T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

HIZLI KENTLEŞMENİN HAVZA HİDROLOJİSİNE VE SEDİMENT YÜKLERİNE ETKİSİNİN ARAZİ DEĞİŞİM MODELİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI İLE İNCELENMESİ

İsmail Bilal PEKER

DANIŞMAN
Doç. Dr. Sezar GÜLBAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Doktora Programı

Eylül, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

İsmail Bilal PEKER tarafından, **Doç. Dr. Sezar GÜLBAZ** danışmanlığında hazırlanan **"HIZLI KENTLEŞMENİN HAVZA HİDROLOJİSİNE VE SEDİMENT YÜKLERİNE ETKİSİNİN ARAZİ DEĞİŞİM MODELİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI İLE İNCELENMESİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **03/09/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Sezar GÜLBAZ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Emre ALP Orta Doğu Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Mehmet Cüneyd DEMİREL İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Başak GÜVEN Boğaziçi Üniversitesi Çevre Bilimleri Enstitüsü		☒ Kabul ☐ Ret

BÜTÇE DESTEKLERİ

HIZLI KENTLEŞMENİN HAVZA HİDROLOJİSİNE VE SEDİMENT YÜKLERİNE ETKİSİNİN ARAZİ DEĞİŞİM MODELİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI İLE İNCELENMESİ

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 124Y229 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

1. GİRİŞ 1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE 5
2.1. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KENTLEŞME 5
2.2. HAVZA HİDROLOJİSİ VE SEDİMENT YÜKLERİ 8
2.3. MODELLEME YAKLAŞIMLARI 10
2.3.1. AKAÖ Değişimi Modelleme Yaklaşımları 10
2.3.2. Havza Modelleme Yaklaşımları 14
2.4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 16
2.4.1. Gelecekteki AKAÖ Değişiminin Tahmini ile İlgili Örnek Çalışmalar 16
2.4.2. AKAÖ ve İklim Değişiminin Su Havzalarına Etkileri ile İlgili Örnek Çalışmalar 20
2.4.3. Alibeyköy Havzasına İlişkin Çalışmalar 23
2.4.4. Tezin Literatüre Katkıları 28
3. MATERYAL VE YÖNTEM 29
3.1. ÇALIŞMA ALANI 29
3.2. VERİ 32
3.2.1. Mekansal Veriler 32
3.2.1.1. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) Verisi 33
3.2.1.2. Toprak Tipi Verisi 34
3.2.1.3. Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü (AKAÖ) Verileri 35
3.2.2. Meteorolojik Veriler 42
3.2.2.1. Geçmiş tarihli meteorolojik veriler 42
3.2.2.2. İklim değişikliği verileri 44
3.2.3. Akış ve Sediment Verileri 49
3.3. SAHA GÖZLEMLERİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI 52
3.3.1. Su Numunesi Alımı 52
3.3.2. Laboratuvar Analizleri 55
3.3.3. Sediment Yükünün Hesabı 57
3.4. ARAZİ DEĞİŞİM MODELLEMESİ (TerrSet LCM) 59

3.4.1. TerrSet LCM Modelleme Teorisi 59
3.4.2. Alibeyköy Havzası için TerrSet LCM ile Modelleme Aşamaları 60
3.5. HAVZA MODELLEMESİ (SWAT) 66
3.5.1. SWAT Modelleme Teorisi 66
3.5.2. Alibeyköy Havzası için SWAT ile Modelleme Aşamaları 70
4. BULGULAR 74
4.1. HAVALİMANI İNŞAATI İLE AKAÖ'DEKİ ANİ DEĞİŞİMİN HAVZA HİDROLOJİSİ VE SEDİMENT YÜKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ 74
4.1.1. SWAT-1 Modelinin Kalibrasyonu ve Validasyonu 74
4.1.2. Havalimanı Öncesi ve Sonrasındaki AKAÖ Değişimine Dair Bulgular 78
4.1.3. Havza Hidrolojisindeki Değişime Dair Bulgular 81
4.1.4. Sediment Yüklerindeki Değişime Dair Bulgular 83
4.1.5. Bulguların Yorumlanması 84
4.2. TAHMİN EDİLEN GELECEK YILLARA AİT AKAÖ DEĞİŞİKLİKLERİNİN SEDİMENT YÜKLERİ VE BARAJ FAYDALI HACMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ 86
4.2.1. Gelecek Yıllarda AKAÖ Değişimi Tahminine Dair Bulgular 86
4.2.2. Havza Hidrolojisindeki Değişime Dair Bulgular 88
4.2.3. AKAÖ Değişikliğinin Baraj Ölü Hacmine Etkisi 91
4.2.4. Bulguların Yorumlanması 92
4.3. AKAÖ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN HAVZA HİDROLOJİSİ VE SEDİMENT YÜKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ 95
4.3.1. SWAT-2 Modelinin Kalibrasyonu ve Validasyonu 95
4.3.2. Çoklu Model Senaryoları 99
4.3.3. Benzer İklim Koşulları Altında AKAÖ Değişikliğinin Etkileri 102
4.3.4. Benzer AKAÖ Koşulları Altında İklim Değişikliğinin Etkileri 104
4.3.5. AKAÖ ve İklim Değişikliğinin Kombine Etkileri 109
4.3.6. Benzer ve Değişen AKAÖ Senaryolarının Karşılaştırılması 114
4.3.7. Bulguların Yorumlanması 117
5. TARTIŞMA 123
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 127

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1: Alibeyköy Havzası'nın coğrafi konumu, havza sınırları ve dere ağı; İstanbul Havalimanı, bağlantı yolları ve Alibey Barajı'nın havza içerisindeki konumları. 29

Şekil 3.2: Alibeyköy Havzası'na ait (a) yükseklik haritası ile hipsometrik eğri ve (b) eğim haritası. 34

Şekil 3.3: Alibeyköy Havzası'na ait FAO-DSMW toprak tipi haritası. 35

Şekil 3.4: Landsat uydu ürünlerinden 1990, 2010 ve 2020 yıllarına ait AKAÖ verilerinin hazırlanma sürecini gösteren akış şeması. 36

Şekil 3.5: Alibeyköy Havzası için (a) 1990 yılına ait Landsat-5, (b) 2010 yılına ait Landsat-5 ve (c) 2020 yılına ait Landsat-8 ham uydu görüntülerinden kontrollü sınıflandırma yöntemi ile elde edilen (d) 1990, (e) 2010 ve (f) 2020 yıllarını temsil eden AKAÖ verileri. 38

Şekil 3.6: Alibeyköy Havzası'nda (a) 2019, (b) 2021 ve (c) 2023 durumunu gösteren Esri AKAÖ verileri. 41

Şekil 3.7: Çalışmada kullanılan meteoroloji gözlem istasyonları ve akım gözlem istasyonunun konumları. 42

Şekil 3.8: Sarıyer, Eyüp ve Arnavutköy istasyonlarına ait (a) yıllık toplam yağışların ve (b) en yüksek /en düşük sıcaklıkların yıllık ortalamalarının karşılaştırılması. 44

Şekil 3.9: İklim değişikliği verilerine ait (a) Türkiye sınırlarındaki gridlerin konumları ve (b) Alibeyköy Havzası için kullanılan 418263 kodlu gridin konumu. 46

Şekil 3.10: 1980–2005 periyodunda gözlem ve iklim değişikliği verileri için her ayda yıllık toplam yağışların ortalaması, en yüksek ve en düşük sıcaklık değerlerinin ortalaması. 47

Şekil 3.11: İklim değişikliği verilerinin 1980–2005 referans döneminde her ay için ortalama (a) yağış, (b) en yüksek sıcaklık ve (c) en düşük sıcaklık değerlerindeki değişimler. 48

Şekil 3.12: Havza modelleme süreçlerinde kullanılan (a) günlük ve (b) aylık ortalama debi verileri. 50

Şekil 3.13: Alibeyköy Havzası için 2013–2022 yıllarına ait veriler kullanılarak elde edilen sediment anahtar eğrisi. 51

Şekil 3.14. DSİ ekipleri tarafından yapılan (a) dere kestinin temizlenmesi ve kesit geometrisi hesabı, (b) muline ile debi ölçümü ve (c) süspanse sediment ölçümü esnasındaki görüntüler. 53

Şekil 3.15. Saha gözlemlerinde (a) su numunesi alımı ve (b) muline ile debi ölçümü. 54

Şekil 3.16. Eşel yüksekliğinin (a) 21.11.2024 tarihli en düşük seviyesi (24 cm) ve (b) 14.01.2025 tarihli en yüksek seviyesi (125 cm). 54

Şekil 3.17. Süzme düzeneği aparatları. 55

Şekil 3.18. Süzme işlemi ile AKM konsantrasyonu hesabının şematik gösterimi. 56

Şekil 3.19. Süzme işleminin aşamaları: (a) filtre kağıdının yerleştirilmesi, (b) düzeneğin sabitlenmesi, (c) su numunesinin düzeneğe boşaltılması, (d) vakum pompası ile süzme işlemi, (e) filtre kağıdının alınması. 57

Şekil 3.20. Süzme işleminden sonra (a) filtre kağıdının etüve yerleştirilip kurutulması ve (b) kurutulan filtre kağıdının hassas terazide tartılması. 57

Şekil 3.21: Alibeyköy Havzası'nın LCM ile modellenmesinde kullanılan akış şeması. 61

Şekil 3.22: Alibeyköy Havzası LCM modeli için itici faktörlerin elde edilmesinde kullanılan (a) yerleşim alanları, (b) mahalle merkezleri, (c) otoyollar, (d) havalimanı, (e) baraj gölü, (f) dere ağı, (g) yükseklik haritaları. 62

Şekil 3.23: Alibeyköy Havzası LCM modeli için üretilen itici faktörler: (a) yerleşim alanlarına uzaklık, (b) mahalle merkezlerine uzaklık, (c) otoyollara uzaklık, (d) havalimanına uzaklık, (e) baraj gölüne uzaklık, (f) dere ağına uzaklık ve (g) yükseklik. 62

Şekil 3.24: 2023 yılına ait (a) doğrulamada kullanılan Esri kaynaklı gözlem AKAÖ verisi ve (b) LCM ile tahmin edilen AKAÖ verisi. 66

Şekil 3.25: SWAT'ta hidrolojik döngü sürecini açıklayan şematik gösterim. 68

Şekil 3.26: Alibeyköy Havzası SWAT modeli çatısına ait (a) dere ağı çıkarımı, (b) 12 alt havza ve (c) 311 HRU'nun gösterimi. 72

Şekil 3.27: Tez çalışmasında kullanılan yöntem ve bulguların tezin kısımları ile ilişkili özeti. 73

Şekil 4.1: SWAT-1 modeli kalibrasyon ve validasyon periyodunda modellenen ve gözlenen (a) akış ve (b) sediment yükü değerleri. 76

Şekil 4.2: SWAT-1 modeli için sediment yüklerinin güncel tarihli saha ölçümleri ile ek validasyonu. 77

Şekil 4.3: Alibeyköy Havzası alt havzalarının (a) 2010 ve (b) 2020 yılları AKAÖ durumu ile birlikte gösterimi. 79

Şekil 4.4: Havza ölçeğinde beş AKAÖ sınıfının 2010 ve 2020 yılları arasındaki dönüşümü. 80

Şekil 4.5: Alibeyköy Havzası'nda (a) 2010 ve (b) 2020 yıllarındaki AKAÖ durumunun alt havza ölçeğinde dağılımı. 81

Şekil 4.6: 2010 ve 2020 yılları için (a-b) su verimi, (c-d) yüzey akışı, (d-e) perkolasyon ve (g-h) ET değerlerinin alt havza ölçeğinde değişimleri. 83

Şekil 4.7. LCM ile tahmin edilen (a) 2033, (b) 2043 ve (c) 2053 yıllarına ait gelecek AKAÖ projeksiyonları. 87

Şekil 4.8. 2033, 2043 ve 2053 yıllarında değişimi ön görülen AKAÖ sınıfı yüzdeleri. 88

Şekil 4.9. 2023, 2033, 2043 ve 2053 yıllarına ait AKAÖ'ler için yıllık toplam (a–d) su verimi, (e–h) yüzey akışı, (i–l) perkolasyon ve (m–p) ET değerlerinin alt havza ölçeğinde gösterimi. 90

Şekil 4.10. SWAT-2 modeli kalibrasyon ve validasyon periyodunda modellenen ve gözlenen (a) akış ve (b) sediment yükü değerleri. 96

Şekil 4.11: SWAT-2 modeli için sediment yüklerinin güncel tarihli saha ölçümleri ile ek validasyonu. 98

Şekil 4.12. Benzer iklim koşulları altında L1990-REF, L2050-REF, L2070-REF ve L2090-REF modellerine ait (a) yıllık ortalama akışlar ve (b) yıllık toplam sediment yükleri. 103

Şekil 4.13. Benzer iklim koşulları altında AKAÖ değişikliğinin su dengesi bileşenleri ve havza sediment verimi üzerindeki etkisi. 103

Şekil 4.14. Benzer AKAÖ koşulları altında sırasıyla (a) RCP 4.5 ve (b) RCP 8.5 iklim senaryolarında yıllık ortalama akışlar. 105

Şekil 4.15. Benzer AKAÖ koşulları altında sırasıyla (a) RCP 4.5 ve (b) RCP 8.5 iklim senaryolarında yıllık toplam sediment yükleri. 105

Şekil 4.16. Benzer AKAÖ koşulları altında sırasıyla GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC, NoerESM1-M için üç periyottaki (a-e) RCP 4.5 ve (f-j) RCP 8.5 iklim senaryosunda su dengesi bileşenleri ve havzanın sediment verimleri. 106

Şekil 4.17. Değişen AKAÖ koşulları altında sırasıyla (a) RCP 4.5 ve (b) RCP 8.5 iklim senaryolarında yıllık ortalama akışlar. 110

Şekil 4.18. Değişen AKAÖ koşulları altında sırasıyla (a) RCP 4.5 ve (b) RCP 8.5 iklim senaryolarında yıllık toplam sediment yükleri. 110

Şekil 4.19. Değişen AKAÖ koşulları altında sırasıyla GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC, NoerESM1-M için üç periyottaki (a-e) RCP 4.5 ve (f-j) RCP 8.5 iklim senaryosunda su dengesi bileşenleri ve havzanın sediment verimleri. 111

Şekil 4.20. Benzer ve değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin akışlar üzerindeki etkisinin karşılaştırılması. 115

Şekil 4.21. Benzer ve değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin sediment yükleri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması. 115

Şekil 4.22. İklim değişikliğinin benzer AKAÖ koşulları altında (a) akışlarda ve (b) sediment yüklerindeki; değişen AKAÖ koşulları altında (c) akışlarda ve (d) sediment yüklerindeki etkisi. 117

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: En yaygın kullanılan arazi kullanımı/arazi örtüsü (AKAÖ) değişimi modelleme yazılımlarının açıklamaları ve referansları. 13

Tablo 2.2: Hidrolojik modellerin sınıflandırılması ve yaygın kullanılan örnekleri. 15

Tablo 3.1: Kullanılan mekansal verilere ait özellikler. 33

Tablo 3.2: 1990 yılı verisine ait AKAÖ sınıfları için hata matrisi. 39

Tablo 3.3: 2010 yılı verisine ait AKAÖ sınıfları için hata matrisi. 39

Tablo 3.4: 2020 yılı verisine ait AKAÖ sınıfları için hata matrisi. 40

Tablo 3.5: AKAÖ verilerinin doğruluk değerlendirilmesinde kullanılan metriklere ait denklemler. 40

Tablo 3.6: Landsat uydu ürünlerinden üretilen AKAÖ verilerinin doğruluk değerlendirmesi (Kappa, OA, AD, QD, OE). 40

Tablo 3.7: MGM istasyonlarına ait uzun dönem yıllık toplam yağışların ortalaması ve en yüksek/en düşük sıcaklıkların ortalamaları. 43

Tablo 3.8: İklim değişikliği verilerindeki küresel iklim modellerine ait bilgiler. 46

Tablo 3.9: Uzun yıllar için toplam yağış ve en yüksek/en düşük sıcaklıkların ortalama değerlerinin karşılaştırılması, PBIAS ve R^2 değerleri. 49

Tablo 3.10: Numune tarihlerine ait eşel yüksekliği, debi, AKM konsantrasyonu ve sediment yükü değerleri. 58

Tablo 4.1: SWAT-1 modelinde kullanılan parametrelerin açıklamaları ve kalibre edilen değerleri. 75

Tablo 4.2: SWAT-1 modeline ait akış ve sediment yükleri için başarı metrikleri. 78

Tablo 4.3: 2010 ve 2020 AKAÖ durumlarını temsil eden model sonuçlarına göre su dengesi bileşenlerinin karşılaştırılması. 82

Tablo 4.4: 2010 ve 2020 yıllarında sediment değerlerindeki değişimler. 84

Tablo 4.5. 2023, 2033, 2043 ve 2053 yıllarında AKAÖ sınıflarındaki alansal değişimler. 88

Tablo 4.6. Su dengesi bileşenlerinin 2033, 2043 ve 2053 yılları için değerleri ve 2023 yılına göre değişim yüzdeleri.....89

Tablo 4.7. 2023, 2033, 2043 ve 2053 yılları AKAÖ durumu için sediment birikimi ve ölü hacimdeki değişimler.....92

Tablo 4.8. SWAT-2 modelinde kullanılan parametrelerin açıklamaları ve kalibre edilen değerleri.....97

Tablo 4.9: SWAT-2 modeline ait akış ve sediment yükleri için başarı metrikleri.....99

Tablo 4.10. AKAÖ ve iklim değişikliği etkilerinin incelenmesi amacıyla oluşturulan çoklu senaryolar.....100

Tablo 4.11. Senaryo kodlarının açıklamaları.....101

Tablo 4.12. Benzer iklim koşulları altında AKAÖ değişikliği ile yıllık ortalama akışlar, yıllık toplam sediment yüklerinin ortalaması ve değişim oranları.....104

Tablo 4.13. Benzer AKAÖ koşulları altında her GCM için üç farklı periyottaki yıllık ortalama akışlar ve değişim oranları.....107

Tablo 4.14. Benzer AKAÖ koşulları altında her GCM için üç farklı periyottaki yıllık toplam sediment yükleri ve değişim oranları.....108

Tablo 4.15. Değişen AKAÖ koşulları altında her GCM için üç farklı periyottaki yıllık ortalama akışlar ve değişim oranları.....112

Tablo 4.16. Değişen AKAÖ koşulları altında her GCM için üç farklı periyottaki yıllık toplam sediment yükleri ve değişim oranları.....113

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$SED_{yük}$	Sediment yükü
SED_{kons}	Sediment konsantrasyonu
Q:	Akış
SW_t:	Nihai toprak su içeriği
SW_0	Başlangıçtaki toprak su içeriği
R_{day}	Yağış miktarını
Q_{surf}	Yüzey akışı miktarı
E_α	Evapotranspirasyon miktarı
w_{seep}	Toprak profilinden vadoz bölgesine giren su miktarı
Q_{gw}	Geri dönüş akışı
sed	Sediment verimi
q_{peak}	Pik akış oranı
$area_{HRU}$	HRU'nun alanı
K_{USLE}	Toprağın aşınabilirlik faktörü
P_{USLE}	Destek uygulama faktörü
C_{USLE}	Örtü ve yönetim faktörü
LS_{USLE}	Topografik faktör
CFRG	Kaba parça faktörü
I_a	Başlangıç kayıpları
λ	Buharlaşma ısısı
E_0	Potansiyel evapotranspirasyon
H_0	Dış atmosfer radyasyonu
T_{mx}	Maksimum hava sıcaklığı
T_{mn}	Minimum hava sıcaklığı
$\overline{T_{av}}$	Ortalama hava sıcaklığı

Kısaltmalar	Açıklama
2W2E:	Water Weather Energy Ecosystem
AD:	Tahsis Uyuşmazlığı
AGİ:	Akım Gözlem İstasyonu
AKAÖ:	Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü
AKM:	Askıda Katı Madde
ANN:	Yapay Sinir Ağı
CA:	Hücresel Otomat
CBS:	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CMIP5:	Bütünleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi Aşama 5
CN:	Eğri Numarası
DF:	Karar Ağacı
DSİ:	Devlet Su İşleri
DSMW:	Dijital Dünya Toprak Haritası
ESA:	Avrupa Çevre Ajansı
FAO:	Gıda ve Tarım Örgütü
GCM:	Küresel İklim Modeli
GFDL:	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GLUE:	Genelleştirilmiş Olasılık Temelli Belirsizlik Tahmini
HadGEM:	Hadley Centre Global Environment Model
HRU:	Hidrolojik İşlem Birimi
HTG:	Hidrolojik Toprak Grubu
IPCC:	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
IPSL:	Institut Pierre-Simon Laplace
ISI-MIP5:	Sektörler Arası Etki Modeli Karşılaştırma Projesi
KGE:	Kling-Gupta Verimlilik Katsayısı
LCM:	Land Change Modeler
LR:	Lojistik Regresyon
MC:	Markov Zinciri
MGİ:	Meteoroloji Gözlem İstasyonu
MGM:	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MIROC:	Model for Interdisciplinary Research on Climate
MLP:	Çok Katmanlı Algılayıcı
MUSLE:	Modifiye Evrensel Toprak Kaybı Denklemi

NASA:	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NDBI:	Normalleştirilmiş Fark Yapılaşma İndeksi
NDVI:	Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi
NIR:	Yakın Kızılötesi
NoerESM:	Norwegian Earth System Model
NSE:	Nash-Sutcliffe Verimlilik Katsayısı
OA:	Genel Doğruluk
PA:	Üretici Doğruluğu
PBIAS:	Yüzde Yanlılık
PET:	Potansiyel Evapotranspirasyon
QD:	Miktar Uyuşmazlığı
R^2:	Determinasyon Katsayısı
RCP:	Temsili Konsantrasyon Rotası
SCS:	Toprak Koruma Servisi
SRTM:	Uzay Mekiği Radar Topografya Misyonu
SVM:	Destek Vektör Makinesi
SWAT:	Soil and Water Assessment Tool
SWIR:	Kısa Dalga Kızılötesi
SYM:	Sayısal Yükseklik Modeli
UA:	Kullanıcı Doğruluğu
USGS:	Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu
WNL:	Ağırlıklı Normalize Olasılık

ÖZET

DOKTORA TEZİ

HIZLI KENTLEŞMENİN HAVZA HİDROLOJİSİNE VE SEDİMENT YÜKLERİNE ETKİSİNİN ARAZİ DEĞİŞİM MODELİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI İLE İNCELENMESİ

İsmail Bilal PEKER

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Doktora Programı

Danışman : Doç. Dr. Sezar GÜLBAZ

İklim değişikliği ile arazi kullanımı/arazi örtüsü (AKAÖ) değişimi, havza ölçeğinde su döngüsü ve sediment taşınımını etkileyen en kritik çevresel etmenler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, özellikle inşa edilen havalimanının etkisiyle meydana gelen hızlı kentleşmenin, bir içme suyu havzası olan Alibeyköy Havzası üzerindeki hidrolojik etkileri ve sediment taşınımına yönelik sonuçları, AKAÖ değişimi modellemesi ve iklim değişikliği senaryoları ile değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, gelecekteki AKAÖ değişimleri, Çok Katmanlı Algılayıcı-Markov Zinciri (MLP-MC) yöntemi ile öngörülmüştür. İklim projeksiyonları beş farklı Küresel İklim Modeli (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC, NorESM1-M) ve iki farklı iklim senaryosu (RCP 4.5 ve RCP 8.5) dikkate alınarak oluşturulmuştur. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) havza modeli, Alibeyköy Havzası özelinde akış ve sediment yüklerinin simülasyonu amacıyla kalibre edilmiş ve farklı dönemlerde valide edilmiştir. Ek olarak, güncel tarihli sediment yükü verileri saha ve laboratuvar çalışmalarıyla elde edilmiştir. Bu veriler, modelin performansını doğrulamak amacıyla ek validasyon sürecinde kullanılmıştır. AKAÖ değişimi tahmininde yüksek doğruluk

elde edilmiş ve bu durum Kappa değerinin 0.95 olarak belirlenmesiyle desteklenmiştir. SWAT havza modeli akış simülasyonlarında hem kalibrasyon hem de validasyon periyotları için NSE değeri 0.5'in üzerinde bulunarak tatmin edici sonuçlara erişilmiştir. Saha ve laboratuvar analizleri ile oluşturulan sediment verileri kullanılarak yapılan ek validasyon sonuçlarında NSE değeri 0.5'in altında olmasına rağmen gözlem ve simülasyon arasındaki trend uyumu kabul edilebilir olarak yorumlanmıştır. Tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular üç farklı açıdan ele alınmıştır: İlk olarak, havalimanı inşaatı öncesi ve sonrası AKAÖ durumları karşılaştırılarak bu etkinin hidrolojik ve sediment yükü özelindeki sonuçları havza modeli aracılığıyla incelenmiştir. Elde edilen bulgular, havalimanı inşaatının yüzey akışlarını artırarak bölgesel ölçekte erozyon ve sediment taşınımını hızlandırdığını göstermektedir. Sonrasında, havza modeline gelecek AKAÖ tahmin senaryoları entegre edilerek Alibey Barajı rezervuarında sediment birikimi öngörülmüştür. Alibey Barajı'nda gözlenen sediment birikiminin uzun vadede ölü hacimde artış potansiyeli taşıyabileceği, ancak kısa ve orta vadede toplam rezervuar hacmi açısından kritik bir tehdit oluşturmadığı sonucuna varılmıştır. Son olarak, havza modeline geleceğe yönelik AKAÖ ve iklim değişikliği senaryoları entegre edilerek kombine analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, havzada ortalama akış değerlerinde azalma eğilimi gözlenmiştir. Söz konusu azalmanın temel nedeni iklim değişikliği olarak belirlenirken, sediment yüklerindeki artışın ise büyük ölçüde AKAÖ değişiminden kaynaklandığı ortaya konmuştur.

Eylül 2025 , 178 sayfa.

Anahtar kelimeler: Hızlı kentleşme, Havza hidrolojisi, Sediment, Arazi kullanımı/arazi örtüsü (AKAÖ) değişimi, İklim değişikliği, SWAT, MLP-MC, Alibeyköy Havzası

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

INVESTIGATING THE IMPACTS OF RAPID URBANIZATION ON BASIN HYDROLOGY AND SEDIMENT LOADS WITH LAND CHANGE MODEL AND CLIMATE CHANGE SCENARIOS

İsmail Bilal PEKER

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Programme of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Sezar GÜLBAZ

Climate change and land use/land cover (LULC) change are among the most critical environmental factors affecting the water cycle and sediment transport at the watershed scale. In this study, the hydrological impacts and sediment transport outcomes of rapid urbanization, particularly due to the construction of an airport in the watershed, were investigated. These effects on the Alibeyköy Watershed, which is a drinking water basin, were evaluated based on LULC change modeling and climate change scenarios. Within the scope of the study, future LULC changes were projected using the Multilayer Perceptron-Markov Chain (MLP-MC) method. Climate projections were generated by considering five different Global Climate Models (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC, NorESM1-M) and two different climate scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5). The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) watershed model was calibrated for the simulation of streamflow and sediment loads and was validated for different periods. In addition, recent sediment load data were obtained through field sampling and laboratory analyses. These data were used in an additional validation process

to verify the model's performance. High accuracy was achieved in estimating the LULC change and this was supported by the Kappa value being determined as 0.95. In the SWAT watershed model streamflow simulations, the NSE value was found to be above 0.5 for both calibration and validation periods, indicating satisfactory results. Although the NSE value in the additional validation using the sediment dataset created through field sampling and laboratory analyses was below 0.5, the trend agreement between observation and simulation was interpreted as acceptable. The findings were addressed from three perspectives: First, by comparing the LULC conditions before and after the airport construction, the hydrological and sediment load-related outputs of this impact were evaluated using the watershed model. The findings showed that the airport construction increased surface runoff and accelerated erosion and sediment transport on a regional scale. Then, future LULC projection scenarios were integrated into the watershed model to predict sediment accumulation in the Alibey Dam reservoir. It was concluded that the observed sediment accumulation in the Alibey Dam may lead to an increase in dead storage in the long term, but does not pose a critical threat to the total reservoir volume in the short and medium term. Finally, as a result of the combined scenario analyses of future LULC and climate change, a decreasing trend in average streamflow values was observed. This decrease was mainly attributed to climate change, while the increase in sediment loads was largely found to result from LULC change.

September 2025, 178 pages.

Keywords: Rapid urbanization, Watershed hydrology, Sediment, Land use/land cover (LULC) change, Climate change, SWAT, MLP-MC, Alibeyköy Basin

1. GİRİŞ

Arazi kullanımı/arazi örtüsü ve iklim değişikliğinin etkileri son yıllarda dikkat çeken konular arasında yer almaktadır (**Agarwal ve diğ., 2002; Wagener, 2007; Hasan ve diğ., 2020**). Hidroloji alanında bu konudaki çalışmalar 21. yüzyılda öncelikli alanlar arasında gösterilmektedir (**Blösch ve diğ., 2019**). Birleşmiş Milletler (BM) tarafından oluşturulan sürdürülebilir kalkınma amaçları değerlendirme raporunda (**UN General Assembly, 2015**) çevrenin korunması ve iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlayan ve iklim krizine karşı önlem alınmasına yönelik benzer konular yer almaktadır. Özellikle son yıllarda dünyada ve ülkemizde yer alan araştırmacılar tarafından arazi kullanımı/arazi örtüsü ve iklim değişikliğinin etkileri tartışılmakta olup bu konuların önemi yapılan son bilimsel çalışmalarda da vurgulanmaya devam etmektedir (**Chotpantarat ve Boonkaewwan, 2018; Roy ve diğ., 2020**).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 6. Değerlendirme Raporu'nda, küresel ısınmanın insan kaynaklı olduğu ve önceki seviyelere kıyasla en ciddi noktaya ulaştığı açık bir şekilde ifade edilmiştir (**IPCC, 2023**). Bu bağlamda, arazi kullanımı/arazi örtüsü ve iklimdeki değişimlerin, özellikle su döngüsü, yüzey akışı, yeraltı suyu beslenimi ve taşkın riskleri gibi hidrolojik süreçler üzerindeki etkileri daha detaylı şekilde ele alınmalıdır. Arazi kullanımı/arazi örtüsündeki hızlı değişimlerin (örneğin orman alanlarının azalması, kentsel yayılımın artması ve tarımsal faaliyetlerin genişlemesi), yağışların toprak tarafından tutulmasını ve yeraltı suyu rezervlerinin beslenmesini olumsuz etkilemektedir. İklim değişikliğinin ise yağış rejimlerini değiştirdiği, buharlaşma oranlarını artırdığı ve ekstrem hidrolojik olayların (kuraklık ve taşkın gibi) sıklığını artırdığı bilinmektedir. Bu iki değişkenin birleşik etkisi, özellikle yarı kurak ve nüfus artışı yüksek olan bölgelerde su kaynaklarının yönetimini daha karmaşık ve kırılgan hale getirmektedir. Bu nedenle, entegre modelleme yaklaşımlarıyla geleceğe dönük projeksiyonlar yapmak, karar vericiler için stratejik planlamalar geliştirmek adına kritik önem taşımaktadır.

Türkiye, su miktarı açısından bakıldığında su stresi altında olan ülkeler arasında yer almaktadır (**DSİ, 2018**). Bu nedenle, su kaynaklarının sürdürülebilir bir biçimde planlanması ve yönetilmesi büyük önem taşımaktadır. Türkiye'nin de dahil olduğu Akdeniz Havzası'nın, küresel iklim değişikliğine karşı en hassas bölgelerden biri olacağı öngörülmektedir (**IPCC,**

2013). Son dönemde yapılan araştırmalar ve gözlemsel veriler, Akdeniz Havzası'nda daha sıcak iklim koşullarına doğru bir yönelim olduğunu ve mevsimsel yağış düzenlerinde belirgin değişiklikler yaşandığını açıkça göstermektedir (**Cüceloğlu, 2019**). Özellikle, İstanbul gibi yoğun nüfusa sahip bir mega kentte su kaynaklarının planlı kullanımı gerekmektedir. İstanbul, hızlı kentleşmesi ve coğrafi konumu nedeniyle iklim değişikliği kaynaklı tehlikelere karşı oldukça hassas, hızlı kentleşen bir kıyı kentidir (**İBB, 2021**). Gerekli önlemler alınmadığı taktirde, kent sakinlerinin ilerleyen yıllarda sıcaklık artışları, deniz seviyesinin yükselmesi, yağış rejimindeki değişimler, kuraklık ve çevresel bozulmalar gibi ciddi sorunlarla karşı karşıya kalmaları muhtemeldir. Sıcaklık artışları, özellikle kentsel ısı adası etkisiyle birleşerek enerji tüketimini artırırken, halk sağlığını da olumsuz etkileyebilir. Deniz seviyesinin yükselmesi, kıyı bölgelerinde su baskınlarına ve toprak kayıplarına yol açabilirken, yağış rejimindeki düzensizlikler sel riskini artırabilir veya su kaynaklarının azalmasına neden olarak kuraklık tehlikesini derinleştirebilir. Bu süreçler, İstanbul'un ekosistemlerini ve biyolojik çeşitliliğini de tehdit ederken, kentin altyapı ve su yönetim sistemleri üzerinde büyük baskılar oluşturacaktır. Bu nedenle, İstanbul için iklim değişikliğine uyum sağlayacak sürdürülebilir politikalar geliştirilmesi, erken uyarı sistemlerin kurulması ve risk azaltıcı stratejiler oluşturulması hayati önem taşımaktadır.

İstanbul'un sınırları içerisinde yer alan Alibeyköy Havzası, içme suyu temini açısından büyük öneme sahiptir. İç ve dış göçlere bağlı olarak artan nüfusla birlikte İstanbul'daki ilçelerin kaçınılmaz genişlemesi, son yıllarda devam eden bir eğilimdir (**Bayraktar ve diğ., 2024**). Alibeyköy Havzası, zamanla yerleşim alanlarının yayılması ve açık ocak madenciliği gibi insan kaynaklı baskılara maruz kalmıştır. Arazi kullanımı/arazi örtüsü, 2014–2018 yılları arasında İstanbul Havalimanı ve bağlantı yollarının inşası ile önemli ölçüde değişmiş; bu değişim konut alanlarının hızla büyümesiyle de sürmektedir. Bu gelişmeler, su, orman, yapılaşmış alan, çıplak toprak ve madencilik gibi temel arazi kullanımı/arazi örtüsü sınıfları arasında dinamik değişimlere yol açmaktadır. Arazi kullanımı/arazi örtüsü durumundaki bu hızlı dönüşümler, havzadaki hidrolojik süreçleri ve su kalitesi parametrelerini doğrudan etkilemektedir (**Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan, 2018**). Ayrıca, Alibeyköy Havzası gibi kentsel havzalarda yoğun insan faaliyetleri, akarsu akışları ile sediment yüklerinde değişimlere neden olmaktadır. İçme suyu barajının varlığı, havzadaki kentsel baskıların araştırılmasını önemli kılmaktadır. Bölgede kentsel alanların genişlemesi ve açık ocak madenciliği faaliyetleri, toprak kazıları ve göllenme süreçleriyle ormanlık alanlar ile çıplak topraklar arasında arazi kullanımı/arazi örtüsü değişimlerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, İstanbul'da yer alan Alibeyköy Havzası'nda hızlı kentleşmeye bağlı arazi kullanımı/arazi örtüsü değişimlerinin, iklim değişikliği senaryoları altında havza hidrolojisi ve sediment taşınımı üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde incelemektir. Çalışmanın özgünlüğü, mega ölçekli bir altyapı projesi olan İstanbul Havalimanı'nın havza üzerindeki ani ve geniş ölçekli etkilerinin, iklim değişikliğinin uzun vadeli projeksiyonlarıyla birlikte değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Geleceğe yönelik AKAÖ dönüşümleri makine öğrenmesi tabanlı bir yöntem ile tahmin edilmiş ve fiziksel tabanlı bir havza modeliyle simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte saha ve laboratuvar verileri de kullanılarak model performansı güçlendirilmiştir. Böylece hem hızlı kentleşme hem de iklim değişikliğinin birleşik baskılarının hidrolojik süreçler ve sediment dinamikleri üzerindeki etkileri ortaya konmuş, içme suyu havzalarının sürdürülebilir yönetimine yönelik literatüre özgün katkılar sağlanmıştır.

Bu tez çalışması "Giriş" kısmı ile birlikte altı ana başlıktan oluşmaktadır:

- Birinci başlık (**GİRİŞ**) altında tez çalışmasının "konusu, amacı ve içeriği" özetlenmektedir.
- İkinci başlık (**KAVRAMSAL ÇERÇEVE**) altında; çalışmanın kavramsal çerçevesi açıklanarak bu tez çalışmasının temel kapsamını ilgilendiren "iklim değişikliği ve kentleşme" ile "havza hidrolojisi ve sediment yükleri" hakkında bilgi verilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan "modelleme yaklaşımlarının (arazi değişimi modellemeleri ve havza modellemeleri)" kavramsal detayı açıklanmaktadır. Ayrıca, konu ile ilgili "literatürde yapılan çalışmalar" sunulmaktadır.
- Üçüncü başlık (**MATERYAL VE YÖNTEM**) tez çalışmasında kullanılan materyali ve takip edilen metodolojik süreçleri içermektedir. Bu başlıkta öncelikle "çalışma alanı olarak seçilen Alibeyköy Havzası" tanıtılmaktadır. Tez çalışması boyunca kullanılan "veriler ve bunların zamansal/mekansal analizi" bu kısımda detaylandırılmaktadır. Gerçekleştirilen "arazi ve laboratuvar çalışmaları"nda kullanılan aparatlar ve ölçüm teknikleri bu başlık altındaki diğer bir içeriktir. Son olarak, arazi kullanımı/arazi örtüsündeki değişikliklerin geleceğe yönelik tahminlerinin yapılmasında faydalanılan "arazi değişim modeli"; havzanın hidrolojik süreçlerinin ve sediment yüklerinin simülasyonunu gerçekleştirmeye yarayan "havza modeli" uygulamaları bu başlık altında ele alınmaktadır.
- Dördüncü başlık (**BULGULAR**), tez çalışmasının sonuçlarını sunmaktadır. Elde edilen veriler ile izlenen metodolojinin bulguları üç farklı alt başlıkta incelenmektedir: İlk

olarak, Alibeyköy Havzası'ndaki havalimanı inşaatına bağlı ani değişen arazi kullanımı/arazi örtüsü durumunun havza hidrolojisi ve sediment yükleri üzerindeki etkilerinin bulguları ortaya konmaktadır. İkinci olarak, arazi değişim modeli tahminlerinin sonuçları ve değişen arazi kullanımı/arazi örtüsü koşullarının sediment birikimi üzerindeki muhtemel etkileri ve buna bağlı olarak gelecek yıllar için baraj ölü hacmi tahminleri sunulmaktadır. Üçüncü olarak ise, arazi kullanımı/arazi örtüsü ve iklim değişikliğinin ayrı ayrı ve kombine etkileri gelecek yıllar için çoklu senaryolar altında değerlendirilmektedir.

- Beşinci başlık (**TARTIŞMA**), elde edilen bulgulara dayalı olarak yapılan tartışma metnini içermektedir. Ayrıca bu kısımda tez çalışmasının kısıtları ve eksikleri tartışılmaktadır.
- Altıncı başlık (**SONUÇ VE ÖNERİLER**), tez çalışmasının amacı doğrultusunda varılan sonuçları özetleyerek Alibeyköy Havzası için geleceğe yönelik arazi kullanımı/arazi örtüsü ve iklim değişikliğine bağlı etkilerin yönetimine dair önerileri içermektedir.

Arazi kullanımı ve arazi örtüsü, çoğunlukla birlikte kullanılan ancak anlam bakımından farklılık gösteren kavramlardır. Arazi kullanımı, arazide gerçekleştirilen insan faaliyetlerini ifade ederken; arazi örtüsü, yüzeyi kaplayan doğal ve yapay fiziksel unsurları tanımlar (**Kafy ve diğ., 2021**). Akademik çalışmalarda bu iki kavram genellikle birlikte ele alınmakta ve **Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü (AKAÖ)** terimiyle ifade edilmektedir. **Bu tez çalışmasında da AKAÖ kısaltması, karasal yüzeydeki tüm değişiklikleri kapsayacak şekilde kullanılmıştır.**

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KENTLEŞME

İklim, belirli bir bölgede uzun yıllar boyunca (genellikle 30 yıl ve üzeri) gözlemlenen sıcaklık, yağış, rüzgar gibi atmosferik koşulların ortalama ve genel özelliklerini ifade eder (**WMO, 2017**). İklim değişikliği ise bu ortalama koşullarda uzun vadeli ve istatistiksel olarak anlamlı değişiklikler meydana gelmesidir (**Gündoğan ve diğ., 2023**). Son yüzyılda insan faaliyetlerinin yoğunlaşmasıyla birlikte atmosferdeki sera gazı birikimi artmış, bu da küresel ölçekte sıcaklıkların yükselmesine, yağış rejimlerinin değişmesine ve aşırı hava olaylarının daha sık ve şiddetli hale gelmesine neden olmuştur (**IPCC, 2021**; **McCoy ve diğ., 2022**). Küresel iklim değişikliği, tüm insanlığın ortak gündeminde yer alan, acil müdahale gerektiren ve çevresel, ekonomik, sosyal ve politik boyutlarıyla çok yönlü etkiler yaratan bir krizdir (**Abbass ve diğ., 2022**). Bu kapsamda, bilimsel temelli bilgi üretmek ve karar alıcıları bilgilendirmek amacıyla Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) kurulmuştur. IPCC, dünya genelindeki binlerce bilim insanının katkısıyla hazırlanan değerlendirme raporları aracılığıyla, iklim sistemindeki değişimlerin nedenlerini, etkilerini ve geleceğe yönelik senaryoları ortaya koymaktadır. Panelin çalışmaları, iklim değişikliğinin büyük ölçüde insan kaynaklı olduğunu ve etkilerinin önlenebilmesi için küresel ölçekte emisyonların azaltılması gerektiğini açıkça göstermektedir. Dolayısıyla, küresel iklim değişikliğini anlamak ve etkili politikalar geliştirmek için IPCC'nin sunduğu bilimsel veriler, uluslararası toplum açısından önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

IPCC tarafından belirli aralıklarla yayınlanan değerlendirme raporları ve özel raporlar birtakım iklim değişikliği senaryolarına dayalı projeksiyonlar sunmaktadır. İklim senaryosu, gelecekteki iklim koşullarını tahmin edebilmek için kullanılan varsayımsal projeksiyonlardır (**Moss ve diğ., 2010**). Bu senaryolar, insan faaliyetlerine bağlı olarak atmosferdeki sera gazı emisyonlarının, arazi kullanım değişikliklerinin ve diğer çevresel etkenlerin nasıl gelişeceğine ilişkin çeşitli varsayımlara dayanır. 2014 yılında yayınlanan Beşinci Değerlendirme Raporu'nda (**IPCC, 2014**) Temsili Konsantrasyon Rotaları (Representative Concentration Pathways, RCP) isimli senaryolar geliştirilmiştir. RCP senaryoları 2100 yılına kadar farklı sera gazı emisyon düzeylerine karşılık gelen RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ve RCP8.5 olmak üzere dört ana senaryoyu ifade eder. Bu senaryolar, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun yarattığı ışınımsal zorlamayı temel alır. RCP2.6 düşük emisyonlu, sıkı iklim politikalarıyla küresel ısınmayı

sınırlamayı hedefleyen senaryodur; RCP4.5 ve RCP6.0, orta düzeyde emisyon artışı öngören ve kısmi azaltım önlemlerini içeren senaryolardır; RCP8.5 ise fosil yakıt kullanımının yüksek düzeyde devam ettiği, "işlerin olduğu gibi devam ettiği" (business-as-usual) senaryodur. IPCC tarafından en son yayınlanan Altıncı Değerlendirme Raporu ile bilimsel kesinlik artırılarak, küresel sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlamanın önemi vurgulanmaktadır (**Türkeş, 2022**).

Yapılan bilimsel çalışmalar ve rehber raporlar iklim değişikliğinin yağış rejimlerinde ve sıcaklık değerlerinde değişikliklere yol açarak su kaynaklarının miktarını, kalitesini ve mevsimsel dağılımını etkileyeceğini ortaya koymaktadır (**Abbaspour ve diğ., 2009; Krysanova ve diğ., 2014; Yang ve diğ., 2021; IPCC, 2022**). Bu durum hem su temini hem de hidrolojik döngü üzerinde baskı yaratmaktadır. Dünya üzerinde farklı coğrafyalardaki bölgelerin iklim değişikliğinden farklı şiddette etkilenmesi beklenmektedir. Türkiye, iklim değişikliğinden en fazla etkilenmesi beklenen Akdeniz Havzası'nda yer almaktadır (**Giorgi ve diğ., 2009**; **Tuel ve El-Tahir, 2020**). Kuraklık, aşırı hava olayları ve su kaynaklarının azalması gibi riskler, ülke genelinde çevresel ve sosyoekonomik sorunlara neden olmaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne göre, 2024 yılı Türkiye ortalama sıcaklığı 15.6°C ile 1991–2020 ortalaması olan 13.9°C'nin 1.7°C üzerinde gerçekleşerek son 54 yılın rekorunu kırmıştır. Bu değer, bir önceki rekor olan 2010 yılının 15.5°C değerini 0.1°C geçmiştir (**MGM, 2025**). Bu durum, iklim değişikliğinin kaçınılmaz olumsuz sonuçlarına karşı yapılan araştırmaları ve iklim değişikliğine adaptasyon politikalarının önemini artırmaktadır.

Kentleşme, nüfusun ve ekonomik faaliyetlerin kırsal alanlardan kentsel bölgelere yönelmesi sürecidir (**Vlahov, 2002**). Kentleşme ile nüfus artışı ve ekonomik gelişmelerle birlikte yerleşim ve sanayi alanlarındaki artış doğal alanların yapılaşmış alanlara dönüşmesi sonucu meydana gelir. Kentleşme, çoğunlukla geçirimsiz yüzeyleri, fosil yakıt kullanımını, ormansızlaştırmayı ve ekosistemlerin bozulmasını beraberinde getirdiği için su kaynakları ve döngüsü üzerinde büyük bir tehdit oluşturmaktadır (**O'Driscoll ve diğ., 2010**). Hızlı kentleşme, çoğu zaman plansız arazi kullanımı değişikliklerine neden olmakta, bu da su kaynaklarının miktar ve kalitesini olumsuz etkilemektedir. Geçirimsiz yüzeylerin artışı; yüzey akışını, taşkın riskini ve sediment taşınımını önemli ölçüde artırmaktadır. Bunun yanı sıra doğal infiltrasyon süreçleri bozulmakta, yeraltı suyu beslenmesi azalmaktadır. Doğal yüzeylerin yapay yüzeylerle yer değiştirmesi, çevresel dengeleri, özellikle su döngüsünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Türkiye'nin en kalabalık ve en hızlı büyüyen kenti olan İstanbul, son yıllarda yoğun bir kentleşme süreci yaşamaktadır (**Kaya ve Curran, 2005**; **Khorrami ve diğ., 2021**). Bu durum

doğal alanların daralmasına, ekosistemlerin bozulmasına ve altyapı üzerinde ciddi baskılara neden olmaktadır. İstanbul'da hızla artan nüfus ve yapılaşma, içme suyu havzalarının baskı altında kalmasına neden olmakta ve İstanbul'un önemli baraj havzalarındaki su kalitesini ve miktarını olumsuz yönde etkilemektedir (**Kucukmehmetoglu ve Geymen, 2008**; **Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan, 2013**; **Sertel ve diğ., 2019**).

AKAÖ, son birkaç on yılda küresel ölçekte önemli değişimlere uğramıştır (**Winkler ve diğ., 2021**). Türkiye de son yıllarda hızlı ekonomik büyümenin yanı sıra dikkate değer bir nüfus artışı yaşamış; bu durum, sürekli kentleşme eğilimleriyle birlikte AKAÖ'de belirgin değişikliklere yol açmıştır (**Ustaoğlu ve Aydınoğlu, 2020**). AKAÖ değişimleri, çevresel süreçler üzerinde doğrudan etkilidir. Sürdürülebilir ve akıllı kentlerin planlanmasında, kentsel yayılmanın yoğunlaştığı bölgelerin tespiti, yönelimlerinin analiz edilmesi ve dönüşüme uğrayan AKAÖ türlerinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. İklim değişikliği ve kentleşmenin hızlı artışı bir su havzasının hidrolojik sistemini baskı altında bırakmakta ve bu sistemin akış, sızma ve sedimentasyon gibi süreçlerini etkilemektedir. Günümüzde bu etkileşimleri anlamak ve sürdürülebilir su yönetimini sağlamak amacıyla, AKAÖ ve iklim değişikliği kaynaklı baskıların birlikte değerlendirildiği bütüncül yaklaşımlar büyük önem taşımaktadır. Özellikle havza bazlı hidrolojik modelleme çalışmaları, iklim senaryoları ve AKAÖ projeksiyonları entegre edilerek su kaynaklarının gelecekte nasıl değişebileceğini öngörmeye yardımcı olmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen modeller, yerel ve bölgesel düzeyde planlama ve adaptasyon stratejilerinin oluşturulmasında karar vericilere bilimsel veri desteği sunmaktadır. Söz konusu modeller aracılığıyla, gelecekteki olası iklim koşullarının ve kentleşme eğilimlerinin suyun zamansal ve mekansal dağılımı üzerindeki etkileri analiz edilerek, taşkın, kuraklık ve su kalitesi gibi konularda risk azaltım stratejileri geliştirilebilmektedir.

İstanbul özelinde yapılan çalışmalar, özellikle içme suyu temininde kritik rol oynayan havzaların bu etkilerden doğrudan etkilendiğini göstermektedir (**Cüceloğlu, 2019**; **Dogan ve Karpuzcu, 2021**; **Dervisoglu ve diğ., 2024**). Alibeyköy Havzası gibi yoğun kentleşme baskısı altındaki su havzalarında, AKAÖ'deki değişimlerin yüzey akışı, sediment taşınımı ve yeraltı suyu beslenmesi gibi hidrolojik süreçlerde önemli değişimlere neden olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, iklim değişikliğine bağlı olarak artan ekstrem yağış olayları, taşkın riskini artırmakta ve bu durum havza yönetiminde yeni yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda hem iklim değişikliğine uyum sağlamak hem de rezervuarların

taşıma kapasitesini koruyarak su kalitesini ve miktarını sürdürülebilir düzeyde tutmak için bütüncül modelleme temelli ve çok disiplinli planlama yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

İklim değişikliği ve kentleşmenin bu ortak baskıları, özellikle İstanbul gibi hızlı nüfus artışı yaşayan mega kentlerde içme suyu havzaları üzerinde kritik sonuçlar doğurmaktadır. Bu tez çalışması da Alibeyköy Havzası özelinde bu etkileri entegre modelleme yaklaşımıyla inceleyerek literatüre katkı sunmaktadır.

2.2. HAVZA HİDROLOJİSİ VE SEDİMENT YÜKLERİ

Bir havzanın hidrolojik işleyişi, su döngüsünün farklı bileşenlerinin etkileşimine dayanır (**Arnold ve diğ., 1999**). Yağış, atmosferden yeryüzüne düşen su miktarını ifade eder. Yağışın bir kısmı toprağa sızarak infiltrasyonu oluşturur; bu su yeraltı tabakalarına geçer ve akiferleri besler. Toprağa sızamayan yağış ise yüzeysel akışa dönüşerek yüzey akışını meydana getirir. Yüzeyde biriken suların akarsu yatakları boyunca hareketi akarsu akışı olarak adlandırılır. Havzanın su bütçesinin diğer önemli bileşenleri buharlaşma ve terlemedir. Buharlaşma, suyun sıvı halden gaz hale geçerek atmosfere dönmesidir; terleme ise bitkilerin aldıkları suyu yaprakları aracılığıyla atmosfere vermesidir. Bu iki süreç birlikte evapotranspirasyon (ET) olarak adlandırılır. Bir havzaya düşen yağışın tamamı nihayetinde havzanın çıkış noktasından akış olarak ayrılır veya evapotranspirasyon yoluyla atmosfere geri döner (**Bayazıt, 1995; Usul, 2008**). Bu dengenin sonucu olarak akışa katılan su miktarı (su verimi) ile ET yoluyla kaybedilen su miktarı, iklim ve AKAÖ özelliklerine bağlı olarak değişir.

Küresel iklim değişikliği, havzaların hidrolojik bileşenlerini ve su rejimini önemli ölçüde etkilemektedir. Artan sıcaklıklar, su döngüsünü hızlandırarak buharlaşma oranlarını artırır ve atmosferin daha fazla nem tutmasına neden olur. Bu durum bazı bölgelerde aşırı kuraklığa, bazı bölgelerde ise aşırı yağışlara yol açabilir (**IPCC, 2023**). Ayrıca, sıcaklık artışı evapotranspirasyonu artırarak bitki su tüketimini artırır; bu da özellikle kurak dönemlerde su kaynakları üzerindeki baskıyı şiddetlendirir. AKAÖ'deki değişiklikler, yağış sonrası suyun davranışını doğrudan etkilemektedir. Ormanlık alanların tarıma veya yerleşime açılması, yüzey akışını artırarak akarsu debilerinde ani artışlara neden olur (**Talib ve Randhir, 2023**). Bitki örtüsünün yoğun olduğu alanlarda yağışın önemli bir kısmı tutulur ve toprak tarafından emilirken, doğal örtünün kaldırılması bu süreci engelleyerek daha fazla suyun doğrudan yüzey akışına geçmesine neden olur. Ayrıca, bitki örtüsünün kaybı toprağın stabilitesini azaltır ve

erozyon riskini artırır. Bu değişiklikler, yüzey akışının artmasına, yeraltı suyu beslemesinin azalmasına ve akış rejimlerinin daha değişken hale gelmesine neden olur (**Pimentel ve diğ., 1995**; **Glanville ve diğ., 2023**).

Kentleşme, geçirimsiz yüzey oranını artırarak yağış sularının toprağa sızmasını büyük ölçüde engeller. Beton, asfalt ve çatı gibi yüzeyler, yağmur sularını doğrudan yüzey akışına dönüştürür (**Ohana-Levi ve diğ., 2017**; **Sun ve diğ., 2021**). Bu durum, yüzey akışını artırarak akarsularda pik akımların daha kısa sürede ve daha yüksek debilerle gerçekleşmesine neden olur. Aynı zamanda düşük akım dönemlerinde debiler daha da düşer, çünkü yeraltı suyu beslemesi sınırlanmıştır. Araştırmalar, geçirimsiz yüzeylerin artmasının taşkın sıklığını ve şiddetini artırdığını göstermektedir (**Jacobson, 2011**; **Shuster ve diğ., 2005**). Ayrıca, bu hızlı akış nehir yataklarında erozyona, yatak oyulmasına ve sediment taşınımında artışa neden olur.

Askıda Katı Madde (AKM), su içinde çözünmemiş halde bulunan, genellikle organik ya da inorganik katı parçacıklardır. Bu parçacıklar su kolonu içinde asılı durumda bulunur, zamanla çökelebilir veya akışla taşınabilirler. AKM, hem doğal süreçlerden (erozyon, biyolojik faaliyetler gibi) hem de insan kaynaklı etkilerden (inşaat, tarım, atıksu deşarjı gibi) kaynaklanabilir (**Bilotta ve Brazier, 2008**). Sediment yükü, akarsuların taşıdığı askıdaki ve dipteki katı maddeleri ifade eder. Bu yük, genellikle erozyon süreciyle ortaya çıkar. Bitki örtüsünün kaybı, arazi bozulması ve çıplak toprak yüzeyleri erozyonun başlıca nedenlerindendir. Arazi bozulması ve ormansızlaşma, toprak stabilitesini azaltarak yağmur sularının daha fazla toprağı yüzey akışına karıştırmasına neden olur. Plansız tarım uygulamaları, madencilik faaliyetleri ve orman yangınları da sediment üretimini artıran diğer faktörlerdir (**Lal, 2001**; **Gonzalez ve Pasternack, 2015**).

Kentleşme ve inşaat faaliyetleri, sediment yüklerinin artmasına neden olan en önemli insan faaliyetleri arasındadır. Çıplak inşaat sahaları, yoğun yağışlarda yüksek miktarda toprak taşınımına sebep olur. Bu yük, barajların dolmasına, taşkın riskinin artmasına ve su kalitesinin bozulmasına neden olur. Sediment taşınımı, barajların aktif su depolama kapasitesini azaltarak ömrünü kısaltır. Bütün baraj ve gölet haznelerinin sediment ile dolması olağandır fakat hazne hacmi ile karşılaştırıldığında yüksekse hazne çok kısa zamanda dolar ve bu durum uygun bir planlama gerektirir (**Tülücü, 1997**). Biriken sediment, baraj kapasitelerinde azalmaya, bakım maliyetlerinde artışa ve yapısal risklere neden olabilir (**Kondolf ve diğ., 2014**; **Perera ve diğ., 2022**). Ayrıca, su kalitesi sediment yükü ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek sediment

konsantrasyonları, besin maddelerinin ve kirleticilerin taşınmasına neden olarak hem içme suyu kaynaklarını hem de ekosistemleri tehdit eder.

Alibey Barajı, İstanbul'un içme suyu ihtiyacını karşılayan stratejik bir kaynak olması nedeniyle, su kalitesinin korunması ve rezervuar ömrünün sürdürülebilirliği açısından kapsamlı havza yönetimi gerektirmektedir. Bu bağlamda, su miktarı ve dere akışlarının yanında sediment taşınımının da incelenmesi önemlidir. Havzaya gelen sediment yükleri, zamanla barajın aktif depolama hacmini azaltmakta, suyun fiziksel ve kimyasal kalitesini etkilemekte ve içme suyu arıtma süreçlerinin maliyetini artırabilmektedir. Ayrıca, yüksek AKM konsantrasyonları, yüzeysel akışla taşınan kirleticilerle birlikte, havza sistemini olumsuz etkileyebilmektedir.

2.3. MODELLEME YAKLAŞIMLARI

Modelleme, gerçek dünya sistemlerini daha iyi anlamak, analiz etmek, öngörmek veya yönetmek amacıyla bu sistemlerin basitleştirilmiş temsillerini oluşturmaktır (**Bhatta, 2010**). Modelleme sayesinde karmaşık süreçler daha kolay analiz edilir ve geleceğe yönelik senaryolar oluşturulabilir. Gelişen bilgisayar teknolojileri kullanılarak birçok gerçek dünya sistemine ait karmaşık fiziksel süreçler modelleme yaklaşımları ile simüle edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında faydalanılan iki tip modelleme yaklaşımı bunlara birer örnektir: 1) AKAÖ değişikliklerini geleceğe yönelik tahminleyen modeller. 2) Su havzası sistemlerine dair hidrolojik süreçleri (yağış, buharlaşma, yüzey akışı, yeraltı suyu, taşkın, sediment taşınımı vb.) benzeştiren havza modelleri.

2.3.1. AKAÖ Değişimi Modelleme Yaklaşımları

AKAÖ değişim modelleri bir bölgedeki arazi kullanımı veya arazi örtüsü sınıfları arasındaki dönüşümü geleceğe yönelik tahminlemeye yarar. Kentsel büyüme, ormansızlaşma, sulak alan kaybı gibi farklı dönüşümlerin miktarını ve yönelimini belirler. Kentsel büyüme modelleri, mekansal değişimlerin nicel ve nitel olarak ortaya konulmasında temel bir araç niteliği taşımaktadır (**Karabacak, 2021**). Geleceğe yönelik AKAÖ değişimlerinin tahmin edilmesinde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama verilerinden faydalanılarak farklı modelleme yaklaşımları kullanılmaktadır (**Nugroho ve Al-Sanjary, 2018**; **Canpolat ve Dağlı, 2021**). Bu modeller, havza hidrolojisini analiz eden modellerle entegre edilerek AKAÖ değişimlerinin su döngüsüne ve/veya su kalitesine etkileri analiz edilebilir.

Karabacak (2021) çalışmasında kentsel büyüme modellerini iki temel başlık altında sınıflandırmaktadır: Kuramsal temellere dayanan modeller ve çağdaş kentsel modeller. Kuramsal modeller, çoğunlukla deneysel gözlemlerden yola çıkarak kentsel büyümeyi merkezi bir çekirdekten dışa doğru genişleyen halkalar şeklinde temsil eden yaklaşımlardır. Buna karşın, çağdaş kentsel modeller; CBS gibi bilgisayar destekli teknolojiler aracılığıyla karmaşık kentsel sistemleri analiz etmeye yönelik daha gelişmiş yöntemler sunmaktadır. Tarihsel süreçte, ilk kuşak kuramsal modellerin, kentlerin çok boyutlu ve dinamik yapısını yeterince açıklamada yetersiz kalması, çağdaş bilgisayar teknolojileriyle geliştirilen modellere olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır.

İlk kuramsal modellerin tarihi Von Thünnen Modeli'ne dayanmaktadır (**Von Thünen, 1826**). Von Thünnen modeli şehir merkezinden dışa doğru tarım ürünlerinin türüne doğru halkalar oluşturur. Buna dayanan eş merkezli çemberler kuramı olarak adlandırılan başka bir model şehir merkezinden dışa doğru sosyal ve ekonomik tabakalaşmaya göre halkalar oluşturur (**Burgess, 1925**). Geliştirilen bir başka kuramsal model olan Hoyt'un sektör modelinde şehir, merkezden çıkan ulaşım aksları boyunca sektör şeklinde gelişir (**Hoyt, 1939**). Konut alanları, sanayi bölgeleri ve yüksek gelirli konutlar ulaşım hatlarına göre yayılır. Christaller'in teorisinde ise, merkezi alanların eşit mesafeli altıgenler şeklinde dağıldığı varsayılır (**Christaller, 1966**). Bu, hizmetlerin maksimum kapsama alanı sağlayacak biçimde dağılmasını temsil eder. **Harris ve Ullman (1945)**, şehirlerin gelişiminin tek bir merkezden değil, çeşitli işlevsel merkezlerden (örneğin sanayi, konut, ticaret, eğitim) oluşan çok çekirdekli bir yapıyla gerçekleştiğini belirtmiştir. Bu yaklaşım, modern ve büyük ölçekli kentlerin mekânsal karmaşıklığını açıklamada daha gerçekçidir.

CBS ile geliştirilen çoğu çağdaş model bu kuramsal temellerden esinlenmiştir. AKAÖ değişimlerini modellemek için hücresel otomatlar (Cellular Automata, CA), yapay sinir ağları (Artificial Neural Network, ANN), Markov zincirleri (MC), lojistik regresyon, çoklu regresyon analizleri ve faktör analizleri gibi ileri yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Her bir yöntem kendine özgü prensiplere, uygulama alanlarına, avantajlara ve sınırlılıklara sahiptir. Hücresel otomatlar (CA) (**Von Neumann and Burks, 1966**), ızgara tabanlı hücrelerin tanımlı komşuluk kurallarına göre evrimleşmesine dayanan mekansal modeller olup basit yerel kurallarla karmaşık mekansal örüntüleri simüle edebilir. Komşu etkileşimlerini hesaba katarak kendi kendine örgütlenme dinamiklerini yakalama konusunda başarılıdır. Markov zincirleri (MC) (**Markov, 1971**), olasılık teorisine dayalı olarak, bir AKAÖ sınıfının gelecekte başka bir

sınıfa dönüşme olasılığını geçmiş geçiş istatistiklerinden hesaplayan yöntemlerdir. Geçmiş eğilimlere göre gelecekteki değişim miktarını öngörmede basit ve kullanışlıdır, ancak komşu hücre etkilerini ve mekansal konumu dikkate almadığı için tek başına arazi değişiminin mekansal dağılımını yansıtamaz. Yapay sinir ağları (ANN) (**Rumelhart ve diğ., 1986**), özellikle çok katmanlı algılayıcı (Multilayer Perceptron, MLP) mimarileriyle, arazi değişimini etkileyen çok sayıda fiziki ve beşerî faktör arasındaki karmaşık (doğrusal olmayan) ilişkileri öğrenip her bir konum için değişim olasılıklarını veya uygunluk değerlerini tahmin edebilen yapay zekâ tabanlı modellerdir. Bu veri güdümlü yaklaşım, yeterli eğitim verisi olduğunda yüksek doğruluklu öngörüler sunabilir ancak modelin "kara kutu" niteliği nedeniyle sonuçların yorumlanması zordur ve aşırı uyum (overfitting) riski vardır. Lojistik regresyon (**Hosmer ve diğ., 2013**), belirli bir arazinin, örneğin kentsel alanlardan kırsal alanlara dönüşümü gibi ikili veya çok sınıflı bir değişimi olasılık olarak ele alıp; yükselti, eğim, nüfus yoğunluğu, yol yakınlığı gibi çok çeşitli bağımsız değişkenler aracılığıyla bu olasılığı tahminleyen klasik bir istatistiksel yöntemdir. Birden fazla faktörü aynı anda modele dahil edebilmesi sayesinde arazi değişiminin temel sürücüleri istatistiksel olarak belirlenebilir.

Bu yöntemlerin entegre ve hibrit kullanımları (CA-Markov, ANN-CA, MLP-MC veya ANN-MLP gibi kombinasyonlar) ise her bir yöntemin güçlü yanlarını bir araya getirerek, özellikle mekânsal ve zamansal dinamiklerin birlikte modellendiği daha başarılı simülasyonlar elde edilmesini sağlar. CA-Markov modeli, hücresel otomatların yerel komşuluk etkileşimleriyle mekânsal desen oluşturma kabiliyetini, Markov zincirlerinin zaman içindeki kategori geçiş olasılıklarını nicelleştirme becerisiyle birleştirerek gelecekteki AKAÖ değişikliklerini hem miktar hem mekân olarak öngörebilmektedir. ANN tabanlı modeller de (özellikle MLP-MC gibi yapılar) yapay zekânın karmaşık sürücü etkileşimlerini öğrenme gücünü, CA veya Markov tabanlı mekânsal simülasyon bileşenleriyle bütünleştirerek piksel düzeyinde değişim olasılıklarını hesaplamakta ve bunları mekâna dayalı olarak uygulamaktadır. Bu tür hibrit modeller, yapay zekâ tekniklerinin CBS ile entegrasyonu sayesinde genellikle tekil yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk ve genelleme yeteneği sergiler. Uzaktan algılama verileriyle desteklendiklerinde hem mekânsal hem zamansal değişimleri eşzamanlı açıklayarak geleceğe yönelik senaryolarda daha gerçekçi öngörüler sunabilmektedirler.

AKAÖ değişikliğinin tespitinde bu yöntemlerin kullanıldığı pek çok yazılım geliştirilmiştir. Bunların en bilinenleri **Tablo 2.1**'de açıklamaları ile birlikte verilmektedir. Bu yazılımların farklı CBS platformaları ile entegre olabilen veya kendilerine özgü oluşturulmuş arayüzleri

kullanıcılara kolaylık sağlamaktadır. Her yazılımın kapasitesine bağlı olarak farklı AKAÖ değişim modeli yöntemi (CA, ANN, lojistik regresyon gibi) bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Alibeyköy Havzası'ndaki AKAÖ değişikliklerinin tahminlenmesinde TerrSet LCM (TerrSet Land Change Modeler) yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım içerisindeki modelleme yaklaşımlarından çok katmanlı algılayıcı (Multilayer Perceptron, MLP) ve Markov zincirlerinin (Markov Chain, MC) hibrit olarak kullanıldığı MLP-MC yöntemi tercih edilmiştir. TerrSet LCM ve kullanılan MLP-MC yöntemi ile ilgili detaylı açıklama ve Alibeyköy Havzası'ndaki uygulaması bu tez çalışmasındaki **Kısım 3.4**'te yer almaktadır.

Tablo 2.1: En yaygın kullanılan arazi kullanımı/arazi örtüsü (AKAÖ) değişimi modelleme yazılımlarının açıklamaları ve referansları.

Yazılım ismi	Açılım	Açıklama	Referans
CLUE	Conversion of Land Use and its Effects	Sosyo-ekonomik sürücülerle mekânsal politikaları entegre eden mekânsal olarak açık bir AKAÖ değişim modeli sistemidir. İstatistiksel regresyon modelleri (çoğunlukla lojistik regresyon) kullanarak AKAÖ uygunluklarını tahmin eder.	(**Verburg ve diğ., 2002**)
FLUS	Future Land Use Simulation	Hücresel otomatlarla yapay sinir ağlarını birleştirerek mekânsal geçiş uygunluklarını dinamik olarak tahmin eder.	(**Liu ve diğ., 2017**)
DINAMICA EGO	Environment for Geoprocessing Objects	Hücresel otomat temelli, dinamik ve esnek yapıda bir yazılım olup; yüksek çözünürlüklü raster verilerle çalışabilir, senaryo tabanlı modelleme yapılabilir.	(**Soares-Filho ve diğ., 2009**)
SLEUTH	Slope, Land cover, Exclusion, Urbanization, Transportation, and Hillshade	Kentleşme ve AKAÖ değişimlerini modellemek için tasarlanmış hücresel otomat tabanlı bir modeldir; yol ağı, topoğrafya ve diğer mekânsal girdilerle çalışır.	(**Clarke ve diğ., 1996**)
TerrSet LCM	Land Change Modeler (TerrSet yazılımı içerisinde bir modül)	TerrSet içinde yer alan LCM modülü, CA-Markov entegrasyonu, geçiş uygunluk modellemesi ve çok senaryolu AKAÖ tahminleri sunar.	(**Eastman, 2015**)
LUCAS	Land Use/Cover Area frame Survey	Avrupa Birliği tarafından yürütülen AKAÖ veri toplama sistemidir; modelden çok gözlem verisi sağlar ancak modelleme girdisi olarak yaygındır.	(**European Commission, 2020**)
MOLUSCE	Modules for Land Use Change Evaluation (QGIS yazılımı içerisinde bir eklenti)	QGIS eklentisi olarak çalışan bir araçtır. CA, lojistik regresyon, yapay sinir ağları gibi tekniklerle AKAÖ değişimini simüle eder.	(**Asia Air Survey, n.d.**)

2.3.2. Havza Modelleme Yaklaşımları

Bir su havzasındaki hidrolojik süreçleri benzeştiren çok sayıda hidrolojik modelleme aracı mevcuttur. Bu modeller farklı kabiliyetlere sahip olup kullanıcı için amaca yönelik hizmet eden araçlardır. İlk hidrolojik model olarak kabul edilen rasyonel metot, pik akışı doğrudan havza alanı, yağış şiddeti ve yüzey akış katsayısı ile ilişkilendirerek tahmin eder (**Mulvaney, 1860**). Yağış-akış ilişkisini anlamada geliştirilen bir diğer model olan birim hidrograf teorisi, bir havzaya belirli sürede düşen 1 cm'lik etkin yağışa karşılık oluşan yüzey akış hidroğrafını temsil eden yöntemdir (**Sherman, 1932**). Sonrasında geliştirilen hidrolojik model türleri havza sistemini farklı model yapılarına göre benzeştirmeyi ve havzadaki süreçleri hesaplamada farklı yaklaşımlar ile temsil etmeyi amaçlamıştır. Bu modeller CBS gibi bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte havza süreçlerini modellemede daha detaylı ve dinamik analizler yapabilen araçlara dönüşmüş; kullanıcıların AKAÖ, topografya ve iklim verilerini entegre ederek çok katmanlı simülasyonlar gerçekleştirmesine olanak sağlamıştır. Literatürde, bu modelleri farklı açılardan sınıflandırmak için çeşitli kriterler kullanılmaktadır (**Jajarmizadeh ve diğ., 2021**; **Devi ve diğ., 2015**). Hidrolojik modellerin başlıca sınıflandırma türleri; model davranışı (deterministik veya stokastik), modelin fiziksel temele dayanma düzeyi (ampirik, kavramsal veya fiziksel tabanlı), zaman ölçeği (sürekli veya olay bazlı) ve mekânsal çözünürlük (dağıtımlı olmayan, yarı dağıtılmış veya tam dağıtılmış) özelliklerine dayanmaktadır. **Tablo 2.2** bu sınıflandırma kriterlerini açıklamaları ile birlikte özetlemektedir. Her hidrolojik model, hedeflenen amaca yönelik bir araç olarak kullanılabilir. Örneğin, taşkın analizi çalışmalarında ihtiyaç duyulan taşkın pik debisini elde etmede olay bazlı toplu bir kavramsal model kullanılması uygun olurken, iklim değişikliği gibi uzun süreçleri ilgilendiren çalışmalarda sürekli modeller tercih edilmesi gerekir. Havzadaki hidrolojik süreçlerin detaylı mekansal analizi tam dağıtımlı fiziksel tabanlı modeller ile gerçekleştirilebilir. Öte yandan, havzada yalnızca hidrolojik değil yayılı kirletici yükleri ve/veya su kalitesi gibi değişkenlerin analizi ile ilgili çalışmalar için bu değişkenleri simüle edebilen havza modelleme yapıları gerekir. İstatistikçi George E.P. Box'a atfedilen "Tüm modeller yanlıştır ancak bazıları faydalıdır" argümanı (**Box, 1979**) farklı kapsitelere sahip hidrolojik modellerin gözlemi hiçbir zaman bire bir yansıtamayacağını ancak süreçleri anlamada faydalı olabileceğine işaret eder (**Akbaş ve Özdemir, 2022**). Bu bağlamda, gerçekleştirilecek çalışmanın hedefine uygun hidrolojik modelleme aracını seçmek önemli bir karar verme aşamasıdır.

Tablo 2.2: Hidrolojik modellerin sınıflandırılması ve yaygın kullanılan örnekleri.

Genel sınıflandırma kriteri	**Model türü**	**Tanım**	**Örnek modeller**
Model davranışı	Deterministik	Rastgelelik içermeyen ve fiziksel ya da ampirik eşitliklerle sistemin neden-sonuç ilişkisini tanımlayan yapılardır. Aynı girdilerle her çalıştırmada aynı sonuçları üretir.	HEC-HMS[1] (**Scharffenberg ve Fleming, 2006**), SWAT[2] (**Arnold ve diğ., 1998**), MIKE-SHE[3] (**Refsgaard and Storm, 1995**)
	Stokastik	Rastgelelik içeren ve sistemi olasılıksal yaklaşımla tanımlayan modellerdir. Belirsizliği yansıtmak için istatistiksel dağılımlar kullanır. Her çalıştırmada farklı sonuçlar üretebilir.	ARIMA, Monte-carlo tabanlı akış simülasyonları
Fiziksel temel	Ampirik (Kara Kutu)	Fiziksel süreçleri detaylandırmadan girdi-çıktı ilişkisini istatistiksel veya deneysel bağıntılarla kuran, veri odaklı ve hızlı çözümler sunan modellerdir.	Regresyon modelleri, Yapay sinir ağları
	Kavramsal (Gri Kutu)	Basitleştirilmiş fiziksel kavramlarla havzanın su döngüsünü temsil eden, depo temelli yapıdadır. Bazı parametreleri fiziksel, bazıları ise kalibrasyonla belirlenir ve havzanın ortalama davranışını simüle eder.	SWMM[4] (**Rossman, 2010**), Sacramento Modeli (**Burnash, 1995**), HBV[5] (**Lindstörm ve diğ., 1997**), TOPMODEL[6] (**Beven ve diğ., 2021**)
	Fiziksel tabanlı (Beyaz Kutu)	Suyun havza içindeki hareketini fiziksel yasalarla simüle eden, diferansiyel denklemler kullanan ve mekânsal-zamansal dağılımı ayrıntılı şekilde temsil eden modellerdir. Kalibrasyona daha az bağımlı olup parametreleri genellikle ölçülebilirdir.	MIKE-SHE, VIC[7] (**Gao ve diğ., 2010**)
Zaman ölçeği	Sürekli (Continuous)	Yıllar veya aylar süresince kesintisiz çalışarak su döngüsünü zaman içinde izler. Her adımda havzanın durumu güncellenir ve iklim verilerine dayalı olarak su bütçesi ile akım rejimi analizleri yapılmasını sağlar.	SWAT, HBV
	Olay bazlı (Event-based)	Kısa süreli tek yağış olayına odaklanarak yalnızca bu olayın oluşturduğu akışı simüle eder. Başlangıç koşulları sabit kabul edilir ve genellikle taşkın analizinde tasarım pik debisi hesabı için kullanılır.	HEC-HMS, Rasyonel metot
Mekansal yapı	Toplu (Lumped)	Havzayı tek bir birim olarak ele alır ve iç mekânsal farklılıkları dikkate almaz. Küçük havzalar için uygundur, büyük havzalarda ise duyarlılığı düşüktür.	GR4J[8] (**Perrin ve diğ., 2003**), IHACRES[9] (**Ye ve diğ., 1997**)
	Yarı dağıtılmış (Semi-distributed)	Havzayı alt birimlere (alt havza veya daha küçük anlamlı hidrolojik birimlere) ayırarak kısmen mekânsal farklılıkları yansıtır. Her birim ayrı simüle edilir ancak grid düzeyinde detay içermez.	SWAT, HEC-HMS, HBV, TOPMODEL
	Tam dağıtılmış (Distributed)	Havzayı grid düzeyinde detaylı temsil ederek her grid için ayrı hesaplama yapar. Yüzey ve yeraltı süreçlerini ayrıntılı yansıtır ancak yüksek hesaplama gücü gerektirir.	mHM[10] (**Samaniego ve diğ., 2010**), WRF-Hydro[11] (**Gochis ve diğ., 2015**), LISFLOOD (**Van Der Knijff ve diğ., 2008**)

[1] HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
[2] SWAT: Soil and Water Assessment Tool
[3] MIKE-SHE: Système Hydrologique Européen
[4] SWMM: Storm Water Management Model
[5] HBV: Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
[6] TOPMODEL: TOPography based hydrological MODEL
[7] VIC: Variable Infiltration Capacity
[8] GR4J: Génie Rural à 4 paramètres Journalier
[9] IHACRES: Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data
[10] mHM: Mesoscale Hydroologic Model
[11] WRF-Hydro: Weather Research and Forecasting model hydrological modeling system

Bu tez çalışmasında, **Tablo 2.2**'de sınıflandırılan havza model türlerine göre SWAT, Alibeyköy Havzası'nın hidrolojik dinamiklerini ve sediment yüklerini bilgisayar ortamında benzeştirmek için kullanılmıştır. Çoğu hidrolojik model yalnızca hidrolojik döngü elemanlarını modelleyen araçlar değil aynı zamanda erozyon, sediment, yayılı kirleticiler ve/veya su kalitesi değişkenlerini de modelleyebilen kapsamlı araçlar haline gelmiştir. **SWAT hem hidrolojik süreçleri hem de buna bağlı sediment taşınımı ve/veya yayılı kirletici yüklenmesi gibi süreçleri modelleyebilen bir araç olduğu için bu tez çalışmasında "hidrolojik model" yerine "havza modeli" ifadesi ile tarif edilmektedir.** SWAT modelinin bu tez çalışması için seçilmesindeki başlıca nedenler modelin hesaplama süreçlerinin AKAÖ girdi verilerine dayalı olması ve modelin sediment taşınımı dinamiğini de hesaplama kapasitesi olmasıdır. SWAT ile ilgili detaylı açıklama ve Alibeyköy Havzası'ndaki SWAT uygulaması bu tez çalışmasındaki **Kısım 3.5**'te yer almaktadır.

2.4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tezin temel kapsamını oluşturan başlıca konular ile ilgili gerçekleştirilen mevcut literatürdeki çalışmalar bu bölümde sunulmaktadır. İlk olarak, gelecekteki AKAÖ değişiminin tahmini ile ilgili örnek çalışmalar özetlenmiştir. İkinci olarak, AKAÖ ve/veya iklim değişikliğinin su havzaları üzerindeki etkilerini inceleyen örnek çalışmalar verilmiştir. Son olarak, bu tezde çalışma alanı olarak belirlenen Alibeyköy Havzası özelinde mevcut literatürde yer alan çalışmalar verilmiştir.

2.4.1. Gelecekteki AKAÖ Değişiminin Tahmini ile İlgili Örnek Çalışmalar

Geleceğe yönelik AKAÖ değişikliğinin tahminlenerek incelenmesi farklı çalışmalarda araştırma konusu olmuştur. Bu amaçla araştırmacılar AKAÖ değişikliğini yönlendirici faktörler ile dinamik olarak tahmin edebilen araçlar kullanmışlardır. Dünya genelinde çok sayıda çalışmada farklı bölgelerin AKAÖ durumları geleceğe yönelik modellenmiştir. Ülkemizde AKAÖ değişikliğinin geleceğe yönelik tahminleri üzerine yapılan örnek çalışmaların kapsamları devam eden paragraflarda özetlenmektedir.

Şevik (2006) tarafından yapılan çalışmada, Antalya'daki kentsel büyüme 2025 yılı için SLEUTH modeli ile tahmin edilmiştir. Tahmin için simülasyon 2003–2025 yılları arasında gerçekleştirilmiştir ve sonuçta simülasyon periyodu olan 23 yıl boyunca, 2025 yılına kadar kentsel alanlarda 9824 hektarlık bir artış elde edilmiştir.

Erdoğan (2011) tarafından yapılan çalışmada, İzmir ili Urla, Karaburun ve Çeşme ilçelerinde AKAÖ değişimini 1420 km^2'lik bir çalışma alanında CLUE-s ile incelenmiştir. Bu çalışmada, 1987–2000 ve 2000–2010 yılları arasında AKAÖ değişimi gözetilmiş ve 2010–2025 yılları arasındaki değişim tahminlenmiştir. Değişim analizinde elde edilen sonuçlara göre, alandaki en önemli değişimin, kentsel yapılar sınıfında yaşanan artışın olduğu görülmüştür. Bu artışa karşı tarım alanlarında benzer oranda bir azalmanın olduğu görülmüştür.

Atak (2013) tarafından Didim Yarımadası için yapılan çalışmada, farklı senaryolar ile çalışma alanı için 2035 yılına ait AKAÖ değişimi tahmin edilmiştir. Çalışmada SLEUTH modeli kullanılmıştır. Sonuçta, 2035 yılı için oluşturulan tüm senaryolardan elde edilen alan kullanımları değerlendirildiğinde, yapay yüzeylerin; orman, tarım ve diğer alan kullanımlarına göre daha çok artacağı ortaya çıkmıştır.

Abdi (2015) tarafından yapılan çalışmada, SLEUTH modeli kullanıalarak Bursa kentinin 2040 yılına kadarki büyümesi analiz edilmiştir. 2011–2040 yılları arasındaki kentsel büyüme ve AKAÖ değişimi iki senaryo ile tahmin edilmiştir. Uydu görüntüleri ve CBS verileriyle kalibre edilen model, mevcut büyüme senaryosunda 29000 hektar, planlı büyümede ise 14000 hektar kent alanı artışı öngörmüştür. En büyük kayıp çayır/mera alanlarında, en az değişim ise ormanlarda görülmüştür.

Çapan (2019) tarafından yapılan çalışmada, Adana kentinin 2050 yılına kadar kentsel büyümesi üç senaryo altında simüle edilmiştir. Simulasyonlar SLEUTH modeli ile gerçekleştirilmiştir. 1990–2016 yıllarına ait uydu verileri ve 2016 kent planı kullanılarak yapılan modelleme, planlanan yol projelerinin ve farklı büyüme eğilimlerinin etkilerini değerlendirmiştir. Sonuçlara göre, kent alanı ilk senaryoda %120, ikincide %62 ve en koruyucu senaryoda %50 oranında artış göstermektedir.

Sefer (2019) tarafından yapılan çalışmada, Dyna-CLUE modelil kullanılarak Uzungöl'deki AKAÖ değişimi 2015'ten 2050'ye kadar tahmin edilmiştir. Gelecekteki AKAÖ değişimlerinin haritalanması iki farklı senaryo için gerçekleştirilmiştir. Senaryo 1'de 2004 ve 2015 yılları arasında değişim hızının ve eğiliminin aynı şekilde devam etmesi halinde 2050 yılı için tahmin yapılmıştır. Senaryo 2'de ise 2004–2015 yılları arasında değişim hızının ve eğiliminin aynı şekilde devam ettiği ve buna ek olarak Uzungöl'ün göl kesiminin yakınında bir koruma bölgesi olması durumu için gelecekteki AKAÖ değişimi tahmin edilmiştir. Her iki senaryoda da eğimin

uygun olduğu, mevcut yerleşim ve anayollara yakın ziraat alanlarının yerleşime dönüştüğü görülmektedir.

Aksoy ve Kaptan (2020) tarafından yapılan çalışmada, AKAÖ değişimlerinin modellenmesi ve orman örtüsü dinamiklerinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada hücresel otomat- ve Markov yöntemi tercih edilmiştir. 2019–2039 dönemini kapsayacak şekilde gelecek AKAÖ durumunu yansıtan tahminler gerçekleştirilmiştir. Modelin doğruluğu, 2019 yılına ait simülasyon haritası ile aynı yıla ait kontrollü sınıflandırma haritası karşılaştırılarak test edilmiş ve yüksek oranında benzerlik elde edilmiştir. Çalışmada, iğne yapraklı, geniş yapraklı ve karışık ormanlar ile yerleşim, su ve tarım olmak üzere altı farklı sınıf üzerinden analiz yapılmıştır. 1999–2019 döneminde orman alanlarında, yerleşim alanlarında ve su yüzeylerinde artış gözlenmiş; buna karşılık tarım alanlarında bir azalma tespit edilmiştir. 2019–2039 dönemine yönelik simülasyon sonuçlarına göre, toplam orman alanında %2.4, yerleşim ve su alanlarında %3.7, tarım alanlarında ise %6.9 oranında azalma öngörülmektedir.

Canpolat ve Dağlı (2020) tarafından Elazığ ili için yapılan çalışmada, AKAÖ'deki değişim ve bunu etkileyen faktörler TerrSet LCM kullanılarak analiz edilmiştir. Jeomorfoloji, toprak, jeoloji, hidrografya, arazi kabiliyeti, uydu görüntüleri ve sosyo-ekonomik veriler dikkate alınarak 2030 yılına ait AKAÖ simülasyonu üretilmiştir. Bu süreçte Markov zinciri, yapay sinir ağları ve hücresel otomat modelleri birlikte kullanılmıştır. Sonuçlar, özellikle yerleşim ve tarım alanlarında belirgin artışlar, mera ve iç su yüzeylerinde ise azalma olacağını göstermektedir.

Çağlıyan ve Dağlı (2022) tarafından Diyarbakır ili üzerine yapılan çalışmada, AKAÖ değişimlerinin uzun dönemli etkileri FLUS modeli kullanılarak incelenmiş ve geleceğe yönelik projeksiyonlar yapılmıştır. 1984, 2002 ve 2020 yıllarına ait uydu görüntüleri nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi ile analiz edilmiştir. Gelecek AKAÖ simülasyonlarına dayalı olarak sınıflandırılmış görüntüler üzerinden yapılan değişim analizi ile 2038 yılına kadar olası değişimler öngörülmüştür. Elde edilen sonuçlar, kentsel büyümenin özellikle doğal ve yarı doğal alanların hızlı kaybına neden olduğunu, tarım, mera ve su kütlelerinde azalma yaşanacağını ve yapılaşmış alanların artacağını göstermektedir. Kentsel büyümenin, özellikle batı-kuzeybatı yönünde Elazığ ve Şanlıurfa Bulvarı doğrultusunda genişleyerek devam edeceği tahmin edilmektedir. Bu çalışma AKAÖ değişiminin yalnızca kırsal havzalarda değil, hızla büyüyen kent merkezlerinde de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Şenik ve Kaya (2021) tarafından yapılan çalışmada, AKAÖ değişikliği konusu Düzce'deki Melen Havzası'nın bir alt havzası olan Asarsuyu Havzası özelinde ele alınmıştır. Bu çalışmada, peyzaj kavramı doğal ve kültürel bileşenlerin, ekosistemlerin ve çevresel süreçlerin bütüncül bir etkileşim ağı olarak ele alınmakta ve manzara duyarlılığı temelinde kentsel büyümenin yönlendirilmesi amaçlanmaktadır. 2018–2036 ve 2036–2054 dönemlerini kapsayan iki farklı senaryo üzerinden AKAÖ değişimleri FLUS modeli ile simüle edilmiştir. Bu senaryolar doğrultusunda, özellikle manzara duyarlılığının yüksek olduğu alanlar tespit edilerek, bu bölgelerde kentsel yayılmanın sınırlandırılması önerilmiştir. Çalışma, ekolojik eşiklerin korunması açısından manzara duyarlılığı analizlerinin kentsel planlamaya entegre edilmesinin önemine dikkat çekmekte ve sürdürülebilir arazi yönetimi için stratejik bir yaklaşım sunmaktadır.

Aytaç (2022) tarafından AKAÖ'deki değişimlerin sektörel etkilerine odaklanarak yapılan çalışma Samsun ili örneğinde PLUS modeli (FLUS modelinin güncel versiyonu) ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, fındık bahçelerinin hızlı genişlemesinin gelecekteki AKAÖ üzerindeki etkileri mekansal-zamansal analiz teknikleriyle değerlendirilmiştir. Modelleme sürecinde, 2000–2020 yılları arasındaki AKAÖ verileri kullanılarak 2040 yılına yönelik projeksiyonlar oluşturulmuştur. Bulgular, fındık tarımının özellikle orman ve çayır-mera alanları aleyhine genişlediğini ve bu yayılımın doğal ekosistemler üzerinde önemli baskılar yarattığını ortaya koymuştur. Çalışma, tarımsal yayılımın planlı bir şekilde yönetilmemesi durumunda hem biyolojik çeşitlilikte hem de arazi bütünlüğünde ciddi kayıpların yaşanabileceğine dikkat çekmekte; dolayısıyla sektörel büyümenin ekolojik etkilerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Göncüler ve Köylü (2024) tarafından, Kayseri ili Melikgazi ilçesinde 2000–2020 dönemine ait AKAÖ değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmada AKAÖ tahminleri QGIS platformunda MOLUSCE eklentisi ile yapılmıştır. Uydu görüntüleri kullanılarak yapılan arazi kullanımı kategorileri sınıflandırılarak değişim analizleri yapılmıştır. Bu süreçte özellikle yerleşim alanlarında %143 oranında bir artış gözlenmiştir. 2030 ve 2040 yıllarına yönelik AKAÖ projeksiyonları üretilmiş; yerleşim alanlarının gelecekte de artmaya devam edeceği öngörülmüştür. Bulgular, hızlı kentleşmenin sürdürülebilir şekilde yönetilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır.

Tonyaloğlu (2025) tarafından yapılan çalışmada, Aydın ili örneğinde AKAÖ değişimlerinin karbon depolama ve habitat kalitesi gibi ekosistem hizmetleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada PLUS modelinden faydalanılmıştır. Üç senaryo kapsamında yapılan modelleme, tarımsal genişleme ve bitki örtüsü dönüşümlerinin başlıca değişim etmenleri olduğunu ortaya koymuştur. Çalılık ve orman alanlarındaki azalma ekosistem hizmetlerini olumsuz etkilerken, bu alanlara yönelik dönüşümler olumlu katkılar sağlamıştır. Ekosistem hizmeti odaklı senaryo, hem ekolojik hem ekonomik faydaları maksimize etme açısından en etkili yaklaşım olarak öne çıkmıştır.

2.4.2. AKAÖ ve İklim Değişiminin Su Havzalarına Etkileri ile İlgili Örnek Çalışmalar

Literatürdeki farklı çalışmalarda AKAÖ ve/veya iklim değişimi hidrolojik modeller ile birlikte kullanılarak farklı çalışma alanlarındaki bu değişikliklere bağlı sonuçlar değerlendirilmiştir. Devam eden paragraflarda bu konuya odaklanan dünyanın farklı bölgelerinde gerçekleştirilmiş örnek çalışmaların kapsamları özetlenmektedir.

Park ve diğ. (2011) Güney Kore'deki dağlık bir havzadaki potansiyel iklim ve AKAÖ değişikliklerinin hidrolojik etkilerini değerlendirmiştir. Bu çalışmada, üç zaman periyodu için (2010–2039, 2040–2069 ve 2070–2099) tahmin edilen iklim verileri istatistiksel ölçek küçültme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Gelecekteki durum, mekansal bilgilerle temsil edilen 11 yönlendirici faktör ile beş AKAÖ tipi için CLUE-s kullanılarak tahmin edilmiştir. İklim ve AKAÖ tahminlerinin havzadaki hidrolojik bileşenler üzerindeki etkisi SWAT modeli ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, öngörülen 2070–2099 sıcaklık ve yağış değişiklikleri, orman alanlarındaki azalma ve kentsel alanlardaki artış için, iklim değişikliği senaryosuyla birlikte AKAÖ değişikliğinin de dikkate alınması (+%55.4), tek iklim ve tek AKAÖ değişikliği senaryolarına göre daha fazla akarsu akışı değişikliğine neden olmuştur (sırasıyla +%39.8 ve +%10.8). Gelecekteki yağışlarda tahmin edilen büyük artışın ve buna karşılık gelen orman arazisindeki azalışın, özellikle yüzey akışı ve akarsu akışı üzerinde önemli etkileri olacağı tahmin edilmiştir. Bu nedenle, olumsuz hidrolojik etkileri azaltmak için çalışma havzasındaki su kaynakları planlamasında hem AKAÖ hem de iklim değişikliklerinin dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır.

Zhou ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada şehirleşmenin hızlı geliştiği Yangtze Nehir Deltası bölgesinde hidrolojik tepkiler SWAT modeli kullanılarak incelemiştir. Bu çalışmada, AKAÖ değişimi geleceğe yönelik tahmin simülasyonları CLUE-s ile belirlenmiştir. Daha

sonra, simülasyonlardan elde edilen AKAÖ tahminleri hidrolojik modele entegre edilmiştir. Gelecekteki kentleşmenin akarsu akışları üzerindeki etkisini nicel olarak değerlendirmede iyi bir yaklaşım olduğu sonucuna varılmıştır.

Zhang ve diğ. (2013) çalışmalarında Çin'deki Miyun Rezervuarı yukarı havzasında farklı AKAÖ senaryoları altında kirlilik yüklerini simüle etmek için CLUE-s ile AKAÖ tahmin modeli sonuçları ve SWAT havza modelini birlikte kullanmıştır. Sonuçlar, farklı senaryolar altında AKAÖ yapısındaki değişikliklerin noktasal olmayan kaynak kirlilik yükünü önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Hidrolojik model ve AKAÖ değişim modelinin birleştirilmesi, tarımsal noktasal olmayan kaynaklı kirlilik kontrolü için yapılan değerlendirmede etkili bir yöntem olmuştur.

Liu ve diğ. (2014) tarafından Çin'in Hunhe-Taizi Nehri Havzası'nda yapılan çalışmada, CLUE-s ile AKAÖ değişimi tahminleri ve SWAT havza modeline dayalı olarak kentsel planlama, tarihsel eğilimler ve ekolojik koruma senaryolarında noktasal kaynaklı kirlilik yükü modellenmiştir. Noktasal kaynaklı kirlilik parametreleri olarak toplam azot ve toplam fosfor seçilmiştir. Noktasal kaynaklı kirliliğin esas olarak kuru tarım arazilerinden, çeltik tarlalarından, kırsal ve kentsel alanlardan geldiği görülmüştür. Toplam azot ve toplam fosforun mekansal dağılımı, 57 alt havzada aynı eğilimi sergilemiştir. TN ve TP, kentsel alanı ve tarım arazisini yoğunlaştıran batı ve orta ovalarda en yüksek noktasal kaynaklı kirlilik yüküne sahiptir. Noktasal kaynaklı kirlilik yükü, kentsel planlama ve tarihi eğilimler senaryolarında artacak ve kentsel planlama senaryosunda daha da yüksek olacağı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, ekolojik koruma senaryosunda noktasal kaynaklı kirlilik yükü azalmıştır. Üç senaryoda gözlemlenen farklılıklar, AKAÖ'nün noktasal kaynaklı kirlilik üzerinde bir dereceye kadar etkisi olduğunu göstermiştir.

Wagner ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada Hindistan'ın Pune kentinde hızla gelişen bir su havzası incelenmiştir. Bu kapsamda, AKAÖ'deki değişikliklerin su kaynakları üzerindeki potansiyel gelecekteki etkilerini analiz edebilmek için SLEUTH modeli AKAÖ projeksiyonları, dinamik bir şekilde SWAT modeline entegre edilmiştir. Bu çalışmada AKAÖ değişikliği modelinden elde edilen tahminler, hidrolojik modele dinamik bir girdi olarak kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, özellikle hızla değişen ortamlarda hem dinamik AKAÖ değişikliği hem de iklim değişikliğinin uygulanmasının su dengesindeki mevsimsel ve dereceli değişiklikleri değerlendirmek için uygun göründüğü sonucuna varılmıştır.

Feng ve Shen (2021) yaptıkları çalışma ile Çin'de bulunan Miyun Rezervuarı havzasındaki iklim ve AKAÖ değişikliğinin bütünleşik etkilerini hafifletmeye yönelik önlemleri değerlendirmeyi amaçlamıştır. Noktasal olmayan kirlilik kaynakları SWAT havza modeline girilerek gelecekteki iklim senaryolarının değerlendirilmesi yapılmıştır. CLUE-s AKAÖ değişim modeli ile gelecek yıllara ait değişiklikler tahminlenerek havza modeline girdi olarak kullanılmıştır. Çalışmada üç gelecek AKAÖ senaryosu oluşturulmuştur: Tarihsel eğilim senaryosu, mekansal konfigürasyon dikkate alınmadan ekolojik koruma senaryosu ve ekolojik koruma senaryosu. Mekansal konfigürasyonu dikkate alan ekolojik koruma senaryosu, sediment, toplam azot ve toplam fosfor üzerindeki en iyi azaltma etkisini göstermiştir. Bu nedenle, AKAÖ değişikliğinin bir parçası olarak bölgeye özgü tercih değişkenlerinin eklenmesinin daha iyi kirletici kontrol etkileri sağladığı sonucuna varılmıştır.

Ülkemizde, gelecek AKAÖ ve/veya iklim değişimi tahminlerini hidrolojik modeller ile birlikte kullanılarak, bu değişikliklerin havzalar üzerinde etkisini inceleyen birkaç çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar devam eden paragraflarda özetlenmektedir.

Altürk (2017) tarafından yapılan çalışmada, Trakya Bölgesi'nde 2023, 2030, 2050 yılları için farklı senaryolara göre AKAÖ değişikliği CLUE-s ile belirlenmiş ve geleceğe yönelik AKAÖ değişikliği ile birlikte olası iklim değişikliğinin su kaynaklarına kantitatif etkisi ortaya konmuştur. Sektörler arası su tahsisinin mevcut (2015) ve gelecekteki durumu (2023–2030) incelenerek taşkın riskine karşı duyarlı alanlar belirlenmiştir. Ayrıca, araştırma bölgesinin bir alt havzası olan Bakırca Havzası'nın su bütçesine etkisi belirlenmiştir. Bunun için, sektörel su tahsisi modellemesi yapılmıştır. Taşkın ve sel riski duyarlılığının belirlenmesinde çok kriterli karar verme analizi kullanılmıştır. Modelleme sonuçları, 2023–2050 yılları arasında artan şehirleşme ve sanayileşmenin yüzey akışı artıracağını göstermektedir. Bu durumun, toprak nemi ve yeraltı suyu beslenimini azaltırken; erozyon, su kirliliği ve sel riskini artıracağı bildirilmiştir.

Ağaçsapan (2021) tarafından yapılan çalışmada, Porsuk Nehri Havzası'ndaki su kaynaklarının mekânsal-zamansal dağılımları ortaya konulmuştur. Çalışmada öncelikle 1985–2013 yıllarını kapsayan referans dönem 2012 yılı AKAÖ ve küresel iklim verileri ile Porsuk Havzası modellenmiştir. AKAÖ değişimi gelecek periyotlar için model destekli yöntemle tahmin edilmiştir. Değişen AKAÖ ve iklim parametrelerinin havzada mavi ve yeşil su kaynaklarına etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada AKAÖ değişiklikleri TerrSet LCM ile, hidrolojik

modelleme ise SWAT kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, referans dönem (1985–2013) için Kütahya ilinin mansabından Eskişehir ili kent merkezine kadar olan bölgenin su temini açısından daha güvenli olduğu görülmüştür. 2010–2099 periyodunda hem iyimser hem de kötümser senaryoda mavi su akışı havza genelinde değişimi incelenmiştir. Yağış ve sıcaklık unsurlarındaki değişikliklerin yeşil su kaynaklarını büyük ölçüde etkilediği görülmüştür.

Gunacti ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada, Gediz Nehri Havzası'nda yer alan Marmara Gölü'nün, iklim ve AKAÖ değişiklikleri altındaki hidrolojik durumu değerlendirilmektedir. Araştırma kapsamında, su dengesi modeli kullanılarak gölün mevcut durumu analiz edilmiş; gelecekteki AKAÖ ve su talebi projeksiyonları ile birlikte gelecek iklim senaryosu altında 2050 yılına kadar olan koşullar değerlendirilmiştir. Tüm senaryolar, gölün kuruyarak ekosistem hizmetlerini sürdüremeyeceğini göstermektedir.

Gunacti ve diğ. (2022) ve **Boyacioglu ve diğ. (2024)** tarafından Küçük Menderes Havzası'nda yapılan çalışmalar, AKAÖ değişikliklerinin hidrolojik denge ve su kalitesi üzerindeki etkilerini bütüncül bir şekilde değerlendirmektedir. İlk çalışmada, 2050 yılına kadar AKAÖ projeksiyonları makine öğrenmesi yöntemleriyle modellenmiş; bu senaryolar hidrolojik model ile entegre edilerek havzanın su dengesindeki değişimlerin farklı AKAÖ sınıfları geçiş türlerine göre analiz edilmesi sağlanmıştır. Sonuçlar, orman alanlarının sulanmayan tarım arazilerine dönüşümünün %22.9 oranına ulaşarak yıllık akışlarda %9.1'lik bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Bu çalışmayı takip eden ikinci araştırmada ise benzer modelleme yaklaşımı kullanılarak AKAÖ ve iklim değişikliğinin yüzey sularına taşınan nitrat yükleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. AKAÖ sınıfları geçişlerinin nitrat taşınımını nasıl etkilediği, yine AKAÖ tiplerine göre gruplandırılarak analiz edilmiş ve özellikle tarımsal dönüşümlerin nitrat kirliliğini artırdığı belirlenmiştir. Bu çalışmalar, AKAÖ'deki değişimlerin yalnızca su miktarı değil, aynı zamanda su kalitesi üzerinde de önemli sonuçlar doğurduğunu vurgulamaktadır.

2.4.3. Alibeyköy Havzasına İlişkin Çalışmalar

Mevcut literatürde Alibeyköy Havzası özelinde yapılan çalışmalar havzadaki kentleşme artışı sebepli AKAÖ dönüşümleri, buna bağlı hidrolojik etkiler ve çözüm teknikleri, taşkın analizleri ve baraj gölünün sedimentasyonu gibi konularda gerçekleştirilmiştir. Devam eden paragraflarda Alibeyköy Havzası özelinde yapılan çalışmaların kapsamları sunulmaktadır.

Çokoyoğlu (2008) tarafından yapılan çalışmada, Kağıthane ve Alibeyköy Havzaları'nda meydana gelen AKAÖ değişimleri ve bu değişimlerin neden olduğu sorunlar incelenmiştir. Çalışmanın bir bulgusu olarak, TEM bağlantı yolunun ve Boğaziçi Köprüsü'nün inşasının, AKAÖ değişimini hızlandırarak bu bölgede bulunan su havzalarını olumsuz etkilediği bildirilmiştir. 1950 yılına ait verilerle 2006 yılı uydu görüntüleri karşılaştırıldığında, Alibeyköy Havzası'nda yerleşim alanlarının %0.02'den %10'lara, Kağıthane Havzası'nda ise %18–20'lere kadar arttığı görülmüştür. Bu durumun havzalarda ciddi siltasyon sorunlarına neden olacağı bildirilmiştir. Çalışma bir diğer sonucu, su havzasında yapılan ağaçlandırmalarda iğne yapraklı türlerin tercih edilmesinin su bütçesini olumsuz etkilemiş olmasıdır.

Geymen ve Baz (2007) tarafından yapılan çalışmada, İstanbul'daki AKAÖ değişimleri zamansal olarak analiz edilmiştir. Çalışma, 1990 ve 2005 yıllarına ait uydu görüntülerinin değerlendirilmesine dayanmakta olup, nüfus, su, orman, sanayi ve topoğrafya gibi çeşitli öznitelik verileriyle desteklenerek İstanbul için kapsamlı bir coğrafi veri tabanı oluşturulmuştur. Çakıştırma analizleri aracılığıyla çalışma alanında meydana gelen AKAÖ değişiklikleri ortaya konmuş; uydu görüntülerinin kentsel dönüşüm süreçlerini ve şehrin makro formundaki değişimleri izleme potansiyeli tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 1995–2005 yılları arasında Alibeyköy Havzası'ndaki yapılaşmış alanlarda %15.89 oranında artış gerçekleştiği bildirilmiştir.

Çelik ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, Alibeyköy Barajı'ndaki sedimantasyon incelenmiştir. 1978 yılına ait batimetrik harita ile 2007 ölçümleri karşılaştırılamamış, sediment miktarı arazi gözlemleriyle tahmin edilmiştir. Baraj tabanında açılan 33 profilde 1.5–1.7 m derinliğe kadar düzensiz sediment katmanları tespit edilmiştir. Üstteki 20–30 cm'lik alüvyon tarım alanı olduğu için tamamen sediment sayılmamıştır. Ayrıca, eski yapı kalıntıları ve su kemeri fotoğrafları incelenmiştir. Sonuçta, baraj ortasından kret hattına doğru yaklaşık 10 cm silt birikimi belirlenmiş, gerekli önlemler önerilmiştir.

Serengil ve diğ. (2012) tarafından İstanbul'daki Alibeyköy, Sazlıdere ve Kağıthane havzalarında gerçekleştirilen çalışmada, akarsu koridorlarının ekolojik işlevleri ile su kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Toplam 66 alt havzada yürütülen analizlerde akarsular, ekolojik su kalitesi, kullanım su kalitesi, kıyı bütünlüğü, işlevsellik ve habitat potansiyeli açısından incelenmiştir. Bulgular, kentsel alanlardaki akarsuların işlevselliğini büyük ölçüde kaybettiğini, %10'unun kanalize edildiğini ve özellikle nitrat konsantrasyonlarında ciddi

kirlilik görüldüğünü ortaya koymuştur. Çalışma, kıyı ekosistemlerinin entegrasyon ve izlenmesinin, su havzası yönetimi için kritik bir gösterge olduğunu vurgulamaktadır.

Akdoğan ve Güven (2016) tarafından yapılan çalışmada, Alibeyköy Havzası'nda akış üretimini etkileyen ana hidrolojik ve hidrolik parametreler incelenmiştir. 55 yıllık yağış verisi kullanılarak yapılan model simülasyonlarında, AKAÖ haritaları ile geçirimsizlik değerleri belirlenmiştir. Tek parametreli duyarlılık analizi sonucunda, alt havza alanı, yağış ve kanal derinliğinin akış üretimi üzerinde en etkili parametreler olduğu; geçirimsizlik ve eğimin ise daha az etkili olduğu bulunmuştur.

Dikici (2016) tarafından yapılan çalışmada, Alibeyköy Havzası için hidrolojik ve hidrolik modeller geliştirilmiş; sahada yapılan hidrometeorolojik ölçümler doğrultusunda bilgisayar destekli bir model oluşturulmuştur. Bu model kullanılarak taşkın yayılım haritaları üretilmiş ve olası taşkın risklerine karşı kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Artan nüfus ve kentleşmeye bağlı olarak yerleşim alanlarında meydana gelen değişimler de modele entegre edilerek, gelecekteki taşkın senaryoları analiz edilmiş ve bu doğrultuda havza yönetimine yönelik öneriler sunulmuştur. Çalışma, Alibeyköy Havzası'nda taşkın risklerinin azaltılması ve sürdürülebilir arazi kullanım planlamasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Gülbaz ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, Alibeyköy Havzası için geliştirilen hidrolojik model, bölgedeki istasyonlardan elde edilen yağış ve akış verileri kullanılarak kalibre edilmiştir. Daha sonra, Alibeyköy Havzası'nda sel gibi kentleşmenin olumsuz etkilerini azaltmak için ana akarsulara yakın alanlarda düşük etkili kentleşme uygulamaları modele uygulanmıştır. Biyo-tutmalar, bitkisel hendekler, geçirgen kaldırımlar ve sızma hendekleri gibi çeşitli düşük etkili kentleşme uygulamalarının dahil edildiği senaryolar, bu uygulamaların sele neden olan pik debi üzerindeki etkisini gözlemlemek için simüle edilmiştir.

Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan (2018) tarafından yapılan çalışmada, Alibeyköy Havzası için düşük etkili kentleşme yöntemlerinin toplam askıda katı madde üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, havza için kalibre edilen bir hidrolojik model kullanılmıştır. Modelde, biyo-tutma, bitkisel hendekler, sızma hendekleri ve geçirimli kaldırımlar gibi farklı düşük etkili kentleşme uygulamaları tek tek ve bir arada değerlendirilmiştir. Sonuçlar hem ayrı ayrı hem de birlikte uygulandıklarında bu yöntemlerin toplam askıda katı madde konsantrasyonunu anlamlı şekilde azalttığını göstermiştir. Özellikle kuvvetli yağışlarda, biyolojik tutma alanları ve bitkisel hendeklerin toplam askıda katı madde azaltımında daha etkili olduğu gözlenmiştir.

Dikici ve Kazezyılmaz-Alhan (2018) tarafından yapılan çalışmada, Alibeyköy Havzası'nda olası taşkın debileri farklı hidrolojik modelleme yöntemleriyle hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Taşkın debilerinin hesabında istatistiksel, sentetik ve deterministik yöntemler kullanılmıştır. Yıllık maksimum akış verileri istatistiksel yöntemlere, 50 ve 100 yıllık yağış verileri sentetik yöntemlere, eş zamanlı yağış-akış ölçümleri ise hidrolojik modelin kalibrasyonuna temel oluşturmuştur. Elde edilen sonuçlar yöntemlerin performansını karşılaştırmaya olanak sağlamış ve havzanın taşkın risk yönetimi için farklı yaklaşımların önemini ortaya koymuştur.

Şerbetçi (2019) tarafından yapılan çalışmada, İstanbul'un 1950'li yıllardan itibaren yaşadığı hızlı kentsel büyümenin özellikle kuzeye doğru yayılmasıyla birlikte orman alanları ve içme suyu havzalarının önemli ölçüde etkilendiği vurgulanmıştır. Bu bağlamda, Alibeyköy Havzası'nın sürdürülebilirliği açısından kentsel yayılmanın uygunluğunu değerlendirmek amacıyla bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada litoloji, eğim, bakı, havza kuşakları, akarsulara uzaklık, arazi kullanımı ve arazi kullanım yetenek sınıfı gibi çeşitli coğrafi kriterler kullanılarak CBS tabanlı ağırlıklı çakıştırma yöntemi uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, Alibeyköy Havzası'nın %78'lik kısmı yerleşime uygun olmayan alanlardan oluşurken, yalnızca %15'i yerleşime uygun veya çok uygun alanlar olarak değerlendirilmiştir. Uygun olmayan alanların büyük ölçüde havzanın kuzeyinde, uygun alanların ise güney kesiminde yer aldığı belirlenmiştir. Bu bulgular, içme suyu havzalarının korunması açısından planlı ve sınırlayıcı kentsel gelişme stratejilerinin gerekliliğine işaret etmektedir.

Ahi (2021) tarafından yapılan çalışmada, Terkos ve Alibeyköy Havzaları'ndaki AKAÖ değişimleri uydu görüntüleri kullanılarak analiz edilmiştir. Terkos Havzası için 2013, 2015 ve 2020; Alibeyköy Havzası için ise 2013, 2015, 2018 ve 2020 yıllarına ait uydu görüntüleri incelenmiştir. Orman, tarım, su ve yerleşim alanlarındaki değişiklikler, uydu görüntülerinin denetlenmiş sınıflandırması yöntemiyle belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 2013 ile 2020 yılları arasında yerleşim alanlarında yaklaşık %53 oranında artış yaşanmıştır. Bu artışın en önemli nedeni, havza sınırları içinde inşa edilen 3. İstanbul Havalimanı'dır. Havalimanı, başta sanayi ve nüfus olmak üzere bölgedeki hareketliliği artırmıştır. 2013–2015 döneminde orman alanlarında bir miktar azalma görülmüş, ancak 2015–2020 yılları arasında yapılan ağaçlandırma çalışmaları sayesinde orman alanlarında kısmi bir artış sağlanmıştır. Su miktarında yıllar içinde sınırlı bir azalma gözlemlendiği bildirilmiştir.

Bakırcı (2022) tarafından yapılan çalışmada, Alibeyköy Havzası'nda kentleşmenin taşkın riski üzerindeki etkisi incelenmiştir. 1990–2018 yıllarına ait AKAÖ haritaları ve nüfus verileri kullanılarak analizler yapılmıştır. Üç farklı kentleşme senaryosu oluşturulmuştur. Her senaryo için hidrolojik ve hidrolik modeller geliştirilmiş ve modeller kalibre edilmiştir. 1990–2100 dönemine ait taşkın debisi, taşkın süresi ve yayılım haritaları üretilmiştir. Sonuçlar, artan kentleşmenin taşkın riskini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir. Çalışmada ayrıca sel kapanı, bekletme havuzları ve taşkın duvarları gibi yapısal önlemlerin etkileri değerlendirilmiş ve Alibeyköy Havzası için uygulanabilir taşkın yönetimi önerileri sunulmuştur.

Dikici ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada, kontrolsüz kentleşme ve iklim değişikliğine bağlı taşkın risklerini değerlendirmek amacıyla Alibeyköy Havzası'nda taşkın tehlike haritaları üretilmiştir. Öncelikle, hidrolojik bir model oluşturulmuş ve yerel yağış, buharlaşma ve akış verileriyle kalibre edilmiştir. Ardından, 50 ve 100 yıllık taşkın senaryoları simüle edilerek taşkın derinliği ve yayılımı haritalanmıştır. Sonuçlar, özellikle havzayı oluşturan derenin orta kesiminde yer alan Arnavutköy'ün yüksek taşkın riski altında olduğunu ortaya koymuştur.

Dikici ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada, Alibeyköy Havzası'nda taşkın frekans analizine yönelik olarak 44 yıl süreli yıllık maksimum akış verisi değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında yedi farklı olasılık dağılımı kullanılmıştır. Bunlar; normal (N), iki parametreli lognormal (LN2), üç parametreli lognormal (LN3), uç değer tipi I (Gumbel), genelleştirilmiş uç değer (GEV), Pearson Tip III (P3) ve Log-Pearson Tip III (LP3) dağılımlarıdır. Taşkın debilerini tahmin etmekte en uygun dağılımın belirlenmesi amacıyla Kolmogorov-Smirnov (K-S) ve PPCC (Probability Plot Correlation Coefficient) testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, GEV ve Gumbel dağılımları taşkın tahmininde en başarılı performansı gösteren dağılımlar olarak öne çıkmıştır.

2.4.4. Tezin Literatüre Katkıları

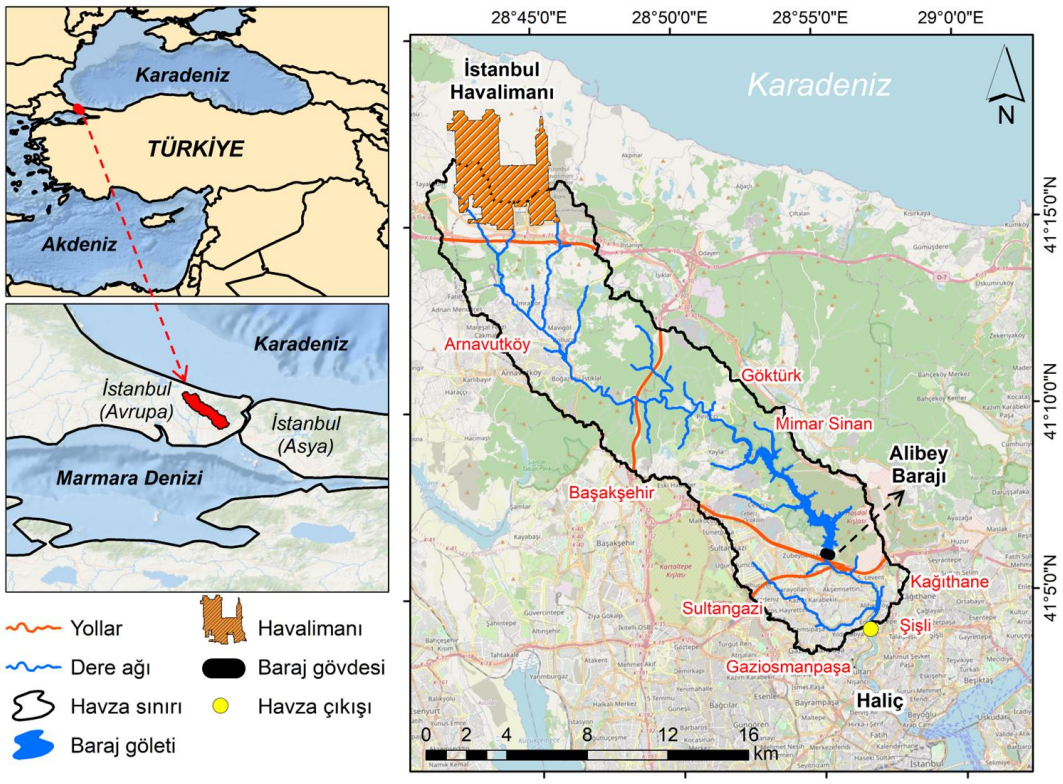
Literatürde yapılan çalışmalar AKAÖ ve iklim değişikliğinin su havzaları üzerindeki etkilerinin kaçınılmaz olduğu konusunda ortak bir fikirde birleşmektedir. Hidrolojik modellerin AKAÖ değişim modelleri ile birlikte kullanılması oldukça etkili bir yöntem olarak görülmektedir. Bunun yanında, AKAÖ ve iklim değişikliği etkilerinin kombine senaryolar olarak incelenmesi önemlidir. Ayrıca, literatürdeki çalışmalar incelendiğinde özellikle ülkemizde AKAÖ ve iklim değişikliğinin su miktarı ve kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesine yönelik çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. AKAÖ'de meydana gelen değişimlerin bölgesel bazda incelenmesi gerektiği ve bu incelemelerin çıktılarının özellikle karar vericiler tarafından dikkate alınması gereken hususlar olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışması ile kentleşme baskısı altındaki bir içme suyu havzasında AKAÖ ve iklim değişikliğinin havza hidrolojisi ve taşınan sediment yükleri açısından değerlendirilmesi için bir dizi metodoloji önerilmektedir. AKAÖ değişimi tahminleri için makine öğrenmesi tabanlı bir model tekniği kullanılmaktadır. Havza hidrolojisi ve sediment yüklerinin simülasyonunda ise yarı-dağılımlı fiziksel-tabanlı bir modellemeden faydalanılmaktadır. Tez çalışması, kentsel bir içme suyu havzasında, bu iki modelleme tekniğini bir araya getirerek geleceğe yönelik tahminler elde etmede çoklu senaryolar ile yenilikçi bir yöntem sunması açısından mevcut literatüre katkı sağlamaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. ÇALIŞMA ALANI

Alibeyköy Havzası İstanbul'un Avrupa Yakası'nda kuzeybatı–güneydoğu yönünde konumlanmıştır. Terkos Havzası ile sınır komşusu olan memba bölgesindeki kuzeybatı kısımları Arnavutköy ilçesinin ormanlık alanlarını içerirken, güneydoğusundaki mansap bölgesinde Kağıthane ve Gaziosmanpaşa gibi yüksek nüfus yoğunluğuna sahip ilçeler yer almaktadır. Havza, Alibey Deresi (veya Molova Deresi) ana kolu ile onu besleyen Cebeci, Boğazköy ve Bolluca gibi daha küçük yan derelerden oluşmaktadır. Bu derelerin çoğu, İstanbul'un kuzeyindeki alanlardan kaynaklanarak güneye doğru akıp Alibey Barajı'na ulaşmakta, ardından Haliç'e dökülmektedir (**Şekil 3.1**). Alibey Barajı'nın gövdesine kadar yaklaşık 160 km^2, İstanbul Boğazı'na (Haliç) döküldüğü noktaya kadar ise yaklaşık 190 km^2 drenaj alanına sahiptir.



Şekil 3.1: Alibeyköy Havzası'nın coğrafi konumu, havza sınırları ve dere ağı; İstanbul Havalimanı, bağlantı yolları ve Alibey Barajı'nın havza içerisindeki konumları.

Yıllık 36 milyon metreküp kapasiteye sahip olan Alibey Barajı İstanbul'un önemli içme suyu barajlarından biridir. Terkos Gölü'nden gelen suyun aktarılmasında bir aracı görevi üstlenmektedir. Ayrıca, Kağıthane Arıtma Tesisleri'ne su Terkos ve Alibey Baraj'larından gelmektedir (**İSKİ, 2021**).

Alibeyköy Havzası'na ait topografik özellikler tez çalışmasının ikinci kısmında açıklanan yükseklik verisi kaynağına bağlı olarak analiz edilmiştir. **Şekil 3.2-a**'da havzaya ait yükseklik haritası ile hipsometrik eğri gösterilmektedir. Buna göre, havzanın yüksekliği deniz seviyesinden (0 m) itibaren 241 m'ye ulaşmaktadır ve ortalama yüksekliği yaklaşık 105 m'dir. Hipsometrik yükseklik ise 110 m olarak hesaplanmıştır. **Şekil 3.2-b**'de havzanın eğim haritası verilmektedir. Buna göre, ortalama eğim yaklaşık %14.2 olarak belirlenmiştir. Havza alanının yaklaşık olarak %36'lık kesimindeki eğimler havza ortalama eğiminden düşükken geri kalan bölgelerde, özellikle baraj göletine yakın dik yamaç kısımlarında, eğimler daha yüksek (%20'den büyük) değerlerdedir.

Alibey Barajı'nın inşa edildiği 1970'li yıllarda bölgedeki yerleşim alanlarının oldukça seyrek olduğu ve havzanın genel olarak ormanlarla ve doğal bitki örtüsü ile kaplı olduğu bilinmektedir (**Ahi, 2021**). Son yıllarda, bölgedeki 3. Havalimanı, 3. Boğaz Köprüsü ve çevre yolları, Kanal İstanbul gibi yeni altyapı gelişmeleri havzanın arazi kullanımı yapısını önemli ölçüde değiştirmiştir ve değiştirmeye devam etmektedir. Bu mega altyapı projeleri havzada nüfus artışıyla birlikte kentleşme baskısı yaratmaktadır. Dolayısıyla, önümüzdeki on yıllarda kentleşmede önemli bir artış öngörülmektedir. Önlemler alınmazsa, bu değişimler gelecekte ekosistem üzerinde olumsuz etkilere yol açma potansiyeline sahiptir (**Gülbaz ve diğ., 2017**).

Havalimanının inşa edilmesi çevresindeki ilçeleri cazibe merkezi haline getirerek nüfus artışına ve dolayısıyla yerleşim alanlarında ani bir genişlemeye sebep olmuştur. Havzada yer alan Arnavutköy ilçesi, havalimanının inşaatı etkisiyle son yıllarda hızlanan yapılaşmaya maruz kalan ve mekânsal genişlemeye açık bir ilçedir. Göktürk ve Mimar Sinan gibi havzanın doğu sınırlarının hemen kıyısında yer alan bölgelerdeki yerleşim alanlarının da havza sınırları içerisine doğru bir genişleme trendi göstermesi, havzadaki kentleşme baskısını artıran diğer unsurdur. Ayrıca, havza sınırları içerisinde yoğun madencilik faaliyetleri görülmektedir. Özellikle, Cebeci taş ocakları havzanın AKAÖ durumunda dinamik değişken bir etki oluşturmaktadır. Taş ocakları çevresindeki madencilik faaliyetleri için konumları sürekli değişkenlik gösteren yapay göletler kurulmaktadır. Bu dinamik değişkenlik havzadaki AKAÖ yapısını sürekli değiştiren bir etki oluşturmaktadır (**Peker ve Gülbaz, 2025**).

Havza alanı ve çevresinde iklim mevsimlere göre belirgin değişimler göstermektedir. Yazlar yoğun sıcaklarla (30°C'den yüksek), sonbaharlar ortalama sıcaklıklarla (15°C civarı) geçmekte ve kıştan ilkbahara geçişte değişken hava koşulları görülmektedir. Havzadaki yıllık ortalama sıcaklık 15°C civarındadır. Yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 800 mm'dir. Yağışlar genellikle Ekim ayında başlamakta ve Mayıs ayına kadar devam ederek tüm kış dönemini kapsamaktadır. Yaz ayları oldukça kuraktır ve bu aylarda havzaya düşen yağış miktarı oldukça düşüktür.

Alibeyköy Havzası iklim değişikliği kaynaklı tehlikelere karşı oldukça hassastır. Gelecek yıllarda beklenen sıcaklık artışları ve yağış miktarındaki değişimler bu havzanın hidrolojik sistemini ve su kalitesini doğrudan etkileyecektir. IPCC 6. Değerlendirme Raporu'nda söz konusu bölgede sıcaklıkların 1ºC ila 4.5ºC artış göstermesi, yağışların ise %30 oranında azalması ön görülmektedir. Değişen iklim koşulları ile ani yağışlardaki artış kentsel bölgelerde sel afetinin görülme sıklığını artırmaktadır. Kurak gün sayısındaki artış ise baraj doluluk oranını etkileyerek içme suyu miktarında düşüşlere sebep olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Alibeyköy Havzası'nın çalışma alanı olarak seçilmesindeki motivasyonlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Havzanın İstanbul gibi sürekli nüfus artışı gösteren bir mega kentin sınırları içerisinde yer almasının havzada ciddi bir insan etkili AKAÖ değişikliğine maruz kalıyor olması dikkat çekmektedir. Artan nüfus ile genişleyen ilçe merkezleri havzada şüphesiz bir kentleşme baskısı meydana getirmektedir.
2. Havzanın memba bölgesinde inşa edilen 3. Havalimanı'nın havza sistemi üzerindeki ani etkisinin incelenmesi elzemdir. Havalimanı inşaatı ile birlikte çevre bölgelerde havzayı etkileyen ciddi bir yapılaşma söz konusudur. Ormanlık alanların ve doğal bitki örtüsünün kısa sürede yapılaşmış bölgelere dönüşmesi havza hidrolojisi ve su kalitesi bakımından üzerinde çalışılması gereken önemli bir konudur.
3. Havzanın konumu, İstanbul gibi iklim değişikliğinin olası etkilerine oldukça hassas bir kent bölgesinde bulunmaktadır. Bu açıdan, Alibeyköy Havzası'nın sıcaklık ve yağış özellikleri gelecek yıllarda mekansal ve zamansal değişimlere uğrayacaktır ve bu değişimler havza hidrolojisini ve sediment yüklerini doğrudan etkileyecektir. AKAÖ ile birlikte iklim değişikliğinin Alibeyköy Havzası üzerindeki etkilerinin incelenmesi, gelecek yıllardaki sürdürülebilir havza yönetimi stratejilerine katkı sağlayacaktır.

4. Havzanın bir içme suyu havzası olması, havzayı meydana getiren derelerdeki suyun miktarı ve kalitesi bakımından araştırılmasını daha da önemli kılmaktadır. Önceki maddelerde belirtildiği üzere havzadaki AKAÖ ve iklim değişikliği etkilerini gelecek yıllardaki durumlar için ortaya koyan hidrolojik ve sedimentasyon odaklı analizler İstanbul nüfusuna içme suyu sağlayan bir baraj havzası için kritiktir.

3.2. VERİ

Tez çalışmasının bu kısmı, çalışma boyunca kullanılan veriler hakkında bilgiler sunmaktadır. Veriler, Alibeyköy Havzası dinamiklerini analiz etmek için ihtiyaç duyulan mekansal ve hidrometeorolojik bilgiler sağlamaktadır. Mekansal veriler yükseklik, eğim, toprak tipi ve AKAÖ tipi; hidrometeorolojik veriler ise sıcaklık, yağış, akış ve sediment verilerinden oluşmaktadır. Takip eden alt başlıklarda söz konusu verilerin kaynakları, kullanım amaçları ve diğer bilgileri verilmektedir.

3.2.1. Mekansal Veriler

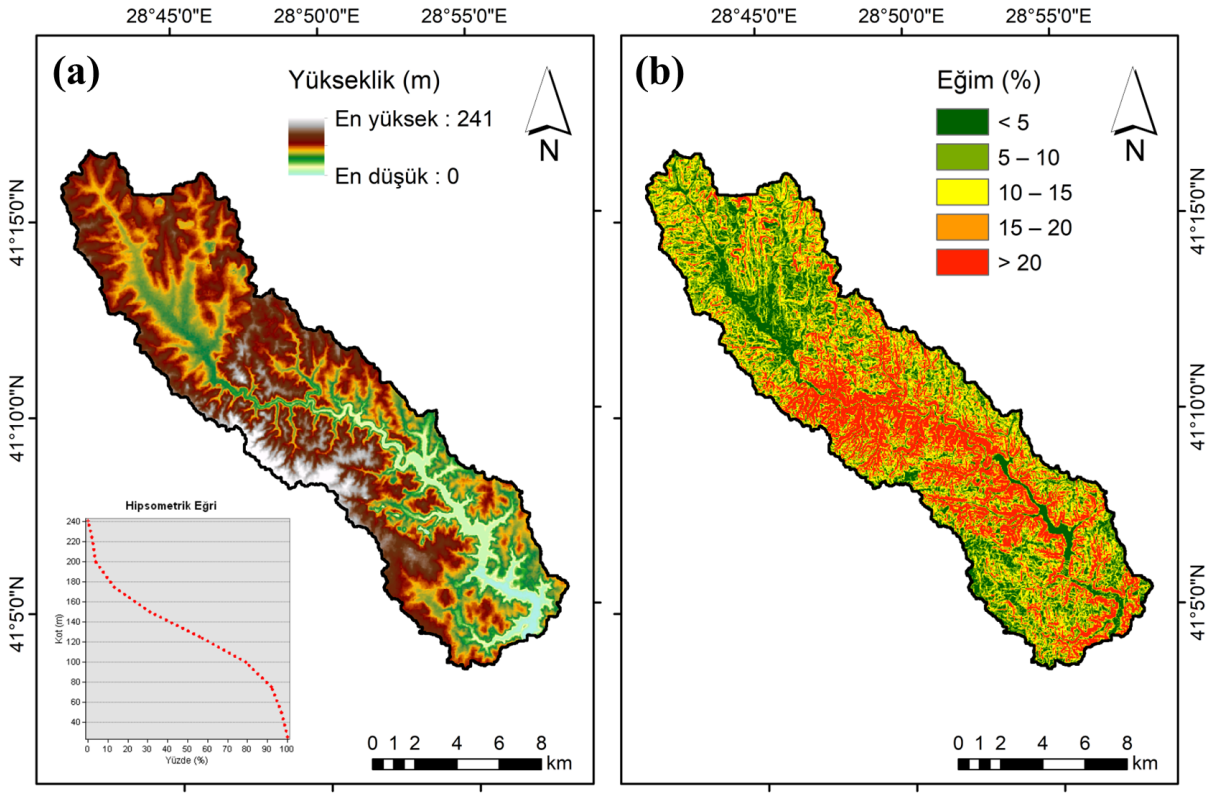
Mekansal veriler (ya da coğrafi veriler) havzanın içerisindeki değişkenlikleri konum bilgileri ile tanımlayan, CBS analizlerinde kullanılan veri sınıfını oluşturmaktadır. Çalışma alanının tanımlanması ve havza modelleme süreci için gerekli olan üç farklı mekansal veri bulunmaktadır: Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisi, toprak tipi verisi ve AKAÖ sınıfı verisi. Tez çalışmasında kullanılan tüm mekansal verilere ait bilgiler **Tablo 3.1**'de özetlenmiştir. Bu tabloda verilerin kaynakları, kullanım amaçları ve mekansal çözünürlükleri verilmiştir.

Tablo 3.1: Kullanılan mekansal verilere ait özellikler.

Veri	Veri kaynağı	Çözünürlük/Ölçek	Kullanım amacı
SYM	SRTM	30 m	• Dere ağının oluşturulması • Havza ve alt havza sınırlarının belirlenmesi • Eğim haritasının oluşturulması • Havza modeli mekansal girdisi
AKAÖ	Landsat	30 m	• 1990, 2010 ve 2020 yıllarına ait AKAÖ verilerinin elde edilmesi
	Living Atlas of the World Esri	10 m	• 2019, 2021 ve 2023 yıllarına ait AKAÖ verilerinin elde edilmesi • Gelecek AKAÖ değişimi tahmin modeli girdisi • Havza modeli mekansal girdisi
Toprak	FAO-DSMW	1:5000000	• Havza modeli mekansal girdisi

3.2.1.1. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) Verisi

SYM verisi havzanın yükseklik ve yüksekliğe bağlı eğim özelliklerini ortaya koymaya yaramaktadır. Bunun için Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration, NASA) tarafından sağlanan 30 metre mekansal çözünürlüklü Uzay Mekiği Radar Topografya Misyonu (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) (https://dwtkns.com/srtm30m/) verisi kullanılmıştır. ArcGIS ArcMap 10.8.2 programındaki CBS araçları ile Alibeyköy Havzası'na ait topografik analizler gerçekleştirilerek yükseklik ve eğim haritası hazır edilmiştir (**Şekil 3.2**). Deniz seviyesinden başlayarak 241 m yüksekliğe ulaşan bir dağılım gösteren havza yüksekliğinin ortalama değeri 110 m ve hipsometrik yüksekliği ise 105 m'dir (**Şekil 3.2a**). SYM aracılığı ile elde edilen havzanın eğim özellikleri %5'ten az, %5 ile %10 arasında, %10 ile %15 arasında, %15 ile %20 arasında ve %20'den fazla olmak üzere beş sınıfta analiz edilmiştir (**Şekil 3.2-b**). Buna göre, havzanın memba kısımlarında eğimin düşük (%5 ve daha az), orta kısımlarında ise eğimin nispeten daha yüksek olduğu (%20 ve daha fazla) tespit edilmiştir. Havzaya ait eğim bilgileri hem akış özellikleri hem de sediment verimini doğrudan etkileyen değişkenler olduğu için, eğim özelliklerini elde etmede kullanılan SYM verisi bu çalışmada önemli bir veri türüdür.

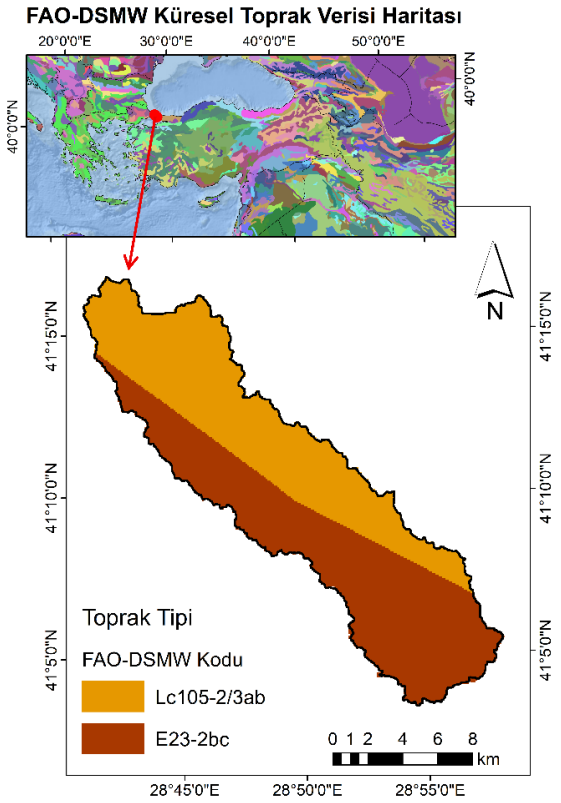


Şekil 3.2: Alibeyköy Havzası'na ait (a) yükseklik haritası ile hipsometrik eğri ve (b) eğim haritası.

3.2.1.2. Toprak Tipi Verisi

Toprak tipi havzadaki akış ve sızma gibi hidrolojik süreçleri doğrudan etkileyen özelliklerdir. Hidrolojik toprak grubu (HTG), hidrolik iletkenlik katsayısı, toprak su tutma kapasitesi gibi özellikler havzaya ait hidrolojik değişkenliklerin tanımlanmasında fayda sağlayacağı için toprak sınıfı verisi bu çalışmada önemli bir gerekliliktir. Ayrıca, toprak sınıfı özellikleri sediment taşınımı üzerinde etkili olacak bilgileri içermektedir. Bu sebeple havza modellemesinin hem akış hem de sediment performansında etkilidir. Bu tez çalışmasında, tercih edilen havza modelleme aracına uygun formattaki küresel toprak tipi verisi kullanılmıştır. Gıda ve Tarım Örgütü (Food and Agriculture Organization, FAO) tarafından sunulan Dijital Dünya Toprak Haritası (Digital Soil Map of the World, DSMW) (https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/) verisi ile havzaya ait toprak tipi özellikleri belirlenmiştir (**Şekil 3.3**). Buna göre havzada iki tip toprak sınıfı (Lc105-2/3ab ve E23-2bc) mevcuttur. Lc105-2/3ab killi ve kumlu, E23-2bc yumuşak

kireçtaşı litolojisine sahip sırasıyla D ve C sınıfı HTG özelliği göstermektedir. Bu özellik Alibeyköy havzası için toprağın orta ila çok düşük geçirgenlikte olduğunu göstermektedir.



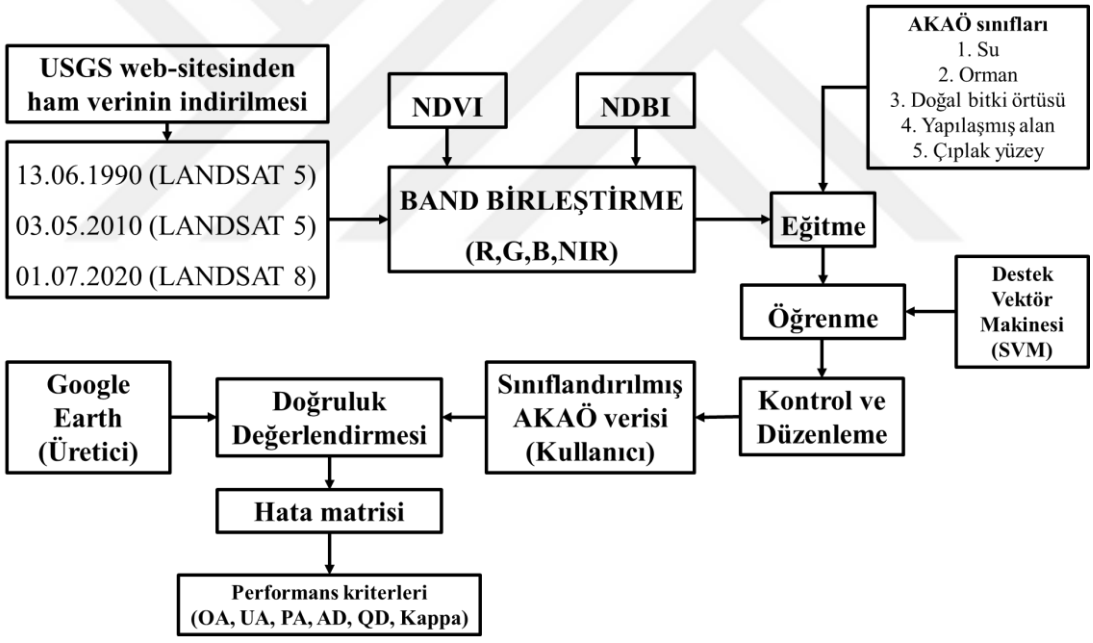
Şekil 3.3: Alibeyköy Havzası'na ait FAO-DSMW toprak tipi haritası.

3.2.1.3. Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü (AKAÖ) Verileri

AKAÖ sınıfı bir havzanın hidrolojik dengesini doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Orman, tarım ve yerleşim alanı gibi farklı arazi kullanımları, yağışın yeraltı suyuna sızması, yüzey akışı ve buharlaşma oranlarını değiştirir. Ayrıca, AKAÖ durumu havzadaki akarsuya ulaşan sediment miktarını belirleyici bir faktördür. Bu nedenle, havza hidrolojisi ve sediment modellerinde AKAÖ verisi kritik öneme sahiptir. Bu tez çalışmasının temel konularından birisi olan AKAÖ'deki değişiklikler incelenmek üzere, iki farklı veri kaynağından faydalanılmıştır: 1) Landsat uydu ürünleri kullanılarak elde edilen AKAÖ verileri ve 2) Sentinel-2 tabanlı Esri AKAÖ verileri.

Yeni yapılan İstanbul Havalimanı'nın inşaatından öncesi ve sonrasını temsil eden AKAÖ verileri, havzada meydana gelen AKAÖ sınıfları arasındaki değişimleri tespit etmek amacıyla hazırlanmıştır. Bu kapsamda, 2010 ve 2020 yıllarına ait Landsat uydu görüntüleri işlenmiştir.

Ayrıca, bu tez çalışmasının son kısmındaki iklim değişikliği çalışmalarında referans periyodunun temsil edilmesinde kullanılan 1990 yılına ait AKAÖ verisi de bu kısımda açıklanan görüntü işleme yöntemi ile hazırlanmıştır. Landsat uydu görüntülerine Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (United States Geological Survey, USGS)'na ait https://www.earthexplorer.usgs.gov/ adresinden erişilebilmektedir. Landsat uydu görüntüleri tarihlerinin seçiminde görüntü kalitesi dikkate alınmış, özellikle bulut örtüsü düşük olanlar tercih edilmiştir. 1990 yılı için kullanılan görüntü 13.06.1990 tarihli Landsat 5; 2010 yılı için kullanılan görüntü, 03.05.2010 tarihli Landsat 5 ürününe; 2020 yılı içinse, 01.07.2020 tarihli Landsat 8 ürününe aittir. AKAÖ haritalarının oluşturulmasında izlenen görüntü işleme adımları **Şekil 3.4**'te şematik olarak gösterilmektedir. Kullanılan Landsat ham uydu görüntüleri **Şekil 3.5**'te verilmektedir.



Şekil 3.4: Landsat uydu ürünlerinden 1990, 2010 ve 2020 yıllarına ait AKAÖ verilerinin hazırlanma sürecini gösteren akış şeması.

Landsat uydu ürünlerinden AKAÖ verilerinin elde edilmesinde beş farklı sınıf tanımlanmıştır: Su, orman, yapılaşmış alan, çıplak toprak ve madencilik. "Su sınıfı" baraj gölleri, küçük göletler ve madencilik faaliyetlerine bağlı su kütlelerini içermektedir. Karışık, yaprak döken veya herdem yeşil türündeki tüm orman alanları genel olarak "orman" sınıfında değerlendirilmiştir. "Doğal bitki örtüsü" sınıfı ise seyrek bitki örtüsüne sahip alanlar, meralar ve açık yüzeyleri

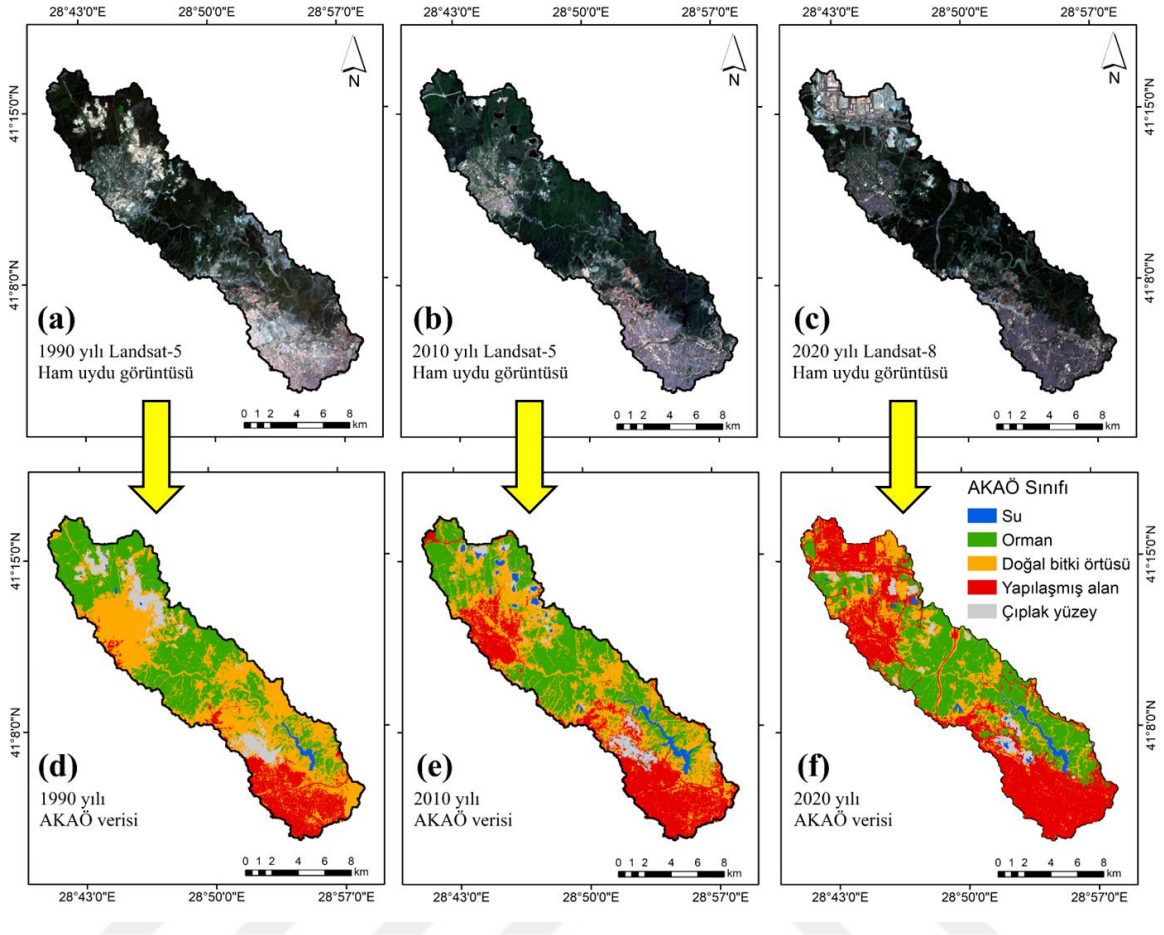
içermektedir. “Yapılaşmış alan” sınıfı; yerleşim alanları, otoyollar, havalimanı ve sanayi bölgelerini kapsayan bir kategoridir. “Çıplak yüzey” sınıfı ayrı bir kategori olarak tanımlanmış ve özellikle havza içerisindeki açık ocak madenciliği faaliyetlerini kapsamaktadır.

Uydu ürünlerinin işlenmesinde kırmızı (R), yeşil (G), mavi (B) ve yakın kızılötesi (NIR) bantlar ile AKAÖ sınıflarının belirlenmesinde etkili indeksler (NDVI ve NDBI) kullanılmıştır. Normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) ve Normalleştirilmiş Fark Yapılaşma İndeksi (Normalized Difference Built-up Index, NDBI) hesaplanarak bant kombinasyonuna dahil edilmiştir. NDVI, bitki örtüsünün sağlığını ve yoğunluğunu sensör verileriyle ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir göstergedir (**Bhandari ve diğ., 2012**). Bu gösterge, kırmızı ve NIR bantlarından elde edilen spektrometrik verilerle hesaplanmaktadır. NDBI ise yapılaşmış konut alanlarını ortaya koymak amacıyla kullanılmakta olup, NIR ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) bantlarından hesaplanmaktadır (**Zha ve diğ., 2003**). NDVI ve NDBI hesaplamaları sırasıyla **Denklem 3.1** ve **Denklem 3.2**’de verilmiştir.

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{R}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{R}} \qquad (\mathbf{3.1})$$

$$\mathrm{NDBI} = \frac{\mathrm{SWIR} - \mathrm{NIR}}{\mathrm{SWIR} + \mathrm{NIR}} \qquad (\mathbf{3.2})$$

Görüntü işleme süreci iki ana adımdan oluşmaktadır: Sınıflandırma ve Doğruluk değerlendirmesi. İlk adımda, ArcGIS/ArcMap araçları kullanılarak kontrollü (supervised) sınıflandırma yöntemi uygulanmıştır. Kontrollü sınıflandırmada, raster verideki benzer özelliklere sahip grid hücrelerine, daha önce sınıflandırılmış AKAÖ sınıflarına göre belirli bir sınıf değeri verilir (**Abburu ve Golla, 2015**). Bu süreçte, “eğitim sınıfları” adı verilen alanlar tanımlanmış ve benzer gridlerin seçilmesiyle AKAÖ sınıflarına ilişkin çeşitli bilgileri içeren bir imza (signature) dosyası oluşturulmuştur. Görüntüler beş sınıfa (su, orman, doğal bitki örtüsü, yapılaşmış alan ve çıplak yüzey) ayrılmış, her bir AKAÖ sınıfına özgü bir imza belirlenmiştir. Sınıflandırma aşamasında, literatürde yaygın olarak kullanılan Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine, SVM) algoritması tercih edilmiştir (**Huang ve diğ., 2002; Avci ve diğ., 2023**). Sınıflandırılmış verilerdeki küçük hatalar ise ArcGIS/ArcMap raster işleme araçları ile manuel olarak düzeltilmiştir. Bu yöntem ile elde edilen 1990, 2010 ve 2020 yıllarına ait sınıflandırılmış AKAÖ verileri **Şekil 3.5**’te sunulmuştur.



Şekil 3.5: Alibeyköy Havzası için (a) 1990 yılına ait Landsat-5, (b) 2010 yılına ait Landsat-5 ve (c) 2020 yılına ait Landsat-8 ham uydu görüntülerinden kontrollü sınıflandırma yöntemi ile elde edilen (d) 1990, (e) 2010 ve (f) 2020 yıllarını temsil eden AKAÖ verileri.

İkinci adımda, oluşturulan verinin (kullanıcı verisi) doğruluğu gözlem verileri (üretici verisi) ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Google Earth görüntüleri üretici verisi (producers's data) olarak kullanılmıştır. "Tabakalı Eşdeğer Rastgele Örnekleme" (Stratified Equivalent Random) adı verilen mekansal rastgele seçim tekniği ile her AKAÖ sınıfı için 100'er adet olmak üzere toplam 500 rastgele nokta otomatik olarak üretilmiştir. Bu noktalarla temsil edilen hücreler kullanıcı ve gözlem verisinde karşılaştırılarak uyumluluk test edilmiştir. Görüntü sınıflandırmasının doğruluğunu değerlendirmede karışıklık veya hata matrisi (confusion/error matrix) yaygın bir uygulamadır (**Rwanga ve Ndambuki, 2017**). Buna ek olarak, doğruluk değerlendirmesini daha kapsamlı biçimde açıklamak amacıyla hata matrisinden türetilmiş şu metrikler de kullanılmıştır: Genel Doğruluk (Overall Accuracy, OA), Kullanıcı Doğruluğu (User's Accuracy, UA), Üretici Doğruluğu (Producer's Accuracy, PA) ve Kappa katsayısı. Ayrıca, Tahsis Uyuşmazlığı (Allocation Disagreement, AD) ve Miktar

Uyuşmazlığı (Quantity Disagreement, QD) da gözetilmiştir. AKAÖ verileri için UA ve PA doğruluk değerlendirme parametreleri, literatürde belirtilen formüller kullanılarak (**Rwanga ve Ndambuki, 2017; Pontius ve Millones, 2011**) hesaplanmıştır. 1990, 2010 ve 2020 yıllarına ait hata matrisleri sırasıyla **Tablo 3.2, Tablo 3.3** ve **Tablo 3.4**'te sunulmaktadır. Ayrıca, Kappa, OA, AD, QD ve OE değerlerinin hesabı **Tablo 3.5**'te verilmektedir. Üretilen verilen doğruluk değerlendirmesi **Tablo 3.6**'da özet olarak sunulmaktadır. Kappa değeri, 2010 yılı LULC verisi için 0.92, 2020 yılı verisi için 0.95 olarak bulunmuştur. Bu değerler, literatürde belirtildiği üzere (**Landis ve Koch, 1977**) "neredeyse mükemmel" düzeyde bir uyuma işaret etmektedir. Toplam hata (Overall Error, OE), **Pontius ve Millones (2011)** tarafından önerildiği şekilde AD ve QD'nin toplamı olarak hesaplanmış ve toplam hata oranı %1'in altında bulunmuştur.

Tablo 3.2: 1990 yılı verisine ait AKAÖ sınıfları için hata matrisi.

AKAÖ sınıfı		Üretici (Google Earth)						
		Su	Orman	Yapılaşmış alan	Doğal bitki örtüsü	Çıplak yüzey	*Toplam*	*UA*
Kullanıcı (İşlenen)	Su	99	0	0	1	0	*100*	*0.99*
	Orman	0	100	0	0	0	*100*	*1.00*
	Yapılaşmış alan	0	4	91	5	0	*100*	*0.91*
	Doğal bitki örtüsü	3	6	1	90	0	*100*	*0.90*
	Çıplak yüzey	3	1	2	4	90	*100*	*0.90*
	Toplam	*105*	*111*	*94*	*100*	*90*		
	PA	*0.94*	*0.91*	*0.97*	*0.90*	*1.00*		

Tablo 3.3: 2010 yılı verisine ait AKAÖ sınıfları için hata matrisi.

AKAÖ sınıfı		Üretici (Google Earth)						
		Su	Orman	Yapılaşmış alan	Doğal bitki örtüsü	Çıplak yüzey	*Toplam*	*UA*
Kullanıcı (İşlenen)	Su	99	0	0	1	0	*100*	*0.99*
	Orman	0	100	0	0	0	*100*	*1*
	Yapılaşmış alan	0	3	90	7	0	*100*	*0.90*
	Çıplak toprak	1	8	1	90	0	*100*	*0.90*
	Maden sahası	5	1	1	3	90	*100*	*0.90*
	Toplam	*105*	*112*	*92*	*101*	*90*		
	PA	*0.94*	*0.89*	*0.98*	*0.89*	*1*		

Tablo 3.4: 2020 yılı verisine ait AKAÖ sınıfları için hata matrisi.

AKAÖ sınıfı		Üretici (Google Earth)						
		Su	Orman	Yapılaşmış alan	Doğal bitki örtüsü	Çıplak yüzey	*Toplam*	*UA*
Kullanıcı (İşlenen)	Su	99	0	0	0	1	*100*	*0.99*
	Orman	0	100	0	0	0	*100*	*1*
	Yapılaşmış alan	0	0	93	5	2	*100*	*0.93*
	Çıplak toprak	0	4	2	91	3	*100*	*0.91*
	Maden sahası	0	4	0	1	95	*100*	*0.95*
	Toplam	*99*	*108*	*95*	*97*	*101*		
	PA	*1.00*	*0.93*	*0.98*	*0.94*	*0.94*		

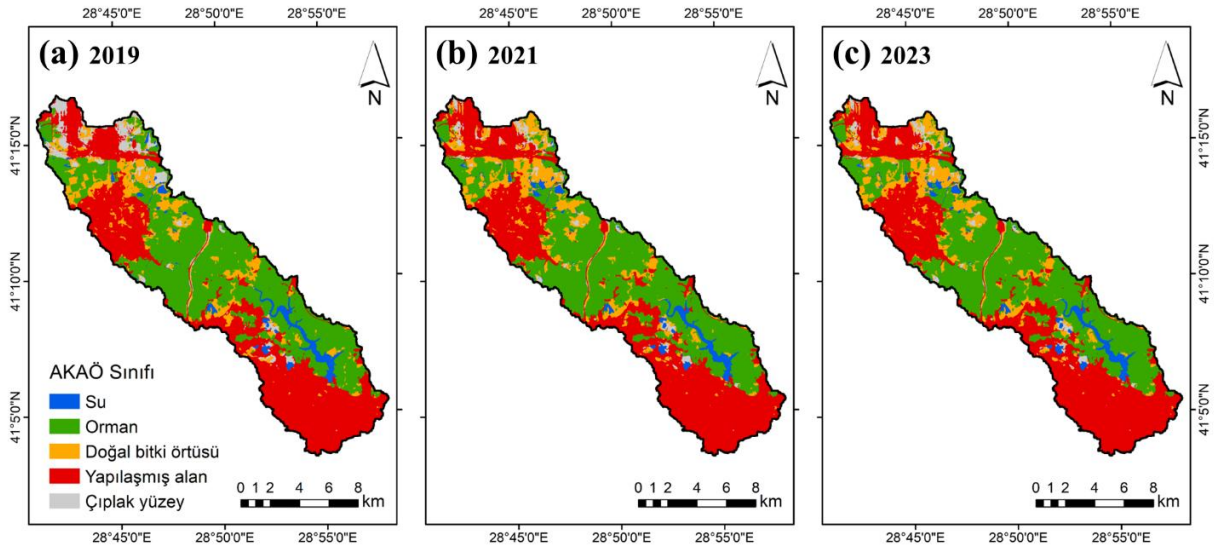
Tablo 3.5: AKAÖ verilerinin doğruluk değerlendirilmesinde kullanılan metriklere ait denklemler.

Metrik	Denklem
Kappa	$\text{Kappa} = \frac{(\text{N} \times \text{TN}) - \sum_{\text{i}=1}^{\text{n}} \text{P}_\text{i}\text{TP}_\text{i}}{\text{N}^2 - \sum_{\text{i}=1}^{\text{n}} \text{P}_\text{i}\text{TP}_\text{i}}$ TN: Referans ile uyuşan toplam doğru piksel sayısı (diyagonal)
OA	$\text{OA} = \frac{\text{Doğru sınıflandırılan piksellerin toplam sayısı (diyagonal)}}{\text{Referans verilen piksellerin toplam sayısı}} \times 100$
AD	$\text{AD} = \frac{\text{Toplam yanlış sınıflandırılmış piksel sayısı}}{\text{Doğru sınıflandırılan piksellerin toplam sayısı (diyagonal)}}$
QD	$\text{QD} = \frac{\sum_{\text{i}=1}^{\text{n}} \left(\frac{\text{P}_\text{i}}{\text{N}}\right) - \left(\frac{\text{TP}_\text{i}}{\text{N}}\right)}{\text{n}}$ P_i : AKAÖ sınıfı için piksel sayısı TP_i : AKAÖ sınıfı için referans ile uyuşan piksel sayısı n: AKAÖ sınıf sayısı N: Toplam piksel sayısı
OE	$\text{OE} = \text{AD} + \text{QD}$

Tablo 3.6: Landsat uydu ürünlerinden üretilen AKAÖ verilerinin doğruluk değerlendirmesi (Kappa, OA, AD, QD, OE).

AKAÖ verisi yılı	Kappa	OA	AD	QD	OE
1990	0.93	0.94	0.0638	0.0120	0.0758
2010	0.92	0.94	0.0661	0.0124	0.0785
2020	0.95	0.96	0.0460	0.0088	0.0548

Landsat uydu görüntülerinden üretilen AKAÖ verileri haricinde ArcGIS Living Atlas of the World platformu üzerinden erişilebilen Esri Sentinel-2 AKAÖ veri setinden faydalanılmıştır. Bu veri seti, Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency, ESA)'na ait Sentinel-2 uydu görüntüleri üzerine derin öğrenme tabanlı sınıflandırma yöntemleri uygulanarak küresel ölçekte üretilmiş 10 metre mekânsal çözünürlüklü AKAÖ haritaları sunmaktadır (**Karra ve diğ., 2021**). 2017 ile 2024 yıllarına ait yıllık AKAÖ verilerini temin etmek için ArcGIS Living Atlas of the World platformuna https://www.livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/ adresinden erişilebilmektedir. Esri verilerine ait küresel AKAÖ haritaları su, orman, tarım alanı, yapılaşmış alan, çıplak yüzey, mera, sulak alan, kar/buz ve bulut olmak üzere dokuz tematik sınıfı kapsamaktadır. Bu veri seti içerisinde 2019, 2021 ve 2023 yıllarına ait haritalar Alibeyköy Havzası için kestirilerek AKAÖ sınıfları yeniden düzenlenmiştir. **Şekil 3.6**'da beş AKAÖ sınıfı için düzenlenen veriler gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Alibeyköy Havzası'nda (a) 2019, (b) 2021 ve (c) 2023 durumunu gösteren Esri AKAÖ verileri.

Landsat uydu ürünleri kullanılarak üretilen 2010 ve 2020 yıllarına ait AKAÖ verileri bu tez çalışmasındaki **Kısım 4.1**'de havalimanı inşası ile hızlı AKAÖ değişikliğinin havza üzerindeki etkilerinin incelenmesinde kullanılmıştır. 1990 yılına ait AKAÖ verisi ise bu tez çalışmasındaki **Kısım 4.3**'te iklim değişikliği incelemelerinde referans AKAÖ verisi olarak kullanılmıştır. **Kısım 4.2** ve **Kısım 4.3**'te detayları verilen AKAÖ değişikliklerinin geleceğe yönelik

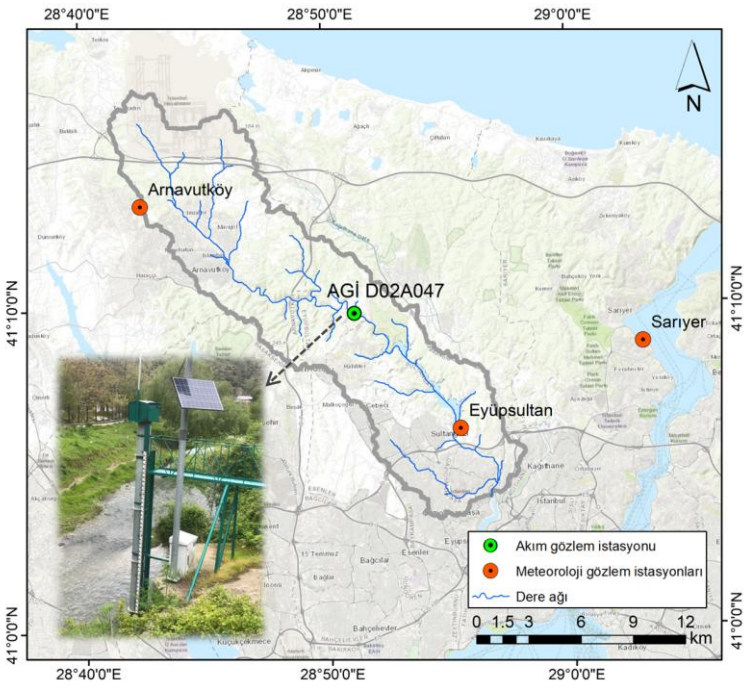
projeksiyonlarının gerçekleştirilebilmesi için ise Esri tarafından üretilmiş 2019, 2021 ve 2023 yıllarına ait veriler kullanılmıştır. İki farklı AKAÖ veri setinin kullanılmasındaki başlıca sebep geleceğe yönelik simülasyonların gerçekleştirilmesinde havalimanı inşası sonrası hızlı AKAÖ değişikliklerini daha iyi yansıtabileceği düşünülen mekânsal çözünürlüğü yüksek bir veriye ihtiyaç duyulmuş olmasıdır.

3.2.2. Meteorolojik Veriler

Meteorolojik veriler havzanın zaman içerisinde değişen iklim durumu hakkında bilgi verir. Bu tez çalışmasındaki havza modellemesinde kullanılan meteorolojik veriler yağış, en yüksek ve en düşük sıcaklık verilerinden oluşmaktadır. Meteorolojik veriler havzayı temsil eden yer gözlem istasyonlarından elde edilen geçmiş tarihli veriler ve iklim değişikliği projeksiyonlarına ait veriler olmak üzere iki sınıfta ele alınmıştır.

3.2.2.1. Geçmiş tarihli meteorolojik veriler

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen, ikisi Alibeyköy Havzası sınırları içerisinde (Arnavutköy ve Eyüp), biri havza sınırları dışında fakat havzaya yakın (Sarıyer) üç istasyon bulunmaktadır. Bu istasyonların konumları **Şekil 3.7**'de gösterilmektedir.

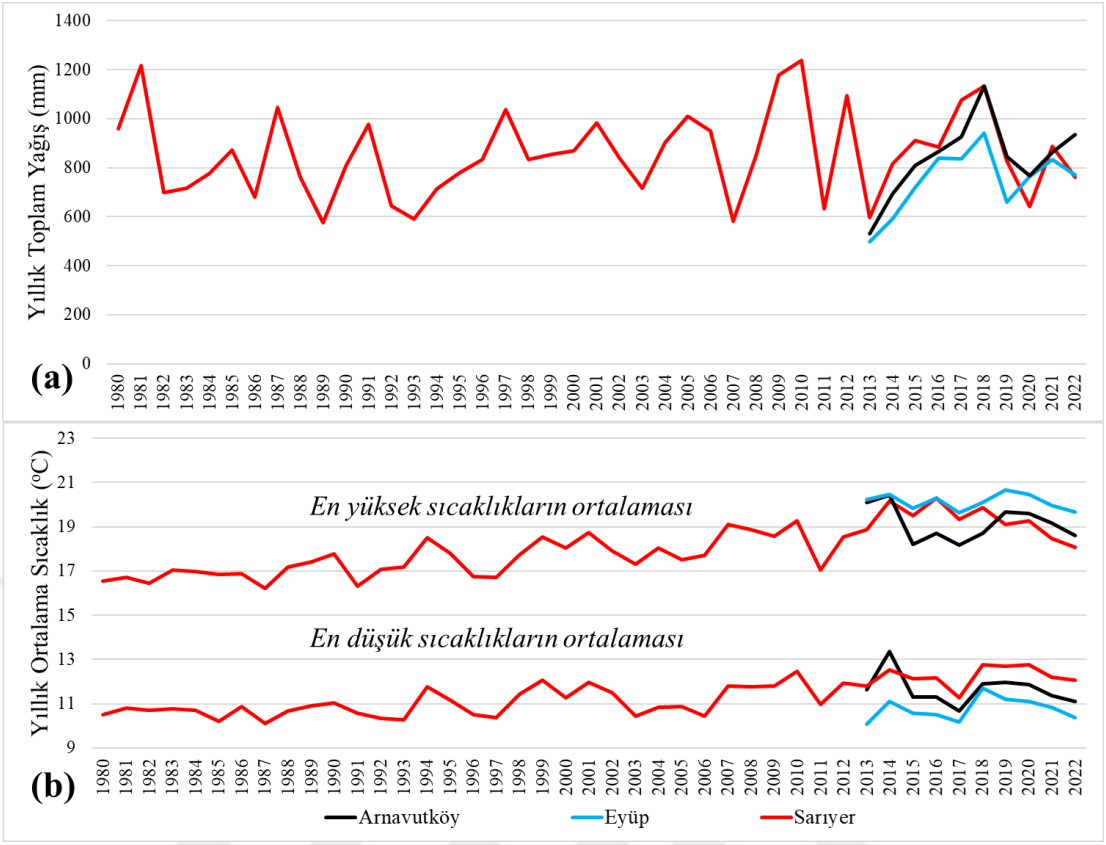


Şekil 3.7: Çalışmada kullanılan meteoroloji gözlem istasyonları ve akım gözlem istasyonunun konumları.

Arnavutköy ve Eyüp istasyonlarına ait veriler 2013–2022 takvim yılları arasındaki on yıllık periyodu, Sarıyer istasyonuna ait veriler ise 1976–2022 su yılları arasında, 1987 ve 2009 su yılları eksik olmak üzere, 47 yıllık periyodu kapsamaktadır. Veriler günlük zaman adımında ölçülmüştür. **Tablo 3.7**'de istasyonlara ait kot bilgileri ile birlikte uzun dönem (istasyonlarda ölçüm yapılan periyot boyunca) yıllık toplam yağışların, en yüksek sıcaklıkların ve en düşük sıcaklıkların ortalaması verilmiştir. Buna göre, Arnavutköy havzanın yüksek kesimlerinde yer alırken Eyüp ve Sarıyer daha düşük kotlardadır. Arnavutköy ve Sarıyer'in yıllık ortalama yağışları birbirine daha yakındır. Sıcaklık ortalamaları ise üç istasyon için birbirine yakın değerlerdedir. **Şekil 3.9-a**'da istasyonlara ait yıllık toplam yağışlar, **Şekil 3.9-b**'de ise yıllık en yüksek sıcaklıkların ve en düşük sıcaklıkların ortalamaları periyot boyunca gösterilmiştir. Buna göre, Sarıyer istasyonuna ait yıllık ortalama yağışlar özellikle Arnavutköy ile uyumlu bir trend göstermektedir.

Tablo 3.7: MGM istasyonlarına ait uzun dönem yıllık toplam yağışların ortalaması ve en yüksek/en düşük sıcaklıkların ortalamaları.

İstasyon Adı	Kot (m)	Yıllık Toplam Yağışların Ortalaması (mm)	En yüksek sıcaklıkların yıllık ortalaması (°C)	En düşük sıcaklıkların yıllık ortalaması (°C)
Arnavutköy	140	892.9	19.14	11.65
Eyüp	54	772.1	20.13	10.76
Sarıyer	59	881.6	17.96	11.31



Şekil 3.8: Sarıyer, Eyüp ve Arnavutköy istasyonlarına ait (a) yıllık toplam yağışların ve (b) en yüksek /en düşük sıcaklıkların yıllık ortalamalarının karşılaştırılması.

Bu tez çalışmasında, günlük zaman adımında hidroloji ve sediment yüklerinin modellenmesi (**Kısım 4.1**) için Arnavutköy ve Eyüp istasyonlarına ait veriler kullanılırken; iklim değişikliği odaklı yapılan incelemelerde (**Kısım 4.3**) ise referans periyodun temsil edilmesinde Sarıyer istasyonuna ait veriler kullanılmıştır. Bu durumun nedeni, tez çalışmasının iklim değişikliği odaklı kısımlarındaki modellerin daha uzun periyodu kapsayan meteoroloji verisi gerektirmesidir. Başlangıçta havza sınırları içerisinde yer alan istasyonlara ait daha kısa periyottaki meteoroloji verileri (Arnavutköy ve Eyüp) çalışmanın odağı için yeterli olurken sonraki iklim değişikliği ile ilgili kısımlarda daha uzun periyottaki meteoroloji verileri (Sarıyer) kullanılması uygun görülmüştür.

3.2.2.2. İklim değişikliği verileri

Küresel iklim modelleri veya küresel dolaşım modelleri (Global Climate Model, GCM) iklim sisteminin anlaşılması ve gelecekteki iklim değişikliklerinin tahmin edilmesi için kullanılan sayısal modelleme araçlarıdır. GCM'ler atmosfer, okyanus, kara ve buz sistemlerini temsil

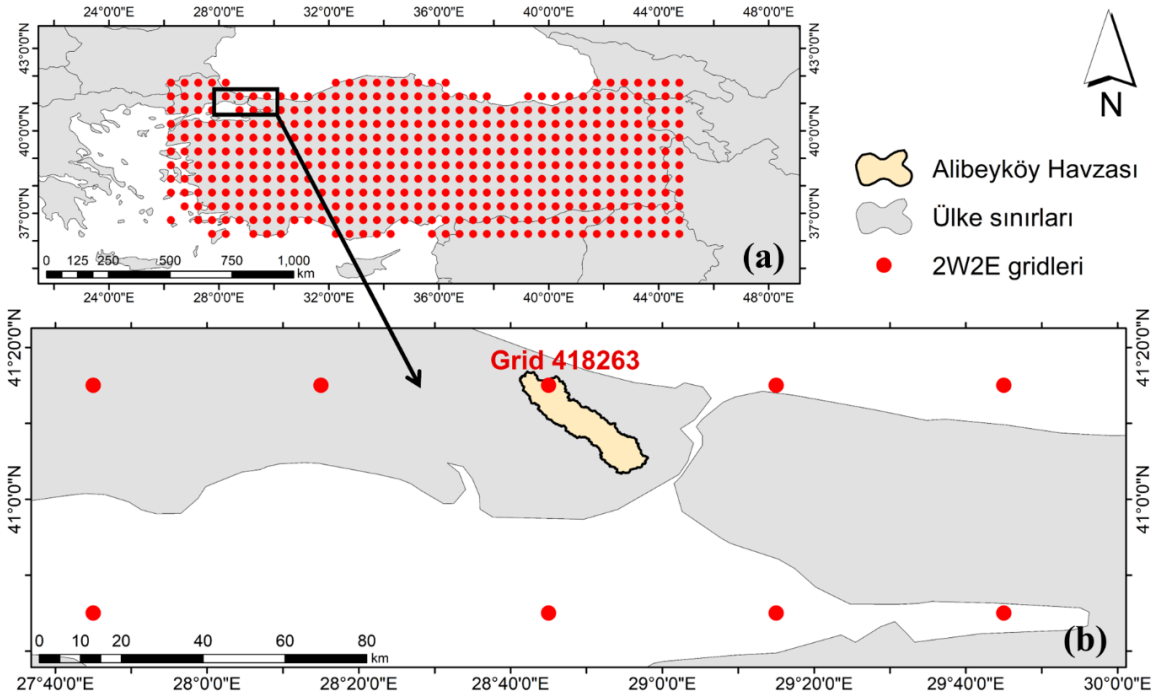
eden, dünya genelinde iklimi simüle eden fiziksel modellerdir. Tüm dünyayı kapsayan, genellikle düşük (yaklaşık 100–250 km grid boyutu) mekansal çözünürlüklü GCM'ler uzun dönemli projeksiyonlar ile iklim değişikliğinin genel eğilimlerini tahmin etmek için kullanılır.

Küresel iklim sistemini anlamaya yönelik en kapsamlı modelleme girişimlerinden biri olan Bütünleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi Aşama 5 (Coupled Model Intercomparison Project 5, CMIP5), IPCC'nin Beşinci Değerlendirme Raporu'na bilimsel altyapı sağlamak amacıyla geliştirilmiştir (**Taylor ve diğ., 2012**). CMIP5, farklı modelleme merkezleri tarafından geliştirilen çok sayıda GCM'yi ortak bir senaryo çerçevesinde test ederek hem geçmiş hem de olası gelecek iklim koşullarını simüle etmeyi hedeflemiştir. Bu projede kullanılan temel senaryolar, Temsili Konsantrasyon Rotaları (Representative Concentration Pathways, RCPs) olarak adlandırılmakta olup, farklı sera gazı emisyon düzeylerinin 2100 yılına kadar atmosferde yaratacağı ışınımsal zorlama etkilerini temsil etmektedir (**Moss ve diğ., 2010**). Dört ana RCP senaryosu – RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ve RCP8.5 – sırasıyla 2.6; 4.5; 6.0 ve 8.5 W/m²'lik ışınımsal zorlama seviyelerini öngörmektedir (**Van Vuuren ve diğ., 2011**).

Farklı GCM çıktılarına ait yağış ve sıcaklık veri setleri "Water Weather Energy Ecosystem (2W2E)" tarafından sağlanmaktadır. Bu tez çalışmasındaki iklim değişikliği verilerine www.2w2e.com web sayfasından erişilmiştir. Bu veri setinde her biri Sektörler Arası Etki Modeli Karşılaştırma Projesi (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISI-MIP5) tarafından desteklenen dört karbon evrim senaryosuna sahip beş farklı GCM (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC, NoerESM1-M) vardır. Kullanılan iklim değişikliği verilerindeki küresel iklim modellerine ait bilgiler **Tablo 3.8**'de verilmektedir. Bu veriler, referans dönemi 1950–2013 yılları olmak üzere 1950–2099 yıllarını kapsamaktadır ve 0.5° (yaklaşık 50 km) mekansal çözünürlüğe sahiptir (**Vaghefi ve diğ., 2017**). Her GCM için RCP4.5 ve RCP8.5 olmak üzere iki farklı iklim senaryosuna ait veriler bulunmaktadır. **Şekil 3.9**'da gösterildiği şekliyle Türkiye'yi kapsayan tüm grid verileri temin edilerek Alibeyköy Havzası sınırlarına giren Grid 418263 verileri kullanılmıştır.

Tablo 3.8: İklim değişikliği verilerindeki küresel iklim modellerine ait bilgiler.

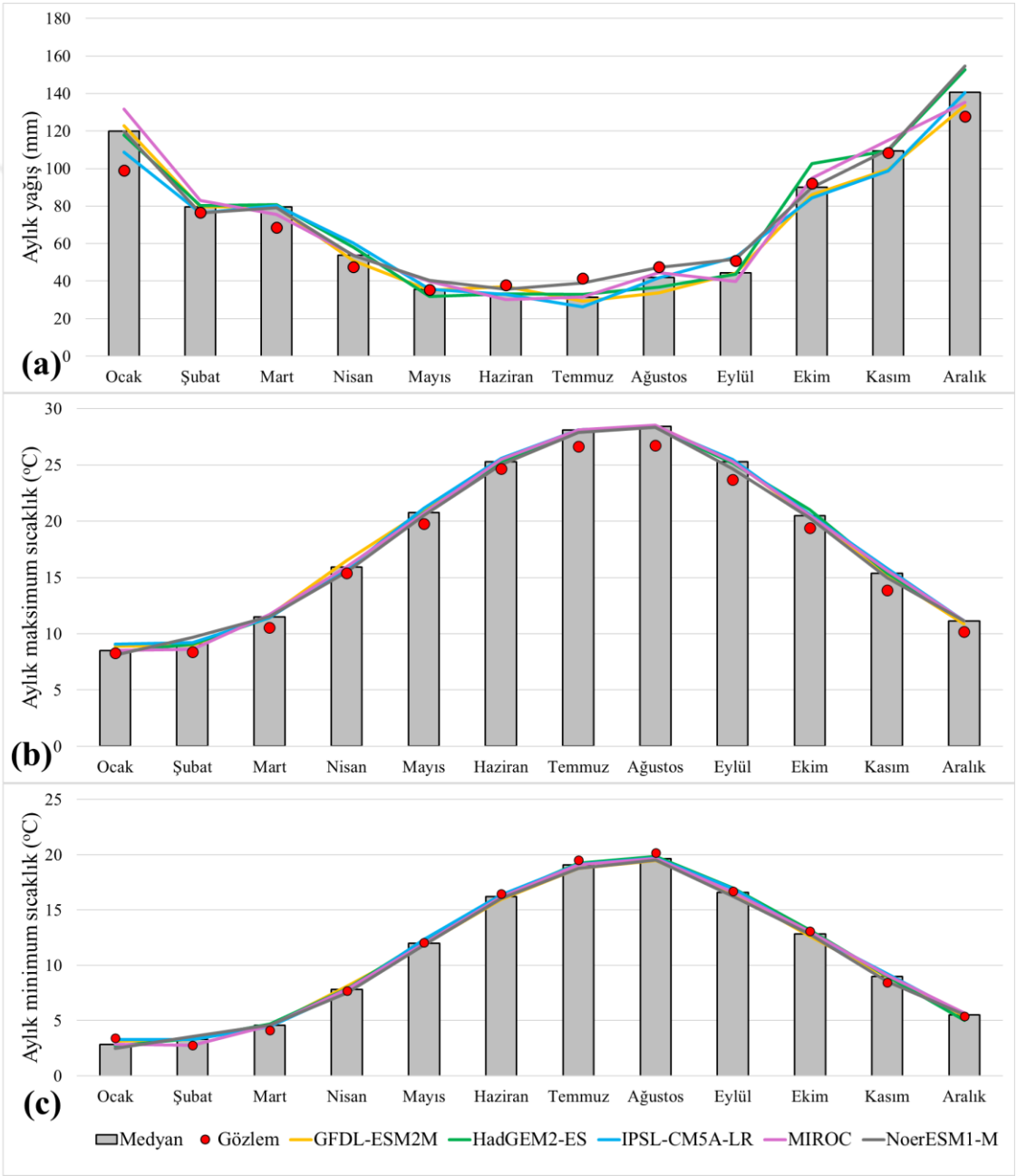
Küresel iklim modeli (GCM)	Geliştirici enstitü	Ülke	Senaryolar
GFDL-ESM2M	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	ABD	RCP4.5, RCP8.5
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	Birleşik Krallık	RCP4.5, RCP8.5
IPSL-CM5A-LR	L'Institute Pierre-Simon Laplace	Fransa	RCP4.5, RCP8.5
MIROC	AORI, NIES and JAMSTEC	Japonya	RCP4.5, RCP8.5
NoerESM1-M	Norwegian Climate Center	Norveç	RCP4.5, RCP8.5



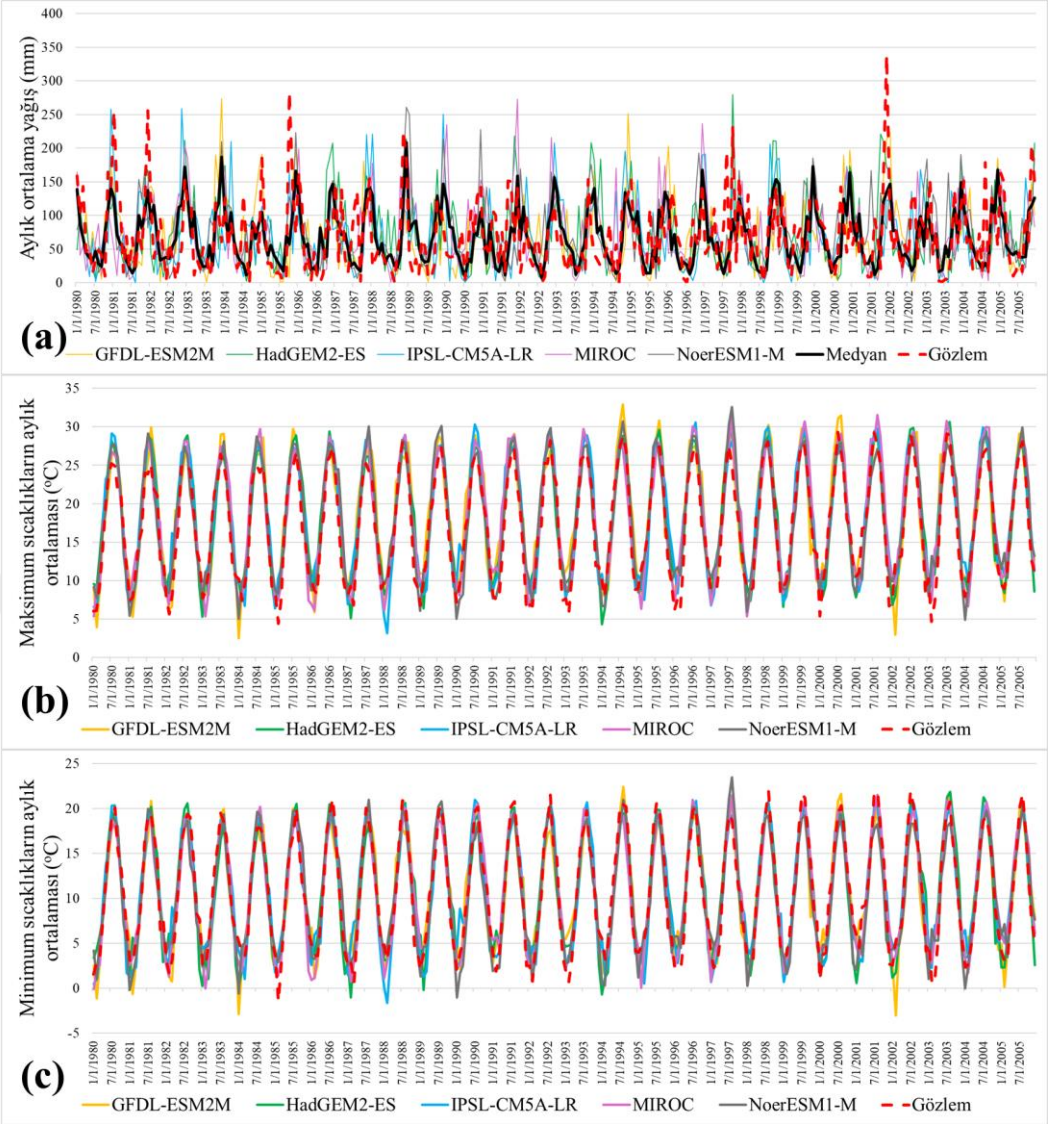
Şekil 3.9: İklim değişikliği verilerine ait (a) Türkiye sınırlarındaki gridlerin konumları ve (b) Alibeyköy Havzası için kullanılan 418263 kodlu gridin konumu.

İklim değişikliği projeksiyonları ile karşılaştırılmak üzere kullanılan yer gözlem verileri, Sarıyer meteoroloji istasyonundan temin edilmiş olup, her iki veri kümesinin ortak referans periyodu 1980–2005 yıllarını kapsamaktadır. İklim projeksiyonlarına ait referans dönemi ile yer gözlem verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, **Şekil 3.10**'da

1980–2005 yılları arasında aylık ortalamalara göre gözlem ve iklim modeli verileri sunulmaktadır. Her bir GCM için ayrı ayrı ve bu modellerin medyan değerleri gösterilmektedir. **Şekil 3.11**'de ise aynı döneme ait aylık ortalama yağış, en yüksek sıcaklık ve en düşük sıcaklık değerlerindeki değişimler zaman serisi olarak verilmiş ve GCM verileri ile gözlem verileri trend karşılaştırması yapılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.10: 1980–2005 periyodunda gözlem ve iklim değişikliği verileri için her ayda yıllık toplam yağışların ortalaması, en yüksek ve en düşük sıcaklık değerlerinin ortalaması.



Şekil 3.11: İklim değişikliği verilerinin 1980–2005 referans döneminde her ay için ortalama (a) yağış, (b) en yüksek sıcaklık ve (c) en düşük sıcaklık değerlerindeki değişimler.

Analiz sonuçları, projeksiyon verilerinin aylık ortalama değerlerindeki değişimlerin, yer gözlem verileriyle benzer bir eğilim gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, **Tablo 3.9**'da her bir GCM için 1980–2005 dönemine ait toplam yağış değerleri ile yer gözlem verilerine göre hesaplanan yüzde yanlılık (Percentage Bias, PBIAS) değerleri sunulmuştur. Maksimum ve minimum sıcaklıkların yıllık ortalamalarına ilişkin benzerlik değerlendirmesi ise determinasyon katsayısı (R^2) kullanılarak yapılmıştır. Buna göre, GCM'lerin yağış verilerinde düşük PBIAS değerleri göstermesi ve sıcaklık değişim trendlerinin yüksek R^2 değerleriyle gözlem verileriyle tutarlılık, iklim projeksiyonu verilerinin güvenilirliğini ve yer gözlem verileriyle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3.9: Uzun yıllar için toplam yağış ve en yüksek/en düşük sıcaklıkların ortalama değerlerinin karşılaştırılması, PBIAS ve R^2 değerleri.

Veri	Uzun yıllar (1980–2005) toplam yağış (mm)	PBIAS (%)	Uzun yıllar (1980–2005) en yüksek sıcaklıkların ortalaması (°C)	R^2	Uzun yıllar (1980–2005) en düşük sıcaklıkların ortalaması (°C)	R^2
Gözlem (Sarıyer)	833.95	-	17.32	-	10.87	-
GFDL-ESM2M	831.98	-0.24	18.39	0.88	10.77	0.89
HadGEM2-ES	879.99	5.52	18.36	0.91	10.91	0.90
IPSL-CM5A-LR	839.07	0.61	18.51	0.89	10.95	0.91
MIROC	874.77	4.89	18.39	0.90	10.82	0.93
NoerESM1-M	897.62	7.63	18.16	0.90	10.66	0.91

3.2.3. Akış ve Sediment Verileri

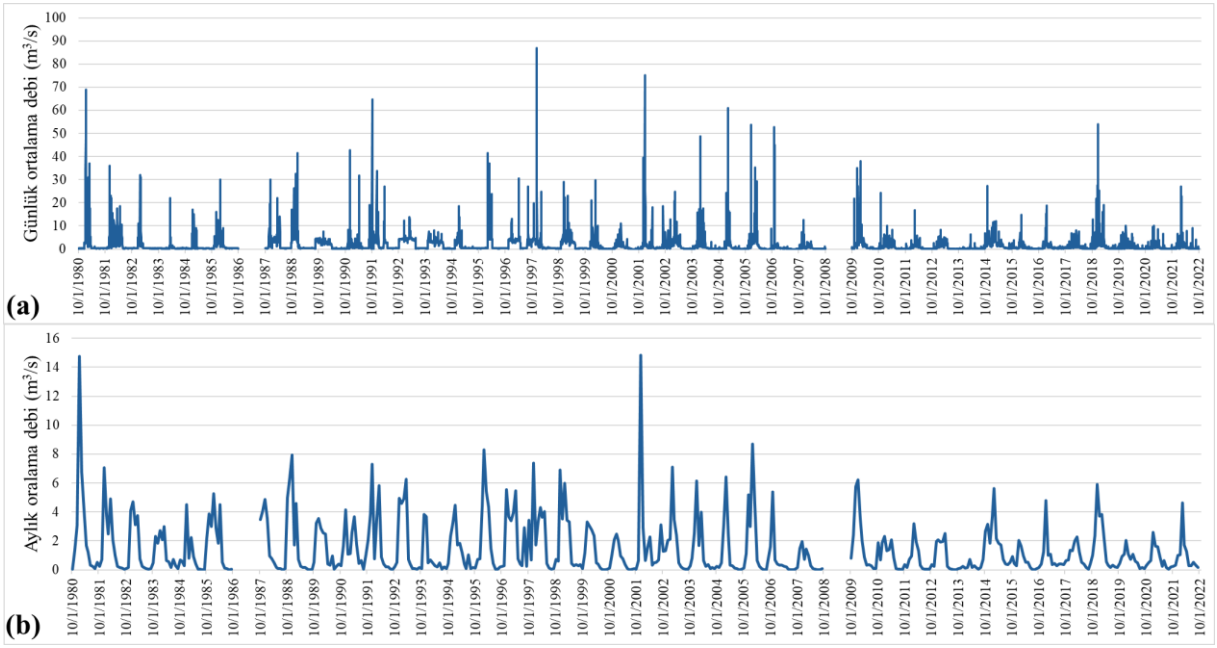
Alibeyköy Havzası'nı oluşturan dere ağının ana kolu olan Alibey Deresi üzerinde, Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından işletilen bir adet akım gözlem istasyonu (AGİ) yer almaktadır. Bu istasyon D02A047 kodlu "Molova Deresi Pirinççiköy" isimli istasyondur. Bu istasyonun konumu ve sahadaki durumu **Şekil 3.7**'de gösterilmektedir.

Geçmiş yıllara ait dere akışı (debi) verileri DSİ Akım Gözlem Yıllıkları'ndan elde edilmiştir. Bu veriler AGİ'lerin açılış tarihlerinden itibaren 2015 su yılına dek sağlanabilmektedir. Verilere https://www.dsi.gov.tr/ web sayfasından erişilebilmektedir. 2015 su yılı sonrası debi verileri (2016–2022 su yılları aralığı) DSİ'den talep edilerek temin edilmiştir. Neticede, D02A047 kodlu AGİ'ye ait 1981–2022 su yıllarına ait günlük ortalama debi verileri havza modellerinin kalibrasyonu ve validasyonunda kullanılmak üzere hazır edilmiştir.

Ayrıca, AGİ'nin yer aldığı kesit üzerinde DSİ tarafından aylık en az bir kez sediment ölçümü yapılmaktadır. Geçmiş yıllara ait mevcut olan sediment verileri 2013–2022 yılları için DSİ'den temin edilmiştir. Bu veri sediment yükü yanında sediment konsantrasyonu ve numune alımı esnasındaki anlık debiyi de içermektedir. Bu verinin elde edilişi için sahada DSİ ekibi tarafından gerçekleştirilen ölçümler yerinde izlenerek takip edilmiştir (**Kısım 3.3.1**). Sediment verileri arazide izlenerek ölçümler yapılmış ve laboratuvar analizleri ile model validasyonunda kullanılmak üzere güncel tarihli (2024–2025 yılları için) veri seti oluşturulmuştur. Böylece hem DSİ ölçümlerinin doğrulanması hem de modelleme sürecinde sediment yükü simülasyonları

için yeni bir validasyon veri seti hazır edilmiştir. **Kısım 3.3**'te arazi çalışmaları ve laboratuvar analizleri süreci detaylı olarak anlatılmaktadır.

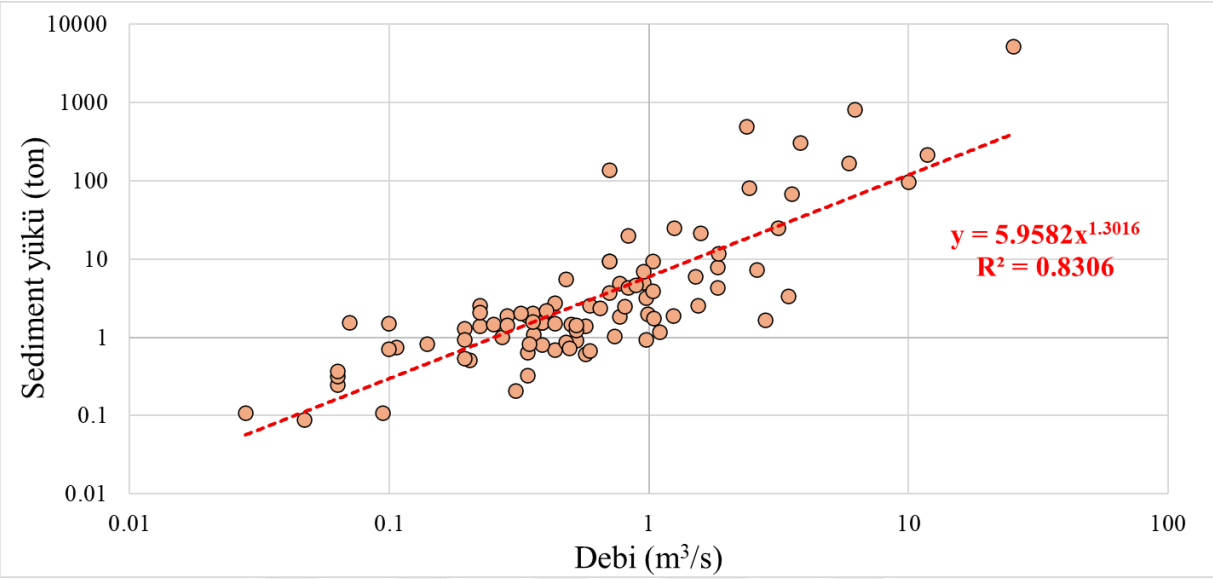
Şekil 3.12-a ve Şekil 3.12-b'de modelleme süreçlerinde kullanılan sırasıyla günlük ve aylık ortalama debi verileri gösterilmektedir. Bu verilerden 2013–2022 günlük zaman adımındaki debi değerleri bu tez çalışmasında **Kısım 4.1**'deki model kalibrasyonu aşamasında kullanılmıştır. 1981–2022 su yılları arasındaki aylık zaman adımındaki debi değerleri ise **Kısım 4.3**'te iklim değişikliği odaklı çalışmalar için tercih edilmiştir.



Şekil 3.12: Havza modelleme süreçlerinde kullanılan (a) günlük ve (b) aylık ortalama debi verileri.

Sürekli sediment verisi elde etmek zordur; bu sebeple sediment anahtar eğrisi yöntemi kullanılarak sürekli sediment verisi oluşturulabilir (**Tülücü, 1997**). Sediment anahtar eğrisi (sediment rating curve), bir akarsuda akış ile taşınan sediment konsantrasyonu veya sediment yükü arasındaki istatistiksel ilişkiyi gösteren eğridir (**Asselman, 2000**). Bu eğri sayesinde sadece debi verileri ile sediment için tahmin yapılabilir. Alibeyköy Havzası için, DSİ tarafından D02A047 kodlu AGİ'nin bulunduğu kesitte 2013–2022 yılları aralığında ölçülen sediment yükleri kullanılarak bu periyoda ait sediment anahtar eğrisi türetilmiştir. Ölçülen debi ve sediment yükü verileri arasında log-log regresyonu uygulanarak doğrusal bir ilişki kurulmuştur.

Şekil 3.13 DSİ tarafından ölçülen sediment yükü değerleri ve ölçüm yapılan güne ait günlük ortalama debi değerleri ile kurulan doğrusal regresyon ilişkisi grafiğini göstermektedir.



Şekil 3.13: Alibeyköy Havzası için 2013–2022 yıllarına ait veriler kullanılarak elde edilen sediment anahtar eğrisi.

Denklem 3.3'te bu doğrusal ilişkiyi veren eşitlik gösterilmiştir. R^2 değerinin 0.8306 olması güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Alibeyköy Havzası için elde edilen bu sediment anahtar eğrisi ile sürekli sediment yükü değerleri hesaplanarak model kalibrasyonu aşamasında kullanılmıştır.

$$SED_{yük} = 5.9582Q^{1.3016} \quad (3.3)$$

Burada, Q debi değeri (m^3/s) ve $SED_{yük}$ sediment miktarıdır (ton).

3.3. SAHA GÖZLEMLERİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Askıda katı madde (AKM) ölçümleri **Şekil 3.7**'de gösterilen D02A047 kodlu AGİ'nin bulunduğu dere kesitinde gerçekleştirilmiştir. Bu kesit Alibey Baraj göletinin hemen membasında yer almaktadır. Böylece, baraj gölüne ulaşan sediment miktarı takip edilebilmektedir. Bu kesitte 2013–2022 tarihleri arasında DSİ tarafından ayda en az bir defa ölçülen AKM verileri havza modelinin kalibrasyonu ve validasyonu aşamalarında kullanılması amacıyla temin edilmiştir. 2024–2025 yıllarında bu tez çalışması kapsamında gözlenen AKM verileri ise sediment yükleri açısından ek havza modeli doğrulamasına olanak tanımaktadır. Böylece, hem geçmiş tarihli AKM verilerinin kendi içerisinde bir kalite kontrolü yapılabilmiş hem de ek validasyon aşaması ile oluşturulan havza modelinin güvenilirliği test edilebilmiştir.

Sediment yüklerini hesaplamak için kullanılan Kasım 2024–Mayıs 2025 tarih aralığındaki güncel AKM veri setinin oluşturulması sahadan su numunesi alımı ve laboratuvar analizleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Su Numunesi Alımı

Tez kapsamındaki ilk saha gözleminde, DSİ rasat ekipleri tarafından yapılan AKM ölçüm teknikleri incelenmiştir (**Şekil 3.14**). Ekipler tarafından öncelikle debi ve enkesit alanı ilişkisinde etkili olan debi anahtar eğrisi hesabı için dere kesiti temizlenmiş ve bu kesitin güncel geometrik durumu kontrol edilmiştir (**Şekil 3.14-a)**. Muline (akış ölçer) yardımıyla sistematik olarak farklı noktalarda ve derinliklerde hız ölçülerek anlık debi hesaplanmıştır (**Şekil 3.14-b**). Ayrıca, sahada bulunan eşel üzerinden su yüksekliği okunarak not edilmiştir. Bu eşel yüksekliği sayesinde debi anahtar eğrisi kullanılarak ölçüm alınan tarihe ait debi hesaplanabilmektedir. AKM ölçümü için özel şeffaf bir cam tüpün ağzı deredeki su akışı yönüne dik tutularak belirli bir süre içerisinde dereye sistematik olarak daldırılıp çıkarılarak su numunesi alınmıştır (**Şekil 3.15-c**). Alınan su numunesi süspanse sediment konsantrasyonu ve sediment yükü hesapları için laboratuvar analizine gönderilmektedir.



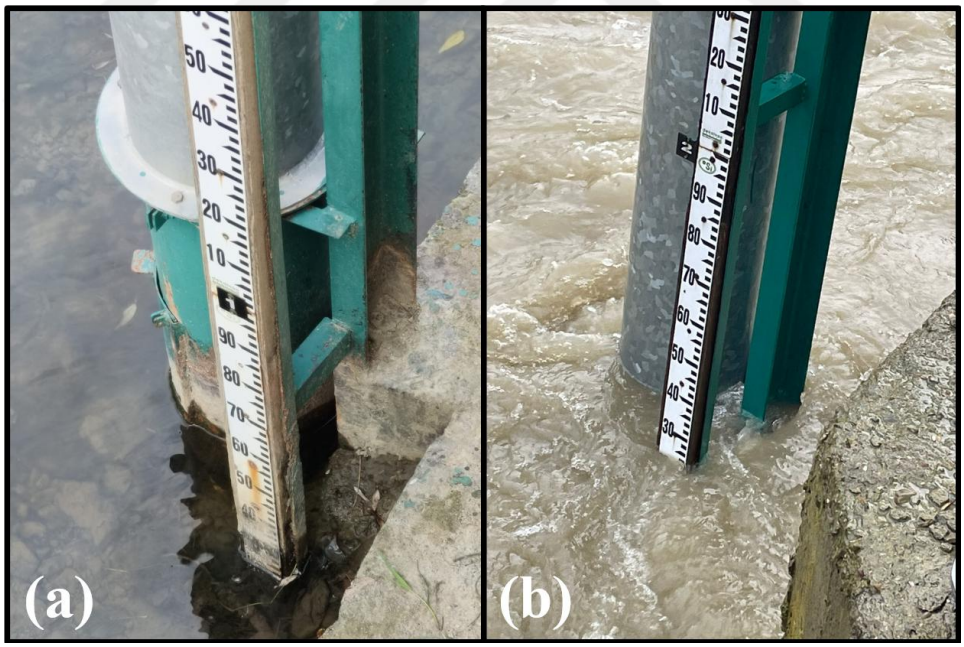
Şekil 3.14. DSİ ekipleri tarafından yapılan (a) dere kestinin temizlenmesi ve kesit geometrisi hesabı, (b) muline ile debi ölçümü ve (c) süspanse sediment ölçümü esnasındaki görüntüler.

DSİ rasat ekiplerine benzer biçimde, tez çalışması süresince dere kesitinden su numunesi alımı yapılarak sediment durumu takip edilmiştir. **Şekil 3.15**'te su numunesi alımı (**Şekil 3.15-a**) ve muline ile debi ölçümü (**Şekil 3.15-b**) esnasındaki fotoğraflar örnek olarak gösterilmektedir. Su numuneleri, öncesinde saf su ve seyreltilmiş hidrobromik asit ile temizlenen kaplar kullanılarak muhafaza edilmiştir. Ayda iki kez gerçekleştirilen saha ziyaretlerinde alınan su numunelerinin yanı sıra eşel yükseklikleri de not edilmiştir. **Şekil 3.16**'da örnek olarak en düşük seviyedeki 21.11.2024 tarihli (**Şekil 3.16-a**) ve en yüksek seviyedeki 14.01.2025 tarihli (**Şekil 3.16-b**) eşel yüksekliği durumu gösterilmektedir.

Hazırlanan sediment veri seti saha ziyaretlerinin yapıldığı Kasım 2024 ile Mayıs 2025 tarih aralığını kapsamaktadır. Laboratuvar analizleri ile toplam AKM miktarının belirlenmesi ve sediment yükü hesabı için toplam 15 su numunesi alınmıştır.



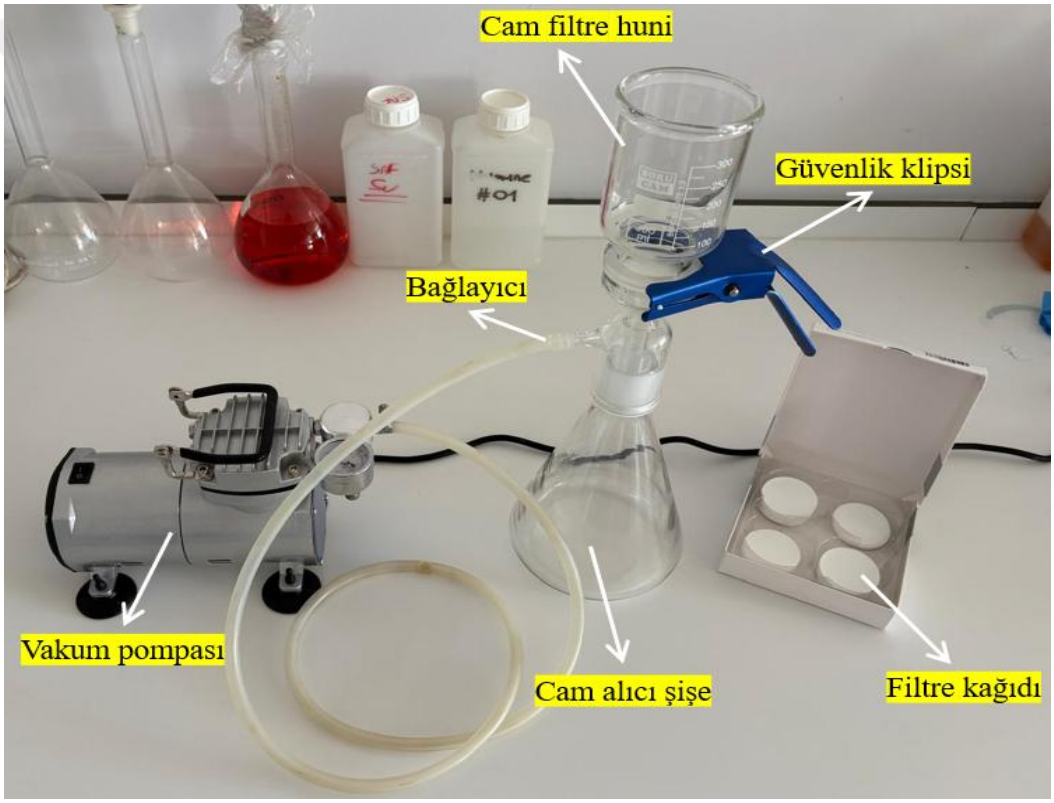
Şekil 3.15. Saha gözlemlerinde (a) su numunesi alımı ve (b) muline ile debi ölçümü.



Şekil 3.16. Eşel yüksekliğinin (a) 21.11.2024 tarihli en düşük seviyesi (24 cm) ve (b) 14.01.2025 tarihli en yüksek seviyesi (125 cm).

3.3.2. Laboratuvar Analizleri

Yapılan saha ziyaretlerinde alınan su numuneleri laboratuvarda analiz edilmiştir. Toplam AKM tayini için kullanılan süzme seti, gravimetrik filtrasyon yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntem için kullanılan süzme düzeneği **Şekil 3.17**'de detaylı olarak gösterilmektedir. Bu düzenek mini vakum pompası, 2000 mL hacimli cam alıcı şişe, 300 mL hacimli cam filtre huni, şişe ve pompa arasında bağlantıyı sağlayan bağlayıcı boru, iki cam hazneyi sabit tutan güvenlik klipsi ve cam mikrofiber yuvarlak filtre kağıtlarından oluşmaktadır. AKM ölçümünde kullanılan deney düzeneği TÜBİTAK projesi kapsamında alınmıştır.

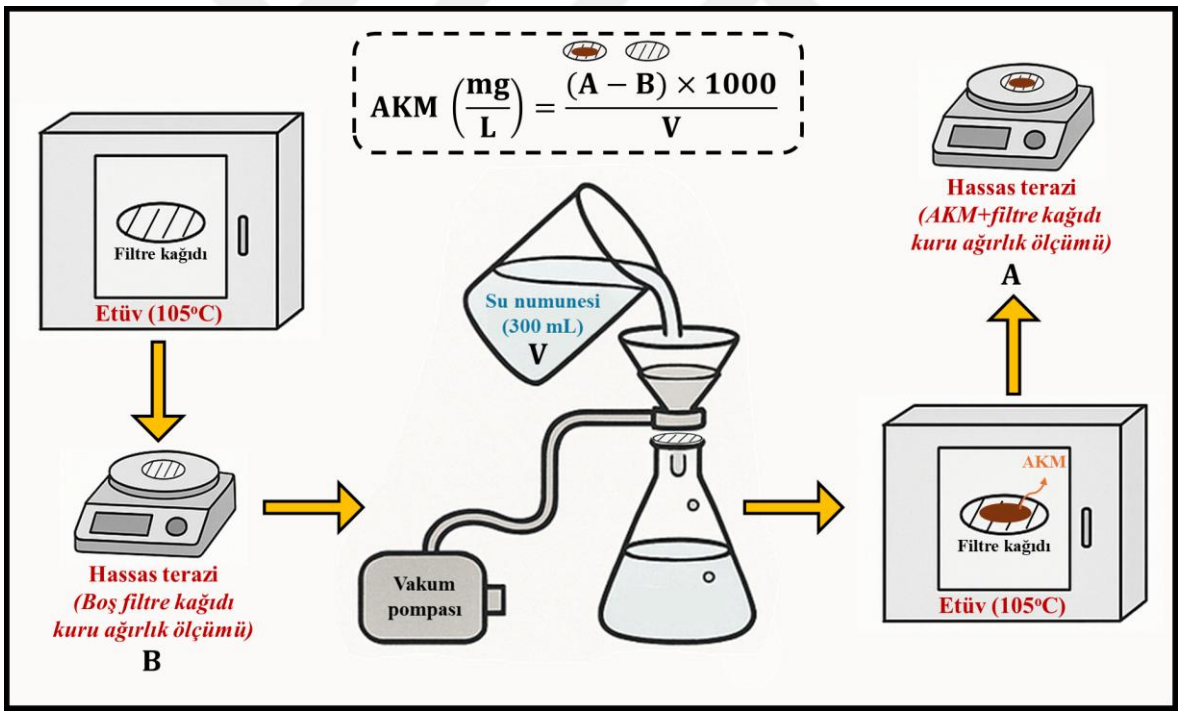


Şekil 3.17. Süzme düzeneği aparatları.

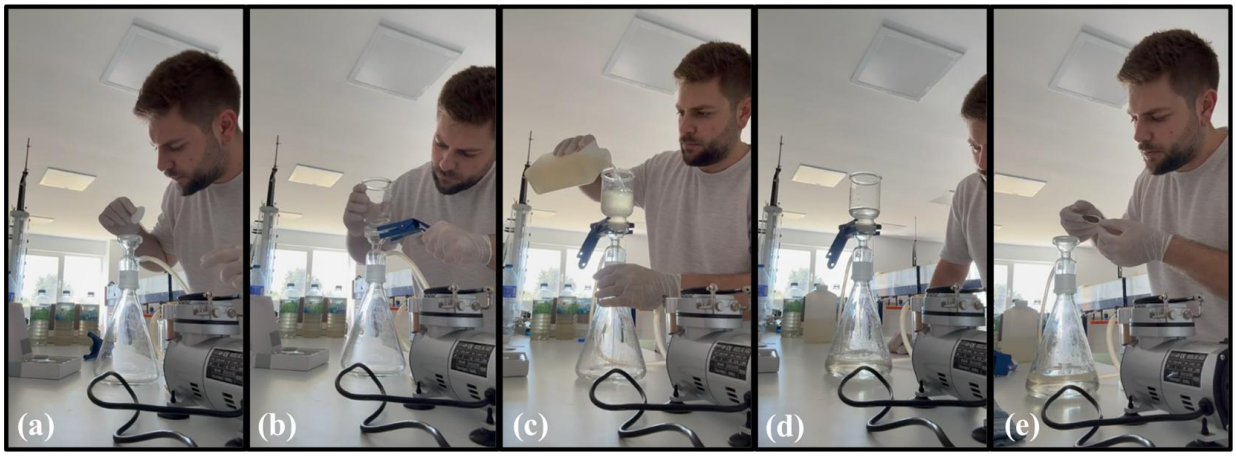
Toplam AKM miktarının belirlenmesinde izlenen laboratuvar analizi prosedürüne ait aşamalar **Şekil 3.18**'de şematik olarak gösterilmektedir. **Şekil 3.19** ve **Şekil 3.20**'de ise deney prosedürünün uygulama aşamaları sunulmaktadır. Toplam AKM tayini prosedüründe, ilk olarak cam mikrofiber filtre kağıdı 105°C sıcaklıktaki etüvde kurutulur, ardından desikatörde soğutularak hassas terazide tartılır ve başlangıç ağırlığı kaydedilir. Bu filtre kağıdı süzme

düzeneğine yerleştirilir (**Şekil 3.15-a**). Süzme düzeneği cam hazneleri güvenlik klipsi ile sabitlenerek süzmeye hazır edilir (**Şekil 3.15-b**). 300 mL hacimde su örneği filtre kağıdından geçirilir (**Şekil 3.15-c**). Bu işlem sırasında vakum pompası kullanılarak filtrasyon işlemi hızlandırılır (**Şekil 3.15-d**) ve çözünmemiş katı maddeler filtre kağıdı üzerinde tutulur (**Şekil 3.15-c**). Filtrasyon işlemi tamamlandıktan sonra filtre kağıdı yeniden etüve konularak 105 °C'de kurutulur (**Şekil 3.16-a**), ardından desikatörde soğutulur ve tekrar hassas terazide tartılarak son ağırlığı belirlenir (**Şekil 3.16-b**). Başlangıç ve son ağırlıklar arasındaki fark, süzülen su hacmine bölünerek AKM konsantrasyonu miligram/litre (mg/L) cinsinden hesaplanır (**Denklem 3.4**).

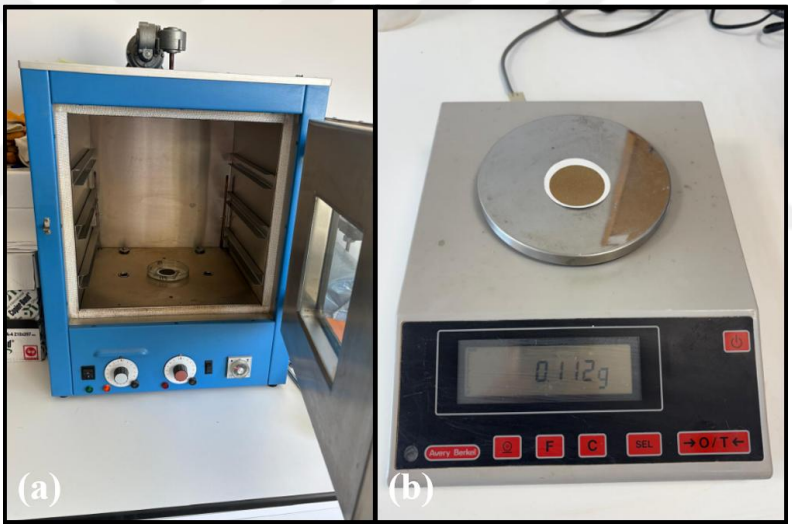
$$\text{Toplam AKM konsanstrasyonu } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{\text{Son ağırlık} - \text{Başlangıç ağırlığı}}{\text{Su numunesi hacmi (300 mL)}} \times 1000 \qquad \textbf{(3.4)}$$



Şekil 3.18. Süzme işlemi ile AKM konsantrasyonu hesabının şematik gösterimi.



Şekil 3.19. Süzme işleminin aşamaları: (a) filtre kağıdının yerleştirilmesi, (b) düzeneğin sabitlenmesi, (c) su numunesinin düzeneğe boşaltılması, (d) vakum pompası ile süzme işlemi, (e) filtre kağıdının alınması.



Şekil 3.20. Süzme işleminden sonra (a) filtre kağıdının etüve yerleştirilip kurutulması ve (b) kurutulan filtre kağıdının hassas terazide tartılması.

3.3.3. Sediment Yükünün Hesabı

Su numune alımları ve laboratuvar analizleri neticesinde elde edilen miligram/litre (mg/L) cinsinden AKM konsantrasyonu değerleri **Denklem 3.5**'teki gibi ton/gün cinsinden sediment yükü olarak hesaplanmıştır. Bu denklemde $SED_{yük}$ ifadesi sediment yükünü, SED_{kons} ifadesi laboratuvar analizinden elde edilen sediment (AKM) konsantrasyonunu, Q ifadesi ölçüm

yapılan güne ait eşel yüksekliğine bağlı elde edilen debi değerini göstermektedir. Denklemin geri kalan terimleri birim dönüşümü için kullanılmıştır.

$$\mathrm{SED_{yük}}\left(\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{gün}}\right) = \mathrm{SED_{kons}}\left(\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}\right) \times \mathrm{Q}\left(\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}}\right) \times \frac{1\ \mathrm{L}}{10^{-3}\ \mathrm{m^3}} \times \frac{86400\ \mathrm{s}}{1\ \mathrm{gün}} \times \frac{1\ \mathrm{ton}}{10^{9}\ \mathrm{mg}} \qquad \textbf{(3.5)}$$

Denklem 3.5 kullanılarak, ölçüm yapılan 15 güne ait sediment yükü değerlerinin tümü hesaplanmıştır. **Tablo 3.10**'da 15 farklı gün için hesaplanan sediment yükleri o tarihlere ait eşel yüksekliği ve AKM konsantrasyonları ile birlikte sunulmaktadır. Bu veri seti tez çalışmasının havza modellemesi validasyon aşamasında model sediment yükü doğrulaması için kullanılmıştır.

Tablo 3.10: Numune tarihlerine ait eşel yüksekliği, debi, AKM konsantrasyonu ve sediment yükü değerleri.

Numune no.	Tarih	Saat	Eşel Yüksekliği (cm)	Debi (m^3/s)	AKM konsantrasyonu (mg/L)	Sediment yükü (ton/gün)
1	21.11.2024	10:00	24	0.192	5	0.08
2	29.11.2024	10:30	24	0.192	4	0.07
3	10.12.2024	12:07	50	2.160	64	11.94
4	22.12.2024	10:20	45	1.610	106.7	14.84
5	14.01.2025	9:50	125	15.400	270	359.25
6	24.01.2025	12:40	37	0.899	20	1.55
7	13.02.2025	10:00	80	6.560	102.5	58.10
8	18.02.2025	12:30	80	6.560	56.6	32.08
9	25.02.2025	9:30	50	2.160	138.7	25.88
10	03.03.2025	11:30	40	1.130	33.33	3.25
11	12.03.2025	12:30	37	0.899	216	16.78
12	06.04.2025	16:00	30	0.439	5	0.19
13	30.04.2025	13:45	30	0.439	5	0.19
14	07.05.2025	9:50	30	0.439	13.33	0.51
15	16.05.2025	10:30	24	0.192	6.66	0.11

3.4. ARAZİ DEĞİŞİM MODELLEMESİ (TerrSet LCM)

3.4.1. TerrSet LCM Modelleme Teorisi

TerrSet (eski adı ile IDRISI), Clark Üniversitesi tarafından geliştirilen bir CBS yazılımıdır (**Eastman, 2012**). Bu yazılım bünyesinde yer alan Land Change Modeler (LCM), geçmişe dönük AKAÖ değişimlerini analiz etmek ve bu değişimlerin gelecekteki eğilimlerini mekansal olarak modellemek amacıyla geliştirilmiş özel bir modüldür. LCM, AKAÖ'deki değişim süreçlerini istatistiksel, mekansal ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerle analiz eder ve simülasyonlarla geleceğe yönelik projeksiyonlar sunar. LCM altı farklı ANN tabanlı öğrenme algoritması içermektedir: Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron, MLP), Karar Ağacı (Decision Forest, DF), Lojistik Regresyon (Logistic Regression, LR), Ağırlıklı Normalize Olasılık (Weighted Normalized Likelihood, WNL), Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine, SVM) ve SimWeight.

Model, temelde geçmiş dönemlere ait AKAÖ verileri ile değişimi etkileyen itici güçler (driving factors) üzerinden geçiş potansiyellerini oluşturur. Değişim analizi ve geçiş potansiyeli süreci, iki zaman dilimine ait sınıflandırılmış AKAÖ haritalarının karşılaştırılmasıyla başlar. Bu haritalar arasındaki fark, değişim matrisleri ve mekansal dönüşüm haritaları ile ifade edilir. Her bir AKAÖ sınıfı için hangi sınıflara ne ölçüde dönüştüğü belirlenir. Bu geçişler, çeşitli itici güçlerin (topoğrafya, yollara yakınlık, nüfus yoğunluğu vb.) etkileriyle birlikte değerlendirilerek, geçiş potansiyel yüzeyleri oluşturulur. MLP bu aşamada kullanılan en yaygın yapay sinir ağı yöntemlerinden birisidir. Parametrik olmayan bir yaklaşım olarak MLP, doğrusal olmayan ilişkileri öğrenme kapasitesi yüksek olan bir denetimli öğrenme yöntemidir ve mekânsal değişimlerin belirleyicileri ile değişim desenleri arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenmekte oldukça etkilidir (**Eastman, 2015**). Lojistik Regresyon gibi diğer modellerle karşılaştırıldığında, MLP genellikle gelecekteki AKAÖ değişikliklerini tahmin etmede daha üstün bir araç olarak kabul edilmektedir (**Mas, 2014; Aguejdad ve diğ., 2017; Gunacti ve diğ., 2022**).

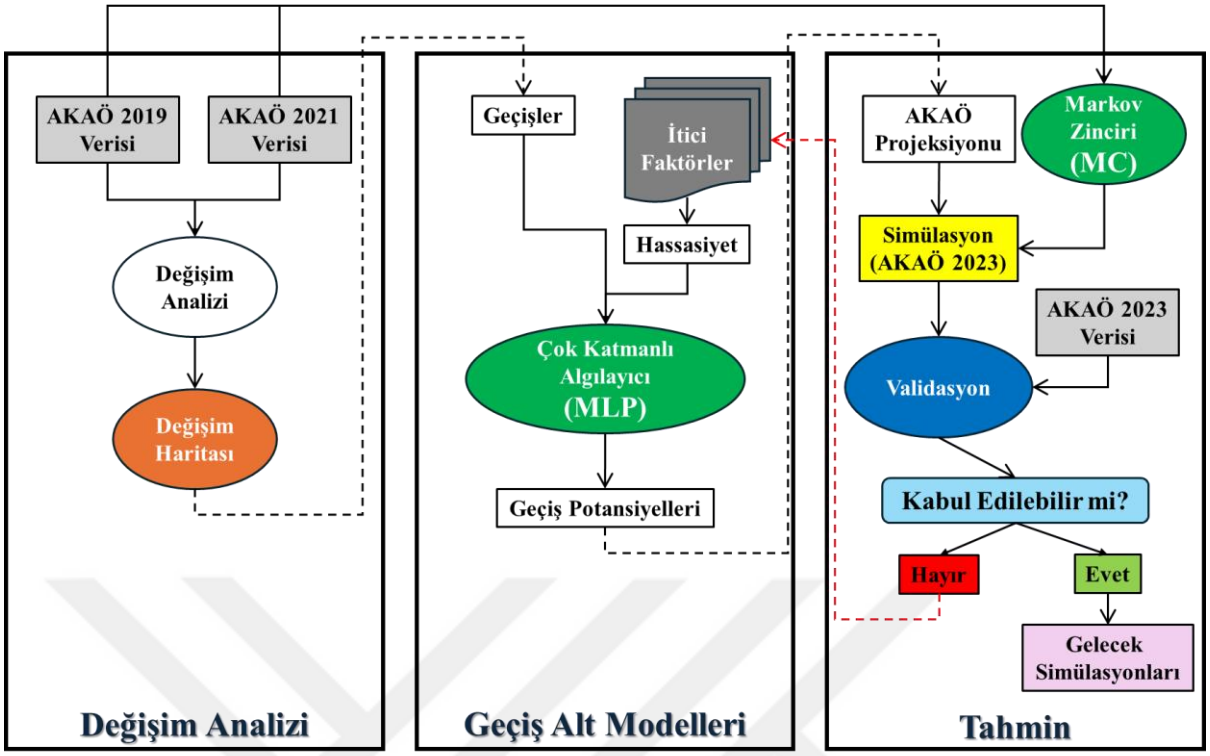
Modelleme sürecinde, iki farklı tarihli AKAÖ haritası kullanılarak, belirli bir sınıfın başka bir sınıfa dönüşümünü temsil eden ikili (binary) değişim haritaları oluşturulmaktadır. Bu değişimlerin mekânsal dağılımını etkileyebilecek faktörler (örneğin; eğim, yükselti, yolların uzaklığı, yerleşim alanlarına mesafe, toprak özellikleri gibi raster biçimindeki mekânsal etkenler) modele giriş olarak verilmektedir. MLP algoritması, her bir dönüşüm türü için ayrı bir ANN modeli oluşturur. Bu modeller, seçilen örneklem noktaları üzerinden eğitilir. Eğitim

aşamasında, sinir ağı giriş katmanında yer alan mekânsal faktörler ile çıkış katmanındaki değişim durumu (değişim var/yok) arasında bağlantılar kurulmakta ve ağırlıklar geri yayılım (backpropagation) algoritması ile optimize edilmektedir. Eğitilen MLP modeli, her bir hücre için değişim olasılığını ifade eden bir uygunluk haritası (transition potential map) üretir. Bu harita, gelecekte ilgili dönüşümün nerede gerçekleşme ihtimalinin yüksek olduğunu gösterir. Daha sonra bu mekânsal olasılık dağılımları, Markov zinciri (MC) tarafından belirlenen miktarsal değişimlerle birleştirilerek belirli bir hedef yıl için AKAÖ simülasyonu gerçekleştirilir.

MLP algoritmasının en önemli avantajı, mekânsal değişimlerin doğrusal olmayan yapısını öğrenebilmesi ve çoklu değişken ilişkilerini yüksek doğrulukla temsil edebilmesidir. Bu yönüyle, özellikle kentleşme, arazi açılması ve orman kaybı gibi insan etkili dönüşümlerin modellenmesinde sıkça tercih edilmektedir.

3.4.2. Alibeyköy Havzası için TerrSet LCM ile Modelleme Aşamaları

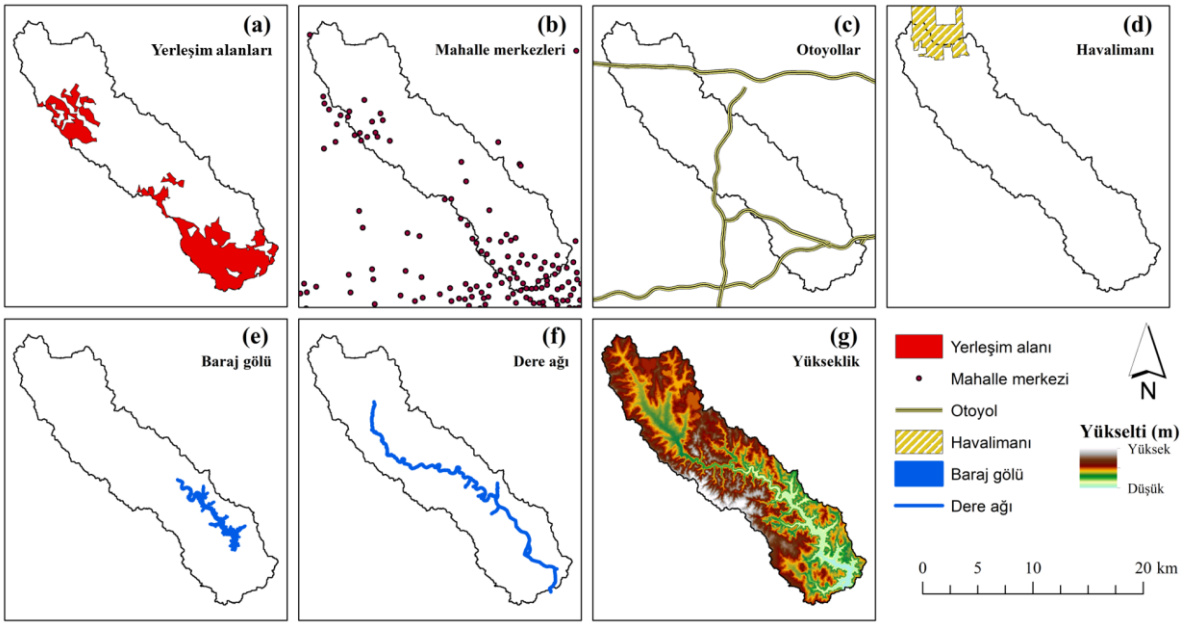
Alibeyköy Havzası AKAÖ değişikliğini LCM ile modelleme yöntemi **Şekil 3.21**'deki akış şemasında gösterilmektedir. Bu modelleme yönteminde **Şekil 3.6**'da gösterilen Esri AKAÖ verilerinden faydalanılmıştır. 2019 ve 2021 yılları arasındaki değişim yapay sinir ağını 'eğitme', 2023 yılı verisi ise 'validasyon' için kullanılmıştır. Gelecek AKAÖ simülasyonlarında ilk olarak önceki ve sonraki yıllara ait (burada 2019 ve 2021) AKAÖ girdi verilerinin değişim analizi yapılmıştır. Veriler aynı coğrafi projeksiyon, hücre sayısı ve sınıflandırma olacak biçimde düzenlenmiştir. Böylece, iki veri arasındaki değişim incelenerek değişim haritaları ve AKAÖ sınıflarının birbirine dönüşüm trendleri belirlenmiştir. Ardından, AKAÖ sınıflarındaki değişimler gözetilerek geçiş alt-modelleri (transition sub-models) oluşturulmuştur. Bu aşamada sınıflar arası geçiş potansiyelleri elde edilmiştir.



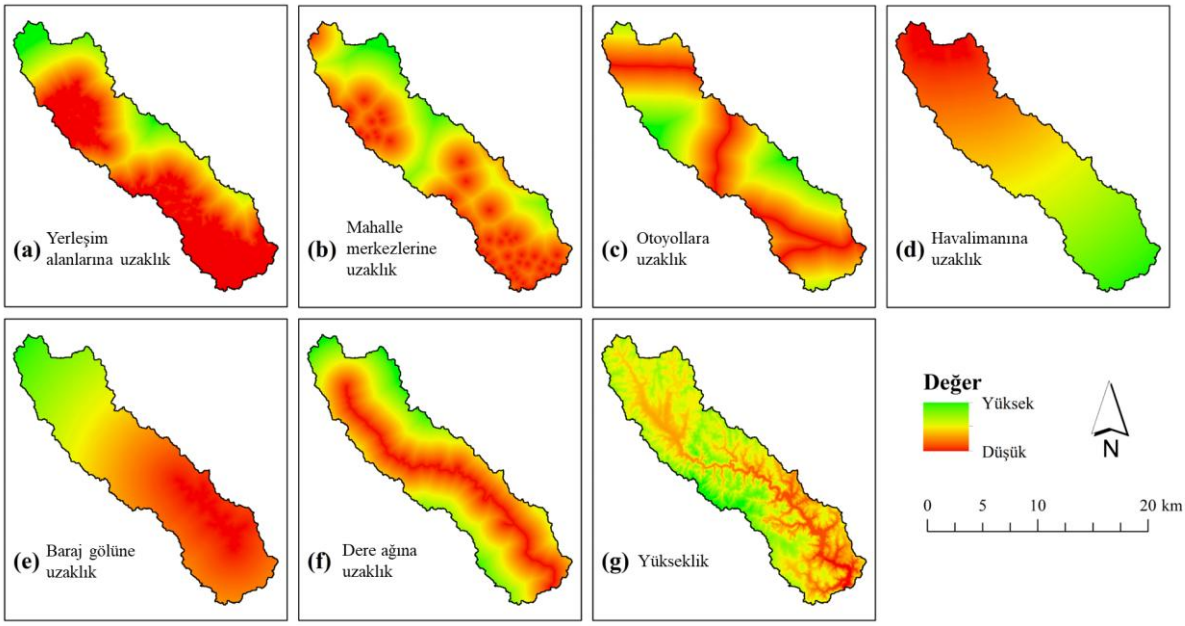
Şekil 3.21: Alibeyköy Havzası'nın LCM ile modellenmesinde kullanılan akış şeması.

Bu çalışmadaki simülasyonlarda geçiş alt-modellerinin oluşturulmasında LCM'nin içerisindeki farklı metotlar arasından MLP tercih edilmiştir. MLP çalıştırılırken sınıflar arasındaki geçişlerde etkili olabilecek değişkenler (itici faktörler) modele girilmiştir. İtici faktörler QGIS QuickOSM eklentisi (https://plugins.qgis.org/plugins/QuickOSM/) yardımıyla elde edilen OpenStreetMap harita verilerinden elde edilmiştir. Alibeyköy Havzası sınırları çevresini kapsayan bu verilerin harita üzerindeki konumlarının gösterimi **Şekil 3.22**'de verilmektedir. Başlangıçta her AKAÖ sınıfının kendi arasındaki dönüşüm trendlerinin yanı sıra 14 farklı itici faktör denenmiştir. İtici faktörlerin farklı kombinasyonları ile model tekrar tekrar çalıştırılarak en uygun sonuçlara erişilebilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada, en etkili olduğu tespit edilen "yerleşim alanlarına uzaklık, mahalle merkezlerine uzaklık, otoyollara uzaklık, havalimanına uzaklık, baraj gölüne uzaklık, dere ağına uzaklık ve yükseklik" itici faktörler olarak kullanılmıştır. İtici faktörler hazır edilirken, yükseklik hariç, uzaklık rasterları ArcGIS/ArcMap yazılımındaki Öklidyen Uzaklık (Euclidean Distance) aracı ile üretilmiştir. Öklidyen Uzaklık işlemi, her hücre merkezinin belirli bir sınıfa (örneğin, yollar) olan düz hat (doğrusal) mesafesini metre cinsinden hesaplamaktadır. Bu işlem sonucunda elde edilen uzaklık rasterları, LCM modeline giriş olarak kullanılmış ve değişim potansiyelinin mekansal modellemesinde

açıklayıcı değişken olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan 7 itici faktör **Şekil 3.23**'te verilmektedir.



Şekil 3.22: Alibeyköy Havzası LCM modeli için itici faktörlerin elde edilmesinde kullanılan (a) yerleşim alanları, (b) mahalle merkezleri, (c) otoyollar, (d) havalimanı, (e) baraj gölü, (f) dere ağı, (g) yükseklik haritaları.



Şekil 3.23: Alibeyköy Havzası LCM modeli için üretilen itici faktörler: (a) yerleşim alanlarına uzaklık, (b) mahalle merkezlerine uzaklık, (c) otoyollara uzaklık, (d) havalimanına uzaklık, (e) baraj gölüne uzaklık, (f) dere ağına uzaklık ve (g) yükseklik.

MLP en az üç katmandan oluşmaktadır: bir girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli katman, ve bir çıktı katmanı. MLP'nin çalıştırılmasında birtakım parametreler ve başlangıç koşulları belirlenmiştir. Her AKAÖ sınıfı için örnekleme boyutu 10000 (%50 eğitme, %50 test) olarak seçilmiştir. Momentum faktörü 0.5, sigmoid sabiti 1.0, gizli katman sayısı 7 olarak alınmıştır. 10000 iterasyon ile çalıştırılan modelde başarı kriteri olarak doğruluk oranının (accuracy rate, AR) %90'ın üzerinde olması hedeflenmitşir. Her katmandaki düğümler (nöronlar), bir sonraki katmandaki her düğüme bağlıdır. Gizli Katman (Hidden Layer) giriş ve çıkış arasında yer alır ve modelin karmaşık desenleri öğrenmesini sağlar. Her bir gizli katman, veriler üzerinde belirli dönüşümler yaparak ağın daha derin bir temsil oluşturmasına olanak tanır. Bu çalışmada, modelin karmaşık AKAÖ ilişkilerini kapsayacak biçimde 7 gizli katman kullanılmıştır. Momentum, öğrenme sürecinde ağırlık güncellemelerinde önceki adımın etkisini belirli bir oranda devam ettirerek, yerel minimumlara takılmayı önlemeye yardımcı olur. 0.5 değeri, önceki güncellemenin %50'sinin yeni güncellemeye katkı sağladığı anlamına gelir. Bu, öğrenmenin daha kararlı ve hızlı gerçekleşmesine katkıda bulunur. Sigmoid fonksiyonu, bir nöronun aktivasyon düzeyini belirlemek için kullanılan doğrusal olmayan bir fonksiyondur ve çıktıları genellikle 0 ile 1 arasında sınırlıdır. Sigmoid sabiti, bu fonksiyonun eğimini kontrol eder. 1.0 değeri, fonksiyonun standart eğimde çalıştığını gösterir.

Stokastik ve bütüncül bir modelleme yöntemi olarak MC, geçmiş değişim kalıplarının gelecekte de devam edeceğini varsayarak gelecekteki AKAÖ değişimlerini tahmin eder (**López vd., 2001**). MC yöntemi, iki tarihsel AKAÖ haritası arasında gözlenen değişimlere dayanarak gelecekteki AKAÖ sınıflarının olasılıksal dağılımını tahmin etmek için kullanılır. Bu yöntem, bir AKAÖ sınıfının diğerine dönüşme olasılığını nicelendiren bir geçiş olasılık matrisi ile beklenen değişim alanını gösteren bir geçiş alan matrisi üretir. Ancak, MC modeli tek başına mekânsal tahsis sağlamaz (**Eastman, 2015**); bu nedenle genellikle MLP gibi mekânsal modelleme yaklaşımlarıyla birleştirilerek gerçekçi mekânsal projeksiyonlar üretilir. Bu entegrasyon, hem gelecekteki AKAÖ değişimlerinin miktarının hem de mekânsal deseninin etkin bir şekilde tahmin edilmesine olanak tanır.

MLP, bir dizi açıklayıcı değişkene dayalı olarak her pikselin geçiş potansiyelini tahmin eden ileri beslemeli bir yapay sinir ağıdır. Özellik vektörü $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ olan her bir girdi pikseli için gizli katmanın hesaplaması **Denklem 3.6** ve **Denklem 3.7**'de gösterildiği şekilde gerçekleştirilir.

$$z_j = \sum_{i=1}^{n} \omega_{ij} x_i + b_j \quad (3.6)$$

$$h_j = f(z_j) \quad (3.7)$$

ω_{ij} bağlantı ağırlıklarını, b_j bias terimini ve $f(\cdot)$ aktivasyon fonksiyonunu (sigmoid) ifade etmektedir.

Daha sonra, çıktı katmanı **Denklem 3.8**'de gösterildiği şekilde geçiş olasılığını üretmektedir.

$$y = g\left(\sum_{j=1}^{m} v_j h_j + c\right) \quad (3.8)$$

v_j gizli katmandan çıktı katmanına olan ağırlıkları, c bias terimini ve $g(\cdot)$ aktivasyon fonksiyonunu (sigmoid) ifade etmektedir. Bu olasılık, ilgili pikselin modellenen geçişi geçirme olasılığı olarak yorumlanmaktadır.

Geçiş modelinin performansı, beceri istatistiği ile ölçülmekte olup, beceri ölçütü (**Denklem 3.9**) ve beklenen doğruluk (**Denklem 3.10**) üzerinden değerlendirilmektedir.

$$S = \frac{A - E(A)}{1 - E(A)} \quad (3.9)$$

$$E(A) = \frac{1}{T + P} \quad (3.10)$$

A ölçülen doğruluğu ve $E(A)$ beklenen doğruluğu ifade etmektedir; burada T geçişlerin sayısını ve P ise kalıcılık (persistence) sınıflarını göstermektedir.

MC modeli, iki zaman periyodu arasındaki arazi örtüsü değişiminin miktarını geçiş olasılıklarına dayanarak tahmin eder. t+1 zamanındaki gelecekteki arazi örtüsü dağılımı, **Denklem 3.11**'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$S_{t+1} = P \cdot S_t \quad (3.11)$$

S_t zaman t'deki arazi örtüsü oranlarını gösteren durum vektörünü, P ise **Denklem 3.12**'de gösterildiği üzere geçiş olasılık matrisi olarak ifade etmektedir.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (\mathbf{3.12})$$

Olasılık matrisinde p_{ij}, i sınıfından j sınıfına geçiş olasılığını temsil etmektedir ve $\sum_{j=1}^{n} p_{ij} = 1$ koşuluna tabidir.

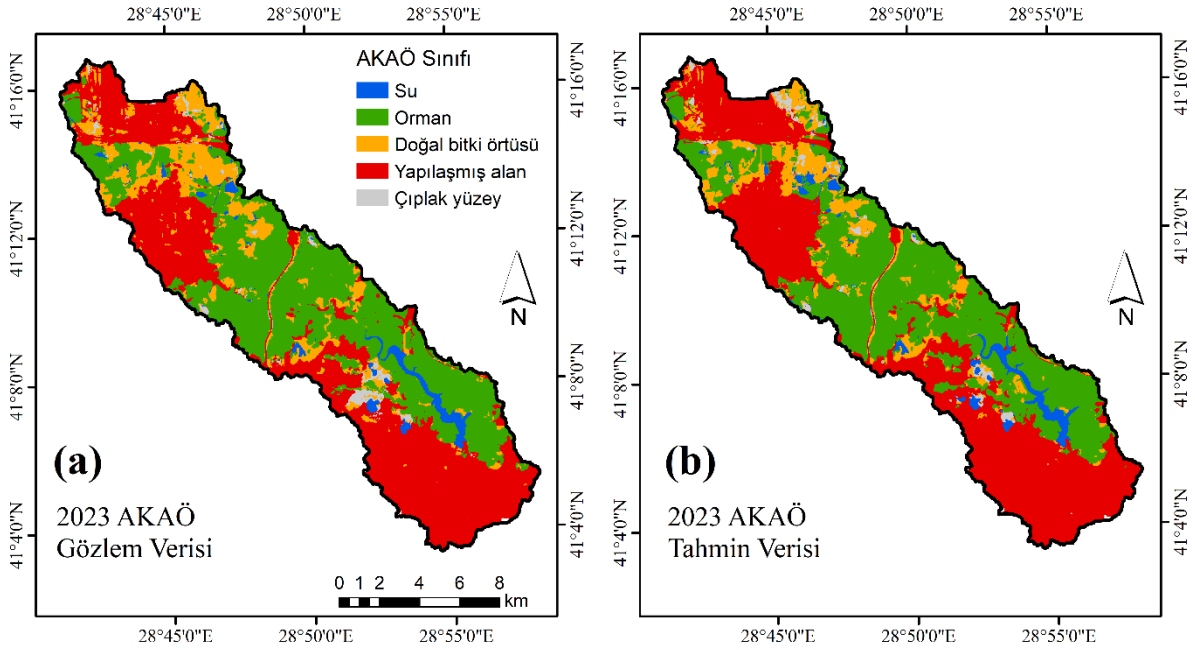
2019 ve 2021 yıllarına ait AKAÖ verileri arasındaki dönüşümler 2023 yılı için modellenerek tahmin edilmiştir. 2023 yılına ait gözlem AKAÖ verisi ise tahmin edilen modelin doğruluğunu test etmek (validasyon) için kullanılmıştır. 2023 yılı için kabul edilebilir doğrulukta tahmin edilen AKAÖ verisi elde edildikten sonra gelecek yıllar için model çalıştırılmış ve AKAÖ tahmin verileri üretilmiştir. **Şekil 3.24**'te 2023 yılına ait AKAÖ gözlem verisi (**Şekil 3.6-c**'de gösterilen veri) ve LCM ile elde edilen 2023 yılına ait AKAÖ tahmin verisi verilmektedir. Test verisi olarak kullanılan 2023 yılına ait Esri AKAÖ verisi ile LCM'den elde edilen 2023 yılı tahmin verisi karşılaştırılmıştır. Görsel olarak yapılan incelemenin yanı sıra gerçekleştirilen AKAÖ değişimi simülasyonlarının başarısı Kappa indeksi ile belirlenmiştir (**Pontius, 2000**). Performans değerlendirme kriteri olarak standart Kappa değeri 0.95 olarak bulunmuştur. Bu değer simülasyon başarısının yüksek olduğunu göstergelerinden birisidir.

AKAÖ değişimi tahmin modellerini değerlendiren çok sayıda çalışmada, sınıflandırma doğruluğunu ve genel model performansını ölçmek amacıyla Kappa indeksi kullanılmıştır (**Pontius, 2000**; **Mitsova ve diğ., 2011**; **Mosammam ve diğ., 2017**; **Rwanga ve Ndambuki, 2017**; **Gashaw ve diğ., 2018**; **Yang ve diğ., 2019**; **Cui ve diğ., 2025**). Ancak, mekânsal değişkenler, arazi kullanım talepleri ve planlama stratejilerinden etkilenen karmaşık kentleşme doğası nedeniyle kentsel genişlemeyi doğru biçimde tahmin etmek hâlen önemli bir zorluktur (**He ve diğ., 2008**). Kappa metriği yararlı içgörüler sunsa da yalnızca bu metriğe dayanmak sınırlı sonuçlar vermektedir (**Foody, 2002**).

Sınıflandırma doğruluğunu daha kapsamlı bir şekilde tanımlamak için, genel doğruluk (OA), tahsis uyuşmazlığı (AD) ve miktar uyuşmazlığı (QD) gibi karışıklık matrisi (confusion matrix) temelli metrikler değerlendirilmiştir. Bunun için oluşturulan hata matrisinden elde edilen OA, AD ve QD değerleri sırasıyla 0.9500, 0.0504 ve 0.0096'dır; bu sonuçlar **Landis ve Koch**

(1977)'un ölçütlerine göre çok iyi bir uyuma işaret etmektedir. Genel hata (OE), AD ve QD'nin toplamı olarak hesaplanmış olup (**Pontius ve Millones, 2011**), 0.0600 olarak bulunmuştur.

Model doğruluğu değerlendirildikten sonra, LCM gelecek yıllar için çalıştırılarak öncelikle 2033, 2043 ve 2053 yıllarına ait AKAÖ tahmin verileri simüle edilmiştir: Bu veriler, bu tez çalışmasındaki **Kısım 4.2**'de yapılan incelemelerde kullanılmıştır. Ardından, LCM 2050, 2070 ve 2090 yılları için de simüle edilerek AKAÖ tahmin verileri üretilmiştir: Bu veriler ise, bu tez çalışmasındaki **Kısım 4.3**'te yapılan incelemelerde kullanılmıştır.



Şekil 3.24: 2023 yılına ait (a) doğrulamada kullanılan Esri kaynaklı gözlem AKAÖ verisi ve (b) LCM ile tahmin edilen AKAÖ verisi.

3.5. HAVZA MODELLEMESİ (SWAT)

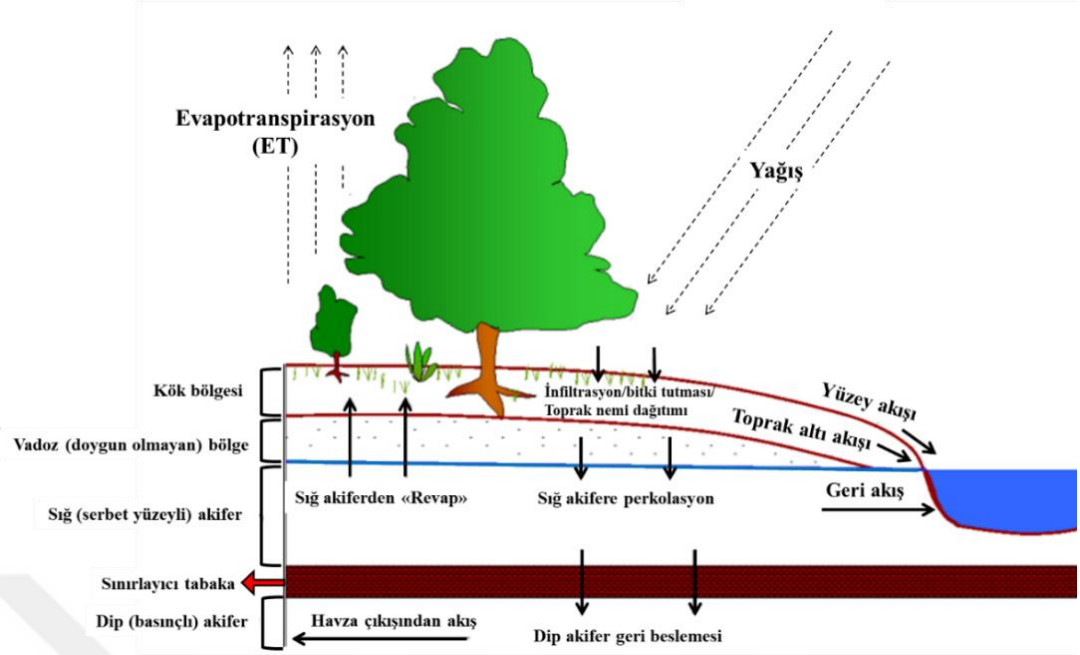
3.5.1. SWAT Modelleme Teorisi

Arnold ve diğ. (1998) tarafından geliştirilen Soil and Water Assessment Tool (SWAT), yarı-dağıtımlı (semi-distributed), fiziksel-tabanlı bilgiler içeren mekansal girdiler (physical-based) ve günlük meteorolojik veriler ile çalışabilen sürekli (continuous) bir havza modelidir. SWAT model yapısında havza temsiliyeti, öncelikle topografyaya bağlı olarak alt havzalara, ardından her bir alt havza hidrolojik işlem birimleri (HRU) adı verilen parçalara ayrılmaktadır. Hidrolojik süreçlere ait matematiksel hesaplamalar farklı mekansal bölümlere ayrılan

HRU'larda gerçekleştirilmektedir. Bu yapısı ile SWAT yarı-dağıtımlıdır. HRU'larda toprak fazındaki hesaplama eğim, AKAÖ ve toprak tipi mekansal girdilerinin örtüştürülmesinden meydana gelen bilgiler ile yapılmaktadır. Arazi kullanımı sınıflarına dair bitki yoğunluğu veya göllenme gibi yüzeysel özellikler ve toprak tipine dair geçirimlilik veya iletkenlik gibi fiziksel özellikleri kullanması açısından SWAT fiziksel tabanlı girdilere dayalı bir model olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca SWAT, oluşturulan her bir alt havza içerisinde bir akarsu parçası tanımlamaktadır. Her bir akarsu parçasında o akarsu kesitine ait özelliklere dayalı olarak öteleme süreci gerçekleştirilmektedir. Böylece, bir su havzası için toprak fazında (land phase) HRU'lardaki ve öteleme fazında (routing phase) akarsu kesitlerindeki hesaplamalar ile hidrolojik süreçler modellenebilmektedir. SWAT'ta hesaplamalar günlük zaman adımındaki beş meteorolojik değişken (yağış, sıcaklık, güneş radyasyonu, rüzgar hızı ve bağıl nem) ile yapılmaktadır. Yağış ve sıcaklık verileri modelin ihtiyaç duyduğu modelleme için gerekli girdilerdir. Diğer meteorolojik girdiler ise farklı (güneş radyasyonu, rüzgar hızı ve bağıl nem) opsiyonel olanlardır. SWAT genellikle uzun yıllık periyotları içeren süreçlerin modellenmesi için tasarlanan ve bu tip modellemelerde başarı gösteren bir araçtır. Bu yönüyle SWAT sürekli bir havza modelidir.

SWAT'ın Dünya genelinde birçok başarılı uygulaması mevcuttur (**Gassman ve diğ., 2007; Aloui ve diğ., 2022**). Yapılan çalışmalarda SWAT modelinden, farklı amaçlara uygun bir araç olarak faydanılmıştır. Dünya genelinde çok sayıda çalışmada SWAT yayılı kirleticiler veya su kalitesi değişkenlerinin modellenmesinde kullanılırken Türkiye'de genellikle akışların ve su dengesi bileşenlerinin modellenmesinde kullanılmıştır (**Peker ve Cuceloglu, 2021**).

SWAT'ta hidrolojik döngü **Şekil 3.25**'te gösterildiği gibi temsil edilmektedir. Buna göre, yağış ve sıcaklık girdisine bağlı olarak potansiyel evapotranspirasyon (PET) hesaplanmakta, sonrasında toprağa ulaşan su miktarı akarsuya ulaşan akış ve yeraltı akışı süreçlerine dahil olmaktadır. Akarsuya ulaşan akış (su verimi) yüzey akışı, toprak altı akışı, sığ akiferden geri akış ve dip akifer geri beslemesinin toplamıdır. Vadoz bölgeden sığ akifere geçiş (perkolasyon) ve sığ akiferden vadoz bölgeye geri dönen akış (revap) toprak özellikleri bilgisine göre hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.25: SWAT'ta hidrolojik döngü sürecini açıklayan şematik gösterim.

SWAT modelinde bir havzanın hidrolojik simülasyonu iki temel aşamadan oluşur: İlk aşama, hidrolojik döngünün toprak fazını (land phase) kapsamaktadır; bu faz, her bir alt havza içerisinde yüzey akışı, infiltrasyon, buharlaşma ve yeraltı akışı süreçleri sonucunda oluşan su, sediment, besin maddeleri ve pestisitlerin ana nehir koluna taşınmasını ifade eder. İkinci aşama ise hidrolojik döngünün öteleme fazı (routing phase) olup, bu maddelerin havzanın ana nehir ağı boyunca çıkış noktasına doğru taşınımını simüle eder (**Neitsch ve diğ., 2011**). SWAT modelinde hidrolojik döngü, **Denklem 3.13**'te gösterilen su dengesi denklemi ile temsil edilir.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t} (R_{day} - Q_{surf} - E_\alpha - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (3.13)$$

Burada; SW_t nihai toprak su içeriğini (mm), SW_0 *i*. günde başlangıçtaki toprak su içeriğini (mm), *t* zamanı (günleri), R_{day} *i*. günde yağış miktarını (mm), Q_{surf} *i*. gündeki yüzey akışı miktarını (mm), E_α *i*. gündeki evapotranspirasyon miktarını (mm), w_{seep} *i*. gündeki toprak profilinden vadoz bölgeye giren su miktarını (mm) ve Q_{gw} *i*. günde geri dönüş akışını (mm) ifade eder.

SWAT modelinde, sediment veriminin hesaplanması için Modifiye Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (Modified Universial Soil Loss Equation, MUSLE) kullanılmaktadır (**Williams, 1975**). MUSLE kullanılarak sediment veriminin hesaplanması için **Denklem 3.14** kullanılır.

$$sed = 11.8\ (Q_{surf}.q_{peak}.area_{HRU})^{0.56}.K_{USLE}.P_{USLE}.C_{USLE}.LS_{USLE}.CFRG \quad (\mathbf{3.14})$$

Burada; sed sediment verimi (ton/ha), Q_{surf} yüzey akış hacmi (m^3/s), q_{peak} pik akış oranı (m^3/s), $area_{HRU}$ HRU'nun alanı, K_{USLE} toprağın aşınabilirlik faktörü, P_{USLE} destek uygulama faktörü, C_{USLE} örtü ve yönetim faktörü, LS_{USLE} topografik faktör ve CFRG kaba parça faktörüdür (**Neitsch ve diğ., 2012; Bonumá ve diğ., 2014**).

SWAT modelinde yer alan üç farklı PET hesaplama yöntemi, ihtiyaç duydukları girdi veri miktarına göre farklılık göstermektedir. Penman-Monteith yöntemi (**Monteith, 1965**); güneş radyasyonu, hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar hızı verilerini gerektirirken; Priestley-Taylor yöntemi (**Priestly ve Taylor, 1972**) yalnızca güneşlenme, hava sıcaklığı ve bağıl nem verilerine ihtiyaç duyar. En az veri gereksinimine sahip olan Hargreaves yöntemi ise (**Hargreaves ve Allen, 2003**) sadece hava sıcaklığı verisi ile çalışmaktadır. Bu tez çalışmasındaki SWAT modellemelerinde kullanılan Hargreaves yöntemiyle PET hesabı **Denklem 3.15**'te verilmektedir.

$$\lambda E_0 = 0.0023 \times H_0 \times (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \times (\overline{T_{av}} + 17.8) \quad (\mathbf{3.15})$$

Burada; λ buharlaşma ısısını (MJ kg^{-1}), E_0 potansiyel evapotranspirasyonu (mm/gün), H_0 dış atmosfer radyasyonunu (MJ m^{-2}/gün), T_{mx} belirli bir gün için maksimum hava sıcaklığını (^oC), T_{mn} belirli bir gün için minimum hava sıcaklığını (^oC), $\overline{T_{av}}$ belirli bir gün için ortalama hava sıcaklığını (^oC) ifade etmektedir.

SWAT modeli yüzey akışlarını Eğri Numarası (Curve Number, CN) yöntemi ile hesaplamaktadır (**SCS, 1985**). Eğri numarası yöntemi ile yüzey akışı hesabında **Denklem 3.16** kulllanılmaktadır.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (\mathbf{3.16})$$

Burada, Q_{surf} biriken yüzey akışı veya artık (efektif) yağışı (mm), R_{day} gün içerisindeki toplam yağış miktarını (mm), I_a (yaklaşık olarak 0.2S olarak alınır) yüzey akışı oluşmadan önce gerçekleşen tüm başlangıç kayıplarını (mm) ve S tutma (retention) parametresini (mm) ifade eder. Tutma parametresi (S), toprak özellikleri, arazi kullanımı ve topraktaki su içeriğindeki değişikliklere bağlı olarak mekânsal olarak değişkenlik gösterir. Bu parametre **Denklem 3.17**'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. CN parametresi AKAÖ verilerine ait bilgilerden elde edilerek modeldeki her HRU için mekansal değişken olarak tanımlanmaktadır.

$$S = 25.4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \quad (\mathbf{3.17})$$

SWAT model kurulumunun gerçekleştirilebilmesi için öncelikle mekânsal girdi verileri ile HRU'ların oluşturulması gerekmektedir. Bu süreç farklı CBS platformlarında gerçekleştirilebilmektedir. ArcGIS/ArcMap ve QGIS platformları bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanlardır. Bu CBS platformları mekansal girdilerin kullanılarak HRU'ların oluşturulmasında ve sonrasında modelin çalıştırılmasında kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında ArcGIS/ArcMap 10.8.2 sürümünde çalışabilen ArcSWAT 2012.10_8.26 versiyonu ile modellemeler gerçekleştirilmiştir.

3.5.2. Alibeyköy Havzası için SWAT ile Modelleme Aşamaları

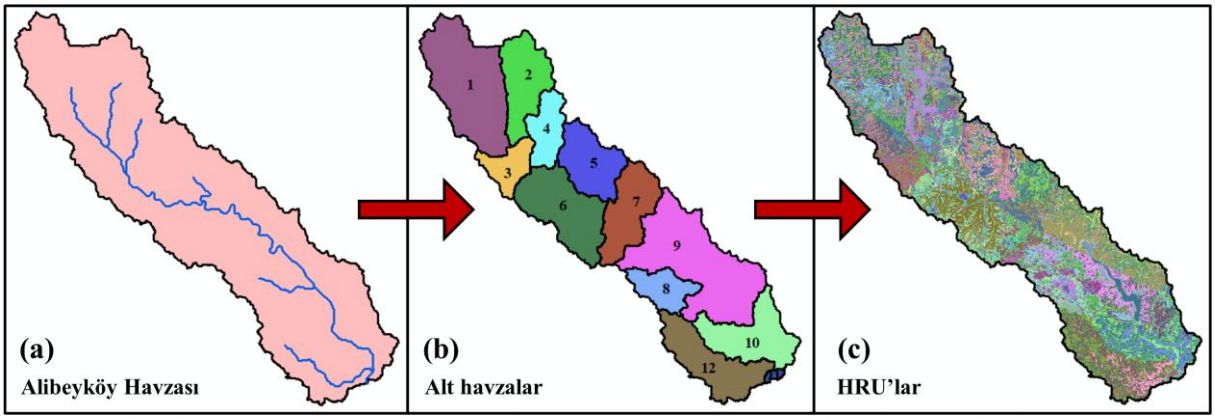
Alibeyköy Havzası için gerçekleştirilen SWAT modelleme süreci üç temel aşamadan oluşmaktadır: İlk aşamada, modelleme için gerekli olan mekânsal ve meteorolojik veriler toplanarak SWAT modelinin gereksinim duyduğu formatlara uygun şekilde işlenmiştir. İkinci aşamada, modelin başlangıç koşulları tanımlanmış, modelin çatısı oluşturulmuş ve ilk çalıştırma gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise modelin akış ve sediment yükü simülasyonları, mevcut gözlem verileri ile karşılaştırılarak kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Bu tez çalışmasının ilgili bölümü, model çatısının kurulmasına ilişkin ilk iki aşamayı kapsamaktadır. Model kalibrasyonuna yönelik ayrıntılı açıklamalar ise çalışmanın ilerleyen bölümlerinde (**Kısım 4.1.1** ve **Kısım 4.3.1**) sunulacaktır.

Alibeyköy Havzası için oluşturulan SWAT modelinin çatısı, iki farklı meteorolojik veri seti kullanılarak oluşturulmuştur. İlk model (bundan sonra **SWAT-1** olarak isimlendirilecektir), **Kısım 3.2.2.1**'de detayları verilen Arnavutköy ve Eyüp meteoroloji gözlem istasyonlarına ait veriler kullanılarak çalıştırılmıştır. İkinci model ise (bundan sonra **SWAT-2** olarak isimlendirilecektir), aynı kısımda açıklanan Sarıyer meteoroloji gözlem istasyonuna ait veriler kullanılarak çalıştırılmıştır. Bu şekilde iki farklı model çatısı oluşturulmasının sebebi, farklı amaçlara yönelik incelemelerde farklı meteorolojik girdilere ihtiyaç duyulmasıdır. SWAT-1 model çatısında, havalimanı inşaatı ile hızlı AKAÖ dönüşümünün etkisi incelenmektedir; bu amaca uygun şekilde, konumları havza sınırları içerisinde bulunan ve veri periyodu havalimanı inşaatı öncesi ve sonrasını temsil eden Arnavutköy ve Eyüp meteoroloji gözlem istasyonları tercih edilmiştir. İklim değişikliğinin etkilerine yönelik incelemelerde bu istayonlara ait verilerin periyodu (10 yıllık) çalışmanın amacı için yeterli görülmemiştir. Bu sebeple, SWAT-2 model çatısında, daha uzun yılları kapsayan veri periyoduna sahip (47 yıl) Sarıyer meteoroloji gözlem istasyonuna ait veriler iklim değişikliğinin etkisine yönelik incelemeler için uygun bulunmuştur. Sarıyer istasyonu **Şekil 3.7**'de gösterildiği üzere konumu havza sınırının içerisinde bulunmasa da Arnavutköy ve Eyüp meteoroloji istasyonuna ait veriler ile iyi uyum gösterdiği için tercih edilmiştir.

SWAT-1 modeli kurulumu sırasında, Alibeyköy Havzası öncelikle topografik özelliklere dayanarak alt havzalara ayrılmış ve dere ağı oluşturulmuş, ardından her bir alt havza eğim, toprak tipi ve AKAÖ özellikleri dikkate alınarak HRU'lara bölünmüştür. Topografik özellikler için **Kısım 3.2.1.1**'de açıklandığı üzere SRTM verisi kullanılmıştır (**Şekil 3.2-a**). Kurulan modelde havza alanı SWAT'ın otomatik havza ayrımı özelliği kullanılarak 12 alt havzaya bölünmüştür. Eğim, <%5, %5–10, %10–15, %15–20 ve >%20 olmak üzere beş sınıfa ayrılmıştır (**Şekil 3.2-b**). HRU'ların oluşturulmasında **Kısım 3.2.1.2**'de açıklandığı üzere toprak tipi için FAO-DSMW (**Şekil 3.3**) ve AKAÖ sınıfları için **Kısım 3.2.1.3**'te detayları verilen Landsat AKAÖ verileri kullanılmıştır (**Şekil 3.5**). AKAÖ sınıfları SWAT modeline uygun formatta modele özgü kodlar ile tanımlanmıştır. Bunun için; su sınıfı için "WATR", orman sınıfı için "FRST", doğal bitki örtüsü sınıfı için "RNGE", yapılaşmış alan sınıfı için "URBN" ve çıplak yüzey sınıfı için "BARR" kodları kullanılmıştır. Neticede, 311 HRU oluşturulmuştur. Oluşturulan modele ait mekansal konfigürasyon **Şekil 3.26**'da gösterilmektedir. Meteoroloji verisi olarak Arnavutköy ve Eyüp istasyonlarına ait yağış ve sıcaklık verilerinden faydalanılmıştır. Modelde PET hesaplamaları için Hargreaves yöntemi

kullanılmıştır. Model simülasyonları, meteorolojik veriler, akım ve sediment yükü gözlemlerinin mevcut olduğu 2011–2022 yıllarını kapsamaktadır. SWAT-1 modelinde günlük zaman adımında akış ve sediment yükü simülasyonları gözetilmiştir.

Tez çalışmasındaki **Kısım 4.2**'de incelenen AKAÖ değişikliğinin baraj ölü hacmine etkisine dair analizleri için SWAT-1 modeli kullanılmıştır. Bu kapsamdaki incelemeler, **Kısım 3.4.2**'de açıklanan yöntem ile gelecek yıllara projekte edilen 2033, 2043 ve 2053 AKAÖ tahmin verileri modele girilerek uygulanmıştır.

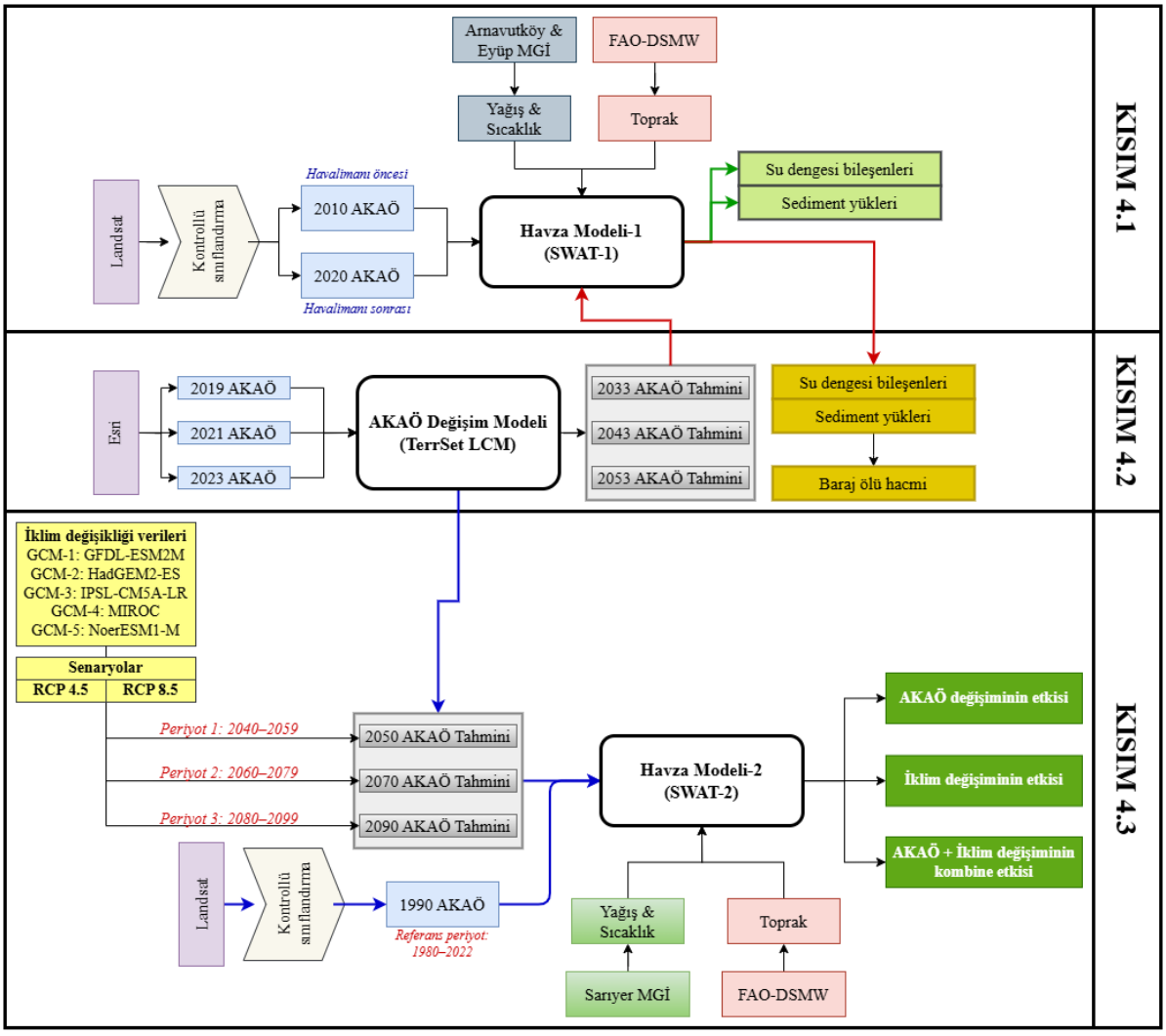


Şekil 3.26: Alibeyköy Havzası SWAT modeli çatısına ait (a) dere ağı çıkarımı, (b) 12 alt havza ve (c) 311 HRU'nun gösterimi.

SWAT-2 modeli kurulumu, SWAT-1 modeline benzer şekilde alt havza ve HRU ayrımı yapılarak gerçekleştirilmiştir. Modelin tüm mekansal konfigürasyonu **Şekil 3.26**'da verilen SWAT-1 ile benzerdir. Farklı olarak, SWAT-2 model çatısında, meteoroloji verisi olarak Sarıyer istasyonuna ait yağış ve sıcaklık verilerinden faydalanılmıştır. Model simülasyonları, meteorolojik veriler, akım ve sediment yükü gözlemlerinin mevcut olduğu 1976–2022 su yıllarını kapsamaktadır. SWAT-2 modelinde aylık zaman adımında akış ve sediment yükü simülasyonları gözetilmiştir.

İklim değişikliğinin etkilerine dair incelemelerde gelecek periyotlar için **Kısım 3.2.2.2**'de detayları verilen iklim değişikliği verileri modele girilmiştir. AKAÖ için ise **Kısım 3.4.2**'de açıklanan yöntem ile gelecek periyotları temsil edecek biçimde 2050, 2070 ve 2090 yıllarına projekte edilen AKAÖ tahmin verileri kullanılmıştır.

Özetle, Şekil 3.27 Alibeyköy Havzası için LCM ile elde edilen gelecek yıllara ait AKAÖ tahmin modellemesi ve SWAT ile gerçekleştirilen hidrolojik modelleme aşamalarını tez çalışmasının bulgu kısımları ile ilişkilendirerek göstermektedir.



Şekil 3.27: Tez çalışmasında kullanılan yöntem ve bulguların tezin kısımları ile ilişkili özeti.

4. BULGULAR

Bu tez çalışmasının bulguları, temelde AKAÖ ve iklim değişimini konu alan üç ana başlık altında incelenmiştir. İlk başlıktaki incelemeler, **Kısım 4.1**'de detaylandırılacağı üzere, Alibeyköy Havzası'nın memba kısmında inşa edilen havalimanı ile değişen hızlı AKAÖ koşullarının havza hidrolojisi ve sediment yüklerine etkisini içermektedir. İkinci başlıktaki incelemeler, **Kısım 4.2**'de detaylandırılacağı üzere, havalimanı inşası sonrası devam eden AKAÖ değişimlerinin gelecek projeksiyonlarının analizini ve bu değişimin Alibey Barajı ölü hacmi üzerindeki etkilerini içermektedir. Üçüncü başlıktaki incelemeler ise, **Kısım 4.3**'te detaylandırılacağı üzere, AKAÖ ve iklim değişiminin gelecek yıllardaki kombine etkilerinin akış ve sediment yükleri açısından değerlendirilmesini ortaya koymaktadır. Tezin sonraki kısımlarında bu üç ana başlık altında gerçekleştirilen çalışmalar açıklanmaktadır.

4.1. HAVALİMANI İNŞAATI İLE AKAÖ'DEKİ ANİ DEĞİŞİMİN HAVZA HİDROLOJİSİ VE SEDİMENT YÜKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Alibeyköy Havzası memba kısmında 2014 yılında inşa edilmeye başlanan havalimanı ile havza içerisinde ani bir AKAÖ değişimi görülmektedir. AKAÖ sınıflarındaki bu ani değişim 2010 ve 2020 yıllarına ait AKAÖ haritaları kullanılarak (**Şekil 3.5-e** ve **Şekil 3.5-f**) analiz edilmiştir. 2010 yılı havalimanı öncesini, 2020 yılı ise havalimanı sonrasını temsil eden AKAÖ haritaları sunmaktadır. Değişimin havza hidrolojisi ve sediment yüklerindeki etkisi SWAT-1 modeli aracılığıyla incelenmiştir. **Kısım 3.5.2**'de detayları açıklanan SWAT-1 modelinin akış ve sediment yükleri için kalibrasyonu ve validasyonu bu kısımda detaylandırılmıştır.

4.1.1. SWAT-1 Modelinin Kalibrasyonu ve Validasyonu

SWAT-1 modelinin kalibrasyonu, SWAT modeline özgü geliştirilmiş RSWAT (**Nguyen ve diğ., 2022**) kullanılarak manuel olarak gerçekleştirilmiştir. RSWAT, SWAT parametrelerinin el ile değiştirilerek veya otomatik optimizasyon yöntemleri kullanarak sonuçları incelemede kolaylık sağlayan bir R paketidir. SWAT-1 modeli için model parametreleri deneme yanılma yöntemi ile ayarlanarak model kalibrasyonu yapılmıştır.

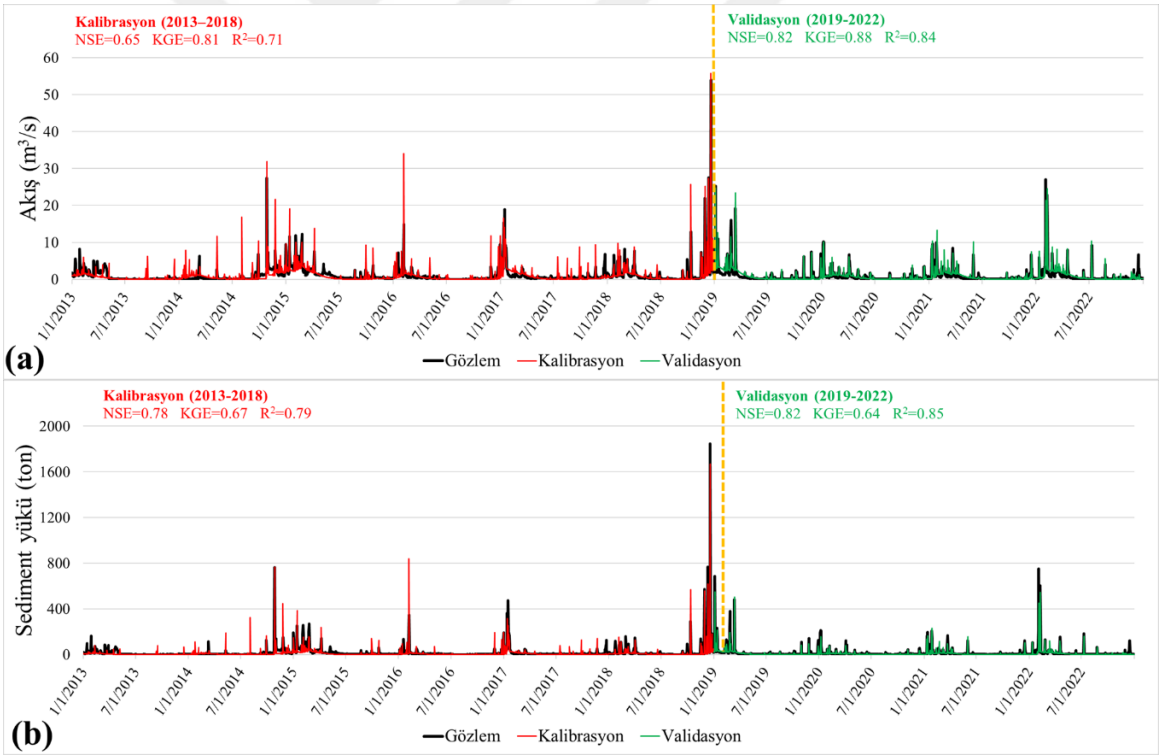
Tablo 4.1'de SWAT-1 modeli için ayarlanan model parametrelerinin açıklamaları ve kalibre edilen değerleri gösterilmektedir. Buna göre, modelin kalibrasyonu için akış ve sediment yükü simülasyonlarında yüksek hassasiyet gösteren etkili on parametre kullanılmıştır. Bunlar; CN2, ESCO, SOL_Z, SOL_K, SOL_AWC, SOL_BD, ALPHA_BF, SLSUBBSN, USLE_P ve

SPEXP parametreleridir. CN2 parametresi yapılaşmış alan AKAÖ sınıfı için (URBN) ayrı tutularak kalibre edilmiştir. Böylece, SWAT'ın URBN kodlu sınıf tanımına ait CN2 eğri numarası değerleri yapılaşmış alan sınıfını temsil edecek biçimde (80 ve üzeri) ayarlanabilmiştir. Mekâna göre değişkenlik gösteren parametreler (her HRU için farklı değer alan CN2 parametresi gibi) rölatif olarak (yüzde oran) değiştirilmiştir. Örneğin, CN2 parmetresinin -0.25 olarak kalibre edilmesi, bu parametrenin her HRU'daki ayrı değerinin %25 oranında azaltılması anlamına gelmektedir. Tüm havza için tek bir değer ile temsil edilen parametreler ise direkt değeri değiştirilerek kalibre edilmiştir. CN2 yüzey akışlarını, ESCO buharlaşmayı, SOL_Z, SOL_K, SOL_AWC, SOL_BD toprağa sızma süreçlerini, ALPHA_BF ise yeraltı suyu ile ilgili akış üzerinde etkili olan parametrelerdir. USLE_P ve SPEXP parametreleri doğrudan toprağın erozyon süreçleri üzerinde etkili olan parametrelerdir ve sediment yükünün model çıktıları için oldukça hassastır. SLSUBBSN parametresi alt havzaların ortalama eğim uzunluklarını ayarlayarak hem akış hem de sediment yükü simülasyonlarına etki etmiştir.

Tablo 4.1: SWAT-1 modelinde kullanılan parametrelerin açıklamaları ve kalibre edilen değerleri.

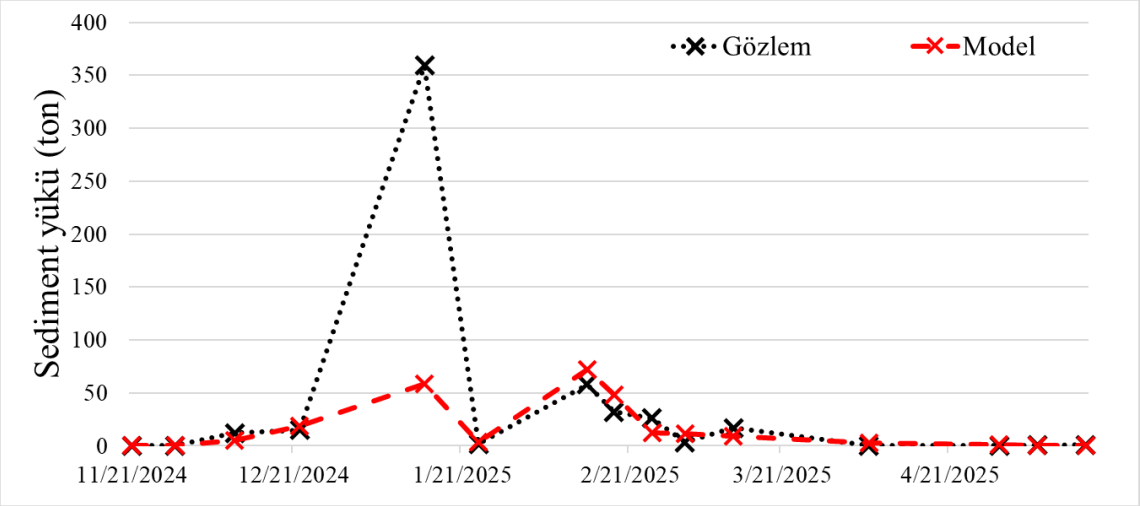
Parametre	**Açıklama**	**Değiştirme Yöntemi**	**Kalibre edilen değer**
CN2 (FRST, RNGE, BARR, WATR)	Nem durumu II için başlangıç SCS akış eğrisi numarası (CN) (birimsiz katsayı)	yüzde oran	-0.25
CN2 (URBN)		direkt değer	80
ESCO	Toprak buharlaşma kompanzasyon faktörü (birimsiz katsayı)	direkt değer	0.65
SOL_Z	Yüzey topraktan alt katmana kadar derinlik (mm)	yüzde oran	0.5
SOL_K	Doymuş hidrolik iletkenlik (mm/saat)	yüzde oran	0.25
SOL_AWC	Toprak tabakasının mevcut su kapasitesi (mm H_2O/mm toprak)	yüzde oran	0.5
SOL_BD	Nemli kütle yoğunluğu (g/cm^3)	yüzde oran	0.2
ALPHA_BF	Baz akış alfa faktörü (1/gün)	direkt değer	0.75
SLSUBBSN	Ortalama eğim uzunluğu (m)	direkt değer	50
USLE_P	USLE denklemi destek uygulama faktörü (birimsiz katsayı)	direkt değer	0.9
SPEXP	Nehir sediment yönlendirmesinde yeniden sürüklenen sedimenti hesaplamak için üs parametresi (birimsiz katsayı)	direkt değer	1.0

SWAT-1 modelinde Arnavutköy ve Eyüp istasyonlarına ait yağış ve sıcaklık verileri kullanılmıştır. Bu veriler 2013–2022 yılları aralığını kapsamaktadır. Sarıyer istasyonuna ait 2011 ve 2012 yıllarına ait yağış ve sıcaklık verileri dahil edilerek 2011–2022 periyodunda model çalıştırılmıştır. Dahil edilen 2011 ve 2012 yılları (2 yıl) modelde ısıtma periyodu (wam-up period) olarak kullanılmıştır. 2013–2018 aralığındaki altı yıl model kalibrasyonu, 2019–2022 aralığındaki dört yıl ise model validasyonu için ayrılmıştır. **Şekil 4.1**'de model periyodunda gözlenen ve modellenen akış ve sediment yükü değerleri gösterilmektedir. **Şekil 4.1-a**'da modellenen akışların gözlem değerlerine göre eğilimleri zaman serisi olarak sunulmuştur. **Şekil 4.1-b**'de ise sediment yüklerindeki değişimler model ve gözlem değerleri olarak modelleme periyodu boyunca verilmiştir. **Şekil 4.1-b**'deki sediment yükleri **Kısım 3.2.3**'te detayları açıklanan sediment anahtar eğrisine ait gözlem verilerini içermektedir.



Şekil 4.1: SWAT-1 modeli kalibrasyon ve validasyon periyodunda modellenen ve gözlenen (a) akış ve (b) sediment yükü değerleri.

Ayrıca, kalibrasyonu tamamlanan SWAT-1 modeli, 2024 ve 2025 yıllarına yönelik olarak çalıştırılmış ve **Kısım 3.3**'te açıklanan saha ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen sediment yükü verileri ile ek bir validasyon gerçekleştirilmiştir. **Şekil 4.2**'de, ek validasyon sürecine ait model tarafından simüle edilen ve gözlenen sediment yükü değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.2: SWAT-1 modeli için sediment yüklerinin güncel tarihli saha ölçümleri ile ek validasyonu.

SWAT-1 modelinin kalibrasyon ve validasyon süreçlerindeki performansı akışlar için Nash-Sutcliffe Verimliliği (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE), Kling-Gupta Verimliliği (Kling-Gupta Efficiency, KGE) ve determinasyon katsayısı (Determination Coefficient, R^2), sediment yükleri için ise NSE, KGE ve yüzde yanlılık (Percent Bias, PBIAS) başarı metrikleri gözetilerek değerlendirilmiştir. **Tablo 4.2** SWAT-1 modeline ait başarı metriklerini özet olarak göstermektedir. Hem kalibrasyon hem de validasyon periyotlarında elde edilen akış ve sediment yükü simülasyonları, **Moriasi ve diğ. (2007)** tarafından önerilen performans kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Bu kriterlere göre, NSE değerinin 0.50'nin üzerinde olması "kabul edilebilir", 0.65–0.75 aralığında olması "iyi" ve 0.75–1.00 aralığında olması ise "çok iyi" model performansı olarak kabul edilmektedir. Elde edilen sonuçlar, kalibrasyon ve validasyon için modelin genel olarak "iyi" ve "çok iyi" düzeyde simülasyon performansı sergilediğini göstermektedir. NSE değerlerinin yaygın olarak kabul edilen 0.50 eşik değerini aşması, SWAT-1 modelinin güvenilirliğini ve pratik uygulamalar için uygunluğunu ortaya

koymaktadır. Ek validasyon için NSE değeri "kabul edilebilir" seviyenin altındadır (NSE<0.50). Öte yandan, ek validasyon aşamasında, sınırlı gözlem verisine rağmen modelin pozitif NSE ve R^2 değerleri ile gözlemlerle benzer eğilimler göstermesi, sediment gibi karmaşık süreçler için kabul edilebilir bir simülasyon performansı olarak yorumlanabilir.

Tablo 4.2: SWAT-1 modeline ait akış ve sediment yükleri için başarı metrikleri.

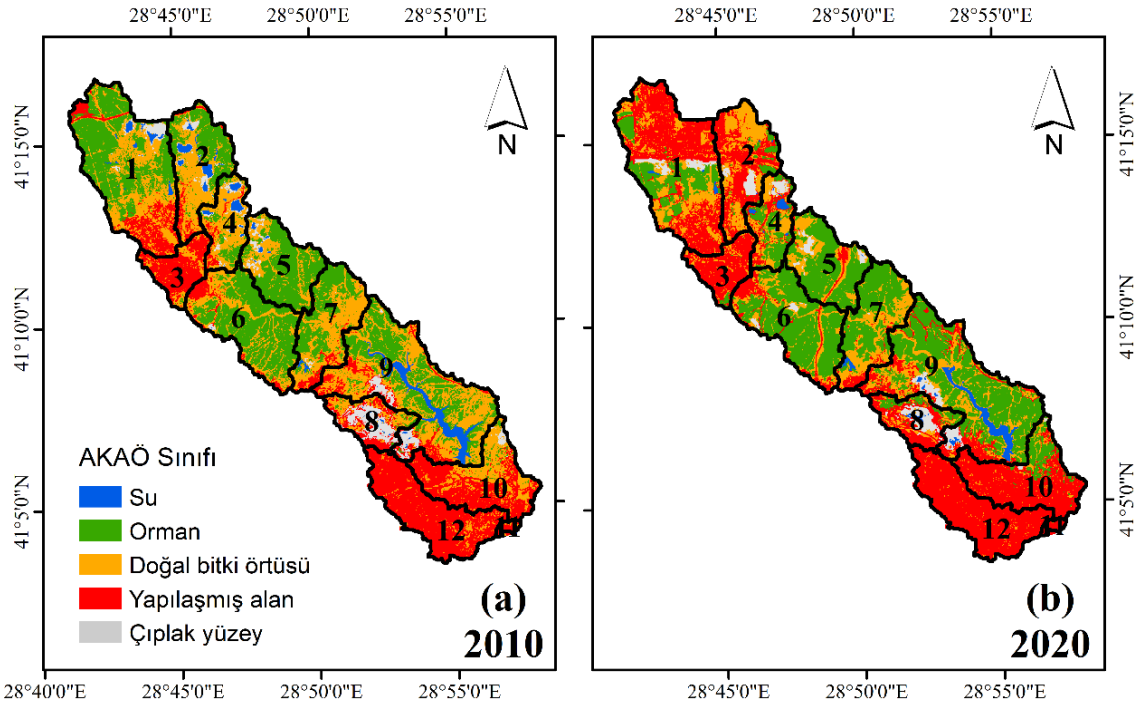
Periyot	Başarı metriği					
	Akış			Sediment Yükü		
	NSE	R^2	KGE	NSE	R^2	PBIAS (%)
Kalibrasyon (2013–2018)	0.65	0.71	0.81	0.78	0.79	+29.80
Validasyon (2019–2022)	0.82	0.84	0.88	0.82	0.85	+26.00
Ek Validasyon (2024–2025)	-	-	-	0.22	0.41	+53.70

4.1.2. Havalimanı Öncesi ve Sonrasındaki AKAÖ Değişimine Dair Bulgular

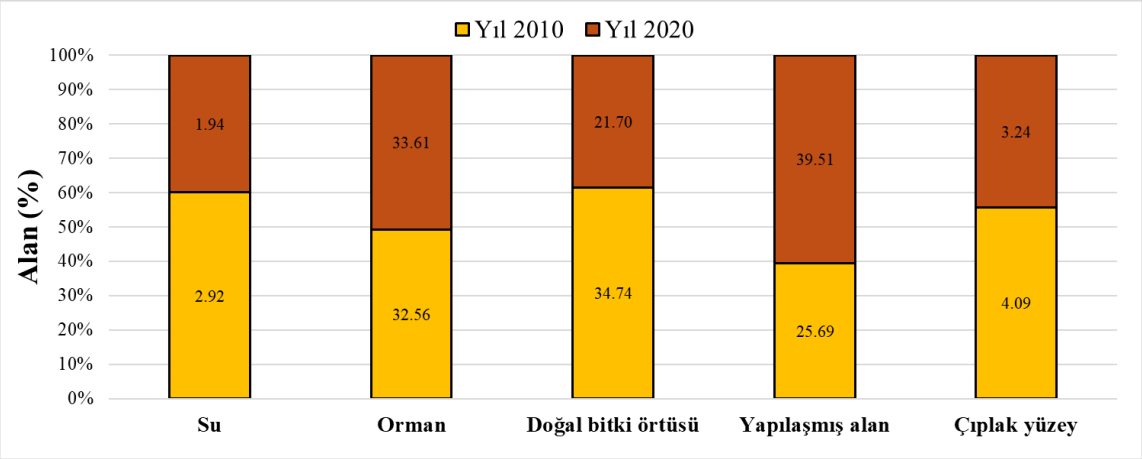
Havalimanı öncesi ve sonrası durumu temsil eden 2010 ve 2020 yıllarına ait haritalar ile AKAÖ sınıflarındaki dönüşüm incelenmiştir. AKAÖ verileri beş sınıfta kategorize edilmiştir (**Şekil 3.5**): 1-Su, 2-Orman, 3-Doğal bitki örtüsü, 4-Yapılaşmış alan, 5-Çıplak yüzey. Sınıflar arasındaki değişikliklerin analizi doğrudan hidrolojik süreçler ve sediment yükleriyle ilgili olacağından oldukça önemlidir. Bu nedenle havzanın AKAÖ sınıfları analiz edilerek yüzde alanları ve mekânsal dağılımları ortaya konulmak istenmiştir.

Şekil 4.3, 2010 ve 2020 yılları için alt havzalar ile birlikte AKAÖ durumunu göstermektedir. **Şekil 4.4**, havza genelinde beş AKAÖ sınıfının 2010 ve 2020 yıllarına ait yüzdesel alan dağılımının karşılaştırmalı olarak analizini vermektedir. Buna göre, su yüzeyi 2010 yılında %2.92 iken, 2020 yılında %1.94'e düşmüştür. Orman alanı, %32.56'dan %33.61'e hafif bir artış göstermiştir. Doğal bitki örtüsü, %34.74'ten %21.70'e azalarak dikkat çeken bir kayıp yaşamıştır. Yapılaşmış alan, %25.69'dan %39.51'e çıkarak en belirgin artışı göstermiştir. Çıplak yüzey, %4.09'dan %3.24'e azalmıştır. Bu değişimler, özellikle doğal bitki örtüsünden yapılaşmış alana doğru bir dönüşümü işaret etmekte olup, havzada kentleşme baskısının arttığını ve doğal ekosistemlerin azaldığını göstermektedir. Havzanın tamamında sınıflar arası rekabette su, doğal bitki örtüsü ve çıplak yüzey sınıfları azalırken, yapılaşmış alan ve orman sınıfları artmıştır. Su ve çıplak yüzey sınıflarında %1 civarında azalma görülürken orman

sınıfında ise %1 civarında artış görülmektedir. AKAÖ sınıflarında 2010 ve 2020 yılları arasında en dikkat çekici dönüşüm yapılaşmış alan ve doğal bitki örtüsü arasındadır. Havzanın tamamında doğal bitki örtüsü sınıfının büyük bir kısmının yapılaşmış alan sınıfına dönüştüğü görülmektedir. Havzanın memba kısımlarındaki yeni havalimanı inşaatı ve bağlantı yollarının inşası, bu kısımlarda yerleşim alanlarında artışa neden olmuştur. Yeni havalimanı inşaatı, bağlantı yolları ve kentsel bölgelerdeki genişlemenin 2020 yılında yapılaşmış alan sınıfının artırdığı görülmektedir. Öte yandan, alan oranının en düşük olduğu sınıf ise 2010 yılında %2.92 ve 2020 yılında %1.94 ile su sınıfıdır. Su sınıfı, baraj gölü, dere kolları ve havza içindeki küçük su birikintilerinin yanı sıra açık maden ocaklarındaki göletleri de içermektedir. 2010 yılından 2020 yılına kadar su alanlarında toplam yüzde olarak çok az değişiklik olmasına rağmen bu dönemde maden alanlarında suyun dağınık bir yapısı gözlemlenmektedir.

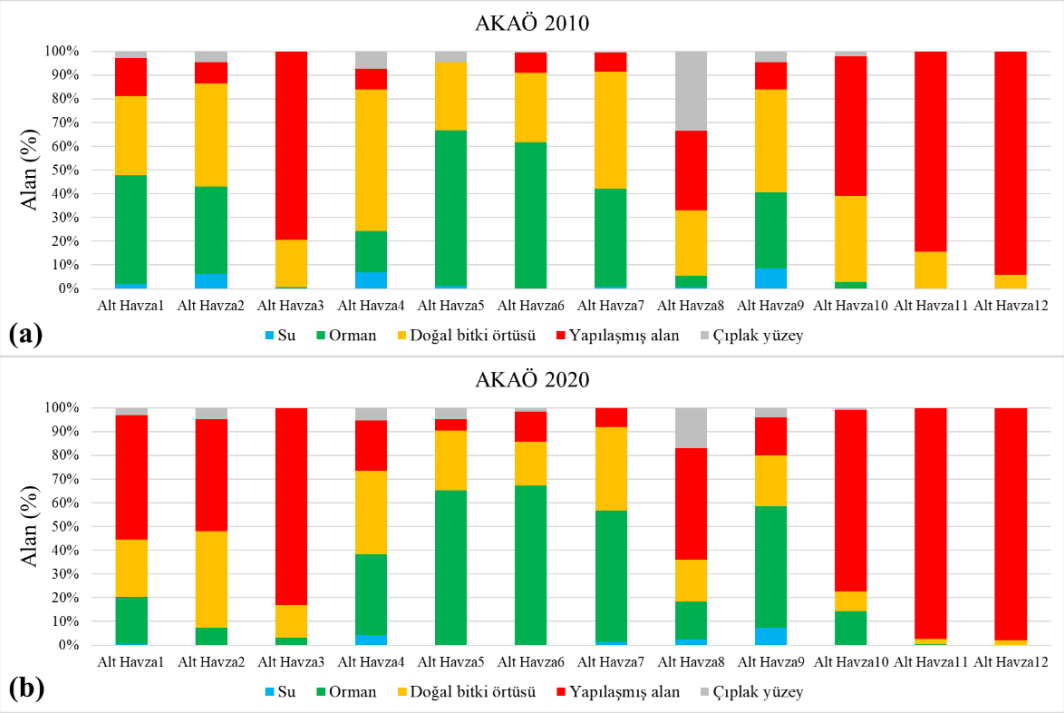


Şekil 4.3: Alibeyköy Havzası alt havzalarının (a) 2010 ve (b) 2020 yılları AKAÖ durumu ile birlikte gösterimi.



Şekil 4.4: Havza ölçeğinde beş AKAÖ sınıfının 2010 ve 2020 yılları arasındaki dönüşümü.

AKAÖ sınıfları durumunun tüm havza alanı için değerlendirilmesine ek olarak, alt havza ölçeğindeki analiz bölgesel değişkenlikleri ortaya çıkarmak için incelenmiştir. **Şekil 4.5**'te gösterildiği gibi her bir alt havza için AKAÖ sınıflarının dağılımı ayrı ayrı yapılmıştır. **Şekil 4.5-a** ve **Şekil 4.5-b** sırasıyla 2010 ve 2020 yıllarındaki sınıfların alt havza ölçeğinde dağılımını göstermektedir. Yapılan analizlerde konut alanlarının yer aldığı Alt Havza 3, 10, 11 ve 12'de yapılaşmış alan oranı yüksektir (genellikle %80'in üzerinde). Bu bölgelerde 2010–2020 yılları arasındaki kentleşme, orman ve çıplak toprak sınıflarının yapılaşmış alanlara dönüşmesiyle sonuçlanmıştır. Bu alt havzalarda (3, 10, 11 ve 12) orman örtüsü neredeyse yoktur. Alt Havza 8 yüksek çıplak yüzey sınıfı oranıyla (%33.68) dikkat çekmektedir. Alt Havza 8'deki çıplak yüzeyler çoğunlukla açık maden ocaklarından ibarettir. 2020 yılına gelindiğinde Alt Havza 8'deki madencilik alanlarının bir kısmı kentleşirken, bazı alanların yeniden ağaçlandırıldığı görülmektedir. Bu durum madencilik faaliyetlerinin havza içerisinde AKAÖ sınıfları arasında dinamik bir değişkenlik oluşturduğunu göstermektedir. 2010'dan 2020'ye geçişte, Alt Havza 1 ve 2 gibi memba alt havzalardaki havalimanı inşaatı, yerleşim alanlarını büyük ölçüde artırmış, ormanları ve çıplak toprak alanlarını ise azaltmıştır. Bu alt havzalardaki dönüşüm çoğunlukla yapılaşmış alan ve orman sınıfları arasındadır. Alt Havza 1'de 2010 yılında %15.96 olan yapılaşmış alanlar 2020 yılında %52.4'e yükselmiştir. Buna karşılık orman sınıfı %46.07'den %19.97'ye, çıplak toprak oranı ise %33.26'dan %24.13'e düşmüştür. Alt Havza 2'de yapılaşmış alan sınıfında %8.94'ten %46.93'e artış olmasına rağmen orman sınıfında %36.75'ten %7.07'ye düşüş yaşanmıştır. Bu bulgular, madencilik ve orman sınıflarındaki değişim oranlarının tüm havza genelinde nispeten düşük olduğunu, ancak alt havzalar içindeki dağılımlarının önemli ölçüde farklılık gösterdiğini açığa çıkarmaktadır.



Şekil 4.5: Alibeyköy Havzası'nda (a) 2010 ve (b) 2020 yıllarındaki AKAÖ durumunun alt havza ölçeğinde dağılımı.

4.1.3. Havza Hidrolojisindeki Değişime Dair Bulgular

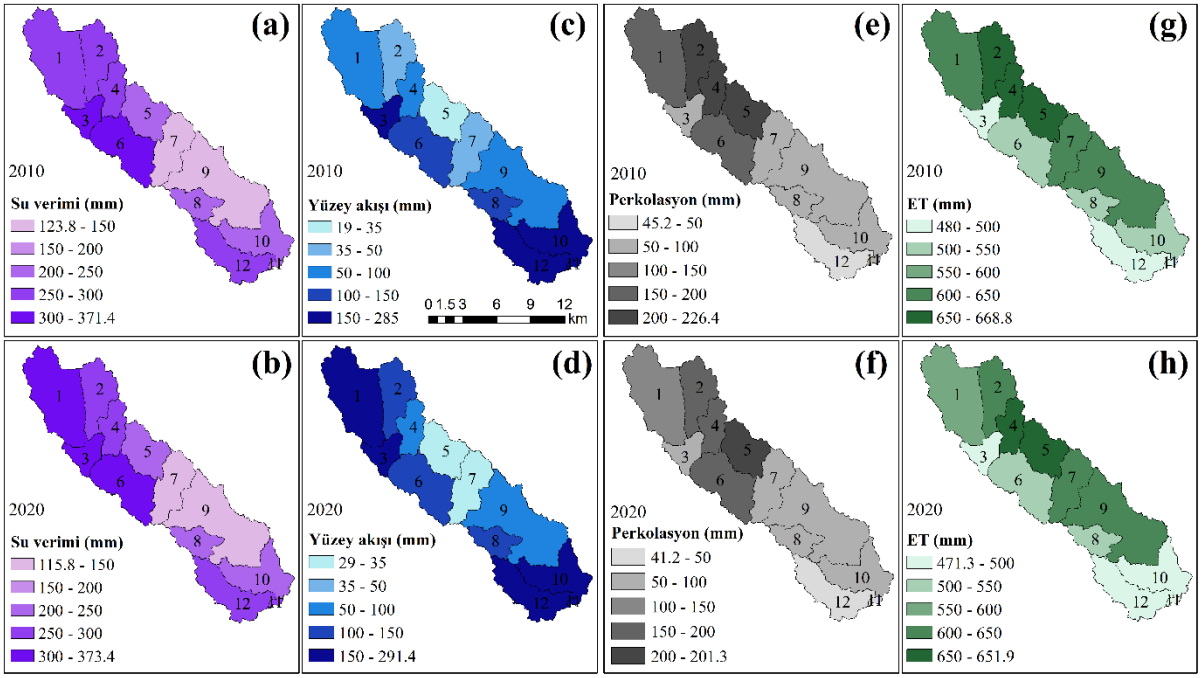
Havalimanı inşaatı öncesi (2010) ve sonrası (2020) AKAÖ durumlarını temsil eden model sonuçları, modelleme dönemi (2013–2022) için yıllık toplam değerlerin ortalaması olarak değerlendirilmiştir. **Tablo 4.3**'te 2010 ve 2020 yıllarına ait su dengesi bileşenleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Bu bileşenler arasında su verimi, yüzey akışı, perkolasyon ve ET değerleri bulunmaktadır. Buna göre, havzadaki toplam yıllık ortalama yağışın (826.40 mm) yaklaşık %70'i evapotranspirasyona (ET) uğramakta, geri kalan yaklaşık %30'u ise toplam akışa (su verimi) dönüşmektedir. Modelleme döneminde yıllık toplam akış ve ET değerlerinin ortalaması 2010 ve 2020'de neredeyse hiç değişmemektedir. Öte yandan, yüzey akışı nispeten yüksek değişkenlik göstermektedir. 2010 yılındaki AKAÖ durumunda toplam akışın %41'i, 2020'de ise %52'si yüzeysel akış olarak bölünmektedir. Bunun sonucunda yüzeysel akış değerleri 2010'dan 2020'ye %30 artış göstermiştir. Buna karşılık, toprağa sızan su (perkolasyon) %15 azalmıştır. Özellikle havalimanı inşaatından büyük ölçüde etkilenen memba alt havzaların (Alt Havza 1 ve 2) yapay yüzeylerle kaplanması yüzeysel akış oranlarını artırmıştır. Havalimanı inşaatının yanı sıra bağlantı yolları ve ilçe merkezlerindeki genişlemeler de bu duruma katkıda bulunmaktadır.

Tablo 4.3: 2010 ve 2020 AKAÖ durumlarını temsil eden model sonuçlarına göre su dengesi bileşenlerinin karşılaştırılması.

Su Dengesi Bileşenleri (mm)	Yıl 2010	Yıl 2020	Değişim Oranı (%)
Yağış	826.40		–
Toplam su verimi	235.80	242.46	+2.82
Yüzeysel akış	97.80	126.74	+29.59
Perkolasyon	129.32	108.83	-15.84
Evapotranspirasyon (ET)	593.90	583.30	-1.78

Ayrıca, hidrolojik döngü bileşenlerine dair bulgular havza içerisinde mekânsal farklılıklar gösterebileceğinden alt havza ölçeğinde bölgesel olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, modelleme sürecinde bölünen 12 alt havza için her bir alt havzanın yıllık ortalama değerleri görselleştirilmiştir. **Şekil 4.6**'da görsel incelemeyi kolaylaştıracak şekilde alt havzalar için su verimi, yüzeysel akış, perkolasyon ve ET değerleri gösterilmektedir. **Şekil 4.6-a** ve **Şekil 4.6-b**, sırasıyla 2010 ve 2020 yıllarına ait alt havzalardaki su verimlerinin dağılımını göstermektedir. Kentleşmiş bölgelerin yer aldığı alt havzalarda akışlarının nispeten yüksek olduğu görülmektedir. Baraj gölünün çevresindeki alt havzalarda (Alt Havza 7 ve 9) ormanlık alanların varlığı dereye ulaşan akışların azalmasına neden olmaktadır. Ormanlık alanların 2020 yılına dek genişlemesi, Alt Havza 4, 7 ve 9'da dereye ulaşan toplam akış değerlerinde %5'lik bir azalmaya yol açmıştır. Bu bölgelerde yağış toprak üzerinde kalmayarak perkolasyona uğrayıp toprak altına sızmıştır. Bunun tersine, kentsel alanların büyümesi diğer alt havzalarda su verimi değerlerini artırmıştır. **Şekil 4.6-c** ve **Şekil 4.6-d**'de görüldüğü gibi yapılaşmış alanlarla kaplı alt havzalarda yıllık ortalama yüzeysel akış değerleri 150 mm'nin üzerindedir. Havalimanı inşaatı nedeniyle yukarı havza alt havzalarda (Alt Havza 1 ve 2) yüzeysel akış değerleri önemli ölçüde artış göstermiştir. 2010'dan 2020'ye geçişte, Alt Havza 1'de %98 ve Alt Havza 2'de %197 artmaktadır. Bu durum, yüzeysel akışların yukarı alt havzalardaki potansiyel artışının ötelenerek mansap yönünde taşkın riskini yükselteceğine ilişkin endişeleri artırmaktadır. Orman örtüsünün hakim olduğu Alt Havza 5'te ise yüzeysel akıştaki değerler minimum düzeyde (35 mm'nin altında) gerçekleşmiştir. Alt havzalarda perkolasyon ile yüzeysel akış değerleri arasında doğrudan bir mekânsal kontrast mevcuttur (**Şekil 4.6-e** ve **Şekil 4.6-f**). Alt Havza 1 ve 2'deki perkolasyon değerleri 2010 ile 2020 arasında yaklaşık %30 azalmıştır ve bu durum yüzeysel akışlara ters bir trend sunmaktadır. **Şekil 4.6-g** ve **Şekil 4.6-h**, sırasıyla 2010 ve 2020 yıllarında ET değerlerindeki mekansal değişiklikleri göstermektedir. Yapılaşmanın baskın olduğu ve yüzeysel akışın yüksek olduğu Alt Havza 1, 2, 10, 11, 12 gibi

alt havzalarda ET değerleri nispeten düşüktür. 2010'dan 2020'ye geçişte tüm alt havzalarda ET oranındaki genel değişiklik %1 civarındayken, havalimanı inşaatından etkilenen alt havzalarda, özellikle de Alt Havza 1 ve 2'de yaklaşık %10'luk kayda değer bir düşüş yaşandığı görülmektedir.



Şekil 4.6: 2010 ve 2020 yılları için (a-b) su verimi, (c-d) yüzey akışı, (d-e) perkolasyon ve (g-h) ET değerlerinin alt havza ölçeğinde değişimleri.

4.1.4. Sediment Yüklerindeki Değişime Dair Bulgular

Alibey Deresi'nde D02A047 kodlu AGİ'nin bulunduğu kesit üzerinde DSİ'nin uzun dönem gözlemlerine göre sediment verimi 31.00 ton/yıl/km^2'dir. Bu değer AGİ'nin bulunduğu noktaya (kesite) kadar olan 111.8 km^2 drenaj alanı için DSİ tarafından hesaplanmıştır. Kalibre edilen SWAT-1 modeline göre ise simüle edilen sediment verimi değerleri 2010 yılı AKAÖ durumu için 30.68 ton/yıl/km^2 ve 2020 yılı durumu için ise 33.80 ton/yıl/km^2 olarak bulunmuştur. 2013–2022 model periyodu aralığındaki toplam sediment yükü değerlerinin yıllık ortalaması 2010 yılı için 3383.60 ton/yıl iken 2020 yılı için 3727.87 ton/yıla yükselmiştir. DSİ tarafından ölçülen gözlem verileri ile türetilen sediment anahtar eğrisi model periyodundaki sediment yükü değerlerini 2968.41 ton/yıl olarak vermektedir. **Tablo 4.4** sediment verimi ve sediment yükü

değerlerini özet olarak sunmaktadır. Model sonuçları, DSİ tarafından gözlemlenen değerle oldukça yakın olup, 2010 yılına ait model çıktısı gözlemsel veriye çok yakın bir sonuç verirken, 2020 yılında gözlenen yapılaşma artışı ve doğal örtüdeki azalmaya bağlı olarak sediment veriminde modelin öngördüğü artış dikkat çekicidir. Bu durum, SWAT modelinin AKAÖ değişimlerine duyarlılığını ve sediment verimi simülasyonundaki güvenilirliğini desteklemektedir.

2010 ve 2020 yılları arasındaki dönemde Alibeyköy Havzası'nda AKAÖ'de belirgin değişiklikler yaşanmıştır. Özellikle yapılaşmış alanlarda önemli bir artış gözlenirken, doğal bitki örtüsü ve çıplak yüzeylerde azalma meydana gelmiştir. Bu değişim, yüzey akışını artırarak erozyon potansiyelini yükseltmiş ve dolayısıyla sediment taşınımını da etkilemiştir. Nitekim SWAT-1 modeli sonuçları da bu eğilimi yansıtmaktadır. 2010–2020 yılları arasında model sonuçlarına göre sediment veriminde yaklaşık %10.18 oranında bir artış gerçekleşmiştir. Bu artış, AKAÖ'deki yapılaşmış alanların artması ve doğal bitki örtüsünün azalmasıyla açıklanabilir. Yapılaşmanın artırdığı yüzey akışı ve azalan bitki örtüsünün neden olduğu toprak erozyonu, sediment taşınımını önemli ölçüde artırmıştır.

Tablo 4.4: 2010 ve 2020 yıllarında sediment değerlerindeki değişimler.

Değer	Gözlenen	Yıl 2010	Yıl 2020	Değişim Oranı (%)
Sediment verimi (ton/km^2/yıl)	31.00	30.68	33.80	
Sediment yükü (2013–2022 aralığındaki toplam değerlerin yıllık ortalaması) (ton/yıl)	2968.41	3383.60	3727.87	+10.18

4.1.5. Bulguların Yorumlanması

Alibeyköy Havzası membasında 2014 yılında inşaatına başlanan havalimanı ile birlikte havza sınırları içerisinde hızlı bir AKAÖ değişimi meydana gelmiştir. Havalimanına bağlantı yolları ve çevre ilçelerdeki genişlemeler havza hidrolojisini ve sediment taşınımını etkilemektedir. Bu tez çalışması ile havalimanı inşaatı öncesi (2010 yılı) ve sonrası (2020 yılı) AKAÖ durumu incelenerek değişimin etkileri ortaya konulmaktadır.

İncelemelerde kullanılan SWAT-1 modeli akış ve sediment yükleri için kalibre edilmiş, kalibre edilen model farklı bir periyotta valide edilmiştir. Genel olarak model performansı yüksek başarı göstermiştir. Modelin güncel tarihli saha ölçümleri ile ek doğrulaması yapılmıştır. Bu aşamada elde edilen NSE değeri, 0.50 eşik değerinin altında kalarak "kabul edilebilir" seviyeye ulaşamamıştır. Bu durum, validasyonun yalnızca saha gözlemleriyle elde edilen 15 adet sediment yükü ölçümüne dayanan sınırlı bir veri setine dayanmasıyla açıklanabilir. Özellikle pik değerlerin tahminindeki yüksek farklılık düşük performans kriteri sonuçlarına sebep olmuştur. PBIAS değerinin %50'nin üzerinde bulunması gözlem ve model değerleri arasında yüksek bir hacim farkı bulunduğunu, bu farkın sebebinin ise 14.01.2025 tarihli pik sediment yükü değerini modelin iyi temsil edememesinden kaynaklandığı açıktır. Bununla birlikte, saha ölçümleri ile doğrulamada pozitif NSE ve R^2 değerlerinin elde edilmesi ve model sonuçlarının gözlemlerle benzer eğilimler sergilemesi, simülasyon performansının genel mertebesini kabul edilebilir düzeye taşımaktadır. Nitekim, sediment taşınımı gibi yüksek derecede değişkenlik ve karmaşıklık içeren süreçlerin, bu denli sınırlı bir veri setiyle "iyi" veya "çok iyi" performans düzeyinde modellenmesi oldukça zordur.

2010 ve 2020 yılları arasındaki AKAÖ değişimleri, havzada kentleşme baskısının belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Özellikle doğal bitki örtüsünde önemli bir azalma gözlenirken, yapılaşmış alanlarda dikkate değer bir artış meydana gelmiştir. Bu değişim, doğal yüzeylerin önemli bir kısmının yapay yüzeylere dönüştüğünü ortaya koymaktadır. Havzanın memba kesimlerinde gerçekleşen havalimanı inşaatı ve ulaşım ağları, yerleşim alanlarının yayılmasına neden olmuştur. Su yüzeyleri ve çıplak alanlarda ise sınırlı düzeyde azalma yaşanırken, ormanlık alanlarda hafif bir artış gözlenmiştir. Bu durum, havza genelinde yapılaşmış alanlardaki artışın ormanlık alanların tahrip edilmesinden ziyade doğal bitkili toprak alanların yapay yüzeylere dönüştürülmesinden kaynaklandığına işaret etmektedir. Genel olarak, havzanın ekolojik yapısı üzerinde baskı oluşturan kentleşme sürecinin, doğal örtülerin kaybı pahasına ilerlediği anlaşılmaktadır.

SWAT-1 modelinden elde edilen sediment verimi sonuçları, gözlemsel verilerle genel olarak uyumlu bir görünüm sergilemiştir. Modelin, özellikle 2010 yılı arazi kullanım koşullarında gözlemlere oldukça yakın değerler üretmesi, kalibrasyon sürecinin başarısını ve modelin güvenilirliğini göstermektedir. AKAÖ'deki değişimlerin, özellikle yapılaşmanın artması ve doğal örtünün azalmasının, sediment üretimini artırdığı gözlemlenmiştir. Model çıktıları bu eğilimi yansıtmakta ve SWAT'ın AKAÖ değişimlerine duyarlı yapısını ortaya koymaktadır.

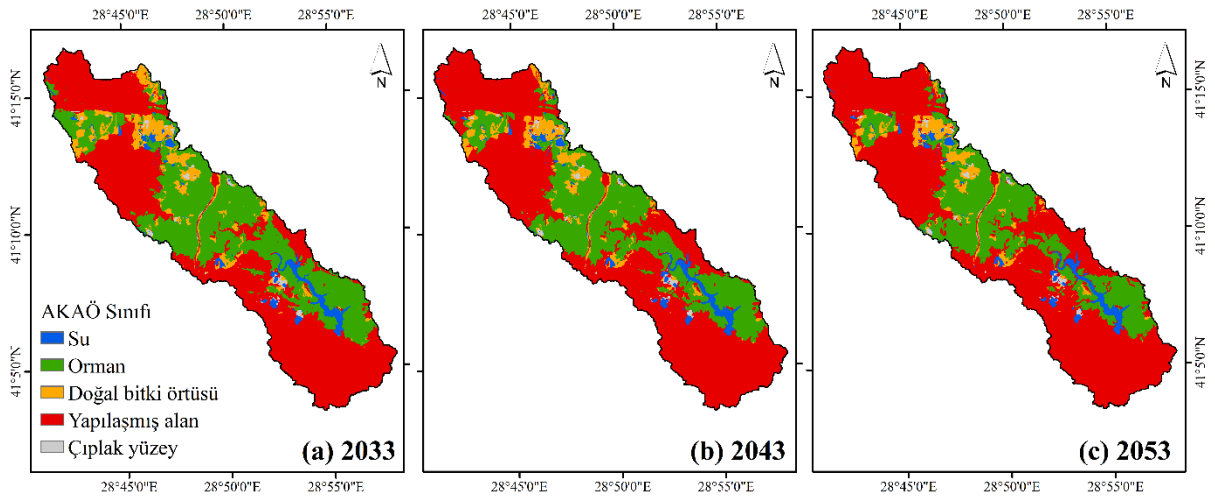
Sediment üretiminde gözlenen artış, yüzey akışının artması ve toprak erozyonunun şiddetlenmesiyle doğrudan ilişkilidir. Genel olarak, sınırlı gözlem verilerine rağmen modelin benzer eğilimler üretmesi, SWAT'ın sediment taşınımı simülasyonlarında uygulanabilir ve güvenilir bir araç olduğunu da ortaya koymaktadır.

4.2. TAHMİN EDİLEN GELECEK YILLARA AİT AKAÖ DEĞİŞİKLİKLERİNİN SEDİMENT YÜKLERİ VE BARAJ FAYDALI HACMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Alibeyköy Havzası'nın memba kesiminde yer alan İstanbul Havalimanı'nın yapımına 2014 yılında başlanmış, tesis 2018 yılında tamamlanarak hizmete alınmıştır. 2018 sonrasında havalimanına ilişkin ek tesisler ve bağlantı yolu yatırımları sürmüştür. Buna paralel olarak, havalimanı çevresindeki ilçelerde yerleşim alanları genişlemiş ve yeni yapılaşmış ortaya çıkmıştır. Meydana gelen bu değişim havza hidrolojisini ve sediment taşınımını doğrudan ilgilendirmektedir. Bu kapsamdaki incelemeler **Kısım 3.4.2**'de açıklanan TerrSet LCM ile AKAÖ değişikliği tahminleri ve **Kısım 4.1.1**'de detayları verilen kalibre edilmiş SWAT-1 modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının bu kısmında öncelikle 2033, 2043 ve 2053 yılları için AKAÖ projeksiyonları verilmiştir ve AKAÖ sınıfları arasındaki değişim incelenmiştir. Buna bağlı olarak havza hidrolojisindeki ve sediment yüklerindeki değişimler ortaya konulmuştur. Sediment yüklerindeki değişimin Alibey Barajı rezervuarının ölü hacmi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

4.2.1. Gelecek Yıllarda AKAÖ Değişimi Tahminine Dair Bulgular

2019 ve 2021 yıllarına ait AKAÖ verileri ile 2023 yılına ait AKAÖ tahmin verisi elde edilmiş ve gözlem verisi ile doğrulanmıştır. Ardından, LCM kullanılarak 2033, 2043 ve 2053 yıllarına ait AKAÖ tahmin verileri elde edilmiştir. **Şekil 4.7-a**, **Şekl 4.7-b** ve **Şekil 4.7-c** sırası ile 2033, 2043 ve 2053 yıllarına ait tahmin edilen AKAÖ verilerini göstermektedir. Böylece, Alibeyköy Havzası'nda AKAÖ sınıfları arasındaki dönüşüm ve kentsel büyümenin şekli incelenebilmektedir. Görüldüğü üzere, havalimanının çevresine yakın Arnavutköy ve Gaziosmanpaşa ilçelerinde yapılaşmış alanlarda genişleme mevcuttur. Ayrıca, havzanın memba kısmında kuzeydoğu sınırında yer alan Eyüpsultan İlçesine bağlı Mimar Sinan ve Göktürk mahallelerinin havza sınırları içerisine doğru büyümesi dikkat çekmektedir. Devam eden ek havalimanı inşaatları havzanın memba kısmındaki yapay yüzey örtüsünü artırmaya devam etmektedir



Şekil 4.7. LCM ile tahmin edilen (a) 2033, (b) 2043 ve (c) 2053 yıllarına ait gelecek AKAÖ projeksiyonları.

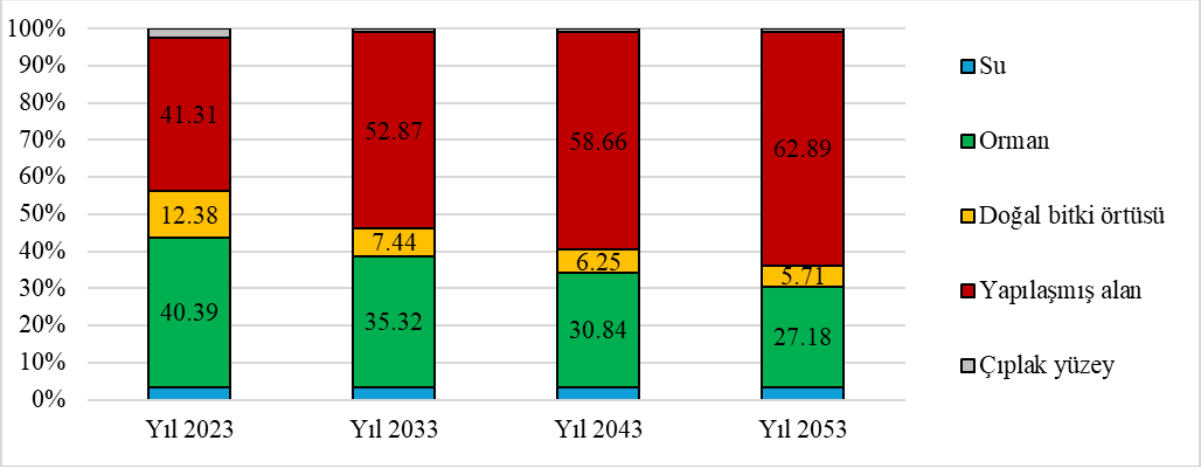
Tablo 4.5 AKAÖ sınıflarının alansal olarak değişimlerini göstermektedir. Buna göre 2023–2053 yılları arasında Alibeyköy Havzası'ndaki AKAÖ sınıflarında belirgin bazı değişimler gözlenmiştir. Bu değişimler, özellikle orman alanları ve doğal bitki örtüsünde meydana gelen kayıplar ile yapılaşmış alanlardaki artış üzerinden dikkat çekmektedir. Orman alanları, 2023 yılında 76.00 km² iken, 2053 yılında 51.13 km²'ye gerileyerek yaklaşık %32.75 oranında bir azalma göstermiştir. Benzer şekilde, doğal bitki örtüsü sınıfı 23.30 km²'den 10.74 km²'ye düşerek %53.9 oranında ciddi bir kayba uğramıştır. Bu düşüş, özellikle yapılaşma baskısının ve kentleşme eğilimlerinin doğal ekosistemler üzerindeki etkisini göstermektedir. Yapılaşmış alanlar ise aynı dönemde 77.73 km²'den 118.34 km²'ye yükselerek yaklaşık %52.2 oranında bir artış sergilemiştir. Bu artış, kırsal alanların yapılaşmaya açılması ve kentleşmenin havza ölçeğinde yaygınlaşmasıyla ilişkilendirilebilir. Çıplak yüzey alanları da 2023 yılında 4.80 km² iken, 2053 yılında 1.62 km²'ye kadar azalmıştır. Bu durum, bazı alanların yeniden bitki örtüsüyle kaplanmış olabileceğini ya da yapılaşmaya dönüşmüş olabileceğini düşündürmektedir.

Havza sınırları içerisindeki AKAÖ sınıflarının 2023 mevcut durumuna kıyasla 2033, 2043 ve 2053 yılları için öngörülen değişimi **Şekil 4.8**'de gösterilmektedir. Böylece, tüm havza alanı için AKAÖ sınıflarının kapladığı yüzde oranlar genel olarak değerlendirilebilmiştir. Buna göre, 2023 yılında havzanın yaklaşık %41'ini oluşturan yapılaşmış alanlar 2033, 2043 ve 2053 yıllarında sırası ile %53, %59 ve %63 olarak tahmin edilmiştir. Buna karşın, 2023 yılında havza

alanının yaklaşık %40'ını kapsayan ormanların 2033, 2043 ve 2053 yıllarında sırası ile %35, %31 ve %27 olarak azalacağı, yaklaşık %12 olan doğal bitki örtüsünün ise %7, %6 ve %5 olarak azalacağı ön görülmektedir.

Tablo 4.5. 2023, 2033, 2043 ve 2053 yıllarında AKAÖ sınıflarındaki alansal değişimler.

AKAÖ sınıfı	Alan (km^2)			
	Yıl 2023	Yıl 2033	Yıl 2043	Yıl 2053
Su	6.33	6.33	6.33	6.33
Orman	76.00	66.46	58.03	51.13
Doğal bitki örtüsü	23.30	14.00	11.75	10.74
Yapılaşmış alan	77.73	99.49	110.38	118.34
Çıplak yüzey	4.80	1.88	1.67	1.62



Şekil 4.8. 2033, 2043 ve 2053 yıllarında değişimi ön görülen AKAÖ sınıfı yüzdeleri.

4.2.2. Havza Hidrolojisindeki Değişime Dair Bulgular

Kalibre edilen SWAT-1 modeli, LCM ile tahmin edilen 2033, 2043 ve 2053 AKAÖ verileri ile çalıştırılmıştır. Böylece, SWAT'tan elde edilen su dengesi bileşenleri (toplam su verimi, yüzey akışı, perkolasyon ve ET) yıllık ortalama değerler olarak analiz edilmiştir. **Tablo 4.6**'da 2023 yılı AKAÖ durumuna kıyasla 2033, 2043 ve 2053 yılları AKAÖ durumları için su dengesi bileşenlerinde meydana gelen değişim yüzdeleri sunulmaktadır. Buna göre, 2023 yılındaki AKAÖ durumunda yıllık ortalama yağışın (826.40 mm) yaklaşık %15'i yüzeysel akış (122.53 mm), %70'i evapotranspirasyon (578.5 mm), %10'u perkolasyon (85.86 mm) ve geri kalan

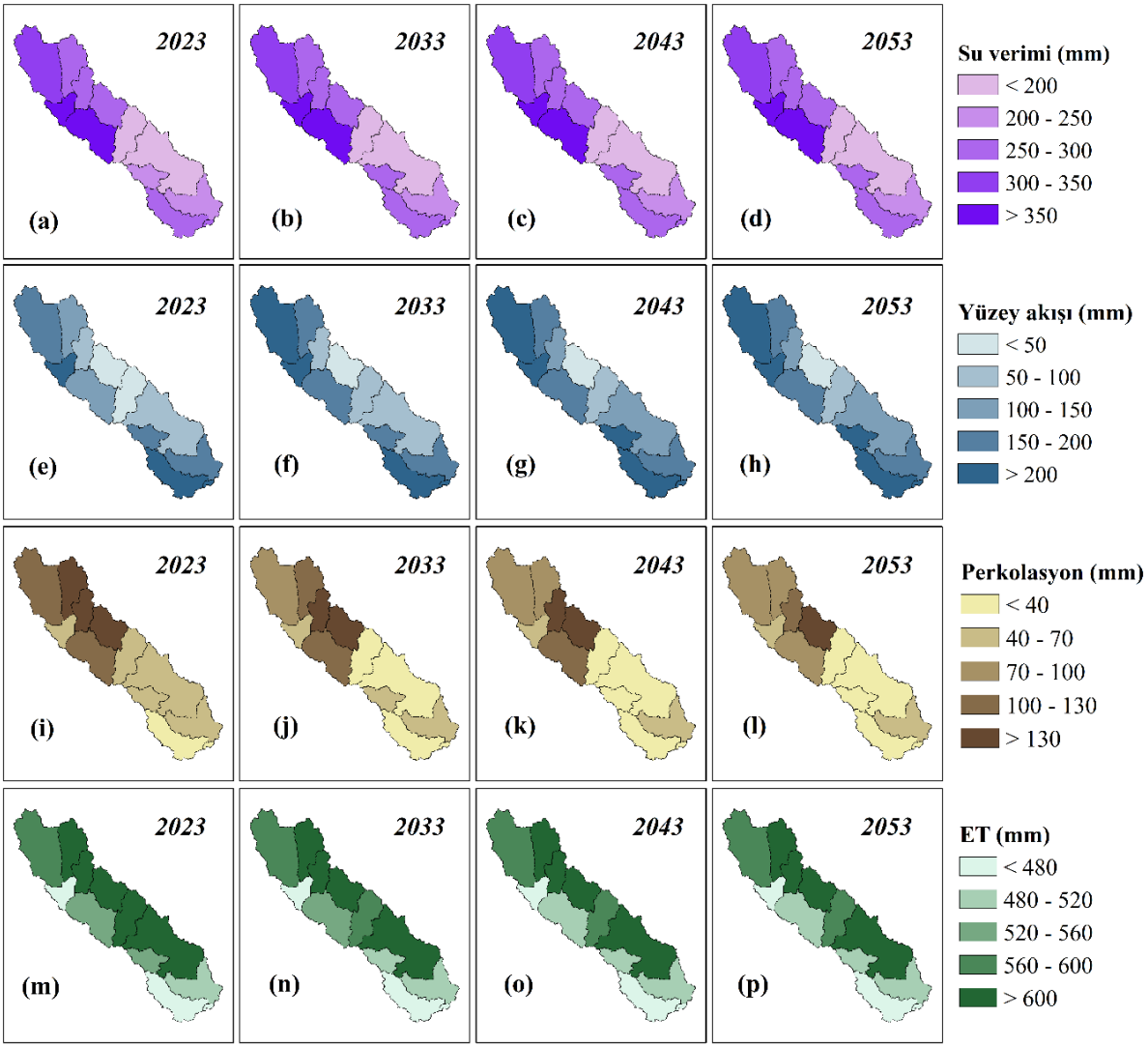
kısım ise diğer bileşenler (dip akifer geri beslemesi ve revap) olarak ayrılmaktadır. Değişen arazi kullanımı koşulları sonucu 2033, 2043 ve 2053 yıllarında sırası ile %18, %27 ve %34 oranında yüzeysel akışın artacağı öngörülmektedir. Buna karşın, sızma değerlerinde bu yıllar için sırası ile yaklaşık %16, %23 ve %26 oranında azalma olacağı tahmin edilmektedir. ET değerleri ise gelecek yıllarda %1 mertebesinde azalış göstererek nispeten daha az değişmektedir. Toplam su verimine (akarsuya ulaşan toplam akış) katkı sağlayan toprak altı akışlarının (yanal toprak altı akışı, sığ akiferde yeraltı akışı ve dip akifer geri beslemesi) gelecek yıllarda azalması beklenirken yüzey akışlarında tahmin edilen artış nispeten daha fazladır. Sonuçta, toplam su verimi değerlerinin gelecek yıllarda AKAÖ değişikliğine bağlı olarak %2–5 mertebesinde artması beklenmektedir.

Tablo 4.6. Su dengesi bileşenlerinin 2033, 2043 ve 2053 yılları için değerleri ve 2023 yılına göre değişim yüzdeleri.

Su Dengesi Bileşenleri	Değer (mm)				Değişim (%)		
	2023	2033	2043	2053	2023-2033	2023-2043	2023-2053
Yağış	826.40				-		
Toplam su verimi	250.61	254.87	259.12	262.71	1.70	3.40	4.83
Yüzeysel akış	122.53	144.31	155.75	163.87	17.78	27.11	33.74
Perkolasyon	85.86	71.88	66.42	63.24	-16.28	-22.64	-26.35
Evapotranspirasyon (ET)	578.50	578.40	574.20	570.80	-0.02	-0.74	-1.33

Şekil 4.9'da alt havza ölçeğinde yıllık ortalama su verimi, yüzey akışı, sızma ve ET değerlerinin mekânsal analizi görülmektedir. Buna göre, yüzey akışlarının havalimanı çevresindeki bölgelerde nispeten daha fazla artış göstereceği buna karşılık sızma değerlerinin bu bölgelerde azalacağı ön görülmektedir. 2033, 2043 ve 2053 yıllarına ait AKAÖ tahmin senaryoları altında alt havza ölçeğinde elde edilen hidrolojik bileşen haritaları, havzanın hidrolojik rejiminde belirgin değişimlerin yaşandığını ortaya koymaktadır. Su verimi değerlerinde alt havza ölçeğinde çarpıcı bir değişiklik görülmemektedir. Perkolasyon değerlerinde ise özellikle orta alt havzalarda zamanla bir düşüş yaşanmıştır. Bu eğilim, bu alt havzalarda toprağın suyu yeraltına iletme kapasitesinin azaldığını ve infiltrasyon süreçlerinin zayıfladığını göstermektedir. Özellikle 2033 ve sonrasında açık renkli alanların yaygınlaşması, permeabilitesi düşük alanların arttığına işaret etmektedir. ET bileşeni ise su verimine benzer biçimde alt havzalar arasında ciddi bir farklılık göstermemektedir. Yüzey akışı bileşeni zaman

içinde görece artış göstermekte, özellikle güneydeki alt havzalarda 2053 yılında yüksek değerler gözlemlenmektedir. Özellikle, memba alt havzalarda 2053 yılında yıllık ortalama yüzey akışı değerinde 80 mm'nin üzerinde artış görülmektedir. Bu artış, bölgesel olarak geçirimsiz yüzey oranının artmasına bağlı olarak yağışların daha büyük kısmının doğrudan yüzey akışına dönüşmesiyle açıklanabilir.



Şekil 4.9. 2023, 2033, 2043 ve 2053 yıllarına ait AKAÖ'ler için yıllık toplam (a–d) su verimi, (e–h) yüzey akışı, (i–l) perkolasyon ve (m–p) ET değerlerinin alt havza ölçeğinde gösterimi.

4.2.3. AKAÖ Değişikliğinin Baraj Ölü Hacmine Etkisi

Alibey Barajı ölü hacmi, baraj gölüne ulaşan toplam sediment yükü tahminleri ile hesaplanmıştır. SWAT-1 modeli ile 2033, 2043 ve 2053 AKAÖ durumları kullanılarak bunlara ait sediment yükleri simüle edilmiş ve bunun Alibey Barajı ölü hacmindeki etkisi analiz edilmiştir. Simülasyonlar 2013–2022 yılları aralığındaki on yıllık model periyodunda gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlara dayalı olarak yıllık ortalama sediment yükleri ve sediment hacimleri belirlenmiştir. Sediment hacimlerindeki artışın doğrudan Alibey Barajı hacminde sediment depolaması olarak baraj ölü hacmini artırması beklenir. Böylece, gelecek yıllar için ölü hacimdeki artış belirlenebilmektedir. **Tablo 4.7**, 2023, 2033, 2043 ve 2053 yıllarına ait AKAÖ durumlarının, rezervuar sistemindeki sediment birikimi ve buna bağlı olarak ölü hacimde meydana gelen değişim üzerindeki etkilerini göstermektedir. Buna göre, gelecek AKAÖ projeksiyonlarının rezervuarda biriken sediment miktarı ve buna bağlı ölü hacim kaybı üzerindeki etkileri yıllara göre sistematik bir artış göstermektedir. Bu durum, özellikle havzadaki doğal arazi örtüsünün yapılaşmaya dönüşmesiyle doğrudan ilişkilidir. 2023 yılı AKAÖ durumu için, rezervuara taşınan sediment miktarı on yıllık model periyodu boyunca 36307 ton, dolayısıyla yıllık ortalama 3630.7 ton/yıl olarak belirlenmiştir (10 yıllık model periyodu için yapılan hesap ile). DSİ gözlem verilerine göre ortalama sediment birim hacim ağırlığı 1.33 ton/m^3 olarak verilmektedir. Buna göre, yıllık ortalama sediment hacmi 2023 yılı için 2729.85 m^3/yıl olarak bulunmuştur. Ayrıca, drenaj alanı göz önünde bulundurularak yıllık ortalama sediment verimi 32.92 ton/km^2/yıl olarak hesaplanmıştır. Sediment verimi değeride DSİ tarafından hesaplanan 31.00 ton/km^2/yıl değerine yakın olarak bulunmuştur. Bu değerler referans olarak alınmış ve sonraki yıllardaki değişimler bu değer üzerinden değerlendirilmiştir. İlk projeksiyon yılı olan 2033 AKAÖ durumunda sediment birikimi ağırlık olarak 3912.22 ton/yıl'a ve hacim olarak ise 2941.52 m^3/yıl'a ulaşmıştır. Ölü hacimdeki bu artış 211.66 m^3/yıl olarak öngörülmektedir. Bu da 2023'e kıyasla ölü hacmin yaklaşık %7.75 oranında artışına işaret etmektedir. 2043 AKAÖ durumu bulgularına göre, sediment miktarı 4090.6 ton/yıl'a çıkmış ve 3075.64 m^3/yıl hacme ulaşmıştır. Bu artışa paralel olarak ölü hacimdeki artış da 345.78 m^3'e yükselmiştir. Bu değer 2023'e kıyasla %12.67'lik bir artışı temsil etmektedir. Yapılaşmanın daha da yaygınlaştığı bu dönemde, havzanın erozyona karşı direncinin zayıfladığı ve bu durumun rezervuardaki birikimi hızlandırdığı değerlendirilmektedir. Son projeksiyon yılı olan 2053 AKAÖ durumu için ise sediment birikimi 4219.31 ton/yıl ve 3172.41 m^3/yıl'a ulaşmış ve bu da başlangıç yılı olan 2023'e göre %16.21 oranında bir artış anlamına gelmektedir. Aynı yılda ölü hacimdeki toplam artış 442.56 m^3 olarak hesaplanmıştır. Havzanın

sediment verimi ise 2033, 2043 ve 2053 yıllarında sırasıyla 35.47, 37.09 ve 38.28 ton/km^2/yıl olarak tahmin edilmektedir.

Alibey Barajı'nın rezervuar hacmi yıllık 36 milyon m^3 kapasiteye sahiptir. **Tablo 4.7**'deki yıllık ortalama sediment hacmi değerlerinin Alibey Barajı rezervuar hacmine oranı tüm yıllara ait AKAÖ durumları için %0.01 mertebesindedir. 2023 AKAÖ durumu için yıllık 2729.85 m^3 olan değer 2053 yılı AKAÖ durumu için 3172.41 m^3'tür. Bu durum ölü hacmin kendi içerisindeki artış oranının yaklaşık %16 olduğunu göstermektedir. Her ne kadar bu oran kayda değer bir artışa işaret etse de rezervuar hacmine oranla ölü hacimdeki değişim çok düşüktür.

Tablo 4.7. 2023, 2033, 2043 ve 2053 yılları AKAÖ durumu için sediment birikimi ve ölü hacimdeki değişimler.

AKAÖ yılı	2023	2033	2043	2053
Toplam sediment yükü (ton)	36307	39122.2	40906	42193.1
Toplam sediment yükünün yıllık ortalaması (ton/yıl)	3630.70	3912.22	4090.60	4219.31
Yıllık ortalama sediment verimi (ton/km^2/yıl)	32.92	35.47	37.09	38.25
Yıllık ortalama sediment hacmi (m^3/yıl)	2729.85	2941.52	3075.64	3172.41
Referansa göre sediment hacmindeki değişim (%)	-	7.75	12.67	16.21
Ölü hacim/Toplam rezervuar hacmi (%)	0.00758	0.00817	0.00854	0.00881

4.2.4. Bulguların Yorumlanması

Alibeyköy Havzası için geçmiş yıllara ait AKAÖ gözlem ve gelecek yıllara ait tahmin verileri kullanılarak yapılan analizler, AKAÖ durumlarında özellikle yapılaşma kaynaklı belirgin dönüşümler yaşandığını ortaya koymaktadır. Modelleme süreci kapsamında yapılan projeksiyonlar, havzanın batı ve kuzeydoğu kesimlerinde yer alan yerleşim alanlarının zamanla genişlediğini ve bu durumun doğal alanlar üzerinde baskı oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle orman ve doğal bitki örtüsü sınıflarında kayıplar gözlemlenirken, yapılaşmış alanlarda düzenli bir artış eğilimi öne çıkmaktadır. Bu bulgular, hızlı kentleşmenin havzanın

doğal yapısını kısa zamanda dönüştürdüğünü ve gelecekte arazi yönetimi açısından kritik planlama gereklilikleri doğurabileceğini işaret etmektedir.

AKAÖ sınıfları arasındaki dönüşümün Alibeyköy Havzası'nın hidrolojik yapısı üzerindeki etkileri, kalibre edilen SWAT modeli kullanılarak incelenmiştir. LCM ile elde edilen gelecek yıllara ait AKAÖ senaryoları modele entegre edilmiş ve su dengesi bileşenlerinin yıllık ortalama davranışları değerlendirilmiştir. Bulgular, yapılaşmanın arttığı alanlarda yüzey akışının anlamlı biçimde yükseldiğini, buna karşılık yeraltı su beslenmesinin ve perkolasyon kapasitesinin zayıfladığını ortaya koymaktadır. Bu durum, infiltrasyon kapasitesindeki azalmaya bağlı olarak taşkın risklerinin artabileceğini düşündürmektedir. Perkolasyon miktarındaki düşüş, yeşil alanların azalması ve yüzey sızdırmazlığının artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Yeraltı suyu beslenmesindeki olası zayıflama, uzun vadeli su kaynakları yönetimi açısından kritik olabilir. Alt havza ölçeğinde yapılan mekansal analizler, özellikle kentleşmenin yoğunlaştığı kesimlerde yüzey akışının daha da belirgin ve infiltrasyon süreçlerinin giderek sınırlı hale geldiğini göstermektedir. Toplam su verimi ve ET bileşenleri ise genel eğilimde nispeten daha az değişim göstermiştir. Doğal bitki örtüsündeki kayıplara rağmen ET değerleri görece daha az değişim göstermesi yapay yüzeylerin ve yapılaşmanın ET üzerindeki dolaylı etkileriyle açıklanabilir. Bu sonuçlar, havzada AKAÖ değişimlerinin hidrolojik rejim üzerinde giderek artan etkiler yarattığını ve bu etkinin özellikle yüzeysel akış süreçleri üzerinde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır.

Model sonuçları hem niceliksel sediment birikimini hem de barajın aktif işlevini sürdürebilme kapasitesini doğrudan etkileyen ölü hacim kaybını ortaya koymaktadır. 2023 yılına kıyasla, ilerleyen yıllarda sediment birikiminde sürekli bir artış eğilimi gözlenmiştir. Bu artış, özellikle doğal bitki örtüsünün azalarak erozyon eğiliminin artmasıyla ilişkilendirilebilir. Yapılaşmış alanlardaki yayılım, yüzey akışını artırarak taşınan sediment miktarını yükseltmiş; bu durum, rezervuarın sedimente maruz kalan hacmini artırmıştır. Sediment birikiminin artması, barajın ölü hacminde de giderek büyüyen bir doluluk yaratmıştır. 2053 AKAÖ durumunda 2023'e göre sediment hacminde bir artış görülmektedir. Ancak bu artış, barajın toplam rezervuar hacmi ile karşılaştırıldığında oldukça sınırlı kalmaktadır. Nitekim ölü hacim/toplam hacim oranındaki mutlak değişim, 2023'ten 2053 AKAÖ durumuna dek çok düşük mertebede (%0.01) yükselmiş olsa da bu düzeydeki birikimin barajın genel işleyişine kısa ve orta vadede kayda değer bir tehdit oluşturmayacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla, uzun vadede sediment birikiminin ölü hacim üzerinde artış eğiliminde olduğu ve yapısal anlamda baraj performansını sınırlayabilecek

bir yönü bulunsa da toplam rezervuar hacmi ile karşılaştırıldığında kısa ve orta vadede ciddi bir tehdit oluşturmayacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, sedimentin rezervuar tabanında lokalize birikmesi, barajın aktif hacmini veya su alma yapıları gibi mühendislik sistemlerini etkileyebilecek bölgesel riskler doğurabilir. Bu nedenle, sediment birikiminin dağılım deseni ve zamanla birikim yoğunluğu da dikkate alınarak izleme çalışmaları yapılması ve havza bazlı erozyon kontrol önlemleri ile desteklenmesi önerilmektedir.

Öte yandan, baraj ölçeğinde ölü hacim/toplam hacim oranındaki artış sınırlı kalsa bile, alt havza ölçeğinde AKAÖ değişimi sonucunda meydana gelen sediment artışı yağmursuyu altyapısı üzerinde belirgin işletme ve güvenlik risklerine neden olabilir. Sediment artışı, ızgara ve ızgara öncesi çökeltim elemanlarının tıkanma sıklığını arttırarak alt yapı elemenlarının hidrolik taşıma kapasitesini azaltır. Bu durum ızgara girişlerinde kısmi veya tam tıkanmalara, suyun geri tepmesine ve taşkın yayılımlarının artmasına yol açabilir. Ek olarak, taşınan ince malzeme boru hattı içinde aşınma riskini arttırırken, kanalizasyon-yağmur suyu birleşik sistemlerinde AKM ve beraberinde taşınan kirleticiler nedeniyle aşırı debi koşullarında taşma olaylarının daha sık tetiklenmesine neden olabilir. Bu nedenle, sediment birikiminin sadece baraj rezervuarıyla sınırlı olmadığı; ızgara–kollektör–menfez zincirinde bakım aralıklarının kısalması, acil müdahale gereksinimlerinin artması ve sokak içi su birikimi olasılığının yükselmesi gibi kentsel işletme etkileri yarattığı unutulmamalıdır. Bu kapsamda, sediment önleyici yapıların ve uygulamaların özellikle sediment artışı bekelenen alt havzalarda uygulanması büyük önem arz etmektedir.

4.3. AKAÖ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN HAVZA HİDROLOJİSİ VE SEDİMENT YÜKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

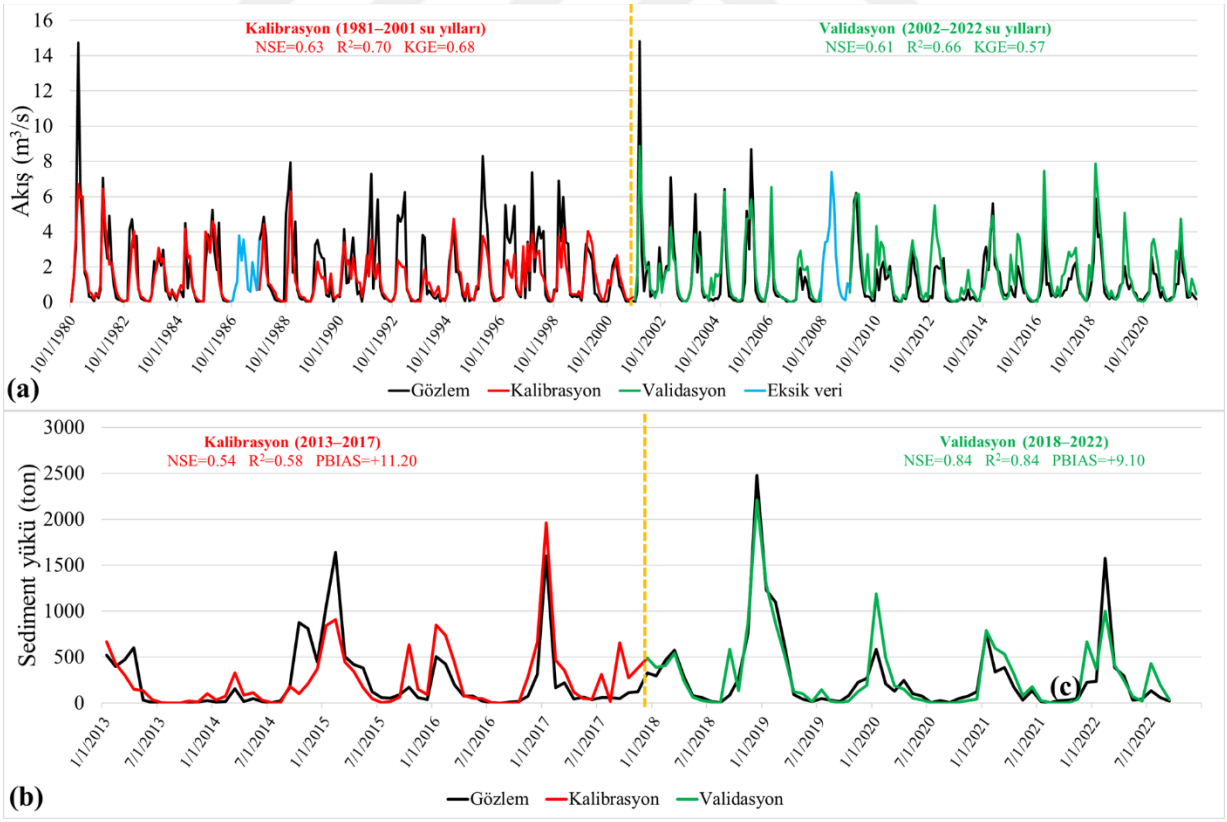
4.3.1. SWAT-2 Modelinin Kalibrasyonu ve Validasyonu

SWAT-2 modeli **Şekil 3.7**'de gösterilen Sarıyer MGİ'ye ait yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak 1976–2022 su yıllarını kapsayan dönem için oluşturulmuştur. Model çıktıları için zaman adımı aylıktır. Model periyodu 1976–2022 yılları arasındaki 47 su yılını kapsamaktadır fakat 1987 ve 2009 su yılları eksiktir. Dolayısıyla modelleme periyodunda 45 su yılı verisi mevcuttur. Bu periyot 1976–1980 (5 su yılı) ısıtma periyodu (warm-up) olmak üzere, 1981–2001 yılları aralığındaki 20 su yılı (1987 su yılı eksik) kalibrasyon için ve 2002–2022 yılları aralığındaki 20 su yılı (2009 su yılı eksik) validasyon için kullanılmıştır. Bu periyotlar akış simülasyonlarının kalibrasyonu ve validasyonu için kullanılırken sediment yükleri, gözlem verisi mevcut olan 2013–2022 takvim yılı aralığında modellenmiştir. Sediment yüklerinin kalibrasyonu için 2013–2017 yılları aralığındaki 5 yıl, validasyonu için ise 2018–2022 yılları aralığındaki 5 yıl kullanılmıştır.

SWAT-2 modelinde akış ve sediment yükleri 23 parametre kullanılarak eş zamanlı kalibre edilmiştir. RSWAT paketi ile otomatik kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. RSWAT içerisinde manuel kalibrasyon seçeneği yanında otomatik optimizasyon ve hassasiyet analizi için kullanılabilen farklı algoritma seçenekleri mevcuttur. Bunlar arasından, Genelleştirilmiş Olasılık Temelli Belirsizlik Tahmini (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, GLUE) (**Beven ve Binley, 1992**) kullanılmıştır. GLUE ile yapılan 5000 iterasyon sonucu kalibre edilen SWAT parametrelerinin değerleri, açıklamaları ile birlikte **Tablo 4.8**'de verilmiştir.

Kalibrasyon sürecinde kullanılan 23 model parametresi, akış ve sediment yükü simülasyonlarında uygun model performansı elde edilecek şekilde optimize edilmiştir. Yüzey akışına duyarlılığıyla bilinen CN2 ve ESCO parametreleri, bu süreçte kritik rol oynamıştır. Ayrıca, SOL_AWC, SOL_K, SOL_Z ve SOL_BD gibi toprak özelliklerine ilişkin parametreler de akış simülasyonlarında önemli etkiye sahiptir. Yeraltı suyu akışı bileşenlerinin modellenmesinde ise GW_DELAY, ALPHA_BF, GWQMN, GW_REVAP ve REVAPMN parametreleri etkili olmuş; bu parametreler, yeraltı akışının zamanlaması ve miktarını kontrol eden temel unsurları temsil etmektedir. Alt havza ve HRU ölçeğinde eğimle ilişkili olan SLSBBSN, HRU_SLP ve SLSOIL parametreleri hem yüzey akışını hem de erozyon süreçlerini etkileyerek sediment yükü simülasyonları üzerinde belirleyici olmuştur. CH_K2 parametresi,

ana kanal alüvyonunun hidrolik iletkenliğini temsil ederek kanal içi akış dinamiklerini düzenlemektedir. Kanal erozyonunu etkileyen diğer önemli parametreler arasında SPCON, SPEXP, CH_COV1, CH_COV2 ve ADJ_PKR yer almaktadır. Son olarak, sediment üretiminin hesaplandığı MUSLE denkleminde kullanılan USLE_K, USLE_P ve C_FACTOR parametreleri, sediment yükü tahminlerinde doğrudan etkili olmuştur. Bu parametre seti ile elde edilen akış ve sediment yükü simülasyonları ve gözlem verileri **Şekil 4.10**'da verilmiştir. **Şekil 4.10-a** akış simülasyonları için kalibrasyon ve validasyon periyodundaki zaman serisini, **Şekil 4.10-b** ise sediment yükü simülasyonlarının zaman serisini göstermektedir. Bu değerler sürekli zaman serileri olarak akış için 40 yıllık, sediment yükleri için ise 10 yıllık periyodu kapsamaktadır ve iklim değişikliği gibi uzun süreçleri ilgilendiren çalışmalar için kullanıma uygun ve kapsayıcı olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple, bu tez çalışmasının ilgili kısmında iklim değişikliği ile ilgili analizlerde **Kısım 4.1.1**'de açıklanan SWAT-1 modeli yerine SWAT-2 modeli tercih edilmiştir.

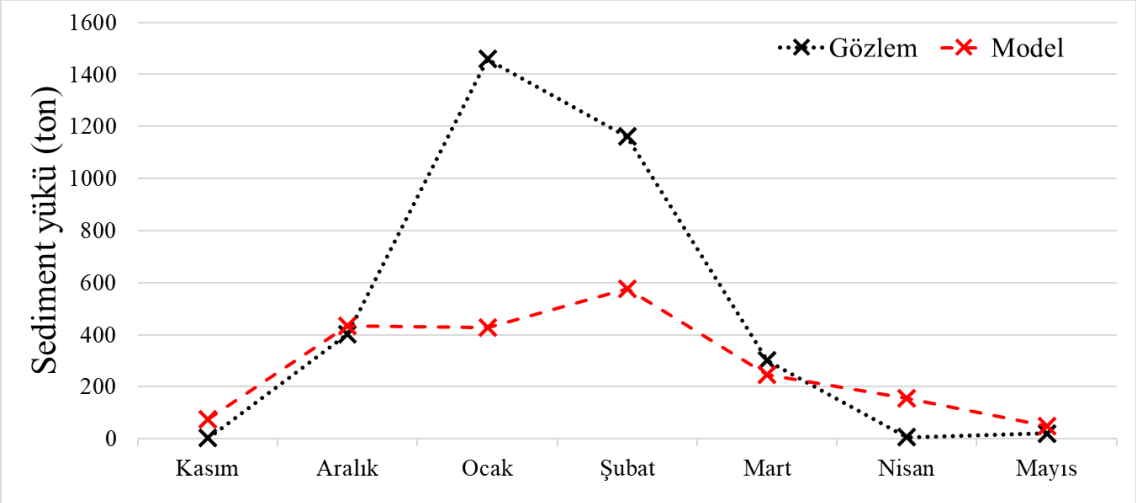


Şekil 4.10. SWAT-2 modeli kalibrasyon ve validasyon periyodunda modellenen ve gözlenen (a) akış ve (b) sediment yükü değerleri.

Tablo 4.8. SWAT-2 modelinde kullanılan parametrelerin açıklamaları ve kalibre edilen değerleri.

Parametre	Açıklama	Değiştirme yöntemi	Kalibre edilen değer
CN2	Nem durumu II için başlangıç SCS akış eğrisi numarası	yüzde oran	-0.283
CN2 (URBN)		direkt değiştirme	91.257
ESCO	Toprak buharlaşma kompanzasyon faktörü	direkt değiştirme	0.968
SOL_AWC	Toprak tabakasının mevcut su kapasitesi (mm H_2O/mm toprak)	yüzde oran	0.210
SOL_K	Doymuş hidrolik iletkenlik (mm/sa)	yüzde oran	0.161
SOL_Z	Yüzey topraktan alt katmana kadar derinlik (mm)	yüzde oran	-0.228
SOL_BD	Nemli kütle yoğunluğu (g/cm^3)	yüzde oran	0.082
GW_DELAY	Yeraltı suyu gecikmesi (gün)	direkt değiştirme	26.125
ALPHA_BF	Baz akış alfa faktörü (1/gün)	direkt değiştirme	0.828
GWQMN	Geri akış için sığ akiferdeki suyun eşik derinliği (mm)	direkt değiştirme	225.509
GW_REVAP	Yeraltı suyu "revap" katsayısı	direkt değiştirme	0.180
REVAPMN	Sığ akiferden buharlaşma veya derin akifere sızmanın başlayabilmesi için gerekli minimum su derinliği (mm)	direkt değiştirme	745.671
SLSUBBSN	Ortalama eğim uzunluğu (m)	direkt değiştirme	58.45
HRU_SLP	HRU ortalama eğim değeri (m/m)	yüzde oran	-0.252
SLSOIL	Yanal yeraltı akışı için eğim uzunluğu (m)	yüzde oran	0.258
CH_K2	Ana kanalın alüvyon tabakasındaki efektif hidrolik iletkenlik (mm/sa)	yüzde oran	-0.080
SPCON	Kanal yatağından yeniden hareketlenebilecek sediment miktarını belirleyen katsayı	direkt değiştirme	0.009
SPEXP	Nehir sediment yönlendirmesinde yeniden sürüklenen sedimenti hesaplamak için üs parametresi	direkt değiştirme	1.029
CH_COV1	Kanal erodibilite faktörü	direkt değiştirme	0.464
CH_COV2	Kanal yüzey kaplama faktörü	direkt değiştirme	0.685
ADJ_PKR	Alt havzadaki sediment taşınımı için pik debi ayarlama katsayısı	direkt değiştirme	1.710
USLE_P	USLE denklemi destek uygulama faktörü	direkt değiştirme	0.307
USLE_K	USLE denklemi toprak erodibilite katsayısı	direkt değiştirme	0.015
C_FACTOR	USLE denklemi vejetasyon örtüsü ile arazi kullanımının erozyona etkisini temsil eden faktör	direkt değiştirme	0.197

Sediment yükleri için ayrıca **Kısım 3.3**'te detayları açıklanan ölçüm yöntemi ile elde edilen Kasım 2024–Mayıs 2025 tarihleri aralığındaki güncel veri seti ile ek bir validasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunun için **Tablo 3.10**'daki sediment değerleri o ayı temsil eden gün sayısı ile çarpılarak aylık toplam sediment yükü değerleri gözlem verisi olarak hesaplanmıştır. **Şekil 4.11**'de 2024–2025 yılları aralığındaki ek validasyon periyodunda simülasyon ve gözlem sediment yükü değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.11: SWAT-2 modeli için sediment yüklerinin güncel tarihli saha ölçümleri ile ek validasyonu.

SWAT-2 modelinin kalibrasyon ve validasyon performansı, SWAT-1 modeli ile benzer biçimde, akış için NSE, KGE ve R^2; sediment yükü için ise NSE, KGE ve PBIAS metrikleriyle değerlendirilmiştir. **Tablo 4.9**'da bu metrikler özet olarak verilmiştir. **Moriasi ve diğ. (2007)** kriterlerine göre yapılan değerlendirmede, Kalibrasyon ve validasyon dönemlerinde model "iyi" ile "çok iyi" arasında performans sergilemiştir. NSE değerlerinin 0.50'nin üzerinde olması, modelin güvenilirliğini göstermektedir. Ek validasyon döneminde ise NSE 0.50'nin altındadır; ancak sınırlı veriye rağmen modelin pozitif NSE ve R^2 değerleri ile gözlem eğilimlerini yansıtması, özellikle sediment için kabul edilebilir bir performans olarak değerlendirilebilir.

Tablo 4.9: SWAT-2 modeline ait akış ve sediment yükleri için başarı metrikleri.

Periyot	Başarı metriği					
	Akış			Sediment Yükü		
	NSE	R^2	KGE	NSE	R^2	PBIAS (%)
Kalibrasyon (1981–2001 su yılı)	0.63	0.70	0.68	0.54	0.58	+11.20
Validasyon (2002–2022 su yılı)	0.61	0.66	0.57	0.84	0.84	+9.10
Ek Validasyon (2024–2025)	-	-	-	0.32	0.71	+41.3

4.3.2. Çoklu Model Senaryoları

AKAÖ ve iklim değişikliği etkilerinin incelenmesinde, oluşturulan SWAT-2 modelinin akış ve sediment yükü çıktıları çoklu model senaryoları ile analiz edilmiştir. AKAÖ verileri için 2050, 2070 ve 2090 yıllarına ait durumların tahminlemesi yapılmıştır. İklim değişikliği verileri **Tablo 3.8**'de gösterilen beş farklı GCM'nin iki farklı iklim senaryosu (RCP 4.5 ve RCP 8.5) altındaki yağış ve sıcaklık değerlerini kapsamaktadır. Böylece, gelecek yıllarda beklenen yağış ve sıcaklık koşulları altında o yılları temsil eden AKAÖ durumları birleştirilerek kombine olarak incelenebilmiştir. Çoklu model senaryolarında AKAÖ ve iklim değişikliği durumları kombine edilerek düzenlenmiştir. Bu senaryolar ve açıklamaları **Tablo 4.10**'da verilmektedir. Ayrıca, **Tablo 4.11**'de belirlenen senaryoların açıklamaları özet olarak sunulmaktadır. AKAÖ'nün geleceğe yönelik değişimi LCM ile üretilen tahminler ile modellere entegre olmuştur.

İklim değişikliği için ele alınan gelecek periyotları 20'şer yıllık üç farklı periyoda bölünmüştür: Periyot-1, 2040–2059 iklim verileri ve 2050 yılına ait AKAÖ tahmini ile; Periyot-2, 2060–2079 iklim verileri ve 2070 yılına ait AKAÖ tahmini ile; Periyot-3 ise, 2080–2099 iklim verileri ve 2090 yılına ait AKAÖ tahmini ile temsil edilmiştir. Referans periyodu **Şekil 3.10** ve **Şekil 3.11**'de karşılaştırmalı analizi verilen meteorolojik gözlem verileri ile benzer periyottaki 1980–2005 yıllarını kapsamaktadır. Dolayısıyla bu periyodu temsil edecek AKAÖ durumu için 1990 yılına ait veri üretilmiştir. Bu verinin üretimine dair metodolojik süreç **Kısım 3.2.1.3**'te detaylandırılmaktadır. Bu metodoloji ile üretilen referans dönemini temsil eden AKAÖ verisi olarak **Şekil 3.5-d**'de gösterilen 1990 yılına ait AKAÖ verisi kullanılmıştır. Böylece, benzer iklim koşulları altında geleceğe yönelik AKAÖ değişikliklerinin etkileri, benzer AKAÖ koşulları altında geleceğe yönelik iklim değişikliğinin etkileri ve hem AKAÖ hem de iklim değişikliğinin geleceğe yönelik kombine etkileri bu senaryolar ile analiz edilebilmiştir.

Tablo 4.10. AKAÖ ve iklim değişikliği etkilerinin incelenmesi amacıyla oluşturulan çoklu senaryolar.

İklim verisi	İklim senaryosu	Periyot	AKAÖ	Senaryo kodu	Amaç
Yer gözlemi (Sarıyer)	-	1980–2022	Landsat-1990	L1990-REF	Referans modeli
	-		Tahmin-2050	L2050-REF	Benzer iklim koşulları altında AKAÖ değişikliğinin etkisi
			Tahmin-2070	L2070-REF	
			Tahmin-2090	L2090-REF	
GFDL-ESM2M	RCP4.5	2040–2059	Landsat-1990	L1990-GCM1-RCP45-1	Benzer AKAÖ koşulları altında iklim değişiklinin etkisi (GFDL-ESM2M ile)
		2060–2079		L1990-GCM1-RCP45-2	
		2080–2099		L1990-GCM1-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059		L1990-GCM1-RCP85-1	
		2060–2079		L1990-GCM1-RCP85-2	
		2080–2099		L1990-GCM1-RCP85-3	
	RCP4.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM1-RCP45-1	AKAÖ ve iklim değişikliğinin kombine etkisi (GFDL-ESM2M ile)
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM1-RCP45-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM1-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM1-RCP85-1	
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM1-RCP85-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM1-RCP85-3	
HadGEM2-ES	RCP4.5	2040–2059	Landsat-1990	L1990-GCM2-RCP45-1	Benzer AKAÖ koşulları altında iklim değişiklinin etkisi (HadGEM2-ES ile)
		2060–2079		L1990-GCM2-RCP45-2	
		2080–2099		L1990-GCM2-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059		L1990-GCM2-RCP85-1	
		2060–2079		L1990-GCM2-RCP85-2	
		2080–2099		L1990-GCM2-RCP85-3	
	RCP4.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM2-RCP45-1	AKAÖ ve iklim değişikliğinin kombine etkisi (HadGEM2-ES ile)
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM2-RCP45-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM2-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM2-RCP85-1	
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM2-RCP85-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM2-RCP85-3	
IPSL-CM5A-LR	RCP4.5	2040–2059	Landsat-1990	L1990-GCM3-RCP45-1	Benzer AKAÖ koşulları altında iklim değişiklinin etkisi (IPSL-CM5A-LR ile)
		2060–2079		L1990-GCM3-RCP45-2	
		2080–2099		L1990-GCM3-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059		L1990-GCM3-RCP85-1	
		2060–2079		L1990-GCM3-RCP85-2	
		2080–2099		L1990-GCM3-RCP85-3	
	RCP4.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM3-RCP45-1	AKAÖ ve iklim değişikliğinin kombine etkisi (IPSL-CM5A-LR ile)
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM3-RCP45-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM3-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM3-RCP85-1	
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM3-RCP85-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM3-RCP85-3	

Tablo 4.10. Devamı.

İklim verisi	İklim senaryosu	Periyot	AKAÖ	Model kodu	Amaç
MIROC	RCP4.5	2040–2059	Landsat-1990	L1990-GCM4-RCP45-1	Benzer AKAÖ koşulları altında iklim değişiklinin etkisi (MIROC ile)
		2060–2079		L1990-GCM4-RCP45-2	
		2080–2099		L1990-GCM4-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059		L1990-GCM4-RCP85-1	
		2060–2079		L1990-GCM4-RCP85-2	
		2080–2099		L1990-GCM4-RCP85-3	
	RCP4.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM4-RCP45-1	AKAÖ ve iklim değişikliğinin kombine etkisi (MIROC ile)
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM4-RCP45-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM4-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM4-RCP85-1	
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM4-RCP85-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM4-RCP85-3	
NoerESM1-M	RCP4.5	2040–2059	Landsat-1990	L1990-GCM5-RCP45-1	Benzer AKAÖ koşulları altında iklim değişiklinin etkisi (NoerESM1-M ile)
		2060–2079		L1990-GCM5-RCP45-2	
		2080–2099		L1990-GCM5-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059		L1990-GCM5-RCP85-1	
		2060–2079		L1990-GCM5-RCP85-2	
		2080–2099		L1990-GCM5-RCP85-3	
	RCP4.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM5-RCP45-1	AKAÖ ve iklim değişikliğinin kombine etkisi (NoerESM1-M ile)
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM5-RCP45-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM5-RCP45-3	
	RCP8.5	2040–2059	Tahmin-2050	L2050-GCM5-RCP85-1	
		2060–2079	Tahmin-2070	L2070-GCM5-RCP85-2	
		2080–2099	Tahmin-2090	L2090-GCM5-RCP85-3	

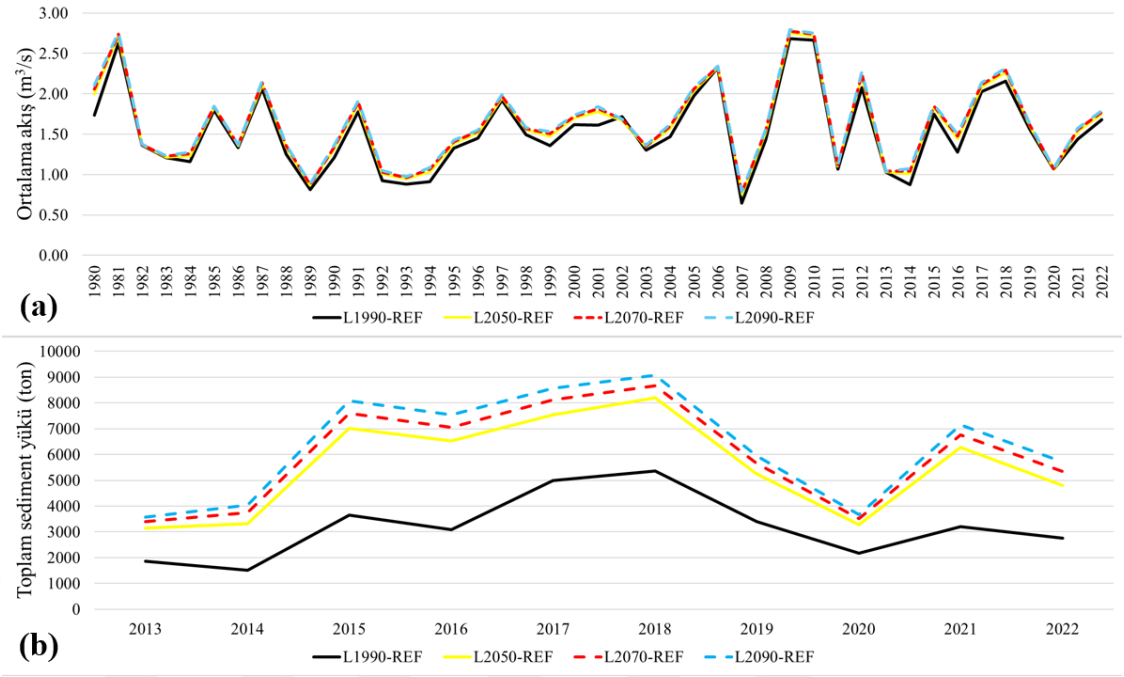
Tablo 4.11. Senaryo kodlarının açıklamaları.

Senaryo kodu	Açıklama
L1990	Referans dönemini temsil eden AKAÖ (Landsat 1990)
L2050	Periyot-1'i temsil eden 2050 yılına ait AKAÖ tahmini (TerrSet LCM ile)
L2070	Periyot-2'yi temsil eden 2070 yılına ait AKAÖ tahmini (TerrSet LCM ile)
L2090	Periyot-3'ü temsil eden 2090 yılına ait AKAÖ tahmini (TerrSet LCM ile)
GCM1	1 numaralı küresel dolaşım modeli: GFDL-ESM2M
GCM2	2 numaralı küresel dolaşım modeli: HadGEM2-ES
GCM3	3 numaralı küresel dolaşım modeli: IPSL-CM5A-LR
GCM4	4 numaralı küresel dolaşım modeli: MIROC
GCM5	5 numaralı küresel dolaşım modeli: NoerESM1-M
RCP45-1	RCP4.5 senaryosunda Gelecek Periyodu-1 (2040–2059) için iklim değişikliği verisi
RCP45-2	RCP4.5 senaryosunda Gelecek Periyodu-2 (2060–2079) için iklim değişikliği verisi
RCP45-3	RCP4.5 senaryosunda Gelecek Periyodu-3 (2080–2099) için iklim değişikliği verisi
RCP85-1	RCP8.5 senaryosunda Gelecek Periyodu-1 (2040–2059) için iklim değişikliği verisi
RCP85-2	RCP8.5 senaryosunda Gelecek Periyodu-2 (2060–2079) için iklim değişikliği verisi
RCP85-3	RCP8.5 senaryosunda Gelecek Periyodu-3 (2080–2099) için iklim değişikliği verisi

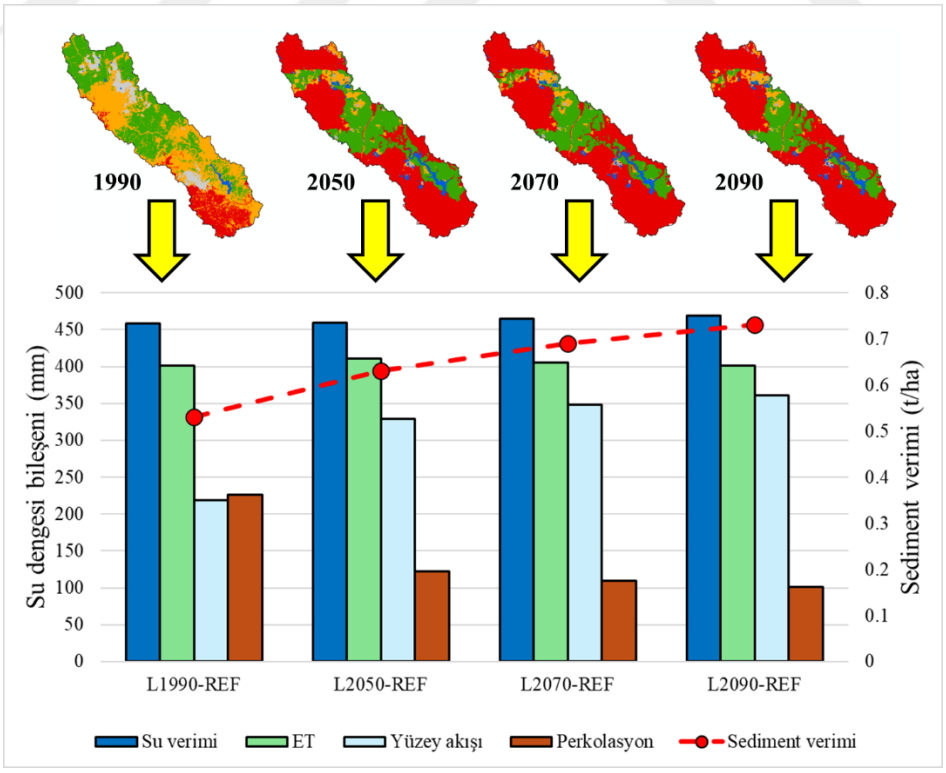
4.3.3. Benzer İklim Koşulları Altında AKAÖ Değişikliğinin Etkileri

Alibeyköy Havzası'nın geleceğe yönelik AKAÖ değişiminin havza hidrolojisi ve sediment yükleri üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek amacıyla **Tablo 4.10**'da yer alan L1990-REF ile L2050-REF, L2070-REF ve L2090-REF senaryoları karşılaştırılmıştır. Bu senaryolara ait modellerde iklim verisi 1980–2022 periyodu için sabit tutularak modellerde yalnızca AKAÖ girdisi değiştirilmiştir. Böylece, benzer iklim koşulları altında havzadaki AKAÖ değişikliklerinin havza hidrolojisi ve sediment yükü üzerindeki etkisi incelenebilmiştir. Bu kısımda kullanılan model senaryolarında, referans periyodundaki yıllık toplam yağışların ortalaması 854.3 mm'dir.

Şekil 4.12-a'da bu modellere ait yıllık ortalama akışlar ve **Şekil 4.12-b**'de sediment yüklerine ait zaman serileri sunulmaktadır. Akış değerlerinde senaryolar arası fark minimal düzeydeyken, sediment yüklerinde özellikle L1990-REF senaryosu ile diğer senaryolar arasında belirgin farklar gözlemlenmektedir. **Şekil 4.13** bu modellere ait havzadaki temel su dengesi bileşenlerini (ET, su verimi, yüzey akışı ve perkolasyon) ve havzanın sediment verimi değerlerini göstermektedir. Üst kısımda 1990, 2050, 2070 ve 2090 yıllarına ait AKAÖ haritaları gösterilmiştir. Alt kısımda ise her bir senaryo için su dengesi bileşenleri sütun grafiklerle, sediment verimi ise ikincil eksende kırmızı çizgiyle sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, yapılaşmış alanların arttığı gelecek senaryolarında ET ve yüzey akışı artarken, perkolasyon değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Su veriminde kısmi artışlar olurken, sediment verimi gelecek senaryolarında sürekli artış göstermiştir. **Tablo 4.12**'de ise referans senaryo modeline göre (L1990-REF) hesaplanan değişimler yüzde olarak verilmiştir. Modelleme sonuçlarına göre, yıllık ortalama akış değerleri 1990 senaryosunda 1.54 m^3/s iken, bu değer yapılaşmanın giderek arttığı senaryolarda sırasıyla 1.61 m^3/s (L2050-REF), 1.63 m^3/s (L2070-REF) ve 1.65 m^3/s (L2090-REF) olarak artış göstermiştir. Yıllık toplam sediment yükü ortalamaları açısından bakıldığında ise değişim çok daha belirgindir. L1990-REF senaryosunda 3202.8 ton/yıl olarak hesaplanan ortalama sediment yükü, L2050-REF, L2070-REF ve L2090-REF senaryolarında sırasıyla 5533.6, 5985.2 ve 6337.3 ton/yıl'a yükselmiştir. Bu artışlar sırasıyla %72.77, %86.87 ve %97.86 oranında değişimlere karşılık gelmektedir.



Şekil 4.12. Benzer iklim koşulları altında L1990-REF, L2050-REF, L2070-REF ve L2090-REF modellerine ait (a) yıllık ortalama akışlar ve (b) yıllık toplam sediment yükleri.



Şekil 4.13. Benzer iklim koşulları altında AKAÖ değişikliğinin su dengesi bileşenleri ve havza sediment verimi üzerindeki etkisi.

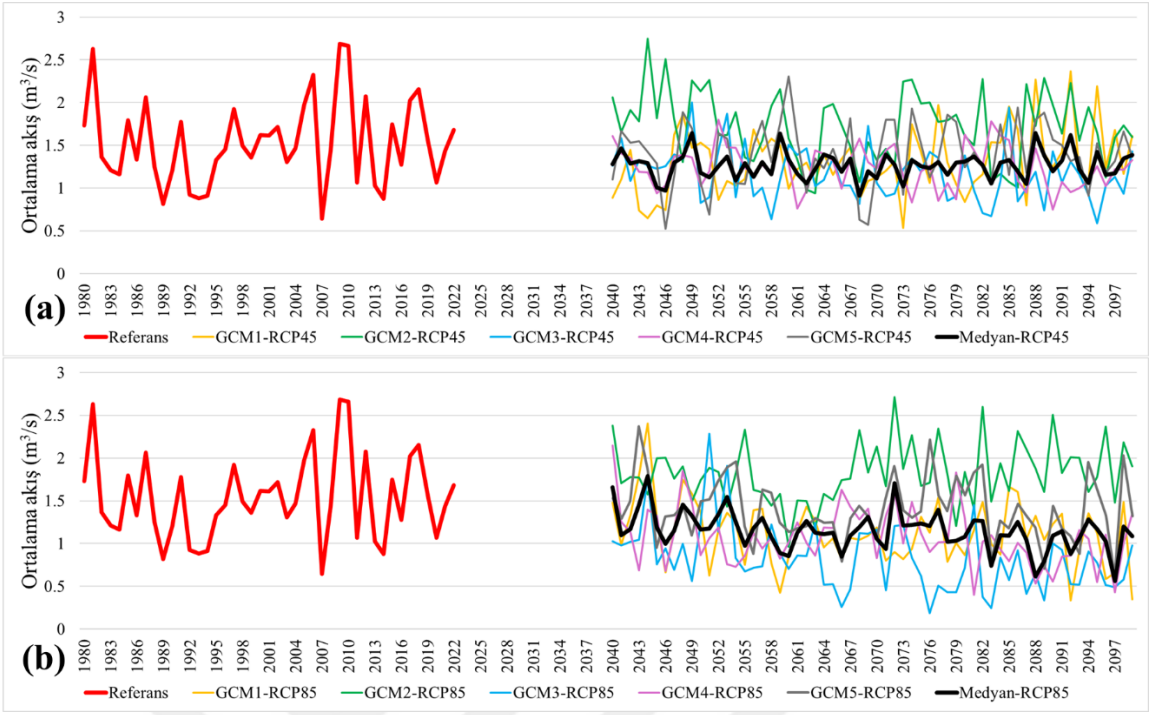
Tablo 4.12. Benzer iklim koşulları altında AKAÖ değişikliği ile yıllık ortalama akışlar, yıllık toplam sediment yüklerinin ortalaması ve değişim oranları.

Değer	Senaryo kodu			
	L1990-REF	L2050-REF	L2070-REF	L2090-REF
Yıllık ortalama akış (m^3/s)	1.54	1.61	1.63	1.65
Yıllık ortalama akıştaki değişim (%)	-	4.61	6.12	7.19
Yıllık toplam sediment yükü ortalaması (ton)	3202.8	5533.6	5985.2	6337.3
Yıllık toplam sediment yükü ortalamasındaki değişim (%)	-	72.77	86.87	97.86

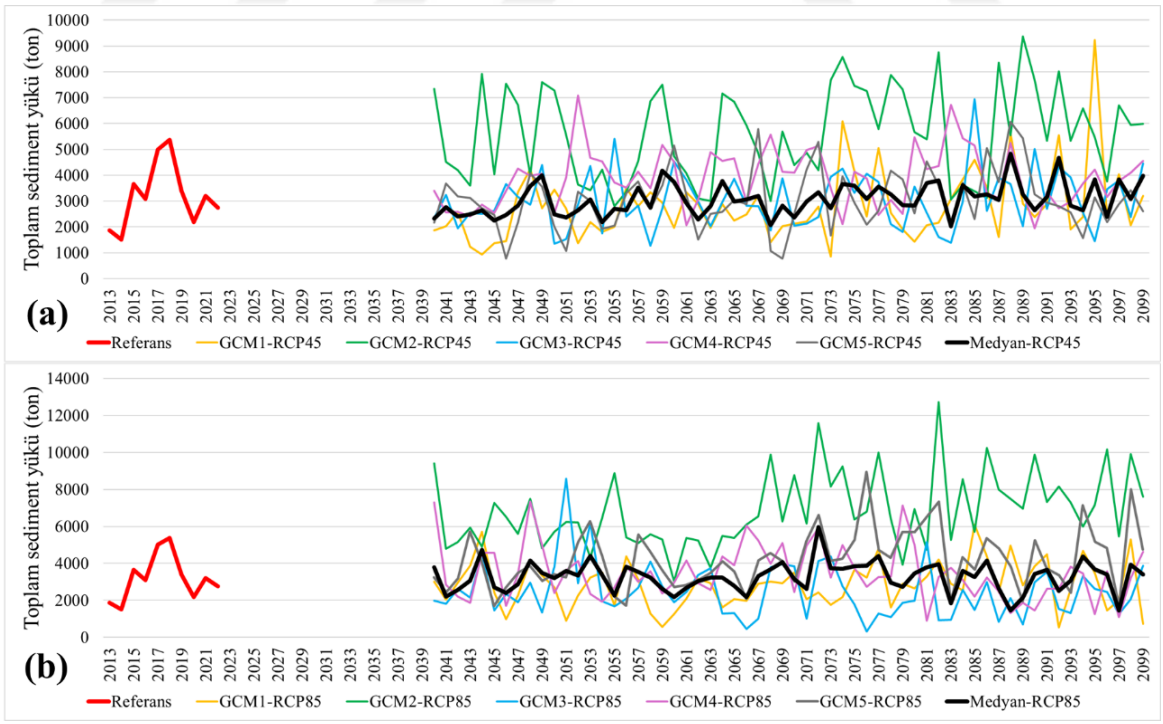
4.3.4. Benzer AKAÖ Koşulları Altında İklim Değişikliğinin Etkileri

Her bir GCM'ye ait iklim değişikliği verisi üç farklı gelecek periyoduna ayrılmıştır: Gelecek Periyodu-1 2040–2059, Gelecek Periyodu-2 2060–2079 ve Gelecek Periyodu-3 2080–2099 yıllarını kapsamaktadır. Ayrıca, her bir periyot iki farklı iklim değişikliği senaryosunda (RCP 4.5 ve RCP 8.5) incelenmiştir. **Tablo 4.10**'da görüldüğü üzere iklim değişikliğinin havza hidrolojisi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinde, her bir GCM için 6 havza modeli çalıştırılmıştır. Örneğin, GFDL-ESM2M (GCM1) için RCP 4.5 iklim senaryosuna ait üç farklı gelecek periyodu (L1990-GCM1-RCP45-1, L1990-GCM1-RCP45-2 ve L1990-GCM1-RCP45-3) ve RCP 8.5 senaryosuna ait üç farklı gelecek periyodu (L1990-GCM1-RCP85-1, L1990-GCM1-RCP85-2 ve L1990-GCM1-RCP85-3) sonuçları elde edilmiştir. Diğer tüm GCM'ler için de bu plan benzer şekilde takip edilmiştir. Bu modellerin tümünde referans AKAÖ verisi (1990 yılını temsil eden Landsat-5 verisi) (**Şekil 3.5-d**) sabit tutulmuştur. Böylece, benzer AKAÖ koşulları altında farklı iklim değişikliği senaryolarının gelecek periyotlar için karşılaştırılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

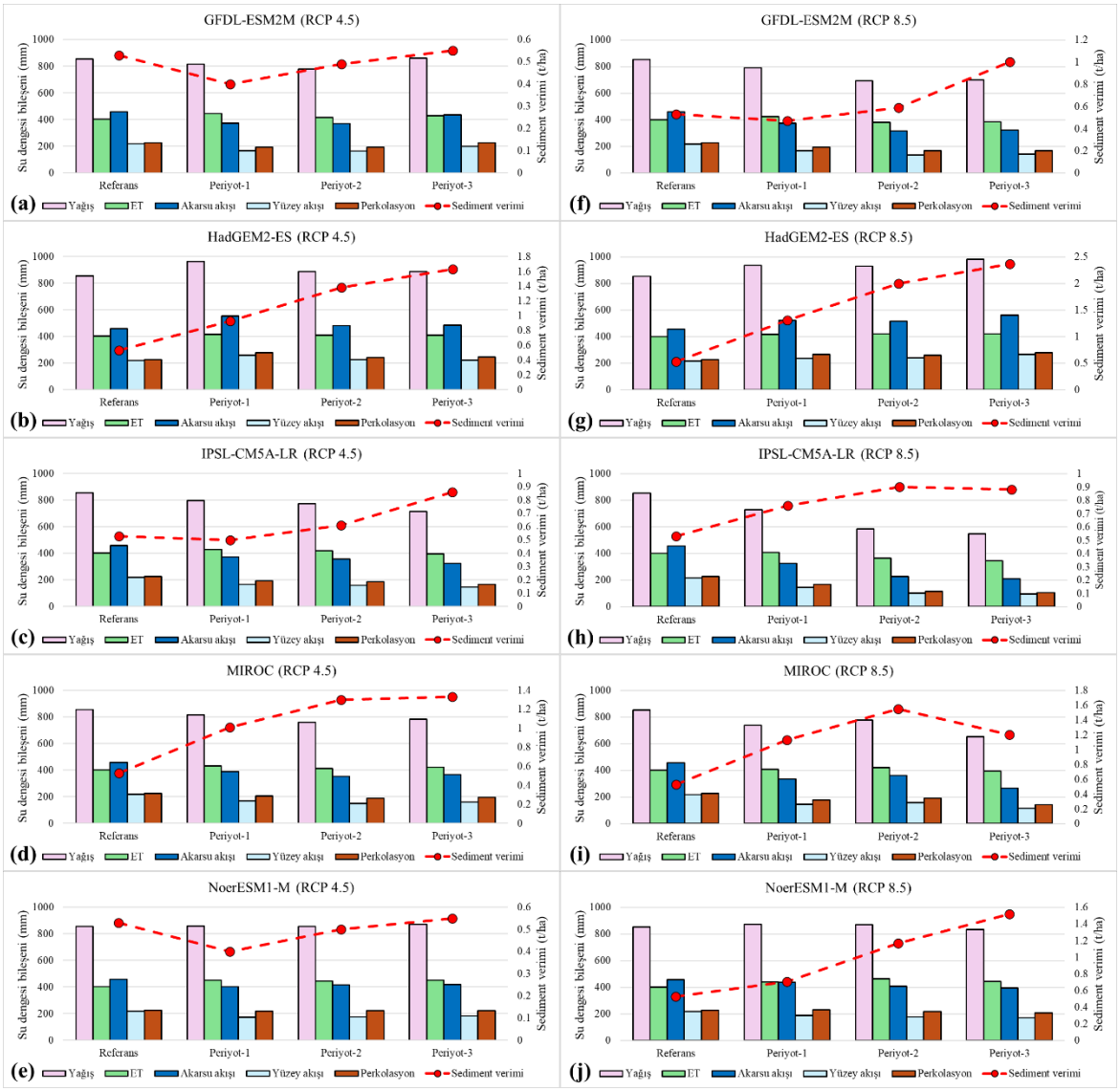
Benzer AKAÖ koşulları altında beş farklı GCM ile çalıştırılan modellere ait yıllık ortalama akışlar ve toplam sediment yükleri sırasıyla **Şekil 4.14** ve **Şekil 4.15**'te verilmektedir. **Şekil 4.16**'da ise tüm GCM'lere ait RCP 4.5 ve RCP 8.5 iklim senaryolarında su dengesi bileşenleri ve havzanın sediment verimindeki değişimler üç gelecek periyodu için gösterilmektedir. **Tablo 4.13** ve **Tablo 4.14**'te benzer AKAÖ koşulları altında beş GCM için üç farklı periyottaki sırasıyla yıllık ortalama akışlar ve toplam sediment yükleri ve bunların gelecek periyotlardaki değerlerin referansa göre değişim oranları verilmektedir.



Şekil 4.14. Benzer AKAÖ koşulları altında sırasıyla (a) RCP 4.5 ve (b) RCP 8.5 iklim senaryolarında yıllık ortalama akışlar.



Şekil 4.15. Benzer AKAÖ koşulları altında sırasıyla (a) RCP 4.5 ve (b) RCP 8.5 iklim senaryolarında yıllık toplam sediment yükleri.



Şekil 4.16. Benzer AKAÖ koşulları altında sırasıyla GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC, NoerESM1-M için üç periyottaki (a-e) RCP 4.5 ve (f-j) RCP 8.5 iklim senaryosunda su dengesi bileşenleri ve havzanın sediment verimleri.

Tablo 4.13. Benzer AKAÖ koşulları altında her GCM için üç farklı periyottaki yıllık ortalama akışlar ve değişim oranları.

İklim senaryosu	Referans yıllık ortalama akış (m^3/s)	GCM	Yıllık ortalama akış (m^3/s)		
			Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3
	1980–2022		2040–2059	2060–2079	2080–2099
RCP4.5	**1.54**	GFDL-ESM2M	1.23	1.23	1.47
		HadGEM2-ES	1.89	1.63	1.65
		IPSL-CM5A-LR	1.24	1.18	1.08
		MIROC	1.31	1.19	1.24
		NoerESM1-M	1.36	1.42	1.42
		Medyan	**1.27**	**1.23**	**1.29**
RCP8.5		GFDL-ESM2M	1.25	1.06	1.07
		HadGEM2-ES	1.78	1.76	1.92
		IPSL-CM5A-LR	1.07	0.73	0.69
		MIROC	1.12	1.22	0.88
		NoerESM1-M	1.49	1.38	1.34
		Medyan	**1.26**	**1.15**	**1.03**
İklim senaryosu	Referans yıllık ortalama akış (m^3/s)	GCM	Yıllık ortalama akıştaki değişim (%)		
			Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3
	1980–2022		2040–2059	2060–2079	2080–2099
RCP4.5	**1.54**	GFDL-ESM2M	-20.13	-20.13	-4.55
		HadGEM2-ES	22.73	5.84	7.14
		IPSL-CM5A-LR	-19.48	-23.38	-29.87
		MIROC	-14.94	-22.73	-19.48
		NoerESM1-M	-11.69	-7.79	-7.79
		Medyan	**-17.53**	**-20.13**	**-16.23**
RCP8.5		GFDL-ESM2M	-18.83	-31.17	-30.52
		HadGEM2-ES	15.58	14.29	24.68
		IPSL-CM5A-LR	-30.52	-52.60	-55.19
		MIROC	-27.27	-20.78	-42.86
		NoerESM1-M	-3.25	-10.39	-12.99
		Medyan	**-18.18**	**-25.32**	**-33.12**

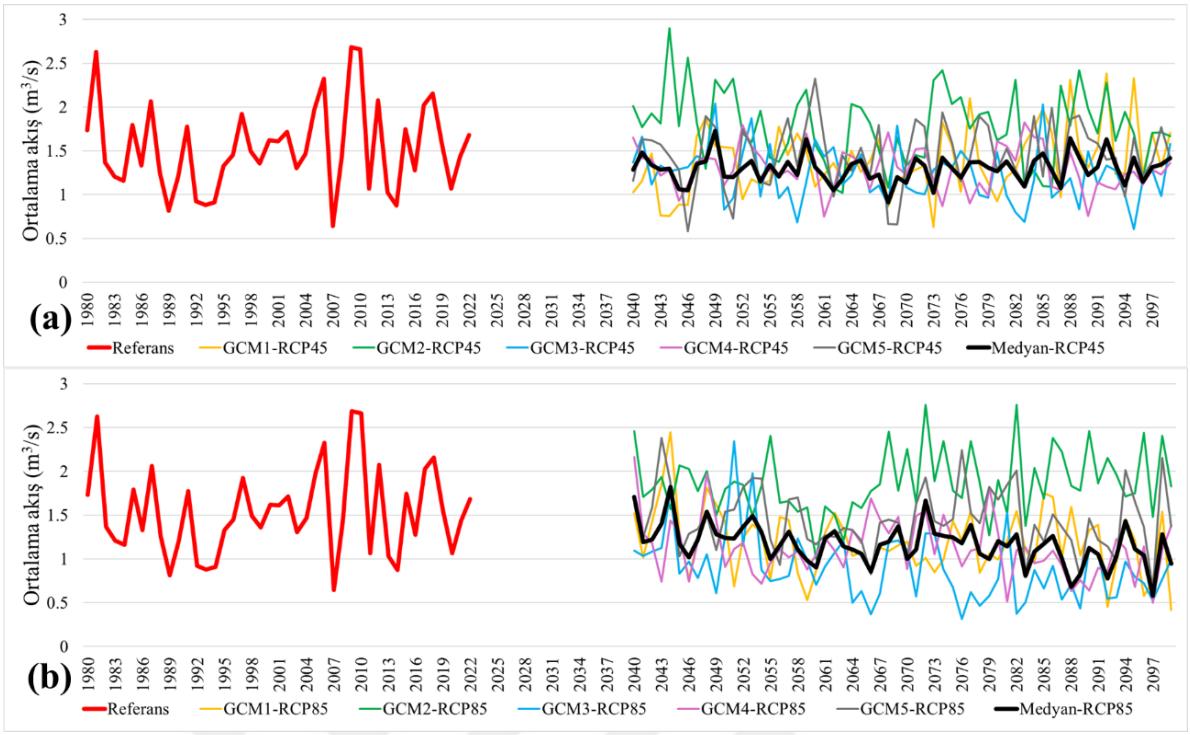
Tablo 4.14. Benzer AKAÖ koşulları altında her GCM için üç farklı periyottaki yıllık toplam sediment yükleri ve değişim oranları.

İklim senaryosu	Referans yıllık toplam sediment yükü ortalaması (ton)	GCM	Yıllık toplam sediment yükü ortalaması (ton)		
			Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3
	2013–2022		2040–2059	2060–2079	2080–2099
RCP4.5	**3202.9**	GFDL-ESM2M	2392.21	2725.92	3340.74
		HadGEM2-ES	5331.39	5688.31	5853.21
		IPSL-CM5A-LR	2784.60	3065.84	3264.65
		MIROC	3744.04	3834.78	4047.15
		NoerESM1-M	2734.51	3092.54	3315.41
		Medyan	**2812.03**	**3053.55**	**3331.00**
RCP8.5		GFDL-ESM2M	2721.24	2604.28	3269.34
		HadGEM2-ES	6052.93	6724.74	7774.09
		IPSL-CM5A-LR	2994.64	2288.35	2232.83
		MIROC	3535.52	4148.06	2740.02
		NoerESM1-M	3677.40	4345.49	4586.52
		Medyan	**3268.81**	**3368.13**	**3159.62**
İklim senaryosu	Referans yıllık toplam sediment yükü ortalaması (ton)	GCM	Yıllık toplam sediment yükü ortalamasındaki değişim (%)		
			Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3
	2013–2022		2040–2059	2060–2079	2080–2099
RCP4.5	**3202.9**	GFDL-ESM2M	-25.31	-14.89	4.30
		HadGEM2-ES	66.46	77.60	82.75
		IPSL-CM5A-LR	-13.06	-4.28	1.93
		MIROC	16.90	19.73	26.36
		NoerESM1-M	-14.62	-3.45	3.51
		Medyan	**-12.20**	**-4.66**	**4.00**
RCP8.5		GFDL-ESM2M	-15.04	-18.69	2.07
		HadGEM2-ES	88.98	109.96	142.72
		IPSL-CM5A-LR	-6.50	-28.55	-30.29
		MIROC	10.38	29.51	-14.45
		NoerESM1-M	14.81	35.67	43.20
		Medyan	**2.06**	**5.16**	**-1.35**

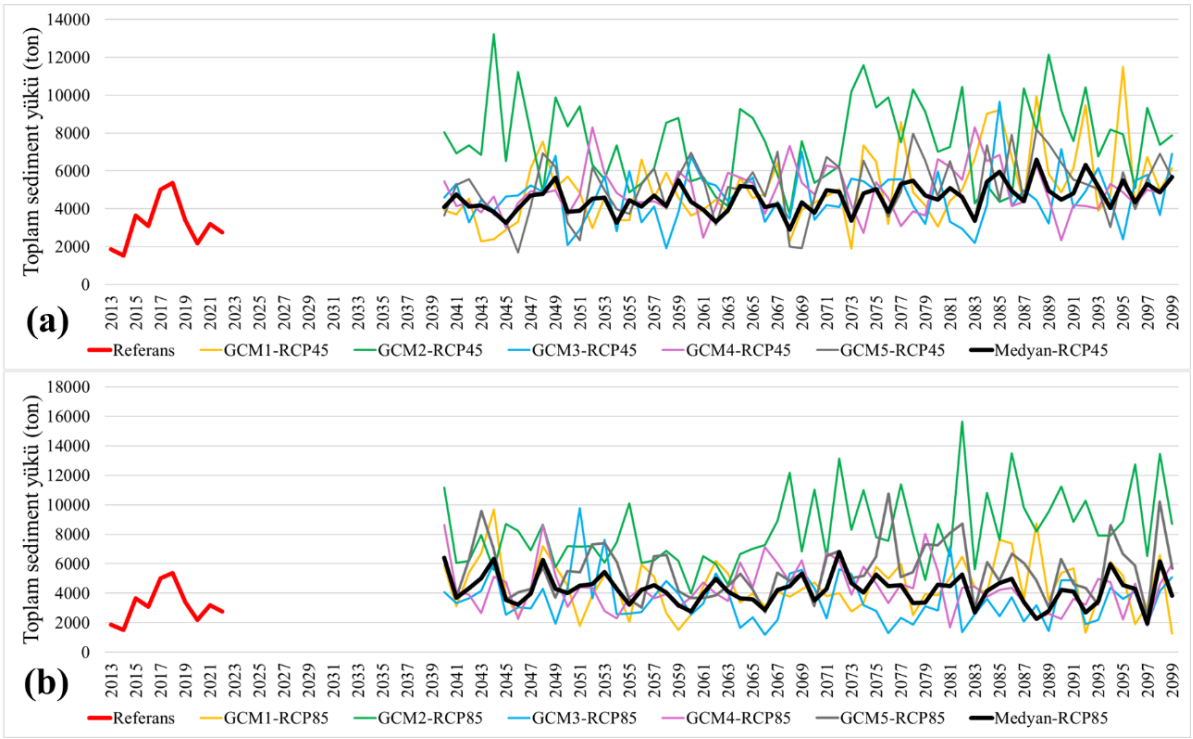
4.3.5. AKAÖ ve İklim Değişikliğinin Kombine Etkileri

Kısım 4.3.4'te açıklanan model planında AKAÖ verisi referans dönemi için sabit tutularak geleceğe yönelik iklim değişikliği projeksiyonları çalıştırılmıştır. Bu kısımdaki incelemede, **Kısım 4.3.4**'teki modellere her bir periyot için o periyodu temsil eden AKAÖ verisi dahil edilerek AKAÖ ve iklim değişikliğinin kombine etkisi değerlendirilmiştir. Bunun için, **Tablo 4.10**'da görüldüğü üzere her bir GCM için 6 havza modeli daha çalıştırılmıştır. Örneğin, GFDL-ESM2M (GCM1) için RCP 4.5 iklim senaryosuna ait üç farklı gelecek periyodu (L2050-GCM1-RCP45-1, L2070-GCM1-RCP45-2 ve L2090-GCM1-RCP45-3) ve RCP 8.5 senaryosuna ait üç farklı gelecek periyodu (L2050-GCM1-RCP85-1, L2070-GCM1-RCP85-2 ve L2090-GCM1-RCP85-3) sonuçları elde edilmiştir. Diğer tüm GCM'ler için de bu plan takip edilmiştir. Böylece, AKAÖ ve iklim değişikliğinin kombine etkisinin gelecek periyotlar için karşılaştırılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

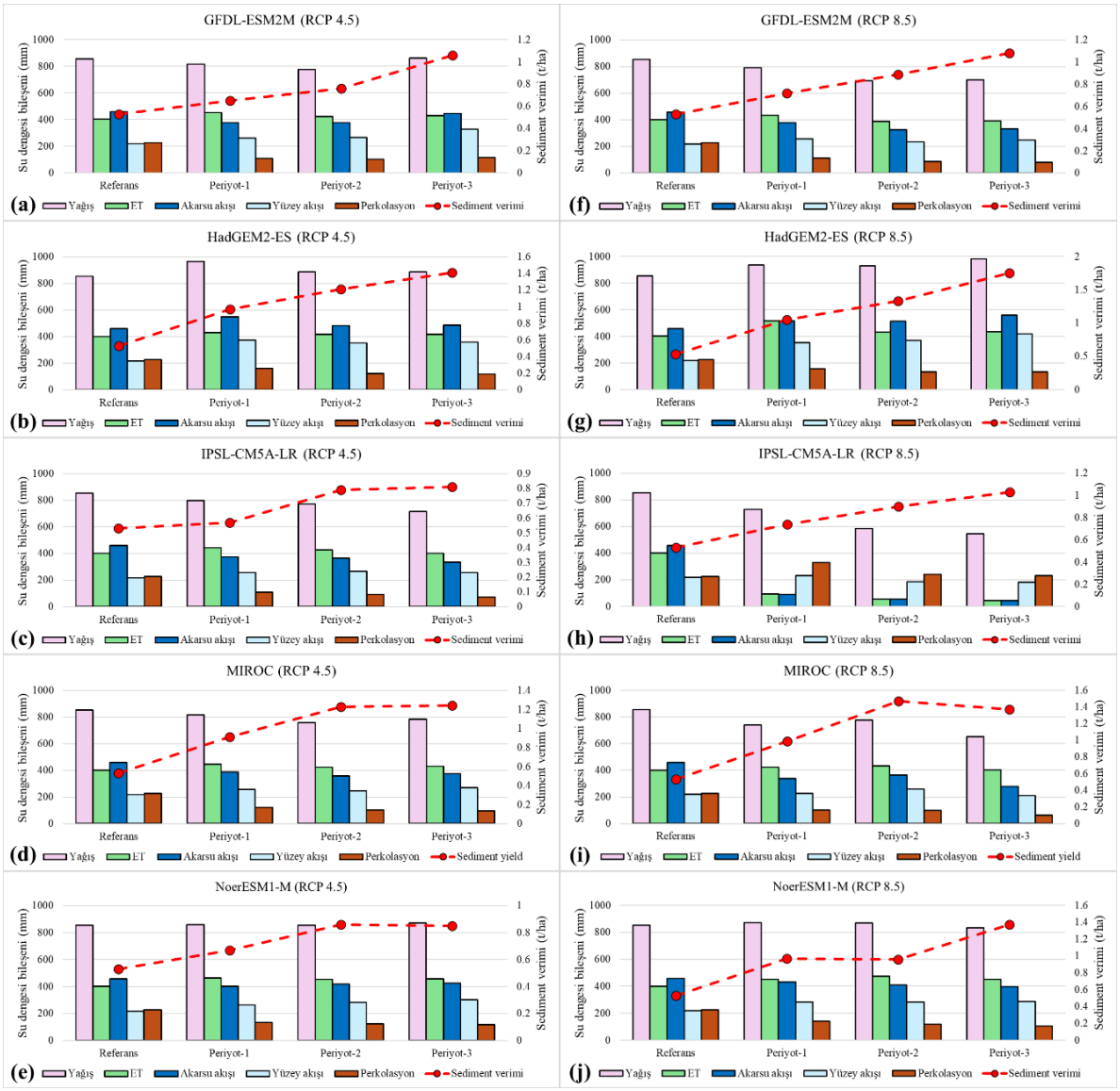
Şekil 4.17 ve **Şekil 4.18**'de değişen AKAÖ koşulları altında beş farklı GCM ile çalıştırılan modellere ait sırasıyla yıllık ortalama akışlar ve yıllık toplam sediment yükleri verilmektedir. **Şekil 4.19**'da AKAÖ durumunun her bir gelecek periyodu için değiştirilerek iklim değişikliği etkisinin incelendiği (kombine durum) GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC, NoerESM1-M için RCP 4.5 ve RCP 8.5 iklim senaryolarında üç gelecek periyodu için su dengesi bileşenleri ve havzanın sediment verimindeki değişimler gösterilmektedir. **Tablo 4.15** ve **Tablo 4.16**'da değişen AKAÖ koşulları altında beş GCM için üç farklı periyottaki sırasıyla yıllık ortalama akışlar ve toplam sediment yükleri ve bunların gelecek periyotlardaki değerlerin referansa göre değişim oranları verilmektedir.



Şekil 4.17. Değişen AKAÖ koşulları altında sırasıyla (a) RCP 4.5 ve (b) RCP 8.5 iklim senaryolarında yıllık ortalama akışlar.



Şekil 4.18. Değişen AKAÖ koşulları altında sırasıyla (a) RCP 4.5 ve (b) RCP 8.5 iklim senaryolarında yıllık toplam sediment yükleri.



Şekil 4.19. Değişen AKAÖ koşulları altında sırasıyla GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC, NoerESM1-M için üç periyottaki (a-e) RCP 4.5 ve (f-j) RCP 8.5 iklim senaryosunda su dengesi bileşenleri ve havzanın sediment verimleri.

Tablo 4.15. Değişen AKAÖ koşulları altında her GCM için üç farklı periyottaki yıllık ortalama akışlar ve değişim oranları.

İklim senaryosu	Referans yıllık ortalama akış (m^3/s)	GCM	Yıllık ortalama akış (m^3/s)		
			Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3
	1980–2022		2040–2059	2060–2079	2080–2099
RCP4.5	**1.54**	GFDL-ESM2M	1.30	1.31	1.56
		HadGEM2-ES	1.93	1.69	1.71
		IPSL-CM5A-LR	1.29	1.26	1.15
		MIROC	1.35	1.24	1.30
		NoerESM1-M	1.40	1.47	1.48
		Medyan	1.31	1.25	1.33
RCP8.5		GFDL-ESM2M	1.31	1.12	1.15
		HadGEM2-ES	1.83	1.81	1.98
		IPSL-CM5A-LR	1.13	0.81	0.77
		MIROC	1.16	1.27	0.95
		NoerESM1-M	1.53	1.43	1.39
		Medyan	1.29	1.18	1.04
İklim senaryosu	Referans yıllık ortalama akış (m^3/s)	GCM	Yıllık ortalama akıştaki değişim (%)		
			Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3
	1980–2022		2040–2059	2060–2079	2080–2099
RCP4.5	**1.54**	GFDL-ESM2M	-15.70	-15.17	1.42
		HadGEM2-ES	25.17	9.94	10.82
		IPSL-CM5A-LR	-16.23	-18.46	-25.16
		MIROC	-12.24	-19.49	-15.49
		NoerESM1-M	-9.06	-4.81	-3.69
		Medyan	**-14.69**	**-19.14**	**-13.86**
RCP8.5		GFDL-ESM2M	-15.26	-27.02	-25.29
		HadGEM2-ES	18.58	17.70	28.48
		IPSL-CM5A-LR	-26.84	-47.37	-50.00
		MIROC	-24.37	-17.64	-38.50
		NoerESM1-M	-0.93	-7.45	-9.57
		Medyan	**-16.28**	**-23.58**	**-32.26**

Tablo 4.16. Değişen AKAÖ koşulları altında her GCM için üç farklı periyottaki yıllık toplam sediment yükleri ve değişim oranları.

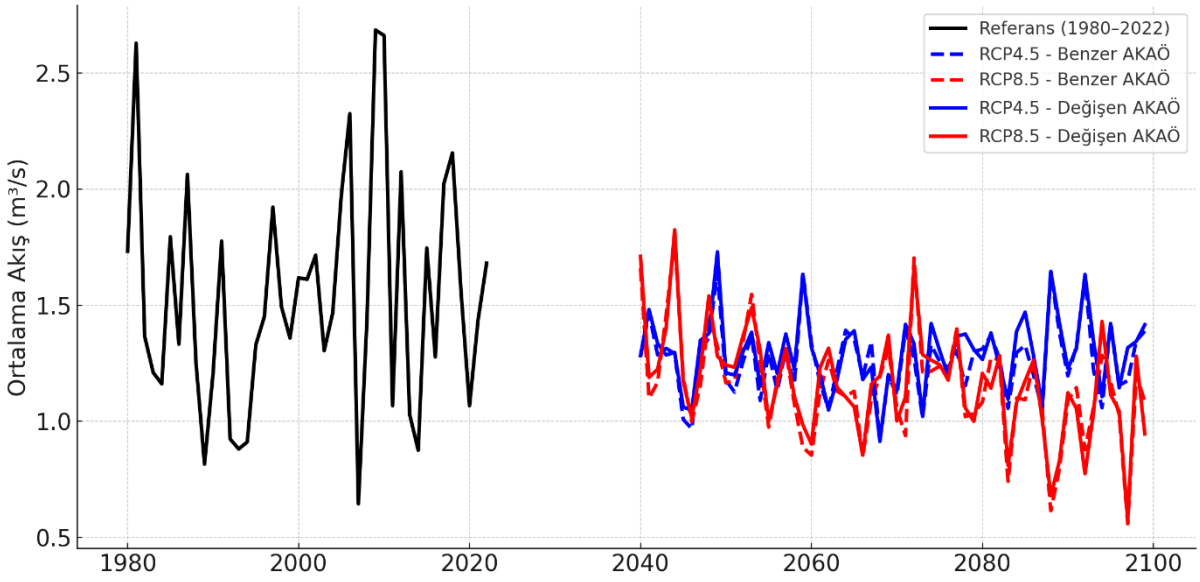
İklim senaryosu	Referans yıllık toplam sediment yükü ortalaması (ton)	GCM	Yıllık toplam sediment yükü ortalaması (ton)		
			Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3
	2013–2022		2040–2059	2060–2079	2080–2099
RCP4.5	**3202.9**	GFDL-ESM2M	4422.40	4704.01	6342.37
		HadGEM2-ES	7682.44	7400.61	7681.60
		IPSL-CM5A-LR	4231.08	4845.25	4805.97
		MIROC	4748.78	4760.99	5197.74
		NoerESM1-M	4527.61	5138.39	5598.26
		Medyan	4322.67	4385.21	5016.74
RCP8.5		GFDL-ESM2M	4573.62	4146.79	4757.31
		HadGEM2-ES	7285.39	7975.60	9622.49
		IPSL-CM5A-LR	4103.10	3287.16	3379.65
		MIROC	4259.96	5068.23	3737.64
		NoerESM1-M	5494.28	5274.68	5827.99
		Medyan	4463.83	4218.15	4027.02
İklim senaryosu	Referans yıllık toplam sediment yükü ortalaması (ton)	GCM	Yıllık toplam sediment yükü ortalamasındaki değişim (%)		
			Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3
	2013–2022		2040–2059	2060–2079	2080–2099
RCP4.5	**3202.9**	GFDL-ESM2M	38.07	46.87	98.02
		HadGEM2-ES	139.86	131.06	139.83
		IPSL-CM5A-LR	32.10	51.28	50.05
		MIROC	48.26	48.65	62.28
		NoerESM1-M	41.36	60.43	74.79
		Medyan	**34.96**	**36.91**	**56.63**
RCP8.5		GFDL-ESM2M	42.80	29.47	48.53
		HadGEM2-ES	127.46	149.01	200.43
		IPSL-CM5A-LR	28.11	2.63	5.52
		MIROC	33.00	58.24	16.70
		NoerESM1-M	71.54	64.68	81.96
		Medyan	**39.37**	**31.70**	**25.73**

4.3.6. Benzer ve Değişen AKAÖ Senaryolarının Karşılaştırılması

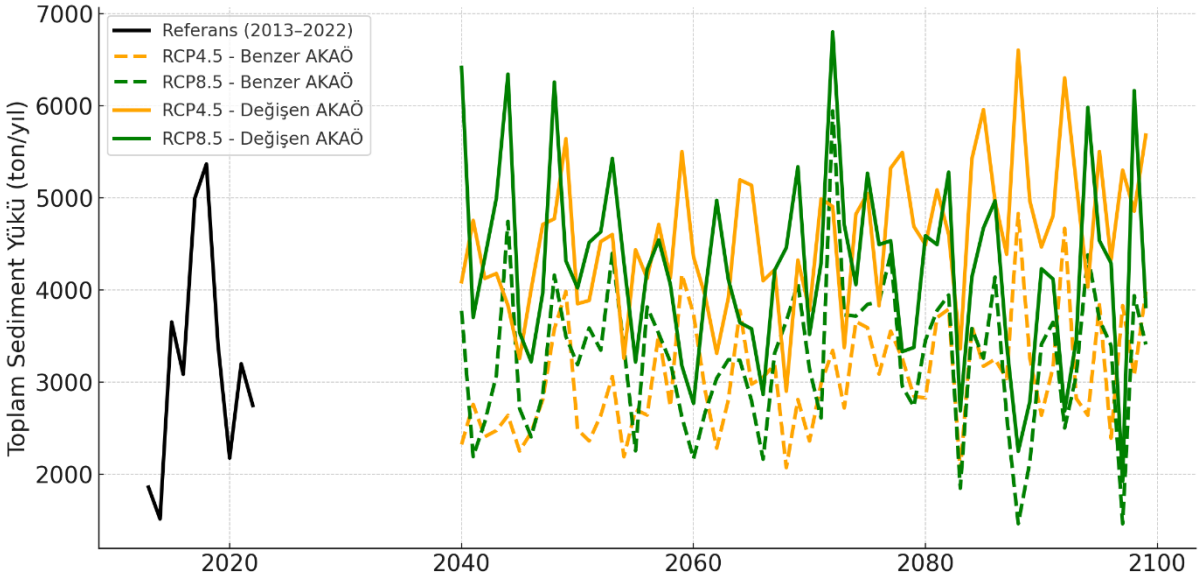
İklim değişikliğinin iki farklı senaryosu (RCP 4.5 ve RCP 8.5) ile beş farklı GCM'ye ait değerler benzer ve değişen AKAÖ koşulları altında karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada öncelikle akışların ve sediment yüklerinin 1980–2099 periyodu boyunca zaman serileri incelenmiş; sonrasında ise ortalama akışların ve toplam sediment yüklerinin referans dönemine (1980–2022) göre yüzde değişim oranları analiz edilmiştir.

Şekil 4.20 benzer ve değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin etkilerini beş GCM'nin ortalama akış değerlerinin medyanı olarak göstermektedir. Grafiklerde kesikli çizgiler yalnızca iklim değişikliğinin etkisi ile; düz çizgiler ise AKAÖ ve iklim değişikliğinin kombine etkileri ile elde edilen değerleri temsil etmektedir. Buna göre, benzer AKAÖ koşulları altında RCP 4.5 - RCP 8.5 iklim senaryolarında medyan akışlar zaman içinde dalgalı bir seyir izlemekte olup, RCP8.5 senaryosu altında özellikle 2080 sonrası dönemde önemli azalmalar gözlenmektedir. Her iki iklim senaryosunda da akışlar referansa göre düşüş eğilimindedir. Özellikle RCP8.5 - değişen AKAÖ senaryosunda dönemsel olarak 1.0 m^3/s altına düşen medyan değerler hem iklim hem de AKAÖ değişiminin kombine etkisinin hidrolojik rejimi olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

Şekil 4.21 benzer ve değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin etkilerini beş GCM'nin toplam sediment yükü değerlerinin medyanı olarak göstermektedir. Grafiklerde kesikli çizgiler yalnızca iklim değişikliğinin etkisi ile; düz çizgiler ise AKAÖ ve iklim değişikliğinin kombine etkileri ile elde edilen değerleri temsil etmektedir. Buna göre, referans dönemine kıyasla tüm senaryolarda sediment yüklerinde artış gözlemlenmektedir. En yüksek değerler RCP8.5 - Değişen AKAÖ senaryosunda oluşmakta, bu da hem artmış yüzey akışının hem de bozulmuş arazi örtüsünün sediment taşınımını şiddetlendirdiğini göstermektedir. RCP4.5 - Değişen AKAÖ senaryosu da referansa göre belirgin artış göstermekte, ancak daha istikrarlı bir eğilim sergilemektedir. Benzer AKAÖ senaryoları altında bile sediment yüklerinde artış olması, sadece AKAÖ değişimim değil, iklim değişikliği etkisinin de (şiddetli yağışlar, taşkınlar vb.) önemli olduğunu ortaya koymaktadır. RCP8.5 altında, sediment yükü bazı yıllarda referansın 2–3 katına çıkmaktadır.



Şekil 4.20. Benzer ve değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin akışlar üzerindeki etkisinin karşılaştırılması.



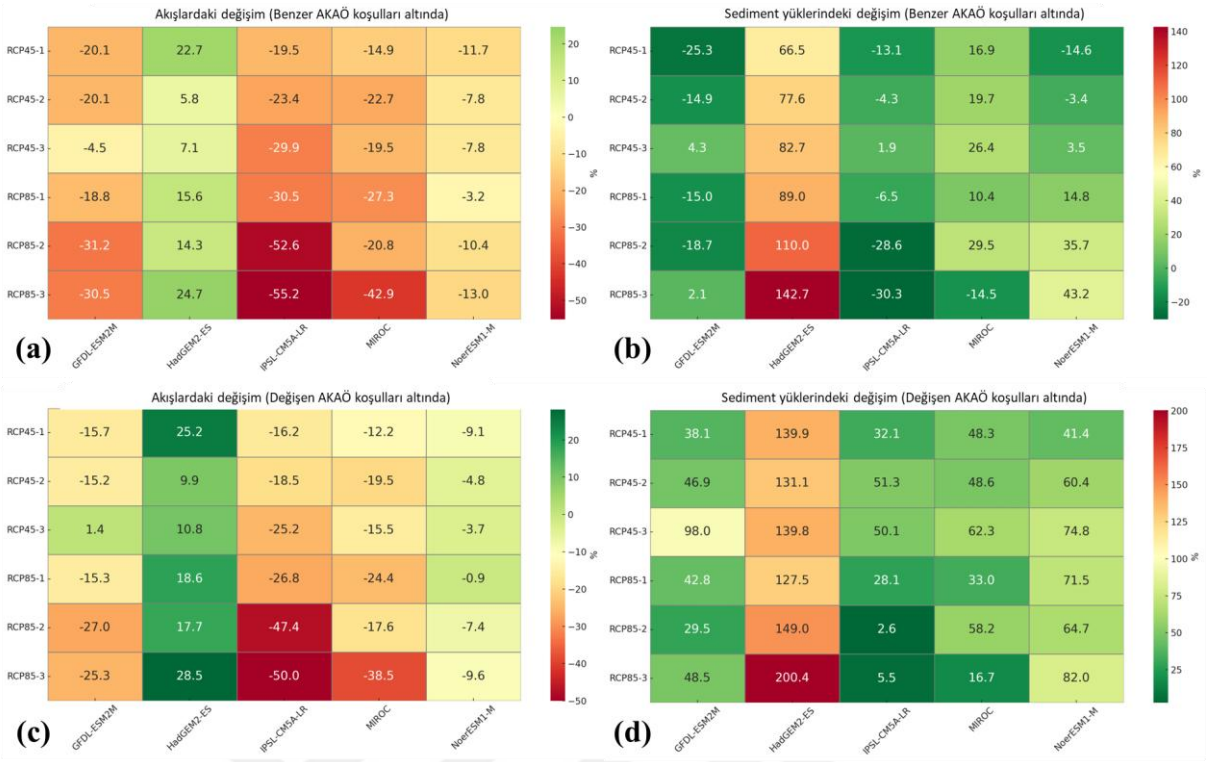
Şekil 4.21. Benzer ve değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin sediment yükleri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması.

Şekil 4.22'de **Tablo 4.13–4.16** tablolarında verilen medyan değerlerdeki değişimlere paralel şekilde renklendirilmiş bir özet sunulmaktadır.

Şekil 4.22-a ve **Şekil 4.22-c** sırasıyla benzer ve değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin akışlar üzerindeki etkilerini referans periyoda göre yüzde oranlar biçiminde vermektedir. Buna göre, AKAÖ değişiklikleri genel olarak akıştaki düşüşü azaltmaktadır (akışta azalma varsa daha az düşüşe neden olmaktadır). Bazı durumlarda (örneğin GFDL-ESM2M, RCP4.5-3), AKAÖ değişikliği etkisi akışı negatiften pozitife çevirmektedir. IPSL-CM5A-LR'de akışlardaki iklim değişikliği etkili büyük düşüşler AKAÖ değişikliği etkisiyle biraz hafifletilmiştir. HadGEM2-ES'de iklim değişikliği etkili artışlar, AKAÖ değişikliği etkisi ile daha da kuvvetlenmiştir. Genel olarak, AKAÖ değişiklikleri, akış üzerindeki iklim kaynaklı baskıyı hafifletici ya da büyütücü etki yapabilir. Bu etki yaklaşık %5 mertebesindedir.

Şekil 4.22-b ve **Şekil 4.22-d** sırasıyla benzer ve değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin sediment yükleri üzerindeki etkilerini referans periyoda göre yüzde oranlar biçiminde vermektedir. Buna göre, AKAÖ değişikliği tüm senaryo ve modellerde sediment yükünü artırıcı etki göstermektedir. Negatif değerlerde azalma (daha az azalma), Pozitif değerlerde artış (daha fazla artış) görülmüştür. IPSL-CM5A-L'de tüm sediment yükü değerleri, AKAÖ değişikliği ile sayesinde negatiften pozitife geçmiştir. Bu çok belirgindir ve AKAÖ değişikliğinin erozyona katkısı açısından çarpıcıdır. HadGEM2-ES'te zaten yüksek olan iklim değişikliği kaynaklı artış, AKAÖ değişikliği etkisiyle çok daha dramatik hale gelmiştir (örneğin RCP8.5-3'te 200.4%). RCP8.5 senaryoları, hem iklim hem AKAÖ değişikliği etkilerinin çarpan etkisiyle en yüksek artışların gözlendiği periyotlardır.

Sonuç olarak, iklim değişikliğinin akışlardaki etkisi AKAÖ değişikliğinin etkisinden daha fazladır. AKAÖ değişikliği ise, sediment yükleri üzerinde iklim değişikliğine göre daha güçlü bir tetikleyicidir.



Şekil 4.22. İklim değişikliğinin benzer AKAÖ koşulları altında (a) akışlarda ve (b) sediment yüklerindeki; değişen AKAÖ koşulları altında (c) akışlarda ve (d) sediment yüklerindeki etkisi.

4.3.7. Bulguların Yorumlanması

Benzer iklim koşulları altında AKAÖ durumundaki değişikliklerin etkisi incelendiğinde, gelecek 2050, 2070 ve 2090 yıllarına ait senaryolarda yıllık ortalama akış değerleri birbirine yakındır (**Şekil 4.12-a** ve **Tablo 4.12**). 1990 yılına ait AKAÖ verisi ile oluşturulan referans modeli (L1990-REF) için 1980–2022 periyodundaki yıllık akışların ortalaması 1.54 m^3/s değerindedir. Bu değer, 2050 yılına ait AKAÖ verisi ile oluşturulan model (L2050-REF) için 1.61 m^3/s, 2070 yılına ait arazi kullanımı verisi ile oluşturulan model (L2070-REF) için 1.63 m^3/s, 2090 yılına ait arazi kullanımı verisi ile oluşturulan model (L2090-REF) için 1.65 m^3/s değerinde bulunmuştur. Buna göre, yıllık ortalama akışlar AKAÖ değişikliği etkisi ile 2050, 2070 ve 2090 yılları için sırasıyla %4.61, %6.12 ve %7.19 oranında artmıştır. Bu artış eğilimi, özellikle geçirimsiz yüzeylerin yayılmasıyla yüzey akışının artmasına bağlanabilir. 1980–2022 periyodundaki yıllık ortalama temel su dengesi bileşenleri (su verimi, ET, yüzey akışı ve perkolasyon) ve havzadaki sediment verimi incelendiğinde en büyük değişikliğin yüzey akışlarında olduğu görülmektedir (**Şekil 4.13**). L2090-REF modelinden elde edilen yüzey akışı

referans modeli değerinden %65.29 daha fazladır. Bu sonuç, havzadaki yapay yüzey artışının doğrudan bir etkisidir. Artan yüzey akışlarının tersine perkolasyonda düşüş olmaktadır. L2090-REF modelinden elde edilen perkolasyon referans modeli değerinden %55.40 daha azdır. Yapay yüzeylerdeki artış toprağa sızan su miktarını düşürüp bu değişime sebep olmaktadır. Su verimi ve ET değerlerinde ise nispeten düşük değişimler gözlenmektedir (%2 mertebesinde). Öte yandan, AKAÖ durumundaki değişikliklere bağlı olarak havzadaki sediment veriminde artışlar öngörülmektedir. L2050-REF modeline göre havzadaki yıllık ortalama sediment verimi değeri %18.87 artmaktadır. Bu artış, L2070-REF modeline göre %30.19 ve L2090-REF modeline göre ise %37.74 olarak bulunmuştur. Gelecek yıllara ait model sonuçları referans dönemine kıyasla sediment yüklerinde artış olduğunu göstermektedir (**Şekil 4.12-b** ve **Tablo 4.12**). 2013–2022 yıllarındaki yıllık toplam sediment yükü değerine göre 2050 senesi AKAÖ tahmini ile oluşturulan modelde %72.77, 2070 modelinde %86.87 ve 2090 modelinde %97.86 artış gözlenmiştir. Sediment yüklerindeki bu yükseliş havzada artan yapay yüzeyler ile birlikte yüzey akışlarındaki yükseliş ile paraleldir. Bu bulgular, gelecekteki AKAÖ değişikliklerinin sadece yüzey akışı üzerinde değil, aynı zamanda sediment taşınımı ve erozyon süreçleri üzerinde de önemli etkiler yaratacağını göstermektedir.

Benzer AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin etkisi incelendiğinde, HadGEM2-ES hariç, gelecek periyotlarda yıllık ortalama akışların azalma trendinde olduğu görülmektedir (**Şekil 4.14**). Gelecek iklim projeksiyonlarına göre, her iki iklim senaryosunda da yıllık ortalama akış değerlerinde değişkenlikler gözlemlenmektedir. RCP 4.5 senaryosunda (**Şekil 4.14-a**), model medyanı görece daha dengeli bir seyir izlerken, GCM'ler arasında belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Özellikle 2040–2060 aralığında HadGEM2-ES ve MIROC gibi bazı GCM'lerde keskin sapmalar görülmüştür. RCP 8.5 senaryosunda ise (**Şekil 4.14-b**) hem ortalama akış düzeylerinde hem de model içi varyasyonda daha fazla belirsizlik gözlenmiştir. HadGEM2-ES RCP 8.5 için birçok yılda diğer GCM'lere kıyasla daha yüksek akış değerleri üretmesi dikkat çekicidir. Medyan değerleri her iki senaryoda da geçmiş dönem ortalamasına yakın seyretse de gelecekteki iklim koşullarının akış rejiminde düzensizlikler yaratabileceği ve taşkın riski ile kurak dönemlerin şiddetini artırabileceği görülmektedir. Benzer AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin etkisi incelendiğinde, gelecek periyotlarda yıllık toplam sediment yüklerinde artış olduğu görülmektedir (**Şekil 4.15**). RCP 4.5 senaryosunda (**Şekil 4.15-a**), referans dönemiyle kıyaslandığında gelecek projeksiyonlarında medyan sediment yüklerinde belirgin bir artış gözlenebilirken GCM'ler arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Özellikle

HadGEM2-ES RCP 4.5 birçok yılda yüksek sediment üretimi simüle ederek diğer GCM'lerden farklılık göstermektedir. Medyan değerler genellikle 4000–6000 ton/yıl aralığında seyretmekte olup, zaman içinde hafif dalgalanmalar göstermektedir. RCP 8.5 senaryosunda (**Şekil 4.15-b**) model varyasyonu daha belirgin olup, sediment yüklerinde yıllara bağlı olarak daha yüksek artışlar gözlenmektedir. HadGEM2-ES RCP 8.5 birçok yılda ekstrem değerlere ulaşarak 10000 ton'un üzerine çıkan sediment üretimi tahminleri sunmuştur. Medyan değerler, RCP 4.5 senaryosuna kıyasla daha yüksek düzeyde gerçekleşmiş ve iklim değişikliğinin sediment taşınımı üzerindeki etkisinin altını çizmiştir. Bu bulgular, artan sıcaklıklar ve değişen yağış rejimlerinin özellikle ekstrem hava olayları yoluyla erozyon ve sediment taşınımını şiddetlendirebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, iklim değişikliği senaryolarının sediment yönetim stratejilerine entegrasyonu, havza ölçeğinde sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. **Şekil 4.16**'daki grafikler incelendiğinde, RCP 4.5 senaryolarında genel olarak yağış miktarlarında sınırlı değişim gözlenirken, ET ve yüzey akışı bileşenlerinde periyotlar ilerledikçe artış eğilimi dikkat çekmektedir. Buna karşılık perkolasyon değerlerinde kademeli azalmalar yaşanmış, bu da yeraltı su beslenmesinin zayıflayabileceğine işaret etmektedir. Sediment verimi ise çoğu GCM'de, özellikle HadGEM2-ES ve MIROC için artış göstermiştir. RCP 8.5 senaryolarında ise hem yağış rejimindeki belirsizlik hem de sıcaklık artışına bağlı ET değerlerindeki yükseliş daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, yüzey akışının ve dolayısıyla sediment üretiminin daha yüksek seviyelere ulaşmasına neden olmuştur. Özellikle HadGEM2-ES ve MIROC modelleri, periyotlar ilerledikçe sediment veriminde artışlar göstermiştir. Bu artış, muhtemelen şiddetli yağış olaylarının ve yüzey akışının güçlenmesiyle ilişkilidir. Sonuç olarak, her iki senaryoda da gelecekteki iklim koşullarının su dengesi bileşenleri üzerinde önemli değişimlere yol açabileceği ve bu değişimlerin erozyon ile sediment taşınımı süreçlerini güçlendirebileceği görülmektedir. Özellikle yüksek emisyon senaryosu olan RCP 8.5, havza sediment veriminde belirgin artışlar öngörmekte olup, bu durum su yapıları ve barajların sürdürülebilir işletimi açısından riskler oluşturabilir. **Tablo 4.13**'e göre, 1980–2022 referans periyodunda yıllık ortalama akış değeri 1.54 m^3/s olarak hesaplanmıştır. Bu referans değere göre yapılan kıyaslama ile tüm GCM'lere ait üç farklı gelecek periyodunda, yalnızca HadGEM2-ES hariç, yıllık ortalama akış miktarlarında azalma söz konusudur. HadGEM2-ES modelinde RCP 4.5 iklim senaryosunda üç periyot için değişim oranları gözlendiğinde %22.73'e varan artış, RCP 8.5 iklim senaryosunda ise %24.68'e varan artış görülmektedir. Diğer GCM'lere ait tüm periyotlarda akışlarda düşüş hesaplanmıştır. En yüksek düşüş -%55.19 ile IPSL-CM5A-LR modelinin RCP 8.5 senaryosundaki üçüncü periyodunda

gözlenmiştir. GCM'lere ait medyan değerlere bakıldığında RCP 4.5 için birinci, ikinci ve üçüncü periyotta sırasıyla -%17.53, -%20.13 ve -%16.23; RCP 8.5 için ise -%18.18, -%25.32 ve -%33.12 değişim söz konusudur. Yıllık toplam sediment yükü ortalamaları ise GCM'ler ve periyotlar arasında farklılık göstermektedir (**Tablo 4.14**). 2013–2022 referans periyodunda yıllık toplam sediment yükü ortalaması 3202.9 ton olarak hesaplanmıştır. Bu referans değere göre yapılan kıyaslamalarda farklı GCM'ler ayrı iklim senaryolarında farklı sonuçlar vermiştir. RCP 4.5 iklim senaryosunda GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR ve NoerESM1-M modelleri birinci ve ikinci periyotta azalış gösterirken, HadGEM2-ES ve MIROC modelleri artış göstermektedir. RCP 4.5 senaryosunun üçüncü periyodunda ise tüm modellerde sediment yüklerinde artış vardır. RCP 8.5 iklim senaryosunda ise birinci ve ikinci periyotta GFDL-ESM2M ve IPSL-CM5A-LR modelleri azalış gösterirken, HadGEM2-ES, MIROC ve NoerESM1-M modelleri artış göstermektedir. RCP 8.5 senaryosunun üçüncü periyodunda ise GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve NoerESM1-M modelleri artış gösterirken, IPSL-CM5A-LR ve MIROC modelleri azalış göstermiştir. Tüm sonuçlarda HadGEM2-ES modelindeki %142.72'ye varan artış dikkat çekmektedir. GCM'lere ait medyan değerlere bakıldığında RCP4.5 için birinci, ikinci ve üçüncü periyotta sırasıyla -%12.20, -%4.66 ve +%4.00; RCP8.5 için ise +%2.06, +%5.16 ve -%1.35 değişim söz konusudur.

Değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin etkisi (kombine etki) incelendiğinde, gelecek periyotlarda yıllık ortalama akışların, özellikle RCP 8.5 senaryosunda, azalma trendinde olduğu görülmektedir (**Şekil 4.17**). RCP 4.5 senaryosu altında (**Şekil 4.17-a**), gelecekteki AKAÖ değişiklikleri ile birlikte akış değerlerinde referans dönemine kıyasla görece istikrarlı fakat dalgalı bir seyir gözlemlenmiştir. Bazı durumlarda, özellikle HadGEM2-ES RCP 4.5, belirli dönemlerde yüksek akış değerleri üretmiştir. Bununla birlikte, model medyanı çoğunlukla referans ortalamasına yakın seyretmiştir. RCP 8.5 senaryosu altında (**Şekil 4.17-b**), hem iklimsel etkiler hem de AKAÖ değişikliklerinin kombine etkisiyle akış rejimi daha dalgalı bir yapı sergilemiştir. Model içi varyasyonlar artmış, bazı yıllarda (özellikle HadGEM2-ES RCP 8.5) ekstrem akış değerlerine ulaşılmıştır. Medyan değerler, RCP 4.5 senaryosuna göre daha geniş bir aralıkta değişmiş ve iklim değişikliğinin artan etkisini yansıtmıştır. Değişen AKAÖ koşulları altında iklim değişikliğinin etkisi (kombine etki) incelendiğinde, gelecek periyotlarda yıllık toplam sediment yüklerinde genel olarak bir artış söz konusudur (**Şekil 4.18**). RCP 4.5 senaryosu altında (**Şekil 4.18-a**), referans dönemine kıyasla gelecekte sediment yüklerinde belirgin artış eğilimleri gözlemlenmiştir. HadGEM2-ES RCP 4.5 modelinin birçok

yılda öne çıkan yüksek değerleri, iklim modeline bağlı belirsizliklerin önemli düzeyde olduğunu göstermektedir. Medyan değerler 2030 sonrası dönemde 4000–8000 ton aralığında dalgalanarak, sediment taşınımının zamanla artabileceğini işaret etmektedir. RCP 8.5 senaryosunda (**Şekil 4.18-b**), artan emisyon seviyeleri ve şiddetlenen yağış rejimlerinin etkisiyle sediment yükü tahminleri daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. HadGEM2-ES RCP 8.5 ve IPSL-CM5A-LR RCP 8.5 modelleri birçok yılda 10000 ton'un üzerinde değerler üretmiş, bu durum özellikle yoğun yüzey akışlarının sediment taşınımını artırdığını düşündürmektedir. Medyan değerler de RCP 4.5'e göre daha yüksektir ve 2040 sonrası dönemde belirgin bir artış eğilimi sergilemektedir. **Şekil 4.19**'daki grafikler incelendiğinde, RCP 4.5 senaryolarında, geleceğe doğru yağış miktarlarında genel olarak sınırlı değişim görülmekte, buna karşın yüzey akışı ve akarsulara ulaşan toplam akış bileşenlerinde artış eğilimi gözlemlenmektedir. Perkolasyon ise neredeyse tüm modellerde zamanla azalma göstermektedir. Sediment veriminde özellikle HadGEM2-ES ve MIROC modellerinde belirgin artış eğilimleri görülmekte, bu durum yüzey akışındaki artışlarla paralellik göstermektedir. RCP 8.5 senaryolarında, artan sıcaklık ve buharlaşma ile birlikte ET değerleri daha yüksek seviyelere ulaşmakta, ancak şiddetli yağış olayları yüzey akışını artırarak sediment üretimini önemli ölçüde tetiklemektedir. Özellikle HadGEM2-ES, MIROC ve NorESM1-M modellerinde sediment veriminde üç dönem boyunca sürekli bir artış gözlenmektedir. Periyot 3'te neredeyse tüm modellerde sediment verimi referans değerlerin oldukça üzerine çıkmıştır. Bu grafikler hem AKAÖ değişikliklerinin hem de farklı iklim senaryolarının birlikte değerlendirilmesinin, havza ölçeğinde hidrolojik süreçleri ve sediment taşınımını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek emisyon senaryolarında (RCP 8.5), artan yüzey akışı ve azalan yeraltı su beslenmesiyle birlikte sediment verimindeki artışlar, baraj doluluk sürelerini kısaltabilecek ve erozyon risklerini artırabilecek düzeydedir. **Tablo 4.15**'e göre, 1980–2022 periyodundaki referans değere göre (1.54 m^3/s) yapılan kıyaslama ile tüm GCM'lere ait üç farklı gelecek periyodunda, HadGEM2-ES ve NoerESM1-M'in RCP 4.5 senaryosundaki üçüncü periyodu hariç, yıllık ortalama akış miktarlarında azalma söz konusudur. Akışlardaki düşüş oranı değişen AKAÖ koşullarının dahil edildiği durumlarda benzer AKAÖ koşullarının kullanıldığı durumlara göre daha az olmuştur. RCP 4.5 ve RCP 8.5 iklim senaryolarının her ikisinde de AKAÖ koşullarının değişimi akışların referansa göre düşüş oranını %5 mertebesinde azaltmıştır. HadGEM2-ES modelindeki artış oranları ise AKAÖ koşullarının değiştiği durumlarda daha fazla olmuştur. Benzer AKAÖ koşullarının kullanıldığı durumda, NoerESM1-M'in RCP 4.5 senaryosundaki üçüncü periyodunda akıştaki değişim %4.5 oranında

düşerken, değişen AKAÖ koşulu altında %1.4 artacağı beklenmektedir. HadGEM2-ES modelinde RCP 4.5 iklim senaryosunda üç periyot için değişim oranları gözlendiğinde %25.17'ye varan artış, RCP 8.5 iklim senaryosunda ise %28.48'e varan artış görülmektedir. En yüksek düşüş -%50.00 ile IPSL-CM5A-LR modelinin RCP8.5 senaryosundaki üçüncü periyodunda gözlenmiştir. Bu değer, benzer arazi kullanımı koşulları ile elde edilen sonuçtan (-%55.19) daha az düşüş olduğunu göstermektedir. GCM'lere ait medyan değerlere bakıldığında RCP 4.5 için birinci, ikinci ve üçüncü periyotta sırasıyla -%14.69, -%19.14 ve -%13.86; RCP 8.5 için ise -%16.28, -%23.58 ve -%32.26 değişim söz konusudur. Bu sonuçlar, modellerde iklim değişikliğinin akışlar üzerindeki etkilerinin incelenmesinde AKAÖ değişikliğinin de hesaba katıldığı kombine durumlardaki farklılığa işaret etmektedir. Yıllık toplam sediment yükü ortalamaları ise GCM'ler ve periyotlar arasında farklılık göstermektedir (**Tablo 4.16**). 2013–2022 periyodundaki referans değere göre (3202.9 ton) yapılan kıyaslamalarda tüm GCM'ler RCP 4.5 ve RCP 8.5 iklim senaryolarında değişen AKAÖ koşulları altında istisnasız artış göstermektedir. En yüksek artış oranı HadGEM2-ES modelinde RCP 8.5 senaryosunun üçüncü periyodunda %200.4 iken, en düşük artış oranı IPSL-CM5A-LR modelinin RCP 8.5 senaryosundaki ikinci periyodunda %2.1 değerindedir. Bu sonuçlar, gelecekteki AKAÖ değişiminin sediment yükleri üzerindeki etkisinin iklim değişimi senaryolarına göre daha hassas olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.20 ve **Şekil 4.21**'deki akışlar ve sediment yüklerindeki değişimler incelendiğinde, **akış değerleri açısından, iklim değişikliği baskın etkendir; AKAÖ değişikliğinin eklenmesiyle oluşan fark sınırlı ve kısmi kalmaktadır**. **Sediment yükleri açısından, AKAÖ değişikliği çok daha belirleyici bir etkendir**. **İklim değişikliği etkisini artırsa da temel tetikleyici arazi örtüsündeki bozulmadır**. **Modelleme sonuçları, iklim değişikliğinin akış miktarları üzerinde AKAÖ değişikliğine kıyasla daha baskın bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır**. Buna karşılık, **sediment yükleri açısından AKAÖ değişikliği daha etkili bir faktör olmuştur**. Bitki örtüsünün kaybı, artan yapılaşma ve bozulmuş eğimli yüzeyler, erozyon süreçlerini hızlandırmakta ve sediment taşınımını iklimsel değişimlere kıyasla çok daha güçlü biçimde tetiklemektedir.

5. TARTIŞMA

Modelleme yaklaşımları ve bu süreçlerde yararlanılan veri setleri, beraberinde belirli düzeyde belirsizlikler ve varsayımsal kabuller getirmektedir (**Abbaspour, 2022**; **Gupta ve Govindaraju, 2023**). Model, kalibrasyon ve validasyon aşamalarında genel olarak güvenilir sonuçlar üretmiş olsa da saha gözlemlerine dayalı sınırlı veri seti nedeniyle bazı performans kısıtları mevcuttur (**Blöschl ve Sivapalan, 1995**; **Kirchner, 2006**). Girdi verilerinin temsiliyetinden, model parametrelerinin genellenebilirliğine ve senaryolarda öngörülen eğilimlerin gerçekleşme olasılığına kadar uzanan bu belirsizlikler, sonuçların yorumlanmasında dikkatli olunmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte, tüm bu sınırlılıklara rağmen, modellerin sağladığı bütüncül bakış açısı ve senaryolar arası karşılaştırma imkânı, çalışmanın genel bulgularını anlamlı ve uygulanabilir kılmaktadır.

SWAT modelinin güvenilirliği büyük ölçüde, model parametrelerinin en uygun değerlerle kalibre edilmesine ve modelin bu optimizasyon sürecindeki hassasiyetine bağlıdır (**Van Griensven ve diğ., 2006**). Bunun yanı sıra, modelin kurulmasında kullanılan girdi verileri (örneğin, mekânsal veriler, meteorolojik gözlemler) ile kalibrasyon ve doğrulama aşamalarında yararlanılan akış ve sediment gözlem verileri, çeşitli işleme ve ölçüm hataları içerebilir. Özellikle saha ölçümleri ve laboratuvar analizleri sırasında karşılaşılabilecek sistematik veya rastgele hatalar, model çıktılarının doğruluğunu etkileyebilir. Nitekim, bu çalışmada gerçekleştirilen saha tabanlı ek validasyon denemelerinde modelin her durumda yeterli doğrulukta sonuç verememesi, söz konusu hata kaynaklarının etkisini ortaya koymaktadır. Bu durum, modelleme çalışmalarında belirsizlik analizlerinin ve veri kalitesinin ne denli kritik olduğunu bir kez daha göstermektedir.

AKAÖ değişimi çalışmalarında farklı geçmiş tarihli haritalar seçilerek geleceğe yönelik tahminler bu haritalar arasındaki değişim potansiyeline göre gerçekleştirilmektedir. Gelecek tahminlerinden önce, geçmiş tarihli haritalar mevcut tarihe ait AKAÖ durumunu simüle etmek için kullanılır ve gözlenen mevcut durum ile doğrulanır. Haritalar arasındaki zaman aralıklarının seçimi, özellikle kentsel büyüme simülasyonlarında, model performansı ve sonuçların tutarlılığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (**Chen ve Pontius, 2010**). Kentsel genişlemenin doğru tahmini ise, kentleşmenin karmaşıklığından dolayı oldukça zordur ve mekansal değişkenler, arazi kullanım talebi ile kentsel planlama gibi unsurlara bağlıdır (**He ve diğ., 2008**). Modellerde daha kaba bir zaman ölçeğinin kullanılması, AKAÖ değişimini düzgün

bir şekilde anlamada başarısız olabilir ve model performansını engelleyebilir (**Álvarez-Martínez ve diğ., 2011**); bu nedenle gelecekteki AKAÖ değişimiyle ilgili çoğu çalışmada kısa ve orta vadeli tarihsel zaman ölçekleri (5–15 yıl) kullanılır. Kentsel AKAÖ değişimi modellemesiyle ilgili birçok çalışmada, daha iyi tahmin sağlayan kısa veya orta vadeli ölçekler kullanmıştır (**Li and Yeh, 2002**; **He ve diğ., 2006**; **Sang ve diğ., 2011**; **Ahmed ve Ahmed, 2012**). Zamansal fark, kentsel büyümenin araştırıldığı çalışmalarda, genelde kısa vadeli seçilmiştir. **Chaudhuri ve Clarke (2013)**, çalışmalarındaki kentsel alanı 1985 ve 2004 yılları arasında ve bu dönemden farklı olarak nispeten daha kısa olan 2005–2010 dönemi için modellemiştir. **Roy ve diğ. (2014)** tarafından yapılan bir başka çalışmada, kentsel bir bölgedeki AKAÖ değişim tahminleri kısa, orta ve uzun vade zamansal ölçeklerinde gerçekleştirerek model başarısı karşılaştırılmıştır. Her iki çalışmada da tahmin süresi kısaldıkça tahmin doğruluğunun yanı sıra kentsel büyüme şeklindeki tutarlılığın arttığı ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasında incelenen Alibeyköy Havzası sınırları içerisinde tarihsel süreç itibariyle AKAÖ sınıfları arasında hızlı ve dağınık bir dönüşüm söz konusudur. Havzada mekânsal konumu hızlı değişkenlik gösteren açık ocak madencilik faaliyetleri ve bu maden sahalarındaki göletler bulunmaktadır. Bu alanların havza içerisinde yıldan yıla sürekli yer değiştirdiği, maden göletlerinin kuruyup başka bir bölgeye taşınan maden sahasına bağlı olarak tekrar ortaya çıktığı gözlenmiştir. Ayrıca, 2018 yılında kullanıma açılan havalimanı ve buna bağlı ek yapıların inşaatının devam etmesi ve havalimanı bağlantı yolları ile havza sınırları içerisindeki AKAÖ sınıflarının yapılaşmış alanlara doğru hızlı ve dinamik bir dönüşüm içerisinde olduğu gözlenmiştir (**Peker ve Gülbaz, 2025**). Bu dönüşümün bir diğer etkisi, havalimanı inşaatının ardından bölgede artan cazibenin kentsel büyüme üzerinde önemli bir etkisi olarak görülmektedir. Model, tarihsel eğilimlere dayandığı için dağınık maden sahalarındaki hızlı mekansal değişimi ve havalimanının yapılaşmış alanlara olan ani etkisini tahmin etmekte zorlanmaktadır. 1990, 2000 ve 2010 yıllarına ait AKAÖ verileri kullanılarak gerçekleştirilen ilk çalıştırmalarda modellerde sonuçlar, geleceğe yönelik tahminlerin kabul edilebilir olmadığını göstermiştir. Tez çalışmasının bu aşamasında, daha makul ve kabul edilebilir gelecek simülasyonları için AKAÖ değişim tahminlerinde kullanılan verilere ait zaman aralıklarının seçimi yeniden değerlendirilmiştir. Havalimanı inşaatının ani etkisi ile hızlı AKAÖ dönüşümünü daha iyi temsil edebilmek ve maden sahalarındaki hızlı mekansal değişimin tutarsız etkilerini önleyebilmek amacıyla kullanılan AKAÖ verileri farklı kaynaklı ve farklı periyotlar için yeniden elde edilmiştir. Landsat uydu ürünlerinden üretilen AKAÖ verileri yerine Esri AKAÖ verileri tercih edilmiştir. Bu veri seti içerisinden 2019, 2021 ve 2023

yıllarına ait veriler kullanılmıştır. Bu yılların tercih edilme sebebi havzada inşa edilen havalimanının 2018 senesinde tamamlanmış olması ve seçilen yılların, bu duruma bağlı artışın başladığı dönemi temsil etmesidir. Özetle, bu tez çalışmasında Landsat verileri yerine Esri verilerinin tercih edilmesindeki nedenler şu şekilde sıralanmıştır: (1) 10'ar yıl arayla elde edilen Landsat verilerinin havzadaki ani havalimanı inşaatı ve hızlı mekânsal değişiklik gösteren maden sahalarını doğru şekilde yansıtamaması, (2) Esri verilerinin 2019 sonrası dönemi kapsaması, böylece havalimanı inşaatı sonrası dönüşümlere odaklanılabilmesi, (3) 2'şer yıl arayla elde edilen 2019, 2021 ve 2023 yıllarına ait Esri verileriyle daha kısa dönemli değişim periyotlarının kullanılarak maden sahalarındaki hızlı mekansal değişikliklerin daha doğru şekilde izlenebilmesi, (4) Esri verilerinin daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olması, bu sayede AKAÖ sınıflarının daha ayrıntılı belirlenebilmesi.

Bu tezde Alibeyköy Havzası özelinde yapılan analizler, küresel ölçekte raporlanan eğilimlerle uyumlu biçimde, insan kaynaklı AKAÖ değişikliklerinin ve artan sıcaklıklarla şekillenen iklim koşullarının havza hidrolojisini ve sediment dinamiklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Literatürde benzer şekilde, kentleşmenin yüzey akışlarını artırarak erozyonu hızlandırdığı sıklıkla rapor edilmiştir (**Chen ve diğ., 2017**; **MacKenzie ve diğ., 2022**). Bu çalışmada ulaşılan bulgular, özellikle Alibeyköy Havzası'nın kuzeyinde inşa edilen havalimanının alt havza ölçeğinde yüzey akışı ve sediment yüklerini belirgin biçimde artırmasıyla bu genel eğilimleri doğrulamaktadır.

Sediment birikiminin Alibey Barajı'nda uzun vadede artış göstermesi, baraj performansını sürdürülebilir kılmak açısından kritik bir bulgudur. Sonuçlara göre, gelecekteki AKAÖ senaryoları, zamanla sediment birikiminde sistematik bir artışa ve buna bağlı olarak ölü depolama kaybının yaşanacağına işaret etmektedir. Bu eğilim, doğal arazi örtüsünün kentsel alanlara dönüşmesiyle yakından bağlantılıdır. **Serengil ve diğ. (2012)**, Alibeyköy Havzası'nın yüksek seviyelerde toplam askıda katı madde sergilediğini bildirmiştir. İstanbul Havalimanı'nın inşasını takiben, sediment yüklerinin daha da artması ve yüzey akışında bir artışın eşlik etmesi beklenmektedir (**Peker ve Gülbaz, 2025**). Yıllık artış göreceli olarak küçük olsa da (36 milyon m³'lük bir rezervuarın %0,00881'i), tahmini 2.729,85–3.172,41 m³/yıl birikimi 30 yıl boyunca ~82.000-95.000 m³'e denk gelmektedir; bu da birçok küçük ve orta ölçekli rezervuarın başlangıçtaki ölü depolama kapasitesine benzemektedir. Çalışma, kısa ve orta vadede rezervuar hacmi açısından ciddi bir tehdit öngörmemekle birlikte uzun vadeli sedimentasyonun barajın ölü hacmi üzerinde yapısal kısıtlar yaratabileceğini ortaya

koymaktadır. Bu durum, baraj yönetiminde periyodik izleme ve sediment kontrol stratejilerinin uygulanmasının gerekliliğine işaret etmektedir. Bu nedenle, zamanında bakım ve risk bilincine sahip operasyonlara rehberlik etmek için periyodik batimetrik araştırmalar, öncelikli bölgelerde morfodinamik değerlendirmeler ve giriş/çıkış yapılarının rutin denetimleri önerilmektedir.

Analizlerin önemli bir çıktısı da gelecekteki akış azalmasının esas olarak iklim değişikliğinden, sediment yüklerindeki artışın ise AKAÖ değişikliğinden kaynaklanacağıdır. Bu sonuç, havza yönetiminde tekil faktörlere odaklanmanın yetersiz kalacağını ve iklim ile AKAÖ değişimlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Metodolojik açıdan değerlendirildiğinde, MLP-MC hibrit makine öğrenmesi yöntemi ile SWAT modelinin entegre biçimde kullanılması bu tez çalışmasının güçlü yönlerinden biridir. AKAÖ projeksiyonlarının makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlarla tahmin edilmesi, SWAT gibi süreç tabanlı hidrolojik modellerin çıktılarının daha gerçekçi senaryolarla beslenmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, kullanılan küresel iklim modelleri (GCM) sayısının sınırlı olması sonuçların genelleştirilebilirliği açısından bir sınırlılık oluşturmaktadır. Gelecek çalışmalarda daha geniş ensemble yaklaşımlarının kullanılması, farklı iklim senaryoları altında belirsizliklerin daha kapsamlı değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, çalışmada akış ve sediment yüklerine odaklanılmış olup, su kalitesi parametrelerinin (azot, fosfor, ağır metaller vb.) modele entegre edilmesi, daha bütüncül bir değerlendirme olanağı sunacaktır.

Uygulama ve yönetim boyutunda, çalışma bulguları bir dizi öneri geliştirmeyi mümkün kılmıştır. Özellikle, havza ölçeğinde bütüncül arazi kullanım planlamasının benimsenmesi, doğa temelli çözümlerin yaygınlaştırılması, su hasadı ve yeraltı suyu besleme gibi iklim uyumlu stratejilerin teşvik edilmesi, Alibeyköy Havzası gibi hızlı kentleşme baskısı altındaki bölgeler için kritik önemdedir. Ayrıca, SWAT ve MLP-MC tabanlı senaryo analizlerinin yerel yönetimlerin karar destek sistemlerine entegre edilmesi, havza bazlı yönetim politikalarının daha sağlam temellere oturtulmasına katkı sunacaktır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

21. yüzyılın en önemli araştırma konuları arasında yer alan insan kaynaklı etkiler ile değişen arazi kullanımı/arazi örtüsü (AKAÖ) koşulları ve artan sıcaklıklar ile birlikte değişen iklim koşulları su havzalarını etkileyen başlıca faktörlerdir. Bu tez çalışması, söz konusu değişikliklerden büyük ölçüde etkilenen Alibeyköy Havzası'na odaklanmaktadır. Analizler genel olarak şu soruya cevap arar niteliktedir: Alibeyköy Havzası'nda arazi kullanımı/arazi örtüsü (AKAÖ) ve iklim değişikliği gelecek yıllarda havza hidrolojisini ve sediment yüklerini nasıl etkileyecektir? Bu araştırma sorusunu cevaplayabilmek için üç ana alt başlıkta yapılan değerlendirmeler sonucu şu bulgulara erişilmiştir:

- Alibeyköy Havzası sınırları içerisinde inşa edilen havalimanı yüzey akışlarını ve buna bağlı olarak erozyon miktarını ve sediment yüklerini artırmıştır. Bu etki bölgesel olarak (alt havza ölçeğinde) daha net gözlenmektedir.

- Alibey Barajı'nda sediment birikiminin uzun vadede ölü hacimde artış eğilimi göstermekte ve bu birikimin barajın genel performansı üzerinde yapısal etkiler yaratma potanseline sahip olmasına karşın, kısa ve orta vadede toplam rezervuar hacmine kıyasla ciddi bir tehdit oluşturmayacağını ortaya koymaktadır.

- Gelecek yıllarda havzadaki toplam ortalama akışlar azalacaktır ve iklim değişikliği bu etkide AKAÖ değişikliğine kıyasla daha baskındır. Sediment yükleri ise artacaktır ve AKAÖ değişikliği bu etkide iklim değişikliğinden daha ciddi bir tetikleyicidir.

Bu sonuçların elde edilmesinde, iki farklı modelleme yaklaşımının entegre bir şekilde kullanılması belirleyici rol oynamıştır. Geleceğe yönelik AKAÖ projeksiyonları, MLP-MC hibrit makine öğrenmesi yöntemiyle başarılı bir şekilde tahmin edilirken; havza hidrolojisi ve sediment dinamikleri, SWAT modeli aracılığıyla kapsamlı biçimde simüle edilmiştir. Bu iki yöntemin birbirini tamamlayan yapısı, hem mekânsal hem de zamansal değişimleri hassasiyetle değerlendirme imkânı sunmuştur. Bu tez kapsamında elde edilen çıktılar, MLP-MC ve SWAT modellerinin birlikte kullanımının, sürdürülebilir havza yönetimi ve iklim uyumlu planlama çalışmalarında ne denli etkili ve uygulanabilir araçlar olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasındaki analizlerde beş farklı küresel iklim modeli (GCM) kullanıldı. İklim değişikliği ile ilgili çalışmalarda, daha fazla sayıda GCM ile gerçekleştirilen ensemble

yaklaşımlar model sonuçlarındaki belirsizliği azaltmada etkili olacaktır. AKAÖ değişiklikleri için ise birtakım kısıtlamalar altında makine öğrenmesi temelli MLP-MC hibrit yöntemi uygulanmıştır. AKAÖ durumundaki değişiklikleri geleceğe yönelik tahminleyebilmek sürdürülebilir havza yönetimi açısından ileriye yönelik planlamalar yapılmasında kritiktir. AKAÖ değişimini modelleyebilen makine öğrenmesi temelli yaklaşımların geliştirilmesi bu kapsamda faydalı olacaktır. Böylece, yalnızca iklim değişikliğinin tekil etkisi değil bununla birlikte AKAÖ değişikliği etkilerinin de hesaba katılması geleceğe yönelik planlamalarda daha güvenilir bir bakış açısı sunacaktır.

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular doğrultusunda, Alibeyköy Havzası gibi hızlı kentleşme ve iklim değişikliği baskısı altındaki alanlarda sürdürülebilir havza yönetiminin sağlanabilmesi için bir dizi öneri geliştirilmiştir. Öncelikle, havza ölçeğinde bütüncül bir arazi kullanım planlaması benimsenmelidir. Özellikle erozyona hassas alanlar, dere kenarları ve içme suyu koruma bölgeleri gibi yapılaşmaya kapalı alanlarda ekosistem hizmetlerini destekleyecek koruma kullanımı tercih edilmelidir. Altyapı projeleri hayata geçirilmeden önce, yalnızca proje alanı değil, projenin havza ölçeğinde yaratacağı hidrolojik etkiler de göz önünde bulundurularak kümülatif etki analizleri yapılmalıdır. İkinci olarak, yüzey akışlarını ve sediment taşınımını azaltacak doğa temelli çözümler (Nature-based Solutions, NBS) desteklenmelidir. Geçirimsiz yüzeylerin yaygınlaştığı bölgelerde yağmur bahçeleri, geçirgen zemin uygulamaları, yeşil çatı sistemleri ve bio-sızdırma hendekleri gibi yeşil altyapı çözümlerinin yaygınlaştırılması önerilmektedir. Ayrıca, eğimli ve çıplak toprak alanlarda erozyon kontrolünü sağlamak amacıyla ormanlaştırma, bitki örtüsü rehabilitasyonu ve tampon kuşakların oluşturulması etkili olacaktır. Üçüncü olarak, iklim değişikliğine uyumlu yönetim stratejileri geliştirilmelidir. Bu bağlamda, azalan yüzey akışlarını dengelemek ve su arz güvenliğini artırmak amacıyla su hasadı sistemleri, küçük ölçekli göletler ve yeraltı suyu besleme uygulamaları teşvik edilmelidir. Yönetim planlarının geliştirilmesinde, farklı iklim senaryolarını içeren esnek ve uyarlanabilir yaklaşımlar benimsenmeli; belirsizlikler göz önüne alınarak alternatif senaryolarla dayanıklılık analizleri yapılmalıdır. Dördüncü olarak, bu tezde kullanılan SWAT ve MLP-MC gibi modelleme araçlarının karar verme süreçlerine entegre edilmesi önerilmektedir. Özellikle yerel yönetimler ve planlama birimleri için model tabanlı karar destek sistemleri geliştirilmeli; mekânsal-zamansal değişimleri değerlendiren senaryo analizleri, havza yönetim stratejilerine yön vermelidir. Çalışmada sunulan entegre yöntem farklı havzalarda uygulanarak iklim değişikliğinin farklı bölgesel etkileri ve farklı AKAÖ

değişikliği dinamikleri analiz edilebilir. Bölgesel olarak farklılık gösteren dinamiklere sahip farklı havzalara özgü yönetim stratejileri bu tez çalışmasındaki benzer metodolojinin geliştirilerek daha ileri görütülmesinde faydalı olacaktır. Ayrıca, model çıktıları olarak akış ve sediment yüklerinin yanı sıra azot, fosfor veya ağır metal gibi su kalitesi parametrelerinin incelenmesi bu metodolojiye dayandırılarak gerçekleştirilebilir. Son olarak, sürdürülebilir yönetimin temel bileşenlerinden biri olan izleme ve katılımcı yönetişim süreçleri güçlendirilmelidir. Havza genelinde uzun dönemli sediment ve su kalitesi izleme sistemleri kurulmalı veya olan sistemler korunmalıdır. Aynı zamanda yerel halk, çiftçiler, Sivil Toplum Kuruluşları (STK) ve kamu kurumları gibi tüm paydaşların sürece aktif katılımı sağlanmalıdır. Eğitim, bilgilendirme ve farkındalık artırıcı çalışmalar ile yerel kapasite güçlendirilmeli ve havza yönetimine ilişkin kararlar çok paydaşlı bir platformda alınmalıdır.

Bu tez çalışması, Alibeyköy Havzası'nda hızlı kentleşme ve iklim değişikliğinin birleşik etkilerini bütüncül bir metodolojiyle inceleyerek, hem bilimsel literatüre hem de sürdürülebilir havza yönetimi uygulamalarına özgün katkılar sağlamayı hedeflenmiştir. Bulgular, yalnızca Alibeyköy Havzası için değil, benzer dinamiklere sahip diğer kentleşen havzalar için de yol gösterici niteliktedir.

KAYNAKLAR

Abbaspour, K.C., **2022**, The fallacy in the use of the "best-fit" solution in hydrologic modeling. *The Science of the Total Environment*, 802, 149713. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149713

Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S. and Yang, H., **2009**, Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. Water Resources Research, 45(10), W10434. https://doi.org/10.1029/2008wr007615

Abbass, K., Qasim, M.Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H. and Younis, I., **2022**, A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6

Abburu, S. and **Golla**, S.B., **2015**, Satellite Image Classification Methods and Techniques: A review. *International Journal of Computer Applications*, 119(8), 20–25. https://doi.org/10.5120/21088-3779

Abdi, B.S., **2015**, *Simulation Future Urban Growth in the City of Bursa, Turkey using SLEUTH Model*. M.Sc. Thesis, Kahramanmaras Sutcu Imam University Institute of Science and Technology.

Agarwal, C., Green, G.M., Grove, J.M., Evans, T.P. and Schweik, C.M., **2002**, *A Review and Assessment of Land-Use Change Models: Dynamics of Space, Time, and Human Choice*. General Technical Report NE-297. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, Newtown Square, 61. https://doi.org/10.2737/NE-GTR-297

Aguejdad, R., Houet, T. and Hubert-Moy, L., **2017**, Spatial validation of land use change models using multiple assessment techniques: A case study of transition potential models. *Environmental Modeling & Assessment*, 22(6), 591–606. https://doi.org/10.1007/s10666-017-9564-4

Ağaçsapan, B., **2021**, *İklim Değişiklikleri ve Arazi Örtüsü Değişiminin Hidrolojik Parametrelere Etkisinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Destekli Analizi: Porsuk Havzası Örneklemi*. Doktora Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Ahi, S., **2021**, *Uzaktan Algılama ve CBS Kullanılarak Arazi Kullanımının Su Havzalarına Olan Etkilerinin İncelenmesi: İstanbul İli – Terkos ve Alibeyköy Havza Örnekleri.* Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi.

Ahmed, B. and **Ahmed**, R., **2012**, Modeling urban land cover growth dynamics using Multi-Temporal satellite images: a case study of Dhaka, Bangladesh. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(1), 3–31. https://doi.org/10.3390/ijgi1010003

Akbaş, A. and **Özdemir**, H., **2022**, Tüm Modeller Yanlıştır, Ancak Bazıları Faydalıdır: Akım Gözlem İstasyonu Bulunmayan Havzalarda Düşük (Kurak) ve Yüksek (Taşkın) Akım Davranışlarının Belirlenmesi. *Coğrafya Dergisi/Journal of Geography*, 0(45), 33–46. https://doi.org/10.26650/jgeog2022-1075304

Akdoğan, Z. and Güven B., **2016**, Assessing the sensitivity of SWMM to variations in hydrological and hydraulic parameters: a case study for the city of Istanbul, *Global NEST Journal*, 18(4), 831–841.

Aksoy, H. and **Kaptan**, S., **2020**, Simulation of future forest and land use/cover changes (2019–2039) using the cellular automata-Markov model. *Geocarto International*, 37(4), 1183–1202. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1778102

Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A. and Zghibi, A., **2022**, A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management*, *326*, 116799. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799

Altürk, B., **2017**, *Arazi Kullanim/Arazi Örtüsü Değişikliğinin ve Su Kaynaklarina Etkisinin Belirlenmesi: Ergene Havzasi Örneği*. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Álvarez-Martínez, J., Suárez-Seoane, S. and De Luis Calabuig, E., **2011**, Modelling the risk of land cover change from environmental and socio-economic drivers in heterogeneous

and changing landscapes: The role of uncertainty. *Landscape and Urban Planning*, 101(2), 108–119. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.009

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Allen, P.M., **1999**, Contınental Scale Simulation of the Hydrologic Balance. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(5), 1037–1051. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb04192.x

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R., **1998**, Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34 (1), 73–89.

Asia Air Survey Co., Ltd. (**n.d.**). *MOLUSCE: Modules for Land Use Change Evaluation*. https://github.com/nextgis/qgis_molusce/tree/master/src/molusce/doc/en

Asselman, N., **2000**, Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234(3–4), 228–248. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00253-5

Atak, B.K., **2013**, *Didim Yarımadası Örneğinde SLEUTH Mdoeli Kullanılarak Alan Kullanım Senaryolarının Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Avci, C., Budak, M., Yağmur, N. and Balçik, F., **2021**, Comparison between random forest and support vector machine algorithms for LULC classification. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(1), 1–10. https://doi.org/10.26833/ijeg.987605

Aytaç, E., **2022**, Modeling future impacts on land cover of rapid expansion of hazelnut orchards: a case study on Samsun, Turkey. *European Journal of Sustainable Development Research*, 6(4), em0193. https://doi.org/10.21601/ejosdr/12167

Bakırcı, M., **2022**, *Taşkın Analizinde Kentleşme Etkisinin İncelenmesi: Alibeyköy Havzası Örneği.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Bayazıt, M., **1995**, *Hidroloji*. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Bayraktar, S., Cegielska, K., Sökmen, E.D., Noszczyk, T., Yener, Ş.D. and Kukulska-Kozieł, A., **2024**, Directions of land degradation in the greater Istanbul metropolitan area: A

view from four decades. *Land Degradation and Development*, 35(5), 1656–1672. https://doi.org/10.1002/ldr.5012

Beven, K.J. and **Binley**, A., **1992**, The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrology Processes*, 6, 279-298. https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305

Beven, K.J., Kirkby, M.J., Freer, J.E. and Lamb, R., 2021, A history of TOPMODEL. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 527–549. https://doi.org/10.5194/hess-25-527-2021

Bhandari, A., Kumar, A. and Singh, G., **2012**, Feature Extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A Case Study of Jabalpur City. *Procedia Technology*, 6, 612–621. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.10.074

Bhatta, B., **2010**, *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data*. In Advances in geographic information science. Berlin, Germany:Springer-Verlag, 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05299-6

Bilotta, G. and Brazier, R., **2008**, Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*, 42(12), 2849–2861. https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018

Blöschl, G. and **Sivapalan**, M., **1995**, Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes*, 9(3–4), 251–290. https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305

Blöschl, G., Bierkens, M.F., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J. W., McDonnell, J.J., Savenije, H.H., Sivapalan, M., Stumpp, C., Toth, E., Volpi, E., Carr, G., Lupton, C., Salinas, J., Széles, B., Viglione, A., Aksoy, H., . . . Zhang, Y., **2019**, Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10), 1141–1158. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507

Bonumá, N.B., Rossi, C.G., Arnold, J.G., Reichert, J.M., Minella, J.P., Allen, P.M. and Volk, M., **2012**, Simulating landscape sediment transport capacity by using a modified SWAT

model. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 55–66. https://doi.org/10.2134/jeq2012.0217

Box, G.E., **1979**, Robustness in the strategy of scientific model building. *In Robustness in statistics* (pp. 201-236). Academic Press.

Boyacioglu, H., Gunacti, M.C., Barbaros, F., Gul, A., Gul, G.O., Ozturk, T. and Kurnaz, M.L., **2024**, Impact of climate change and land cover dynamics on nitrate transport to surface waters. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(3). https://doi.org/10.1007/s10661-024-12402-x

Burgess, E., **1925**, *The Growth of the City: An Introduction to a Research Project*. In: Park, R.E., Burgers, E.W. and McKenzie, R.D., Eds., The City, University of Chicago Press, Chicago.

Burnash, R.J.C., **1995**, The NWS river forecast system-catchmentmodeling. In: Singh, V.J., (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology, *Water Resources Publication*, HighlandsRanch, Colorado, pp. 311–366.

Canpolat, F.A. and **Dağlı**, D., **2020**, Elazığ İli'nde Arazi Kullanımı Değişimi (2006–2018) ve Simülasyonu (2030). *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*, *42*, 702–723. https://doi.org/10.32003/igge.746668

Canpolat, F.A. ve **Dağlı**, D., **2021**, *Türkiye'de arazi kullanımının değişimi (1990–2018) ve simülasyonu (2030)*. Coğrafya Araştırmalarında Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları II (ss. 87–117). Pegem Akademi Yayıncılık.

Chaudhuri, G. and **Clarke**, K.C., **2013**, Temporal Accuracy in Urban Growth Forecasting: A study using the SLEUTH model. *Transactions in GIS*, 18(2), 302–320. https://doi.org/10.1111/tgis.12047

Chen, H. and **Pontius**, R.G., **2010**, Diagnostic tools to evaluate a spatial land change projection along a gradient of an explanatory variable. *Landscape Ecology*, 25(9), 1319–1331. https://doi.org/10.1007/s10980-010-9519-5

Chen, J., Theller, L., Gitau, M.W., Engel, B.A. and Harbor, J.M., **2017**, Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States. *Journal of Environmental Management*, 187, 470–481. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.017

Chotpantarat, S. and **Boonkaewwan**, S., **2018**, Impacts of land-use changes on watershed discharge and water quality in a large intensive agricultural area in Thailand, *Hydrological Sciences Journal*, 63(9), 1386–1407. https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1506128

Christaller, W., **1966**, *Central Places in Southern Germany*, Translated by Carlisle W. Baskin. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 130 p.

Clarke, K.C., Hoppen, S., and Gaydos, L.J., **1996**, Methods and Techniques for Rigorous Calibration of a Cellular Automaton Model of Urban Growth. *Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, pages 21–25.

Cui, Y., Wu, C., Niu, G. and Huang, G., **2025**, Water yield service flow assessment under future SSP-RCP scenarios in the Yellow River Basin: Coupled effect of climate and land use change. *Journal of Hydrology*, 662, 133852. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133852

Cüceloğlu, G., **2019**, *İklim değişikliğinin İstanbul'un yüzeysel su kaynaklarına etkisi ve kuraklık dirençli bütünleşik su yönetimi*, Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çağlıyan, A. and **Dağlı**, D., **2022**, Monitoring land use land cover changes and modelling of urban growth using a Future Land Use Simulation Model (FLUS) in Diyarbakır, Turkey. *Sustainability*, *14*(15), 9180. https://doi.org/10.3390/su14159180

Çapan, H., **2019**, *Evaluation of Growth Trends by using SLEUTH Model: A Case Study in Adana*. M.Sc. Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences.

Çelik, H., Şengönül, K., Akyüz, F., Altunel, O., Dağcı, M. ve Esin, A.İ., **2012**, İstanbul'un İçme Suyu Barajlarının Sedimantasyon Problemi ve Çözüm Önerileri: Alibey Barajı Örneği.

Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University, 62(2), 113–127. https://doi.org/10.17099/jffiu.93356

Çokoyoğlu, S., **2008**, *Alibey ve Kağıthane Havzalarında Arazi Kullanımı ve Sorunlarının 50 Yıllık Değişimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dervisoglu, A., Yagmur, N. and Sariyilmaz, F.B., **2024**, A comprehensive research on open surface drinking water resources in Istanbul using remote sensing technologies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(4). https://doi.org/10.1007/s10661-024-12496-3

Devi, G.K., Ganasri, B. and Dwarakish, G., **2015**, A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126

Dikici, M. ve Kazezyılmaz-Alhan, C.M., **2018**, Alibeyköy havzası için farklı hidrolojik modelleme yöntemleri ile taşkın debilerinin belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9(2), 919–928.

Dikici, M., **2016**, *Alibeyköy Havzası'nın Hidrodinamik Modeli ve Kentleşme Süreci Çerçevesinde Taşkın Risk Haritalarının Çıkarılması*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dikici, M., Kazezyılmaz-Alhan, C.M. and Gülbaz, S., **2022**, Flood hazard assessment for Alibeyköy watershed in Istanbul with MIKE NAM and MIKE 21. *Environmental Engineering and Management Journal*, 21(3), 399–411.

Dikici, M., Kazezyılmaz-Alhan, C.M. ve Önöz, B., **2023**, The Best Fit Flood Probability Distribution for Alibeyköy Basin in İstanbul, Türkiye. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 40-51. https://doi.org/10.46740/alku.1323214

Dogan, F.N. and **Karpuzcu**, M.E., **2021**, Effect of land use change on hydrology of forested watersheds. *Ecohydrology*, 15(1). https://doi.org/10.1002/eco.2367

DSİ, **2018**, *DSİ 2018 Yılı Faaliyet Raporu*. Ankara: Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.

Eastman, J.R., **2012**, *IDRISI Selva*. Clark University Worcester, MA.

Eastman, J.R., **2015**, *Terrset Geospatial Monitoring and Modeling System Manual*, Clark Labs, Clark University.

Erdoğan, N., **2011**, *İzmir İli Örneğinde Peyzaj Değişim Senaryolarına Yönelik Modelleme Yaklaşımı: CLUE-s*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

European Commission, **2020**, LUCAS - Land use and coverage area frame survey. Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/web/lucas

Feng, M. and **Shen**, Z., **2021**, Assessment of the Impacts of Land Use Change on Non-Point Source Loading under Future Climate Scenarios Using the SWAT Model. *Water*, 13(6):874. https://doi.org/10.3390/w13060874

Foody, G.M., **2002**, Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201. https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00295-4

Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T.J., Su, F., Sheffield, J., Pan, M., Lettenmaier, D.P and Wood, E.F., **2010**, Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model. *In Algorithm Theoretical Basis Document for Terrestrial Water Cycle Data Records (in review)*.

Gashaw, T., Tulu, T., Argaw, M. and Worqlul, A.W., **2017**, Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *The Science of the Total Environment*, 619–620, 1394–1408. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.191

Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G., **2007**, The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research Directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. https://doi.org/10.13031/2013.23637

Geymen, A. and **Baz**, I., **2007**, Monitoring urban growth and detecting land-cover changes on the Istanbul metropolitan area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1–3), 449–459. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9699-x

Giorgi, F., **2006**, Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8). https://doi.org/10.1029/2006gl025734

Glanville, K., Sheldon, F., Butler, D. and Capon, S., **2023**, Effects and significance of groundwater for vegetation: A systematic review. *The Science of the Total Environment*, 875, 162577. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162577

Gochis, D.J., Yu, W. and Yates, D.N., **2015**, *The WRF-Hydro Model Technical Description and User's Guide, Version 3.0*, NCAR Technical Document.

Gonzalez, R. and **Pasternack**, G., **2015**, Reenvisioning cross-sectional at-a-station hydraulic geometry as spatially explicit hydraulic topography. *Geomorphology*, 246, 394–406. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.024

Göncüler, K.N. and **Köylü**, Ü., **2024**, Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü Değişim Analizi ve Geleceğe Yönelik Simülasyon Modeli, Kayseri Melikgazi Örneği. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 40(1), 108–122.

Gunacti, M.C., Gul, G.O., Cetinkaya, C.P., Gul, A. and Barbaros, F., **2023**, Evaluating impact of land use and land cover change under climate change on the Lake Marmara system. *Water Resources Management*, *37*(6–7), 2643–2656. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03317-8

Gunacti, M.C., Kandemir, F.A., Najar, M., Kuzucu, A., Uyar, M., Barbaros, F., Boyacioglu, H., Gul, G.O., and Gul, A., **2022**, Attribution of changes in the water balance of a basin to land-use changes through combined modelling of basin hydrology and land-use dynamics. *Journal of Water and Climate Change*, 13(11), 4087–4104. https://doi.org/10.2166/wcc.2022.304

Gupta, A. and **Govindaraju**, R.S., 2022, Uncertainty quantification in watershed hydrology: Which method to use? *Journal of Hydrology*, 616, 128749. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128749

Gülbaz, S. and **Kazezyılmaz-Alhan**, C.M., **2013**, Calibrated hydrodynamic model for Sazlıdere Watershed in Istanbul and investigation of urbanization effects. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(1), 75–84. https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000600

Gülbaz, S. and **Kazezyılmaz-Alhan**, C.M., **2018**, Impact of LID implementation on water quality in Alibeyköy Watershed in Istanbul, Turkey. *Environmental Processes*, 5(S1), 201–212. https://doi.org/10.1007/s40710-018-0318-3

Gülbaz, S., Kazezyilmaz-Alhan, C. M., Nasirzadeh-Dizaji, R. and Dikici, M., **2017**, A calibrated hydrological model for Alibeyköy watershed in Istanbul, Turkey incorporating LID implementation. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(10), 6112–6120.

Gündoğan, A.C., Baş, D., Sayman, R.Ü., Arıkan, Y. and Özsoy, G., **2023**, A'dan Z'ye İklim Değişikliği Başucu Rehberi: "Çok geç olmadan harekete geçmek isteyenler için". Kaynak, İklim ve Çevre Derneği–REC. https://rec.org.tr/ [Erişim Tarihi: 14 Temmuz 2025]

Hargreaves, G.H. and **Allen**, R.G., **2003**, History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129, 53–63. https://10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53)

Harris, C.D. and **Ullman**, E.L., **1945**, The Nature of Cities. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 242, 7–17. https://doi.org/10.1177/000271624524200103

Hasan, S.S., Zhen, L., Miah, M.G., Ahamed, T. and Samie, A., **2020**, Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development*, 34, 100527. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100527

He, C., Okada, N., Zhang, Q., Shi, P. and Li, J., **2008**, Modelling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, *86*(1), 79–91. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.12.010

He, C., Okada, N., Zhang, Q., Shi, P. and Zhang, J., **2006**, Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China. *Applied Geography*, 26(3–4), 323–345. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2006.09.006

Hosmer, D.W., Lemeshow, S. and Sturdivant, R.X., **2013**, Applied Logistic Regression. In Wiley series in probability and statistics. https://doi.org/10.1002/9781118548387

Hoyt, H., **1939**, *The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities*. Federal Housing Administration, Washington DC.

Huang, C., Davis, L.S. and Townshend, J.R.G., **2002**, An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 23(4), 725–749. https://doi.org/10.1080/01431160110040323

IPCC, **2014**, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri & L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

IPCC, **2021**, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., et al. (Eds.)]. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

IPCC, **2022**, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Eds.)]. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

IPCC, **2023**, *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647

İBB, **2021**, *İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı*. Çevre Koruma ve Kontrol Dairesi Başkanlığı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi. https://cevre.ibb.istanbul/ [Erişim Tarihi: 14 Temmuz 2025]

İSKİ, **2021**, İstanbul İçmesuyu Ve Kanalizasyon Master Planı Hazırlanması İşi. Taslak Kapsam Belirleme Raporu.

Jacobson, C.R., **2011**, Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1438–1448. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.018

Jajarmizadeh, M., Harun, S. and Salarpour, M., **2012**, A review on theoretical consideration and Types of models in hydrology. Journal of Environmental Science and Technology, 5(5), 249–261. https://doi.org/10.3923/jest.2012.249.261

Kafy, A.-.A., Faisal, A., Rakib, A.A., Roy, S., Ferdousi, J., Raikwar, V., Kona, M.A. and Fatin, S.A., **2021**, Predicting changes in land use/land cover and seasonal land surface temperature using multi-temporal landsat images in the northwest region of Bangladesh. *Heliyon*, 7(7), e07623. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07623

Karabacak, K., **2021**, *Kentsel Alanlarda Arazi Kullanım Modelleri ve Uygulamaları*. Coğrafya Araştırmalarında Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları II, (ss.159–184), Ankara: Pegem Akademi.

Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J.C., Mathis, M. and Brumby, S.P., **2021**, Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning," *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, Brussels, Belgium, pp. 4704-4707. https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499

Kaya, S. and **Curran**, P., **2005**, Monitoring urban growth on the European side of the Istanbul metropolitan area: A case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(1), 18–25. https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.05.002

Khorrami, B., Heidarlou, H.B. and Feizizadeh, B., **2021**, Evaluation of the environmental impacts of urbanization from the viewpoint of increased skin temperatures: a case study from Istanbul, Turkey. *Applied Geomatics*, 13(3), 311–324. https://doi.org/10.1007/s12518-020-00350-3

Kirchner, J.W., **2006**, Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42(3). https://doi.org/10.1029/2005wr004362

Kondolf, G.M., Gao, Y., Annandale, G W., Morris, G.L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., Fu, K., Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuil, C., Sumi, T., Wang, H., Wang, Z., Wei, Z.,

Wu, B., Wu, C. and Yang, C.T., **2014**, Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth S Future*, 2(5), 256–280. https://doi.org/10.1002/2013ef000184

Krysanova, V., Wortmann, M., Bolch, T., Merz, B., Duethmann, D., Walter, J., Huang, S., Tong, J., Buda, S. and Kundzewicz, Z.W., **2014**, Analysis of current trends in climate parameters, river discharge and glaciers in the Aksu River basin (Central Asia). *Hydrological Sciences Journal*, 60(4), 566–590. https://doi.org/10.1080/02626667.2014.925559

Kucukmehmetoglu, M. and **Geymen**, A., **2008**, Urban sprawl factors in the surface water resource basins of Istanbul. *Land Use Policy*, 26(3), 569–579. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.08.007

Lal, R., **2001**, Soil degradation by erosion. *Land Degradation and Development*, 12(6), 519–539. https://doi.org/10.1002/ldr.472

Landis, J.R. and **Koch**, G.G., **1977**, The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, *33*(1), 159. https://doi.org/10.2307/2529310

Li, X. and **Yeh**, A.G., **2002**, Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(4), 323–343. https://doi.org/10.1080/13658810210137004

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S., **1997**, Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201(1–4), 272–288. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(97)00041-3

Liu, M., Li, C., Hu, Y, Sun, F., Xu, Y. and Chen, T., **2014**, Combining CLUE-S and SWAT models to forecast land use change and non-point source pollution impact at a watershed scale in Liaoning Province, *Chinese Geographical Science*, 24, 540–550. https://doi.org/10.1007/s11769-014-0661-x

Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., Li, S., Wang, S. and Pei, F., **2017**, A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by

coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168, 94–116. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019

MacKenzie, K., Singh, K., Binns, A., Whiteley, H. and Gharabaghi, B., **2022**, Effects of urbanization on stream flow, sediment, and phosphorous regime. *Journal of Hydrology*, 612, 128283. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128283

Markov, A.A., **1971**, *Extension of the Limit Theorems of Probability Theory to a Sum of Variables Connected in a chain*. Reprinted in Appendix B of: R. Howard. Dynamic Probabilistic Systems, Volume 1: Markov Chains. John Wiley and Sons.

Mas, J., Kolb, M., Paegelow, M., Olmedo, M.T.C. and Houet, T., **2013**, Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 51, 94–111. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010

McCoy, A.L., Jacobs, K.L., Vano, J.A., Wilson, J.K., Martin, S., Pendergrass, A.G. and Cifelli, R., **2022**, The press and pulse of climate change: Extreme events in the Colorado River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 58(6), 1076–1097. https://doi.org/10.1111/1752-1688.13021

MGM, **2025**, *2024 Yılı İklim Değerlendirmesi*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü İklim ve Zirai Meteoroloji Dairesi Başkanlığı Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Mitsova, D., Shuster, W. and Wang, X., **2011**, A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*, 99(2), 141–153. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.10.001

Monteith, J.L., **1965**, Evaporation and the Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, 19, 205–234.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, RL., Harmel, R.D. and Veith, T. L., **2007**, Model Evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. https://doi.org/10.13031/2013.23153

Mosammam, H.M., Nia, J.T., Khani, H., Teymouri, A. and Kazemi, M., **2017**, Monitoring land use change and measuring urban sprawl based on its spatial forms. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), 103–116. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.08.002

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. and Wilbanks, T.J., **2010**, The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. https://doi.org/10.1038/nature08823

Mulvaney, T.J., **1860**, On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 4, 18–33.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R., **2011**, *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Temple, Texas 76502: USDA-153 ARS Grassland Soil and Water Research Laboratory, and Texas A&M University, Blackland Research and Extension Center.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R. and Williams, J.R., **2012**, Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation. Temple, Texas: USDA-ARS: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory.

Nguyen, T.V., Dietrich, J., Dang, T.D., Tran, D.A., Van Doan, B., Sarrazin, F.J., Abbaspour, K. and Srinivasan, R., **2022**, An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling & Software*, *156*, 105497. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105497

Nugroho, F. and **Al-Sanjary**, O.I., **2018**, A review of simulation urban growth model. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4), 17–23. https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.11.20681

O'Driscoll, M., Clinton, S., Jefferson, A., Manda, A. and McMillan, S., **2010**, Urbanization effects on watershed hydrology and In-Stream processes in the Southern United States. *Water*, 2(3), 605–648. https://doi.org/10.3390/w2030605

Ohana-Levi, N., Givati, A., Alfasi, N., Peeters, A. and Karnieli, A., **2017**, Predicting the effects of urbanization on runoff after frequent rainfall events. *Journal of Land Use Science*, 13(1–2), 81–101. https://doi.org/10.1080/1747423x.2017.1385653

Park, N.J., Park, N.M., Joh, N.H., Shin, N.H., Kwon, N.H., Srinivasan, N.R. and Kim, N.S., **2011**, Assessment of MIROC3.2 HIRES Climate and CLUE-s Land Use Change Impacts on Watershed Hydrology using SWAT. *Transactions of the ASABE*, 54(5), 1713–1724. https://doi.org/10.13031/2013.39842

Peker, İ.B. and **Gülbaz**, S., **2025**, Impact of rapid anthropogenic land use and land cover change on basin hydrology and sediment loads. *Landscape and Ecological Engineering*. https://doi.org/10.1007/s11355-024-00625-6

Peker, İ.B. ve **Cuceloglu**, G., **2022**, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Modeline Genel Bir Bakış ve Modelin Türkiye'deki Uygulamaları. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 23(1), 9-26.

Perera, D., Williams, S. and Smakhtin, V., **2022**, Present and Future losses of storage in large reservoirs due to sedimentation: A Country-Wise Global Assessment. *Sustainability*, 15(1), 219. https://doi.org/10.3390/su15010219

Perrin, C., Michel, C. and Andréassian, V., **2003**, Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 275–289. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(03)00225-7

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. and Blair, R., **1995**, Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), 1117–1123. https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117

Pontius, R.G. and **Millones**, M., **2011**, Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, *32*(15), 4407–4429. https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923

Pontius, R.G., **2000**, Quantification Error versus Location Error in Comparison of Catagorical Maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66, 1011–1016.

Priestley, C.H.B. and **Taylor**, R.J., **1972**, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92. https://10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2

Refsgaard, J.C. and **Storm**, B., **1995**, MIKE SHE, Computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publication*, 809–846.

Rossman, L.A., **2010**, *Storm water management model user's manual, version 5.0* (Vol. 276). Cincinnati, OH, USA: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Roy, H.G., Fox, D.M. and Emsellem, K., **2014**, Predicting Land Cover Change in a Mediterranean Catchment at Different Time Scales. In: Murgante, B., et al. Computational Science and Its Applications – ICCSA 2014. ICCSA 2014. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 8582. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09147-1_23

Roy, P., Pal, S.C., Chakrabortty, R., Chowdhuri, I., Malik, S. and Das, B., **2020**, Threats of climate and land use change on future flood susceptibility. *Journal of Cleaner Production*, 272(1), 122757. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122757

Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. and Williams, R.J., **1986**, Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533–536.

Rwanga, S.S. and **Ndambuki**, J.M., **2017**, Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification using remote sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 08(04), 611–622. https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033

Samaniego, L., Kumar, R. and Attinger, S., **2010**, Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5). https://doi.org/10.1029/2008wr007327

Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D. and Yun, W., **2011**, Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA–Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3–4), 938–943. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.019

Scharffenberg, W.A. and Fleming, M.J., **2006**, *Hydrologic modeling system HEC-HMS: User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

SCS, **1985**, *National engineering handbook*. Section 4-Hydrology. Washington, DC.

Sefer, Y., **2019**, *Dyna-CLUE Modeli Kullanılarak Farklı Senaryolara Göre Arazi Kullanımı Değişiminin Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Serengil, Y., Inan, M., Yurtseven, I., Kiliç, Ü. And Uygur, B., **2012**, Stream corridors as indicators of watershed land use: A case study in Istanbul. *Bosque (Valdivia)*, 33(3), 39–40. https://doi.org/10.4067/s0717-92002012000300020

Sertel, E., Imamoglu, M.Z., Cuceloglu, G. and Erturk, A., **2019**, Impacts of Land Cover/USE changes on hydrological processes in a rapidly urbanizing mid-latitude water supply catchment. *Water*, 11(5), 1075. https://doi.org/10.3390/w11051075

Sherman, L.K., **1932**, Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News-Record*, 108(14), 501–505.

Shuster, W. D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E. and Smith, D. R., **2005**, Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2(4), 263–275. https://doi.org/10.1080/15730620500386529

Soares-Filho, B.S., Rodrigues, H.O., Costa, W. and Schlesinger, P., **2009**, *Modeling environmental dynamics with Dinamica EGO*. Centro de Sensoriamento Remoto. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 115.

Sun, X., Zhang, H., Hua, D. and Wei, B., **2021**, The influence of urbanization on storm runoff. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 769(2), 022031. https://doi.org/10.1088/1755-1315/769/2/022031

Şenik, B. and **Kaya**, H.S., **2021**, Landscape sensitivity-based scenario analysis using FLUS model: a case of Asarsuyu watershed. *Landscape and Ecological Engineering*, *18*(2), 139–156. https://doi.org/10.1007/s11355-021-00488-1

Şerbetci, Z., **2019**, Effects of Urban Sprawl on Drinking-Water Basins: Alibeykoy Basin (Istanbul-Turkey). *Journal of International Social Research*, 12(62), 428–434. https://doi.org/10.17719/jisr.2019.3064

Şevik, Ö., **2006**, *Application of SLEUTH Model in Antalya*, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences.

Talib, A. and **Randhir**, T.O., **2023**, Long-term effects of land-use change on water resources in urbanizing watersheds. PLOS *Water*, 2(4), e0000083. https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000083

Taylor, K.E., Stouffer, R.J. and Meehl, G.A., **2012**, An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(4), 485–498. https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00094.1

Tonyaloğlu, E.E., **2025**, Future land use/land cover and its impacts on ecosystem services: case of Aydın, Turkey. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22*(6), 4601–4617. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05907-y

Tuel, A. and **Eltahir**, E.A.B., **2020**, Why is the Mediterranean a climate change hot spot? *Journal of Climate*, 33(14), 5829–5843. https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0910.1

Tülücü, K., **1997**, *Su Kaynaklarının Planlanması*. Çukurova Üniversitesi Genel Yayın No: 175, Ders Kitapları Yayın No: 53.

Türkeş, M., **2022**, IPCC'nin Yeni Yayımlanan İklim Değişikliğinin Etkileri, Uyum ve Etkilenebilirlik Raporu Bize Neler Söylüyor? *Resilience*, 6(1), 197–207. https://doi.org/10.32569/resilience.1098946

UN General Assembly, *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, **2015**, A/RES/70/1, https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html [Erişim Tarihi: 14 Temmuz 2025]

Ustaoglu, E. and **Aydınoglu**, A., **2020**, Suitability evaluation of urban construction land in Pendik district of Istanbul, Turkey. *Land Use Policy*, 99, 104783. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104783

Usul, N., **2008**, *Mühendislik Hidrolojisi*. ODTÜ Yayıncılık.

Vaghefi, S.A., Abbaspour, N., Kamali, B. and Abbaspour, K.C., **2017**, A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling & Software*, 96, 181–198. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.033

Van Der Knijff, J. M., Younis, J. and De Roo, A.P.J., **2008**, LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2), 189–212. https://doi.org/10.1080/13658810802549154

Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M. and Srinivasan, R., **2006**, A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324(1–4), 10–23. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J. and Rose, S.K., **2011**, The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1–2), 5–31. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z

Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V. and Mastura, S.S., **2002**, Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental Management*, 30(3), 391–405. https://doi.org/10.1007/s00267-002-2630-x

Vlahov, D., **2002**, Urbanization, urbanicity, and health. *Journal of Urban Health*, 79(4), 1–12. https://doi.org/10.1093/jurban/79.suppl_1.s1

Von Neumann, J. and **Burks**, A.W., **1966**, Theory of self-reproducing automata. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(1), 3–14.

Von Thünen, J.H., **1826**, *Der isolirte Staat in Beziehung auf Landwirthschaft und National¨okonomie*. In: Auflage (Ed.), Perthes, Hamburg, p.1.

Wagener, T., **2007**, Can we model the hydrological impacts of environmental change?. *Hydrological Processes*, 21(23), 3233–3236. https://doi.org/10.1002/hyp.6873

Wagner, P.D., Bhallamudi, S.M., Narasimhan, B., Kantakumar, L.N., Sudheer, K.P., Kumar, S., Schneider, K. and Fiener, P., **2016**, Dynamic integration of land use changes in a hydrologic assessment of a rapidly developing Indian catchment, *Science of The Total Environment*, 539, 153–164. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.148

Williams, J.R., **1975**, *Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor* (Volume 40, p. 244). Washington DC: ARS-S, Southern Region, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M. and Herold, M., **2021**, Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12(1). https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2

WMO, **2017**, *Guidelines on the Calculation of Climate Normals*. WMO: Geneva, Switzerland.

Yang, D., Yang, Y. and Xia, J., **2021**, Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115–122. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003

Yang, W., Long, D. and Bai, P., **2019**, Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China. *Journal of Hydrology*, 570, 201–219. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.055

Ye, W., Bates, B.C., Viney, N.R., Sivapalan, M. and Jakeman, A.J., **1997**, Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resources Research*, 33(1), 153–166. https://doi.org/10.1029/96wr02840

Zha, Y., Gao, J. and Ni, S., **2003**, Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. https://doi.org/10.1080/01431160304987

Zhang, P., Liu, Y.H., Pan, Y. and Yu, Z.R., **2013**, Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3–4), 588–595, https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.061

Zhou, F., Xu, Y., Chen, Y., Xu, C. Y., Gao, Y. and Du, J., **2013**, Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology*, 485, 113–125. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.040

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

İsmail Bilal PEKER.docx

ORİJİNALLİK RAPORU

%8	%7	%4	%3
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
2	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%1
3	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
4	dacd.artvin.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
5	İsmail Bilal Peker, Sezar Gülbaz. "Impact of rapid anthropogenic land use and land cover change on basin hydrology and sediment loads", Landscape and Ecological Engineering, 2024 Yayın	<%1
6	acikerisim.sakarya.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
7	avesis.gelisim.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
8	Dağlı, Pelin Keçecioğlu. "Kentsel alan kullanımlarındaki değişimin stratejik mekansal planlama açısından değerlendirilmesi: İstanbul riva örneği", Bartin University (Turkey), 2024 Yayın	<%1
9	avesis.iuc.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1