'de istasyonlara ait bilgiler Çizelge 6.4'de gösterilmiştir.



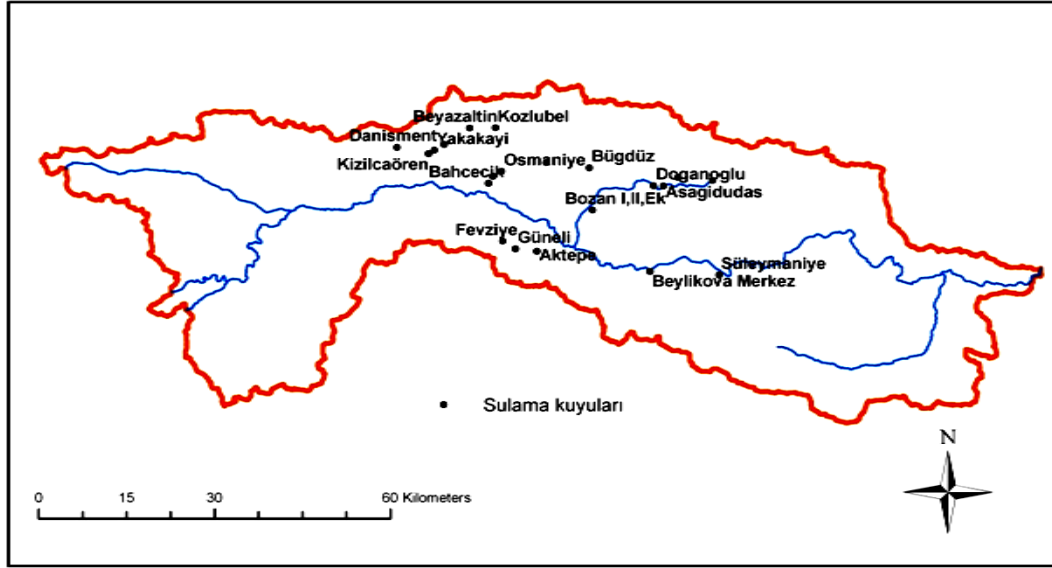
Şekil 6.8. DSİ ve EİEİ akım ve su kalitesi gözlem istasyonları

Çizelge 6.4. DSİ ve EİEİ akım gözlem istasyonları hakkında bilgi

İstasyon Adı	Durum	Veri Aralığı*
12-02 Sazova (DSİ)	Kapalı	1964-1972
12-12 Sazılar (EİEİ)	Kapalı	1963-1986
12-34 Porsuk (DSİ)	Açık	1964-2007
12-48 Eskişehir (EİEİ)	Kapalı	1973-2000
12-51 Kırnarharmanı (EİEİ)	Açık	1989-2008
12-54 Eşenkara (DSİ)	Açık	1964-2007
12-63 Uludere-Uluçayır (DSİ)	Açık	1965-2005
12-114 Sarıungur (DSİ)	Kapalı	1973-1982
12-134 Yeşildon (DSİ)	Kapalı	1977, 1979-1984, 1988-1993, 1995-1998
12-165 Doğanolu (DSİ)	Kapalı	1983-1987
12-170 Kandilli (DSİ)	Açık	1984-1990, 1994-2000, 2002-2005
12-172 İnönü (DSİ)	Açık	1984-1990, 1994-1998, 1999, 2002-2005
12-182 Pürtek (DSİ)	Açık	1988-1997, 2001-2005

* Su yılı (1 Ekim tarihi ile takip eden yılın 30 Eylül tarihleri arası)

Çalışma alanı içerisinde Eskişehir sulaması için sulama kanalları dışında, tarım arazilerinin sulanması için derin kuyular yer almaktadır. Kuyuların konumları Şekil 6.9’da, tahsis edilen miktarlar Çizelge 6.5’de gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Sulama Kuyuları

Çizelge 6.5. Kuyulardan sulama amaçlı kullanılan yıllık su miktarı (DSİ III. Bölge personeli ile kişisel görüşme, 2010)

		Kooperatif Adı		Tahsis Miktarı (m ³)
1	Eskişehir	Merkez	Danişment	497215
2	Eskişehir	Merkez	Kızılcaören	1003525
3	Eskişehir	Merkez	Yakakayı	2275283
4	Eskişehir	Merkez	Gündüzler	2638552
5	Eskişehir	Merkez	Beyazaltın I Ks.	4199040
	Eskişehir	Merkez	Beyazaltın II Ks.	1667846
6	Eskişehir	Merkez	Kozlubl	1405793
7	Eskişehir	Alpu	Bahçecik I, II Ks.	1983057
8	Eskişehir	Alpu	Karakamış	1706676
9	Eskişehir	Alpu	Osmaniye	2526497
10	Eskişehir	Alpu	Çukurhisar	725338
11	Eskişehir	Alpu	Bügdüz	721292
12	Eskişehir	Alpu	Bozan I Ks.	1550016
	Eskişehir	Alpu	Bozan II Ks.	5509577
	Eskişehir	Alpu	Bozan (Ek)	1671411
13	Eskişehir	Beylikova	Doğanoglu	501144
14	Eskişehir	Beylikova	Aş. Yk. Dudaş	779340
15	Eskişehir	Mihalıççık	Güce, K.Geyikli	1050050
16	Eskişehir	Beylikova	Süleymaniye	388585
17	Eskişehir	Beylikova	Merkez	1344979
18	Eskişehir	Alpu	Aktepe	2337120
19	Eskişehir	Alpu	Güneli	1717463
20	Eskişehir	Alpu	Fevziye	1410807

Proje kapsamında kurulan su kalitesi gözlem istasyonlarında, Hach marka taşınabilir “sension 156” cihazı ile pH, çözünmüş oksijen, iletkenlik, tuzluluk, toplam çözünmüş katı madde ölçümleri arazide yapılmış, termometre ile su sıcaklığı, WTW marka taşınabilir bulanıklık ölçer ile bulanıklık analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her istasyonda akarsu en kesit alanı belirleme çalışmaları kapsamında yatak genişliği ölçümleri ile derinlik ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerle birlikte debinin hesaplanabilmesi için, akışın olduğu dönemlerde muline ile akarsuyun belirlenen kesitlerinde akış hızları ölçülmüştür. 2009 Ağustos ayından itibaren temin edilen Sontek marka RiverSurvoyer M9 akustik doppler akım ölçer ile akım gözlem çalışmalarına devam edilmiştir. Diğer yandan bu ölçümler esnasında Ruttner marka su örnekleme ekipmanı ile akarsuyun belli kesitlerinden su örnekleri alınarak kompozit örnekler oluşturulmuş, bu örneklerin bir bölümü plastik numune şişelerine konularak bir bölümü de asit koruyucularla muhafaza edilerek cam şişelerde buz kalıplarının konulduğu soğuk kutularda laboratuvara ulaştırılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Arazide gerçekleştirilen örnek alma ve akım ölçümleri Şekil 6.10’da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Fidanlık istasyonunda örnek alma ve akım ölçüm çalışmaları

Laboratuvarda gerçekleştirilen azot ve fosfor türleri ile KOİ analizleri, USEPA tarafından kabul edilen yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Bu analizler

sırasında Hach marka DR2400 su analiz spektrofotometresi kullanılmıştır. Diğer analizler ise standart metotlara göre yapılmıştır. Yapılan analizler ve uygulanan yöntemlere ait ayrıntılar Çizelge 6.6.'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.6. Laboratuvarda gerçekleştirilen analizler ve ayrıntıları

Yapılan Analiz	Açıklama
Koliform tayini	Membran filtrasyon tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Besi yeri olarak Sartorius firmasından temin edilen Endo-NKS kullanılmıştır.
Azot türleri	DR2400 su analiz spektrofotometresi kullanılarak Amonyak azotu nessler yöntemi ile, Nitrit düşük konsantrasyon ve nitrat azotu hem yüksek hem orta seviyedeki konsantrasyonlar için analiz yöntemleri kullanılarak sonuçlar belirlenmiştir.
Fosfor türleri	DR2400 su analiz spektrofotometresi kullanılarak ortofosfat analizi yapılmakta toplam fosfor analizinde çürütme için termoreaktörden yararlanılmıştır.
Askıda katı ve çözünmüş katı madde	Gravimetrik analiz yöntemleri kullanılarak standart yöntemlerle analiz edilmiştir. Askıda katı analizinde cam elyafından 0,45 mikron gözenek çapına sahip filtre kağıdı ile sartorius firmasından alınan filtrasyon düzeneği kullanılmıştır.
Klorofil	Standart yöntemlere göre (10200 H) ön işlemden geçirildikten sonra spektrofotometrik olarak analiz edilmiştir.
Klorür	Standart titrimetrik yöntemle analiz gerçekleştirilmiştir.
Alkalinite	Standart titrimetrik yöntemle analiz gerçekleştirilmiştir.
Kimyasal oksijen ihtiyacı	Kapalı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hach KOİ reaktöründe çürütme işlemi yapılarak Hach marka DR2400 spektrofotometre ile analizi gerçekleştirilmiştir.
Biyolojik oksijen ihtiyacı	Standart titrimetrik yöntemle analiz gerçekleştirilmiştir.
Toplam organik karbon	Standart Metot 3510 B'ye göre Shimadzu marka VCPH-5000 model TOK analizöründe otomatik örnekleyici kullanılarak yapılmıştır.

7. ArcSWAT PROGRAMI

ArcSWAT, SWAT modelinin kullanılabilmesi için ArcGIS programının grafiksel bir ara yüzüdür. Temel amacı akarsu ağı ve havza sınırlarının belirlenebilmesini sağlamaktır. Bunun için havza ile ilgili yükseklik haritalarına ihtiyaç duymaktadır. Bu haritalar ile arazi yapısındaki olası akarsu akış yolları belirlenerek akarsu ağları oluşturulmaktadır. Bu yapıların oluşturulmasında topoğrafik özellikler, toprak tipi, iklimsel özellikler ve bitki örtüsü gibi hususlar da göz önüne alınarak arazi tipolojisi belirlenir. Kısacası ArcSWAT modülü, SWAT modelinin çalıştırılmasından önce gerekli olan coğrafi bilgi sistemleri altyapısını oluşturmak için kullanılmaktadır.

ArcSWAT modülünü yönetebilmek için altı farklı bölüm bulunmaktadır. Bu bölümlerden ilki çalışmanın yapılacağı havza ile ilgili projenin oluşturulacağı SWAT proje ayarlarıdır. Bu bölümde yeni proje oluşturma, varolan projelere erişebilme, projelerin kopyalanması ve silinebilmesi için alt birimler vardır. İkinci bölüm havza tanımlama ise havza sınırlarının belirlenebilmesi için, akarsu akış yönlerinin, arazi eğiminin, akarsu ağ yapısının oluşturulduğu yerdir. Diğer bir kısım, farklı arazi kullanımı, toprak tipi ve arazi eğim özelliklerinin kombinasyonlarından oluşturulan HRU'ların yöneltildiği HRU analiz bölümüdür. Meteorolojik değerlerin okutulduğu, alt havzaların hangi meteoroloji istasyonlarından etkilendiğini belirleyen, SWAT modelinin çalışması için gerekli toprak, alt havza, HRU, yeraltısuyu, akarsu kanalıyla ilgili özelliklerin yer aldığı girdilerin yazılmasını sağlayan bir bölümde bulunmaktadır. Bahsi geçen bu dört kısım coğrafi bilgi sistemleri kapsamında modelin çalışması için altyapının oluşturulduğu bölümlerdir. Bundan sonraki iki bölüm ise havzada bulunan noktasal kaynakların, havza giriş kısımlarının, rezervuarların, alt havzaların yönetildiği, modelin çalıştırıldığı, duyarlılık analizi, belirsizlik analizi, kalibrasyon gibi uygulamaların gerçekleştirildiği, bu uygulamalara ait raporların erişildiği bölümlerdir.

ArcSWAT'ın ilk versiyonu, 2008 yılında ArcGIS 9.1 tarafından desteklenen ArcSWAT 1.0.7 olarak yayınlanmıştır. İki yıl içerisinde 4 farklı versiyonu daha oluşturulmuş ve şu anda kullanılan son versiyon ArcGIS 9.3

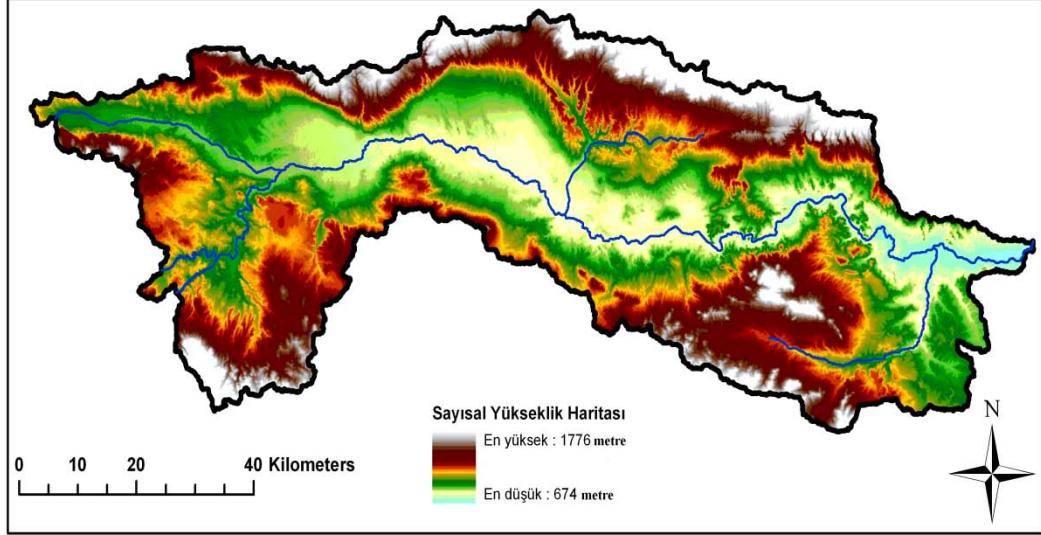
tarafından desteklenen ArcSWAT 2009.93.4'tür ve yapılan bu çalışmada da bu sürüm kullanılmıştır.

7.1. Model Girdilerinin Oluşturulması

SWAT modeli havzaya ait bazı temel özellikler üzerine kurulmuştur. Bu temel özellikler araziye ait yükseklik haritası, arazi kullanımı, toprak tipi ve meteorolojik verilerdir.

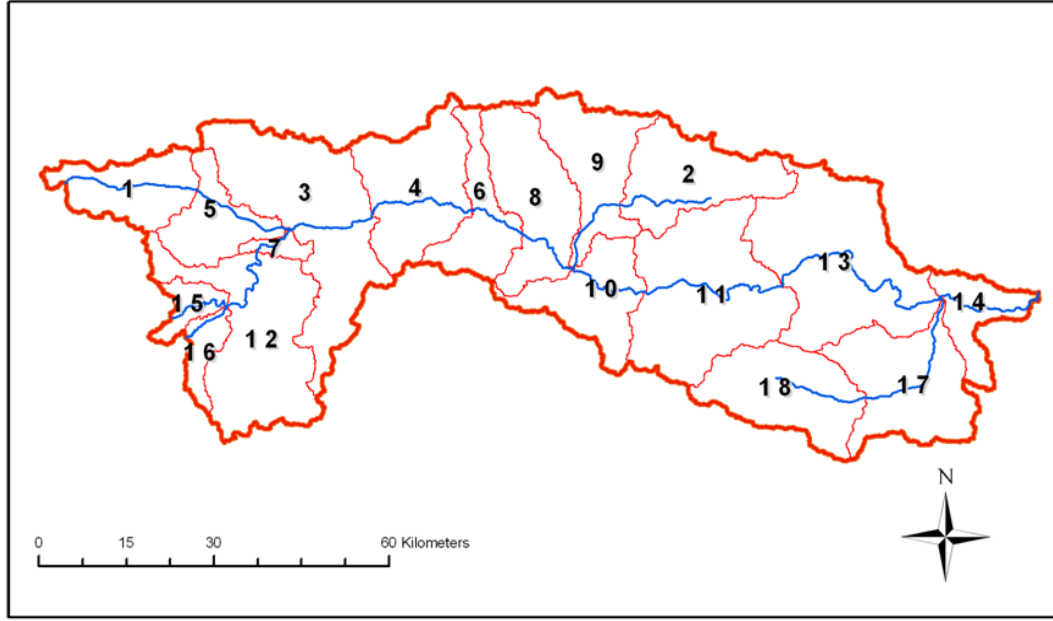
7.1.1. Sayısal Yükseklik Haritası (DEM)

Çalışma alanındaki akarsu ağı ve havza sınırlarının belirlenebilmesi amacıyla 100 m çözünürlüklü sayısal yükseklik haritaları (Digital Elevation Map-DEM) ve uydu radar topoğrafik verileri (Space Shuttle Radar Topography Mission-SRTM) kullanılmıştır.



Şekil 7.1. Aşağı Porsuk Havzası sayısal yükseklik haritası

Yükseklik haritaları kullanılarak, ArcSWAT programı yardımı ile oluşturulan alt havzalar ve akarsu ağ yapısı Şekil 7.2'de, alt havzalara ait bilgilerde Çizelge 7.1'de gösterilmektedir.



Şekil 7.2. Çalışma alanı alt havzalar

Çizelge 7.1. Alt havzalara ait bilgiler

Alt Havza No	Alan (ha)	Ortalama Yükseklik (m)
1	23290	842
2	32233	1129
3	59995	1153
4	37777	784
5	19369	830
6	19902	803
7	3574	826
8	34002	768
9	29655	765
10	26218	845
11	59771	760
12	51787	1587
13	63908	773
14	15717	798
15	7040	924
16	7397	1480
17	38594	934
18	34681	993

7.1.2. Toprak Haritası

Çalışma havzası içerisindeki bölgelere ait toprak özelliklerini içeren 1/25000 ölçekli sayısal haritalar Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Tarımsal Üretim

ve Geliştirme Genel Müdürlüğü Tarım Arazilerini Değerlendirme Daire Başkanlığı'ndan temin edilmiştir. Temin edilen 1/25000 ölçekli coğrafi toprak veri tabanının kapsadığı verilerin yapısı Çizelge 7.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2. Temin edilen toprak ve sayısal hizmet harita bilgileri

Harita Türü	Pafta Adeti	*Pafta No					
Büyük Toprak Grupları-Arazi Tipleri-Diğer Coğrafi Veriler*	69	i23b3	i24a2	i25a1	i26a1	i27a1	j24a1
		i23b4	i24a3	i25a2	i26a2	i27a3	j24a2
		i23c1	i24a4	i25a3	i26a3	i27a4	j24b1
Toprak Özellikleri*	69	i23c2	i24b1	i25a4	i26a4	i27c1	j24b2
			i24b2	i25b1	i26b1	i27c2	j25a1
			i24b3	i25b2	i26b2	i27c3	j26b2
Diğer Toprak Özellikleri*	69		i24b4	i25b3	i26b3	i27c4	j27a1
			i24c1	i25b4	i26b4	i27d1	j27a2
Erozyon Dereceleri*	69		i24c2	i25c1	i26c1	i27d2	j27b1
			i24c3	i25c2	i26c2	i27d3	
Arazi Kullanım Kabiliyet Sınıfları ve Alt Sınıfları*	69		i24c4	i25d1	i26c3		
			i24d1	i25d2	i26c4		
Arazi Kullanım Durumu*	69		i24d2	i25d3	i26d1		
			i24d3	i25d4	i26d2		
İl Bazında Kırsal ve Tarımsal Alt Yapı Hizmetleri**	4		i24d4		i26d3		
					i26d4		

* Pafta numaralarına ait

** Eskişehir, Bilecik, Kütahya, Ankara illerine ait

1938 Amerikan sınıflama sistemine göre Türkiye toprakları, Büyük Toprak Grupları düzeyinde sınıflandırılmış ve haritalama ünitesi olarak bunlara eğim, taşlılık, drenaj ve tuzluluk gibi toprak fazları da eklenmiş ve Zonal, Intrazonal, Azonal ordolarına yerleştirilmiştir (Dinç, 2001). Temin edilen bu haritalarda yer alan büyük toprak grupları da “Eski Amerikan Toprak Sınıflandırma Sistemi” baz alınarak oluşturulmuştur. Bu haritalardan büyük toprak gruplarına ait bazı öznelikler Çizelge 7.3'te gösterilmiştir.

Gerekli araştırmalar yapıldıktan sonra bu haritaların model programın gereksinim duyduğu şekilde yeniden yapılanması gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında öncelikle büyük toprak gruplarının, toprak taksonomisinde yer alan hangi alt sınıflara bağlı olduğu saptanmaya çalışılmıştır. Bunun için Tarımsal Üretim ve Geliştirme Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan Toprak ve Arazi

Sınıflaması Standartları Teknik Talimatından faydalanılmıştır. Eski Amerikan Toprak Sınıflaması, Toprak Taksonomisi ve FAO/UNESCO Toprak Sınıflaması arasındaki tahmini ilişki Çizelge 7.4’de görülmektedir (Anonim 1).

Çizelge 7.3. Büyük toprak grubu ve toprak özellikleri kombinasyonu

BTG_EDK Kombinasyonu						
Büyük Toprak Grubu (BTG)		Eğim – Derinlik Kombinasyonu (EDK)				
Sembol	Anlamı	Derinlik (cm)				
		90+	90-50	50-20	20-0	Litozolik
P	Kırmızı Sarı Podzolik Topraklar	1	2	3	4	25
G	Gri Kahverengi Podzolik Topraklar					
M	Kahverengi Orman Toprakları					
N	Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları					
CE	Kestane rengi Topraklar	5	6	7	8	26
D	Kırmızımsı Kestane rengi Topraklar					
T	Kırmızı Akdeniz Toprakları					
E	Kırmızı Akdeniz Toprakları					
B	Kırmızı Kahverengi Akdeniz Toprakları	9	10	11	12	27
U	Kahverengi Topraklar					
F	Kireçsiz Kahverengi Topraklar					
R	Kırmızımsı Kahverengi Topraklar					
V	Rendzinalar	13	14	15	16	28
Z	Vertisoller					
L	Sierozemler					
X	Regosoller					
Y	Bazaltik Topraklar Yüksek Dağ Çayır Toprakları	21	22	23	24	30

Çizelge 7.4. Büyük toprak gruplarının yaklaşık karşılıkları (Anonim 1, 2007)

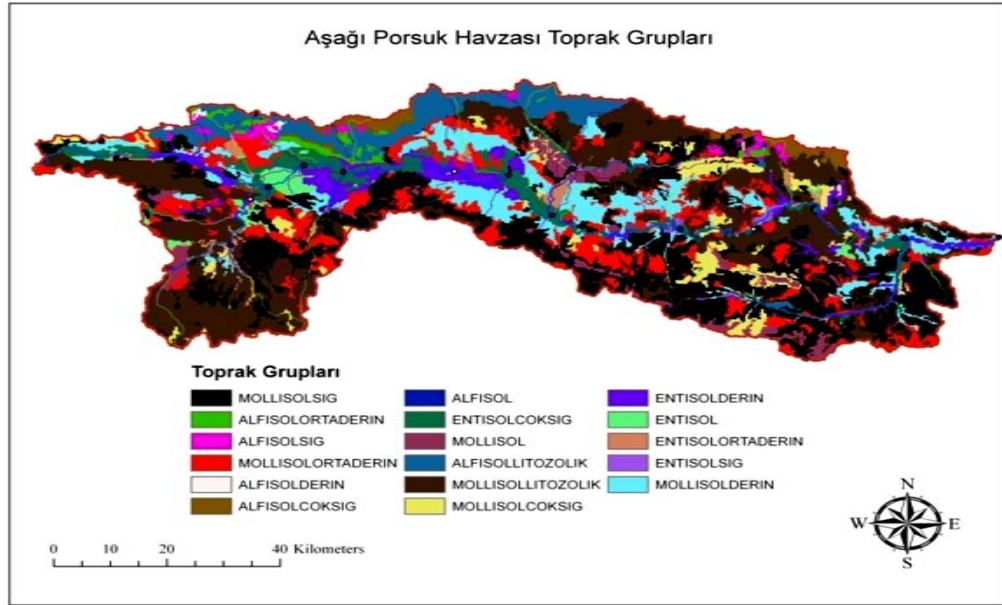
Büyük Toprak Grupları	Toprak Taksonomisi	FAO/UNESCO
Kireçsiz Kahverengi Orman Topraklar	Ochrept	Cambisol
Kahverengi Orman Toprakları	Ochrept,Xeroll,Udoll	Cambisol,Leptosol
Kolüvyal Topraklar	Fluvent	Leptosol,Arenosol
Kahverengi Topraklar	Ustoll,Xeroll	Kastozem
Kireçsiz Kahverengi Topraklar	Xeralf,Ustalf	Luvisol
Alüvyal Topraklar	Fluvent,Incept,Molli	Fluvisol
Kırmızımsı Kahverengi Topraklar	Ustalf,Calcid	Kastozem
Hidromorfik Topraklar	Aquoll	Gleysol,Albeluvisol

Toprak ve Arazi Sınıflaması Standartları Teknik Talimatına göre büyük toprak gruplarına karşılık gelen toprak taksonomisindeki alt sıralar tespit edilip, ardından bu alt sıraların 7. yaklaşım veya yeni toprak taksonomi sisteminde hangi sıralara karşılık geldiği Çizelge 7.5’de belirlenmiştir (Altınbaş, 2000).

Çizelge 7.5. Yeni Amerikan toprak sınıflandırma sistemi sıralarının, Eski Amerikan sisteminin büyük gruplarıyla ilişkisi (Altınbaş, 2000)

Büyük Toprak Grupları	Toprak Taksonomisi	Yeni toprak taksonomi sisteminde sıralar
Kireçsiz Kahverengi Orman Topraklar	Ochrept	Alfisol
Kahverengi Orman Toprakları	Ochrept,Xeroll,Udoll	Mollisol
Kolüvyal Topraklar	Fluvent	Entisol
Kahverengi Topraklar	Ustoll,Xeroll	Mollisol
Kireçsiz Kahverengi Topraklar	Xeralf,Ustalf	Alfisol
Alüvyal Topraklar	Fluvent,Incept,Molli	Entisol
Kırmızımsı Kahverengi Topraklar	Ustalf,Calcid	Aridisol
Hidromorfik Topraklar	Aquoll	Mollisol

Büyük toprak gruplarının yeni sisteme göre karşılıkları belirlendikten sonra havza sınırları içerisinde alfisol, entisol ve mollisol olmak üzere 3 farklı toprak tipinin yer aldığı görülmüştür. Yeni sisteme göre belirlenen 3 farklı toprak tipi ile derinlik kombinasyonu sağlanarak 17 farklı yeni toprak grubu oluşturulmuş ve Şekil 7.3’te gösterilmiştir.



Şekil 7.3. Aşağı Porsuk Havzası toprak grupları

Model programın ihtiyaç duyduğu topraktaki kum, kil, silt içeriği, Türkiye’de benzer topraklarda yapılan etüt çalışmaları sonucu elde edilen değerlerle aynı olduğu varsayılmıştır (Dinç, 2001).

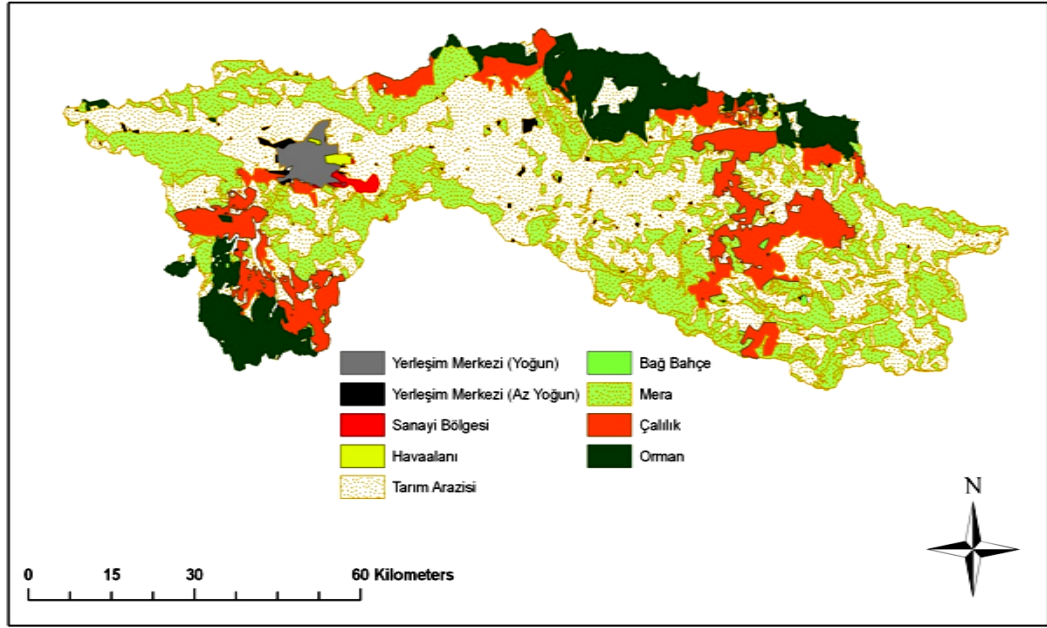
Toprak geçirgenliğini ifade etmek için hidrolojik toprak grupları kullanılmaktadır. A, B, C ve D olmak üzere 4 farklı hidrolojik toprak gurubu bulunmaktadır. %10’dan az kil, %90’dan daha fazla kum içeriğine sahip olan topraklar A grubu içerisinde, %10 ile %20 arasında kil ve %50 ile %90 arasında kum içeriğine sahip olan topraklar B grubu içerisinde, %20 ile %40 arasında kil ve %50’den daha az kum içeriğine sahip olan topraklar C grubu içerisinde, %40’dan daha fazla kil ve %50’den daha az kum içeriğine sahip olan topraklar D grubu içerisinde olduğu kabul edilmektedir (Werner ve ark.). Havza içerisindeki toprakların hangi hidrolojik toprak grubuna dahil olduğu bu şekilde bulunmuştur. Hidrolojik toprak grupları belirlendikten sonra uygun toprak grubuna karşılık gelen hidrolik iletkenlik değerleri Çizelge 7.6’daki gibi seçilmiştir.

Çizelge 7.6. Hidrolojik toprak gurubuna karşılık gelen hidrolik iletkenlik değerleri

Hidrolojik Toprak Grubu	Hidrolik İletkenlik ($\mu\text{m/s}$)
A	>40
B	$10 < H_i < 40$
C	$1 < H_i < 10$
D	$H_i < 1$

7.1.3. Arazi Kullanım Haritası

Toprak haritalarında olduğu gibi arazi kullanım haritaları da Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Tarımsal Üretim ve Geliştirme Genel Müdürlüğü Tarım Arazilerini Değerlendirme Daire Başkanlığı’ndan temin edilmiştir. SWAT modelinde arazi kullanımı ile ilgili olarak farklı kodlama sistemi geliştirilmiştir. Bu yüzden bu haritalar Google Earth programındaki uydu görüntüleri yardımıyla kontrol edilerek model için uygun hale getirilmiş ve Şekil 7.4’te gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Aşağı Porsuk Havzası arazi kullanımı

Havza geneline bakıldığında tarım arazilerinin yoğunluğu göze çarpmaktadır. Bu arazilerde yetiştirilen ürünlerin çeşitliliği, çalışma alanındaki hidrolojiyi ve sediment tahminlerini etkileyeceği de göz önünde bulundurularak kendi içlerinde alt gruplar oluşturulmuştur. Bu gerçekleştirilirken Eskişehir il sınırları içerisinde bulunan tarım arazilerinde yetiştirilen ürünlere ait yüzdeler temel alınmıştır. Bu dağılım Çizelge 7.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.7. Eskişehir’de ekilen tarım ürünlerine ait bilgiler (Anonim 2, 2007)

Ürün Cinsi	Ekilen Alan (Da)	Ekilen Alan %
Buğday	2,008,264	51,1
Arpa	1,255,390	32,0
Şeker Pancarı	125,317	3,2
Ayçiçeği	96,333	2,4
Diğer	442,932	11,3
Toplam	3,928,236	100

Yine aynı şekilde havzada bulunan ormanlardaki bitki deseninin farklılık göstermesi ormanlarında yaprağını döken ve dökmeyen olarak iki gruba

ayrılmasını uygun olacağı düşünülmüştür. Çizelge 7.8’de Eskişehir’deki ormanlarda bulunan ağaç türleri ve alan yüzdeleri verilmiştir.

Çizelge 7.8. Eskişehir’deki ormanlara ait bilgiler (Anonim 2, 2007)

Yaprağını dökmeyen		Yaprağını döken	
Ağaç Türü	% Alan	Ağaç Türü	% Alan
Karaçam	5,7	Kayın	10,1
Kızılcıcam	72,8	Kavak	0,2
Sarıçam	8,5	Meşe	2,7
Toplam	87,1	Toplam	12,9

Arazi kullanımına ilişkin model için önemli girdilerden biri de arazi üzerindeki bitkilerin maksimum gölge kapasiteleridir. Bitkilerin gölgeleri direkt olarak sızma, yüzeysel akış ve evapotranspirasyonu etkilemektedir. Ayrıca yağış sırasında düşen yağmur tanelerinin erozif etkilerini de azaltmaktadır. Bu nedenle çalışma alanı içerisindeki bitki desenine uygun olacak şekilde maksimum gölge kapasitesi belirlenmiş ve Çizelge 7.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 7.9. Bitki türüne bağlı maksimum gölge kapasitesi

Arazi Türü	Maksimum Gölge Kapasitesi (mm)
Yaprağını döken orman	1.5 ^a
Yaprağını dökmeyen orman	6 ^b
Buğday	10 ^c
Arpa	2 ^d
Mera	3 ^d
Fundalık	3 ^d
Bağ – bahçe	0.2 ^e

^a Price ve diğ.(2003), ^b Klaassen ve diğ.(1998), ^c Llorens ve Gallart (2000), ^d Klingaman ve diğ.(2007), ^e Li ve diğ.(2000), ^d Persson (1997), ^e Dunkerley (2000), ^e Estringana ve diğ.(2010), ^e Barfield (1973).

7.1.4. Meteorolojik Veriler

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Araştırma ve Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı'ndan Aşağı Porsuk Çayı havzasının içindeki ve yakın çevresindeki 4 meteoroloji istasyonuna ait veriler temin edilerek çalışma için kullanıma hazır hale getirilmiştir. Elde edilen bu verilerin yanı sıra SWAT modeli de yağış gibi bazı meteorolojik parametreleri çeşitli yöntemlerle, aylık ortalama değerleri kullanarak tahmin edebilmektedir. Bu tahminleri gerçekleştirmek için ihtiyaç duyduğu meteorolojik parametreler ve bu parametrelere ilişkin değerler 4 meteoroloji istasyonu için hesaplanmış ve Çizelge 7.10'da Eskişehir meteoroloji istasyonu değerlendirme sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 7.10. Eskişehir meteoroloji istasyonu değerlendirme sonuçları

Eskişehir Meteoroloji İstasyonu	AYLAR											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Parametreler												
Maksimum sıcaklık (°C)	3,7	6,2	11,4	16,9	21,8	26,0	28,9	29,2	25,3	19,5	11,9	5,5
Minimum sıcaklık (°C)	-3,9	-3,3	-0,8	3,7	7,6	11,1	13,7	13,5	9,3	5,1	0,5	-1,9
Ortalama aylık yağış (mm)	34,1	25,8	29,1	49,3	36,4	16,4	15,4	7,6	20,9	19,6	38,3	43,9
0.5 saatlik maksimum yağış (mm)	2,5	1,9	2,4	5,0	7,9	6,3	5,3	2,3	6,5	4,7	3,7	2,3
Islak bir günü kurak bir günün takip etme olasılığı	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,10	0,17	0,23	0,28
Islak bir günü ıslak bir günün takip etme olasılığı	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,47	0,49	0,58	0,59
Aylık ortalama yağışlı gün sayısı	13,0	11,3	12,6	11,8	9,6	5,3	2,8	3,1	5,0	8,0	12,0	13,0
Solar radyasyon (MJ/m ² /gün)	5,3	7,9	11,2	13,9	17,2	19,6	20,2	18,2	14,89	10,06	6,52	4,38
Çiğlenme noktası sıcaklığı (°C)	-4,5	-3,7	-0,6	2,8	6,2	8,2	10,6	11,5	9,2	6,2	1,6	-2,9
Rüzgar hızı (m/s)	2,7	2,9	3,1	3,0	2,9	3,0	3,4	3,1	2,7	2,2	2,4	2,8

Özellikle dağlık bölgelerde yer alan havzalarda sıcaklık ve yağış üzerine olan orografik etki SWAT modeli ile simüle edilebilmektedir. Bu orografik etkinin sıcaklık ve yağışa olan etkisini belirlemek için model, her bir alt havza için 10 farklı yükseklik bandı oluşturmaya izin vermektedir. Bu sayede meteoroloji istasyonun bulunduğu yere bağlı kalmaksızın, örneğin istasyonun bulunduğu yerde yağış yağmur olarak gerçekleşirken, yüksek bölgelerde yağışın kar olarak düştüğünü ya da farklı yüksekliğe sahip bölgeler için sıcaklık farklılıklarını hesaplayabilmektedir. Bu amaçla çalışma alanı içerisindeki 18 alt havza için farklı yükseklik bantları ve bu yükseklik bantları içinde kalan alanların yüzde oranları modele tanımlanmıştır.

7.2. Duyarlılık Analizi

Fiziksel temele dayanan karmaşık hidrolojik modellerin büyük bir bölümü çok sayıda değişkenle tanımlanmaktadır. Bu sayının çokluğu süreçteki tüm değişkenlerin tam olarak bilinmesini zorlaştırmakla birlikte, bir çoğu da direkt ölçüm yoluyla belirlenememektedir. Kalibrasyon sırasında seçilen parametreler modelin, gözlem değerlerine yakın sonuçlar verebilmesi için belirli alt ve üst limitler arasında değiştirilmektedir. Bu değişkenlerin çokluğu kalibrasyon sürecini zorlaştırarak karmaşıklığa yol açmaktadır. Bu nedenle, kalibrasyonda kullanılan parametrelerin model çıktıları üzerine yaptıkları anlamlı etkiyi belirleyebilmek ve bu değişkenleri önem sırasına koyabilmek için duyarlılık analizi gerçekleştirilmektedir (Sudheer, 2010).

SWAT modeli de bu analizi gerçekleştirirken Latin hiperküp yaklaşımını (McKay, 1979) kullanmaktadır. Latin hiperküp, Monte Carlo simülasyonunu temel olarak alan, güvenilir analiz sonuçları verebilmek için Monte Carlo simülasyonunda olduğu gibi çok fazla denemeye gitmeden, rastgele örnekleme yapan gelişmiş bir yöntemdir. Monte Carlo simülasyonu yaygın şekilde kullanılan ve güvenilir bir yöntem olmasına rağmen, yüksek sayıda simülasyon gerçekleştirme gereksinimi ve buna bağlı olarak yüksek kapasiteli bilgisayar kullanımı gerekliliği olumsuz tarafları oluşturmaktadır. Latin hiperküpte temel olarak parametrelerin değer aralığı N sayıda parçaya bölünür. Ardından model,

parametrelerin rastgele kombinasyonlarıyla N defa çalıştırılır. Elde edilen sonuçlar korelasyon ve çoklu lineer regresyon gibi istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek bunun sonucunda etkin parametreler belirlenmesi sağlanmaktadır. Duyarlılık analizinde kullanılan parametrelere ilişkin bilgiler Çizelge 7.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.11. Duyarlılık analizinde kullanılan parametrelere ait bilgiler

Parametre	Alt limit	Üst limit	Açıklama
Alpha_Bf	0	1	Baseflow alfa faktör
Biomix	0	1	Biyolojik karışma verimi
Blai	0	1	Potansiyel maksimum yaprak alanı indeksi
Canmx	0	10	Maksimum gölge kapasitesi
Ch_Cov	0	1	Kanal örtü faktörü
Ch_Erod	0	1	Kanal erodibilite faktörü
Ch_K2	0	150	Ana kanalın hidrolik iletkenliği
Ch_N2	0	1	Ana kanalın Manning pürüzlülük katsayısı
CN2	35	98	Eğri numarası
Epc0	0	1	Bitki alımı dengeleme faktörü
Esco	0	1	Topraktan buharlaşmayı dengeleme faktörü
Gw_Delay	0	50	Yer altı suyu alıkonma süresi
Gw_Revap	0.02	0.2	Yer altı suyu “revap” katsayısı
Gwqmn	0	5000	Geri akışın oluşabilmesi için sığ akiferdeki eşik su derinliği
Revapmn	0	500	Revap için sığ akiferdeki eşik su derinliği
Slope	0	1	Ortalama eğim
Slsubbsn	10	150	Ortalama eğim uzunluğu
Sol_Al	0	0.3	Nemli toprak albedosu
Sol_Awc	0	1	Toprağın su kapasitesi
Sol_K	0	100	Doymuş hidrolik iletkenlik
Sol_Z	0	3000	Toprak derinliği
Spcon	0,0001	0,01	Maksimum sediment miktarının hesaplanabilmesi için lineer parametre
Spexp	1	2	Kanalın içine katılan sediment miktarının hesaplanabilmesi için üstel parametre
Surlag	0	10	Yüzeysel akış gecikme katsayısı
Usle_C	0	1	Su erozyonu için bitki örtüsü ve yönetim faktörünün minimum değeri
Usle_P	0	1	Toprak koruma faktörü

Hidrolojik kalibrasyon ve sediment kalibrasyonundaki etkili parametrelerin belirlenebilmesi için çalışma alanı içinde çeşitli havzalarda duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Parametreler sıralanırken 0,1 değerinden büyük değişkenler kalibrasyona dahil edilmiştir (Abbaspour, 2008). Hidrolojik ve sediment kalibrasyonu öncesi yapılan duyarlılık analizi sonuçları, havzalara göre çok büyük farklılıklar göstermemiştir. Genel olarak sonuçlar Çizelge 7.12’de gösterilmektedir.

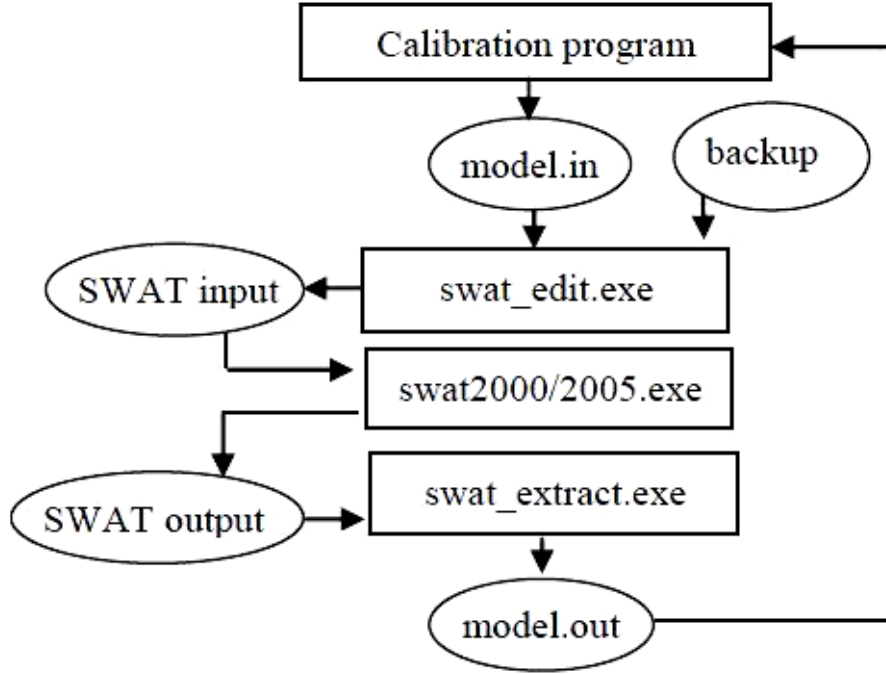
Çizelge 7.12. Duyarlılık analizi sonuçları

Duyarlılık Analizi		
Sıralama	Hidrolojik	Sediment
1	CN2	Usle_P
2	Alpha_Bf	Spcon
3	Gwqmn	Spexp
4	Ch_K2	
5	Sol_Z	
6	Ch_N2	
7	Esco	
8	Surlag	
9	Sol_Awc	
10	Canmx	

7.3. Model Kalibrasyonu

Kalibrasyon ve belirsizlik analizi için uzun yıllardır birçok yöntem kullanılmıştır. Sadece bir yöntemin uygulanmaması olaylara bağlı olarak alınan farklı sonuçlardan kaynaklanmaktadır. SWAT modeli de kalibrasyon, duyarlılık analizi, belirsizlik analizi ve validasyon işlemleri için tasarlanmış, genelleştirilmiş belirsizlik olasılığı tahmini (GLUE), parametre çözümü (ParaSOL), sıralı belirsizlik kurma (SUFI), gibi yöntemleri temel alarak işlem gören SWAT-CUP adlı bir programı kullanmaktadır. Programın 2.1.5 ve 3.1.3 olmak üzere iki versiyonu bulunurken çalışmada SWAT-CUP 3.1.3 kullanılmıştır. Program SWAT modeli girdi ve çıktılarıyla uyumlu bir şekilde tasarlanmıştır. SWAT ile

kalibrasyon programı SWAT-CUP arasındaki etkileşim Şekil 7.5’de gösterilmiştir.



Şekil 7.5. SWAT ve SWAT-CUP arasındaki ilişki (Rostamian, 2008)

SWAT-CUP programında ilk olarak üzerinde değişiklik yapılacak parametrelerin hangi değerler arasında değiştirileceği belirlenmelidir. Bu üç farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan ilki parametrenin yerine direkt olarak verilen aralıktaki değerlerin atanması, ikincisi $\pm\%$ olarak değiştirmek yani belirli oranda parametre değerini artırıp azaltmak, üçüncüsü de mevcut değişken değerinin üzerine yine belirtilen aralıkta değer ekleme şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu konuda kesin bir kısıtlama olmadığı gibi, koşullara göre uygun değişim türünün seçilmesi daha doğru olacaktır. Program kalibrasyon işlemini günlük, aylık ve yıllık olarak gerçekleştirebilmektedir. Alt havza bazında gerçekleştirilen kalibrasyon işleminde, duyarlılık analizinde öne çıkan parametre değerlerinin yanı sıra çalışma alanı için ölçümü mümkün olmayan bazı parametre değerleri de kalibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. SWAT-CUP programı yardımıyla hidrolojik modelin kalibrasyonu aylık bazda, sediment kalibrasyonu ise günlük bazda gerçekleştirilmiştir. Model için hidrolojik kalibrasyon sırasında

parametreler için belirlenen değişim türü ve değer aralığı Çizelge 7.13'te gösterilmektedir.

Çizelge 7.13 Kalibrasyonda kullanılan parametrelere ait değişim aralıkları

Parametre	Alt limit	Üst limit
ALPHA_BF*	0	1
CN2**	-0.2	-0.1
GWQMN***	0	250
SURLAG*	3	5
CH_K2*	25	100
CH_N2*	0.05	0.15
ESCO*	0.6	1
SOL_Z()**	0	0.9
GW_REVAP***	0.02	0.2
REVAPMN***	0	500
SOL_AWC()**	-0.3	-0.1
SOL_BD()*	1.1	1.9
SOL_K()**	-0.3	0.5
GW_DELAY**	-0.3	0.1
RCHRG_DP*	0	1

* Direkt olarak parametre değerini değiştir

** % değerinde arttır veya azalt

*** Var olan değere ekle

Uygun değişim ve parametre aralıkları belirlendikten sonra kalibrasyon işlemleri sırasında programın gerçekleştireceği Latin hiperküp sayısı ve kalibrasyon periyoduna ait gözlem verileri uygun formatta programa girilmektedir. Eğer istenirse akım, sediment, azot ve fosfor gözlem verileri girilerek tüm bu bileşenler için kalibrasyon işlemleri aynı anda gerçekleştirilerek zamanı iyi kullanmak da mümkün olabilmektedir. Çünkü çalışma alanındaki alt havza sayısı çok olduğu takdirde modellenecek olan her bir değişkenin ayrı ayrı kalibre edilmesi uzun zaman alacaktır. Kalibrasyon sonrası program yaptığı N sayıdaki simülasyon sonucundan gözlem verilerine en uygun olan simülasyonu seçerek parametrelerin ne şekilde değiştirileceğini belirler. Çalışma alanında bulunan 11 numaralı alt havza için gerçekleştirilen kalibrasyon sonunda elde edilen parametre değerleri Çizelge 7.14'te gösterilmektedir.

Çizelge 7.14. Kalibrasyonda elde edilen parametre değerleri

Parametre	Kalibrasyon Değeri
ALPHA_BF*	0,63
CN2**	-0,05
GWQMN***	2293,92
SURLAG*	4,90
CH_K2*	68,89
CH_N2*	0,13
ESCO*	0,85
SOL_Z()**	0,43
GW_REVAP***	0,09
REVAPMN***	153,75
SOL_AWC()**	-0,18
SOL_BD()*	1,53
SOL_K()**	0,32
GW_DELAY**	-0,01
RCHRG_DP*	0,65

* Direkt olarak parametre değerini değiştir

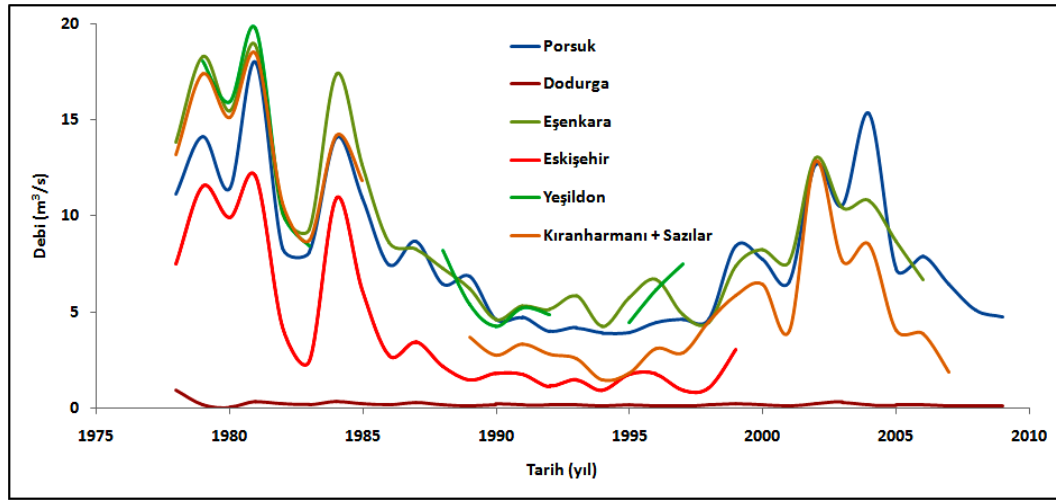
** % değerinde artır veya azalt

*** Var olan değere ekle

En uygun simülasyon ve gözlem verileri arasında Nash-Sutcliffe değeri, belirleme katsayısı, ortalamadan sapmaların kareleri toplamları, simülasyon sonucunun ne kadarının %95'lik belirsizlik düzeyindeki alanda kaldığı gibi istatistiksel değerlendirme sonuçları verebilmektedir. Aynı zamanda eğer sonuçlar makul bulunmaz ve bir kez daha kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmek istenirse, program yeni parametre aralıkları vererek farklı bir iterasyon gerçekleştirme olanağı da sunmaktadır.

8. MODEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Aşağı Porsuk Çayı havzasında SWAT modeli kullanılarak 18 alt havza hidrolojik ve sediment açısından değerlendirilmiştir. Hidrolojik olarak değerlendirmede DSİ ve EİEİ'ne ait akım gözlem istasyonu verilerinin yanı sıra, yine DSİ'ye ait Porsuk ve Dodurga barajlarına ait işletme bakım verileri kullanılmıştır. Temin edilen DSİ ve EİEİ'ne ait akım verilerinin zamansal olarak değişimi Şekil 8.1.'de gösterilmektedir.



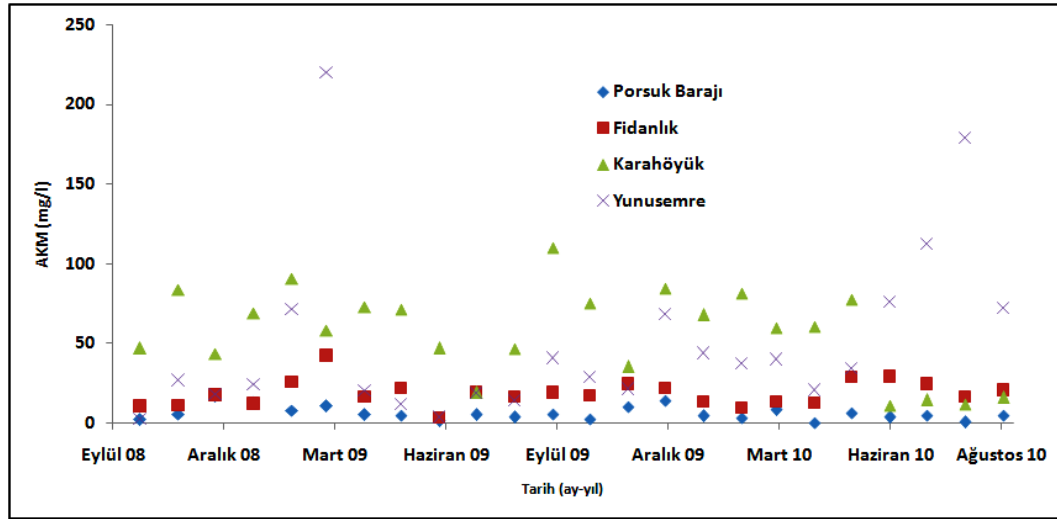
Şekil 8.1. DSİ ve EİEİ'ye ait akım gözlem istasyonlarının zamansal değişimi

Şekil 8.1.'de görüldüğü gibi akım verileri tüm istasyonlarda aynı zaman periyodunda yer almamaktadır. Sadece Porsuk ve Dodurga barajlarına ait işletme bakım verilerinde modelin çalışma periyodu olan 1978-2009 yılları arasındaki dönemde eksiksiz olarak veri bulunmaktadır. Hidrolojik modelin kalibrasyonu ve validasyon işlemleri sırasında Porsuk Çayı ana kolu üzerinde bulunan Eşenkara, Yeşildon ve Kıranharmanı ve Sazılar akım gözlem istasyonu verileri kullanılmıştır. Bu istasyonlara ait akım verilerinin istatistiksel değerlendirilmesi Çizelge 8.1'de gösterilmektedir. Çalışma alanı içerisinde yer alan Sarısu, Pürtek çayı, Doğanoglu deresi gibi Porsuk çayını besleyen yan kolların kalibrasyonu sırasında hem istasyonların konumu, hem de çalışma periyodlarının süreklilik teşkil etmemesi bu kolların bulunduğu alt havzaların kalibrasyonunda büyük zorluklar yaratmıştır.

Çizelge 8.1. DSİ ve EİEİ'ye ait akım gözlem istasyonlarının istatistiksel değerlendirilmesi

	Porsuk	Dodurga	Eşenkara	Eskişehir	Yeşildon	Kıranharmanı + Sazılar
Gözlem yılı	32	32	29	22	13	27
Ortalama (m ³ /s)	8,1	0,2	9,2	4,1	9,1	7,2
Akım Aralığı (m ³ /s)	3,9-18	0,03-0,9	4,3-18,9	0,9-12,1	4,3-19,8	1,5-18,5
Sapma katsayısı (%)	47	72	47	92	59	73

Sediment kalibrasyonu için ise 2008-2010 yılları arasında örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği Porsuk Barajı, Fidanlık, Karahöyük ve Yunusemre gözlem istasyonlarından elde edilen askıda madde ölçüm sonuçları kullanılmıştır. Bu istasyonlardan elde edilen sonuçlar Şekil 8.2'de gösterilmektedir.



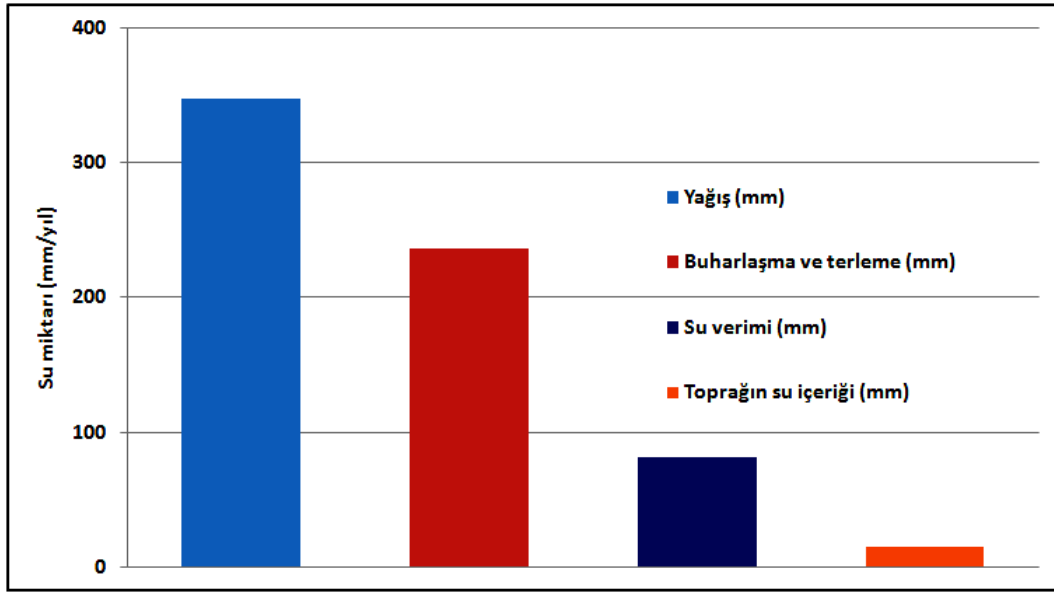
Şekil 8.2. Ölçüm istasyonlarındaki askıda katı madde sonuçları

Yapılan ölçümler sonucu elde edilen askıda katı madde derişimlerinde Porsuk Barajı gözlem istasyonunda ortalama 6 mg/l gibi oldukça düşük AKM değerleri olduğu gözlenmiştir. Porsuk barajı öncesi yukarı havzada bulunan DSİ'ye ait Çalça su kalitesi gözlem istasyonunda 2003-2005 yılları arasında yapılan ölçümlerde AKM derişimi ortalama 90 mg/l civarındayken yine aynı

tarihler arasında Porsuk barajı çıkışında bulunan su kalitesi gözlem istasyonundaki ölçüm sonuçları ortalama 5 mg/l mertebesindedir. Bu da Porsuk barajının AKM derişiminin azalmasındaki katkıyı gözler önüne sermektedir. Bir diğer dikkat çekilecek nokta ise, Eskişehir sonrası Alpu yakınlarında yer alan Karahöyük gözlem istasyonundaki AKM derişimlerinin, Haziran 2010 tarihinden sonra yeni yapılan Eskişehir atıksu arıtma tesisinin faaliyete girmesiyle birlikte büyük oranda azalmış olmasıdır.

8.1. Hidrolojik Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SWAT tarafından oluşturulan hidrolojik model sonuçlarının değerlendirilmesi için modelin çalışma periyodu olan 1978-2009 yılları arasında tüm havza üzerine düşen ortalama yağış, evapotranspirasyon, su verimi (yüzeysel akış + yer altı suyu akışı + ara akış) ve toprağın su içeriği gibi hidrolojik döngüdeki temel bileşenler incelenerek su dengesi eşitliği kontrol edilmiştir. Bunun sonucunda havzaya düşen yağışın %65 gibi büyük bir kısmının buharlaşma ve terleme ile havzadan uzaklaştığı, %25’lik bölümün akarsuyu beslediği, kalan kısmında toprak nemi olarak havzada kaldığı görülmüştür. Su dengesine ait sonuçlar Şekil 8.3’de gösterilmektedir.



Şekil 8.3. Hidrolojik döngüdeki temel bileşenlere ait 1978-2009 yılları arası ortalama sonuçlar

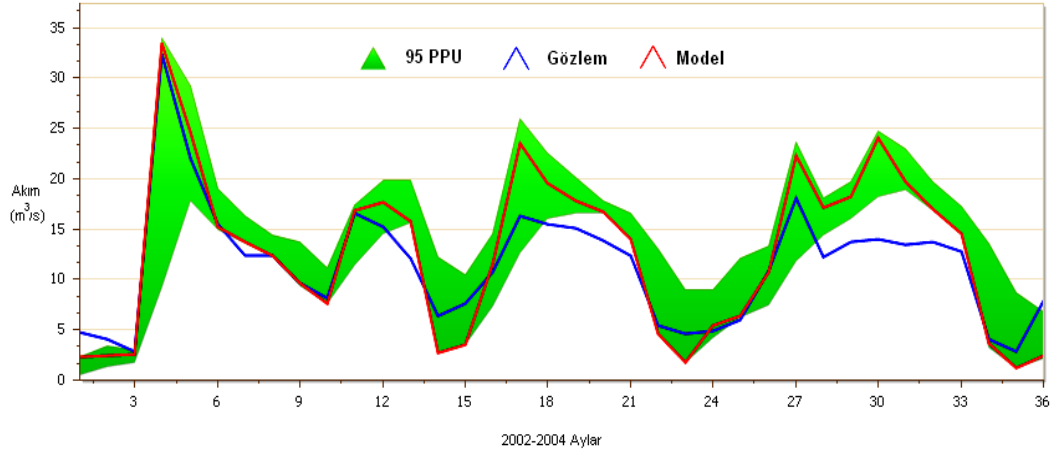
Model, simülasyonları günlük, aylık ve yıllık bazda gerçekleştirebilmektedir. İlk olarak akım verileri yıllık bazda değerlendirilmiştir. Değerlendirme sırasında gözlem ve simülasyon verilerinin istatistiksel olarak birbirinden farklı olup olmadığına dair bazı hipotez testleri gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Hidrolojik kalibrasyonun tamamlanıp tamamlanmadığı hususunda dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Gözlem ve model sonuçlarının ortalamaları arasında farkın $\pm\%15$ 'i geçmemesi, Nash-Sutcliffe veriminde (E_{NS}) 0,5'ten ve belirleme katsayısı (R^2) değerinin 0,6'dan büyük olması iyi bir kalibrasyon için ölçüt olarak sayılmaktadır (Santhi ve ark., 2001). İstatistiksel değerlendirilme için kullanılan Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (Nash ve Sutcliffe, 1970) Denklem (8.1)'de gösterilmektedir.

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (8.1)$$

Burada; E , Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı; Q_o^t , t anındaki gözlem değeri; Q_m^t t anındaki model değeri; \bar{Q}_o , gözlem değerlerinin ortalaması; şeklinde ifade edilir.

Eşenkara istasyonunun bulunduğu alt havzanın kalibrasyonu için 2002-2004 yılı arasında aylık akım verileri kullanılarak SWAT-CUP programı tarafından kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında üç farklı alt havzaya ait kalibrasyon parametreleri çeşitli kombinasyonlarda denenmiş ve en uygun simülasyon sonucu bulunmaya çalışılmıştır. Kalibrasyon gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken en önemli unsur kalibrasyona giren parametre değerlerinin gerçek ve makul aralıklarda değiştirilerek kalibrasyonun sağlanmaya çalışılmasıdır. Çünkü SWAT-CUP programı işlemi gerçekleştirdikten sonra tüm parametreler için yeni aralık değerleri vermektedir. Bu aralık değerlerinin, parametreler için limit aralık değerlerini aştığı gözlenmekte ve yapılacak yeni iterasyonlarda bu aralıkların düzeltilmesine dikkat etmek gerekmektedir. Eşenkara istasyonu ile aylık kalibrasyon sonunda gözlem ve simülasyon sonuçlarının ortalamalarında $\%10$ 'luk farkın, E_{NS} değerinin 0,67, model sonuçlarının $\%64$ 'ünün $\%95$ belirsizlik düzeyindeki alan içerisinde bulunduğu, R^2 değerinin de

0,88 olduğu gözlenmiştir. Kalibrasyon sonucu uygun parametre değerlerinin modele entegre edilerek yıllık olarak elde edilen simülasyon sonuçlarında ise gözlem ve model sonuçları arasındaki ortalama farkın %1, E_{NS} değerinin 0,85, R^2 değerinin de 0,88 olduğu tespit edilmiştir. Yıllık model sonuçları ile gözlem sonuçlarının varyanslarını karşılaştırmak için yapılan F testi sonucunda %95 anlamlılık düzeyinde varyansların eşit olduğu, bağımlı değişkenler için ortalamaların karşılaştırılması için yapılan t testi sonucunda da %95 anlamlılık düzeyinde ortalamalar arasında bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Eşenkara istasyonu için F testi sonuçları Çizelge 8.2’de, t testi sonuçları Çizelge 8.3’te, aylık kalibrasyon dönemi sonuçları Şekil 8.4’te, aylık model ve gözlem sonuçları da Şekil 8.5.’de gösterilmiştir.



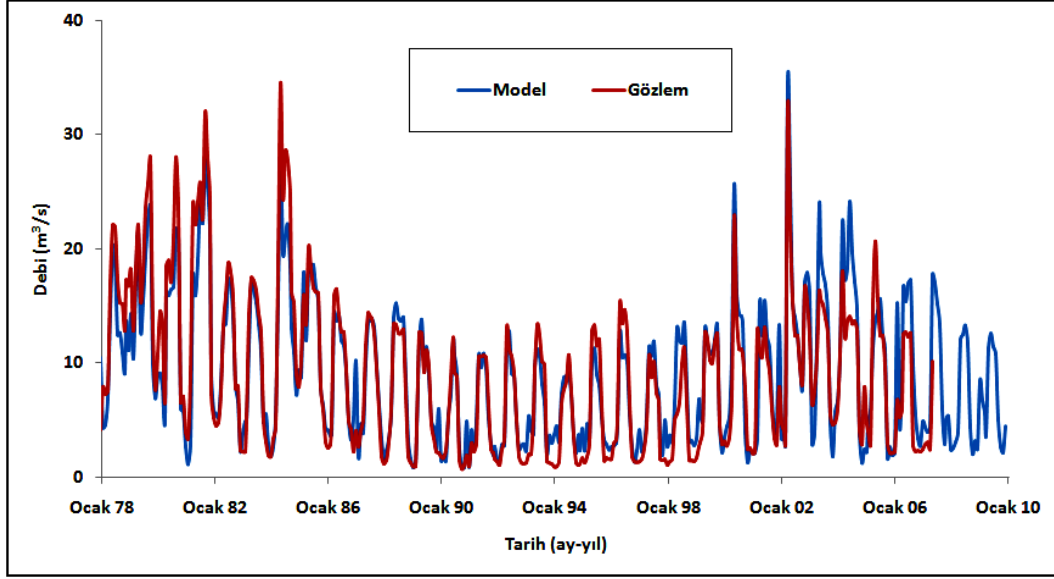
Şekil 8.4. Eşenkara kalibrasyon dönemi sonuçları

Çizelge 8.2. Eşenkara istasyonu için yıllık F testi sonuçları

F testi ($\alpha = 0.05$)	Model	Gözlem
Ortalama (m^3/s)	9,05	9,18
Varyans	10,17	18,27
Veri sayısı	32	29
P olasılık değeri tek kuyruk	0,057	

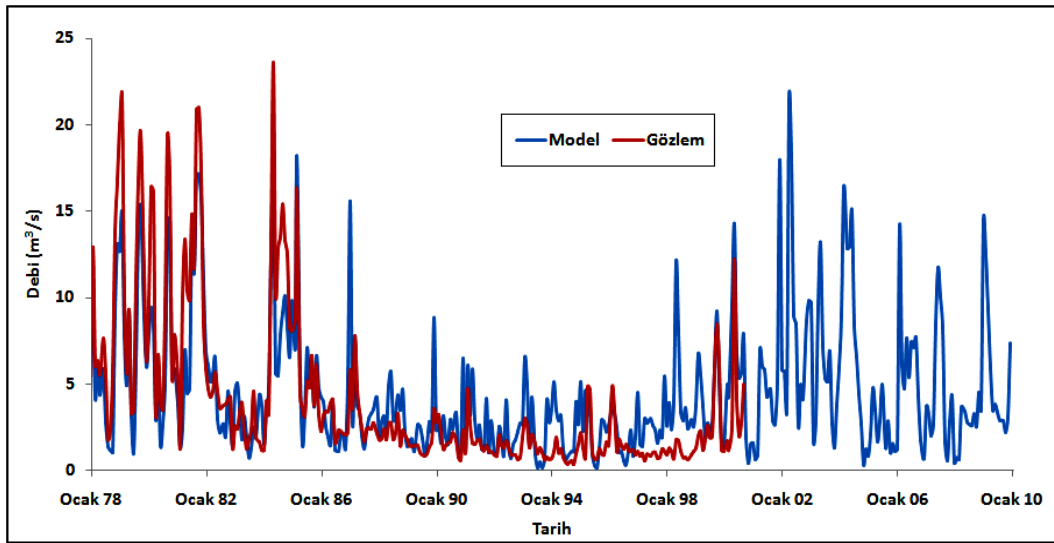
Çizelge 8.3. Eşenkara istasyonu için yıllık t testi sonuçları

t testi ($\alpha = 0.05$)	Model	Gözlem
Ortalama (m^3/s)	9,24	9,18
Varyans	10,77	18,27
Veri sayısı	29	29
P olasılık değeri tek kuyruk	0,424	



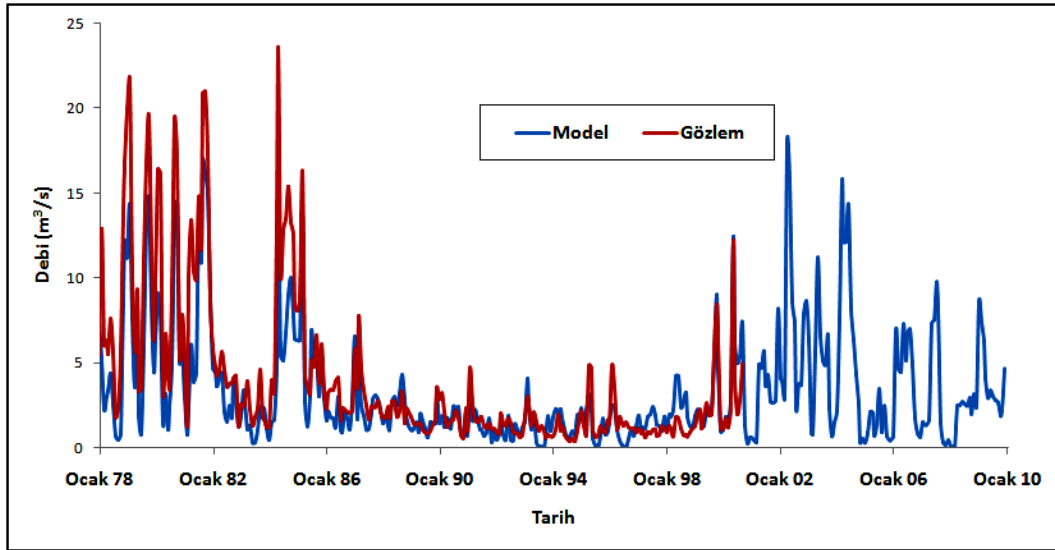
Şekil 8.5. Eşenkara istasyonu için aylık model ve gözlem sonuçları

Eşenkara istasyonu sonrası, Eskişehir sulamasının ihtiyacını karşılamak üzere sol sahil ve sağ sahil kanallarına su aktarılmaktadır. Sarısu ve sulama kanalları sonrasında Porsuk çayı ana kolu üzerinde bulunan EİEİ'ne ait 12-48 kodlu Eskişehir istasyonu ile havzadan su çekme işleminin doğru bir şekilde gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğinin kontrolü için, bu istasyona ait veriler gözlem sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 8.6'de Eskişehir istasyonuna ait aylık model ve gözlem sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 8.6. Eskişehir istasyonu için aylık model ve gözlem sonuçları

Sonuçlar değerlendirildiğinde, ortalamalar arasındaki farkın %4, E_{NS} değerinin 0,69, R^2 değerinin de 0,70 olduğu görülmüştür. Şekil 8.6'daki sonuçlara göre özellikle 1985 sonrası model sonuçlarının gözlem sonuçlarına göre yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin sağlıklı bir şekilde kalibre edilemeyen Sarısu kolunun getirdiği yüksek debiden kaynaklandığı düşünülmektedir. Gerçekte Sarısu, model sonuçlarında olduğu gibi yüksek akım değerlerini Porsuk çayına taşımamaktadır. Bu nedenle Eskişehir istasyonu sonuçları ile Sarısu karışımı öncesinde bulunan alt havzaya ait çıkış değerlerinin karşılaştırılarak Sarısu etkisi ortaya konmaya çalışılmıştır. Sarısu karışımı öncesindeki alt havzaya ait aylık model sonuçları ile Eskişehir istasyonunun karşılaştırılması Şekil 8.7'de gösterilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucu ortalamalar arasında %24'lük bir farkın olduğu, aylık model ve gözlem sonuçlarından hesaplanan E_{NS} değerinin 0,75, R^2 değerinin ise 0,84 olduğu belirlenmiştir. Ortalamalar arasındaki %24 gibi büyük farkın sebebi, 1978-1982 ve 1984 yılındaki model sonuçlarına göre yüksek gözlem sonuçlarıdır.



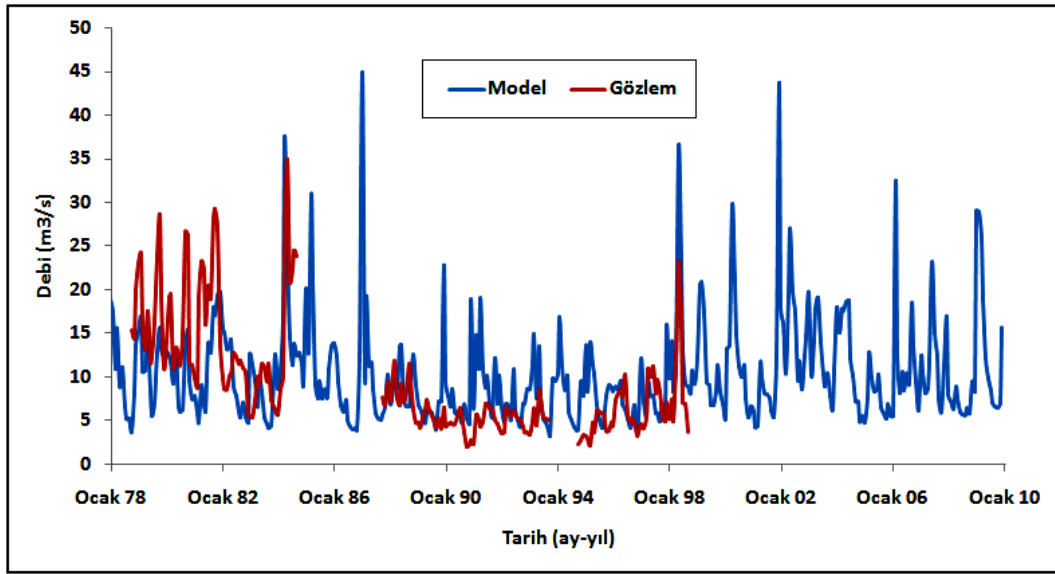
Şekil 8.7. Sarısu karışımı öncesi aylık model sonuçları ile Eskişehir istasyonunun karşılaştırılması

Şekil 8.7'de dikkati çeken bir nokta, gözlem verilerinin 1985 yılı öncesi ve sonrası olmak üzere iki farklı dönemi kapsadığıdır. 1985 öncesi gözlem verileri, 1985 sonrasına göre hem büyüklük olarak farklı, hem de model sonuçlarından daha yüksek değerlere sahiptir. 1985 yılı sonrası incelendiğinde ise bu sonuçların

büyüklik olarak 1985 öncesine göre oldukça düşük olduğu ve model sonuçlarından tamamen yüksek veya düşük değerlere sahip olduğu direk olarak söylenememektedir. 1985-2000 yılları arasındaki veriler incelendiğinde gözlem ve model sonuçları arasındaki farkın %5, E_{NS} değerinin 0,86, R^2 değerinin ise 0,74 olduğu görülmektedir. Buda 1985 öncesi gözlem verilerine ait büyük akım değerlerinden sistemin etkilendiğini ortaya koymaktadır.

DSİ'den temin edilen Yeşildon akım gözlem istasyonuna ait veriler sürekli olmayan 13 yıllık bir periyodu kapsamaktadır. Verilerin sürekli olmaması sebebiyle kalibrasyon için verilerin bulunduğu üç farklı dönem içinde kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu sırada dikkat çeken bir nokta sadece 1979-1983 yılları arasında gözlem sonuçlarının model sonuçlarından daha yüksek sonuç vermektedir, ancak genel olarak model tüm havza bazında değerlendirildiğinde, gözlem sonuçlarının model sonuçlarından daha düşük değerlere sahip olması, bu periyodun kalibrasyonda kullanılmasının doğru olamayacağını fikrini ortaya koymuştur. Sonuç olarak Yeşildon istasyonunun bulunduğu alt havzanın kalibrasyonu için 1988-1990 yılı arasında günlük akım verilerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Kalibrasyon sonunda gözlem ve simülasyon sonuçlarının ortalamalarında %5'lik farkın, E_{NS} değerinin -2,8, model sonuçlarının %42'sinin %95 belirsizlik düzeyindeki alan içerisinde olduğu belirlenmiştir. Kalibrasyon sonucu uygun parametre değerlerinin modele entegre edilerek yıllık olarak elde edilen simülasyon sonuçlarında ise gözlem ve model sonuçları arasındaki ortalama farkın %2, E_{NS} değerinin 0,43, R^2 değerinin de 0,68 olduğu tespit edilmiştir. Yıllık model sonuçları ile gözlem sonuçlarının varyanslarını karşılaştırmak için yapılan F testi sonucunda %95 anlamlılık düzeyinde varyansların farklı olduğu, bağımlı değişkenler için ortalamaların karşılaştırılması için yapılan t testi sonucunda da %95 anlamlılık düzeyinde ortalamalar arasında bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Yeşildon model sonuçlarının Eşenkara kadar iyi olmamasının bazı temel sebepleri vardır. Bunlardan ilki, Eşenkara sonrası Karacaşehir regülatöründe Eskişehir sulaması için sağ ve sol sahil sulama kanallarına aktarılan suyun barajdan bırakılan su miktarı ile gösterdiği tutarsızlıktır. Sarısu karşımı sonrası EİEİ'ne ait 12-48 Eskişehir adlı istasyon verilerinin yardımıyla sulama suyu ihtiyacı için kullanılan su miktarı tahmin

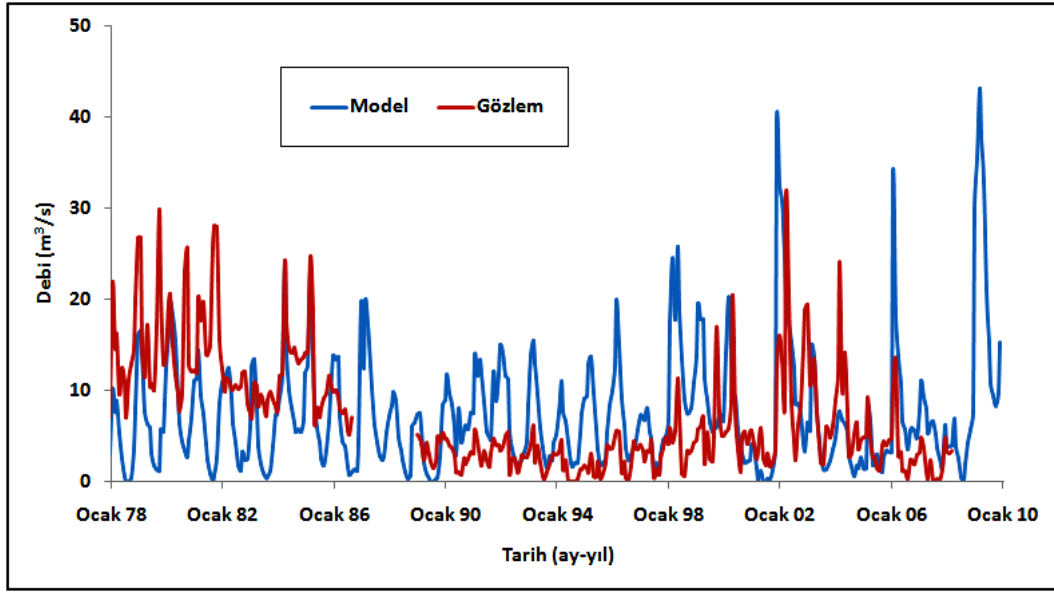
edilerek kısmen de olsa bu sorun çözülmeye çalışılmıştır. İkinci ve en önemli göze çarpan sorun ise Eskişehir Sazova mevkiinde Porsuk ana koluna katılan Sarısu'nun kalibre edilemeyiştir. DSİ'ne ait Sarısu Sazova istasyonununun 1972 yılında faaliyetine son vererek kapanmış olması bu havzanın sağlıklı bir şekilde kalibre edilememesine neden olmuştur. Bu nedenle, Yeşildon istasyonundaki model sonuçlarının gözlem sonuçlarına göre daha yüksek olmasına yol açmıştır. Yeşildon istasyonundaki aylık model ve gözlem sonuçları Şekil 8.8'de gösterilmiştir.



Şekil 8.8. Yeşildon istasyonu için aylık model ve gözlem sonuçları

Hidrolojik modelde değerlendirilen son istasyon havzanın çıkışında Porsuk çayının Sakarya nehrine dökülmesinden hemen önce aynı bölgede bulunan EİEİ'ne ait olan Kıranharmanı ve Sazılar istasyonlarıdır. 1978-1985 arasındaki veriler Sazılar istasyonundan, 1989-2007 yılları arasındaki veriler ise Kıranharmanı istasyonundan kullanılmıştır. 2001-2003 yılları arasındaki aylık akım verileriyle gerçekleştirilen kalibrasyon sonucunda aylık gözlem ve simülasyon sonuçlarının ortalamalarında %111'lik farkın, E_{NS} değerinin -2,38, model sonuçlarının %17'sinin %95 belirsizlik düzeyindeki alan içerisinde olduğu, R^2 değerinin de 0,38 olduğu belirlenmiştir. Kalibrasyon sonunda model uzun dönem çalıştırıldığında gözlem ve model sonuçları arasındaki ortalama farkın %1, E_{NS} değerinin -0,12, R^2 değerinin de 0,03 olduğu tespit edilmiştir. Yıllık model

sonuçları ile gözlem sonuçlarının varyanslarını karşılaştırmak için yapılan F testi sonucunda %95 anlamlılık düzeyinde varyansların eşit olduğu, bağımlı değişkenler için ortalamaların karşılaştırılması için yapılan t testi sonucunda da %95 anlamlılık düzeyinde ortalamaların farklı olmadığı tespit edilmiştir. Kıranharmanı istasyonundaki aylık model ve gözlem sonuçları Şekil 8.9'da gösterilmiştir.



Şekil 8.9. Kıranharmanı ve Sazılar istasyonu için aylık model ve gözlem sonuçları

Sonuçlardan da görüldüğü gibi model ve gözlem sonuçları arasındaki ilişki oldukça zayıftır. Kıranharmanının Yeşildon istasyonunda sonra havza çıkışında yer alması Yeşildon istasyonu kalibrasyondaki sıkıntılarının bu sonuçlara da yansımaya neden olmuştur. Daha öncede belirtildiği gibi çalışma alanı 18 alt havzaya ayrılmıştır. Alt havzaların 8 tanesi Yeşildon istasyonundan sonra yer alırken, 18 alt havzadan en fazla tarım arazisine sahip 2 alt havza içinde, Alpu, Mihaliççık, Beylikova gibi tarım arazilerini oldukça yoğun olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Tarım arazileri için kullanılan su miktarının bilinmemesi ve ayrıca Porsuk ana kolunu besleyen Doğanolu deresi ve Pürtek çayının kalibre edilememesi model sonuçlarındaki tutarsızlığın başlıca sebeplerindendir. Ayrıca sağanak yağışın olduğu dönemlerde SWAT modelinin çok yüksek akım sonuçları vermesi bir şekilde aylık bazda ortalama değerlerin artmasına sebep olmaktadır.

Literatürde modelin bu dezavantajı yönünde çalışmalar yer almaktadır (Borah ve ark. 2007, Kliment ve ark. 2008, Demirel ve ark. 2009). Yapılan hidrolojik değerlendirmeye ilişkin özet bilgiler Çizelge 8.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 8.4. Akım değerlendirme sonuçları

İstasyon Adı	Ortalamalar arasındaki fark (%)	E_{NS}	R^2
Eşenkara	1	0,85	0,88
Eskişehir	2	0,78	0,91
Yeşildon	2	0,43	0,68
Sazılar ve Kıranharmanı	1	-0,12	0,03

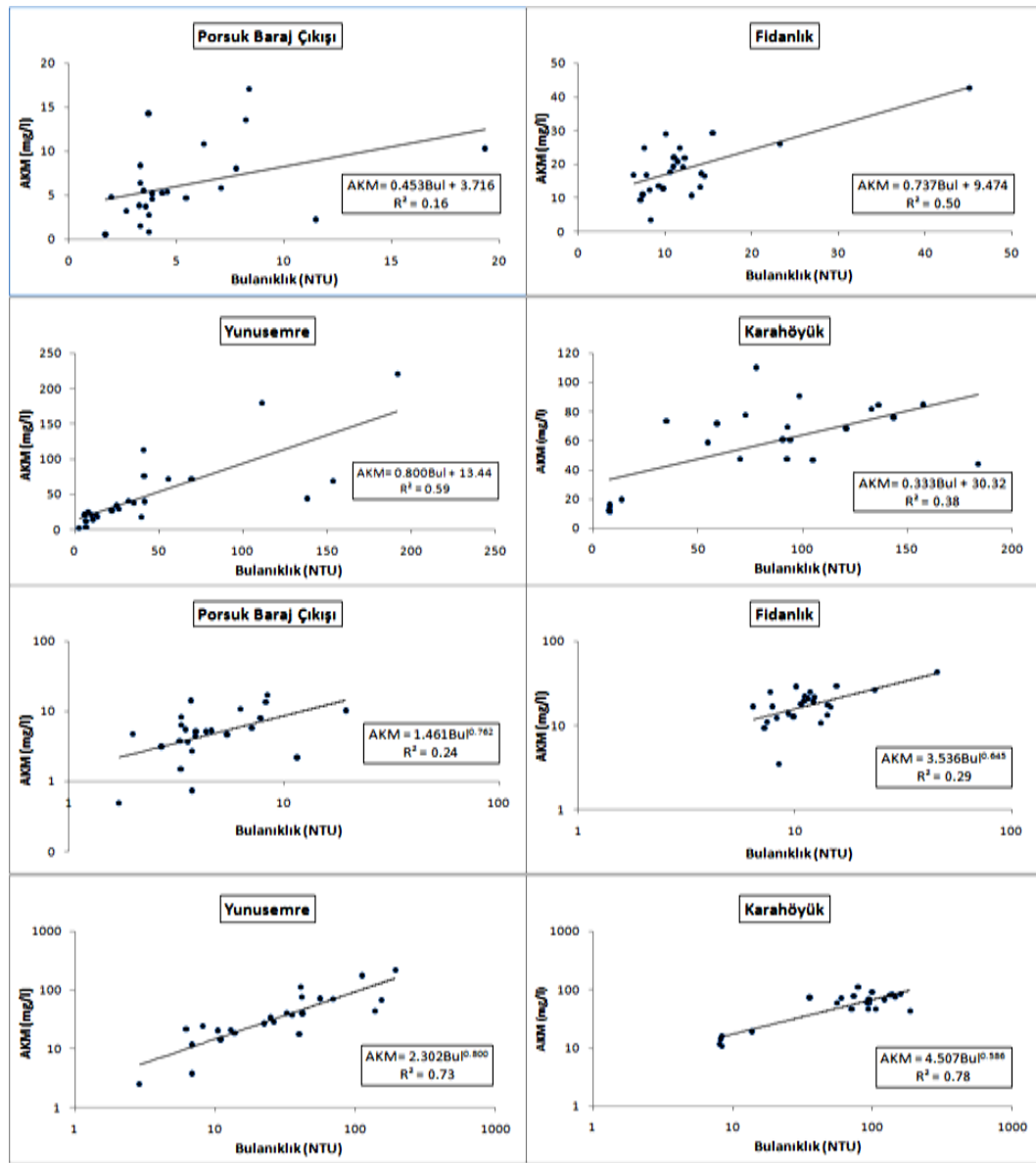
8.2. Sediment Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sedimentin modellenmesi bölümünde kalibrasyon için, proje kapsamında kurulan istasyonlardaki askıda katı madde verileri kullanılmıştır. Kurulan dört farklı istasyonda iki yıl örnekleme süresi boyunca örnek alma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sırasında askıda katı madde yanında bulanıklık da gözlenmiştir. 2009-2010 su yıllarında istasyonlardaki askıda katı madde derişimi ve bulanıklık değerlerine ilişkin bilgiler Çizelge 8.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.5. Askıda katı madde ve bulanıklığa ilişkin bilgiler

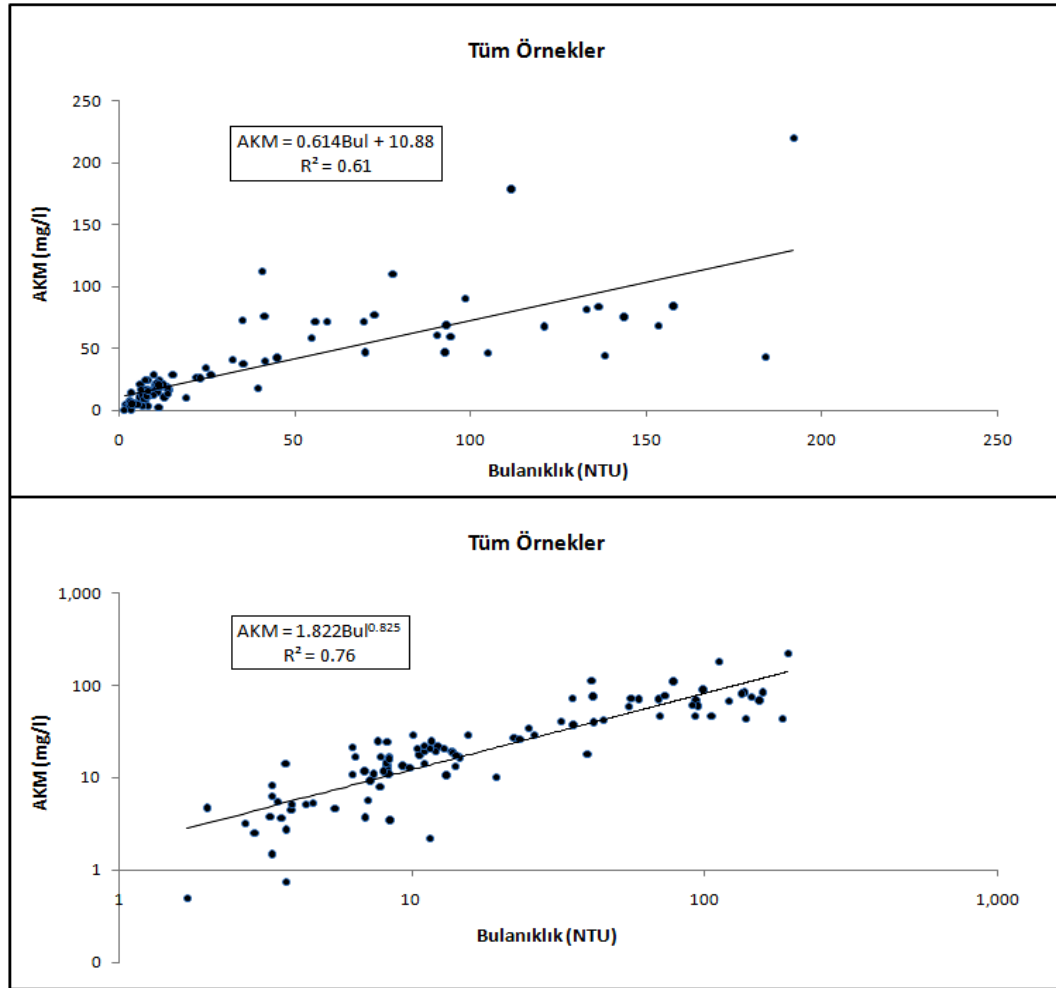
ASKIDA KATI MADDE				
	Porsuk Baraj	Fidanlık	Karahöyük	Yunusemre
Veri sayısı	24	24	23	24
Ortalama (mg/l)	6	19	57	50
Değer Aralığı (mg/l)	1-17	4-43	11-110	3-220
Sapma katsayısı (%)	70	43	49	106
BULANIKLIK				
	Porsuk Baraj	Fidanlık	Karahöyük	Yunusemre
Veri sayısı	24	24	23	24
Ortalama (NTU)	5	13	81	46
Değer Aralığı (NTU)	2-19	6-45	8-184	3-192
Sapma katsayısı (%)	71	62	63	111

Askıda katı madde ve bulanıklık arasındaki ilişkinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda bu ilişkinin genellikle lineer olduğu tespit edilmiştir. Ancak literatürde üssel ilişkinin ortaya konduğu çalışmalar da bulunmaktadır. Bu kapsamda dört istasyondan elde edilen verilerden askıda katı madde bulanıklık arasındaki ilişki ilk olarak her bir istasyonda ayrı ayrı, sonrasında toplanan tüm ölçüm sonuçları hem lineer olarak hem de üssel olarak incelenmeye çalışılmıştır. Tüm istasyonlarda incelenen askıda katı madde bulanıklık arasındaki lineer ve üssel ilişkisi Şekil 8.10’da gösterilmektedir.



Şekil 8.10. Örnekleme noktalarındaki askıda katı madde ve bulanıklık arasındaki lineer ve üssel ilişki

Sonuçlardan da görüldüğü gibi Porsuk Baraj çıkışı istasyonunda hem lineer hem de üssel bir ilişkinin düşük olduğu göze çarpmaktadır. Askıda katı madde derişimlerinin sifira yakın olduğu ölçümlerde bile bulanıklık değerlerinin sifira yaklaşmaması, gözlemlerin % 80'inin 10 mg/l altında bulunması derişim ortalamalarını 6 mg/l gibi çok düşük değerde olması yapılan ölçümlerdeki hata payını ciddi oranda arttırmaktadır. Fidanlık istasyonundaki askıda katı madde derişimlerinin Porsuk Baraj çıkışına göre daha yüksek olması sebebiyle kısmen de olsa lineer bir ilişki göze çarpmaktadır. Karahöyük ve Yunusemre istasyonlardaki incelemede üssel olarak AKM ve bulanıklık arasında anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. İstasyonların konumları göz önünde bulundurulmaksızın tüm gözlem sonuçları karşılaştırılarak genel bir kaniya varılmaya çalışılmıştır. Lineer ve üssel ilişki sonuçları Şekil 8.11'de gösterilmektedir.



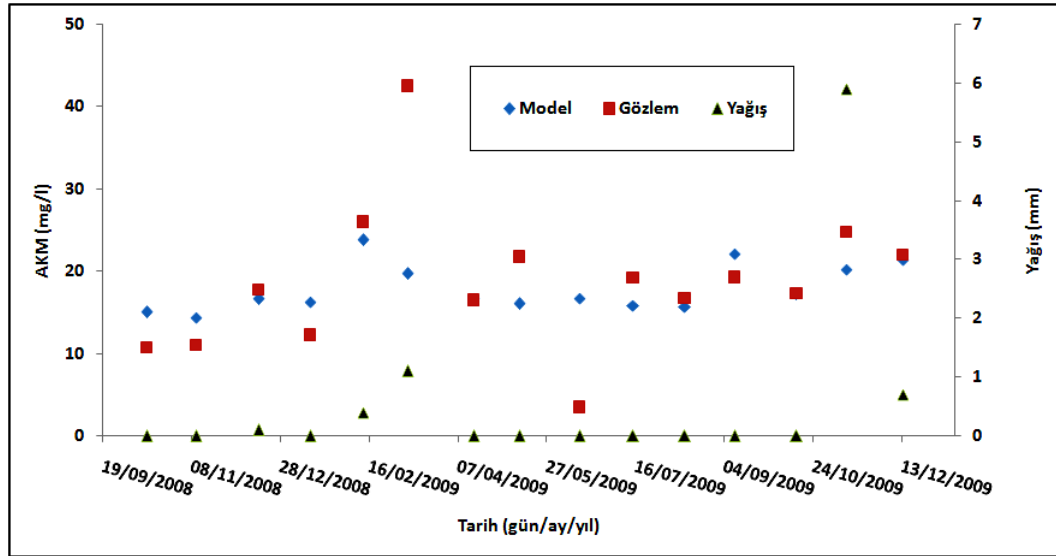
Şekil 8.11. Tüm ölçümlerde askıda katı madde bulanıklık arasındaki lineer ve üssel ilişki

Tüm veriler incelendiğinde AKM ile bulanıklık arasında lineer ve üssel olarak anlamlı bir ilişkinin olduğu, üssel ilişkinin lineer ilişkiye göre daha kuvvetli olduğu belirlenmiştir.

Havzalarda gerçekleştirilecek modelleme çalışmalarının en önemli ayağı hidrolojik modelleme aşamasıdır. Ardından genellikle sediment, sonrasında azot, fosfor gibi su kalitesi bileşenlerinin modellenmesi gerçekleştirilmektedir. Çoğunlukla akarsularda su kalitesi bileşenlerinin modellenmesi için yapılan çalışmalarda ilk adım, hidrolojik modelin iyi bir şekilde oluşturulmasıdır. Hidrolojik model sonuçlarının doğru tahmin edilememesi su kalitesi bileşenlerini de büyük ölçüde etkilemektedir.

Sedimentin modellenmesi için simülasyonlar günlük bazda gerçekleştirilmiştir. Sediment sonuçlarının değerlendirilmesinde kıstaslar; gözlem ve model sonuçlarının ortalamaları arasında farkın $\pm\%20$ 'yi geçmemesi, Nash-Sutcliffe veriminde (E_{NS}) 0,5'ten ve belirleme katsayısı (R^2) değerinin 0,6'dan büyük olması anlamlı ilişki için ölçüt olarak sayılmaktadır (Santhi ve ark., 2001).

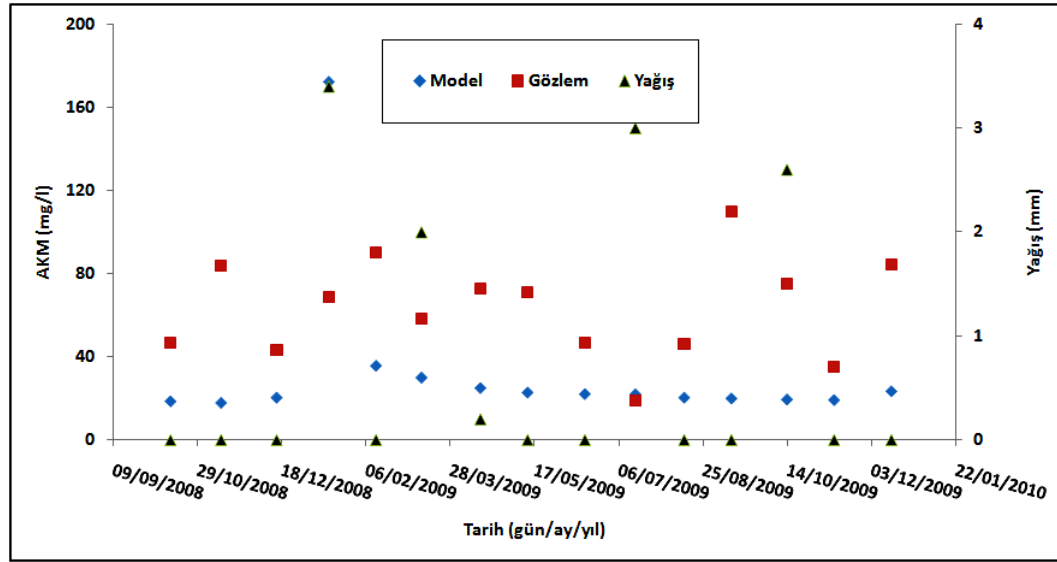
Fidanlık istasyonu askıda katı madde için model ve gözlem sonuçları incelendiğinde ortalamalar arasındaki farkın %5, E_{NS} değerinin 0,24, R^2 değerinin de 0,31 olduğu bulunmuştur. Şekil 8.12'de model ve gözlem sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 8.12. Fidanlık istasyonu model ve gözlem sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde genel olarak model ve gözlem sonuçları ortalamalarının iyi sonuç verdiği görülmektedir. Gözlem sonuçları anlık olarak alınan numunelerden elde edilirken, model sonuçları gün içerisindeki ortalama sediment derişimlerinden hesaplanmaktadır. Yağışın olmadığı günlerde gün içerisindeki ortalama sediment derişiminin, akarsu debisinde artış olmadığı sürece büyük oranda değişmeyeceği söylenebilir. Elde edilen sonuçlar da bunu ortaya koymaktadır. 10/03/2009 tarihinde 42,5 mg/l'lik AKM derişimi, meteorolojik koşulları incelendiğinde numunenin alınması esnasında havanın yağışlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu gözlem değerinin değerlendirme dışında bırakıldığı düşünülüğünde, ortalamalar arasındaki farkın %4, , E_{NS} değerinin 0,38, R^2 değerinin de 0,41 olduğu tespit edilmiştir.

Sediment açısından incelenen bir diğer istasyon Eskişehir ile Alpu arasında yer alan Karahöyük istasyonudur. Buradaki sonuçlar incelendiğinde model ve gözlem sonuçları arasındaki ortalama farkın %49, E_{NS} değerinin -4,13, R^2 değerinin de 0,01 olduğu tespit edilmiştir. Karahöyük istasyonuna ait model ve gözlem sonuçları Şekil 8.13 de gösterilmektedir.

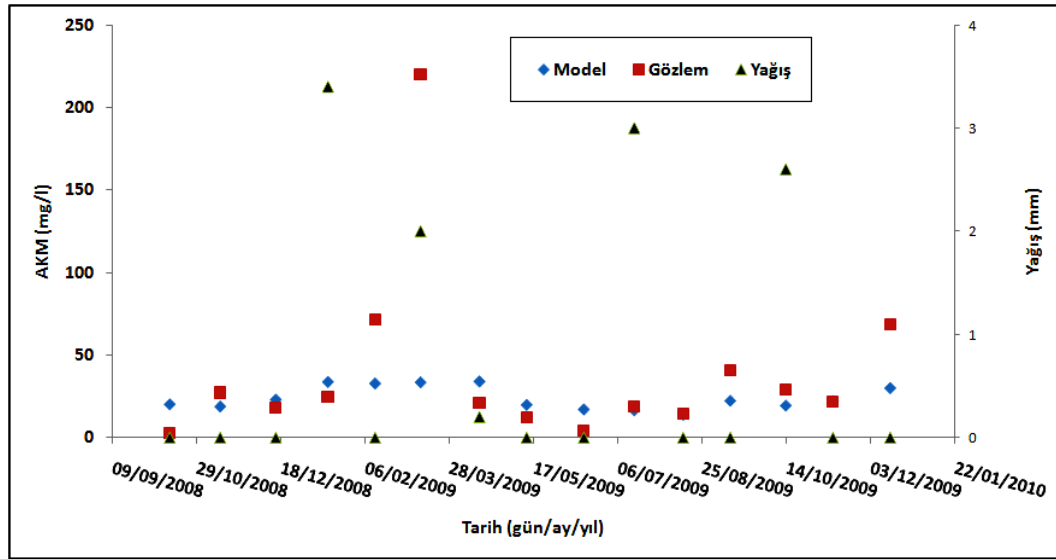


Şekil 8.13. Karahöyük istasyonu model ve gözlem sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde model ve gözlem sonuçları arasında anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmektedir. Bu istasyondaki askıda katı madde derişimleri Fidanlık istasyonunun yaklaşık 3 katıdır. Bunun başlıca nedeninin Eskişehir atıksu

arıtma tesisinin Porsuk Çayına deşarjı olduğu bilinmektedir. Hidrolojik modelin daha önce belirtilen sebepler nedeniyle bu bölgede iyi oluşturulamaması sonucu model yüksek akım değerleri vermiştir. Olması gerekenden daha yüksek debi noktasal kaynak olarak Porsuk çayını etkileyen atıksu arıtma tesisinin sediment üzerine olumsuz etkisini de bir anlamda tolere ederek düşük askıda katı madde sonuçları vermiştir.

Sediment açısından değerlendirilen son istasyon Beylikova ve Sazılar arasında bulunan, Porsuk Çayının Sakarya nehrine dökülmesine yaklaşık 65 km uzaklıkta bulunan Yunusemre istasyonudur. Yunusemre istasyonu askıda katı madde için, model ve gözlem sonuçları incelendiğinde ortalamalar arasındaki farkın %39, E_{NS} değerinin 0,04, R^2 değerinin de 0,30 olduğu bulunmuştur. Yunusemre istasyonuna ait model ve gözlem sonuçları Şekil 8.14'de gösterilmektedir.



Şekil 8.14. Yunusemre istasyonu model ve gözlem sonuçları

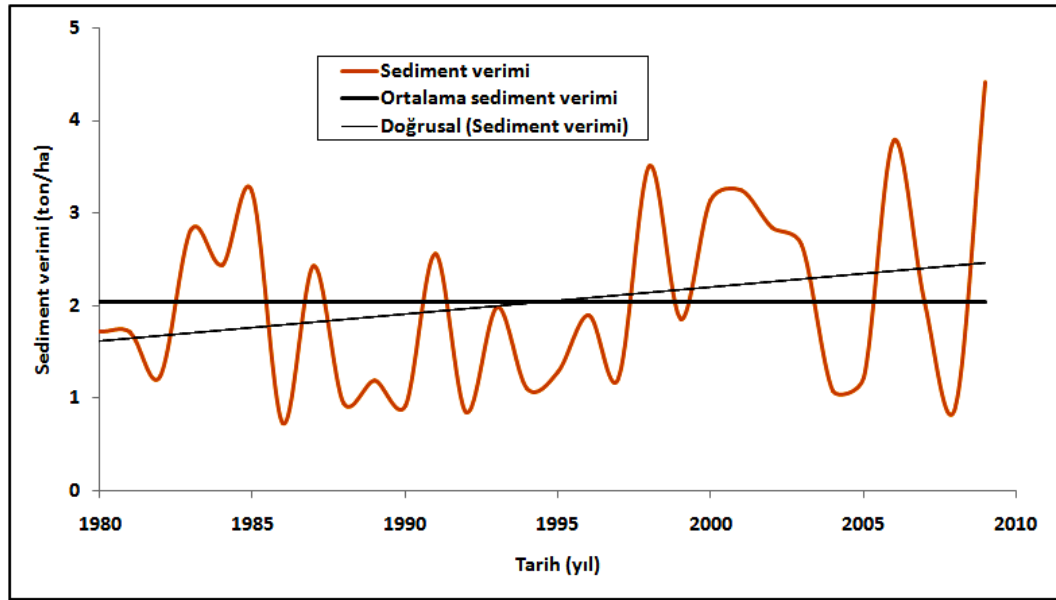
Gözlem sonuçları içerisinde yer alan 3/11/2009 tarihli askıda katı madde sonucu 220 mg/l'dir. Ortalamanın 39 mg/l olduğu düşünülüşünde, değerlendirmedeki bu değer büyük etki yaratmaktadır. Alınan numunelerin anlık olduğu düşünülüşünde bu tarz olağandışı durumlar mümkündür. 3/11/2009 tarihindeki askıda katı madde derişiminin değerlendirme dışı bırakılarak incelenmesi sonucu, ortalamalar arasındaki farkın %12, E_{NS} değerinin 0,23, R^2

değerinin de 0,32 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında, 220 mg/l değerinin, değerlendirmeyi ne kadar etkilediğini ortaya koymaktadır. Gözlem istasyonlardaki askıda katı madde sonuçlarının değerlendirmesine ilişkin özet bilgiler Çizelge 8.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 8.6. AKM değerlendirme sonuçları

İstasyon adı	Ortalamalar arasındaki fark (%)	E_{NS}	R^2
Fidanlık	4	0,38	0,41
Karahöyük	49	-4,19	0,01
Yunusemre	12	0,23	0,32

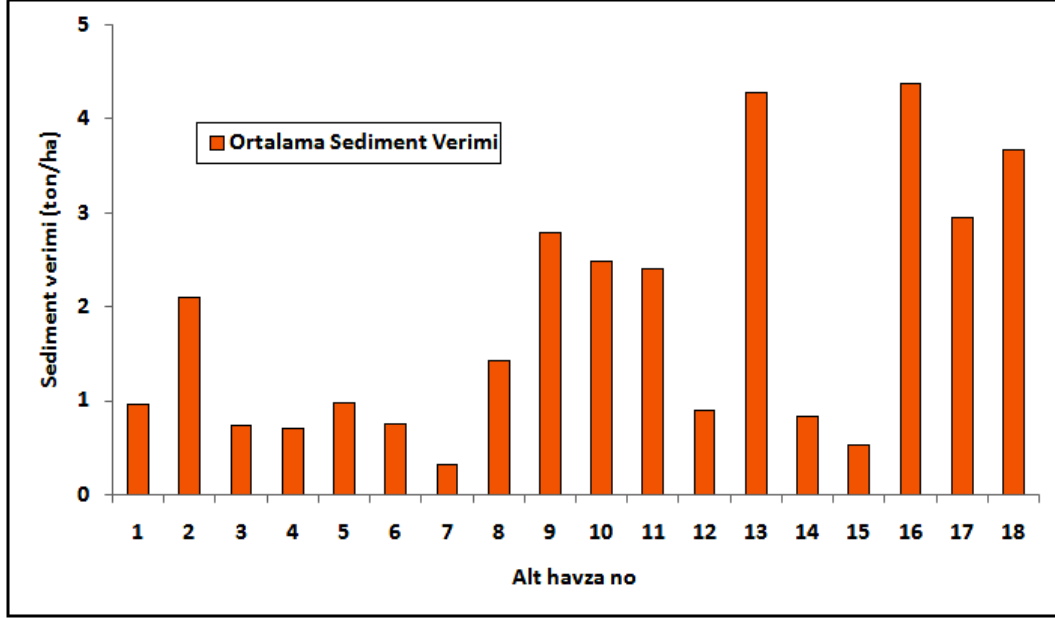
Sediment veriminin elde edilebilmesi için model 1980-2009 arasında çalıştırıldığında tüm alt havzalar bazında elde edilen yıllık ortalama sediment verimi Şekil 8.15'de, her bir alt havzaya ait ortalama sediment verimi Şekil 8.16'da gösterilmektedir.



Şekil 8.15. Sediment veriminin zamansal değişimi

Şekil 8.15'deki sediment veriminin yıllara göre değişimi incelendiğinde en büyük 5 değerden 4'nün 1998 sonrasında olduğu buna bağlı olarak da taşınan

sediment miktarında bir artış olduğu gözlenmektedir. Havza içinde yer alan akım gözlem istasyonlarına ait değerlerle birlikte model sonuçları da incelendiğinde 1998 sonrası akarsu debisindeki artışın, tıpkı 1985 öncesinde de olduğu taşınan sediment miktarının artmasına neden olduğu görülmektedir.



Şekil 8.16. Alt havzalara ait ortalama sediment verimi

9. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Sakarya nehrinin en büyük kolu olan Porsuk çayından temin edilen su, Kütahya ve Eskişehir'in kullanma suyu ihtiyacını karşıladığı gibi, hem alıcı ortam olarak, hem de tarım arazilerinin sulanması için kullanılması Porsuk çayının bölge için önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle gerçekleştirilen yüksek lisans tezi kapsamında Aşağı Porsuk Çayı havzasında SWAT modeli kullanılarak hidrolojik model ve sediment tahminlerine yönelik bir çalışma ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu yöndeki çalışmalar, Dünyanın farklı yerlerinde çeşitli modeller kullanılarak yaygın bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Çalışmaların sağlıklı yürüyebilmesi için havzaların özelliklerini yansıtan parametrelerin doğru bir şekilde belirlenebilmesi önem arz etmektedir. Maalesef ülkemizde, modellere uygun verilerin ölçülmemesi, bilgiye ulaşmanın zorluğu, bu tarz çalışmaların sınırlı sayıda kalmasının en büyük nedenlerindedir. Özellikle sediment çalışmalarında araziye ait toprak özelliklerinin belirlenebilmesi için etüt çalışmalarının yetersiz olması modellerin uygulanabilmesi açısından karşılaşılan en önemli zorluklardandır.

Gelişmiş ülkelerde modellerin ihtiyaç duyduğu havzalara ait bilgiler veritabanlarında toplanarak herkesin erişebileceği şekilde kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır. Ülkemizde henüz bu tarz bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Farklı kurumlarda, farklı verilerin dağınık bir yapıda olması, bilgiye ulaşmak isteyen açısından zaman alıcı ve yorucu bir süreci doğurmaktadır. Havza veritabanlarını oluşturulmasında rol oynayacak DMI, DSI, EİEI, KHGM gibi kamu kurumlarının verilerini tek bir bilgi sisteminde toplanması, atılması gereken adımların başında gelmektedir. Ayrıca üniversitelerde gerçekleştirilen çalışmalar sırasında düzenlenen verilerin bu veritabanlarına geri bildirimle paylaşımı sayesinde, bilgilerin tekrar tekrar derlenerek zaman ve emek kaybına yol açmasının da önüne geçileceği düşünülmektedir. Bu adımların atılması sonucu Türkiye'de bu konuda yapılacak çalışmaların sayısının artacağına, bu sayede havzalardaki toprak ve su kaynaklarının daha iyi bir şekilde yönetilmesi hususunda alınacak önlemlerin ortaya konacağına ve hissedilen çevresel baskılarında azalacağına inanılmaktadır.

Gerçekleştirilen bu çalışmaya ilave olarak, havza üzerinde uygun görülen yerlerde akım gözlem ve su kalitesi gözlem istasyonları kurularak, arazi

kullanımındaki değişim senaryolarının hidroloji ve sediment üzerindeki etkilerinin incelenmesi, yeni yapılan Eskişehir atıksu arıtma tesisinin devreye alınması ile birlikte bu tesisin Porsuk Çayının su kalitesi üzerine nasıl bir etki yapacağını modeller yardımıyla belirlenmesi, farklı iklim senaryolarından üretilen meteorolojik veriler yardımıyla, iklim değişikliğinin havza üzerindeki etkilerinin ortaya konması gibi konuların araştırılmasının faydalı olacağı düşünölmektedir.

Bu tez çalışmasının gelecekte Aşağı Porsuk Çayı havzası üzerinde gerçekleştirilecek çalışmalara yol gösterici olacağı umulmaktadır.

KAYNAKLAR

- Anonim-1 (2007), *Eskişehir il çevre durum raporu*, Eskişehir İl Çevre ve Orman Müdürlüğü, Eskişehir.
- Anonim-2 (2007), *Toprak ve arazi sınıflaması standartları teknik talimatı*, Tarımsal Üretim ve Geliştirme Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Abbaspour, K.C. (2008), *SWAT-CUP2:SWAT Calibration and Uncertainty Programs-A User Manual*, Department of System Analysis, Integrated Assessment and Modeling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland.
- Achite, M. ve Ouillon, S. (2007), “Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995)” *Journal of Hydrology*, **343**, 187-202.
- Albek, E. (2002), “Statistical analysis of water quality trends: an application to the porsuk stream”, *Anadolu University Journal of Science and Technology*, Eskişehir, **2**, 281-292.
- Albek, E. (2003), “Estimation of point and diffuse contaminant loads to streams by non-parametric regression analysis of monitoring data”, *Water, Air and Soil Pollution*, Netherlands, **147**, 229-243.
- Albek, E., Albek, M., Göncü, S. ve Gence, S. (2004), “Havza Süreçleri ile İlişkili Olarak Seydi Suyu’nda Su Kalitesinin İzlenmesi” *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **5**, 73-81.
- Albek, E. ve Göncü, S. (2005), “Türkiye Akarsularında Askıda Katı Madde Değişimlerinin Yıllar Boyu İncelenmesi” *Anadolu University Journal of Science and Technology*, Eskişehir, **6**, 183-190.
- Albek, M. (2001), *Seydi suyu havzasında yaygın kaynak kirliliğinin sediment bazında modellenmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Altınbaş, Ü. (2000), *Toprak Genetiği ve Sınıflaması*, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, İzmir.

- Atalay, İ. (2006), *Toprak Oluşumu, Sınıflandırılması ve Coğrafyası*, T.C. Çevre Orman Bakanlığı Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Genel Müdürlüğü Yayını Ankara.
- Aydemir, A. (1993), *Toprak Erozyonu ve Toprak Reformu*, Ankara.
- Barfield, B.J., Payne, F.A. ve Walker, J.N. (1973), “Surface water storage capacity of selected crop leaves under irrigation sprays” *Agricultural Meteorology*, **12**, 105-111.
- Barut, Ö. (2010), *Artvin Şavşat yöresinde su erozyonu çeşitleri-toprak tekstürü ilişkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayazıt, M. ve Avcı, İ. (2010), *Akarsularda Akım ve Sediment Taşınımı*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Baylar, A., Emiroğlu, M.E., Arslan, A. (1999), “Geriye Yayılma Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Yanal Su Alma Yapısına Yönelecek Olan Sürüntü Maddesi Oranının Bulunması”, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt. 1, Sayı 2, 1–11.
- Borah, D.K., Arnold, J.G., Bara, M., Krug, E.C. ve Liang, X.Z. (2007) “Storm Event and Continuous Hydrologic Modeling for Comprehensive and Efficient Watershed Simulations” *Journal of Hydrologic Engineering*, **12**, 605-616.
- Bouraoui, F., Benabdallah, S., Jrad, A. ve Bidoglio, G. (2005), “Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia)” *Physics and Chemistry of the Earth*, **30**, 497-507.
- Chou, W.C., (2009), “Modeling watershed scale soil loss prediction and sediment yield estimation” *Water Resources Management*, **24**, 2075-2090.
- Çepel, N. (1997), *Toprak Kirliliği Erozyon ve Çevreye Verdiği Zararlar*, Türkiye Erozyonla Mücadele, Ağaçlandırma ve Doğal Varlıkları Koruma Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Demirel, B.C., Venancio, A. ve Kahya, E. (2009) “Flow forecast by SWAT model and ANN in Pracana basin, Portugal” *Advances in Engineering Software*, **40**, 467-473.

- Dinç, U., Şenol, S., Kapur, S., Cangir, C. ve Atalay, İ. (2001), *Türkiye Toprakları*, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Adana.
- Doğan, E. (2008), *Akarsularda taşınan toplam katı madde miktarının yapay zeka metotları ile tahmin edilmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Dunkerley, D. (2000), “Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies” *Hydrological Processes*, **14**, 669-678.
- Erinç, S. (1957), *Tatbiki Klimatoloji ve Türkiye'nin İklim Şartları*, İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrojeoloji Enstitüsü Yayınları, İstanbul.
- Erkek, C. ve Ağırlioğlu, N. (1993), *Su Kaynakları Mühendisliği*, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- Estringana, P.G., Blázquez, N.A. ve Alegre, J. (2010), “Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs” *Journal of Hydrology*, **389**, 363-372.
- Ferguson, R.I., (1987), “Accuracy and precision of methods for estimating river loads” *Earth surface Processes and Landforms*, **12**, 95-104.
- Geza, M. ve McCray, J.E. (2008), “Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions” *Journal of Environmental Management*, **88**, 393-406.
- Ghaffari, G., Keesstra, S., Ghodousi, J., Ahmadi, H. (2010), “SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran” *Hydrological Processes*, **24**, 892-903.
- Green, C.H. ve Griensven A.V. (2008), “Autocalibration in hydrological modeling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds” *Environmental Modeling & Software*, **23**, 422-434.
- Kalkan, Y. (2009), “Barajlarımızdaki hidrografik ölçmeler ve sediment hareketleri”, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara
- Karaş, E. (2005), *Küçükermalı ve Güvenç havzalarının su ve sediment verimlerine göre sürdürülebilir yönetimi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Kayaalp, N. (2003), *Dicle havzasındaki akarsularda sediment taşınımının matematiksel modellerle belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Kinnell, P.I.A., (2000), “AGNPS-UM: applying the USLE-M within the agricultural non point source pollution model” *Environmental Modelling & Software*, **15**, 331-341
- Kişi, Ö., Karahan, M.E., Şen Z. (2003), “Nehirlerde askı maddesi miktarının bulanık mantık ile modellenmesi”, İTÜ Dergisi , İstanbul, **3**, 43-54.
- Klaassen, W., Bosveld, F. ve Water, E. (1998), “Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception” *Journal of Hydrology*, **212-213**, 36-50.
- Kliment, Z., Kadlec, J. ve Langhammer, J. (2008), “Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models” *CATENA*, **73**, 286-299.
- Klingaman, N.P., Levia, D.F. ve Frost, E.E. (2007), “A Comparison of Three Canopy Interception Models for a Leafless Mixed Deciduous Forest Stand in the Eastern United States” *Journal Hydrometeor*, **8**, 825–836.
- Koyuncu, H., Yörükoğulları, E., Yılmaz, G., Bakış, R., Banar, M., Kürkcüoğlu, M. ve Özek, T., (2007), Porsuk Havzası ve Porsuk Nehrinde zemin, sediment ve su kalitesinin belirlenmesi, 104Y180 nolu Tübitak Projesi, Eskişehir.
- Köy Hizmetleri Gene Müdürlüğü (KHGM) Toprak ve Su Kaynakları Ulusal Bilgi Merkezi (2009), 1/25000 ölçekli sayısal haritalar, Ankara.
- Krasa, J., Dostal, T., Rompaey A.V., Vaska, J. ve Vrana, K. (2005), “Reservoirs' siltation measurments and sediment transport assessment in the Czech Republic, the Vrchlice catchment study” *CATENA*, **64**, 348-362.
- Leibendgut, H. (1975), *Wir und die Umwelt. Wirkungen des Waldes auf die Umwelt des Menschen*. E.Rentsch Verlag, Zürich und Stuttgart.
- Lenzi, M.A. ve Marchi, L. (2000), “Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy)” *CATENA*, **39**, 267-282.
- Li, J. ve Rao, M. (2000), “Sprinkler water distributions as affected by winter wheat canopy” *Irrigation Science*, **20**, 29-35.

- Llorens, P. ve Gallart, F. (2000), “A simplified method for forest water storage capacity measurement” *Journal of Hydrology*, **240**, 131-144.
- McKay, M.D., Beckman, R.C. ve Conover, W.J. (1979), “A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code” *Technometrics* **21**, **2**, 239-245.
- Mater, M. (1995), *Toprak Oluşumu, Erozyon ve Koruması*, Çantay Kitabevi, İstanbul.
- Mulungu, D.M.M. ve Mkhandi, M.S. (2005), “*Modeling land-water interactions in Simiyu river catchment using the soil water assessment tool (Swat)*” Six Water Resources Fund of Southern Africa (WARFSA)/WaterNet Symposium, Swaziland.
- Mulungu, D.M.M. ve Munishi, S.E. (2005), “Simiyu river catchment parameterization using SWAT model” *Physics and Chemistry of the Earth*, **32**, 1032-1039.
- Nash, J.E. ve Sutcliffe, J.V. (1970), “River flow forecasting through conceptual models Part I. A Discussion of Principles” *Journal of Hydrology*, **10**, 282-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. ve Williams, J.R. (2005), *Soil And Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas, A.B.D.
- Öztürk, F., Apaydın, H. ve Walling, D.E. (2001), “Suspended Sediment Loads Through Flood Events for Streams of Sakarya River Basin” *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, **25**, 643-650.
- Parlak, M. (2005), *Farklı debi ve eğim koşullarının parmak erozyonu ve sediment taşınımı üzerine etkileri*, Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Persson, G. (1997), “Comparasion of simulated water balance for willow, spruce, grass ley and barley” *Nordic Hydrology*, **28**, 85-98.
- Price, A.G. ve Carlyle-Moses, D.E. (2003), “Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada” *Agricultural and Forest Meteorology*, **119**, 69-85.

- Romero, E.N., Regüés, D. ve Latron, J. (2008), “Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands” *CATENA*, **74**, 127-136.
- Rompaey A.V., Krasa, J. ve Dostal, T. (2007), “Modelling the impact of land cover changes in the Czech Republic on sediment delivery” *Land Use Policy*, **24**, 576-583.
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S.F., Heidarpour, M., Jalalian, A., Abbaspour, K.C. (2008), “Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basin in central Iran” *Hydrological Sciences Journal*, **53**, 977.
- Rossi, C.G., Srinivasan, R., Jirayoot, K., Duc, T.L., Souvannabouth, P., Binh, N. ve Gassman, P.W. (2009), “Hydrologic evaluation of the lower Mekong River basin with the Soil and Water Assessment Tool model” *International Agricultural Engineering Journal*, **18**, 1-13.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dudas, W.A., Srinivasan, R. ve Hauck, L.M. (2001), “Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources” *Journal of the American Water Resources Association*, **37**, 1169-1188.
- Shen, Z.Y., Gong, Y.W., Lia, Y.H., Hong, Q., Xua, L., ve Liu, R.M., (2009), “A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area” *Agricultural Water Management*, **96**, 1435-1442.
- Sudheer, K.P., Lakshmi, G. ve Chaubey, I. (2010), “Application of a pseudo simulator to evaluate the sensitivity of parameters in complex watershed models” *Environmental Modeling & Software*, **26**, 135-143.
- Süzal, A. ve Bizsel, N. (2008), “Gediz nehri su kalitesi: Askıda katı madde taşınımı”, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Eskişehir, **1**, 57-63.
- Tanju, Ö. (1996), *Toprak Genesisi ve Sınıflandırma*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara.

- Taş, H. (2005), *Yağış ve havza karakteristiklerine bağlı olarak Kurukavak havzasının toprak erozyonu tahmin modeli*, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ullrich, A. ve Volk M. (2009), “Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity” *Agricultural Water Management*, **96**, 1207-1217.
- Vogt J.V., Soille P., Jager A., Rimavičiūtė E., Mehl W., Haastrup P., Paracchini M.L., Dusart J., Bodis K., Foisneau S., Bamps C., (2007), “Developing a pan-European Data Base of Drainage Networks and Catchment Boundaries from a 100 Metre DEM”, 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Aalborg University, Denmark.
- Werner, J., Woodward, D.E., Nielsen, R., Dobos, R., Hjelmfelt, A. ve Hoefl, C.C. (2007), *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook Chapter 7: Hydrologic Soil Groups*, United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, Michigan.
- Wischmeier, W.H. ve Smith, D.D. (1978), *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook:537.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B. ve Cross, B.V. (1971), “A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites” *Journal of Soil and Water Conservation*, **26**, 189-193
- Williams, J.R. (1995), The EPIC model In: V. P. Singh, Computer Models of Watershed Hydrology, Chapter 25: Sayfa 909-1000, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Xu, H., Taylor, R.G., Kingston, D.G., Jiang, T., Thompson, J.R. ve Todd, M.C. (2010), “Hydrological modeling of River Xiangxi using SWAT2005: A comparison of model parameterizations using station and gridded meteorological observations” *Quaternary International*, **226**, 54-59.