

**ÇORUH HAVZASI'NDA ÇOK KRİTERLİ
HİDROLOJİK MODELLEME
VE TAHMİN ÇALIŞMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Yusuf Oğulcan DOĞAN

Eskişehir, 2018

**ÇORUH HAVZASI'NDA ÇOK KRİTERLİ HİDROLOJİK MODELLEME
VE TAHMİN ÇALIŞMASI**

Yusuf Oğulcan DOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İnşaat Mühendisliği Hidrolik Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali Arda ŞORMAN**

**Eskişehir
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Temmuz, 2018**

Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1705F122 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Yusuf Oğulcan DOĞAN'ın “ Çoruh Havzası'nda Çok Kriterli Hidrolojik Modelleme ve Tahmin Çalışması” başlıklı tezi 19/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Hidrolik Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı - Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Dr. Öğr. Üyesi Ali Arda ŞORMAN	
Üye	: Prof. Dr. İsmail YÜCEL	
Üye	: Doç. Dr. Aynur ŞENSOY ŞORMAN	

Prof.Dr. Ersin YÜCEL
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

ÖZET

ÇORUH HAVZASI'NDA ÇOK KRİTERLİ HİDROLOJİK MODELLEME

VE TAHMİN ÇALIŞMASI

Yusuf Oğulcan DOĞAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz, 2018

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali Arda ŞORMAN

Küresel sıcaklıklardaki artış, sürekli artan dünya nüfusunu olumsuz yönde etkileyerek hidroloji biliminin önemini ortaya koymaktadır. Ülkedeki su kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması, kuraklık ve taşkın kontrolü, su kaynaklarının yönetimi açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple Yusufeli, Deriner gibi Türkiye'nin önemli barajlarını barındıran Çoruh Havzası'nın yüksek kesimlerinde biriken kar miktarının takip edilmesi, gerekli tahmin ve modellemelerin yapılması bu noktada önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada akımın önemli kısmının bahar ve erken yaz aylarında kar erimesinden oluştuğu Çoruh Havzası'nın memba bölümü seçilmiştir. Seçilen bu alanın özelliklerini daha iyi tanıyabilmek adına CBS platformu ile çeşitli yüzey analizleri gerçekleştirilmiş ve bölgenin kar potansiyeli farklı özellikli uydular kullanılarak belirlenmiştir. Kullanılan uydulardan MODIS ile daha iyi mekânsal çözünürlüğe sahip Landsat uydu görüntüleri ve yer gözlem verileriyle karşılaştırılarak doğrulama çalışması yapılmıştır. 2003-2015 yıllarına ait hidro-meteorolojik veriler kullanılarak HBV ile hidrolojik modelleme çalışması yapılmış ve farklı iki yöntemle model kalibre edilmiştir. GAP yöntemiyle yapılan akım kalibrasyon sonuçlarından elde edilen modelin performans değerleri, kalibrasyon dönemi için 0.86, validasyon döneminde ise 0.77 olarak hesaplanmıştır. Akım verilerinin yanı sıra uydu görüntülerinden elde edilen kar kaplı alan değerleri kullanılarak çok kriterli hidrolojik modelleme çalışması Monte Carlo yöntemi ile denenmiştir. Model parametrelerinin belirsizlik ve hassasiyetleri incelenerek, çok kriterli yöntem kullanıldığında model parametre belirsizliğini azaltmada etkisinin olduğu gözlenmiştir. Hidrolojik modelleme ile yapılmak istenen akım tahmin çalışması, 2015 su yılının Mart-Haziran ayları üzerinde 1 ve 2 günlük sayısal hava tahmin verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar ve sonuçları, seçilen bölge üzerindeki kavramsal hidrolojik modelleme çalışmalarına bir örnek olup, kar ağırlıklı benzer havzalar için öncülük etme potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Çoruh Havzası, Uydu Görüntüleri, Hidrolojik Modelleme, HBV, Akım Tahmini.

ABSTRACT
MULTI CRITERIA HYDROLOGICAL MODELING AND FORECASTING STUDY
IN CORUH BASIN

Yusuf Oğulcan DOĞAN

Department of Civil Engineering

Anadolu University, Graduate School of Sciences, July, 2018

Supervisor: Asst. Prof. Ali Arda ŞORMAN

The increase in global temperatures, undesireably affects the continuously increasing world population and reveals the importance of the science of hydrology. The efficient use of water resources in the country as well as drought and flood control, is crucial in terms of water resources management. For this reason, monitoring the amount of accumulated snow in the higher parts of Coruh Basin, hosting Turkey's major dams such as Yusufeli and Deriner, is vital in terms of modeling and forecasting the expected flow.

In this study, the upstream part of the Coruh Basin is selected where a significant portion of the streamflow comes from snowmelt during spring and early summer months. In order to better understand the properties of this area of interest, various surface analyses have been carried out with the GIS platform and the snow potential of the region is examined using different satellites. Verification of snow algorithm is evaluated by comparing MODIS images with finer resolution Landsat satellite images as well as ground observation data. Hydrologic modeling is performed utilizing the HBV model with hydro-meteorological data for 2003-2015 water years and the model is calibrated by two different methods. The performance in terms of model efficiency using the GAP method is calculated as 0.86 for the calibration and 0.77 for the validation period. Multi-criteria hydrological modeling is applied using the Monte Carlo method, exploiting satellite snow cover images besides flow data. After applying sensitivity and uncertainty analysis on the model parameters, it is observed that multi-criteria modeling is effective in reducing the uncertainty of the parameters. As a final result, ensemble runoff forecasts are generated with several best model parameters using 1-day and 2-day ahead numerical weather prediction data for the snowmelt period (March-June) of 2015 water year.

The study performed and the results achieved serve as an example of the conceptual hydrological modeling studies on the selected region and have the potential to lead for similar snow dominated basins.

Keywords: Coruh Basin, Satellite Images, Hydrological Modeling, HBV, Runoff Forecast

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında öneri ve eleştirileriyle bana yol gösteren, yardımlarını, hoşgörülerini esirgemeyen ve bilime olan tutkularıyla ufkumu genişleten, değerli ve saygıdeğer hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Ali Arda ŞORMAN ve Doç. Dr. Aynur ŞENSOY ŞORMAN'a,

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Araş. Gör. Cansaran ERTAŞ ve Araş. Gör. Dr. Gökçen UYSAL'a,

Hayatıma renk katan, hep yanımda olan, varlığıyla beni güçlü kılan, hayatımın en zor günlerinde beni ayağa kaldıran, çalışmanın her aşamasında desteğini bir an olsun esirgemeyen, hayatımın anlamı sevgili mimarım Fatma YAPICI'ya ve onun değerli ailesine,

2 senedir hayatımızda olan, küçük patisiyle büyük mutluluklar veren dünyanın en tatlı, en masum köpeği Hera'ma,

Yetişmemde ve hayatımın her anında yanımda olan, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, varlıkları ile güç aldığım, beni bu günlere getiren, biricik annem, canım babam ve canımdan çok sevdiğim kardeşime,

Bu çalışmamın ilk zamanlarında yanımda olup sonra en güzel cennet bahçelerinden benim yanımda olmaya devam eden, iki meleğime çok teşekkür ederim.

Yusuf Oğulcan DOĞAN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Yusuf Oğulcan DOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Konusu	1
1.2. Çalışmanın Amacı	2
1.3. Çalışmanın İçeriği	3
2. ÇALIŞMA ALANI ve VERİ	4
2.1. Çoruh Nehri	4
2.2. Coğrafi Bilgi Sistemi Analizleri	6
2.3. Hidro-meteorolojik Veri Analizleri	11
2.4. Eksik Akım Verisi Tamamlama Çalışması	17
3. UZAKTAN ALGILAMA ANALİZLERİ	21
3.1. Kar Çalışmalarının Uzaktan Algılama Tarihçesi	21
3.2. Kar Kaplı Alan Uydu Görüntü Analizleri	22
3.2.1. MSG-SEVIRI kar ürünü	23
3.2.2. MODIS kar ürünü	23
3.2.3. IMS kar ürünü	26
3.3. Kar Su Eşdeğeri	34
3.4. Uyduları Yer Gözlemiyle Doğrulama Çalışması	36

3.4.1. Landsat	36
3.4.2. Etkili kar kaplı alan algoritması	38
3.4.3. MODIS	40
3.4.4. Çalışma alanı	43
3.4.5. İndekslerin ilgili alanda uygulanması	46
3.4.6. Uydular ve yer gözlemi kıyası	52
3.4.7. Çalışmada uygulanan indekslerin sonuçları	55
4. HİDROLOJİK MODELLEME	60
4.1. HBV Modeli	60
4.1.1. Kar modülü	63
4.1.2. Toprak nemi modülü	64
4.1.3. Akım modülü	65
4.1.4. Öteleme modülü	66
4.2. Model Uygulaması	66
4.2.1. Genetik Algoritma ve Powell (GAP) yöntemi ile kalibrasyon çalışmaları	67
4.2.2. Kar Kaplı Alan (KKA) – Kar Su Eşdeğeri (KSE)	73
4.2.3. HBV model ile çok kriterli kalibrasyon-validasyon çalışması	77
4.2.3.1. <i>Amaç fonksiyonları seçimi</i>	79
4.2.4. HBV model ile belirsizlik ve hassasiyet çalışmaları	89
4.2.4.1. <i>Hassasiyet analizi</i>	90
4.2.4.2. <i>Belirsizlik analizi</i>	97
4.3. Akım Tahmini	106
4.3.1. Sayısal hava tahmin verileri	106
4.3.2. Hidrolojik model tahmin çalışması	109
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	115
KAYNAKÇA	120
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. E23A004 Havzası yükseklik dağılımı	7
Tablo 2.2. E23A004 Havzası bakı dağılımı	8
Tablo 2.3. E23A004 Havzası eğim dağılımı	9
Tablo 2.4. E23A004 Havzası arazi kullanımı dağılımı	10
Tablo 2.5. E23A004 Havzası'nda kullanılan istasyon bilgileri	12
Tablo 2.6. E23A004 Havzası 2003-2016 su yılları değerlendirmesi	16
Tablo 2.7. İstasyonların temel istatistik verileri	18
Tablo 3.1. Landsat 1-8 uyduları özellikleri	37
Tablo 3.2. Landsat 5-8 uyduları bant kombinasyonu	37
Tablo 3.3. Görüntülere uygulanan ikili ve Etkili KKA sınıflandırmaları	49
Tablo 3.4. Uyduları yer gözlemi verileriyle doğrulama çalışması	53
Tablo 4.1. HBV Light modelinin kullandığı değişken parametreler ve değer aralıkları	62
Tablo 4.2. GAP yöntemi için belirlenen parametre aralıkları	68
Tablo 4.3. GAP metodunda kullanılan ve değerlendirilen model performans ölçütleri	68
Tablo 4.4. GAP metodunda Reff amaç fonksiyonuna göre her yıl için kalibrasyon sonuçları	69
Tablo 4.5. GAP metodunda Reff amaç fonksiyonuna göre kalibrasyon ve validasyon sonuçları	69
Tablo 4.6. Reff amaç fonksiyonuna göre GAP metodu ile elde edilen 'en iyi' (2003-2009) kalibrasyon dönemi	70
Tablo 4.7. MC yöntemi için belirlenen parametre aralıkları	78
Tablo 4.8. MC yöntemi ile kalibrasyon denemeleri için kullanılan amaç fonksiyonları	79

Tablo 4.9. MC yöntemi ile kalibrasyon denemeli için kullanılan tekil ve çoklu amaç fonksiyonları	80
Tablo 4.10. Farklı amaç fonksiyonları ve bunların kombinasyonları ile yapılan belirsizlik analizi sonuçlarının en iyi 100 parametre setine göre %50 (%75-%25) değerlerindeki değişimi	103
Tablo 4.11. Akım tahmin çalışması için belirlenen en iyi 10 parametre setinin özellikleri ve performansları	110

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Çoruh Havzası, nehir ağı ve üzerindeki su yapıları	4
Şekil 2.2. Çalışma alanı olarak seçilen E23A004 AGİ Havzası'nın konumu	5
Şekil 2.3. E23A004 Havzası sayısal yükseklik modeli haritası	6
Şekil 2.4. E23A004 Havzası'nın hipsometrik eğrisi	7
Şekil 2.5. E23A004 Havzası bakı haritası	8
Şekil 2.6. E23A004 Havzası eğim haritası	9
Şekil 2.7. E23A004 Havzası arazi kullanım haritası	10
Şekil 2.8. E23A004 Havzası'nda kullanılan istasyon haritası	11
Şekil 2.9. 2003-2016 su yıllarında havzaya düşen toplam yağış grafiği	13
Şekil 2.10. 2003-2016 su yıllarında havzanın aldığı aylık ortalama toplam yağış grafiği	13
Şekil 2.11. 2003-2016 su yıllarında havzanın aylık ortalama sıcaklık grafiği	14
Şekil 2.12. 2003-2016 su yıllarında havzanın aylık sahip olduğu ortalama akım grafiği	14
Şekil 2.13. Çalışma için seçilen istasyonların konumları	18
Şekil 2.14. İstasyonlar arasındaki ilişkilerin incelenmesi ve matematiksel denklemin seçilmesi	20
Şekil 2.15. Tamamlanan 2012 su yılı akım verisi ve iki istasyon arasındaki akım uyumu	20
Şekil 3.1. 24 Mart 2010 tarihli MSG-SEVIRI kar kaplı alan görüntüsü	23
Şekil 3.2. 24 Mart 2010 tarihli MODIS kar kaplı alan görüntüsü	24
Şekil 3.3. Terra ve Aqua görüntüleri ile harmanlama işlemi sonucu üretilen görüntüler (3 Nisan 2015 tarihli görüntü)	25
Şekil 3.4. 24 Mart 2010 tarihli IMS kar kaplı alan görüntüsü	26
Şekil 3.5. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2003 su yılı	28

Şekil 3.6. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2004 su yılı	28
Şekil 3.7. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2005 su yılı	29
Şekil 3.8. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2006 su yılı	29
Şekil 3.9. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2007 su yılı	30
Şekil 3.10. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2008 su yılı	30
Şekil 3.11. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2009 su yılı	31
Şekil 3.12. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2010 su yılı	31
Şekil 3.13. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2011 su yılı	32
Şekil 3.14. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2012 su yılı	32
Şekil 3.15. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2013 su yılı	33
Şekil 3.16. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2014 su yılı	33
Şekil 3.17. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2015 su yılı	34
Şekil 3.18. 01 Mart 2015 tarihli SSMI/S kar su eşdeğeri (mm) uydu görüntüsü	35
Şekil 3.19. 27 Mart 2011 Landsat TM görüntüsü	41
Şekil 3.20. 4 Nisan 2014 Landsat OLI/TIRS görüntüsü	41
Şekil 3.21. 8 Mart 2016 Landsat OLI/TIRS görüntüsü	42
Şekil 3.22. 4 Nisan 2014 MODIS işlenmemiş Doğu Anadolu görüntüsü	42
Şekil 3.23. Çalışma alanı ve havzalar arasındaki ilişki	43
Şekil 3.24. Çalışma alanının arazi kullanım haritası	44
Şekil 3.25. Çalışma alanının yükseklik haritası (DEM)	45
Şekil 3.26. Çalışma alanında indeks uygulama adımları	46
Şekil 3.27. Çalışma alanında uygulanan indeksler (4 Nisan 2014)	47
Şekil 3.28. Çalışma alanında uygulanan MODIS-Landsat karşılaştırma adımları	48
Şekil 3.29. MODIS-Landsat karşılaştırma görüntüsü (4 Nisan 2014)	52

Şekil 3.30. Landsat ve KGİ kullanılarak yapılan kar kaplı alan karşılaştırması (4 Nisan 2014)	54
Şekil 3.31. MODIS ve KGİ kullanılarak yapılan kar kaplı alan karşılaştırması (4 Nisan 2014)	54
Şekil 3.32. Çalışmada kullanılan NDVI-NDSI grafiği	55
Şekil 3.33. Çalışmada kullanılan NDSI-Band 5 grafiği	57
Şekil 3.34. 4 Nisan 2014 NDSI indeksi sınıflandırması	57
Şekil 3.35. Farklı versiyonlara ait Landsat görüntülerinin NDSI histogram grafiği	58
Şekil 3.36. NDSI kriterlerine göre başarı dağılımı	59
Şekil 4.1. HBV Light modelinin ana yapısı	61
Şekil 4.2. HBV modelinin kar modülü	63
Şekil 4.3. HBV modelinin toprak nemi modülü	64
Şekil 4.4. HBV modelinin akım modülü	65
Şekil 4.5. E23A004 Havzası, 2003-2009 su yılları kalibrasyon sonuçları (GAP)	71
Şekil 4.6. E23A004 Havzası, 2010-2015 su yılları validasyon sonuçları (GAP)	72
Şekil 4.7. 2011 su yılına ait KKA-KSE grafiği	74
Şekil 4.8. 2012 su yılına ait KKA-KSE grafiği	74
Şekil 4.9. 2013 su yılına ait KKA-KSE grafiği	75
Şekil 4.10. 2014 su yılına ait KKA-KSE grafiği	75
Şekil 4.11. 2015 su yılına ait KKA-KSE grafiği	76
Şekil 4.12. Kalibrasyon periyodu sonuçlarına göre en iyi koşullara uyan 10 ve 100 parametre setleri için istatistik değerleri	82
Şekil 4.13. Validasyon periyodu sonuçlarına göre en iyi koşullara uyan 10 parametre seti için istatistik değerleri	84
Şekil 4.14. E23A004 Havzası, MC yöntemi ile çok kriterli kalibrasyon dönemi (2003-2009) akım değerleri	85

Şekil 4.15. E23A004 Havzası, MC yöntemi ile çok kriterli validasyon dönemi (2010-2015) akım değerleri	86
Şekil 4.16. E23A004 Havzası, MC yöntemi ile çok kriterli kalibrasyon dönemi (2003-2009) KKA değerleri	87
Şekil 4.17. E23A004 Havzası, MC yöntemi ile çok kriterli validasyon dönemi (2010-2015) KKA değerleri	88
Şekil 4.18. Model parametrelerinin farklı amaç fonksiyonlarına göre hassasiyet analizleri	92
Şekil 4.19. TT, CFMAX, SP ve SFCF parametrelerinin belirsizlik analiz sonuçları	99
Şekil 4.20. FC, LP, BETA ve PERC parametrelerinin belirsizlik analiz sonuçları	100
Şekil 4.21. UZL, K0, K1 ve K2 parametrelerinin belirsizlik analiz sonuçları	101
Şekil 4.22. MAXBAS, Cet, PCALT ve TCALT parametrelerinin belirsizlik analiz sonuçları	102
Şekil 4.23. R kriterine göre incelenen 2008 su yılı hidrografi	104
Şekil 4.24. R+M kriterine göre incelenen 2008 su yılı hidrografi	104
Şekil 4.25. R+S kriterine göre incelenen 2008 su yılı hidrografi	105
Şekil 4.26. R+M+S kriterine göre incelenen 2008 su yılı hidrografi	105
Şekil 4.27. E23A004 Havzası'nın WRF tahmin ve gözlenen ortalama sıcaklık grafikleri (15 Mart – 1 Temmuz 2015) a) 1 günlük b) 2 günlük	107
Şekil 4.28. E23A004 Havzası'nın WRF tahmin ve gözlenen toplam yağış ile birikimli yağış grafikleri (15 Mart – 1 Temmuz 2015) a) 1 günlük b) 2 günlük	108
Şekil 4.29. 1 günlük WRF verileri kullanılarak elde edilen akım tahminleri ve aralıkları	112
Şekil 4.30. 2 günlük WRF verileri kullanılarak elde edilen akım tahminleri ve aralıkları	113
Şekil 4.31. 1 günlük WRF verileri kullanılarak elde edilen kar kaplı alan tahminleri ve aralıkları	114
Şekil 4.32. 2 günlük WRF verileri kullanılarak elde edilen kar kaplı alan tahminleri ve aralıkları	114

KISALTMALAR DİZİNİ

AGİ : Akım Gözlem İstasyonu

AOI : Area of Interest

ASTER-GDEM : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Map

CBS : Coğrafi Bilgi Sistemleri

DSİ : Devlet Su İşleri

EİE : Elektrik İşleri Etüt İdaresi

EO : Earth Observation

GAP : Genetic Algorithm and Powell

HBV : Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning

H-SAF : Satellite Application Facilities in Hydrology

IMS : Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System

KGİ : Kar Gözlem İstasyonu

KKA : Kar Kaplı Alan

KSE : Kar Su Eşdeğeri

LogReff : Efficiency for Log Discharge

MARE : Mean Absolute Relative Error

MC : Monte Carlo

MGİ : Meteoroloji Gözlem İstasyonu

MGM : Meteoroloji Genel Müdürlüğü

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSG-SEVIRI : Meteosat Second Generation – Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NDSI : Normalized Difference Snow Index

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NDWI : Normalized Difference Water Index

NESDIS : National Environmental Satellite, Data and Information Service

NIC : National Ice Center

NOAA : The National Oceanic and Atmospheric Administration

R^2 : Coefficient of Determination

Reff / NSE : Nash-Sutcliffe Efficiency

RMSE : Root Mean Square Error

SCA : Snow Cover Area

SCE : Shuffled Complex Evolution

VE : Volume Error

VIS : Visible

WRF : Weather Research and Forecasting

NIR : Near Infrared

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Konusu

Geçmişten günümüze suyun varlığı canlıların yaşamında temel etkenlerden biri olmuştur. Günümüzde ise küresel ısınmayla birlikte yaşanan iklim değişimleri ve hızla gelişen dünya nüfusu su kaynaklarını birçok açıdan olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuz etkileri azaltmak amacıyla doğal kaynakların korunması ve etkin şekilde kullanılmasının önemi giderek artmaktadır. Bu bağlamda hidroloji biliminin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Özellikle kar ağırlıklı alanda yapılan hidrolojik modelleme çalışmaları akım tahminlerine fayda sağlayacağı gibi doğal su kaynaklarının da verimliliğinin artmasına katkı sağlar. Barajların sağlıklı bir şekilde işletilebilmesi ve yapılacak taşkın kontrol çalışmaları bu akım tahminlerine bağlıdır.

Türkiye ortalama yüksekliği 1130 m olup batıdan doğuya doğru artan dağlık alanlardan oluşması sebebiyle akım tahmin çalışmaları için uygun bir ülkedir. Bu alanlar Doğu Anadolu Bölgesi, İç Anadolu Bölgesi ve Doğu Karadeniz Bölgesi olmak üzere toplam alan yüzdesinin yaklaşık % 45'ini oluşturmaktadır. Topoğrafik açıdan engebeli olan bu bölgeler hidro-meteorolojik verilerin toplanmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum bölgede yapılacak olan hidrolojik modellemenin önemini ortaya koymaktadır.

Çoruh Nehri, 3255 m rakımlı Mescit Dağları'nın batı yamaçlarından doğup Bayburt, Erzurum ve Artvin illerinden geçerek Türkiye sınırlarından çıkmaktadır. Nehir yan kolları ile birlikte toplamda 431 km uzunluğa sahip olup bunun yalnızca 20 km'lik bölümü Gürcistan sınırları içerisindedir. Çoruh Havzası, toplamda 22.100 km²'lik yağış alanı ile Türkiye'nin 25 hidrolojik havzasından biri olup bu havzalar arasında eğimi en yüksek olanıdır. Yıllık ortalama 6.3 milyar m³'lük akış hacmine sahip olmakla birlikte yılda ortalama 5.8 milyon m³ sediment taşıyan Çoruh Nehri, ülkemizin en hızlı akan nehridir (Sucu ve Dinç, 2008). Bu sebeple, erozyon ve çığ problemleri bölge için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Nehir, dar ve dik vadiler arasında kaldığından sulama suyu kullanımı için uygun değildir. Bu nedenle, su potansiyelinin yüksek olmasının yanısıra hidro-elektrik potansiyelinin de yüksek olması, Çoruh Havzası'nı önemli kılmaktadır. Bundan dolayı Türkiye'nin enerji üretim potansiyeli yüksek barajları (Laleli, İspir, Güllübağ, Aksu, Arkun, Yusufeli, Artvin, Deriner, Muratlı ve Borçka) Çoruh Havzası'nda yer almaktadır. Ayrıca sınır aşan sular kategorinde yer almasından dolayı nehir suyunun ölçülmesi ve kontrol altına alınması önem taşımaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, ülkemizdeki kar potansiyeli yüksek sınıraşan sular kategorisinde olan bir havzada uydu görüntülerinden elde edilen verilerle çok kriterli hidrolojik modelleme ve akım tahmin çalışmaları olarak belirlenmiştir. Çalışma alanı olarak akımın önemli kısmının kar erimesinden oluştuğu, Çoruh Nehri üzerinde bulunan ve mansabında Türkiye'nin önemli bir miktarda enerji üretiminin sağlandığı Çoruh Havzası'nın memba bölümü seçilmiştir. Bu çalışmayla kar ağırlıklı beslenen yüksek rakımlı bir havzada yağış-akış ilişkisinin modellenmesi gerçekleşmiş olacak ve aynı zamanda da yeterli yer ölçüm verisi olmamasından kaynaklı uydu görüntülerinden elde edilen kar kaplı alan verilerinden faydalanarak sadece akım verisini doğrulamak yerine çok kriterli bir modelleme denenmiş olacaktır.

Öncelikle havzanın özelliklerini saptamak ve haritalarla göstermek için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) analizleri yapılmıştır. Ardından eldeki mevcut veri kapsamında, farklı çözünürlüklere sahip uydular ile havzanın kar kaplı alan analizi yapılmıştır. Böylece elde edilen analiz sonuçları ile havzanın dönemsel kar potansiyeli belirlenmiştir. Hidrolojik modelin uydu görüntüleriyle de tutarlı olması amaçlanmıştır. Bu nedenle çalışmada kullanılan 500 m çözünürlüklü MODIS uydusunun doğruluğunu tespit etmek adına, 30 m mekansal çözünürlüğe sahip Landsat uydusu ve farklı noktalardan elde edilen yer verileri kullanılarak bu veriler arasında kar kaplı alan karşılaştırma çalışması yapılmıştır.

Havzanın yağış-akış ilişkisinin belirlenmesi için kavramsal hidrolojik model olan HBV modelinin HBV-Light versiyonu bu çalışma için seçilmiştir. Modelin kalibrasyonu ve validasyonu için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Uydu görüntülerinden elde edilen kar verileri aracılığıyla çok amaçlı kalibre edilmiş modelin, akım tahmin çalışmalarının başarısı sorgulanmak istenmiştir. Bu amaçla 1 ve 2 günlük sayısal hava tahmin verileri kullanılarak akım tahmin çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmaların kazanımları, havza üzerinde bulunan büyük barajların ve gelecekte planlanan önemli su yapılarının daha verimli ve güvenli işletilmesine katkıda bulunarak örnek bir karar destek sistemi sağlamaktadır.

1.3. Çalışmanın İçeriği

Tez metni, genel bilgilerin sunulduğu giriş bölümü ile başlamaktadır. Tezin ikinci bölümünde çalışma alanı tanıtılmış, bölgenin topoğrafik özelliklerinden bahsedilmiştir. Ayrıca hidro-meteorolojik veriler ve akım verisi eksik olan su yılı için yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, uzaktan algılama tekniklerinin kar çalışmaları üzerindeki etkisinden bahsedilerek üç farklı uydu ile yapılan kar kaplı alan analiz çalışmaları anlatılmıştır. Yine bu bölümde farklı çözünürlükteki uydu verileri ile yer gözlem verileri arasında kar kaplı alan karşılaştırması yapılmıştır. Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan hidrolojik modelin tanıtımı yapılmış ve özellikleri anlatılmıştır. Ayrıca bu bölümde, farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak yapılan model kalibrasyonu ve doğrulaması anlatılıp, elde edilen model parametrelerinin belirsizlik ve hassasiyet çalışmaları değerlendirilmiştir. Yine bu bölümün içerisinde tahmin verilerinden bahsedildikten sonra, yapılan akım tahmin çalışmasının performans analiz sonuçları sunulmuştur. Son olarak elde edilen sonuçlar, yorumlar ve çalışmanın bundan sonraki araştırmalara sağlayacağı fayda özetlenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI ve VERİ

2.1. Çoruh Nehri

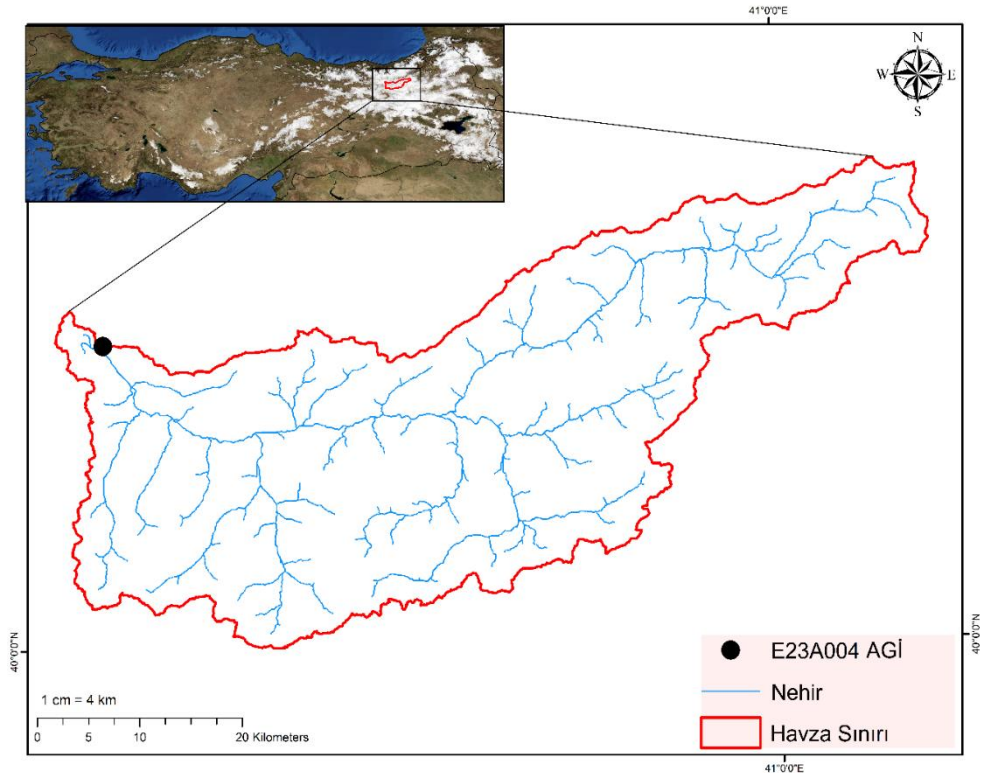
Çoruh Nehri, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde 3255 m rakımlı Mescit Dağları'nın batı yamaçlarından doğarak ilk olarak batıya doğru akar. Ardından Bayburt ovasında doğuya doğru yönelerek ilerler. İspir'in doğu yamacında bulunan Türkiye'nin en derin vadilerinden biri olan Çoruh Vadisi'nden geçerek Tortum ve Oltu çayları ile birleşir. Çoruh Nehri; Bayburt, Erzurum ve Artvin illerini geçtikten sonra Türkiye sınırlarından çıkarak Gürcistan'a geçer buradan da Karadeniz'e dökülür (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Çoruh Havzası, nehir ağı ve üzerindeki su yapıları

Türkiye'nin 25 hidrolojik havzasından biri olan Çoruh Havzası toplamda 22.100 km²'lik bir alana sahiptir. Ülkemizin en hızlı akan nehri olan Çoruh Nehri, yıllık ortalama 6.3 milyar m³'lük akış hacmine sahiptir ve yılda ortalama 5.8 milyon m³ sediment taşımaktadır (Sucu ve Dinç, 2008). Nehir toplamda 431 km uzunluğundadır. Nehrin 411 km'lik bölümü Türkiye sınırları içerisindeyken 20 km'lik bölümü Gürcistan sınırları içerisindeyken. Çoruh Nehri'nin, sınır aşan sular kategorisinde olması uluslararası önem arz ederken, içerisinde bulundurduğu farklı amaçlı su yapıları ve yüksek barajlar (Laleli, İspir, Güllübağ, Aksu, Arkun, Yusufeli, Artvin, Deriner, Muratlı ve Borçka) ise ulusal su kaynakları yönetiminde önemli bir planlama gerektirmektedir. Ayrıca bölgede daha önce uygulanmış herhangi bir kavramsal hidrolojik modelleme çalışması bulunmamaktadır.

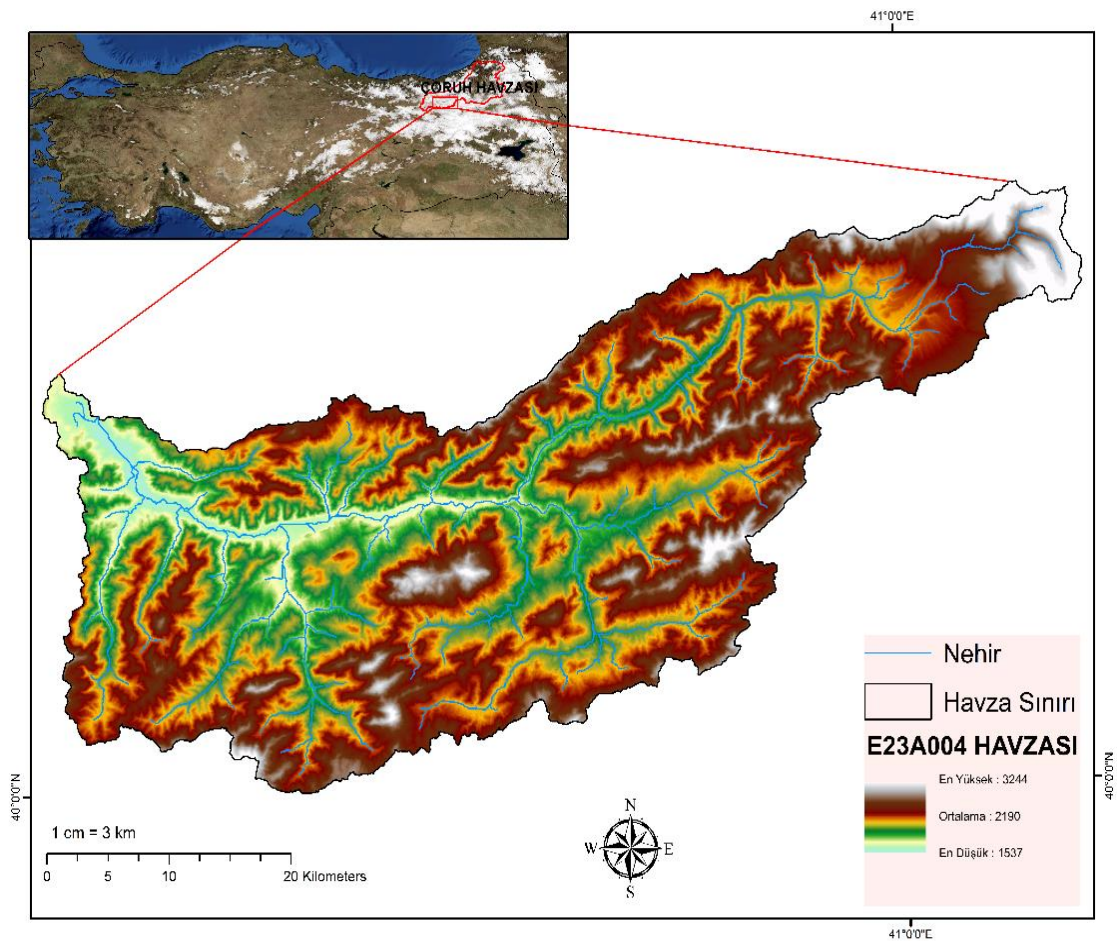
Bu çalışmada akımın önemli kısmının bahar ve erken yaz aylarında kar erimesinden oluştuğu Çoruh Nehri'nin memba bölümü seçilmiştir. Çalışma havzası 40° 02' – 40° 24' Kuzey Enlemleri ile 40° 12' – 41° 10' Doğu Boyamları arasında yer almakta ve çıkışında Devlet Su İşleri'nin (DSİ) işlettiği E23A004 Çoruh-Bayburt Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) bulunmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Çalışma alanı olarak seçilen E23A004 AGİ Havzası'nın konumu

2.2. Coğrafi Bilgi Sistemi Analizleri

Çalışma alanının özelliklerini daha iyi tanımak için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) platformu (ESRI ArcGIS 10.4.1) kullanılarak çeşitli yüzey analizleri gerçekleştirilmiştir. E23A004 Havzası'nın ASTER-GDEM kullanılarak üretilen 30 m çözünürlüğündeki Sayısal Yükseklik Modeli Şekil 2.3'de ve yükseklik aralıkları (zon) Tablo 2.1'de verilmiştir. Yaklaşık 1783 km² su toplama alanına sahip olan havzanın yüksekliği 1537 ile 3244 metre arasında değişmektedir. E23A004 Havzası 10 ayrı yükseklik aralığına bölünmüştür ve ortalama yüksekliği 2190 metre ile oldukça yüksek rakımda bulunan bir havza konumundadır.

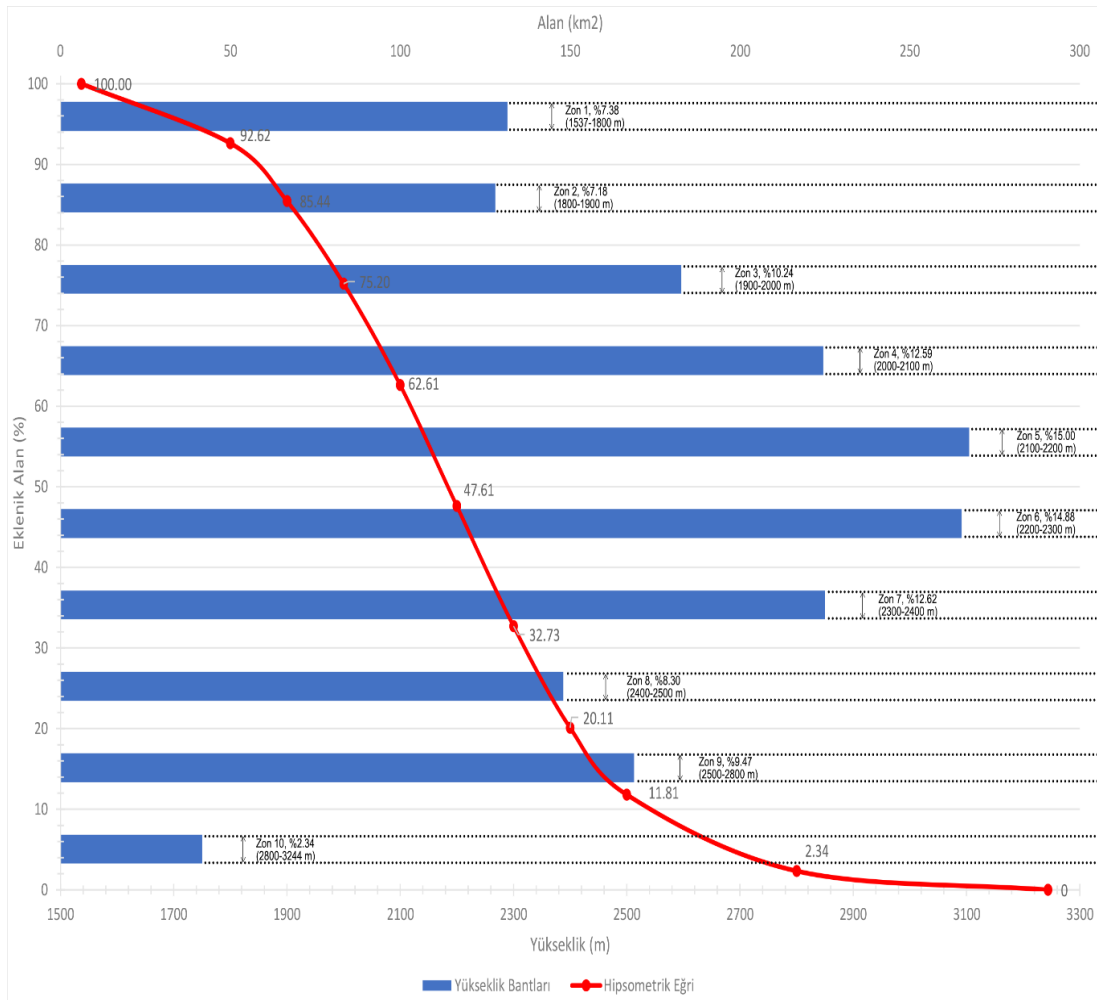


Şekil 2.3. E23A004 Havzası Sayısal Yükseklik Modeli haritası

Bir alandaki yüksekliklerin birikimli dağılım fonksiyonuna hipsometrik eğri denir. E23A004 Havzası'nın Şekil 2.4'te görülen hipsometrik eğrisi, Coğrafi Bilgi Sistemleri platformunda oluşturulan poligon haritası kullanılarak elde edilmiştir.

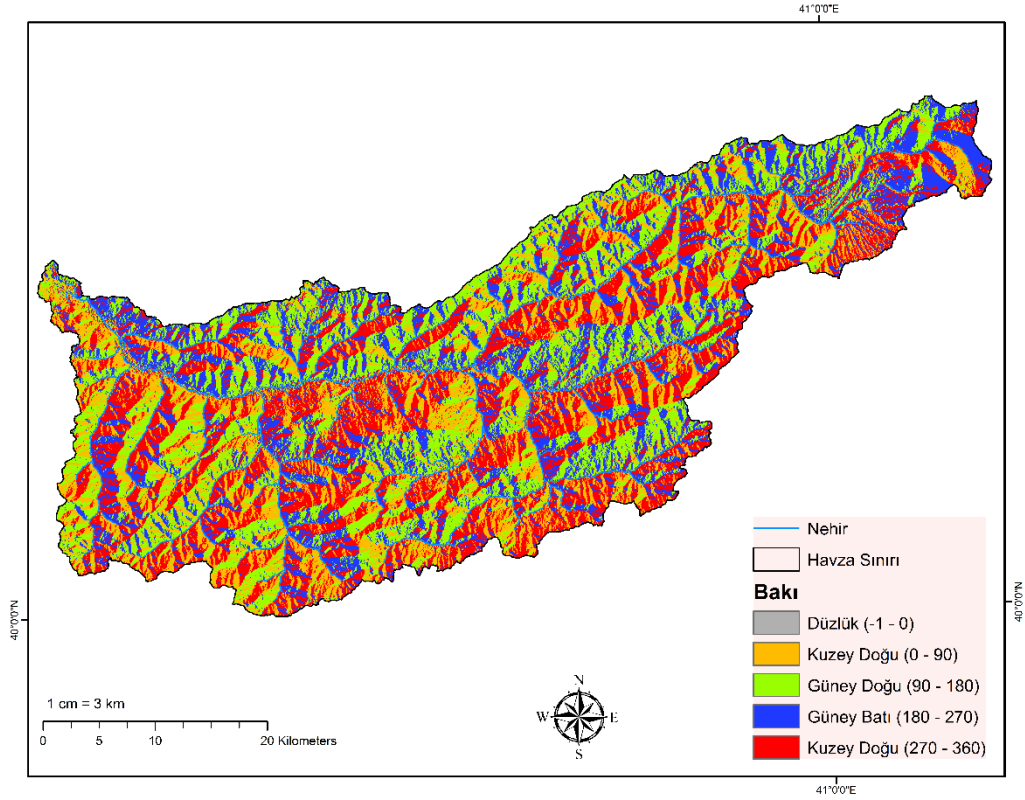
Tablo 2.1. E23A004 Havzası yükseklik dağılımı

Yükseklik (m)	Alan (km ²)	Alan (%)	Eklenik Alan (%)
1537-1800	131.66	7.38	7.38
1800-1900	127.96	7.18	14.56
1900-2000	182.69	10.24	24.80
2000-2100	224.53	12.59	37.39
2100-2200	267.46	15.00	52.39
2200-2300	265.28	14.88	67.27
2300-2400	224.99	12.62	79.89
2400-2500	147.99	8.30	88.19
2500-2800	168.85	9.47	97.66
2800-3244	41.70	2.34	100
Toplam	1783	100	



Şekil 2.4. E23A004 Havzası'nın hipsometrik eğrisi

Bakı, bir bölgedeki dağların güneş ışınlarını alışı yönünü belirttiği için havza üzerindeki terleme-buharlaşmayı ve kar erimesini etkilemektedir. Kar potansiyeli yüksek olan E23A004 Havzası'nda, bakı 5 sınıfa ayrılarak güneşlenme durumu değerlendirilmiştir. Havzanın çok az bir bölümü düz olmakla birlikte genellikle eşit bir yön dağılımı gözlenmektedir. (Şekil 2.5 ve Tablo 2.2)

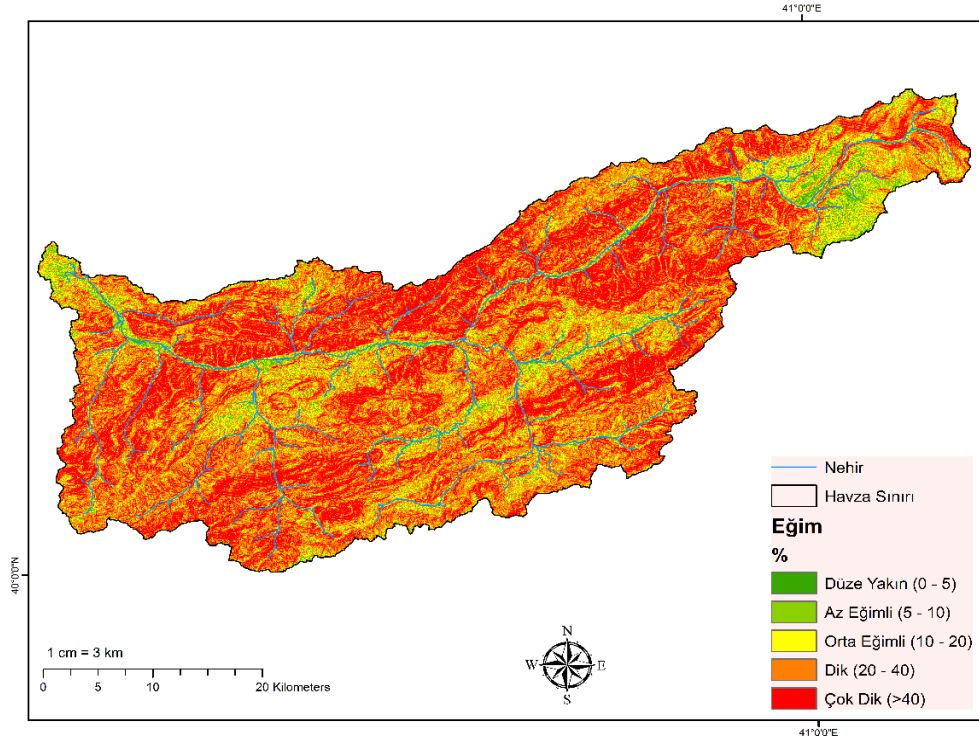


Şekil 2.5. E23A004 Havzası bakı haritası

Tablo 2.2. E23A004 Havzası bakı dağılımı

Sınıflandırma	Bakı (Derece)	Alan (km ²)	Alan (%)
Düzlük	-1-	7.40	0.41
Kuzey Doğu	0-90	393.11	22.05
Güney Doğu	90-180	466.53	26.17
Güney Batı	180-270	411.39	23.07
Kuzey Batı	270-360	504.57	28.30
Toplam		1783	100

Bir havzadaki eğim, oradaki yeryüzü şekillerinin ne kadar sarp veya ne kadar düz olduğunu ifade eder. Coğrafi Bilgi Sistemleri platformunda Sayısal Yükseklik Modeli kullanılarak çıkartılmış eğim (Şekil 2.6 ve Tablo 2.3) analizleri sunulmuştur. Buna göre ortalama eğimi yaklaşık % 35 ile havza oldukça eğimli durumdadır. Ayrıca havzanın 3/4 'lük bölümü dik eğimli ve sarp yamaçlara sahip olduğu için, yükseklik aralığı da göz önünde bulundurulunca bölgenin dağlık ve engebeli bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.

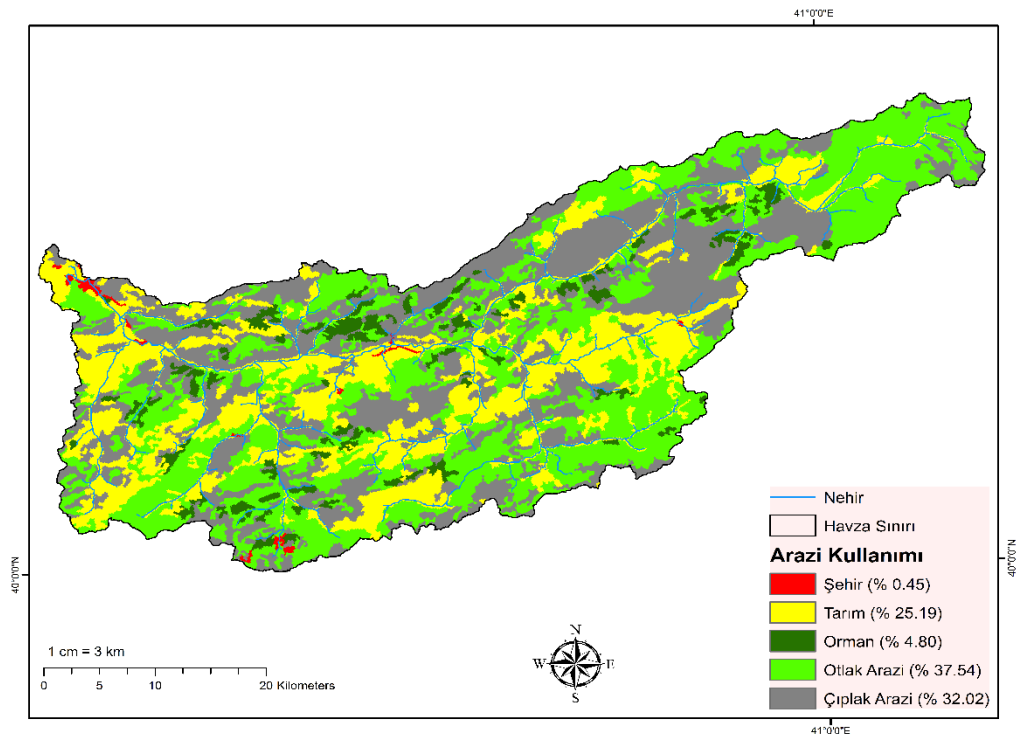


Şekil 2.6. E23A004 Havzası eğim haritası

Tablo 2.3. E23A004 Havzası eğim dağılımı

Sınıflandırma	Eğim (%)	Alan (km ²)	Alan (%)
Düzeye Yakın	0-5	45.02	2.52
Az Eğimli	5-10	118.58	6.65
Orta Eğimli	10-20	333.99	18.73
Dik	20-40	676.75	37.96
Çok Dik	>40	608.66	34.1
Toplam		1783	100

Bir havzanın arazi kullanımının, havzaya düşen yağışın akım potansiyelinin ve sızma kapasitesinin hesaplanmasında etken bir rolü vardır. Altlık olarak Corine haritası (http-1) kullanılarak hazırlanan arazi kullanım haritasına göre havzanın neredeyse tamamı tarımsal, mera ve çıplak arazilerden oluşmaktadır (Şekil 2.7 ve Tablo 2.4). Şehirleşme etkisinin yok denecek kadar az olması havzadaki doğal durumu gösterirken iklim ve topoğrafya koşulları düşünüldüğünde veri toplamanın zorluğunu da hissettirmektedir. Dolayısıyla benzer özelliklerdeki havzalarda uydu verisi kullanımı, düzenli izlenecek değişkenler için önemli rol oynamaktadır.



Şekil 2.7. E23A004 Havzası arazi kullanım haritası

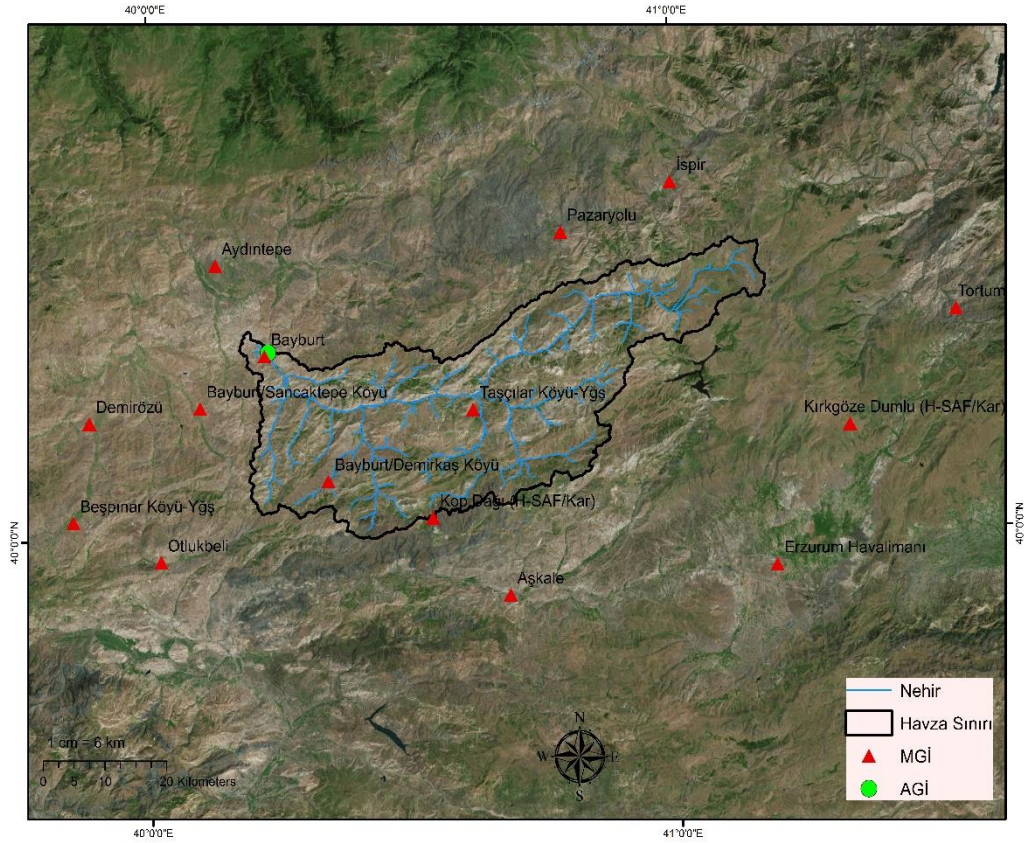
Tablo 2.4. *E23A004 Havzası arazi kullanımı dağılımı*

Sınıflandırma	Alan (km ²)	Alan (%)
Şehir	8.01	0.45
Tarım	449.16	25.19
Orman	85.58	4.80
Otlak Arazi	669.39	37.54
Çıplak Arazi	570.86	32.02
Toplam	1783	100

2.3. Hidro-meteorolojik Veri Analizleri

Hidrolojik çalışmaları yürütebilmek için hidro-meteorolojik verilere sahip olmak gerekir. Bu verilere su potansiyelinin öngörülmesini gerektiren her çalışmada ihtiyaç duyulabilir. Verilerin miktarı ve kalitesi, gerekli öngörünün yapılmasına olanak tanıyacak yeterlilikte olmalıdır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) ve Devlet Su İşleri (DSİ), Türkiye’de hidro-meteorolojik verilerin toplanıp arşivlenmesini üstlenen kurumlardır.

E23A004 Havzası’nda kullanılan yağış ve sıcaklık verileri, havzanın içinde ve çevresinde konuşlanan Meteoroloji Gözlem İstasyonlarının (MGI) ağırlıklı ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Bu istasyonların konumları Şekil 2.8’da gösterilmiş ve Tablo 2.5’te özetlenmiştir.



Şekil 2.8. E23A004 Havzası'nda kullanılan istasyon haritası

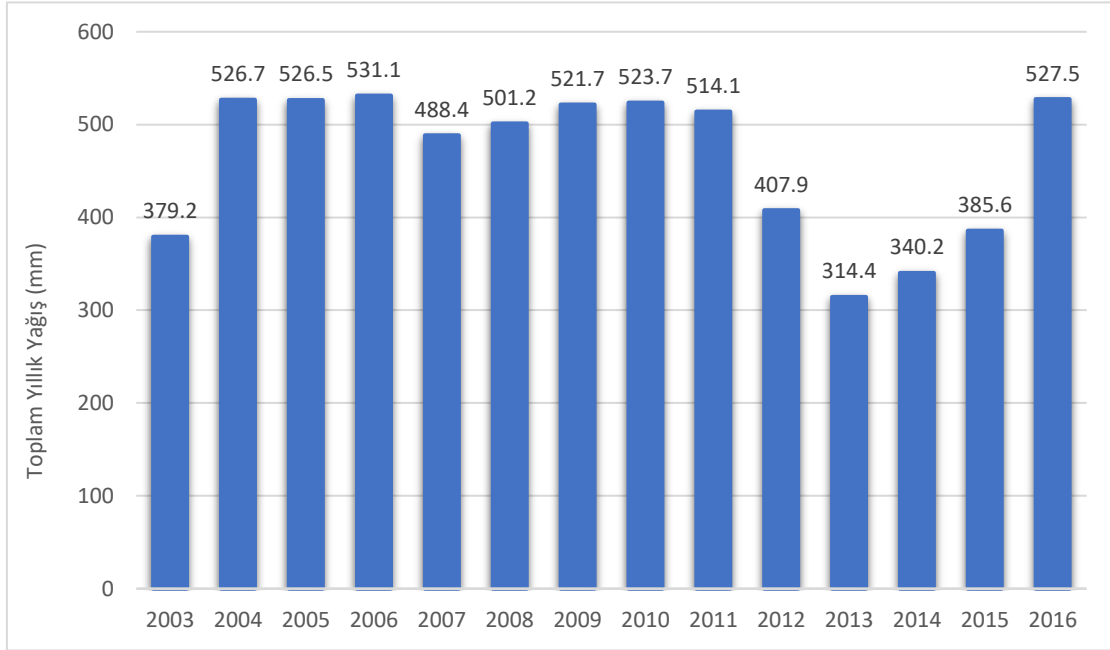
Tablo 2.5. E23A004 Havzası'nda kullanılan istasyon bilgileri

İstasyon Adı	İstasyon Türü	İstasyon Numarası	Yükseklik (m)
İspir	MGİ	17666	1223
Pazaryolu	MGİ	18368	1520
Bayburt	MGİ	17089	1584
Tortum	MGİ	17688	1586
Aydıntepe	MGİ	18557	1597
Aşkale	MGİ	18205	1691
Otlukbeli	MGİ	18363	1740
Demirözü	MGİ	18219	1757
Erzurum Havalimanı	MGİ	17096	1758
Sancaktepe Köyü	MGİ	19050	1770
Beşpınar Köyü	MGİ	18718	1777
Demirkaş Köyü	MGİ	19051	1933
Taşçılar Köyü	MGİ	18719	2090
Kop Dağı	MGİ	17691	2415
Kırkgöze Dumlu	MGİ	17669	2666
Bayburt	AGİ	E23A004	1545

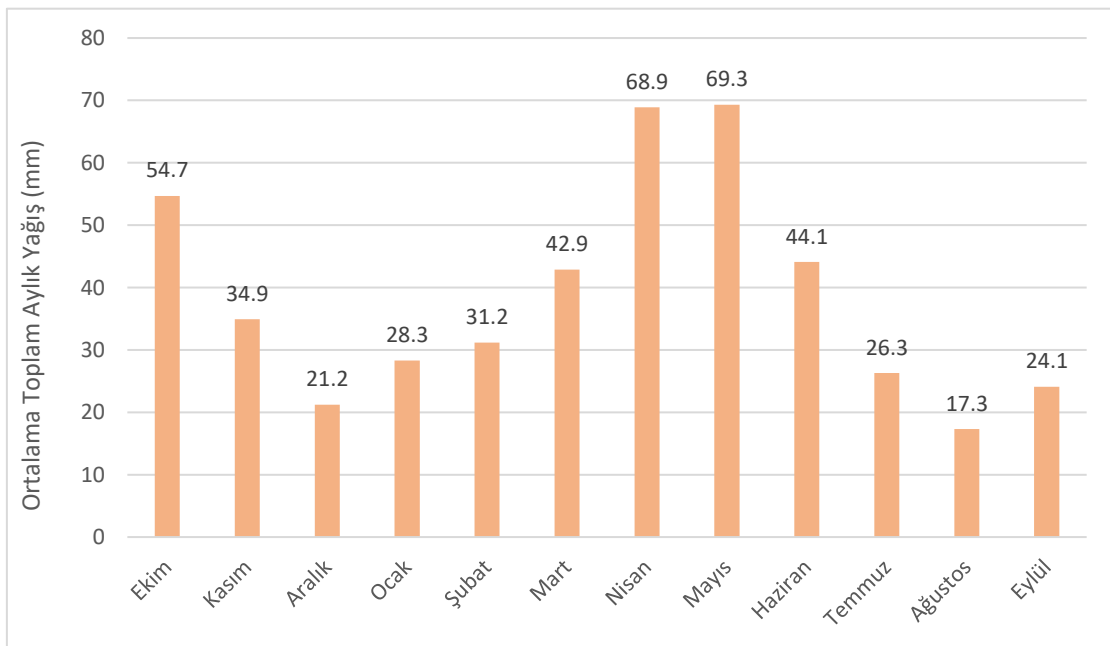
MGİ: Meteoroloji Gözlem İstasyonu AGİ: Akım Gözlem İstasyonu

İlgili kurumlardan temin edilen MGİ ve AGİ verisi istenilen düzende işlenmiş, hatalar ayıklanmış ve eksikler giderilerek havzayı en uygun şekilde temsil edecek duruma getirilmiştir. Havzadaki akım gözlem istasyonu 1941 yılının Eylül ayından itibaren kurularak akım verisi toplanmaya başlanmıştır. Ancak hidrolojik modelleme çalışması mevcut meteorolojik ve uydu verilerinden dolayı 2003 su yılı ve sonrası için yapılmıştır. Bununla birlikte, havza içi ve civarındaki meteorolojik istasyon ağının son yıllarda güncellenerek artış göstermesinden sonra havza içi meteorolojik olayların daha iyi temsil edileceği düşünülmektedir.

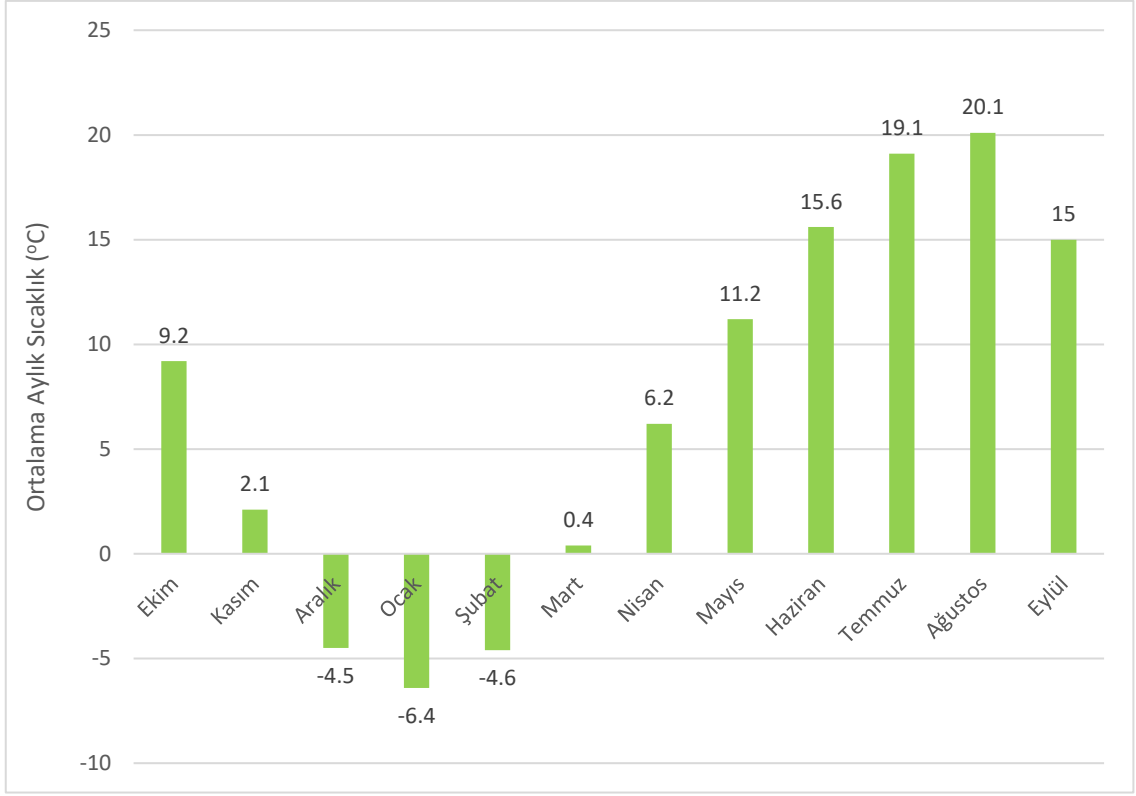
Yapılan veri analizlerinde 2003 - 2016 su yılları arasında havza üzerindeki meteorolojik istasyonlardan elde edilen günlük toplam yağış ve ortalama sıcaklık verileri ile havza çıkışında 1545 m yüksekliğinde bulunan Çoruh-Bayburt Akım Gözlem İstasyonu'ndan alınan akım verileri kullanılmıştır. Bu verilerle oluşturulan çeşitli yıllık ve aylık grafikler Şekil 2.9, Şekil 2.10, Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



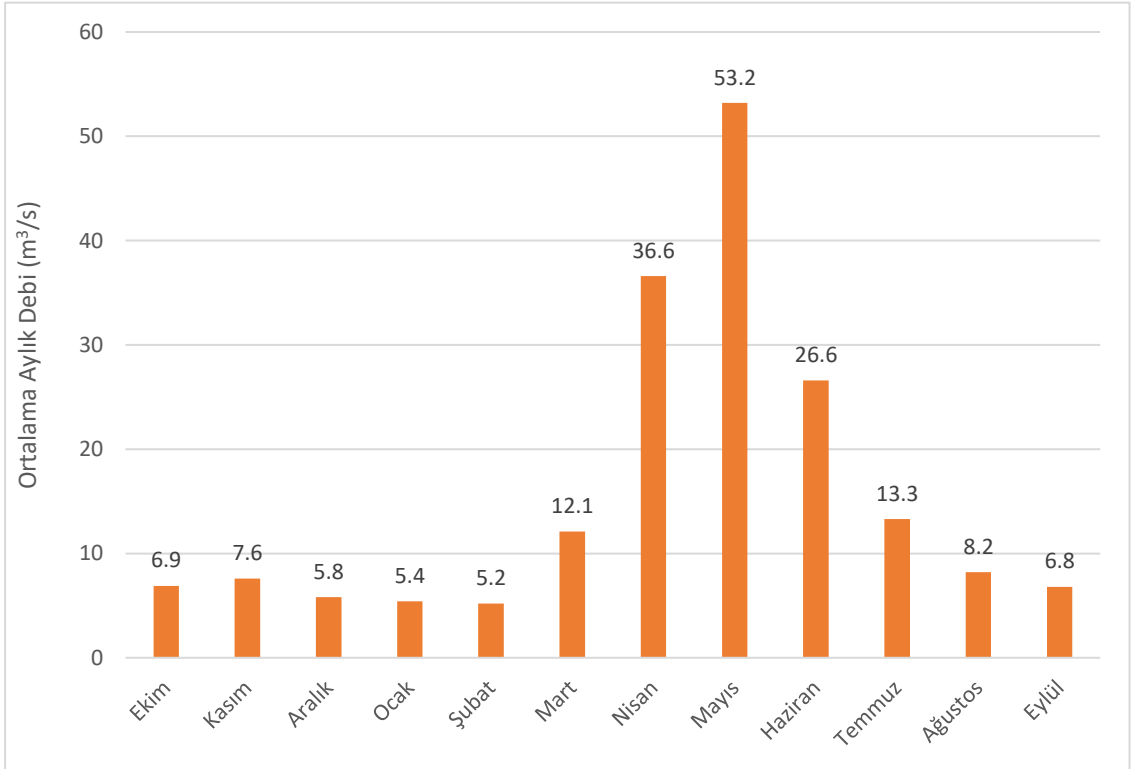
Şekil 2.9. 2003 – 2016 su yıllarında havzaya düşen toplam yağış (mm) grafiği



Şekil 2.10. 2003 – 2016 su yıllarında havzanın aldığı aylık ortalama toplam yağış (mm) grafiği



Şekil 2.11. 2003 – 2016 su yıllarında havzanın aylık ortalama sıcaklık (°C) grafiği



Şekil 2.12. 2003 – 2016 su yıllarında havzanın aylık sahip olduğu ortalama akım (m³/s) grafiği

Bu grafikler birbirleriyle ilişkilendirilerek incelendiğinde havzayı yorumlamada yardımcı olmaktadır. Havzaya bir yılda düşen ortalama toplam yağış 463.44 mm'dir. Şekil 2.11'e göre Aralık, Ocak ve Şubat aylarında sıcaklık sıfırın altında seyrettiği için o aylarda yağışın kar şeklinde düştüğü anlaşılabılır. Bahar ayları ile birlikte sıcaklığın artmasıyla yağın karın erimeye başlamasından ve en çok yağışın Nisan ve Mayıs aylarında düşmesinden dolayı en fazla akım değeri Mayıs ayında gözlenir. Ayrıca bahar aylarındaki yağışın hem kendisi akıma katılır hem de sıcaklık artışıyla birlikte karın erime hızını artırarak da akıma katkı yapar. Havzanın en az yağış aldığı ve aynı zamanda en sıcak olduğu ay Ağustos'tur.

Havzanın karakteristik özelliklerinden dolayı çevresindeki diğer havzalarda olduğu gibi bir yılın yarısı süresince havzada kar görülebilir. İlkbahar aylarında havzadaki karın erimeye başlamasıyla artan akım değerleri taşkınlara sebep olabilir. Havzada meydana gelen bir taşkın, sulamada ve enerji üretiminde kullanılabilecek suyun kaybına neden olur.

Su yıllarını ve model sonuçlarını yorumlamada yardımcı olması için hidro-meteorolojik veriler, su yılları bazında kuru, normal ve ıslak olarak adlandırmak için analiz edilmiştir. Bu analizde toplam yağış, toplam debi ve ortalama sıcaklık değerleri ölçüt alınmıştır. 2003 – 2016 yıllarını kapsayan 14 yılın ölçüt değişkenlerinin (x) ortalamaları ($\bar{x}$) ve standart sapmaları (σ) hesaplanmıştır. Değerlendirme aşağıda verilen denklemlere göre yapılmıştır.

$$\text{Eğer } x < (\bar{x} - \sigma) = \text{Kuru} \quad (2.1)$$

$$\text{Eğer } x > (\bar{x} + \sigma) = \text{Islak} \quad (2.2)$$

$$\text{Eğer } (\bar{x} - \sigma) \leq x \leq (\bar{x} + \sigma) = \text{Normal} \quad (2.3)$$

Tablo 2.6. E23A004 Havzası 2003-2016 su yılları değerlendirmesi

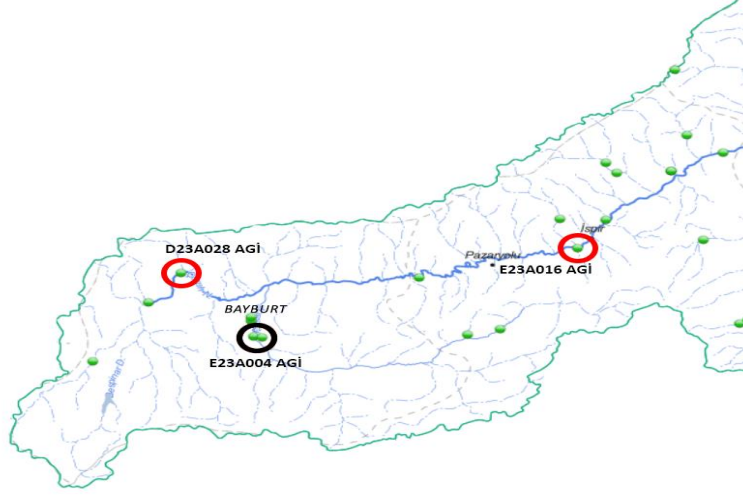
Su Yılı	Toplam Yağış (mm)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Toplam Debi (m³)	Genel Durum
2003	379.2 Kuru/Normal	6.0 Normal	5006.9 Normal	Normal
2004	526.7 Normal	6.3 Normal	7323.6 Normal	Normal
2005	526.5 Normal	5.7 Soğuk	7405.7 Islak/Normal	Normal/Islak
2006	531.1 Normal/Islak	7.3 Normal	7997.0 Islak	Islak
2007	488.4 Normal	5.9 Soğuk	7318.6 Normal/Islak	Normal
2008	501.2 Normal	6.6 Normal	5931.1 Normal	Normal
2009	521.7 Normal	6.5 Normal	5048.7 Normal	Normal
2010	523.7 Normal	9.3 Sıcak	6353.5 Normal	Normal
2011	514.1 Normal	7.5 Normal	5553.5 Normal	Normal
2012	407.9 Normal	6.3 Normal	*5106.8 Normal	Normal
2013	314.4 Kuru	7.8 Normal	4285.7 Normal	Normal/Kuru
2014	340.2 Kuru	7.8 Normal	2338.9 Kuru	Kuru
2015	385.6 Normal/Kuru	8.3 Sıcak	4085.5 Normal/Kuru	Normal/Kuru
2016	527.5 Normal	6.6 Normal	-	
Ortalama	463.4	7.0	5720.7	
Standart Sapma	79.4	1	1671.9	
Ort + SS	542.8	8	7392.6	
Ort - SS	384	6	4048.8	

*Doldurulmuş akımdan hesaplanmıştır.

2.5. Eksik Akım Verisi Tamamlama Çalışması

Su kaynaklarının planlanması ve işletilmesine yönelik havza bazındaki çalışmalarda, meteorolojik ve hidrolojik verilere ihtiyaç vardır. Bu verilerin eksiksiz olması önemlidir. Fakat çeşitli çalışmalarda, farklı kurumlardan meteorolojik ve hidrolojik veriler temin edilirken, geçmiş yıllara ait verilerde çeşitli sebeplerle eksikler olabilmektedir. Bu veri eksikliği; ölçüm cihazında oluşan problemler, ulaşım zorlukları ve elverişli olmayan iklim koşulları gibi nedenlerle ortaya çıkabilmektedir. Bu koşullara bağlı oluşabilecek eksik veriler, özellikle hidrolojik modelleme ile su kaynaklarının planlanması ve projelendirilmesi çalışmalarında önemli sorunlar yaratmaktadır. Özellikle ülkemizdeki hidrolojik verilerde, yukarıda sayılan nedenlerden dolayı, önemli miktarda veri eksiklikleri vardır (Usul, 2013). Eksik verilerin tamamlanması için, interpolasyon, regresyon analizi, zaman serisi analizi ve yapay sinir ağları gibi çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Ayrıca çeşitli ampirik denklemler ile de benzer havza karakteristiklerine sahip akım gözlem verileri ve meteorolojik verilerden eksik veriler tamamlanmaktadır (Gündoğdu vd., 2001). Akım gözlem verilerinde karşılaşılan eksik verilerin tamamlanmasında farklı metotlar kullanılsa da, veriler arasındaki ilişki de (korelasyon) göz önünde bulundurulmalıdır (Burgess ve Webster, 1980). Böylece ölçümü olmayan bir istasyon için, o havzanın karakteristik özelliklerine benzer komşu havzalarından temin edilen veriler ile bölgeselleştirme yöntemi kullanılarak akım tahmini yapılabilir (Blöschl vd., 2013).

Bu çalışmada, daha önce belirtildiği üzere E23A004 Akım Gözlem İstasyonu'nun (AGİ) 2012 su yılında gözlenen akım verisi mevcut değildir. Bunun sebebi ise, 2012 su yılında Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin (EİE) işlettiği akım gözlem istasyonunun Devlet Su İşleri'ne (DSİ) devredilmesidir. Hidrolojik modelleme çalışmasından önce eksik verilerin doğru bir şekilde tamamlanması amacıyla Çoruh Havzası üzerinde bulunan; D23A028 Büyükçay-Çatıksu (1440.7 km²) ve E23A016 Çoruh-İspir Köprüsü (5505.2 km²) AGİ verileri 2003 su yılından 2015 su yılına kadar DSİ'den temin edilmiştir (Şekil 2.13). Bu istasyonların birbirleri ile olan akım ilişkisinin matematiksel bağıntıları regresyon analizi uygulanarak belirlenmiştir. İncelenen AGİ'lere ait akımların yıllık ortalaması, minimum ve maksimum akımları ile standart sapması gibi temel istatistik verileri m³/s cinsinden hesaplanmıştır (Tablo 2.7).



Şekil 2.13. Çalışma için seçilen istasyonların konumları

Şekil 2.13’de yeşil noktalı yerler Çoruh Havzası’nda konumlanmış akım gözlem istasyonlarını temsil etmektedir. Kırmızı noktalar, bu çalışma için seçilen D23A028 Büyükçay-Çatıksu Akım Gözlem İstasyonu ile E23A016 Çoruh-İspir Köprüsü istasyonlarını temsil etmektedir. Siyah nokta ile gösterilen Akım Gözlem İstasyonu ise çalışma alanı olarak belirlenen E23A004 Akım Gözlem İstasyonu’na aittir.

Tablo 2.7. İstasyonların temel istatistik verileri

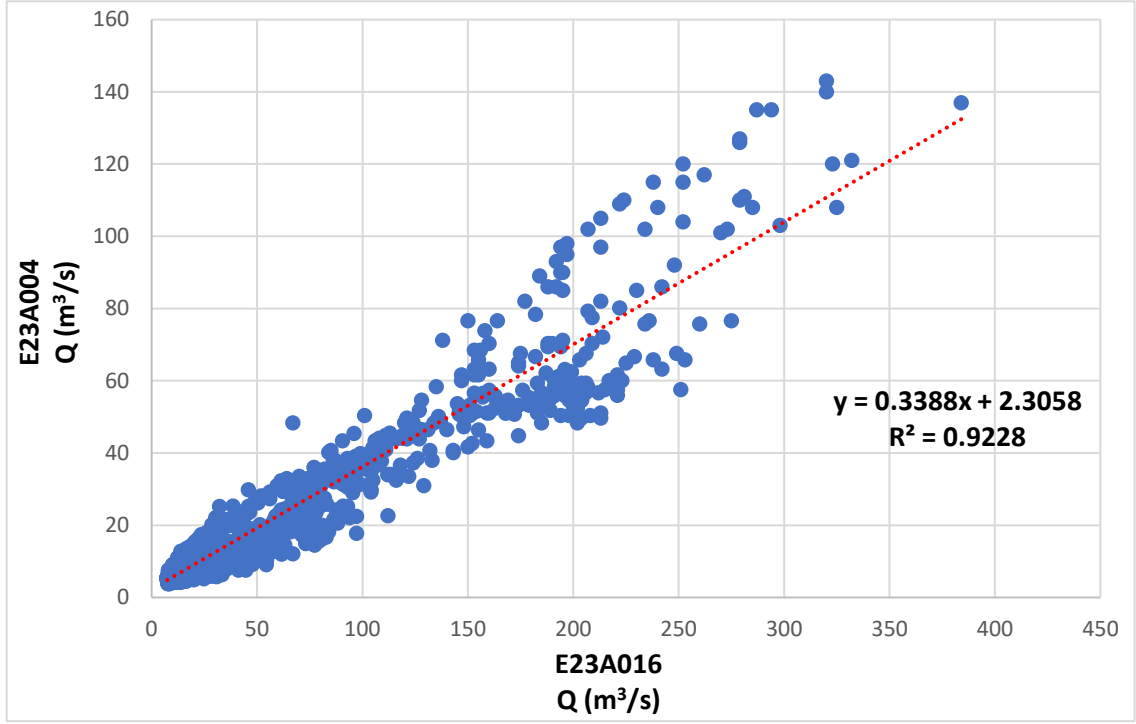
Yıllar	E23A004 AGİ				D23A028 AGİ				E23A016 AGİ			
	Min	Max	Ort	St.Sapma	Min	Max	Ort	St.Sapma	Min	Max	Ort	St.Sapma
2003	3.66	72.1	16.35	17.09	0.51	45.5	6.09	9.46	5.38	207	38.17	46.80
2004	2.96	78.4	20	19.31	0.38	44.5	7.27	10.6	7.2	285	50.28	57.13
2005	4.02	232	20.29	25.82	1.6	74	11.08	15.97	6.4	531	50.49	71.75
2006	4.42	137	21.91	26.46	1.51	65.9	9.99	14.07	7.88	384	55.39	70.86
2007	4.42	143	20.05	27.04	-	-	-	-	9.14	320	45.9	62.74
2008	4.8	65	16.21	14.32	-	-	-	-	7.94	196	39.69	43.78
2009	4.71	60.2	13.83	12.94	0.26	35	4.59	6.17	7.36	212	35.75	43.72
2010	3.47	72.1	17.41	16.77	0.79	36	6.25	7.07	8.23	257	51.87	49.66
2011	3.89	67.6	15.21	17.15	1.19	32.7	4.9	6.75	7.58	253	46.66	65
2012	-	-	-	-	0.63	24	3.31	3.72	7.36	187	34.38	44.22
2013	3.27	54.9	11.74	11	0.72	46.9	4.71	7.53	7.36	212	39.03	48.05
2014	3.67	15.6	6.41	2.67	0.3	3.05	1.18	0.59	4.28	136	18.62	18.41
2015	3.15	52.6	11.19	11.59	0.56	21.3	2.73	3.73	6.2	157	31.44	38.82

Hesaplanan bu istatistik verileri, iki ya da daha çok değişken arasındaki bir ilişki olup olmadığını ve eğer bir ilişki söz konusu ise bu ilişkinin yönü ve gücünü belirlemek amacıyla yapılan regresyon-korelasyon analizi için önem arz etmektedir. Korelasyon katsayısının hesaplanması Denklem 2.4'te belirtilmiştir. Korelasyon katsayısının 1 değerine yakın olması, istasyonlar arasındaki hidrolojik ilişkinin doğrusal ve kuvvetli olduğunu göstermektedir.

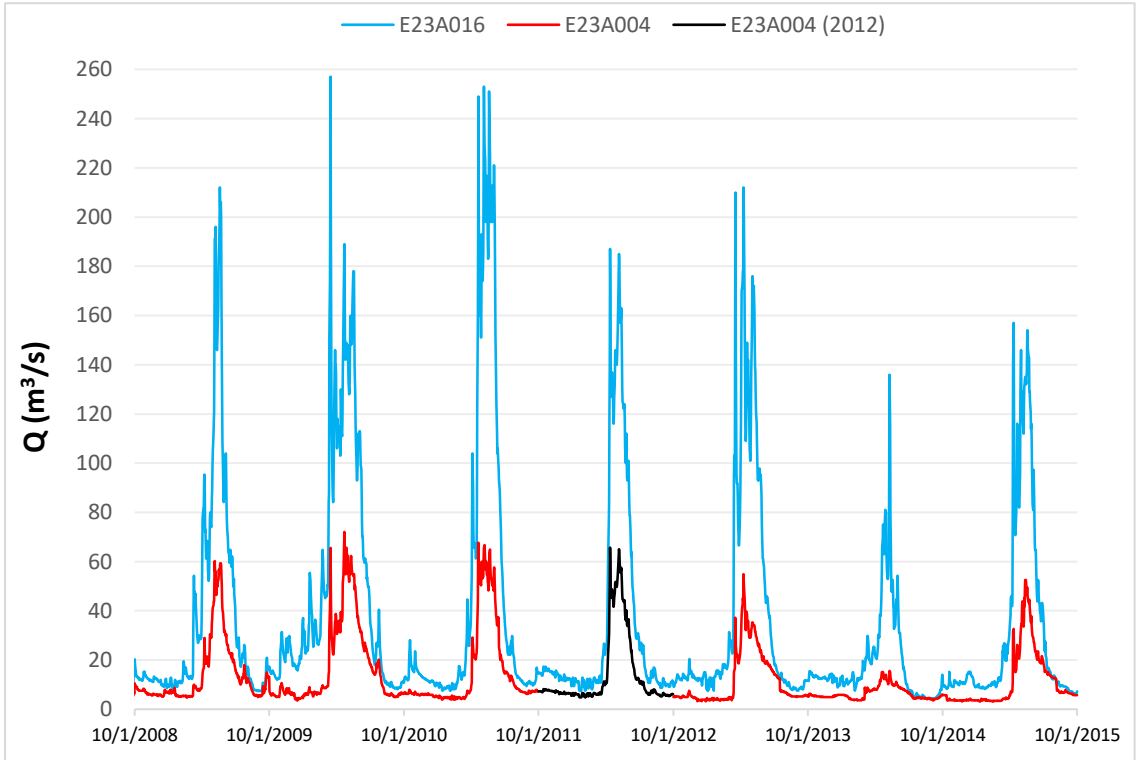
$$r_x = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.4)$$

Denklemden belirtilen r_x korelasyon katsayısını, x_i ve y_i değerleri ise iki akım ölçüm istasyonunu temsil etmektedir. AGİ'lere ait ortalama akım değerlerini ifade eden parametreler ise $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ 'dir. Bu denklemden elde edilen değerler göz önüne alındığında E23A004 istasyonu ile yan kolda bulunan ve farklı karakteristik özelliklere sahip D23A028 istasyonu ile olan akım ilişkisi oldukça zayıftır. Bu nedenle, eksik verilerin sağlıklı olarak tamamlanabilmesi için D23A028 istasyonunun yapılan analizlerde dikkate alınmaması gerekmektedir. E23A004 AGİ verileri ile aynı kolda bulunan E23A016 AGİ verileri arasındaki akım ilişkisi yıl yıl ve tümsel olarak incelenmiştir. Bu iki istasyonun birbirleri ile kuvvetli bir akım ilişkisine sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.14). 2 pikli düzgün bir hidrografa sahip 2012 su yılı için doldurulan akım sayı aralığı, daha güvenilir analiz yapılması adına 0-200 m³/s arası dikkate alınarak yapılmıştır.

Korelasyon matris grafiğinden elde edilen verilere göre iki istasyon arasındaki akım ilişkisi regresyon analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Yıl yıl yapılan regresyon analizleri sonucunda elde edilen matematiksel ilişkilerden hangi yıllardaki akımların en iyi şekilde E23A004 istasyonundaki akımları temsil ettiği hesaplanmıştır. Böylece, yapılan analizlere göre E23A004 istasyonuna ait olan eksik 2012 su yılı akım verisi grafikten elde edilen denkleme göre tamamlanmıştır (Şekil 2.15).



Şekil 2.14. İstasyonlar arasındaki ilişkilerin incelenmesi ve matematiksel denklemin seçilmesi



Şekil 2.15. Tamamlanan 2012 su yılı akım verisi ve iki istasyon arasındaki akım uyumu

3. UZAKTAN ALGILAMA ANALİZLERİ

Uzaktan algılama teknolojisi, nokta verisine karşılık gelen mekansal veriyi sağlayabildiği, dünya üzerindeki geniş ve uzak alanların durumunu ölçebildiği için pek çok bilimsel ve mühendislik amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır. Hidroloji alanında da su kaynaklarının modellenmesi, yönetilmesi, işletilmesi ve çeşitli tahmin çalışmalarında mekansal veriye ihtiyaçtan dolayı yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle kar hidrolojisi çalışmalarında, kar örtüsünün havza içerisindeki dağılımını ve zamanla değişimini belirlemek amacıyla uydu görüntülerinden faydalanılmaktadır.

3.1. Kar Çalışmalarının Uzaktan Algılama Tarihçesi

Globalleşen Dünya’da su kaynakları sağlama ve yönetimi açısından kar erimeleri önemli bir yere sahiptir. Özellikle kış aylarında biriken kar, ilk bahar ve yaz aylarında erimeye başlar. Yer gözlem istasyonları noktasal olup, yakın çevresini temsil etmesi sebebiyle kar kaplı alanların günlük değişimlerini gözlemlemek zor olmaktadır. Bu nedenle uydu verileri, karın yansıma özelliğinden dolayı kar hidrolojisi ve günlük hava durumu tahmini için zamana bağlı mekansal değişimi takip etmeyi kolaylaştırmaktadır.

Su kaynaklarının modellenmesi, yönetilmesi, işletilmesi ve çeşitli tahmin çalışmalarında nokta verisine karşılık gelen mekânsal veriyi sağlayabilmesi için uzaktan algılama teknolojisi yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle kar hidrolojisi çalışmalarında, kar örtüsünün dağılımını ve zamanla değişimini belirlemek amacıyla uydu görüntülerinden yararlanılmaktadır. Dünyadaki gelişmeler çeşitli çözünürlüklerde yeni uyduların kullanımına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda erime ve birikme dönemlerinde kar örtüsü değişiminin izlenmesinde, yüksek zamansal çözünürlükteki uydular oldukça önemlidir.

Yeryüzünü Gözlemeleme (Earth Observation - EO) verisi, kar hidrolojisinde 1975’li yıllarda uygulanmaya başlanmıştır. Öncü çalışmalar Rango ve diğ. (1977) tarafından EO verisi kullanılarak, kar erimesinden kaynaklı akım tahmini uygulamalarıyla gerçekleştirilmiş ve Rott (1978), farklı sensörler kullanılarak Alp Dağları’nın karla kaplı alan uygulaması yapmıştır. EO verisi kullanılarak, kar ve buz haritalama çalışmaları Hall ve Martinec (1985) tarafından özetlenmiştir. Uydu görüntüsünden üretilen karla kaplı alan verisinin hidrolojik modellemede kullanılmasının yararını gösteren bir çalışma

Martinec ve Rango (1987) tarafından verilmiştir. Wiesnet vd., (1987) kar kaplı alanların haritalanması için uzaktan algılama metodlarının önemini vurgulamıştır. Frank vd., (1988), Harrison ve Lucas (1989), Hu vd., (1993), Seidel vd., (1994), Baumgartner ve Rango (1995), Rango (1996), Nagler ve Rott (1997) bireysel olarak sık sık karla kaplı alan izleme çalışmaları gerçekleştirmiştir. Ancak geniş kullanıcı kitlesiyle paylaşılan metod ve uygulama sonuçları özellikle Avrupa'da HydAlp (Rott vd., 2000) ve SnowTools (Gueriussen vd., 2000) projeleri ile başlamıştır.

3.2. Kar Kaplı Alan Uydu Görüntü Analizleri

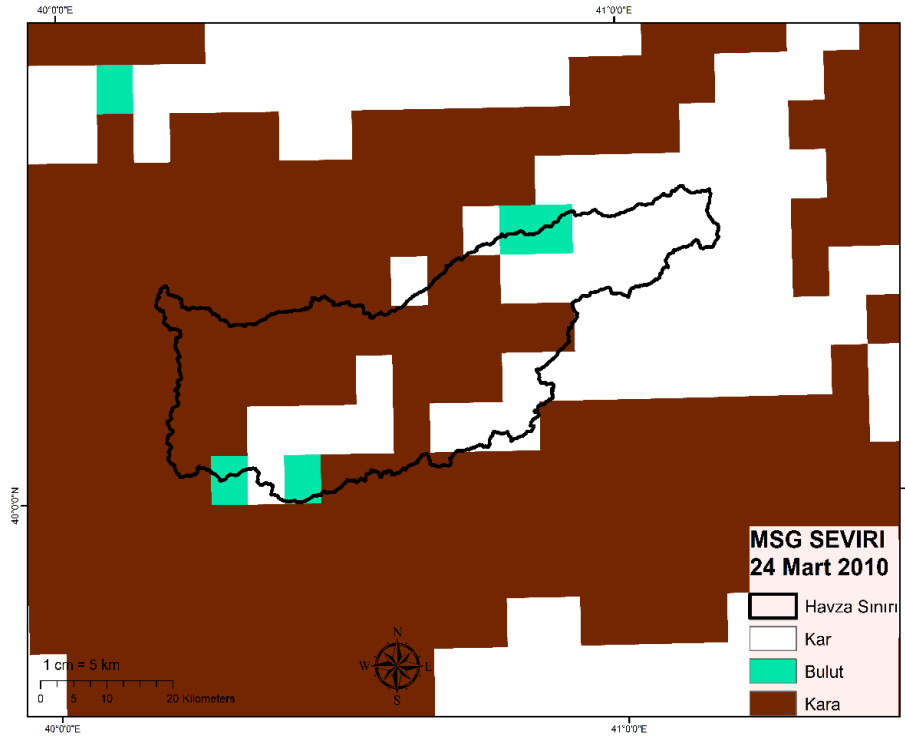
Dağlık arazide kar ölçümlerinin manuel veya otomatik şekilde yapılması ancak ölçülen nokta ve yakın civarını temsil edebilmektedir. Daha geniş alansal bazda yakın gerçek zamanlı kar örtüsü değişimini takip etmenin en etkili yolu uydu görüntüleri kullanmaktır (Parajka ve Blöschl, 2012). Rango (1994), mevsimsel karla kaplı alan değişimini gözlemlemenin en etkili yolunun uzaktan algılama tekniklerinin kullanılması olduğunu ifade etmektedir. Özellikle kış aylarında biriken karın kapladığı alan ile bahar ve ilk yaz ayları sırasında eriyen karın farklı alan ve kotlarda değişiminin en kolay takibi uydu görüntüleri kullanılarak yapılabilmektedir. Dünyadaki gelişmeler çeşitli çözünürlüklerde yeni uyduların kullanımına olanak tanımaktadır. Erime ve birikme dönemlerinde kar örtüsü değişiminin izlenmesinde, yüksek zamansal çözünürlükteki uydular oldukça önemlidir.

Karın yansıma özelliklerinden dolayı güncel uzaktan algılama yöntemleriyle kar örtüsü izlemesi en iyi şekilde elektromanyetik spektrumun görünür (VIS) ve yakın kızıl ötesi (NIR) bölgelerinde olmaktadır (Hall vd., 2002). Dolayısıyla karla kaplı alanların düzenli ve verimli olarak izlenmesinde bahsedilen spektral aralıklarda, orta çözünürlüklü optik görüntüleyicilerin kullanılmasının uygun olduğunu bilinmektedir. Ancak optik görüntüleyicilerle izlenen kar örtüsü en çok bulut durumundan etkilenmektedir. Bulutluluk durumlarında iki yol izlenmektedir 1) görüntüyü buluttan arındırmak için çeşitli filtreleme algoritmalarının uygulanması, 2) iyi çözünürlüklü optik görüntüleri kaba çözünürlüklü pasif mikrodalga görüntüleriyle harmanlayarak bulut etkisinin azaltılmasıdır. Bu çalışmada her iki yönteminde kullanıldığı üç ayrı uydu görüntüsü (MSG-SEVIRI, MODIS ve IMS) çalışma havzasındaki kar kaplı alan takibi için kullanılmıştır.

3.2.1.MSG-SEVIRI kar ürünü

Meteosat-9 veya MSG-2 olarak da bilinen Meteosat Second Generation (MSG) ana aygıtı Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), 21 Aralık 2005 yılında uzaya fırlatılmıştır. Yeryüzünün ve atmosferin 12 farklı dalga boyunda olan görüntülerini her 15 dakikada bir verir. Mekansal çözünürlüğü Türkiye’de 5 km’dir. MSG-SEVIRI verisi 08:00 ve 15:45 saatleri arasında 32 görüntü üretmektedir.

MSG-SEVIRI bütün yarımküreyi tarayabilen sabit yörüngeli bir uydudur. Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından 10 yılı aşkın bir süredir MSG-2 (HRT) veri formatında temin edilmektedir. E23A004 Havzası’nı gösteren örnek bir MSG-SEVIRI karla kaplı alan uydu görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir. Kullanılan bulut filtreleme işlemlerinden sonra çalışma havzası sonuçları verilecektir.



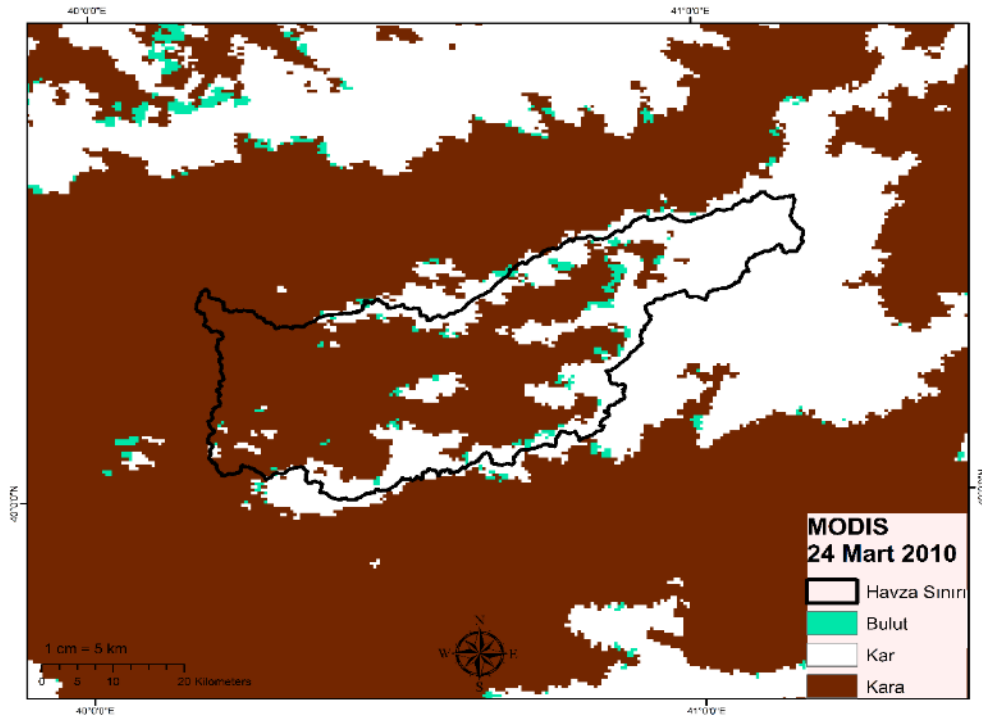
Şekil 3.1. 24 Mart 2010 tarihli MSG-SEVIRI kar kaplı alan görüntüsü

3.2.2 MODIS kar ürünü

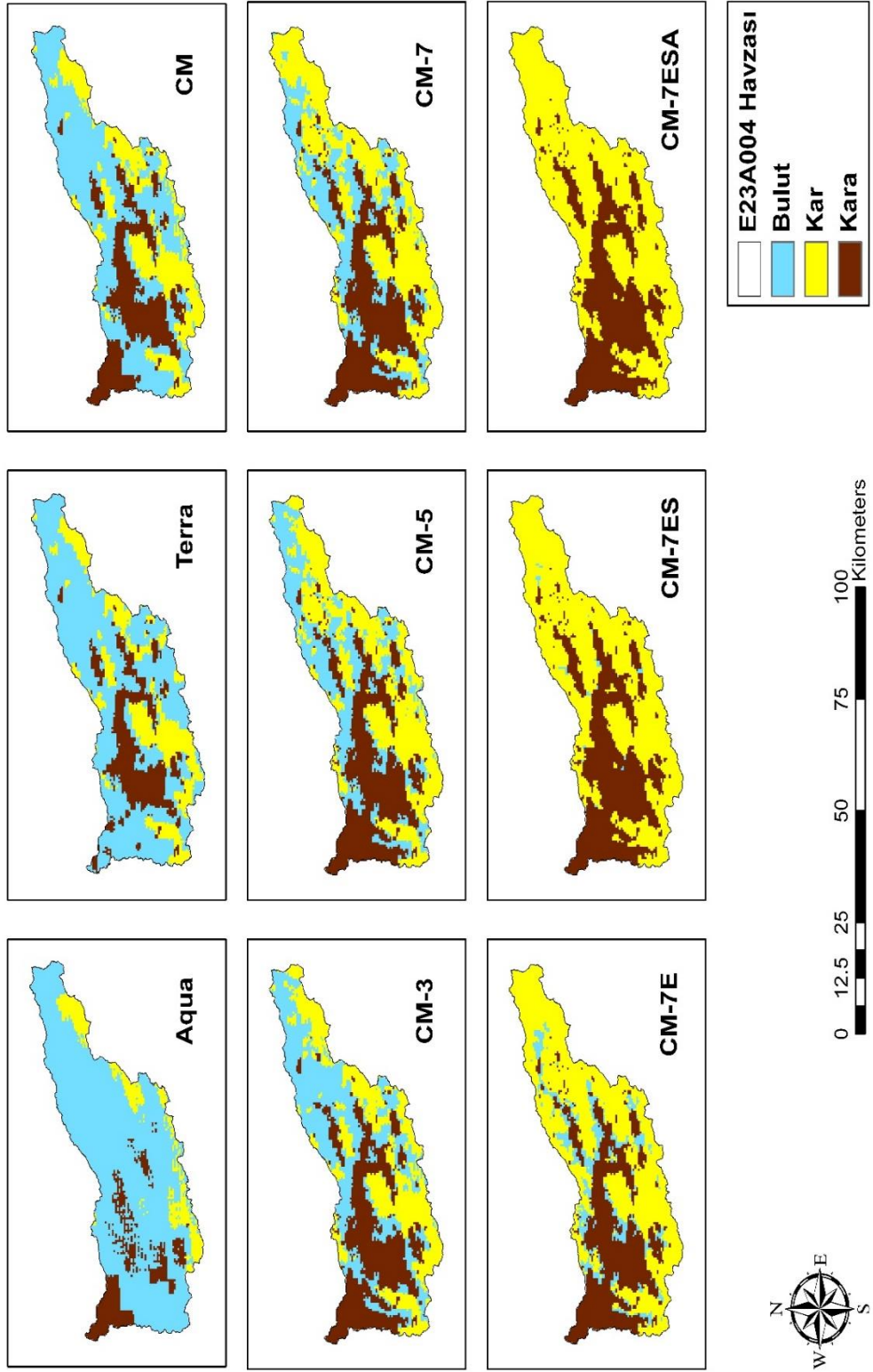
Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA), Dünya İzleme Sistemi (Earth Observing System, EOS) programı çerçevesinde Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) algılayıcısı Terra platformu üzerinde 18 Aralık 1999 ve Aqua platformunda 4 Mayıs 2002 tarihinde uzaya fırlatmıştır (Hall vd., 2002).

Terra ve Aqua platformları üzerindeki MODIS algılayıcısı, dünya yüzeyi ve bulutların görüntüsünü 36 dar spektral bantta, 0.4 μm 'den 14 μm 'ye kadar dalga boyu aralığında, günlük tekrarlama süresinde ve 250 m (bant 1-2), 500 m (bant 3-7) ve 1000 m (bant 8-36) mekansal çözünürlükte sağlamaktadır. 24 Şubat 2000 tarihinde veri toplamaya başlayan MODIS/Terra uydusunun ekvator geçiş zamanı yaklaşık saat 10:30 civarındadır. 24 Haziran 2002 tarihinde veri toplamaya başlayan MODIS/Aqua uydusunun ekvator geçiş zamanı ise yaklaşık saat 13:30 civarındadır. Bu iki geçiş zamanıyla (Terra sabah, Aqua öğleden sonra), bulutların 3 saat içerisinde yerinin ve alansal dağılımının değişmesinden dolayı, daha açık kar örtüsü görüntülerinin elde edilme olasılığı artmaktadır (Hall ve Riggs, 2007).

Bu çalışmada, zamansal çözünürlüğü günlük ve mekansal çözünürlüğü 500 m olan MODIS Terra/Aqua kar ürünleri (MOD/MYD10A1) kullanılarak zamansal ve yükseklik filtreleri uygulanmıştır. Kullanılan uydu görüntüleri üzerindeki bulut temizleme algoritması tamamlanmış başka bir projenin (BAP1207F117) konusu olduğu için detaylarına girilmeyecektir ve sadece çalışma havzası sonuçları sunulacaktır. E23A004 Havzası'nı gösteren örnek bir MODIS karla kaplı alan uydu görüntüsü Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.2. 24 Mart 2010 tarihli MODIS kar kaplı alan görüntüsü



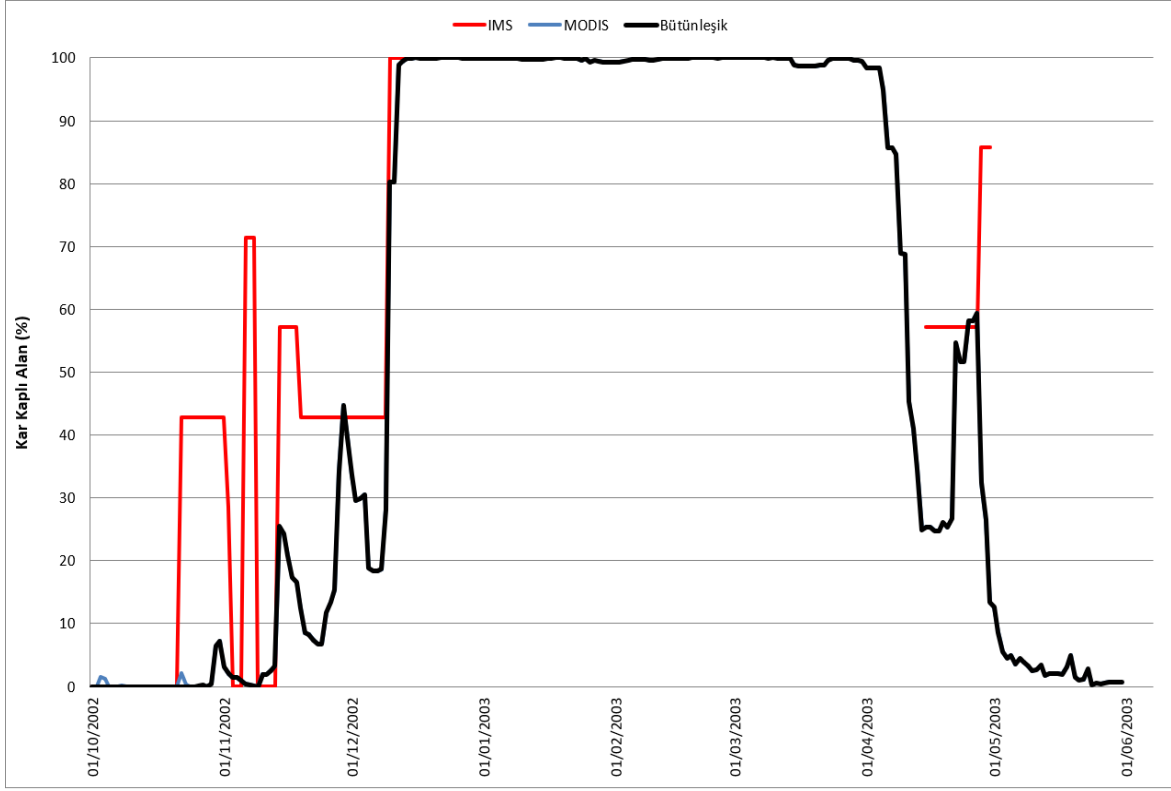
Şekil 3.3 Terra ve Aqua görüntüleri ile harmanlama işlemi sonucu üretilen görüntüler (3 Nisan 2015 tarihli görüntü)

Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi Ulusal Çevre Uydu Veri ve Bilgi Servisi (National Oceanic and Atmospheric Administration's National Environmental Satellite Data and Information Service, NOAA/NESDIS) tarafından 1966'dan itibaren sağlanan Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) verisi olan haftalık kar ve buzul haritaları, kuzey yarımküreye ait kar örtüsünün izlenmesinde en uzun süreli uydu kaynaklı çevresel veri olarak kabul edilir (Robinson vd., 1993).

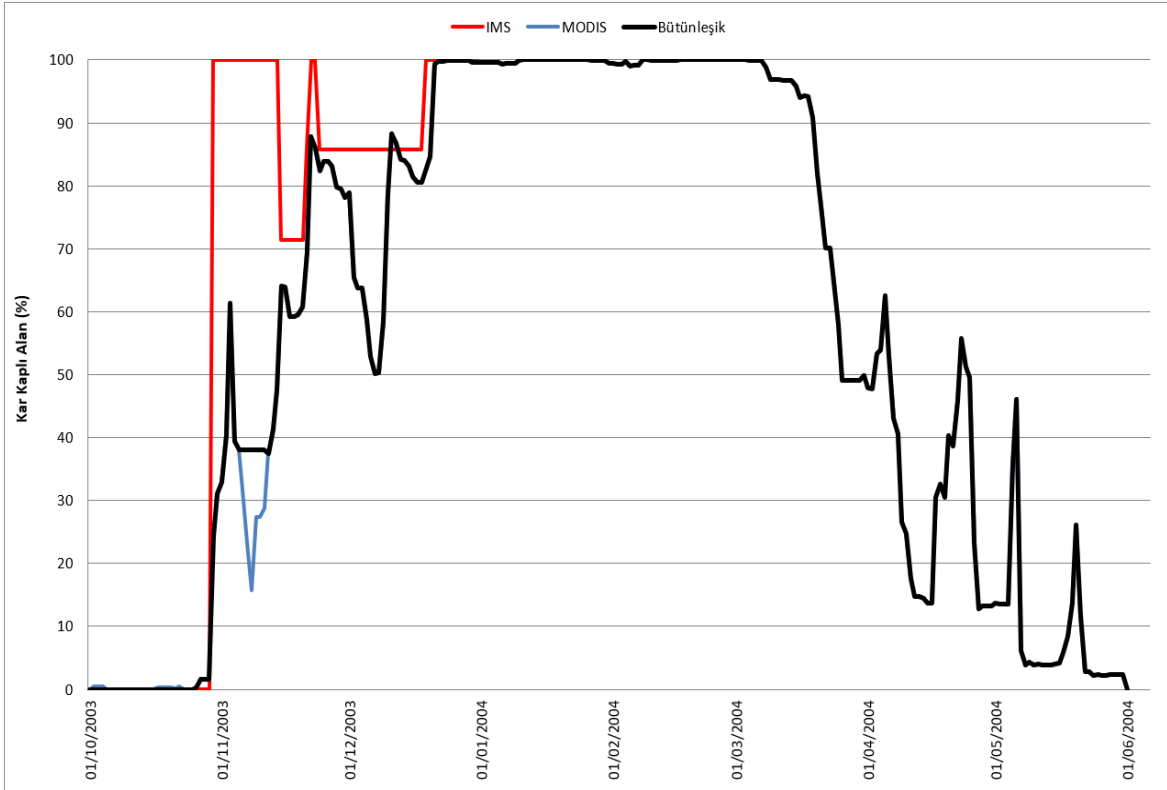
26

IMS ürünü olan kar ve buz haritaları 190 km mekansal çözünürlüklü haftalık veriler olarak 1966'dan itibaren 30 yılı aşkın süre üretilmiştir. Kullanıcıların daha yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlüklü veri ihtiyacı IMS verisinin geliştirilmesine sebep olmuştur ve 1997'de verinin mekânsal çözünürlüğü 24 km olurken zamansal çözünürlük de günlük olmuştur. IMS verisinin ulaşılabilir üç farklı sürümü vardır. İlk sürüm olan 24 km mekansal ve günlük zamansal çözünürlüklü ürün 4 Şubat 1997'den itibaren üretilmektedir. Mekansal çözünürlüğü 4 km, zamansal çözünürlüğü de günlük olarak iyileştirilen ürünün ikinci sürümü 23 Şubat 2004 tarihinde sağlanmaya başlamıştır. Fakat mevcut çalışmaların veri sıkıntısına uğramaması için 24 km mekansal çözünürlüklü verinin temini de devam etmektedir. IMS'in en son ve yeni sürümündeki değişiklik (Aralık 2014 sonrası) ise mekansal çözünürlüğün 1 km olarak iyileştirilmesidir. Her üç sürümün üretilmesinde kullanılan girdiler uydulardaki ve veri kaynaklarında değişimlere bağlı olarak farklılık göstermektedir (nsdic.org/data/docs/noaa). Bu çalışmada modelleme tarihlerinin uyumu açısından ikinci sürüm ürünü olan 4 km mekansal çözünürlüklü günlük IMS ürünü kullanılmıştır.

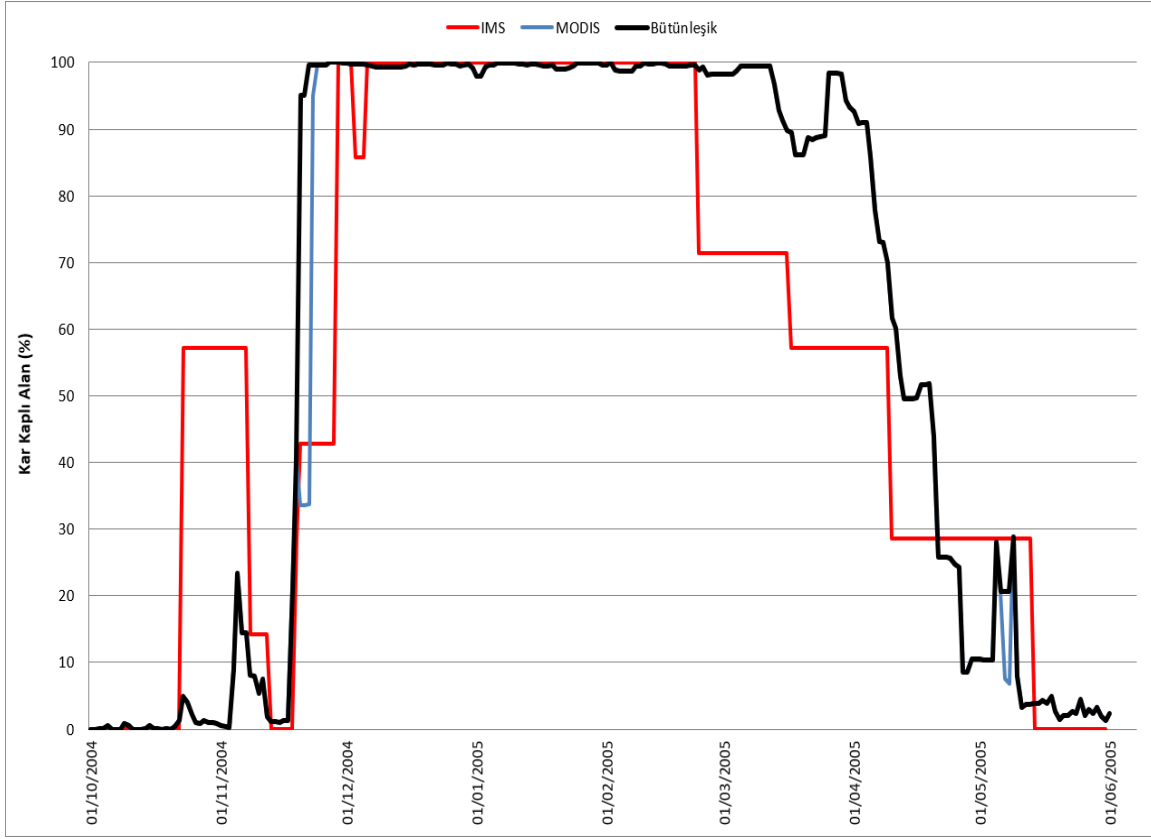
Bu çalışmada, E23A004 Havzası'nda kar kaplı alan takibi için üç ayrı uydu görüntüsü kullanılmıştır. Eldeki mevcut uydu verilerine göre; 500 m MODIS verisi 2003 su yılından itibaren, 4 km IMS verisi 2006 su yılından itibaren, 24 km IMS verisi 2003-2005 su yılları arasında ve 5 km MSG-SEVIRI verisi 2008 su yılından itibaren E23A004 Havzası için işlenmiştir. Kar Kaplı Alan (KKA) verisi için hazırlanan grafikler hidrolojik modelleme periyodunu gözeterek 2003-2015 su yıllarını kapsamaktadır (Şekil 3.5-3.17). Farklı çözünürlüklere sahip üç uydunun birleşiminden oluşan bütünleşik serileri, hidrolojik model çıktılarıyla karşılaştırılmak üzere kullanılacaktır. Grafik sonuçlarından yorumlanacağı üzere optik uyduların (MODIS ve MSG-SEVIRI) bulut temizleme işlemlerinden sonra daha doğal ve gerçekçi bir patern izlediği gözlenmektedir. Birçok uydudan harmanlanan IMS görüntüleri ise bulutsuz olmasına rağmen daha yavaş değişim gösterdiği söylenebilir. Ancak IMS görüntülerinin buluttan etkilenmemesinden dolayı özellikle havzadaki kar yağışlarını daha erken tespit edebildiği görülmektedir. Bu sebeplerle kar birikme sezonunda (accumulation) IMS görüntülerinden, erime sezonunda (depletion) ise optik görüntülerden faydalanılması gerektiği sonucu çıkmaktadır.



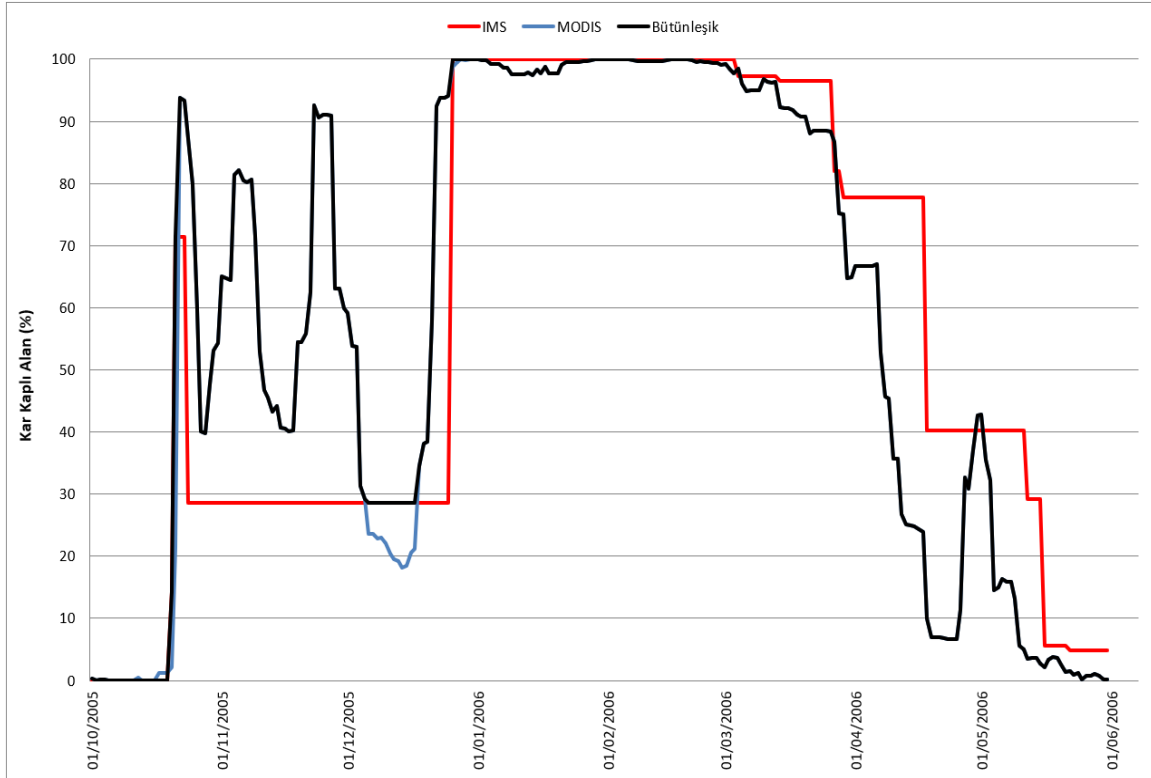
Şekil 3.5. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2003 su yılı



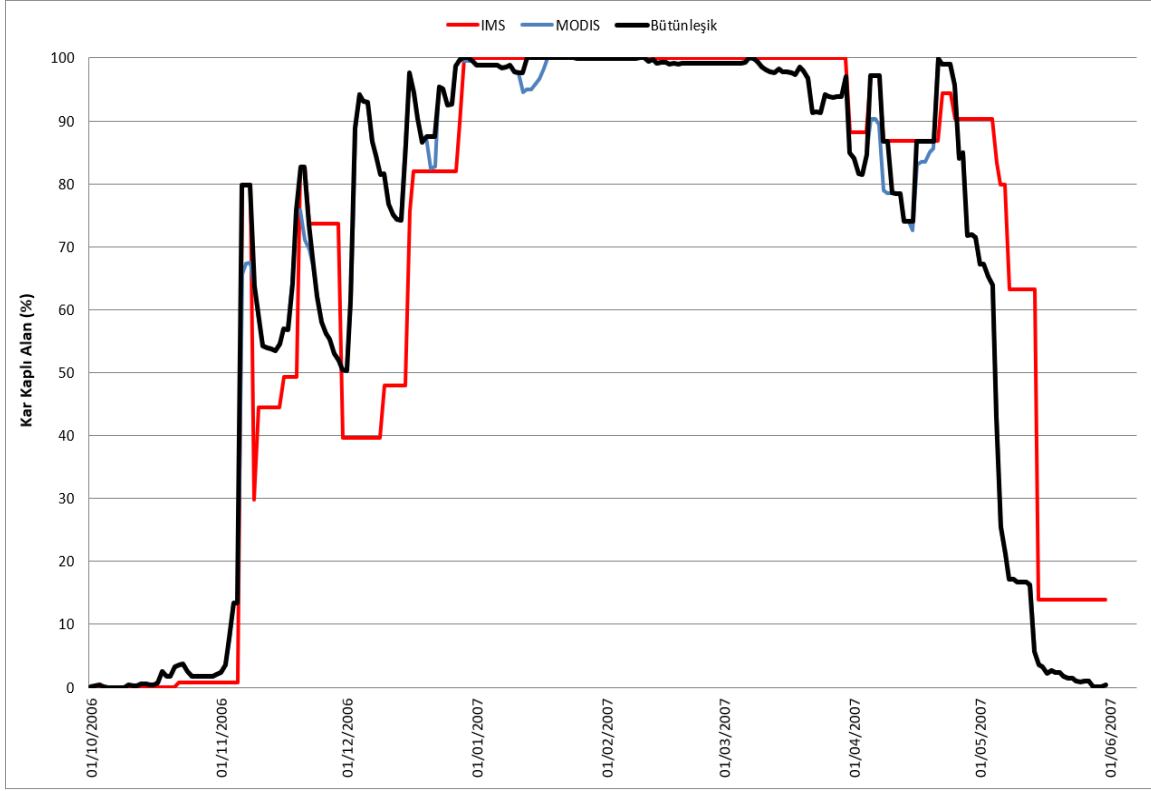
Şekil 3.6. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2004 su yılı



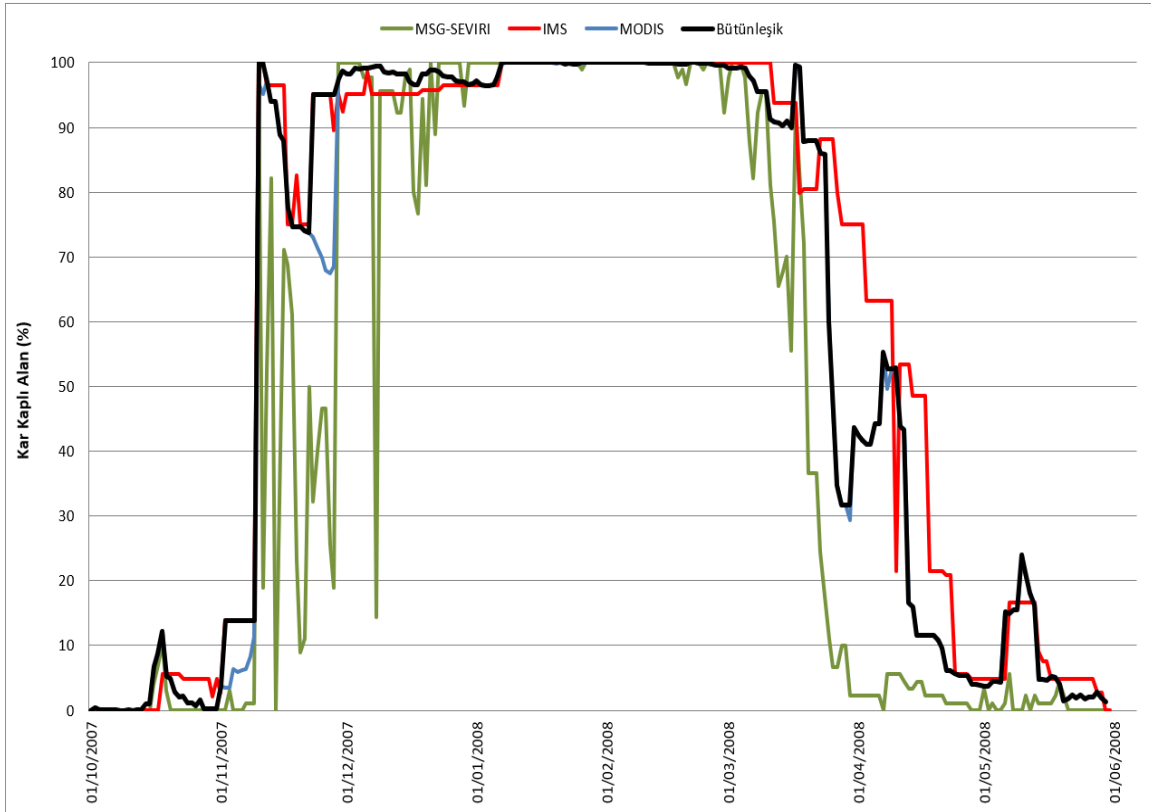
Şekil 3.7. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2005 su yılı



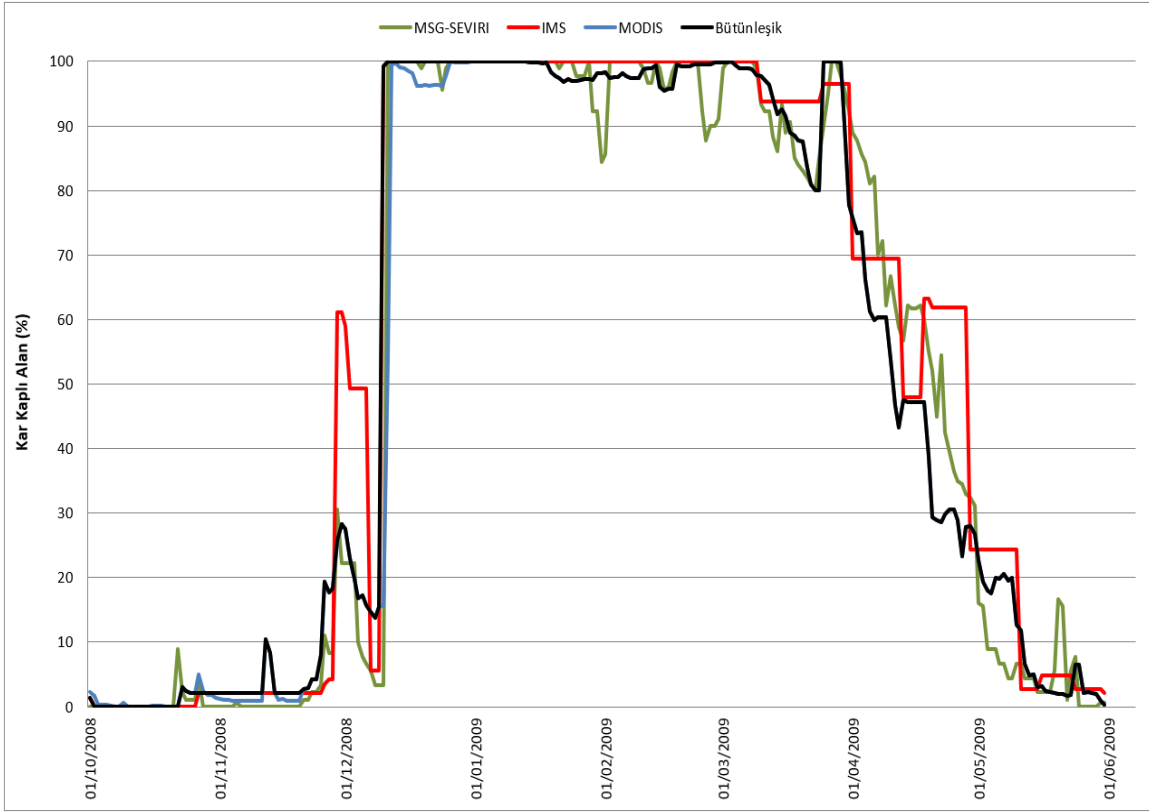
Şekil 3.8. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2006 su yılı



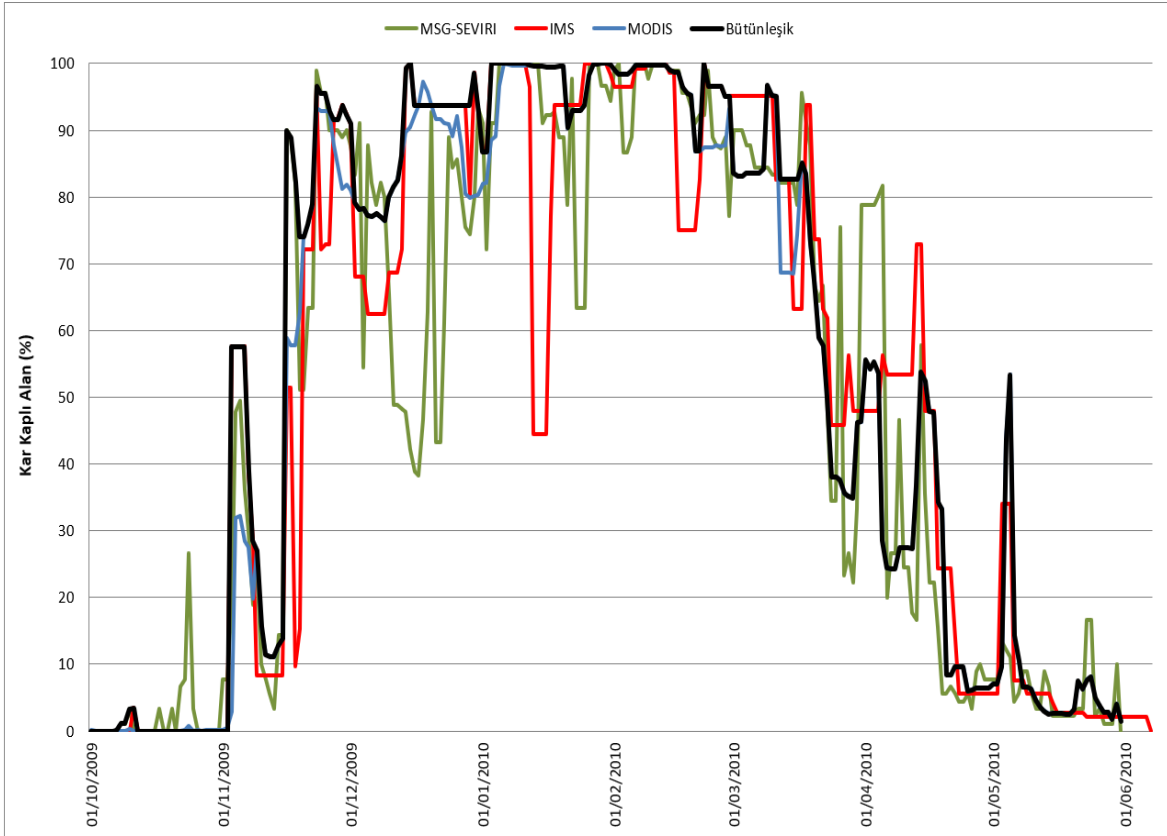
Şekil 3.9. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2007 su yılı



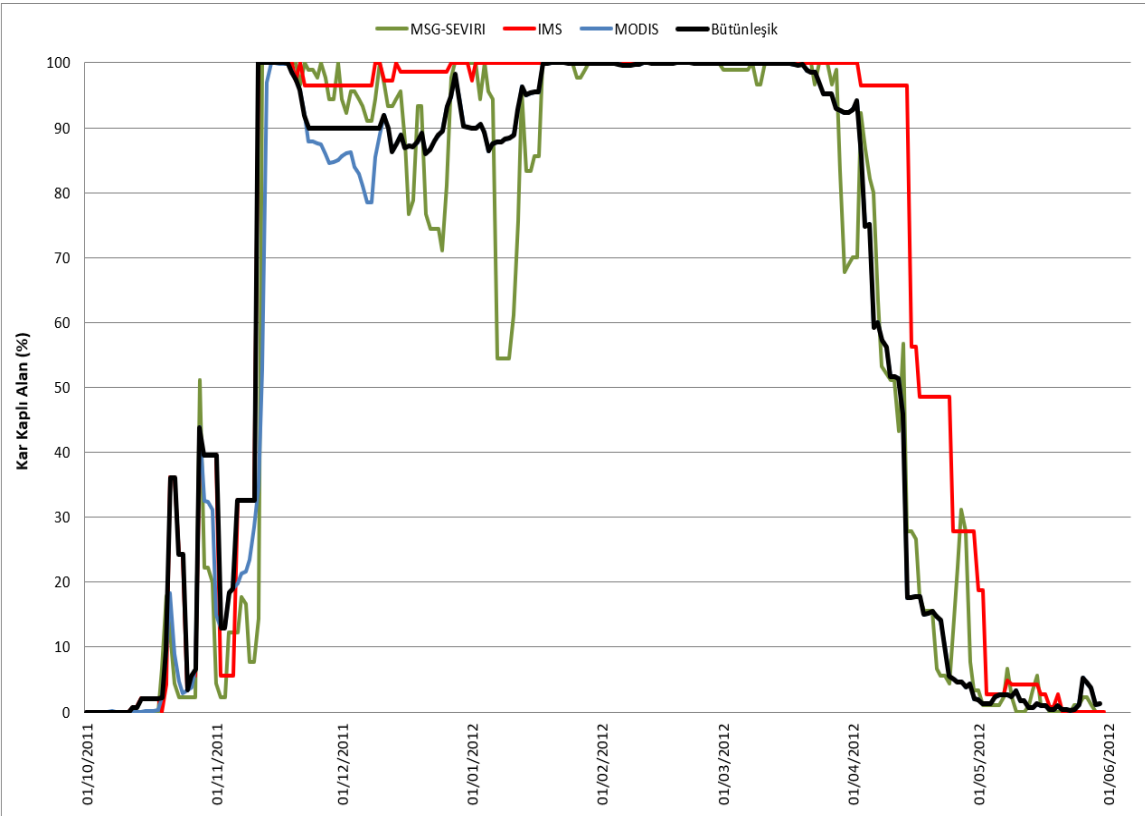
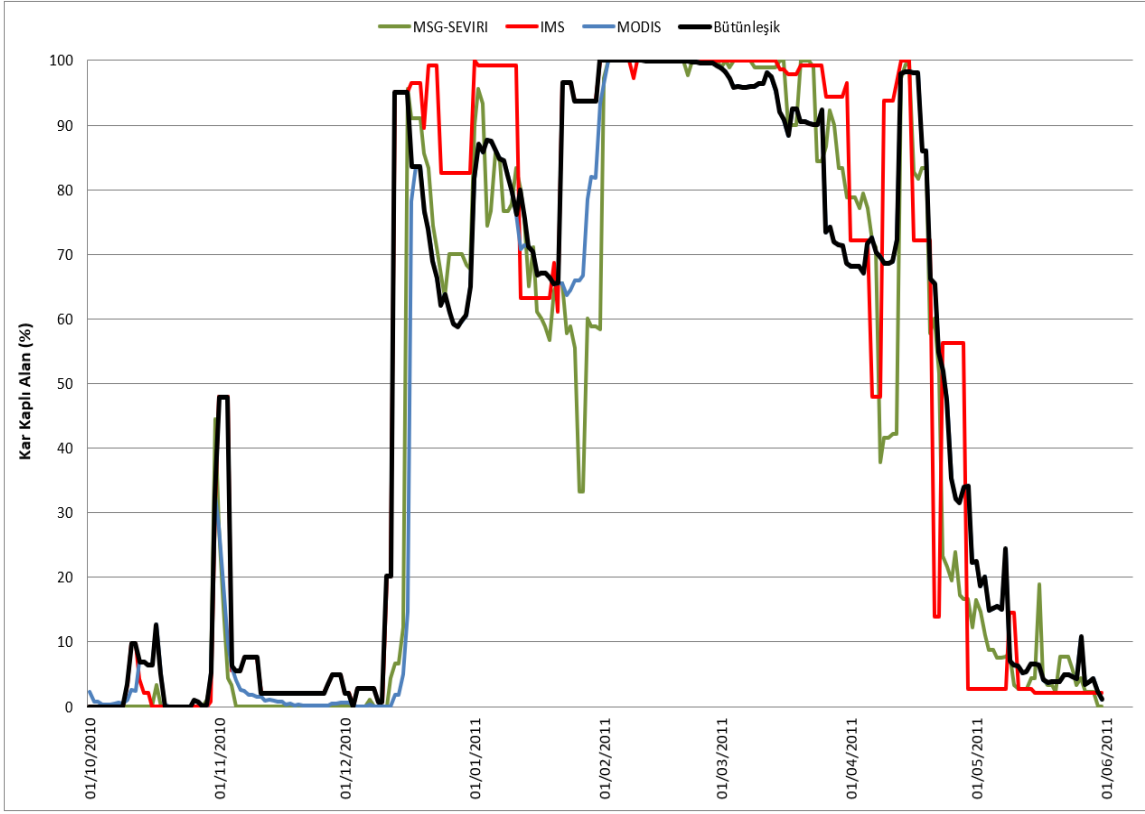
Şekil 3.10. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2008 su yılı

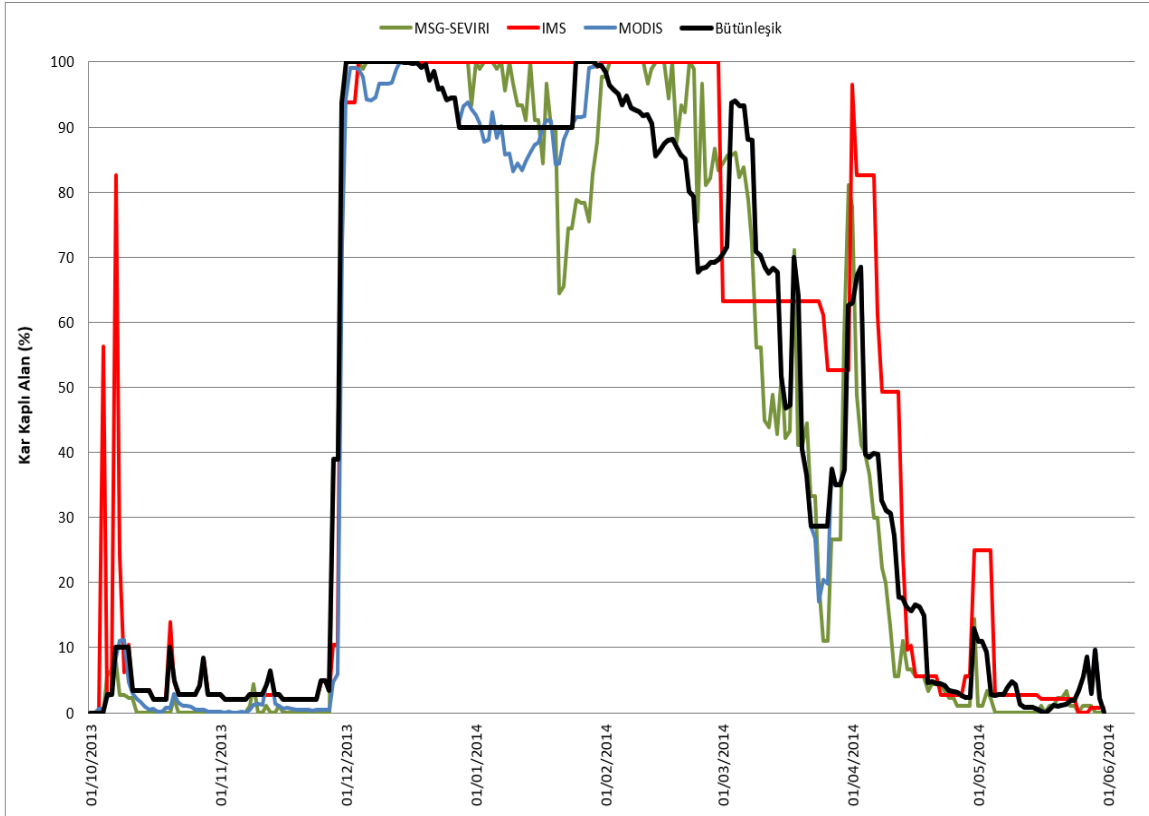
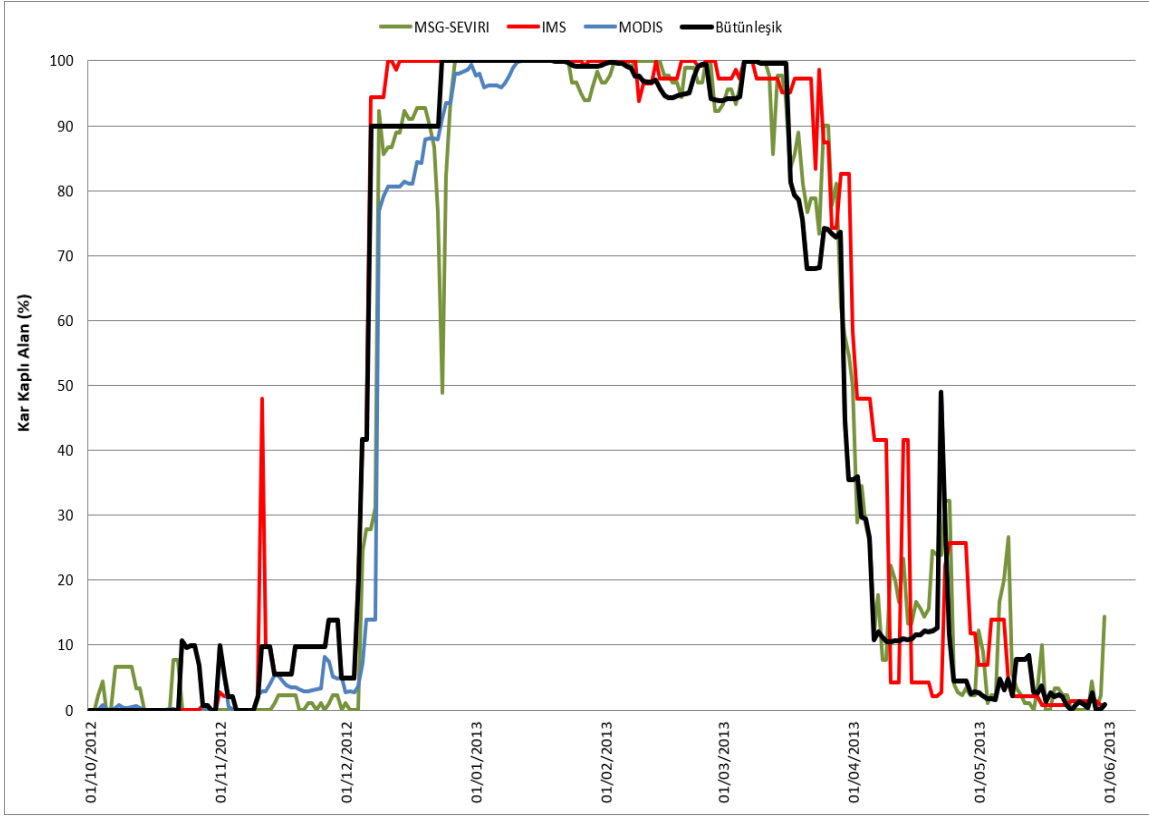


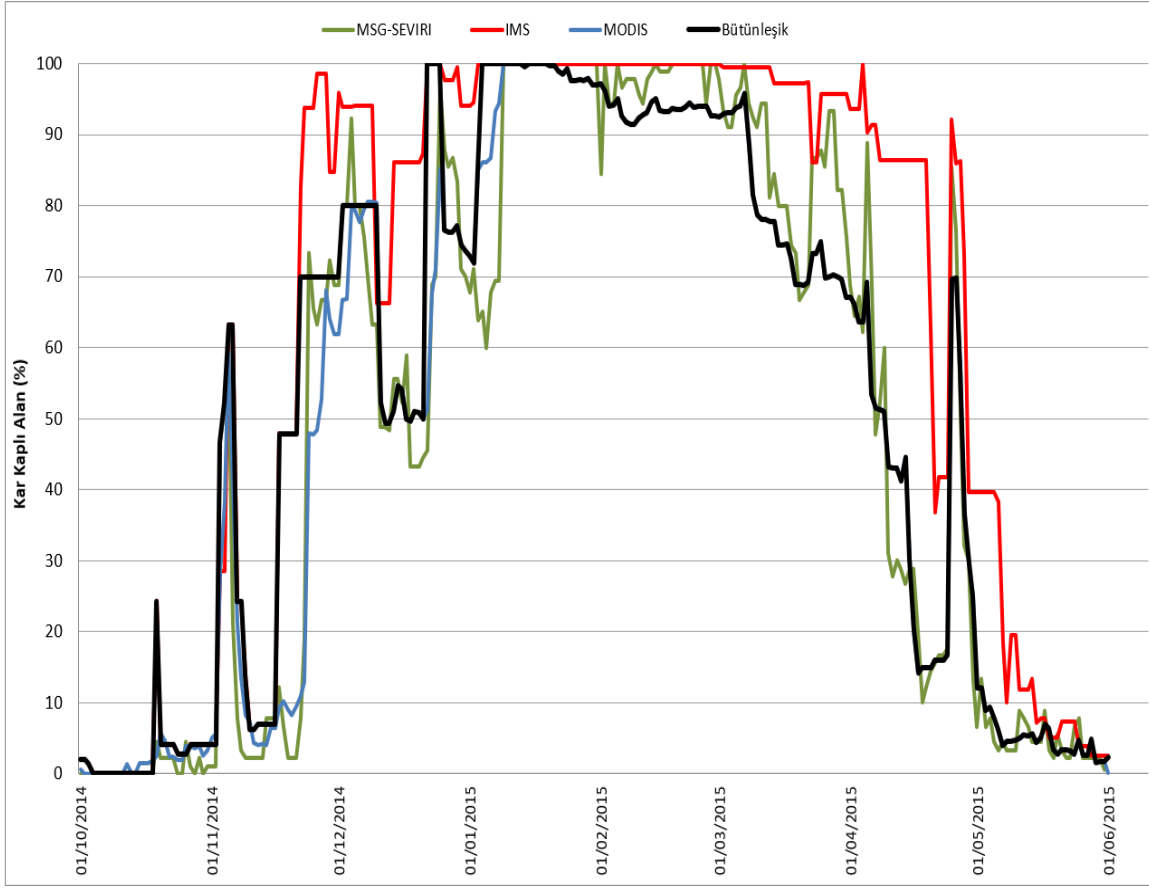
Şekil 3.11. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2009 su yılı



Şekil 3.12. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2010 su yılı







Şekil 3.17. E23A004 Havzası günlük kar kaplı alan miktarı, 2015 su yılı

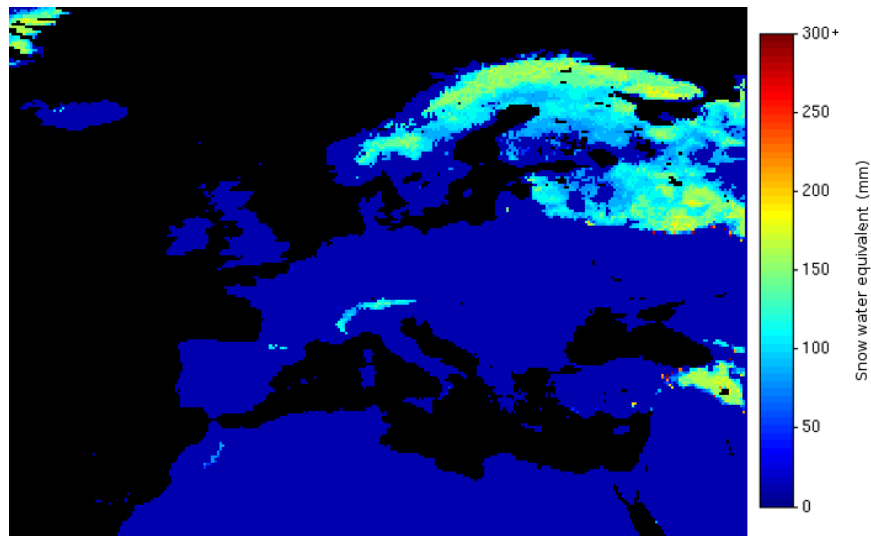
3.3. Kar Su Eşdeğeri

Kar su eşdeğeri tespiti, günümüzdeki kar odaklı hidrolojik çalışmalar için önemli bir basamaktır. Kar su eşdeğerinin mekansal ve zamansal durumunu belirlemek, hidro-enerji üretimi ve Türkiye’de bulunan kar turizminin gelişmiş olduğu bölgelerde doğal afet risk yönetimi için gerekli bir durumdur. Bundan dolayı bir bölgedeki karın karakteristik durumunu saptayabilmek amacıyla yerinde otomatik olarak ölçüm yapan SPA (Snow Pack Analyser) kar istasyonları Türkiye’de çeşitli yerlere kurulmuş ve denenmektedir (Sommer ve Fiel, 2009).

Optik uydular geniş alanlar için karla kaplı bölgeleri mekansal ve zamansal açıdan iyi tespit edebilmekle birlikte kar örtüsü altındaki su eşdeğeri hakkında yeterli bilgiyi sağlayamamaktadır. Kar derinliğinin uydulardan ölçülerek kar su eşdeğerine dönüştürülebilmesi için dalga boyları yüzeyden daha derine ulaşabilen pasif mikrodalga uydular ve bu uydulara bağlı model algoritmaları kullanılmaktadır.

Karla kaplı bölgelerin belirlenmesinde kullanılan MSG-SEVIRI uydu algoritmasının geliştirdiği EUMETSAT kaynaklı Hidrolojide Uydu Görüntülerinin Kullanımı (Satellite Application Facilities in Hydrology, H-SAF) projesiyle birlikte pasif mikrodalga uydusu olan Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System (AMSR-E) uydu görüntülerinden Avrupa bazlı kar su eşdeğer haritaları üretilmektedir. 2011 yılının Ekim ayında AMSR-E uydusunda arıza oluşması üzerine, yerine SSMI/S (Special Microwave Imager/Sounder) uydusuyla çalışılmaya başlanmıştır. Optik uydular buluttan etkilenirken pasif mikrodalga uydular birçok farklı ve çeşitli özelliklerde veri kullanılmasının sonucu olarak ve çalıştıkları dalga boyundan dolayı etkilenmeyerek buluttan arındırılmış olarak servis edilmektedir. Ancak bu kazanımın yanı sıra optik uydular gibi yüksek mekansal çözünürlük sağlayamamakta ve yine çalıştıkları dalga boyundan dolayı kar erirken sulu kar halini alınca yansıma değerlerini kaybetmektedir. Bu sebeple SSMI/S verileri karın birikme dönemi olan Ocak – Mart ayları arasında sağlıklı görüntü sağlamaktadır. (Şorman, 2011).

Bu çalışmada, E23A004 Havzası'nın uydular aracılığıyla belirlenen kar kaplı alan analizinin yanı sıra karın havzadaki durumunu tespit etmek adına kar su eşdeğeri verilerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan dolayı H-SAF projesi kapsamında mevcut 25x25 km mekansal çözünürlüğe sahip SSMI/S uydusu kullanılarak üretilen kar su eşdeğeri (KSE) haritaları temin edilip, havza üzerinde kestirilmiştir. Çalışma için kestirilen kar su eşdeğeri verileri, hidrolojik modelleme çalışmasında elde edilen model çıktılarıyla karşılaştırılacaktır. Şekil 3.18'de SSMI/S uydu görüntüsü kullanılarak Avrupa bazında üretilen örnek bir KSE haritası verilmiştir.



Şekil 3.18. 01 Mart 2015 tarihli SSMI/S kar su eşdeğeri (mm) uydu görüntüsü

3.4. Uyduları Yer Gözlemiyle Doğrulama Çalışması

Havzanın kar kaplı alan analizi yapılırken kullanılan uydular arasında çözünürlüğü 500 m ile en yüksek olan MODIS uydusunun doğruluğunu tespit etmek adına farklı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda daha iyi mekansal çözünürlüğe sahip Landsat uydu görüntüleri ile bazı yer gözlem verilerinden yararlanılmıştır.

3.4.1. Landsat

İlk Landsat uydusunun 1972 yılında uzaya gönderilmesinden sonra 4 adet Landsat uydusu daha yörüngeye oturtulmuştur. Bu uydular iki sensör taşımaktadır: Return Beam Vidican (RBV) kamera ve multispectral scanner (MSS). İkinci kuşak Landsat uyduları, 1982’de Landsat 4 ile başlayarak, RBV yerine Thematic Mapper (TM) adında yeni bir cihazla donatılmışlardır. 1993 yılında Landsat 6 şanssız bir şekilde düştükten sonra Landsat 7, geliştirilmiş TM ve yüksek çözünürlüklü tarayıcı ile donatılarak Mart 1999’da fırlatılmıştır. Landsat 8 NASA’nın bu serideki sekizinci uydusu olup, yiyecek, su ve ormanlar gibi insanları etkileyen gerekli kaynakların düzenlenmesi, izlenmesi ve anlaşılmasında Landsat programının en önemli rolünün devam etmesi sağlanmıştır. Landsat’ın ilk uydusundan son uydusuna kadar olan versiyonlarının özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Landsat 8, Landsat 7’nin yörüngesine katılmış olup iki farklı sensör taşımaktadır: Operational Land Imager (OLI) ve Thermal Infrared Sensor (TIRS). Landsat 8 uydusu, görünür, yakın-infrared, kısa dalga infrared ve termal infrared aralıklarında görüntü almakta olup, spektral aralığa bağlı olarak 15 ile 100 metre arasında yersel çözünürlüğe sahiptir. Optik bir sensör olan Landsat uydusu; tekrarlı, dairesel, güneşe senkronize, kutuplara yakın yörüngeye sahiptir. Bu özellikleri sayesinde 81° Kuzey ve 81° Güney enlemleri arasında görüntüleme yapar (http-2). Bu çalışmada kullanılan Landsat 5 TM ve Landsat 8 OLI/TIRS uydularının bant kombinasyonları karşılaştırması Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Landsat 1-8 uyduları özellikleri

Uydu	Operatör	Başlangıç ve Sonlanma Tarihi	Sensör	Yersel	Radyometrik	Şerit Genişliği (Swath)	Görüntüleme Sıklığı
Landsat 1/2/3	NASA-EOSAT	1972/75/78 1978/82/83	MSS	80m	8 bit	-	18 gün
Landsat 4/5	Space Imaging	1982/84, 1987-	TM	30m (VNIR)	8 bit	183	16 gün
			TM	30m (SVIR)	8 bit	183	16 gün
			TM	120m (TIR)	8 bit	183	16 gün
Landsat 7	NASA	1999	Pan	15m	8 bit	185	16 gün
			ETM	30m (VNIR-SWIR)	8 bit	185	16 gün
			ETM	60m (TIR)	8 bit	185	16 gün
Landsat 8	NASA-USGS	2013	Pan	15m	12 bit	185	16 gün
			OLI	30m			
			TIRS	100m			

Tablo 3.2. Landsat 5-8 uyduları bant kombinasyonu

Landsat 5 TM			Landsat 8 OLI/TIRS		
Band Numarası	Dalga Boyu (µm)	Çözünürlük (m)	Band Numarası	Dalga Boyu (µm)	Çözünürlük (m)
			1-Ultra Blue (aerosol)	0.435-0.451	30
1-Blue	0.45-0.52	30	2-Blue	0.452-0.512	30
2-Green	0.52-0.60	30	3-Green	0.533-0.590	30
3-Red	0.63-0.69	30	4-Red	0.636-0.673	30
4-NIR	0.76-0.90	30	5-NIR	0.851-0.879	30
5-SWIR-1	1.55-1.75	30	6-SWIR-1	1.566-1.651	30
6-TIR	10.40-12.50	120*(30)	10-TIR-1	10.60-11.19	100
			11-TIR-2	11.50-12.51	100
7-SWIR-2	2.08-2.35	30	7-SWIR-2	2.107-2.294	30
			8-Pan	0.503-0.676	15
			9-Cirrus	1.363-1.384	30

3.4.2. Etkili kar kaplı alan algoritması

Kar kaplı alanların yansımaya karakteristiği değişken olması sayesinde uydular o bölgede karın olup olmadığını algılamaktadır. Bu süreç karın yüksek görülebilir yansımaya özelliği (VIS) ve kısa dalga boylu yakın kızılötesi yansımaya karakteristiği (SWIR) arasında gerçekleşen işlemler ile belirlenir (Frei vd., 2012). VIS ve SWIR yansımaya oranlarının kullanılması veya kar kaplı alan belirlemek için normalize edilmiş farklar 1970'lerden beri çeşitli formlarda, farklı uydu sensörleriyle güvenilir ve doğru bir şekilde kar kaplı alan haritalandırması yapılmaktadır (Hall vd., 2002).

Karın yüksek görülebilir yansımaya ve yakın kızılötesi yansımaya özelliklerinin birlikte kullanılması ile kar buluttan ve diğer yüzey şekillerinden ayırt edilebilmektedir. Etkili kar kaplı alan algoritması temelini karın bu yansımaya karakteristikleri oluşturmaktadır (Riggs vd., 1994). Kısaca VIS ve SWIR yansımaya oranlarının kullanımı ve normalleştirilmiş fark kar indeksi (NDSI) yerdeki etkili kar kaplı alanı haritalandırmada kullanılan hesaplama yöntemidir (Klein vd., 1998).

$$NDSI = (VIS - SWIR) / (VIS + SWIR) \quad (3.1)$$

Etkili kar kaplı alan algoritması (SNOMAP), küresel iklim değişikliği araştırmaları ve yer yüzü çalışmalarında kullanılacak olan kar kaplı alan haritalandırması amacıyla NDSI temelinde dizayn edilen bir algoritmadır. SNOMAP ilk olarak Landsat Thematic Mapper (TM) verisi ile geliştirilmiştir ve daha sonra MODIS verisine uygulanmaya ve geliştirilmeye devam etmiştir (Riggs vd., 1994; Hall vd., 1995).

MODIS etkili kar kaplı alan algoritması, her gün için tüm MODIS pikselleri baz alınarak yapılır. Buna göre, gün içerisinde herhangi bir MODIS pikselinde kar var ise, o piksel kar kaplı alan olarak düşünülür ve bu şekilde günlük veya haftalık kar kaplı ürün binary (kar var/yok) şeklinde elde edilir (Riggs vd., 1994; Hall vd., 1995). 2000 yılından beri MODIS NDSI kullanarak kar kaplı ürün elde etmektedir. NDSI, -1.0 ile 1.0 değerleri arasındadır. 0.0 veya daha az olan NDSI değerleri kar olmayan bölgeyi gösterir. Eğer sensörler tarafından görülebilen kar var ise NDSI 0.0 değerinden büyüktür. Dozier (1989), uydu görüntülerinin görsel tespitlerine dayanarak kar kaplı alan haritalandırması için NDSI eşik değerinin “0.4” olduğunu önermiştir. Fakat sonradan yapılan araştırmalar ile NDSI eşik değerinin değişken olarak birçok faktöre bağlı olabileceği belirlenmiştir; mevsimsel, bitki örtüsü, bölge koşulları gibi (Yin vd., 2013; Riggs vd., 2016).

Etkili kar kaplı alan, ikili kar kaplı alana göre daha kullanışlıdır, çünkü etkili kar kaplı alan bir pikselin yüzde kaç kar kaplı olduğu bilgisini vermektedir (Nolin, 2010). Bunun belirlenmesi için birçok yöntem uygulanmıştır. MODIS ve Landsat TM gibi düşük ve yüksek çözünürlüğe sahip sensörler kullanılarak NDSI ile etkili kar tespiti ilişkilendirilmesi yapılmıştır (Salomonson ve Appel, 2004 ve 2006).

Etkili kar kaplı alan belirlemede NDSI kar ve kar olmayan yerleri birbirinden ayırıcı fonksiyondur ve mevsim koşullarına bağlı olarak belirli bir eşik değerinin üzerinde olmalıdır. Normal koşullarda görülebilir bölge içerisinde, bulut ve kar kaplı alanı ayırt etmek oldukça zordur. Fakat, infrared (kızılötesi) bölgede, bulutun yansıma değeri karın yansıma değerine göre daha yüksektir. Bu fark ile kar sönmelenirken bulut yansır böylece kar ve bulut ayrımı gerçekleşmektedir (Allen vd., 1990; Dozier, 1989). Fakat bu yöntem tek başına yeterli bulunmamıştır. NDSI ile birlikte çeşitli indeksler uygulanarak etkili kar kaplı alan belirlenir. Bunlar; normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi (NDVI) (Denklem 3.2) ile normalleştirilmiş fark su indeksidir (NDWI) (Denklem 3.3). NDSI ile birlikte kullanılan bu yöntemler ile; kar ve kar olmayan yerler birbirinden ayrıldıktan sonra yerde bulunan kar ile ormanlık alanlar ve sulak alanlar kesişmemiş olur.

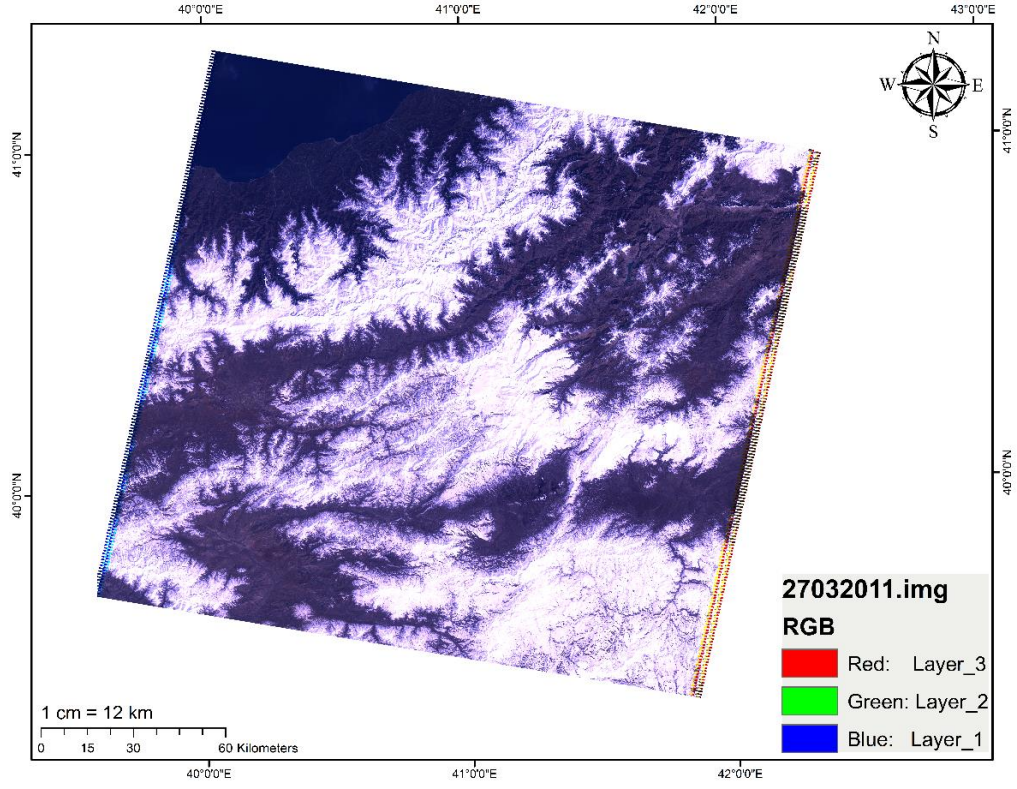
$$NDVI = \frac{(NIR - \text{Kırmızı Bant})}{(NIR + \text{Kırmızı Bant})} \quad (3.2)$$

$$NDWI = \frac{(\text{Yeşil Bant} - NIR)}{(\text{Yeşil Bant} + NIR)} \quad (3.3)$$

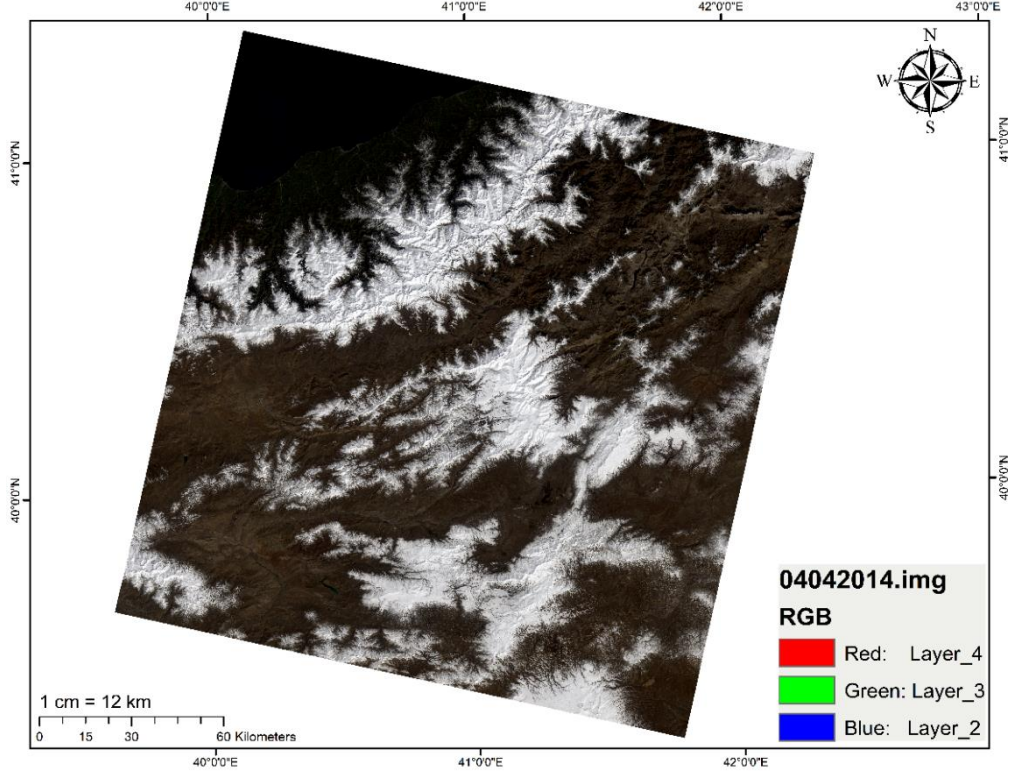
Bu çalışmada, MODIS uydusundan elde edilen görüntüler ile etkili karla kaplı alanların haritalandırması ve doğrulanması için Landsat uydu görüntüleri ve bazı yer gözlem istasyonları kullanılmıştır. Bu kapsamda, 30 m mekânsal çözünürlüğe sahip Landsat TM ve Landsat OLI/TIRS uydusunun açık (az bulutlu) günlerde çekilmiş Türkiye'nin kar potansiyeli yüksek dağlık Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan (Path: 172, Row:32) üç adet uydu görüntüsü temin edilmiştir. Bu uydu görüntüleri 27 Mart 2011 (%10.53 bulutlu), 4 Nisan 2014 (%11.32 bulutlu) ve 8 Mart 2016 (%10.05 bulutlu) günlerine aittir (Şekil 3.19, 3.20, 3.21). Görüntü arama kriterlerinde bulut maskeleyme işleminden kaçınmak için bulutluluk oranının %15'den az olması istenmiştir. Görüntülerin bu aylara denk gelmesi hem 16 günlük Landsat uydusu tekrarlama sürecinde hem de istenilen görüntülerin kar erime süresinde yer almasından kaynaklanmaktadır.

3.4.3. MODIS

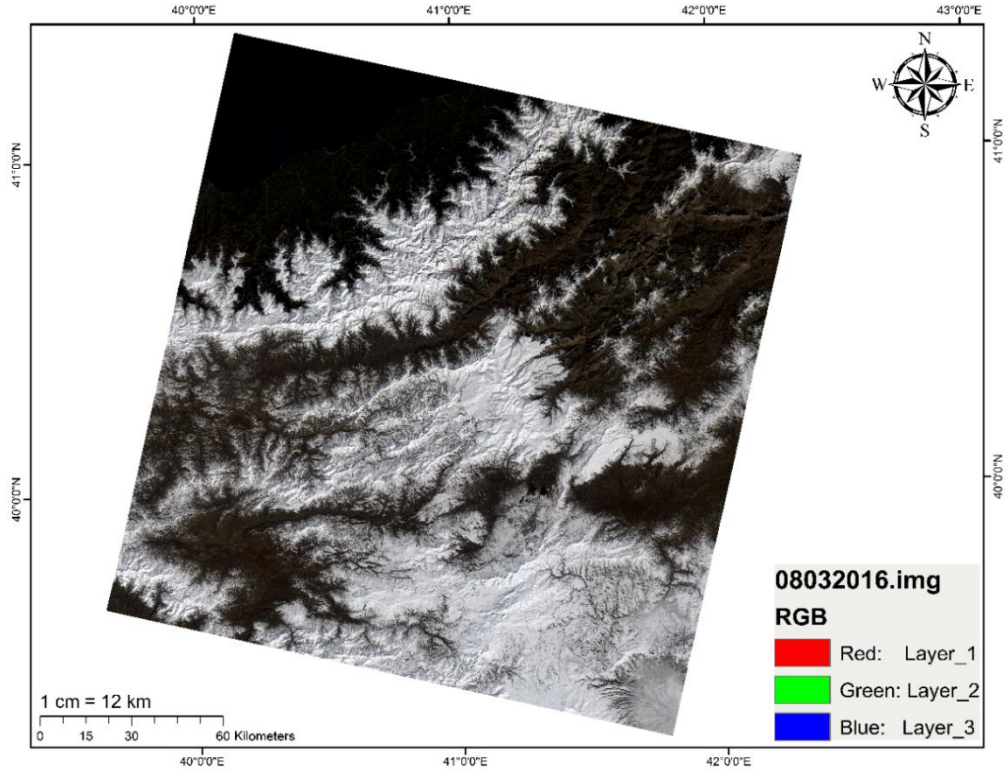
24 Şubat 2000 tarihinde veri toplamaya başlayan Terra ve Aqua platformları üzerindeki MODIS algılayıcısı, dünya yüzeyi ve görüntüsünü 36 dar spektral bantta 0.4 µm'den 14 µm'ye kadar dalga boyu aralığında, günlük tekrarlama süresinde ve 250 m (bant 1-2), 500 m (bant 3-7) ve 1000 m (bant 8-36) mekânsal çözünürlükte sağlamaktadır. Karada, atmosferde, buzullarda ve okyanuslardaki küresel değişimlerin incelenebilmesi için kullanılan birçok MODIS veri ürünü bulunmaktadır (Hall ve Riggs, 2007). Bu çalışma için 4 Nisan 2014 tarihli işlenmemiş MODIS görüntüsü örnek olarak Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.19. 27 Mart 2011 Landsat TM görüntüsü



Şekil 3.20. 4 Nisan 2014 Landsat OLI/TIRS görüntüsü



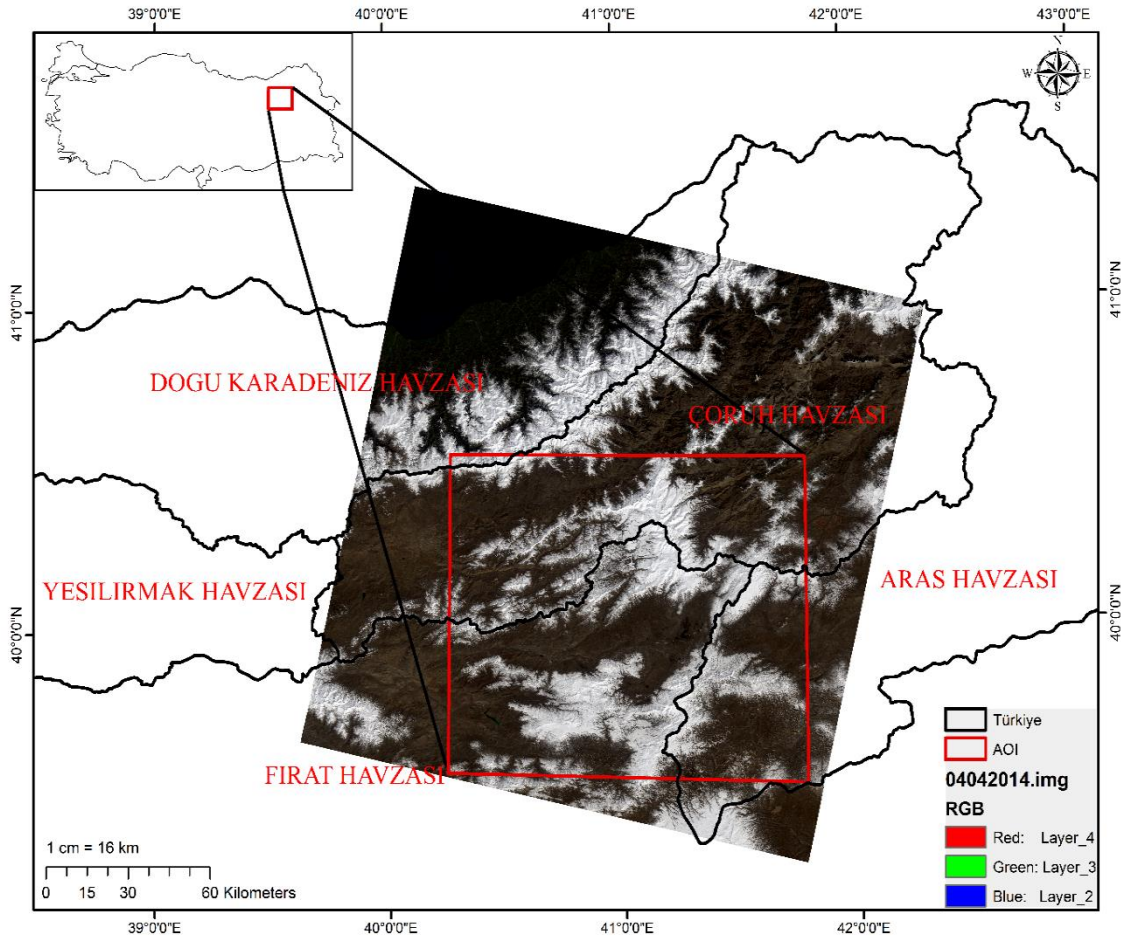
Şekil 3.21. 8 Mart 2016 Landsat OLI/TIRS görüntüsü



Şekil 3.22. 4 Nisan 2014 MODIS işlenmemiş Doğu Anadolu görüntüsü

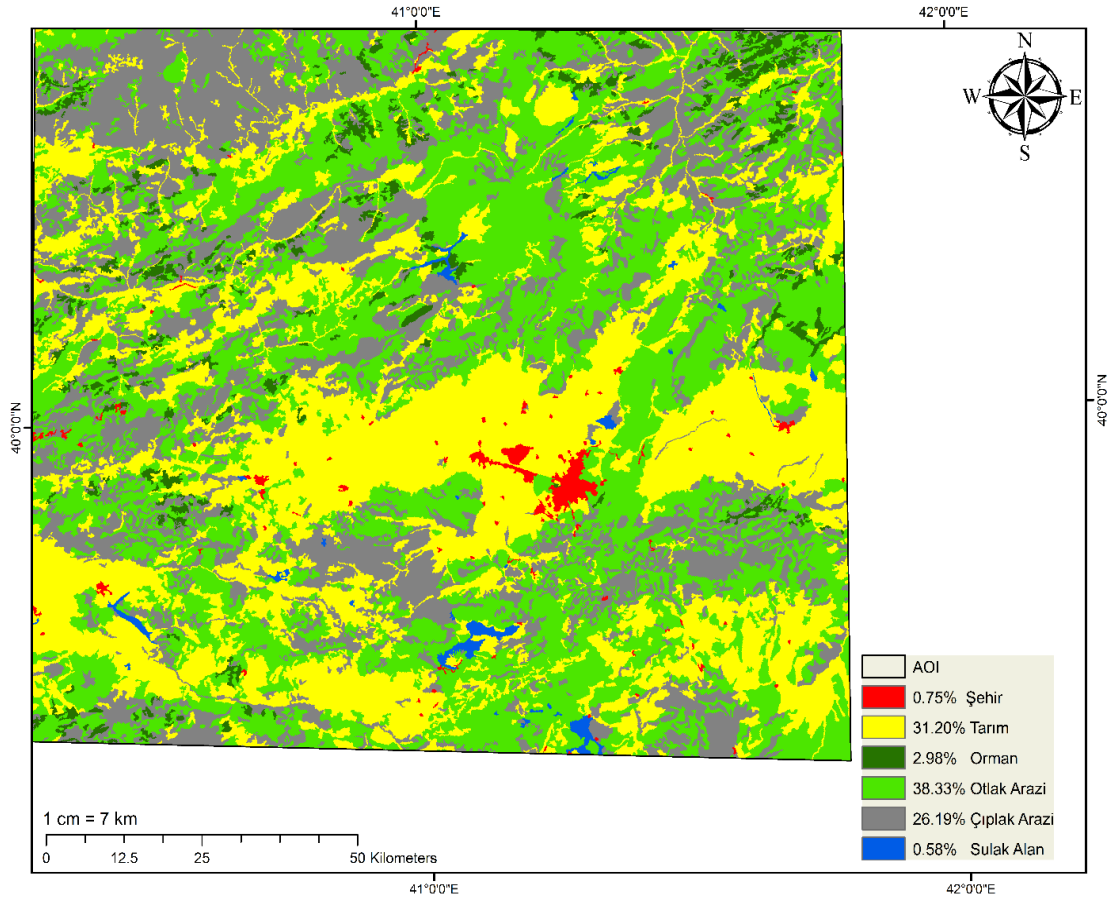
3.4.4. Çalışma alanı

Fırat, Aras ve Çoruh Havzaları'nın alt havzalarını içeren (Şekil 3.23); yüksek kotlu, kar potansiyeli fazla olan bir ilgi alanı (area of interest = AOI) belirlenmiştir. Bu bölge 39-41° kuzey enlemleri ile 40-41° doğu boylamları arasında yer almaktadır. 14,493 km² alana sahip olan bölgede bulutluluk oranı sıfıra yakındır.



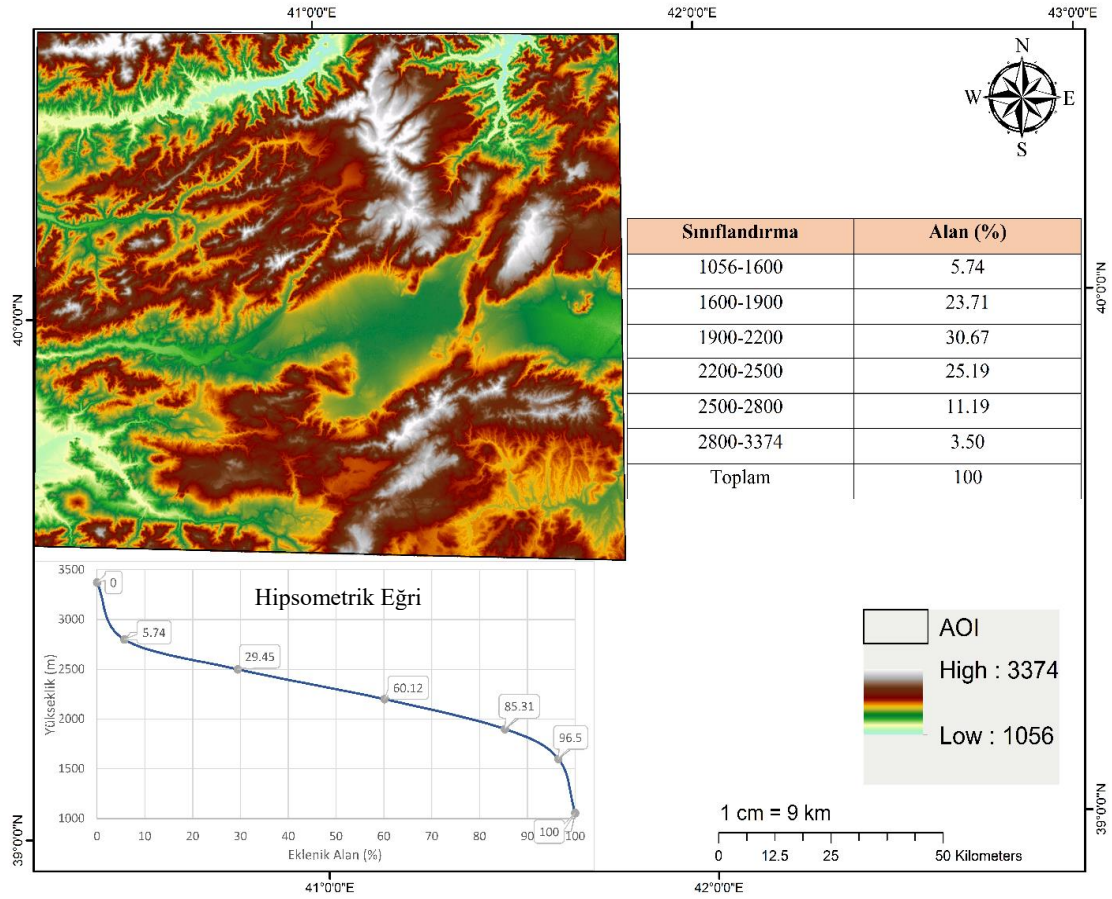
Şekil 3.23. Çalışma alanı ve havzalar arasındaki ilişki

Çalışma alanının arazi kullanım haritası edinilerek, bölge daha iyi tanınmaya çalışılmıştır. (<http-4>) adresinden son sürüm olan CLC 2012 (Corine Land Cover) 100 X 100 m piksel boyutunda görüntü “TIFF” formatında indirilmiştir. Bütün Avrupa’nın arazi kullanım haritasını gösteren görüntü, Coğrafi Bilgi Sistemleri platformunda kestirildikten sonra alansal değişimleri 5 sınıfa ayrılarak belirlenmiştir. İlgili alanı ağırlıklı olarak; tarım, otlak ve çıplak arazi sınıflarından oluşmaktadır.



Şekil 3.24. Çalışma alanının arazi kullanım haritası

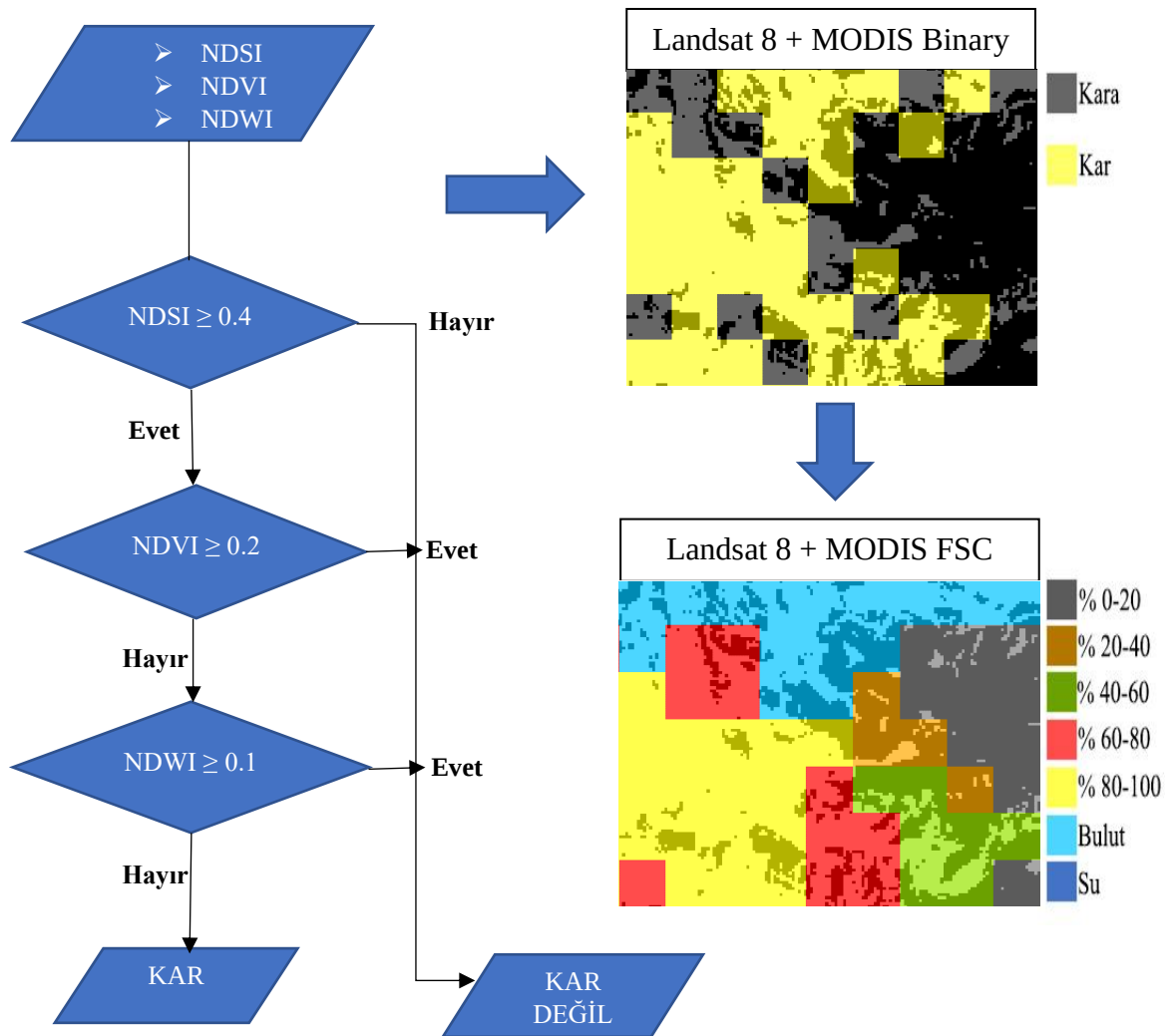
Sayısal yükseklik modeli (DEM), daha detaylı ve doğru bir çalışma için 30 X 30 m piksel boyutunda ASTER DEM olarak “tif” formatında indirilmiştir (http-3). Sayısal yükseklik model haritasına göre çalışma alanının yüksekliği 1056 m ile 3374 m arasında değişmekte ve hipsometrik ortalaması 2380 m’dir.



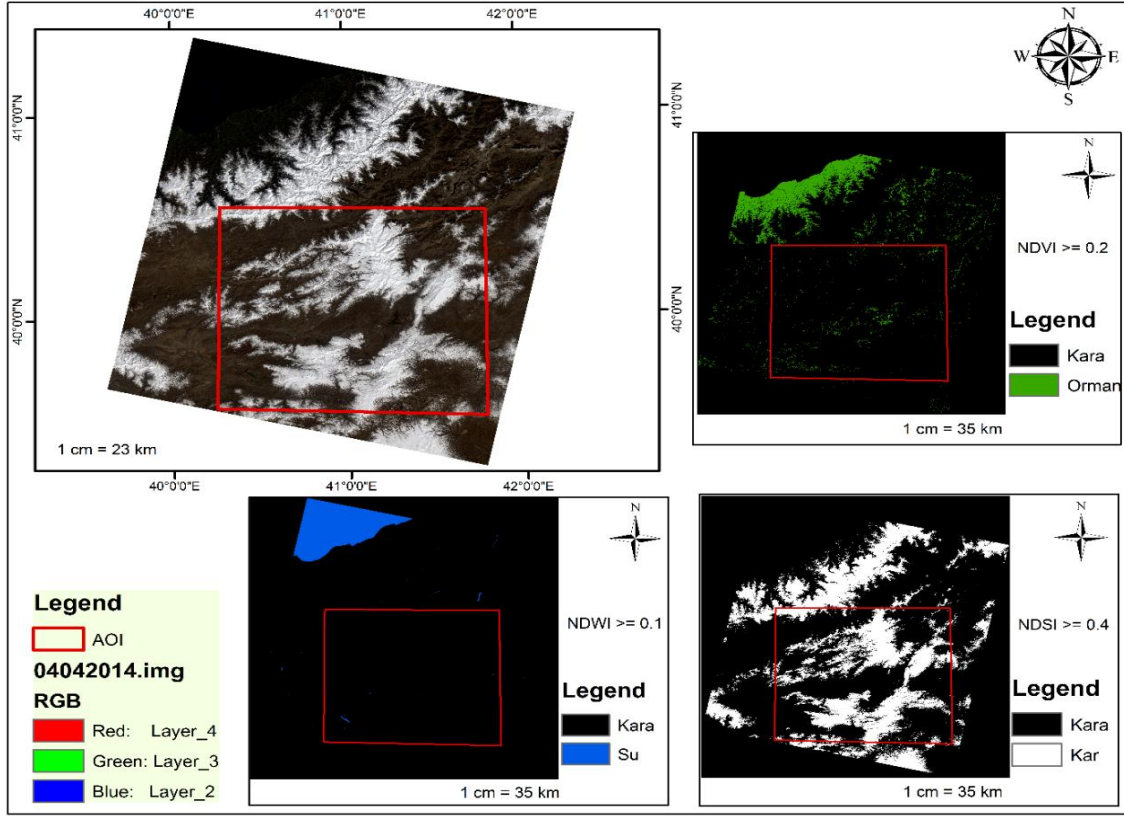
Şekil 3.25. Çalışma alanının yükseklik haritası (DEM)

3.4.5. İndekslerin ilgili alanda uygulanması

Yukarıda bahsedilen indeksler (NDSI, NDVI, NDWI) seçilen 3 görüntüde uygulanmıştır (Şekil 3.26). $NDSI \geq 0.4$ ile kar/kar olmayan sınıflar birbirinden ayrılmış ve iki sınıflı (kar/kara) NDSI görüntüsü elde edilmiştir. $NDVI \geq 0.2$ ile ormanlık alanlar belirlenmiş ve diğer bölgeler yer sınıfına girmiştir. Aynı şekilde $NDWI \geq 0.1$ işlemi uygulanarak sulak alanlar belirlenmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.26. Çalışma alanında indeks uygulama adımları

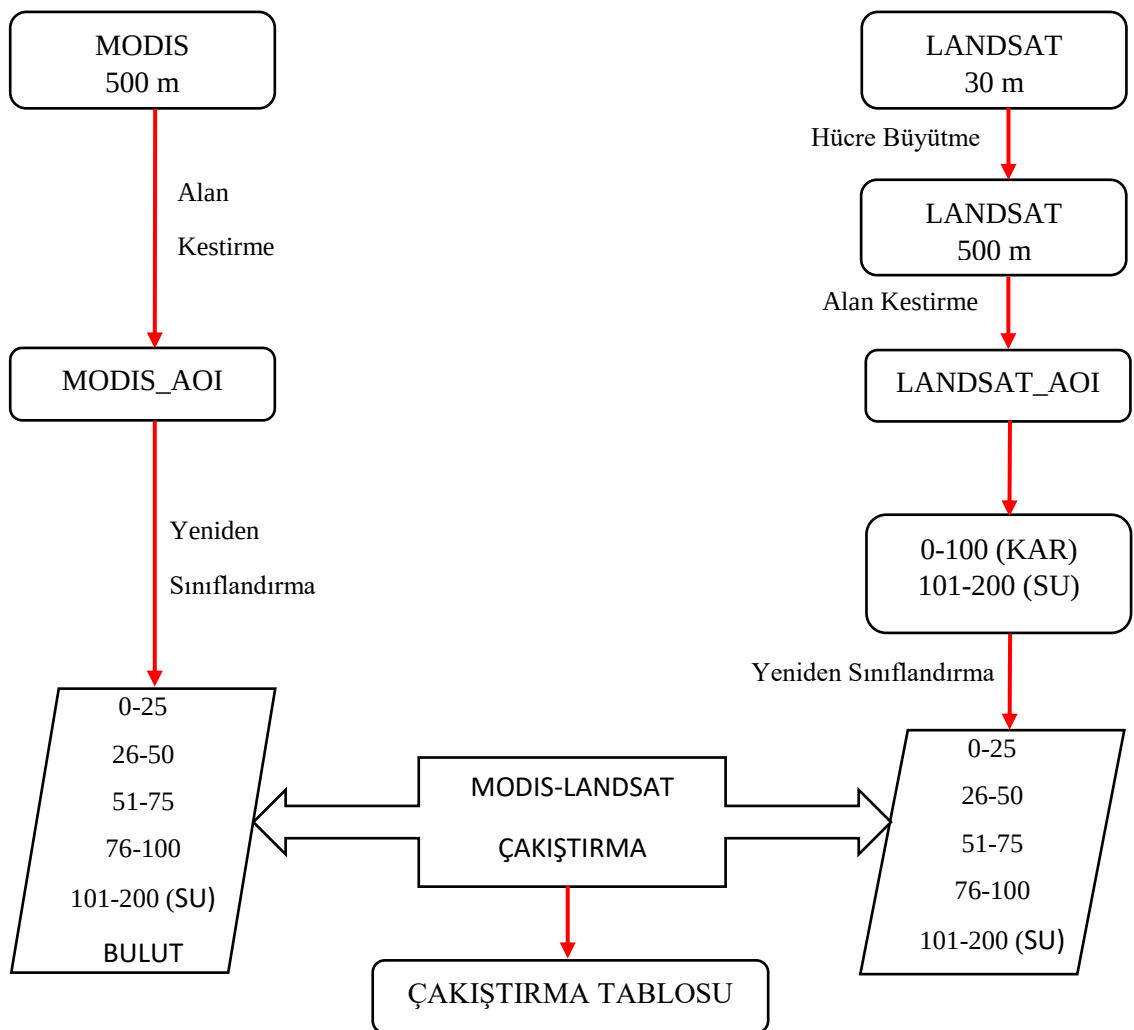


Şekil 3.27. Çalışma alanında uygulanan indeksler (4 Nisan 2014)

Çalışma alanında etkili kar kaplı alan yüzdesinin $NDSI \geq 0.4$ kriterine bağlı olarak belirlenmesi amacıyla 500 metreye dönüştürülen Landsat (30 m) görüntüleri ile aynı boyutlara sahip sınıflandırılmış MODIS görüntüleri karşılaştırılmış ve her bir hücrenin altında kalan kar kaplı alan yüzdesi Coğrafi Bilgi Sistemleri platformunda elde edilmiştir (Şekil 3.28). Daha sonra her bir hücrenin sınıflandırılmış MODIS görüntülerinden elde edilen % kar miktarı ile Landsat görüntülerinden elde edilen NDSI değerleri arasındaki ilişki oluşturulmuştur. Elde edilen bu ilişki ile ikili (kar/kara) ve etkili kar kaplı alan (EKKA) sınıflandırmaları yapılmıştır (Tablo 3.3).

İlgili alanda, Landsat ve MODIS uydu görüntüleri ile 71431 hücre değeri kullanılarak doğrulama çalışmasıyla birlikte görüntülerin aynı mekansal çözünürlüğe sahip hücreleri karşılaştırılarak bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma sonuçlarının verildiği Tablo 3.3'te, aynı görüntünün hem ikili (kar var/yok) hem de etkili kar kaplı alan (EKKA) yüzde değerleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. MODIS için ikili kar kaplı alanların verildiği tablolarda 4 ayrı sınıflandırma yapılmıştır. Bunlar; 0-50 (kar yok), 51-100 (kar var), su ve bulut/kararsız sınıflardır. Etkili kar kaplı alan yüzde değerleri ise su ve bulut/kararsız sınıfları ile birlikte toplam 6 sınıftan oluşmaktadır. Fakat, Landsat

görüntülerinde NDSI indeksiyle birlikte kar ve kar olmayan bölgeler birbirinden ayırt edildiği için her iki tabloda bulunan Landsat sınıflarında ayrıca bir bulut sınıfı bulunmamaktadır. Tablo 3.3'te aynı sınıf aralıklarının birbirini yatay ve düşeyde kesen hücre sayıları boyanmıştır. Bu hücre sayılarının aynı sınıf içine düşen toplam hücre sayılarına oranıyla MODIS için üretici ve Landsat için kullanıcı başarıları elde edilmiştir. Benzer şekilde boyanmış olan hücre sayılarının toplamının, kullanılan toplam hücre sayısına bölünmesiyle de toplam başarı belirlenmiştir.



Şekil 3.28. Çalışma alanında uygulanan MODIS-Landsat çakıştırma adımları

Tablo 3.3. Görüntülere uygulanan ikili ve etkili KKA sınıflandırmaları

	27 Mart 2011	LANDSAT				İkili
MODIS		0-50	51-100	Su	Toplam	Kullanıcı Başarısı
	0-50	23219	2246	29	25494	91.1
	51-100	4175	36896	70	41141	89.7
	Su	28	9	5	42	11.9
	Bulut/ Kararsız	1984	2742	28	4754	
	Toplam	29406	41893	132	71431	
	Üretici Başarısı	79.0	88.1	3.8		

Toplam Başarı (%) = 84.17

Bulutsuz/Kararsız Başarı (%) = 90.17

	4 Nisan 2014	LANDSAT				İkili
MODIS		0-50	51-100	Su	Toplam	Kullanıcı Başarısı
	0-50	42195	1450	38	43683	96.6
	51-100	3166	20686	5	23857	86.7
	Su	11	-	3	14	21.4
	Bulut/ Kararsız	2270	1607	-	3877	
	Toplam	47642	23743	46	71431	
	Üretici Başarısı	88.6	87.1	6.5		

Toplam Başarı (%) = 88.04

Bulutsuz/Kararsız Başarı (%) = 93.08

	8 Mart 2016	LANDSAT				İkili
MODIS		0-50	51-100	Su	Toplam	Kullanıcı Başarısı
	0-50	19071	773	23	19867	96.0
	51-100	6941	39924	133	46998	84.9
	Su	26	3	14	43	32.6
	Bulut/ Kararsız	3209	1312	2	4523	
	Toplam	29247	42012	172	71431	
	Üretici Başarısı	65.2	95.0	8.1		

Toplam Başarı (%) = 82.61

Bulutsuz/Kararsız Başarı (%) = 88.20

Tablo 3.3. (Devam) Görüntülere uygulanan ikili ve etkili KKA sınıflandırmaları

	27 Mart 2011	LANDSAT						Etkili
MODIS		0-25	26-50	51-75	76-100	Su	Toplam	Kullanıcı Başarısı
	0-25	20199	1939	1179	785	29	24131	83.7
	26-50	616	275	134	60	-	1085	25.3
	51-75	960	885	746	545	-	3136	23.8
	76-100	708	1812	4050	31643	70	38283	82.7
	Su	28	-	2	7	5	42	11.9
	Bulut/ Kararsız	1162	822	814	1928	28	4754	
	Toplam	23673	5733	6925	34968	132	71431	
	Üretici Başarısı	85.3	4.8	10.8	90.5	3.8		

Toplam Başarı (%) = 74.01

Bulutsuz/Kararsız Başarı (%) = 79.29

	4 Nisan 2014	LANDSAT						Etkili
MODIS		0-25	26-50	51-75	76-100	Su	Toplam	Kullanıcı Başarısı
	0-25	38953	1332	638	415	38	41376	94.1
	26-50	1384	526	261	136	-	2307	22.8
	51-75	1073	1292	1456	1694	-	5515	26.4
	76-100	201	600	1457	16079	5	18342	87.7
	Su	8	3	-	-	3	14	21.4
	Bulut/ Kararsız	1408	862	757	850	-	3877	
	Toplam	43027	4615	4569	19174	46	71431	
	Üretici Başarısı	90.5	11.4	31.9	83.9	6.5		

Toplam Başarı (%) = 79.82

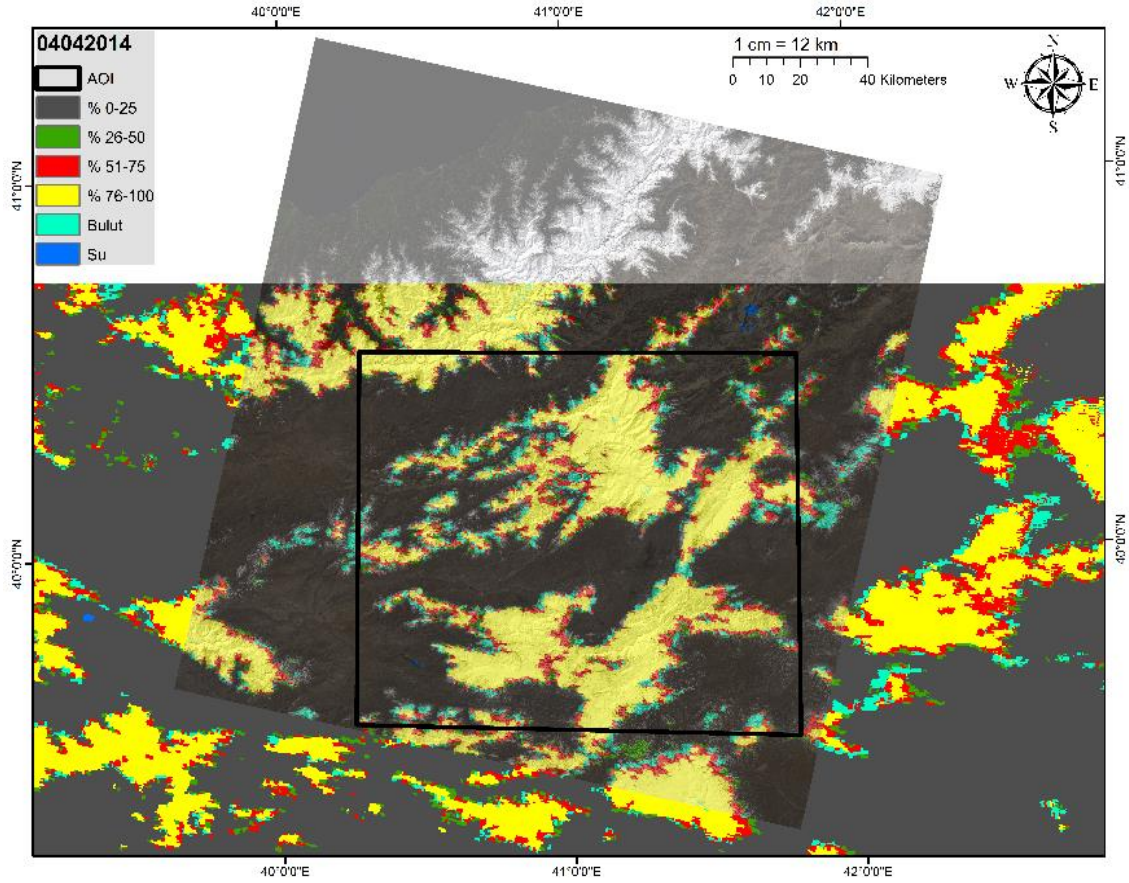
Bulutsuz/Kararsız Başarı (%) = 84.40

	8 Mart 2016	LANDSAT						Etkili
MODIS		0-25	26-50	51-75	76-100	Su	Toplam	Kullanıcı Başarısı
	0-25	16179	895	375	155	20	17624	91.8
	26-50	1578	419	184	59	3	2243	18.7
	51-75	1826	1332	977	590	4	4729	20.7
	76-100	1168	2615	5031	33326	129	42269	78.8
	Su	24	2	1	2	14	43	32.6
	Bulut/ Kararsız	2326	883	692	620	2	4523	
	Toplam	23101	6146	7260	34752	172	71431	
	Üretici Başarısı	70.0	6.8	13.5	95.9	8.1		

Toplam Başarı (%) = 71.28

Bulutsuz/Kararsız Başarı (%) = 76.10

Uygulanan akıştırma analizi yöntemi ile elde edilen ikili (kar var/yok) kar kaplı alan dağılımlarının, sınıflandırılmış Landsat görüntülerinden elde edilen kar kaplı alan dağılımları ile karşılaştırılmasında % 0-50 ve % 51-100 sınıflarının başarıları oldukça yüksektir. Fakat, 8 Mart 2016 tarihli görüntüde MODIS uydusunun etkilediği üretici başarısı düşük bulunmuştur. Bunun sebebi, iki uydunun farklı mekansal çözünürlüğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Etkili kar kaplı alan dağılımlarının kıyaslandığı tablolara bakıldığında, % 0-25 ve % 76-100 sınıflarının kar kaplı alan belirlemede yüksek başarılar elde edilmiştir. Özellikle arada kalan sınıflar incelendiğinde %26-50 sınıfının % 51-75 sınıfıyla karıştırıldığı görülmektedir. Aynı şekilde, % 51-75 sınıfı ile % 76-100 kar kaplı alan sınıfının karıştırıldığı görülmektedir. Elde edilen toplam başarılar her iki tablo için göz önüne alındığında, en başarılı gün 4 Nisan 2014 görüntüsüne aittir. Bunun nedeni, kar kaplı alanları ifade eden sınıflardaki (ikili için: %51-100, Etkili için: %76-100) hücre sayılarının diğer görüntülere göre daha az olmasıdır (daha az kar/daha çok kara). Böylelikle ara sınıfların belirsizliği sonucu oluşan hata oranı azalmış ve bundan dolayı da başarı artmıştır. Benzer şekilde bakıldığında toplam başarı olarak en başarısız günün, kar örtüsünün diğer günlere göre daha yoğun olduğu 8 Mart 2016 görüntüsü olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, MODIS görüntülerinin Landsat görüntülerine göre daha kaba çözünürlüğe sahip olup fazla kar miktarı göstermesindendir. Landsat görüntülerine daha önce uygulanan NDSI indeksi sayesinde bulut veya karar verilemeyen bölgeler ile kar kaplı alanlar birbirinden ayrılmış ve tablolarda görüldüğü üzere farklı sınıflara dağıtılmıştır. Bu sınıf için herhangi bir çakıştırma analizi yapılmadığından başarı sonuçları verilmemiştir. Bir diğer sınıf olan su sınıfı, iki uydu arasındaki sulak alanların keşişim başarılarını göstermektedir. Daha nce NDWI indeksi ile Landsat görüntülerindeki sulak alanlar belirlenerek tablolardaki yerini almıştır. Fakat akıştırma sonuçlarında su sınıflarındaki başarının düşük olmasının ve MODIS görüntülerinde bulunan bulut sınıfının aslında hepsinin bulut olmamakla birlikte geçiş bölgelerinin belirsizliğinden kaynaklanan karar verilemeyen alanları da içermesi Landsat ve MODIS görüntülerinin mekansal çözünürlüğü karşılaştırıldığında beklenen bir sonuçtur. Çalışmada kullanılan iki uydunun, çakıştırma analizi ile elde edilen etkili kar kaplı alan görseli şekil 3.29’da verilmiştir.



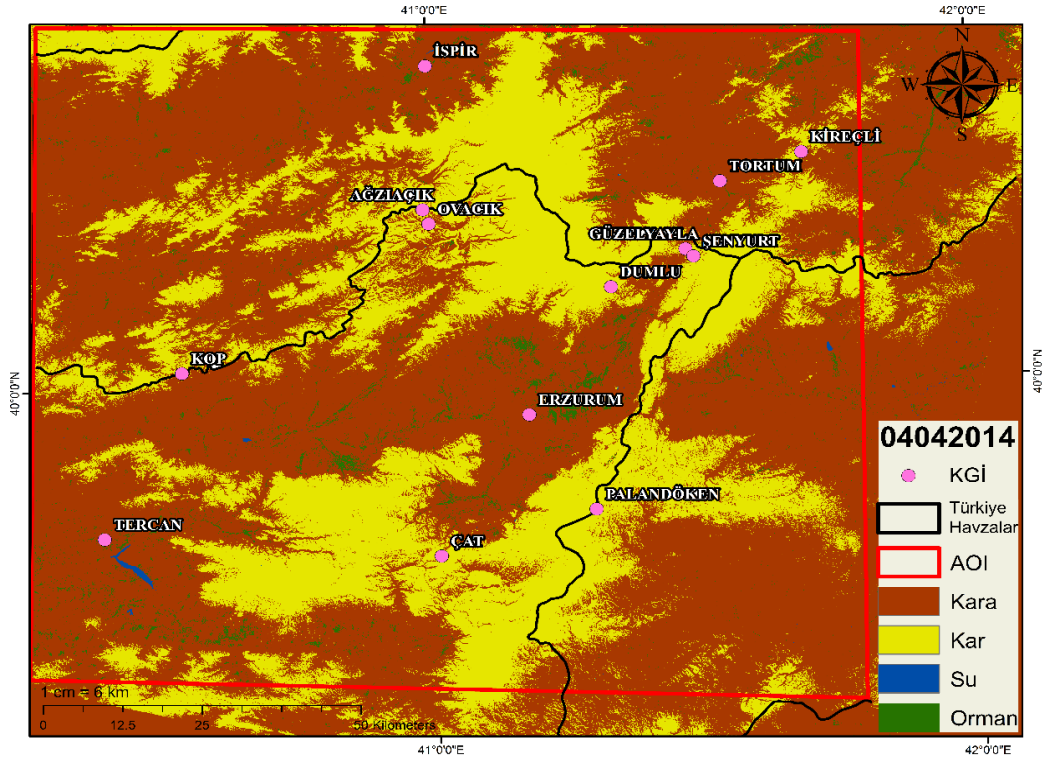
Şekil 3.29. MODIS-Landsat karşılaştırma görüntüsü (4 Nisan 2014)

3.4.6. Uydular ve yer gözlemi kıyası

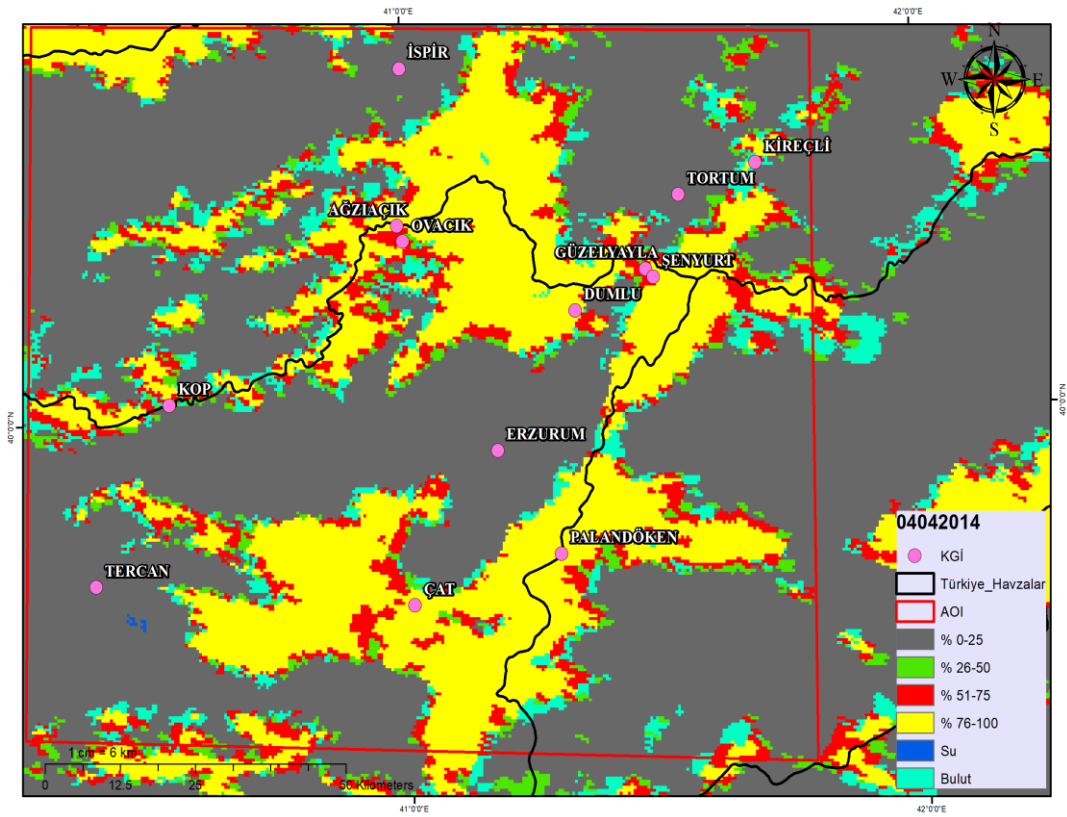
Farklı zamansal ve mekansal çözünürlüğe sahip iki uydunun değişik versiyonları kullanılarak, seçilen ilgili alan içerisinde etkili kar kaplı alan dağılımları karşılaştırılmıştır. Bunu yaparken, CBS platformunda karşılaştırma analizi yöntemi uygulanmıştır. 30 m mekansal çözünürlüğe sahip Landsat uydusu doğru olarak kabul edilip, elde edilen karşılaştırma analizi başarılarına bakılacak olursa 500 m mekansal çözünürlüğe sahip MODIS uydusunun doğruya yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Fakat, bu çalışmanın doğruluğunu desteklemek adına yer gözlemlerinden yararlanılmıştır. Farklı yüksekliklerde ve ilgili alan içerisinde yer alan bazı Kar Gözlem İstasyonları'ndan, (KGİ) kar verileri temin edilmiştir. Elde edilen veriler ile yapılan karşılaştırma çalışmasında, uyduların hem ikili hem de EKKA yüzdeleri Tablo 3.4 'te verilmiştir. Yer gözlem verilerine göre; 1 değeri kar var, 0 değeri ise karın olmadığını ifade etmektedir. Bazı istasyonlarda ise, karın o gün içerisinde kaç cm derinliğe sahip olduğu bilinmektedir. Çalışma sonuçları ve KGİ konumları Şekil 3.30 ve 3.31'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Uyduları yer gözlemi verileriyle doğrulama çalışması

Yer İstasyonları		27 Mart 2011						4 Nisan 2014						8 Mart 2016					
İstasyon Adı	Yükseklik (m)	Veri	Landstat (İkili) 30 m	Landstat (Etkili) 500 m	MODIS (İkili) 500 m	MODIS (Etkili) 500 m	Veri	Landstat (İkili) 30 m	Landstat (Etkili) 500 m	MODIS (İkili) 500 m	MODIS (Etkili) 500 m	Veri	Landstat (İkili) 30 m	Landstat (Etkili) 500 m	MODIS (İkili) 500 m	MODIS (Etkili) 500 m			
PALANDÖKEN	2937	1 (73 cm)	Var	76-100 (100)	51-100	76-100	1	Var	76-100 (100)	51-100	76-100	1	Var	76-100 (100)	51-100	76-100			
DUMLU	2666	1 (51 cm)	Var	76-100 (100)	51-100	76-100	1	Var	76-100 (100)	51-100	76-100	1	Var	76-100 (100)	51-100	76-100			
KOP	2416	1 (106 cm)	Var	76-100 (100)	51-100	76-100	1 (49 cm)	Var	51-75 (51)	Bulut	Bulut	1 (90 cm)	Var	76-100 (100)	51-100	76-100			
KİREÇLİ	2413	1 (30 cm)	Var	76-100 (100)	51-100	76-100	0 (2.7 cm)	Var	76-100 (100)	Bulut	Bulut	—	Var	76-100 (97)	51-100	76-100			
ÇAT	2343	1 (73 cm)	Var	76-100 (99)	51-100	76-100	—	Var	76-100 (95)	51-100	76-100	1 (72 cm)	Var	76-100 (96)	51-100	76-100			
AĞZILAÇIK	2253	1 (60 cm)	Var	76-100 (98)	51-100	76-100	1 (24 cm)	Var	76-100 (77)	51-100	51-75	1	Var	76-100 (97)	51-100	76-100			
ŞENYURT	2214	1 (61 cm)	Var	51-75 (66)	51-100	76-100	—	Var	26-50 (44)	51-100	51-75	1	Var	76-100 (77)	51-100	76-100			
OVACIK	2165	1 (57 cm)	Var	76-100 (97)	51-100	76-100	0 kırçıl	Yok	0-25 (21)	51-100	51-75	—	Var	76-100 (91)	51-100	76-100			
GÜZELYAYLA	2080	1 (26 cm)	Var	76-100 (97)	51-100	76-100	0 kırçıl	Yok	0-25 (0)	51-100	51-75	0 kırçıl	Var	51-75 (69)	51-100	76-100			
ERZURUM	1757	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25			
TORTUM	1585	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25			
TERCAN	1427	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25			
İSPİR	1187	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25	0 (0 cm)	Yok	0-25 (0)	0-50	0-25			



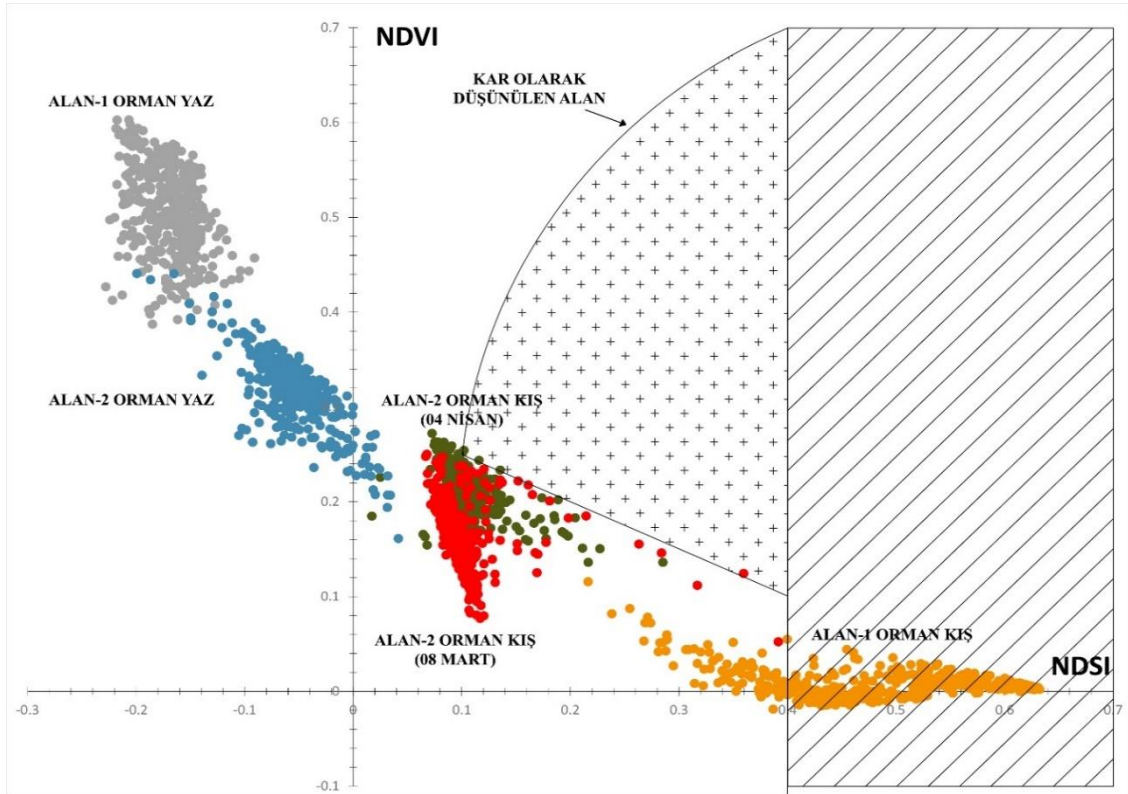
Şekil 3.30. Landsat ve KGI kullanılarak yapılan kar kaplı alan karşılaştırması (4 Nisan 2014)



Şekil 3.31. MODIS ve KGI kullanılarak yapılan kar kaplı alan karşılaştırması (4 Nisan 2014)

3.4.7. Çalışmada uygulanan indekslerin sonuçları

NDVI ve NDSI birlikte ele alındığında, karla kaplı ormanları sınıflandırabilmek için kullanılır. Çalışmada Landsat 8/OLI görüntüleri üzerinde ve belirlenen ilgili alan çerçevesinde karla kaplı ormanları belirlemek için NDVI-NDSI grafiği oluşturulmuştur (Şekil 3.32). Daha önce, çalışma için belirlenen ilgili alan (AOI) seçilirken ormanlık alanların az olduğu belirtilmiştir. Bunu kanıtlamak adına çalışma alanının arazi kullanım haritası verilerek ormanlık alanların %2.98 olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmanın belirleyiciliği açısından NDVI-NDSI grafiği oluşturulurken ilgili alan içerisinde ormanlık alanların yoğun olduğu daha küçük bir bölge seçilmiştir. Bu bölge grafik üzerinde Alan-2 olarak tanımlanmaktadır. Alan-1 ise ilgili alanı (AOI) temsil etmektedir. Ormanlık bölgeler her iki alan için yaz ve kış aylarını temsil etmek üzere grafik üzerinde ikiye ayrılmıştır. Yaz olarak belirlenen tarih, ilgili alanda kar örtüsünün bulunmadığı ve bulutluluk yüzdesinin yok denecek kadar az olduğu 2 Temmuz 2015 Landsat 8 görüntüsüdür. Kış olarak belirlenen tarih ise, Alan-1 için karın yoğun olduğu 8 Mart 2016 görüntüsü, Alan-2 için ise hem 8 Mart 2016 görüntüsü hem de 4 Nisan 2014 görüntüsü birlikte düşünülmüştür.

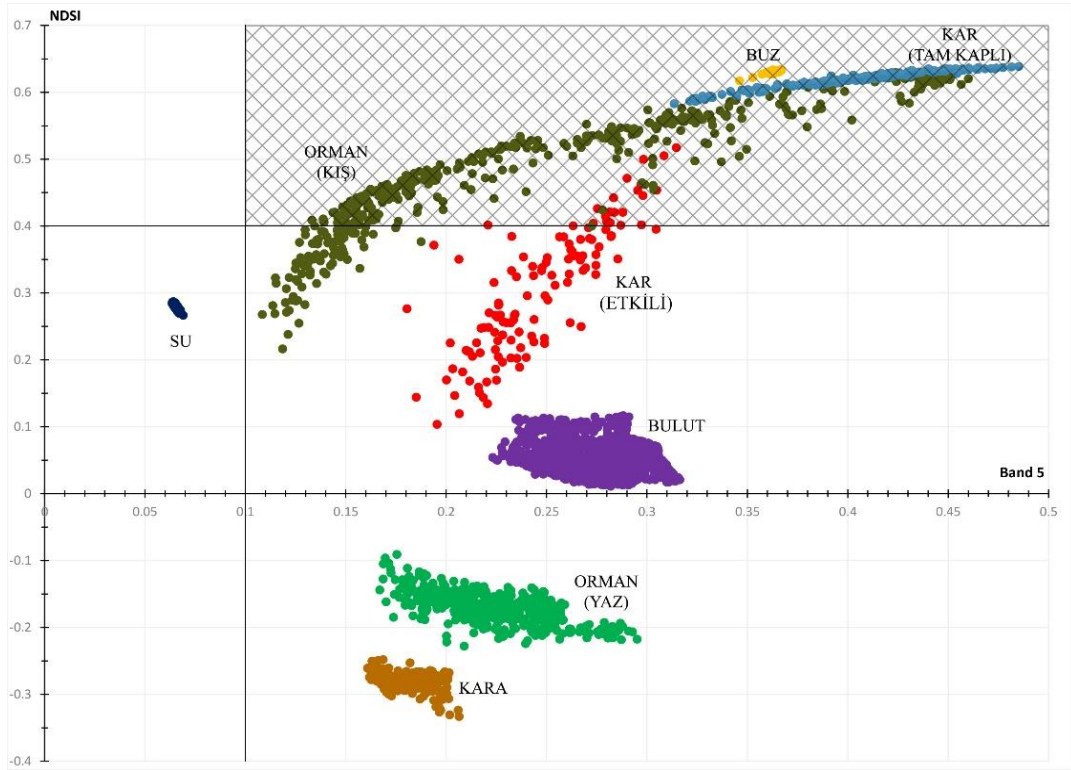


Şekil 3.32. Çalışmada kullanılan NDVI-NDSI grafiği

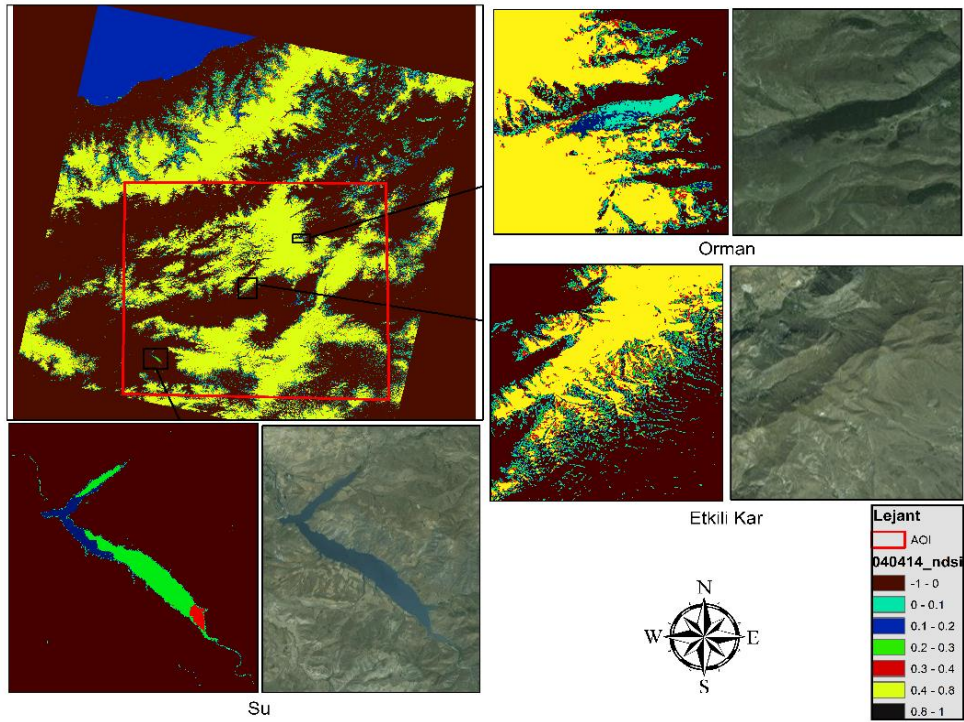
Grafiğe göre, NDSI indeksinin 0.4 kriterine eşit ve üzerini gösteren taralı alan karla kaplı ormanlık alanı göstermektedir. Bu bölgeye sadece ilgili alanın 8 Mart 2016 görüntüsü dahil olmuştur. NDSI indeksinin 0.1 ile 0.4 arasında olan değeri ve NDVI indeksinin 0.1 ve üzeri değerlerinin farklı noktalarda kesiştikleri bölge kar olarak düşünülen alan içerisinde yer almaktadır (Klein vd., 1998). Bu çalışmada sadece birkaç pikselin belirtilen alana dahil olduğu gözlenmiştir. Bu da çalışmada kullanılan NDVI indeksinin, ilgili alan üzerinde karla kaplı ormanları belirlemek adına ihtiyaç duyulan bir indeks olmadığını göstermiştir. Bunun sebebi, çalışma alanında ormanlık alanların az olmasından kaynaklanmaktadır.

Çalışma alanında bulunan su kütleleri, bölgenin karakteristiği düşünüldüğünde 0.1 kriterinden büyük farklı NDSI değerlerine sahip olabilirler. Ancak, su daha düşük yakın kızılötesi yansıma oranına sahip olduğu için kardan ayırt edilebilmektedir. NDSI hesaplandıktan sonra kar için ilave bir test yapılmalıdır (Dozier, 1989). Etkili kar kaplı alan algoritmasında hücre değerlerinin kar kaplı alan olarak sınıflandırılabilmesi için, Landsat 8'e göre band 5'in (Landsat TM band 4) yansıması $> \% 11$ 'den büyük olmalıdır. Bu işlem uygulanan NDWI indeksiyle birlikte düşünülmüştür. NDSI ve yansıtma testlerinin sonuçlarına bakıldığında, NDSI'nin 0.4 ve üzeri değerleri ile yansıtma ve NDWI testlerinin kesişim yerleri (Şekil 3.33'deki taralı alan) o bölgenin kar kaplı alan sınıfında olduğunu belirtmektedir. NDSI-Band 5 test sonuçlarında farklı sınıfları göstermek için, bulut, orman, kara, su, buz ve farklı özelliklere sahip kar sınıfları seçilmiştir. Bu sınıflandırmaları yaparken, sonuçların daha anlaşılabilir olması adına farklı tarihli görüntüler kullanılmıştır. Buna göre; kar, buz ve karla kaplı orman sınıfları karın yoğun olduğu 8 Mart 2016 görüntüsünden, su, bulut ve yazlık orman sınıfları 2 Temmuz 2015 tarihli görüntüden elde edilmiştir. Benzer şekilde, karın erimeye başladığı ve etkili kar sınıfının etkin olduğu 4 Nisan 2014 görüntü de çalışmada kullanılmıştır. Şekil 3.33'te görüldüğü gibi 0.4 NDSI kriterinden küçük karlı ormanların bazı değerleri kar olarak sınıflandırılmamıştır. Ayrıca parçalı kar sınıfına ait değerler, 0.5 ile 0.1 NDSI kriteri arasında dağılmışlardır. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere, NDSI kriterinin 0.4 ve üzeri olarak sınırlandırılmaması gerektiği ve kullanıcının bölge koşullarını ve görüntüleri esas alarak NDSI eşiğinin düşürülebileceğini göstermiştir. Böylece, ormanlarda daha fazla kar eşleştirilmesi yapılabilecek ve parçalı kar sınıfları da kar kaplı alan olarak değer kazanabilecektir (Riggs vd., 2016). NDSI-Band 5 grafiği oluşturulurken, ilgili alanın

hangi bölgelerinden sınıfların elde edildiği 4 Nisan 2014 görüntüsü üzerinde verilmiştir (Şekil 3.34).



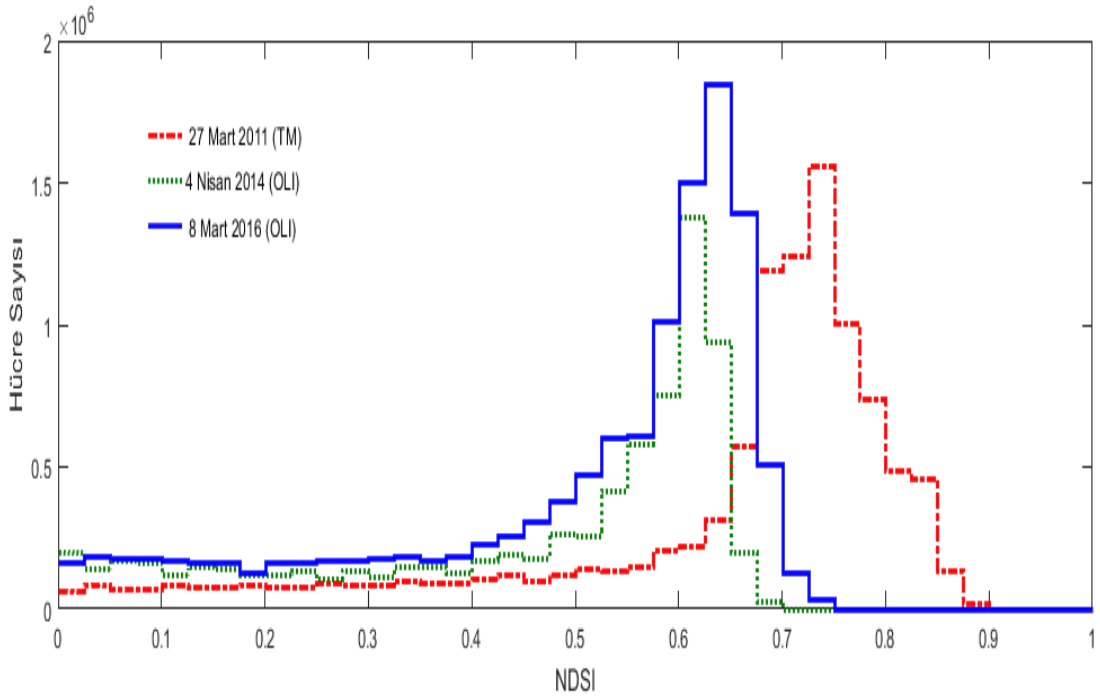
Şekil 3.33. Çalışmada kullanılan NDSI-Band 5 grafiği



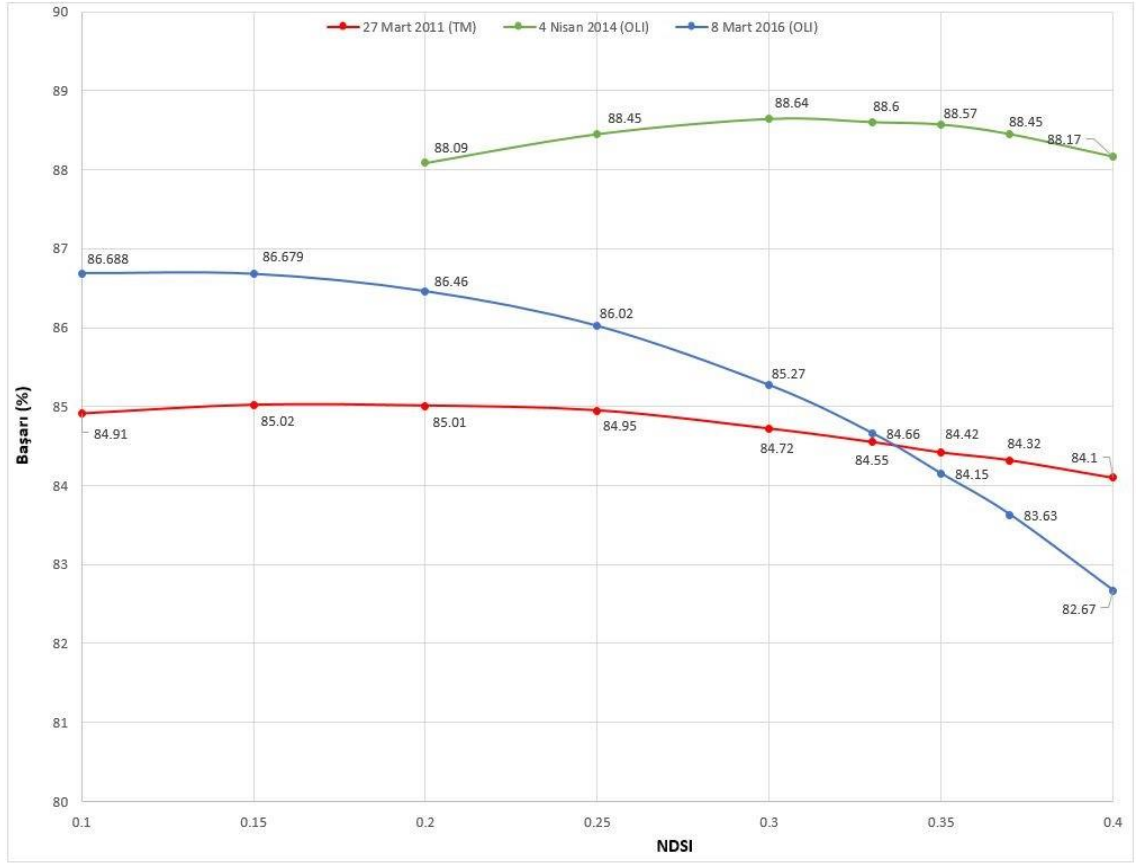
Şekil 3.34. 4 Nisan 2014 NDSI indeksi sınıflandırması

Bu çalışmada kar kaplı alan belirleme kapsamında, farklı özelliklere sahip indeksler ve bantların kullanıldığı birçok analizler yapılmıştır. Farklı versiyonlara sahip Landsat uydu görüntüleri kullanılarak yapılan bu analizler sonucunda, çalışma alanı üzerinde etkili kar kaplı alan belirlenmiş ve MODIS uydu görüntüleri ve yer gözlem verileriyle kıyaslanmıştır. İki uydu arasında yapılan karşılaştırma analiz sonuçlarında hem ikili hem de etkili kar kaplı alan düşünüldüğünde, toplam başarıların ikilide % 82.6 ile % 88, etkilide ise % 71.3 ile % 79.8 arasında değiştiği görülmektedir. Bulut veya kararsız bölgeler çıkarıldığında ise toplam başarının arttığı ve ayrıca elde edilen yer gözlem verilerinin hem MODIS hem de Landsat uydusunu desteklediği belirlenmiştir.

Landsat görüntüleri üzerinde, farklı sınıflar kullanılarak yapılan indeksler ve bunların sonuçları göz önüne alındığında, kar kaplı alan için NDSI indeksinin sadece 0.4 ve üzeri kriterini taşımaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Yapılan analizlerin duyarlılığı, kar için kesin bir NDSI eşik değerinin olmadığını göstermektedir. Çalışma alanının arazi koşulları, iklim özellikleri ve seçilen görüntü tarihleri gibi birçok faktör bu sonuca ulaşılmasını sağlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bu yargıyı, Şekil 3.35’de verilen histogram grafiği ile Şekil 3.36’da verilen 3 görüntünün farklı NDSI kriterlerine göre başarı dağılımları desteklemektedir.



Şekil 3.35. Farklı versiyonlara ait Landsat görüntülerinin NDSI histogram grafiği



Şekil 3.36. NDSI kriterlerine göre başarı dağılımı

Şekil 3.35’de verilen grafiğe göre, Landsat 8 uydu görüntülerinin benzer histogram değerlerine sahip olduğu ancak Landsat 5 görüntüsünün versiyonu ve bant kombinasyonlarına göre daha farklı değerler verdiği görülmektedir. Şekil 3.36’da ise, çalışma alanında denenmiş olan farklı NDSI kriterlerinin başarı yüzdelelerini ne derece etkilediği belirlenmiştir. Özellikle en karlı gün olan 8 Mart 2016 görüntüsü üzerinde yapılan NDSI çalışmalarının başarıyı değiştirme oranında oldukça hassas olduğu görülmektedir.

Bu analiz sonuçlarına göre NDSI kriteri 0.3 – 0.35 bandına göre indirilebilecek hatta bazı yerlerde 0.25 değerlerinin de kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Şekil 3.33’de verilen görselde, etkili kar kaplı alanların ve karla örtülü ormanların NDSI kriterleri üzerindeki değişimiyle de bu açıkça görülmektedir. Ancak bu değerler çalışma alanı olarak seçilen bölge için geçerli olup diğer alanlar için de bu testlerin yapılması gerekmektedir.

4. HİDROLOJİK MODELLEME

Hidrolojik modelleme, havzadaki hidrolojik sürecin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olarak su kaynakları yönetimi çalışmalarının iyileşmesine katkıda bulunmaktadır. Fakat, hidrolojik havzada yağış-akış ilişkisini modellemek karmaşık bir işlemdir. Bu karmaşık sistemi bilgisayar ortamında basitleştirilmiş matematiksel denklemlerle temsil etmeye 1960'lı yılların başında Crawford ve Linsley (1966) tarafından The Stanford Watershed Model kullanılarak başlanmıştır. Daha sonraki yıllarda farklı amaçlar için birçok hidrolojik model geliştirilmiştir (Singh, 1995). Hidrolojik modeller; literatürde daha önce yapılan modelleme çalışmalarına göre fiziksel, kavramsal ve kapalı kutu modeller olarak üç ana başlıkta sınıflandırılmaktadır.

Bu çalışmada, yağış-akış ilişkisini gözlenen verilerle basit matematiksel denklemler aracılığıyla ifade eden ve kavramsal hidrolojik modellerden biri olan HBV modeli tanıtılmıştır.

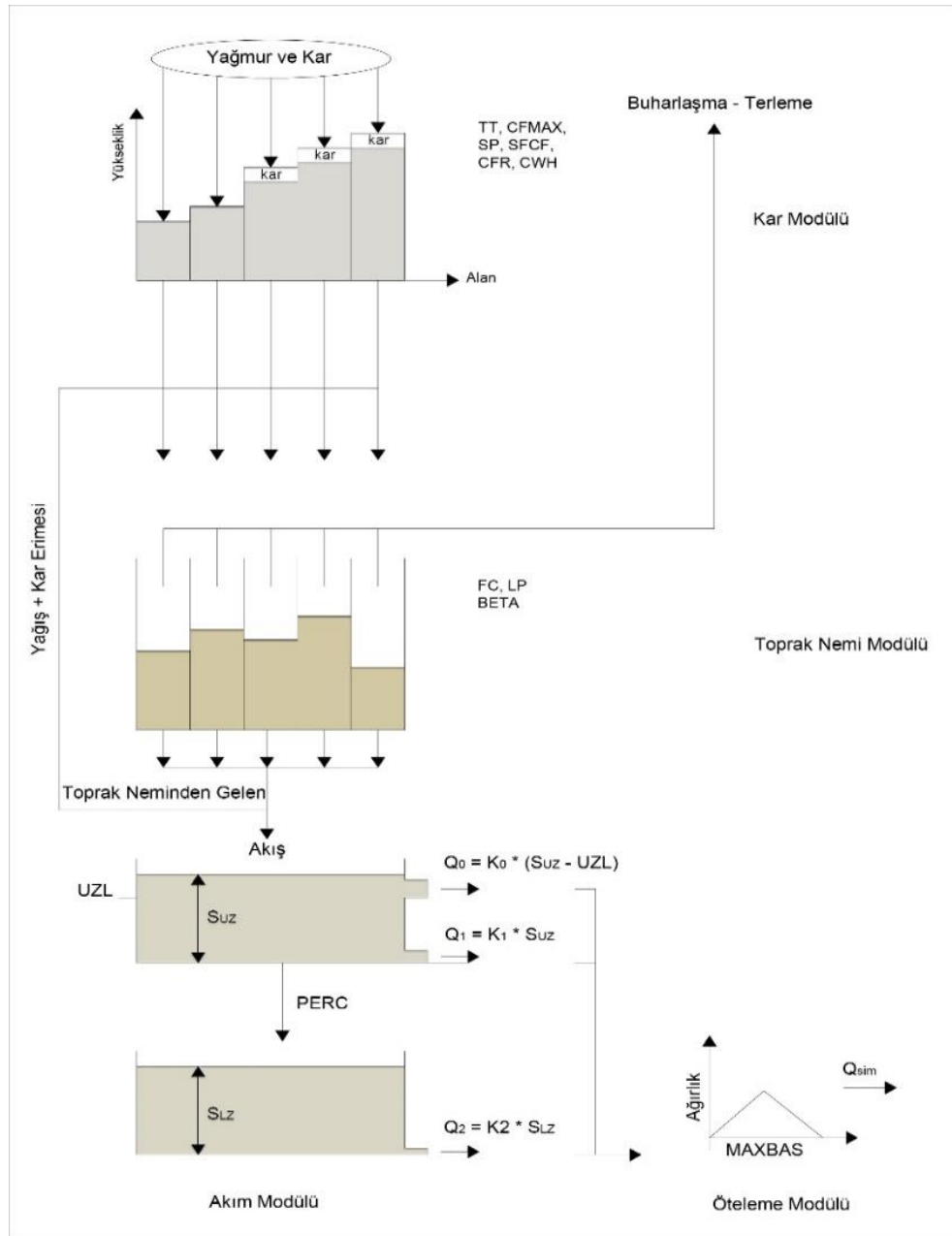
4.1. HBV Modeli

HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning) modeli İsveç Meteoroloji ve Hidroloji Enstitüsü'nde (SMHI) Dr. Sten Bergström ve arkadaşları tarafından 1972 yılında, rezervuara giren akım tahmini ve sel uyarı ihtiyacı nedeniyle geliştirilmiştir. Günümüzde birçok farklı versiyonla kullanılmaktadır (Singh, 1995; Bergström, 2002; Bergström ve Lindström, 2015).

HBV modeli, havzayı farklı yükseklik ve bitki örtüsüne göre alt bölgelere ayırarak yağış, sıcaklık ve potansiyel buharlaşma-terleme girdilerini akım benzetimi gerçekleştirmek için kullanan kavramsal ve yarı dağılımlı bir yağış-akış modelidir (Lindström vd., 1997). Model, kar ve toprak nemi katmanlarını alt havza bazında, akış ve öteleme modüllerini ise tümsel olarak hesaplayarak günlük debiyi simüle eder (Şekil 4.1). Modelde süreklilik gözetildiği için her katmandaki durum değişkeni takip edilebilmektedir.

HBV modelinin bu çalışma için seçilmesinin nedenlerinden biri, uzun yıllar dünyanın farklı bölgelerinde başarısını kanıtlamış bir model olmasındandır. Geliştirilmesinden bu yana HBV-96 modeliyle birlikte birçok düzeltme ve revizyonlar yapılmıştır (Lindström vd., 1997). HBV modeli farklı amaçlar için birçok havzada uygulanmıştır (Harlin ve Kung, 1992; Lindström vd., 1997; Seibert, 1997 ve 2000;

Uhlenbrook vd., 1999; Bergström vd., 2002; Seibert, 2005; Parajka vd., 2007; Şorman vd., 2009; Abebe vd., 2010; Finger vd., 2011 ve 2015; Bergström ve Lindström, 2015; Maat, 2015) ve çoğu uygulamada iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan HBV modeli, Seibert ve Vis (2012) tarafından geliştirilen grafik arayüzlü ve otomatik kalibrasyon seçeneği sunan HBV-Light versiyonudur. Tablo 4.1’de modelde kullanılan değişken parametreler ve bunların özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.1: HBV Light modelinin ana yapısı (Seibert ve Vis, 2012)

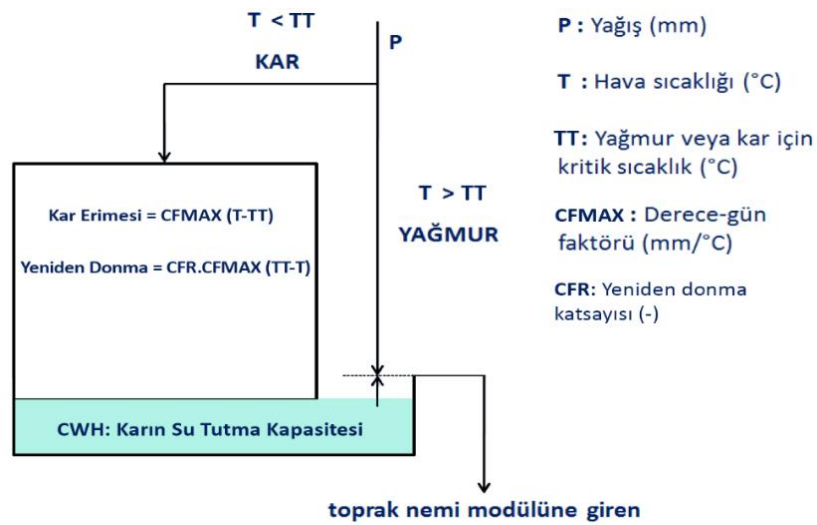
Tablo 4.1: *HBV Light modelinin kullandığı değişken parametreler ve değer aralıkları*

Parametre	Birim	Değer Aralığı	Açıklama
TT	°C	-2.5 – 2.5	Yağış tipi için kritik sıcaklık
CFMAX	mm/gün °C	0 – 5.8	Derece-gün faktörü
SP	-	0 – 1	Derece-gün faktörünün mevsimsel değişkenliği
SFCF	-	0.7 – 1.3	Kar düzeltme faktörü
CFR	-	0.05 – 0.05	Kar modülünde yeniden donma katsayısı
CWH	-	0.1 – 0.1	Karın su tutma kapasitesi
FC	mm	50 - 500	Maksimum toprak nemi depolama kapasitesi
LP	-	0.2 – 1	Toprak nemi modülünde potansiyel buharlaşma limiti
BETA	-	1 - 5	Toprak nemi deposundan akım modülüne katılım katsayısı
PERC	mm/gün	0 – 6	Üst zondan alt zona derin süzülme kapasitesi
UZL	mm	0 – 75	Depolama aşma sınır değeri
K0	gün ⁻¹	0.1 – 0.6	Çok hızlı akım katsayısı
K1	gün ⁻¹	0.01 – 0.2	Hızlı akım katsayısı
K2	gün ⁻¹	0.00005 – 0.1	Düşük akım katsayısı
MAXBAS	gün	1 – 2.5	Öteleme parametresi
Cet	°C ⁻¹	0 – 3	Potansiyel buharlaşma düzeltme faktörü
PCALT	%/100 m	2 – 10	Yağış için yükseklik düzeltme faktörü
TCALT	°C/100 m	0.3 – 0.8	Sıcaklık için yükseklik düzeltme faktörü

4.1.1 Kar modülü

HBV-Light modelinin kar modülü, Şekil 4.2, her bir yükseklik zonu için ayrı çalışarak kar birikmesini ve erimesini derece-gün faktörü (CFMAX) ile kontrol etmektedir. Hava sıcaklığı kritik sıcaklık değerinin (TT) altına düştüğünde model düşen yağışı, kar olarak kabul etmektedir. Model, kar olarak algıladığı bütün yağışları kar düzeltme faktörü (SFCF) ile düzeltilmesine olanak tanımaktadır. Kar birikme sezonunda derece-gün faktörü değişkenlik gösterebilir (SP) ve eğer bu parametre 1'den küçük bir değer alırsa, birikme sezonunu $SP \times CFMAX$ şeklinde hesaplanmaktadır. Kar erimesi, erime sezonu boyunca sabit kaldığı kabul edilen derece-gün faktörüne (CFMAX) göre sıcaklık değeri kritik değerin (TT) üzerine çıktığında başlar ve herhangi bir akım oluşmadan önce karın su tutma kapasitesi (CWH) aşılmalıdır. Erime döneminde sıcaklık değeri, kritik değerin (TT) altına düştüğünde eriyen kar yeniden donmaktadır (CFR).

Havzanın farklı yükseklik zonlarına bölünmesiyle kar birikmesinde etkili olan yüksekliğin, her bir zon için sıcaklık ve yağış düzeltmesi yapılmaktadır (PCALT, TCALT). Genellikle deniz seviyesinden her 100 metre yükseldikçe yağış oranı %10 artarken, sıcaklık oranı da aynı şekilde 0.6°C azalmaktadır (Seibert ve Vis, 2012). Kar modülündeki hesaplamaların temel sonuçları her bir yükseklik ve zaman aralığı için modele girdi olarak yağış ve sıcaklık verileri kullanır. Bu modülde hesaplanan işlemlerden sonra, kar birikmesi ve derinliği (mm), kar su eşdeğeri (mm) ve kar erimesi (mm/gün) çıktı verileri elde edilmektedir.

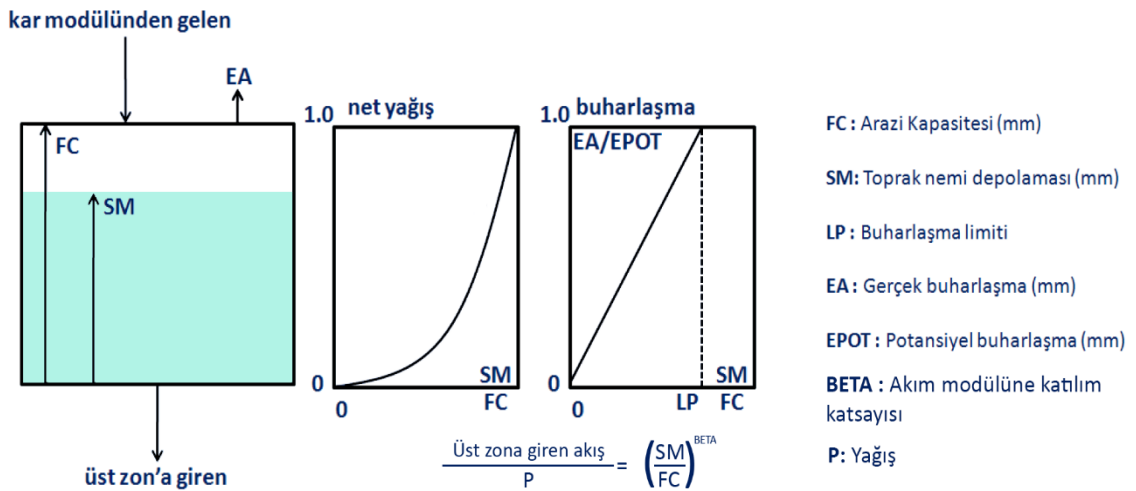


Şekil 4.2: HBV modelinin kar modülü (Killingtveit ve Saelthun, 1995)

4.1.2. Toprak nemi modülü

Modelin toprak nemi modülü, havzadaki depolama kapasitesi için matematiksel bir dağılım kabul eden hazne teorisinin değiştirilmesi temeline dayanır. Toprak nemi modülü; yağışı, kar erimesini ve potansiyel buharlaşmayı girdi olarak alır ve toprak neminde depolanan su ile gerçek buharlaşmayı hesaplar. Ayrıca, yağışla gelen net akım miktarı hesaplanmaktadır. Kar modülünden gelen yağış ve kar erimesi, toprağı besleyen ve yeraltı suyuna katılan akım olarak ayrılırlar. Toprak nemi modülü üç ampirik parametre, BETA, FC ve LP temelinde çalışmaktadır (Şekil 4.3). Bu parametreler değişken parametrelerdir ve model kalibrasyonu ile belirlenmeleri gerekmektedir. BETA parametresi akım modülüne katılımı ve toprak nemi depolamasına giren 1 mm'lik yağış ve kar erimesi için toprak nemi depolamasındaki artışı kontrol eder. Arazi kapasitesi (FC), modeldeki en yüksek toprak nemi depolamasıdır. Eğer toprak nemi depolaması maksimum kapasiteye kadar doldurulmuşsa, gelen yağış veya kar erimesi toprakta depolanmadan doğrudan akıma dönüşecektir.

Model, potansiyel buharlaşmanın uzun vadeli aylık ortalama değerlerini girdi olarak kullanmaktadır. Toprak nemi modülünde gerçek buharlaşma-terlemenin (E_{act}) hesabı, girdi olarak kullanılan potansiyel buharlaşma-terleme (E_{pot}) ve bağıl toprak nemi depolamasının (SM/FC) bir fonksiyonu olarak yapılmaktadır. Eğer toprak nemi LP'nin altında ise gerçek buharlaşma-terleme, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi toprak nemindeki azalma ile doğrusal olarak azalacaktır.



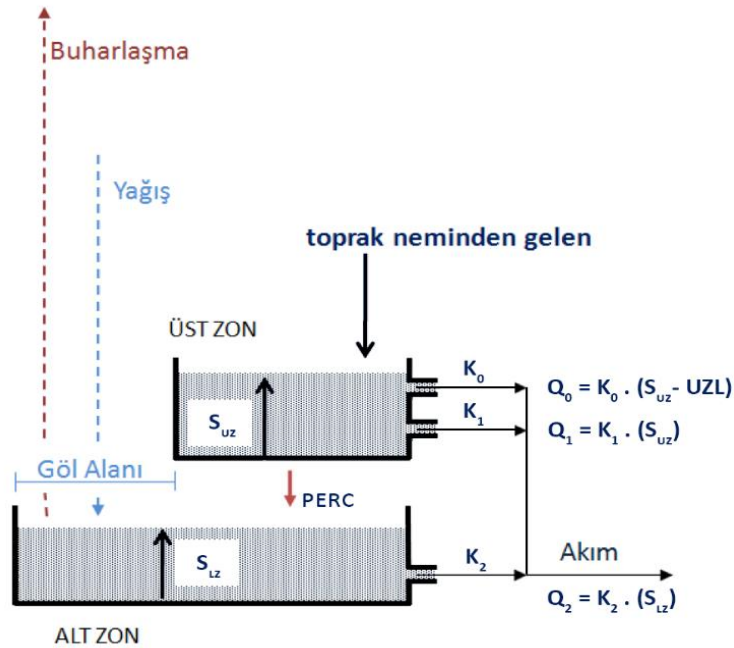
Şekil 4.3: HBV modelinin toprak nemi modülü (Killingtveit ve Saelthun, 1995)

4.1.3. Akım modülü

Akım modülü, toprak nemi modülünden gelen fazla suyu akıma dönüştürür. Aynı zamanda doğrudan yağış ve nehir veya göllerden buharlaşma etkisini de içermektedir. Modeldeki akım modülü Şekil 4.4'te gösterildiği gibi üst zon ve alt zon olarak adlandırılan iki doğrusal rezervuardan oluşur.

Üst zon, hızlı akım modülünü temsil etmektedir. Toprak nemi bölgesinden gelen yağış veya akım girdileri, üst zonda depolanmaya başlayacak ve alt zona doğru süzülecektir (PERC). Eğer üst zonda depolama miktarı eşik değerini (UZL) aşarsa, üst çıkış noktasına doğru çok hızlı drenaj başlayacak ve geciktirme katsayısı K_0 parametresi ile belirlenecektir. UZL ve K_0 parametreleri birbirlerine bağımlı değişkenlerdir. Üst zonda depolanan yağış, alt zona drene edilmeden üst çıkış noktasına doğru K_1 geciktirme katsayısı hesabı ile hızlı drenaj başlayacaktır.

Alt zon kavramsal olarak taban akışına katılan yeraltı suyu ve göl depolamasını temsil eder. Üst zondan süzülen ve göl veya nehirlerle doğrudan yağış düşmesi ile alt zon beslenmektedir. Bu bölgedeki su alt çıkış noktasına doğru taban akımı olarak drene edilir. Drenaj hızı geciktirme katsayısı (K_2) ile kontrol edilir. Alt zonda taban akışına katılamayan sular ise göl veya nehirlerden buharlaşma yolu ile hidrolojik döngüye katılırlar.



Şekil 4.4: HBV modelinin akım modülü (Killingtveit ve Saelthun, 1995)

4.1.4. Öteleme modülü

Akım modülünde üretilen akışa, havzanın çıkışında uygun bir akım hidrograf şekli elde etmek için dönüşüm fonksiyonuyla öteleme işlemi uygulanır. Dönüşüm fonksiyonu, ağırlıkların üçgensel dağılıma sahip basit bir filtreleme tekniğidir. Üçgen ağırlıklandırma fonksiyonunu kullanan ve modellenen hidrografa uygun şeklini veren değişken MAXBAS parametresidir (Şekil 4.1).

4.2. Model Uygulaması

Kavramsal bir hidrolojik modeli belirli bir çalışmada kullanıma hazır hale getirmek için modelin kalibrasyonu yapılmalıdır. Kalibrasyon, havzanın davranışına uygun bir parametre arama sürecidir (Madsen vd., 2002). Kavramsal modellerde kalibrasyon ve validasyon genellikle gözlenen ve modellenen veri (en sık kullanılan veri türü akımdır) arasında olur. Bu süreci değerlendirme aşamasında çeşitli hidrolojik değerlerin model performansı için daha titiz bir şekilde analizlerin yapılması gereklidir (Seibert, 2000). Viviroli vd., (2009) ise yapmış oldukları çalışmalar sonucunda kalibrasyon prosedürünün amacını, belirli bir süre boyunca gözlenen ve simule edilen akımların arasındaki farkı en aza indirebilen bir parametre seti aramak olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada kullanılan HBV-Light modeli kavramsal bir model olduğundan, kullanılan girdilerin birçok matematiksel denklemlerden geçerek üretilen çıktılarının arazide ölçülen değerlerle tutarlı olması için modelin sağladığı parametrelerin düzenlenmesi gerekmektedir. Kalibrasyon olarak adlandırılan bu işlem kavramsal modeller ile yapılan hidrolojik modelleme çalışmasında belirli periyotlar arasında ölçülen verilerle gerçekleştirilir. Kalibre edilen model parametrelerinin farklı yılların modellenmesi sürecinde tutarlılıklarının incelenmesi işlemine ise validasyon adı verilir. Kalibrasyon çalışması ile elde edilen parametre değerlerini, farklı su yıllarında gözlenen veri ile doğruluğunu test etmek adına validasyon işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemler hidrolojik modellerin sunmuş oldukları kalibrasyon seçeneklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Daha önce yapılmış çalışmalarda deneme-yanılma yoluyla yapılan kalibrasyona göre sonuçlar öznel olabildiği gibi, bazı durumlarda birden fazla hidrolojik değeri kalibre ederken doğru sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle çeşitli otomatik kalibrasyon yöntemleri geliştirilmiştir (Sorooshian ve Gupta, 1995). HBV Light modelinin sunduğu ve bu çalışmada havza üzerindeki model parametrelerinin belirlenmiş

olduğu yöntemler; havzanın kalibrasyon yılı için seçilen sürecin, yağış ve sıcaklık durumuna göre en iyi parametre setini veren Genetik Algoritma ve Powell (GAP) Optimizasyonu yöntemi ve normal dağılıma uyumlu rassal model parametre setleri üreten Monte Carlo (MC) yöntemleridir.

4.2.1. Genetik Algoritma ve Powell (GAP) yöntemi ile kalibrasyon çalışmaları

HBV Light modelinin otomatik kalibrasyon yöntemlerinden biri olan GAP metodu belirlenen uygun parametre aralıklarında, amaçlanan işleve göre farklı kombinasyonlar üreterek en iyi parametre setlerinin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Parametre aralığında başlangıçtaki ‘n’ parametre kümeleri rastgele oluşturulur ve her kümenin uygunluğu hedef fonksiyonunun değeri ile değerlendirilir. Bu popülasyondan, n’in iki parametre setini birleştirerek yeni bir nesil üretilir. Her bir parametre için belirli olasılıklarla, hedef fonksiyonuna göre en uygun değerleri veren iki ana kümeden yeni bir parametre kümesi oluşturulur. Böylece, belirtilen parametre aralıklarında en iyi parametre setini veren değerler elde edilir (Seibert, 2000).

Bu çalışmada, daha önceki HBV Light çalışmalarında önerilen parametre aralıkları (Tablo 4.2) kullanılarak GAP yöntemi ile bütün yıllar tek tek ve iki ayrı kalibrasyon-validasyon periyotları arasında (2003-2009 ile 2010-2015) denenmiştir. Modellenen akımın gözlenen akımla uyumunu temsil eden Nash-Sutcliffe Efficiency (Reff), kullanılan kalibrasyon yönteminde amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Tablo 4.3’te kullanılan GAP metodunda 2003-2015 su yıllarının ayrı ayrı Reff amaç fonksiyonuna göre uygulanan kalibrasyon sonuçları verilmiştir.

Kalibrasyon-validasyon çalışmalarında eldeki veri setinin bir bölümü kalibrasyon, diğer bölümü validasyon için kullanılır. Çalışmada 2003-2009 yıllarında Reff amaç fonksiyonuna göre kalibrasyon çalışması yapıp elde edilen parametre seti ile 2010-2015 yıllarında validasyon yapılmıştır.

Tablo 4.2. GAP yöntemine girdi olarak belirlenen parametre aralıkları

Parametre	En Küçük Değer	En Büyük Değer
TT	-2.5	+2.5
CFMAX	0	5.8
SP	0	1
SFCF	0.7	1.3
FC	50	500
LP	0.2	1
BETA	1	5
PERC	0	6
UZL	0	75
K0	0.1	0.6
K1	0.01	0.2
K2	0.0005	0.1
MAXBAS	1	2.5
Cet	0	0.3
PCALT	2	10
TCALT	0.3	0.8

Bu çalışmada her su yılı için uygulanan kalibrasyon sonuçlarına göre, gözlenen veriyle modellenen veri arasındaki tutarlılığın sadece Reff amaç fonksiyonuna göre değil, farklı model performans ölçütlerine göre de uygunluğu değerlendirilmiştir. Tablo 4.3'te model performans ölçütleri ve formülleri verilmiştir. Çalışmanın sonuçları Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 ile Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.3. GAP metodunda kullanılan ve değerlendirilen model performans ölçütleri

Model Performans Ölçütü	İngilizce Ölçüt Tanımı	Türkçe Ölçüt Tanımı	Formülü	Değer Aralığı
Reff (NSE)	Nash-Sutcliffe Efficiency	Model Verimlilik Katsayısı	$1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$	$(-\infty - +1)$
LogReff	Efficiency for Log(Q)	Logaritmik Model Başarısı	$1 - \frac{\sum (\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})^2}{\sum (\ln Q_{obs} - \overline{\ln Q_{obs}})^2}$	$(-\infty - +1)$
R ²	Coefficient of Determination	Determinasyon Katsayısı	$\frac{(\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}))^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}$	$(-1 - +1)$
VE	Volume Error	Hacim Hatası	$\frac{ \sum (Q_{obs} - Q_{sim}) }{\sum (Q_{obs})}$	$ -1 - 0 $

Tablo 4.4. GAP metodunda Reff amaç fonksiyonuna göre her yıl için kalibrasyon sonuçları

Su Yılı	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Reff	0.955	0.932	0.972	0.973	0.970	0.941	0.969	0.968	0.982	0.900	0.970	0.911	0.975
LogReff	0.264	0.703	0.658	0.890	0.242	0.728	0.895	0.822	0.945	0.265	0.665	0.882	0.778
R²	0.973	0.939	0.972	0.973	0.972	0.945	0.969	0.970	0.983	0.942	0.975	0.912	0.976
VE	0.139	0.053	0.034	0.01	0.043	0.03	0.003	0.029	0.01	0.173	0.032	0.003	0.001

Tablo 4.5. GAP metodunda Reff amaç fonksiyonuna göre kalibrasyon ve validasyon sonuçları

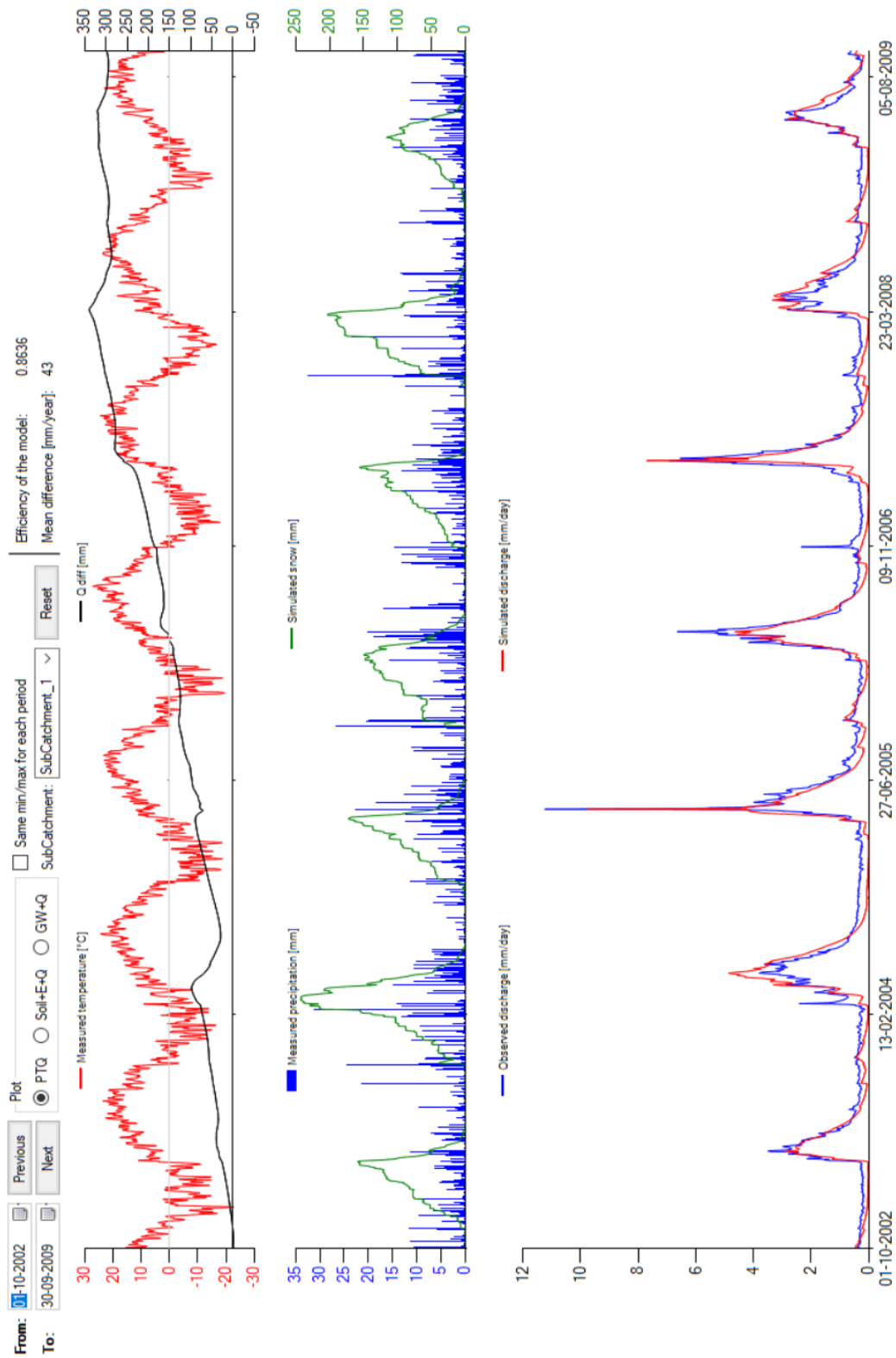
Su Yılları	2003-2009 Kalibrasyon	2010-2015 Validasyon
Reff	0.864	0.774
LogReff	-1.245	-1.944
R²	0.886	0.867
VE	0.134	0.305

Reff amaç fonksiyonu ile yapılan yıllık otomatik kalibrasyon sonuçlarına göre, her yıl için en iyi parametre seti elde edilmiştir. Tablo 4.4'te verilen sonuçlara göre, model başarısının (Reff) ve determinasyon katsayısının (R²) her yıl için çok yüksek olduğu görülmektedir. Modelde Reff yüksek akımların uyumunu temsil ederken, logaritmik model başarısı olan LogReff ise düşük akımlar arasındaki uyumu ifade etmektedir. Tablolarda verilen sonuçlara göre, LogReff amaç fonksiyonunun değişen değerler aldığı gözlenmektedir. Bunun sebebi ise, gözlenen ve simüle edilen düşük akımlar arasındaki uyum problemi (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Hacim hatalarının (VE) ise sıfır değerine yakın olması iyi bir sonuç olarak görülmektedir (Tablo 4.4 ve Tablo 4.5). Yıllık kalibrasyon sonuçlarının uzun yıl (2003-2009) kalibrasyon dönemine göre, belirtilen amaç fonksiyonları da düşünüldüğünde daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Bunun nedeni, her yıl için GAP yöntemiyle ayrı ayrı en iyi parametre seti üretilirken uzun yıl kalibrasyon dönemi için o süreci temsil eden tek bir en iyi parametre seti üretilmektedir. Bu nedenle yıllık kalibrasyon sonuçlarının uzun dönem kalibrasyon sonuçlarına göre

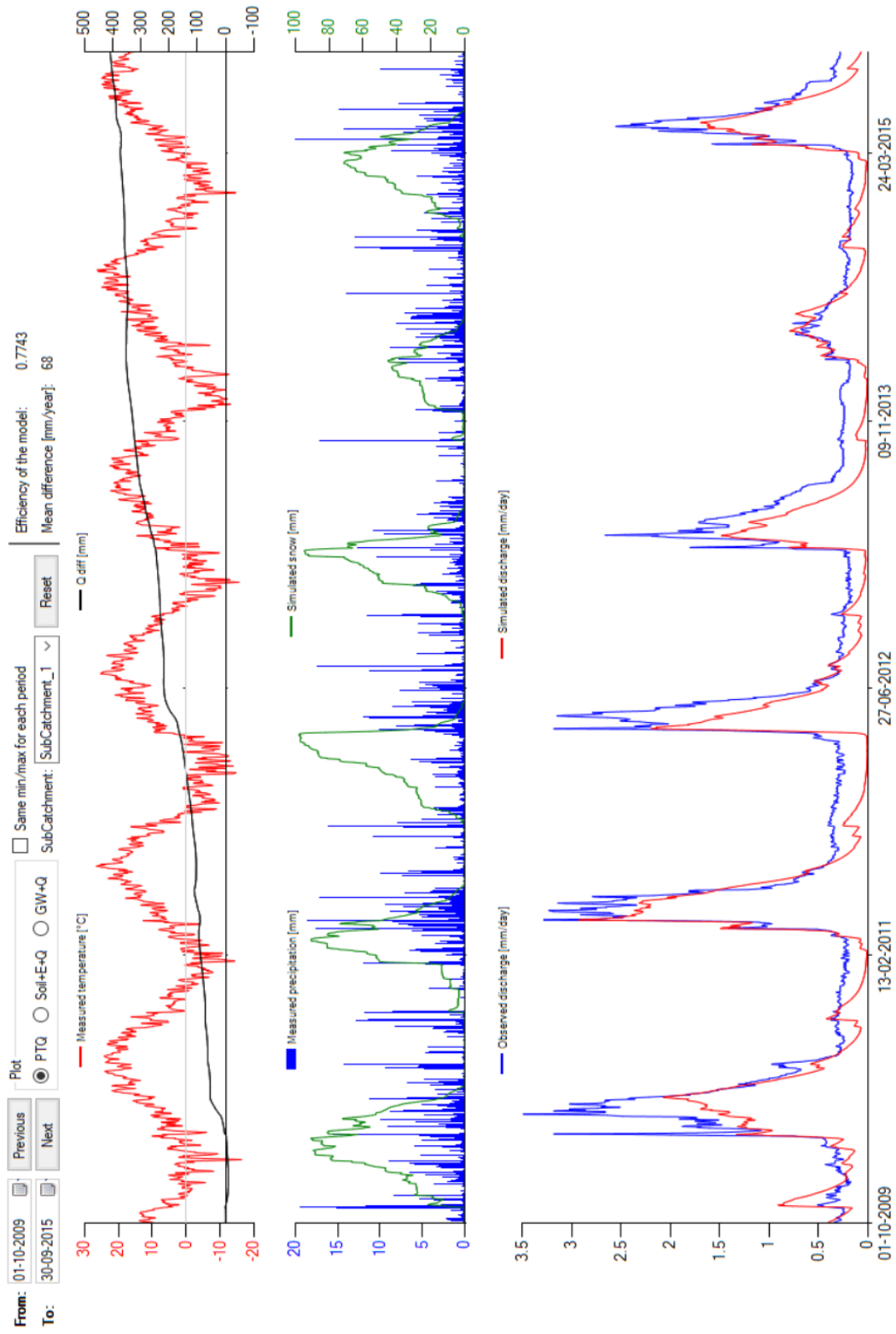
daha iyi olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, validasyon sonuçlarının beklendiği üzere kalibrasyon sonuçlarından düşük olduğu görülmektedir. Havzadaki 2003-2009 kalibrasyon dönemini, GAP metodu kullanılarak elde edilen ‘‘en iyi’’ parametre seti ile temsil eden değerler Tablo 5’te verilmiştir. Daha önce belirtildiği üzere GAP metodu ile tek bir parametre seti üretilmektedir. Bu da, ileride uygulanacak tahminlerde modelleme güvenilirliği ve belirsizliği açısından bir sorun yaratabilmektedir.

Tablo 4.6. *Reff amaç fonksiyonuna göre GAP metodu ile elde edilen ‘en iyi’ kalibrasyon dönemi parametre seti (2003-2009)*

Parametre	Değer
TT	-1.184
CFMAX	2.365
SP	1.000
SFCF	0.800
CFR	0.05
CWH	0.1
FC	82.680
LP	1.000
BETA	1.000
PERC	4.212
UZL	35.442
K0	0.485
K1	0.058
K2	0.035
MAXBAS	1.005
Cet	0.300
PCALT	9.440
TCALT	0.762



Şekil 4.5. E23A004 Havzası, 2003-2009 su yılları kalibrasyon sonuçları (GAP)

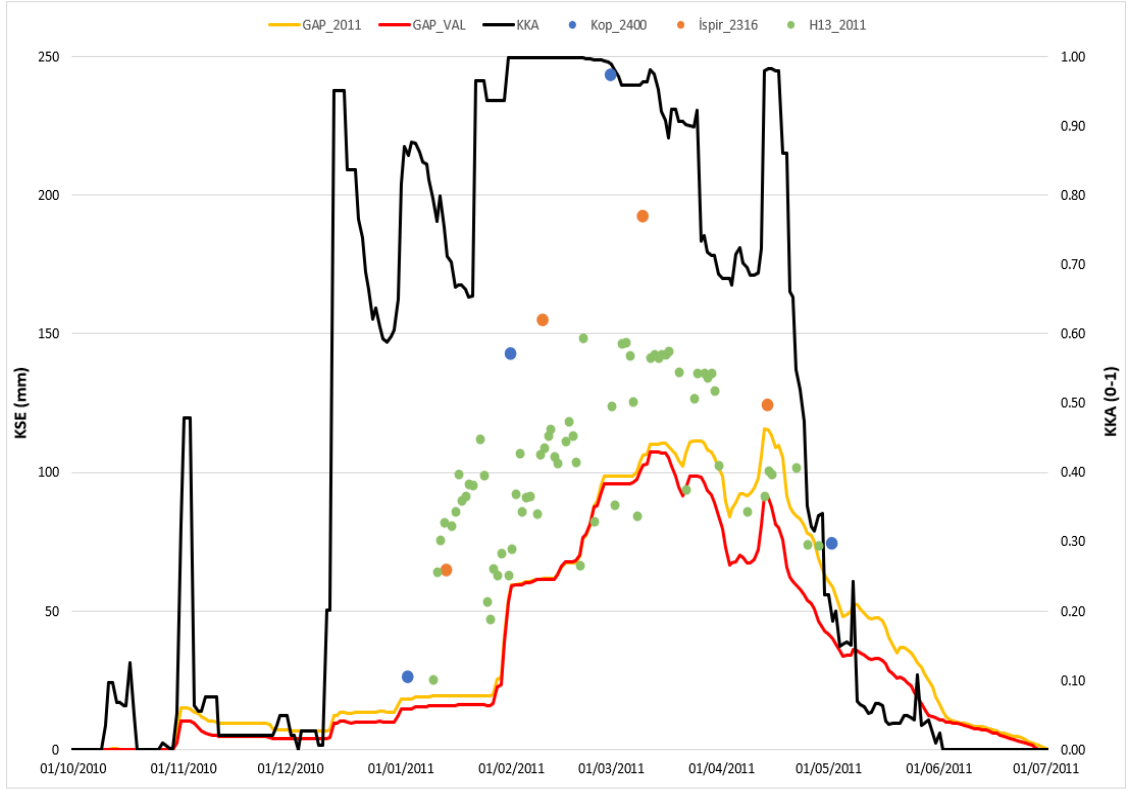


Şekil 4.6. E23A004 Havzası, 2010-2015 su yılları validasyon sonuçları (GAP)

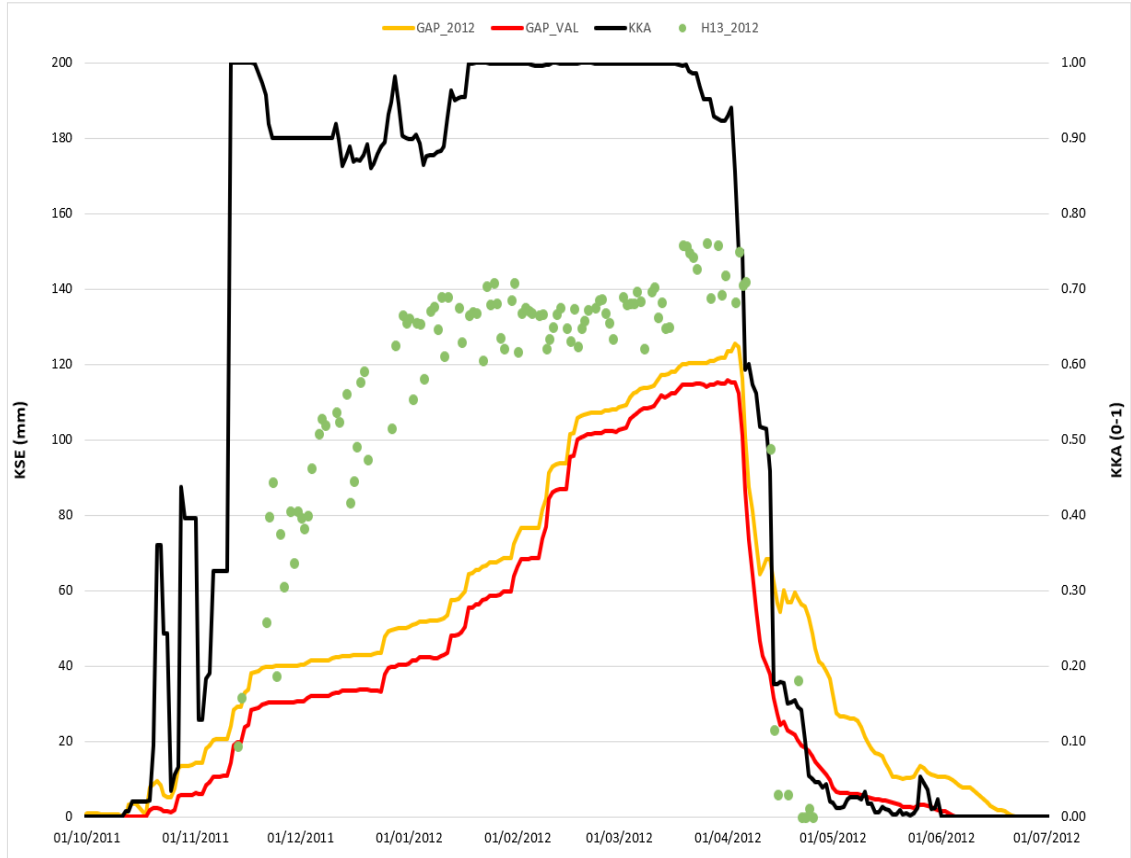
4.2.2. Kar kaplı alan (KKA) – kar su eşdeğeri (KSE)

Hidrolojide uydu görüntülerinin kullanımı ve hidrolojik model çıktılarıyla kıyaslanması, yapılan modelleme çalışmasının başarısını ölçmede ve güvenilirliğini belirlemede önemli bir yere sahiptir. Özellikle kar ağırlıklı havzalarda kar kaplı alan (KKA) ve kar su eşdeğeri (KSE) uydularından elde edilen sürekli ve sağlıklı veriler, günümüz koşullarında su kaynaklarının verimli bir şekilde işletilebilmesi için gerekli parametrelerdir. Daha önce farklı çözünürlüklere sahip uydulardan (MSG-SEVIRI, MODIS ve IMS) elde edilen görüntülerle yapılan çalışmada, havzanın kar kaplı alan analizi gerçekleştirilmiştir. Havzaya ait kar su eşdeğeri verileri ise SSMI/S uydusundan ve HBV modeliyle yapılan otomatik kalibrasyon çalışmalarından elde edilmiştir. KKA verileri yüzdelik dilimde ve KSE verileri ise mm cinsinde olmasına rağmen, eş zamanlı oldukları için bu çalışmada birlikte değerlendirilmiştir.

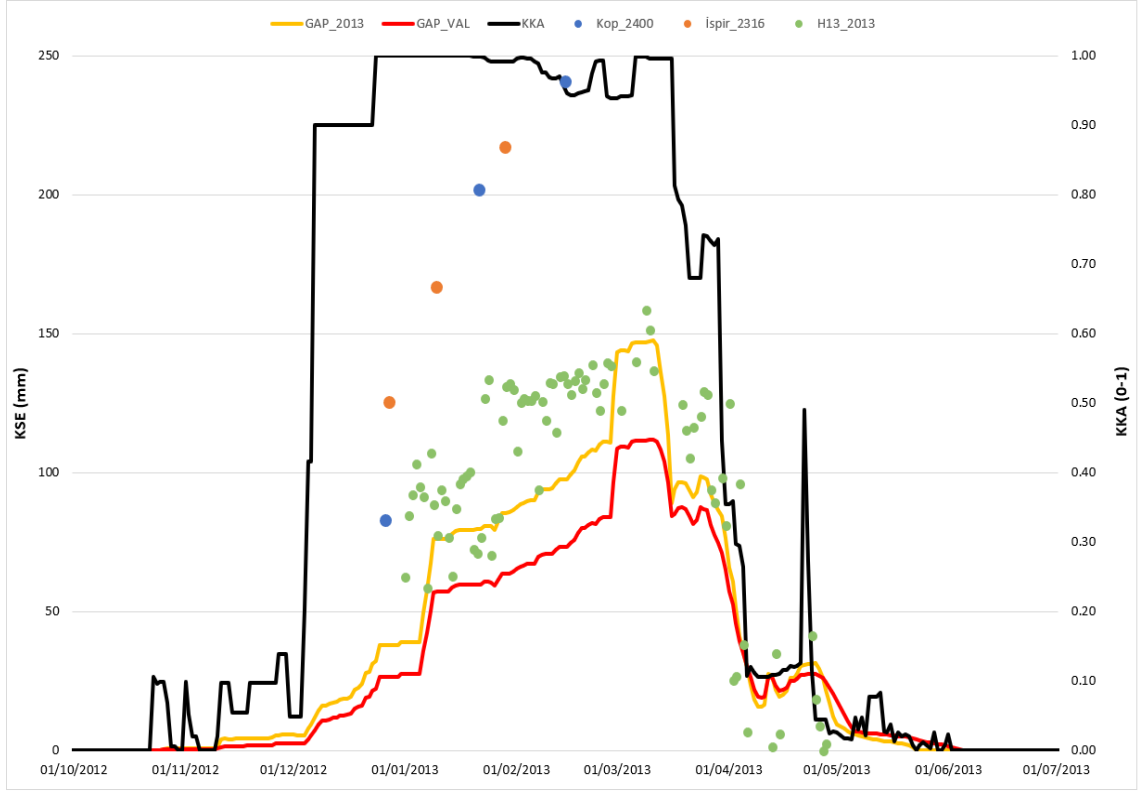
GAP yöntemiyle yapılan kalibrasyon çalışmalarından iki farklı KSE serisi elde edilmiştir. Bunlar, yıl yıl yapılan kalibrasyon sonuçları ile bu çalışma kapsamında daha önce belirlenen kalibrasyon-validasyon periyotlarını içeren çalışma sonuçlarıdır. SSMI/S uydusu 2012 su yılından itibaren kullanılmaya başlandığı için, KKA ve KSE verilerinden oluşturulmuş grafikler 2011-2015 su yıllarına aittir (Şekil 4.7-4.11). Buna karşılık uydunun zaman zaman yaşadığı aksaklıklar nedeniyle veriler sürekli değildir. Ayrıca bu grafiklere havzanın ortalama yüksekliğinin üzerinde yer alan, Kop (2400 m) ve İspir (2365 m) kar gözlem istasyonlarında (KGİ) ölçülen kar su eşdeğeri verileri havza temsiliyeti açısından eklenmiştir.



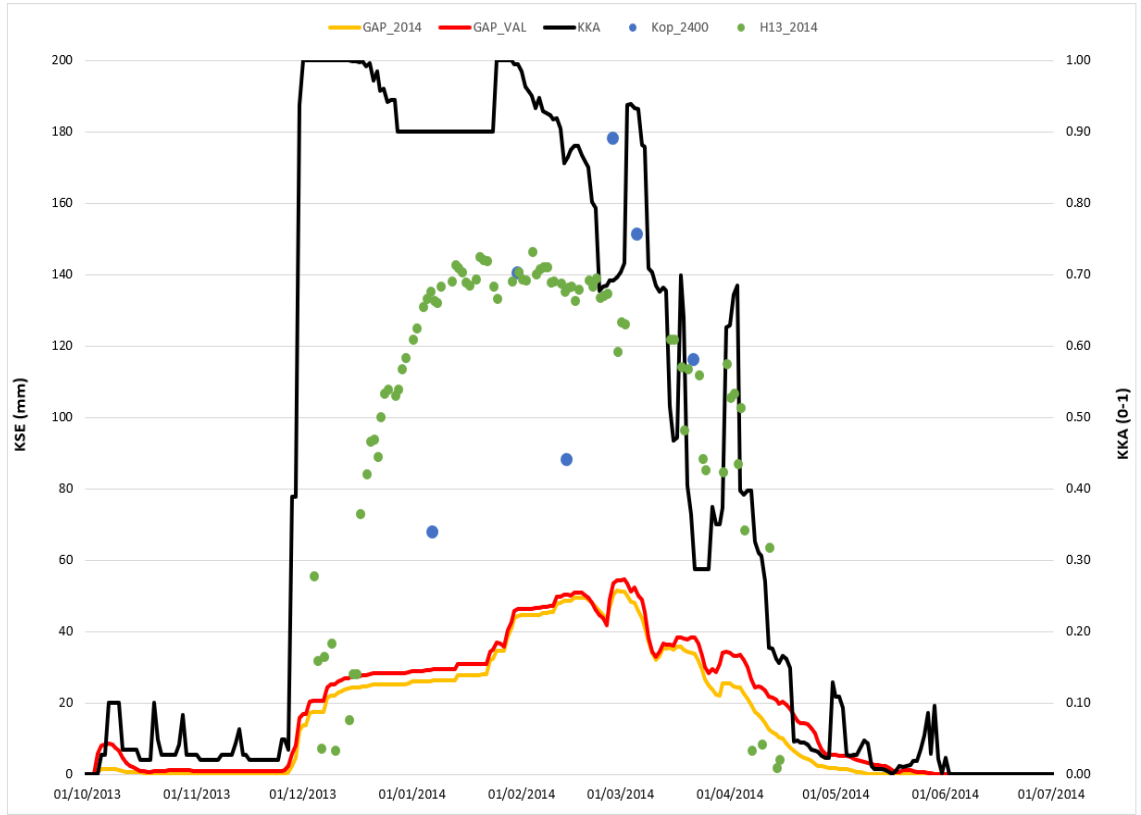
Şekil 4.7. 2011 su yılına ait KKA-KSE grafiği



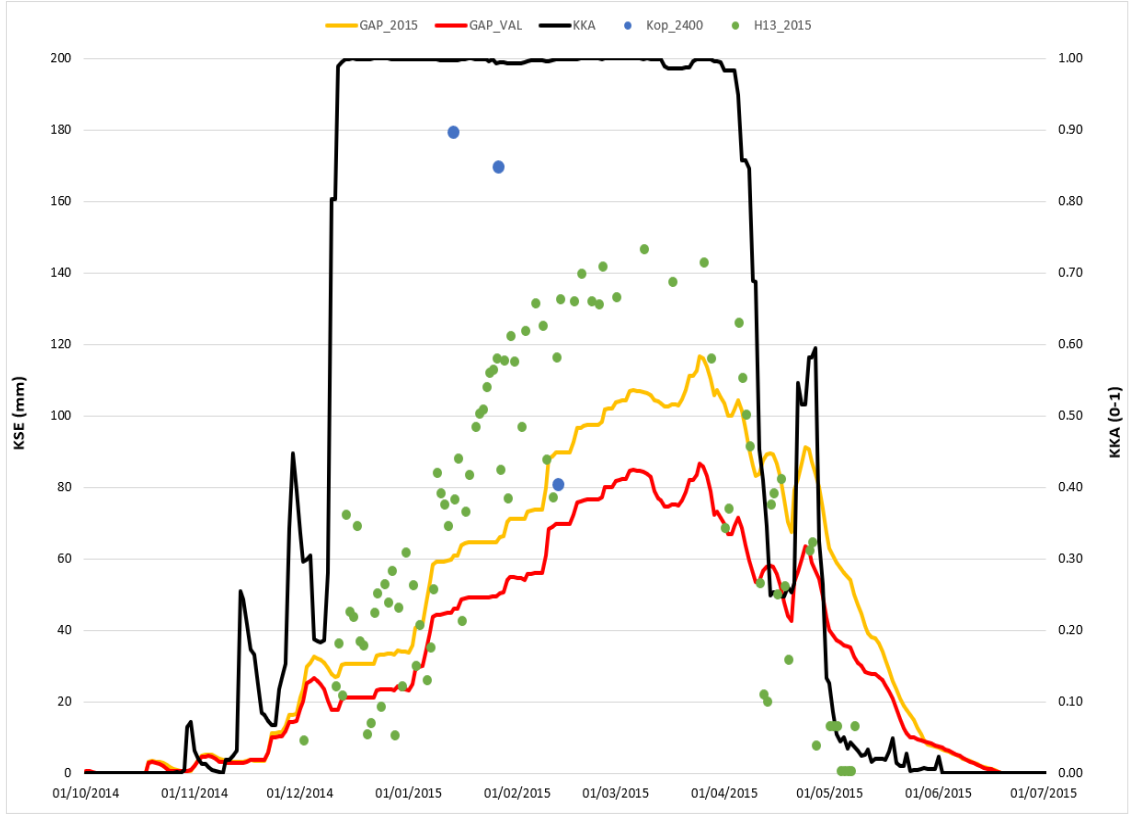
Şekil 4.8. 2012 su yılına ait KKA-KSE grafiği



Şekil 4.9. 2013 su yılına ait KKA-KSE grafiği



Şekil 4.10. 2014 su yılına ait KKA-KSE grafiği



Şekil 4.11. 2015 su yılına ait KKA-KSE grafiği

Farklı kaynaklardan elde edilen KSE değerlerinin karın birikme dönemindeki çıkışları ve özellikle uydular ve modelin havza ortalamalarını baz alarak izlediği patenlerin birbirleriyle ve kar kaplı alanla hareket ettiği görülmektedir. Fakat, uydu verilerinden elde edilen görüntülerin kaba olması ve verilerin sürekli olmamasından dolayı havzayı temsiliyeti açısından henüz güvenilir sonuçlar vermemektedir. Bununla birlikte yüksek kotlardan elde edilen nokta KSE değerlerinin ise model ve uydu verileriyle hareket ettiği ancak beklendiği üzere daha yüksek değerlere çıktığı gözlenmiştir. Sonuç olarak grafikler üzerinde verilen KKA ve KSE değerlerinin en az birinden elde edilecek olan grafikte havzaya karın ne zaman yağmaya ve erimeye başlayacağı saptanabilir.

4.2.3. HBV model ile çok kriterli kalibrasyon-validasyon çalışması

Dağlık bölgelerde etkili olan kar, hidrolojik dengenin önemli bir bileşenini temsil etmektedir. Bu nedenle verilerin seyrek olduğu bu bölgelerde hidrolojik sürecin doğru bir şekilde temsil edilmesi oldukça önemlidir (Sleziak vd., 2016). Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için olası yaklaşımlardan biri modellenen akımın yanı sıra ek verilerin kullanılmasıdır. Bu veriler; yeraltı suyu (Seibert, 2000; Beldring, 2002; Madsen, 2003), toprak nemi (Western ve Grayson, 2000; Merz vd., 2009) ve kar kaplı alan (Finger, 2015; Parajka vd., 2007; Udnaes vd., 2007) olabilir. Beldring, (2002) Bergstrom vd. (2002), yapılan çalışmalarında bu yargıları destekler şekilde, tek bir ölçülen değişkene karşı kalibrasyon eksikliklerinin üstesinden gelmenin bir yolu olarak çok değişkenli ve çok kriterli kalibrasyon yaklaşımlarına odaklanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Literatürde geçen bazı çalışmalara örnek olarak, Parajka vd., (2007) yapmış oldukları çalışmada Avusturya'daki 320 havzada HBV modelini kalibre etmek için akım ve kar kaplı alan ile çok değişkenli yöntem kullanmışlardır. Çok değişkenli yaklaşımın sonuçlarını, yalnızca bir ölçütten (akım) elde edilen değerleri içeren geleneksel kalibrasyonun sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Bunun sonucunda, çok değişkenli yaklaşımın geleneksel kalibrasyon yaklaşımına göre akım karşılaştırmasında başarının biraz azaldığı ama kar kaplı alan için başarının arttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak, Madsen (2003), model kalibrasyonunda yeraltı suyu verilerini kullanarak havza akış simülasyonunun daha az başarılı fakat havzadaki yeraltı suyu dinamiğinin daha iyi temsil edildiğini göstermiştir. Duethmann vd. (2014) bunu destekler şekilde, çok değişkenli kalibrasyonda uydulardan elde edilmiş kar örtüsü verilerinin kullanımı, hidrolojik süreçlerin temsilini iyileştirmesi açısından iyi bir yol olabileceğini belirtmişlerdir. Şorman vd. (2009) ise yapmış oldukları çalışmalar ile bunlara ek olarak, Türkiye'nin dağlık Doğu Anadolu Bölgesi'nde kar çekilme döneminde günlük MODIS verileriyle ürettikleri günlük kar kaplı alan girdilerini kullanarak HBV modeli ile çok kriterli (akım ve kar kaplı alan) tahmin çalışmaları yapmışlardır. Elde ettikleri başarılı sonuçlar ile modellemenin daha doğru ve güvenilir çalışması için ek verilere ihtiyaç olduğunu göstermişlerdir. Birçok hidrolojik modelleme çalışmasında, kalibrasyon sürecinde birlikte kullanılan akım ve kar verilerinin, havzadaki kar süreçlerini daha iyi temsil ettiği ve akıma bağlı model performanslarının da çok değişmediği gösterilmiştir (Parajka ve Blöschl, 2008). Bu çalışmaya ilham kaynağı olan Finger vd. 2011 ve 2015'de yaptıkları çalışmalar ile sadece akıma göre değil, her bir gözlemsel veri kümesi olan kar örtüsü ve mevsimsel buzul kütle dengliklerini de

kullanarak başarılı parametre setleri belirlemişlerdir. Bunu da, rastgele oluşturulmuş parametre kümeleriyle gerçekleştirilen 10,000 Monte Carlo (MC) çalışmasından elde edilen en iyi parametre kombinasyonlarıyla yapmışlardır.

Bu çalışmada, sadece gözlenen ve modellenen akımın uyumuna göre kalibrasyonun, daha doğru ve güvenilir bir akım tahmini için yeterli olamayacağı düşünülmüştür. Bu nedenle, hem düşük ve yüksek akımlar arası uyum hem de ek veri seti olarak kullanılan ve üç farklı uydunun kombinasyonu ile işlenmiş günlük kar kaplı alanlar arası uyumu gözeterek, çok kriterli kalibrasyon-validasyon çalışması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan MC yöntemi, çok sayıda model simülasyonu yoluyla önceden tanımlanmış bir model parametre aralığında normal dağılıma uyumlu rassal model parametre setleri üreten bir prosedürdür.

Bu çalışmada, 2003-2009 su yıllarını kapsayan kalibrasyon periyodunda 500,000 MC simülasyonu yapılmıştır. Belirtilen kalibrasyon periyodunda, daha önce uygulanan GAP yöntemi sonuçlarına göre MC simülasyonu için kullanılan parametre aralıkları belirlenmiştir. Bu doğrultuda parametre aralıkları, başarılı parametre setine yakın sonuçlar vermesi adına daraltılmıştır (Tablo 4.7).

Tablo 4.7. MC yöntemi için belirlenen parametre aralıkları

Parametre	En Küçük Değer	En Büyük Değer
TT	-2	-0.5
CFMAX	1	4
SP	0.5	1
SFCF	0.7	1.1
FC	50	200
LP	0.5	1
BETA	1	3
PERC	2	5
UZL	20	50
K0	0.3	0.6
K1	0.02	0.1
K2	0.001	0.06
MAXBAS	1	1.5
Cet	0.1	0.3
PCALT	8	10
TCALT	0.6	0.8

4.2.3.1. Amaç fonksiyonları seçimi

Kalibre edilmiş modelin uygun bir şekilde değerlendirilebilmesi için, genel kalibrasyon hedefinin farklı amaç fonksiyonları ile birlikte kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Bu hedef doğrultusunda, gözlenen ve modellenen veriler arasındaki uyumu değerlendiren tek veya birleşik kriterlerden oluşan kalibrasyon için üç farklı amaç fonksiyonu düşünülmüştür (Tablo 4.8). Bu amaç ile, akım verilerinin farklı istatistiksel yönlerini aynı anda değerlendirebilmek için kriter kombinasyonları belirlenmiştir (Tablo 4.9). Kullanılan bu kriter kombinasyonları ile elde edilen parametre setlerinin hidrolojik süreçleri ne derece iyi ifade ettiği gözlemlenmek istenmiştir.

Tablo 4.8. MC yöntemi ile kalibrasyon denemeleri için kullanılan amaç fonksiyonları

Kriter	İngilizce Ölçüt Tanımı	Türkçe Ölçüt Tanımı	Formülü
Reff (NSE)	Nash-Sutcliffe Efficiency	Model verimlilik katsayısı	$1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$
SCA_RMSE	Root Mean Square Error for Snow Cover	Kar kaplı alan için ortalama hata kareleri kökü	$1 - \sqrt{\frac{1}{n} (C_{sim} - C_{obs})^2}$
MARE	Mean Absolute Relative Error	Ortalama mutlak bağıl hata	$1 - \frac{1}{n} \sum \frac{ Q_{obs} - Q_{sim} }{Q_{obs}}$

Reff (Nash ve Sutcliffe, 1970) amaç fonksiyonu, pik akımlarına karşı daha duyarlı olup modelin performansını değerlendirmek için kullanılan verimlilik katsayısıdır. Yağış-akış modellerinde en çok tercih edilen amaç fonksiyonudur. Burada Q_{obs} gözlemlenen akım, $\overline{Q_{obs}}$ gözlemlenen akımların ortalaması ve Q_{sim} ise modellenen akım değerini temsil etmektedir. Modelin Reff verimliliği $-\infty$ ile 1 değerleri arasında değişebilir ve en iyi model performansı 1 değerinin üretilmesidir. Bu şekilde, modellenen akım ile gözlemlenen veriler arasında mükemmel bir uyum elde edilmiş olur. Eğer 0'ın altında bir Reff sonucu elde edilirse, ortalama gözlenen akım modellenen akıma kıyasla daha iyi performans gösterir ve bu durumda model kullanılmamalıdır.

SCA, gözlemlenen ve modellenen karla kaplı alan değerlerinin farklarının kareleri ile hesaplanır ve bu kriter için en iyi model performansı 1 değeridir. Burada n değeri modellenen gün sayısı, C_{obs} ve C_{sim} ise sırasıyla gözlemlenen ve modellenen kar verisidir. Kar kaplı alan verisinin kullanımı, modellenen akımı doğrulamada kullanılabileceği gibi ayrıca bu verilerin kalibrasyon amaçlı kullanımı, sınırlı veri kullanılabilirliği olan dağlık bölgelerde yapılacak çalışmalarda çok değerli olabilmektedir.

MARE, ortalama mutlak bağıl hata olarak adlandırılır ve düşük akımlara karşı duyarlı bir amaç fonksiyonudur. Model performans değerleri mutlak değer içinde hesaplandığı için 0 ve 1 arasındadır. Buna karşılık en iyi performans değeri 1'dir.

Model performansının değerlendirilmesi, bu çalışmada kullanılan farklı amaç fonksiyonlarından elde edilen tekil ve çoklu kriterlerle yapılmıştır. Tablo 4.9'da belirtilen amaç fonksiyonları ve bunların ağırlıkları eşit alınarak elde edilen farklı kombinasyonları ile yapılan çalışmada, normal dağılıma uyumlu rassal model parametre setleri üreten MC yöntemi kullanılmıştır. Böylece, her biri farklı bir değere karşılık gelen 500,000 MC simülasyonunu derecelendirmek için hesaplanmış performans değerleri kullanılarak farklı parametre setleri üretilmiştir.

Tablo 4.9. MC yöntemi ile kalibrasyon denemeleri için kullanılan tekil ve çoklu amaç fonksiyonları

Reff
SCA
MARE
SCA+MARE
Reff+SCA
Reff+ MARE
Reff+SCA+MARE

500,000 MC simülasyonunu her bir amaç fonksiyonu ve bunların kombinasyonlarıyla elde edilen kriterlere göre derecelendirilirken, Denklem 4.1'de belirtilen formül uygulanmıştır (Finger ve diğ., 2011 ve 2015). Bu yöntemle, her bir model simülasyonunun sıralama değerleri (ranking value) hesaplanmıştır.

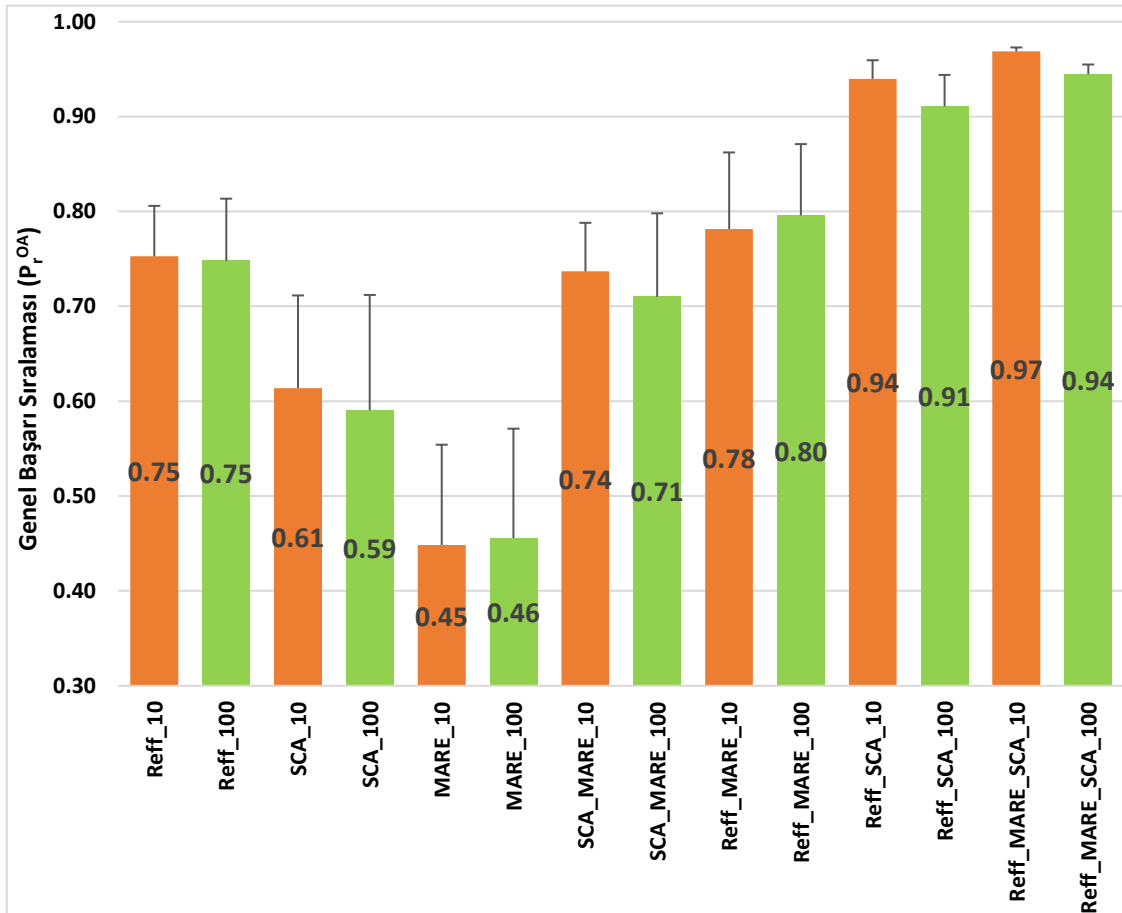
$$P_r^i = \frac{(N+1)-R_r^i}{N} \quad (4.1)$$

Denklemden ifade edilen P_r^i sıralama değerini (ranking value), r her bir modellemeyi, i her bir performans kriterini (Reff,SCA,MARE), N toplam modelleme sayısını (run) ve R_r^i ise her bir performans kriterine göre elde edilen sıralamayı (rank) temsil etmektedir. Bu çalışmada, 2003-2009 yıllarını kapsayan kalibrasyon periyodu 500,000 MC simülasyonu ile kalibre edilmiş ve elde edilen her bir modelleme de belirtilen bu denklemle 1 ila 500,000 değerleri arasında sıralanmıştır. Her başarı kriterinin modelleme sonuçları ayrı ayrı alınmış ve modelin işlem sırası korunarak kullanılan her bir amaç fonksiyonunun sıralama değerleri hesaplanmıştır. Sıralama değerleri elde edildikten sonra Denklem 4.2’de belirtilen formül ile amaç fonksiyonları tekil veya farklı kombinasyonlar halinde oluşan çoklu kriterlere göre genel bir şekilde sıralanmaktadır.

$$P_r^{OA} = \frac{(P_r^{Reff} + P_r^{SCA} + P_r^{MARE})}{3} \quad (4.2)$$

Modellenen değerler arasında yapılan çoklu genel sıralama (P_r^{OA}) ifadesi, Denklem 4.2’de belirtildiği üzere uygulanmıştır. P_r^{Reff} pik akımlara karşı daha duyarlı olan ve gözlenen akım ile modellenen akım arasındaki uyumu ifade eden Reff amaç fonksiyonuna göre sıralama değerlerini, P_r^{SCA} kar kaplı alan verisinin başarısını temsil eden SCA amaç fonksiyonuna göre sıralama değerlerini, P_r^{MARE} ise düşük akımlara karşı daha duyarlı olan MARE amaç fonksiyonuna göre sıralama değerlerini temsil etmektedir. Bu denklem ile, ilgili amaç fonksiyonlarının kendi içlerindeki sıralama değerlerinin ortalamaları alınarak genel bir sıralama değeri elde edilmiştir. Böylece, hesaplamada her amaç fonksiyonunun (birimleri farklı olsa da) ağırlıkları eşit alınarak değerlendirilmiş olur. Daha sonra, hesaplanan her bir P_r^{OA} değeri en uygun parametre set aralıklarını elde etmek için artan sıraya göre sıralanmıştır. Böylece, Denklem 4.2 uygulandığında 1 değerine en yakın sonucu veren P_r^{OA} sıralama değeri, kullanılan amaç fonksiyonlarına göre en iyi genel performansa sahip parametreleri vermektedir. Örneğin, Tablo 4.9’da bahsi geçen Reff+MARE kombinasyonu kalibrasyon sürecinde uygulandığında, kendi aralarında Denklem 4.1’e göre bir sıralama değerleri hesaplanır. Daha sonra, ayrı ayrı elde edilen her bir sıralama değeri Denklem 4.2’ye göre genel başarı sıralamasını vermesi adına hesaplanır. Fakat, bu şekilde hesaplanan genel sıralama içerisinde kar kaplı alan verisi olmadığından Reff ve MARE sıralama değerleri ortalaması alınır. Sıralama sonuçları ile elde edilen parametre setleri, yüksek ve düşük akımları en iyi ifade eden parametre setlerini göstermektedir.

P_r^{OA} değerinin hesaplanması ve artan sıraya göre sıralanması, modelin gözlenen veriler ile tutarlılığını ifade eden tüm kriterlerin eş zamanlı performansının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Böylece, farklı veri kümeleriyle seçilen en iyi modelleme çalışmalarının ortalama genel performanslarının karşılaştırılması, kalibrasyon periyodu boyunca çok kriterli yapının değerinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada hedeflenen çok kriterli yapı ile hidrolojik modelleme aşamasında; yüksek ve düşük akım ile kar kaplı alan kriterlerine göre genel sıralamada 500,000 MC simülasyonu için başarılı performansa sahip en iyi 10 ve 100 parametre setleri elde etmektir. Bu amaç doğrultusunda, 2003-2009 su yıllarını içeren kalibrasyon periyodunda belirtilen amaç fonksiyonlarına göre havza temsiliyeti bakımından en başarılı performansa sahip parametre setleri elde etmek hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda, kalibrasyon periyodunda kullanılan amaç fonksiyonları ve bunların kombinasyonları ile elde edilen en iyi 10 ve 100 parametre setlerinin genel başarı sıralamaları, P_r^{OA} , Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



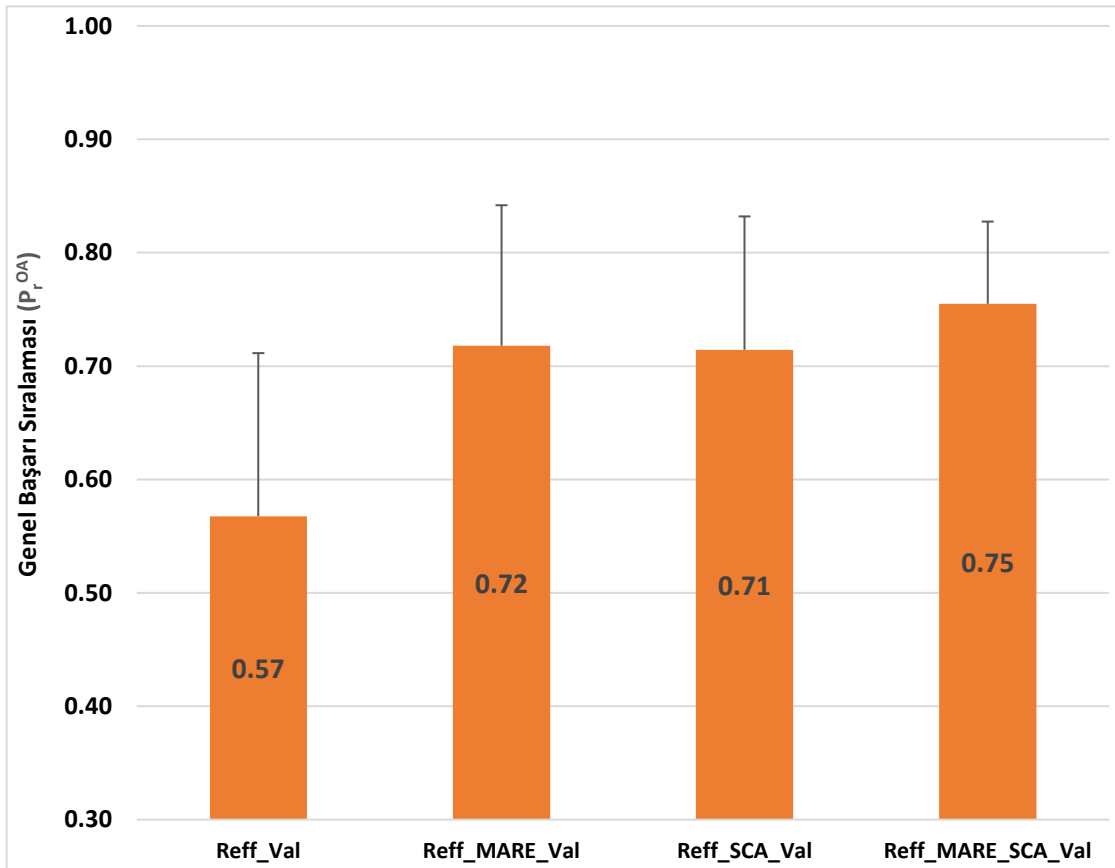
Şekil 4.12. Kalibrasyon periyodu sonuçlarına göre en iyi koşullara uyan 10 ve 100 parametre setleri için istatistik değerleri

Kalibrasyon döneminde (2003-2009) yapılan Şekil 4.12'deki çalışmada, farklı performans kriterlerine göre en iyi koşullara uyan 10 ve 100 parametre setlerinin model performanslarını gösteren genel başarı sıralamaları (P_r^{OA}) verilirken, şekil üzerinde gösterilen hata çubukları ise her bir performans kriteri ile elde edilen ortalama değerlerin standart sapmalarını vermektedir. Genel model performansı, kullanılan amaç fonksiyonlarına ve onların etkilemiş olduğu verilere göre farklılık gösterebilmektedir. Model kalibre edilirken seçilen parametre setleri sadece tek bir amaç fonksiyonuna göre olursa, genel model performansının daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, kalibrasyon sürecinde tek bir amaç fonksiyonu yerine birden çok amaç fonksiyonu kullanılırsa model performansının artacağı ve kullanılan parametre setleri aralığının grafikte gözlendiği gibi azalacağı belirlenmiştir. Ayrıca, beklendiği üzere en iyi 10 parametre setinin en iyi 100 parametre setine göre başarısı daha fazladır. Çünkü, 500,000 MC simülasyonu ile yapılan hesaplamalar ve elde edilen sıralama değerlerine göre, parametre seti sayısı arttıkça başarının azalacağı beklenmektedir. Fakat MARE amaç fonksiyonunun kullanıldığı MARE ve Reff+MARE kriterlerinde bu durum farklıdır. Bunun sebebinin ise, modeldeki düşük akımlar arasındaki uyum probleminden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

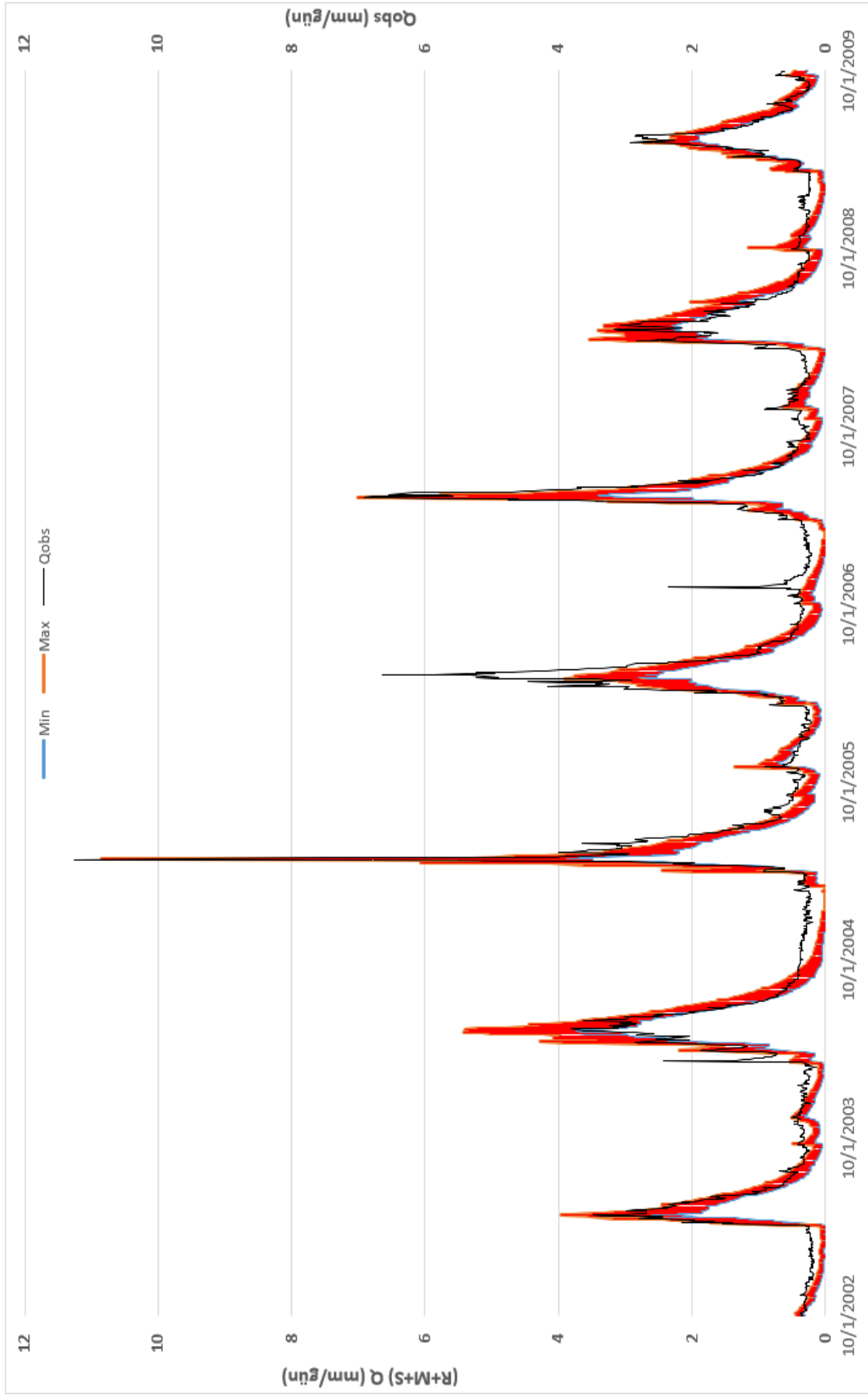
Kalibrasyon periyodunda yapılan çalışmalardan elde edilen parametre setlerinin havzayı ne derece temsil ettiğini belirlemek adına validasyon (doğrulama) çalışmaları yapılmıştır. Eğer kalibrasyon sürecinde kullanılan parametre setleri farklı su yıllarında da başarılı sonuçlar verirse, model doğrulanmış olmaktadır. Bu çalışmada, 2010-2015 su yılları daha önce belirtildiği gibi validasyon periyodu olarak düşünülmüştür. Kalibrasyon çalışmalarında uygulanan ve bu süreçte tek ve çok kriterli yöntemlerden genel model performanslarına göre daha başarılı olan kriterler validasyon çalışmaları için kullanılmıştır (Şekil 4.13). Kalibrasyon çalışmalarında elde edilen her bir performans kriterinden en iyi 10 parametre seti validasyon çalışmalarında kullanılmıştır. Şekil 4.13'de görüldüğü gibi, Reff amaç fonksiyonu hem tek başına hem de farklı kombinasyonlarda validasyon çalışmaları için kullanılmıştır. Bunun sebebi, kalibrasyon çalışmalarında kullanılan farklı amaç fonksiyonları göz önüne alındığında yüksek akımların uyumunu temsil eden model başarısı, Reff, önemli bir yere sahiptir. Ayrıca çalışma sonuçlarından anlaşılabileceği üzere, Reff genel model performansını en çok etkileyen amaç fonksiyonudur. Bu nedenle, validasyon çalışmaları için Şekil 4.13'de belirlenen kriterler esas alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bütün amaç

fonksiyonlarını birlikte kullanmak model performansını artırdığı gibi standart sapma değerlerini (kutudan uzanan çizgiler) de bir o kadar azaltmaktadır. Ayrıca, modelin validasyon sonuçlarının beklendiği üzere kalibrasyon sonuçlarına göre daha düşük çıktığı gözlenmektedir.

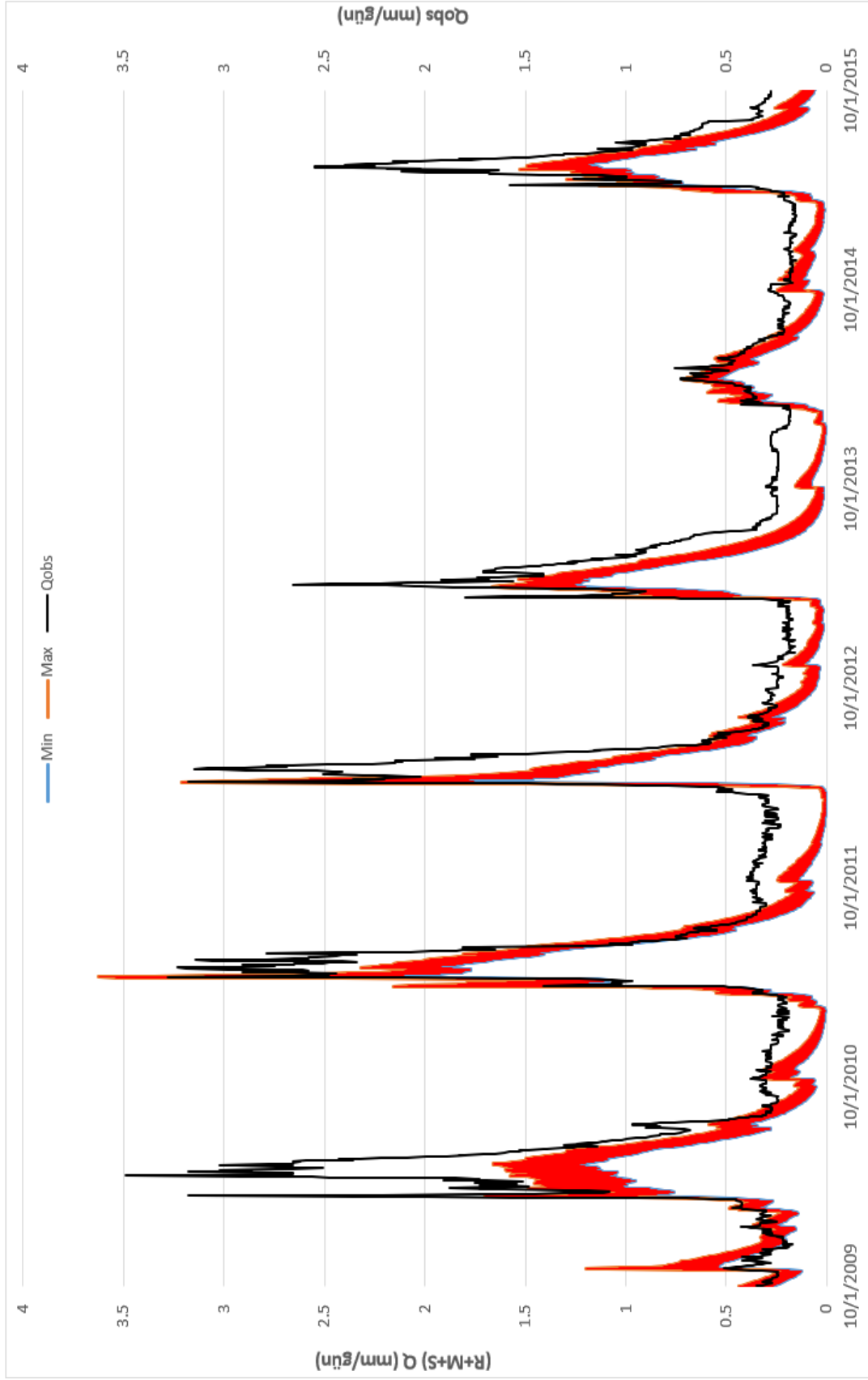
Bütün amaç fonksiyonları ile oluşturulan kriter ve yapılan hesaplamalar ile elde edilen en iyi 10 parametre seti, kalibrasyon dönemi (2003-2009) ve validasyon dönemi (2010-2015) için kullanılmış ve gözlenen akım (Qobs) ile uyumunu gösteren hidrograflar mm/gün cinsinden Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilmiştir. Hidrograflarda verilen R+M+S değerleri (**Reff+MARE+SCA**) bütün amaç fonksiyonlarının birlikte kullanılmasından elde edilen akım simülasyonunu ifade etmektedir. Min ve max değerleri ise, seçilen 10 parametre seti ile yapılan modelleme çalışmasında en düşük ve en yüksek akım değerlerini temsil etmektedir. Ayrıca kalibrasyon-validasyon dönemi için gözlenen kar kaplı alanlar ile seçilen parametre setleri arasındaki uyum grafikleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'da verilmiştir.



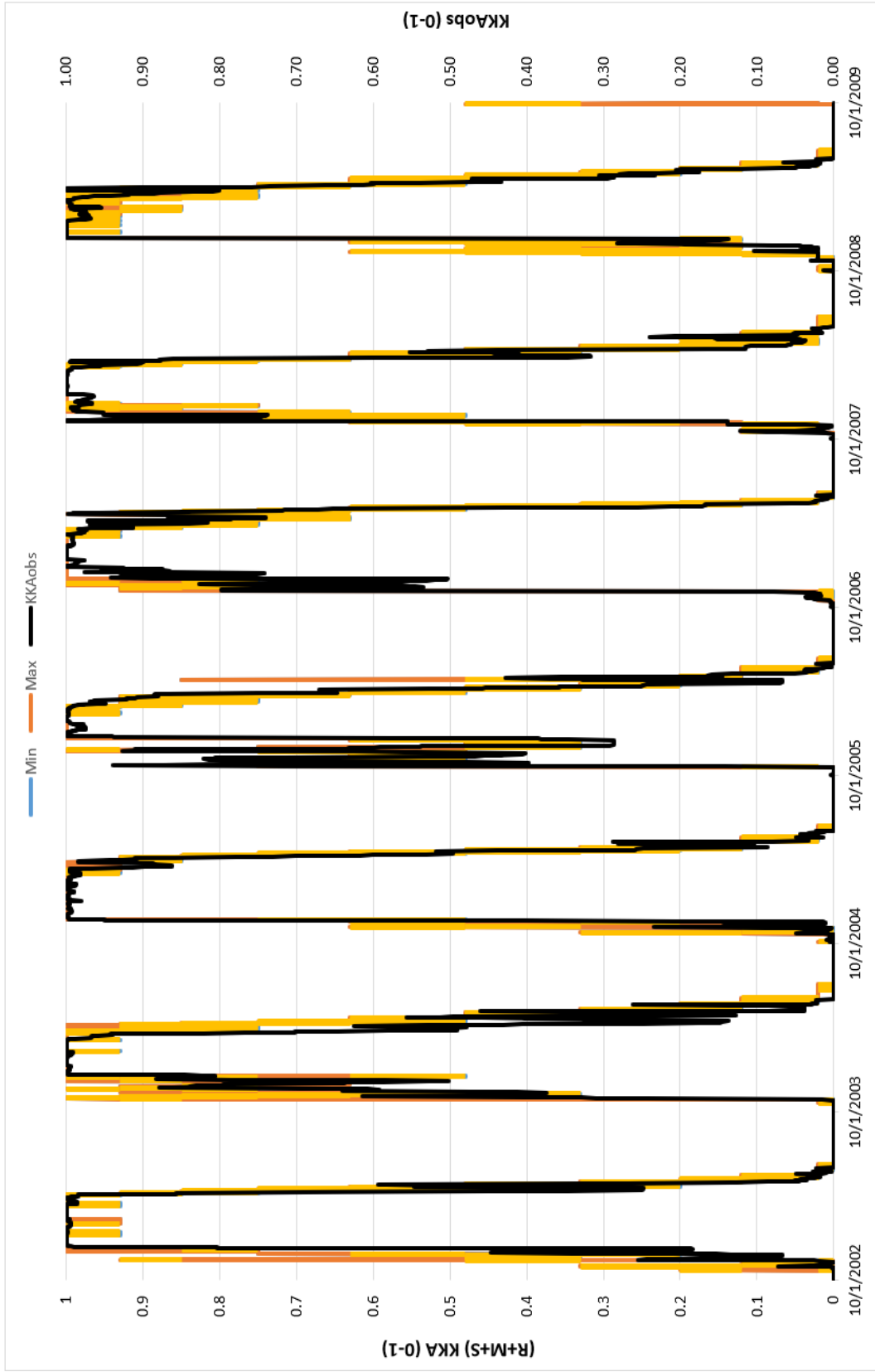
Şekil 4.13. Validasyon periyodu sonuçlarına göre en iyi koşullara uyan 10 parametre seti için istatistik değerleri



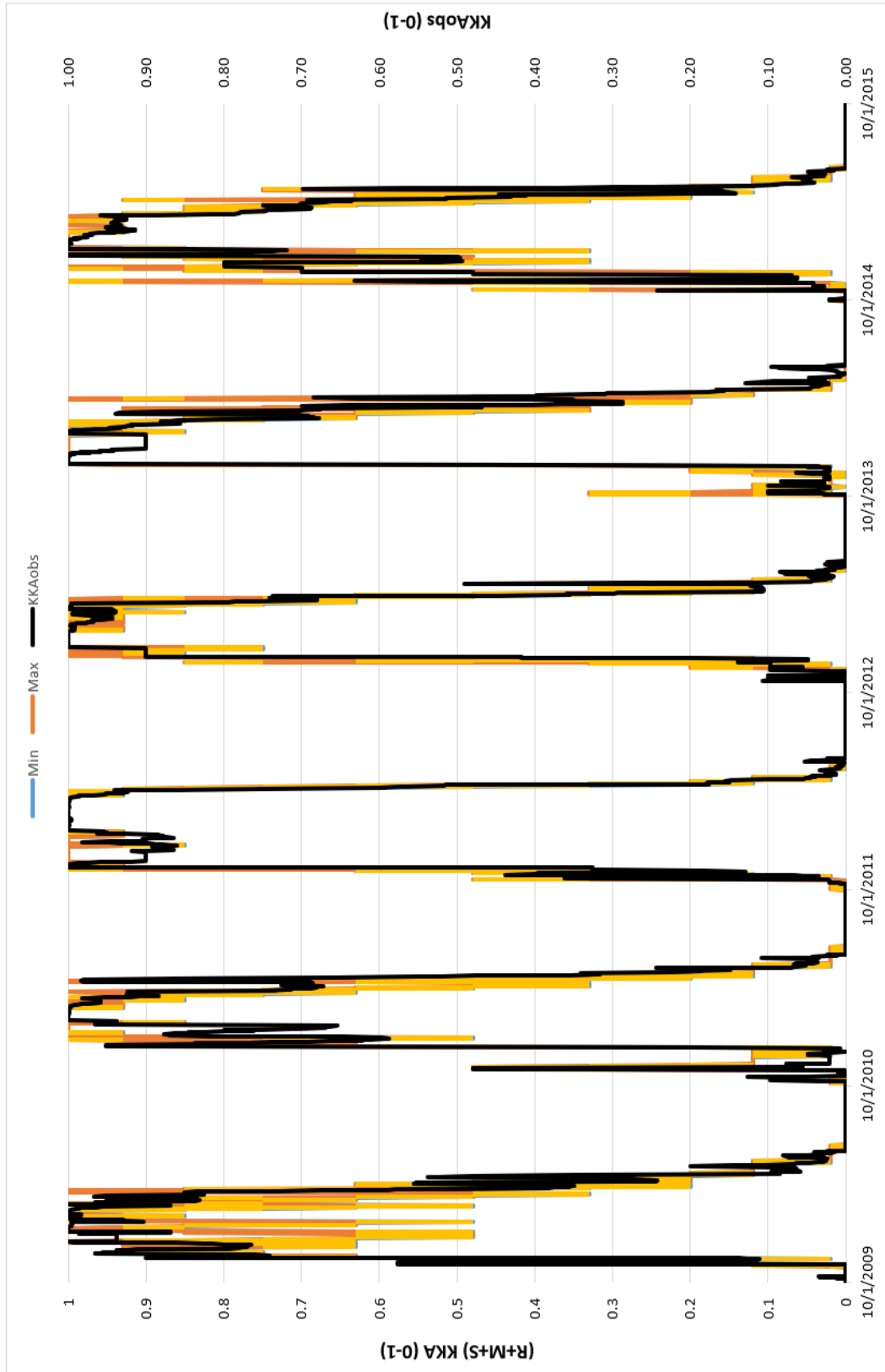
Şekil 4.14. E23A004 Havzası, MC yöntemi ile çok kriterli kalibrasyon dönemi (2003-2009) akım değerleri



Şekil 4.15. E23A004 Havzası, MC yöntemi ile çok kriterli validasyon dönemi (2010-2015) akım değerleri



Şekil 4.16. E23A004 Havzası, MC yöntemi ile çok kriterli kalibrasyon dönemi (2003-2009) KKA değerleri



Şekil 4.17. E23A004 Havzası, MC yöntemi ile çok kriterli validasyon dönemi (2010-2015) KKA değerleri

4.2.4. HBV model ile hassasiyet ve belirsizlik çalışmaları

Hidrolojik modeller, birçok farklı uygulama alanında gerçekliğin basitleştirilmiş matematiksel temsilini ifade etmektedir. Hidrolojik süreçlerin modellenmesinde; havzanın farklı koşullara sahip su yıllarına göre hidrolojik parametrelerin kalibre edilmeleri gerekmektedir. Hidrolojik modellemenin zor olan tarafı ise, farklı karakteristik gösteren bu süreçlerin aynı model parametreleri ile ifade edilmeye çalışılmasıdır. Model kalibrasyonunda kullanılan veri setinin uzunluğu ve içeriği havza temsiliyeti için optimum parametrelerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Wriedt ve Rode, 2006). Modelleme çalışmaları farklı nedenlerden dolayı belirsizlik içerir ve bu belirsizlikleri azaltmak için model parametrelerinin belirsizlik ve hassasiyet çalışmalarının yapılması gerekmektedir (Butts vd., 2004). Parametreler, model çıktısının ayarlanması için kullanılan model yapısının bir parçasıdır. Model parametreleri manuel olarak belirlenebileceği gibi optimizasyon yöntemleri kullanılan otomatik kalibrasyon yöntemleri ile de belirlenebilirler. Ancak, bu yaklaşımlardan herhangi biriyle elde edilen parametreler havzayı temsil eden doğru parametreler olmayabilirler. Bunun nedeni ise, havzadaki hidrolojik süreç ve model değişkeninden kaynaklı belirsizliklerin ortaya çıkmasıdır (Abebe vd., 2010). Belirsizlik analizi, model girdisindeki belirsizliklerin bir sonucu olarak modelin tepkisiyle ilişkili belirsizliği değerlendirmeye olanak sağlar. Hassasiyet analizi ise, modelin kendisine verilen bilgiye nasıl bağımlı olduğunu analiz ederek optimizasyon için önemli bilgiler vermektedir. Crosetto vd. (2000) yapmış oldukları çalışmalar ile, belirsizlik ve hassasiyet analizlerini hidrolojik modelleme için yapılması gereken ön koşullar olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, literatürde bu konular ile ilgili birçok farklı çalışma yapılmıştır.

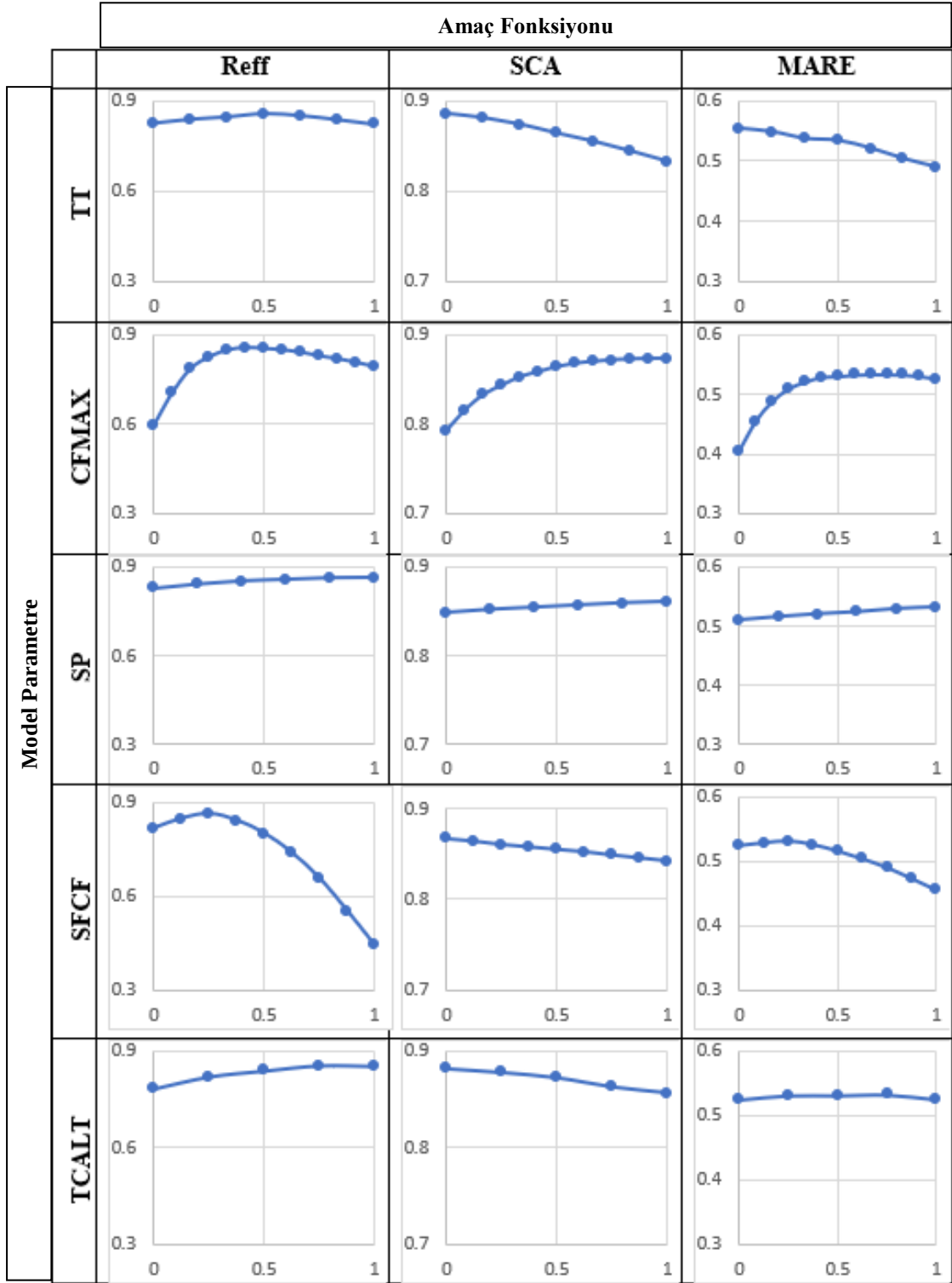
Harlin ve Kung (1992), Seibert (1997), Uhlenbrook vd., (1999) ve Sieber ve Uhlenbrook (2005) ilgili modellerin parametre belirsizliklerini analiz ederek model çıktısına karşılık gelen etkilerini değerlendirmişlerdir. Örneğin, Seibert (1997) İsveç'te bulunan 2 havzada HBV modelini kullanarak parametrelerin belirsizlikleri konusunda çalışmalar yaparken, 500,000 MC simülasyonu ile modeli 1981-1991 su yılları arasında kalibre ederek farklı performans kriterleri kullanmıştır. Modeli kalibre edilen parametrelerle doğruladığında, parametrelerdeki belirsizliğin modelin belirsizliğini doğrudan etkilediğini göstermiştir. Çalışmasının sonucunda ise, sadece birkaç parametrede belirsizliğin azaldığını tespit etmiş ve çoğu parametre için daha geniş

aralıklar kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini belirtmiştir. Bu konudaki çalışmaları destekler şekilde, Parajka vd. (2007) parametre belirsizliğini azaltmak adına çok kriterli yöntem ile hidrolojik modelleme çalışmaları yapmışlardır. Farklı belirsizlik ölçütleri ile, yüksek akımların uyumu ve kar kaplı alan değişimi kriterlerini kullandıkları çalışmada, sadece modelin kar rutininde bulunan parametrelerin belirsizliklerini azaltmada başarılı olmuşlardır. Hem kullandıkları amaç fonksiyonları etkisinden, hem de toprak nemi ve akım modülünde bulunan parametrelerin çok fazla değişme eğilimine sahip olmalarından dolayı bu sonucu elde ettiklerini belirtmişlerdir. Abebe vd. (2010) ise yapmış oldukları çalışmalar ile bunlara ek olarak, HBV modelini MC yöntemiyle kalibre ederek parametrelerin belirsizlik ve hassasiyet analizlerini çalışmışlardır. Havzadaki hidrolojik süreçte parametrelerin dinamik davranışını araştırmak için Dinamik Tanımlanabilirlik Analizi (DYNIA) yaklaşımını kullanmışlardır. Akışın toplam hacimsel hataları ve yüksek akım serilerindeki hata kriterlerini kullanmış ve bu ölçütlere karşı hassas olan farklı parametre gruplarının olduğunu belirlemişlerdir. Benzer şekilde, Sürer (2015) HBV modeli ile uygulama alanı olarak seçtikleri Yukarı Fırat Havzası'nda hidrolojik modelleme çalışmaları yapmışlardır. SCE (Shuffled Complex Evolution) algoritması kullanarak model parametrelerinin her birinin hassasiyet analizini çalışmışlardır. Bunun sonucunda, toprak nemi ve buharlaşma-terleme parametrelerinin toplam su hacmine ilişkin hataya karşı hassas oldukları ve akım ve öteleme modülü parametrelerinin ise yüksek akımlara etki ettiğini tespit etmişlerdir.

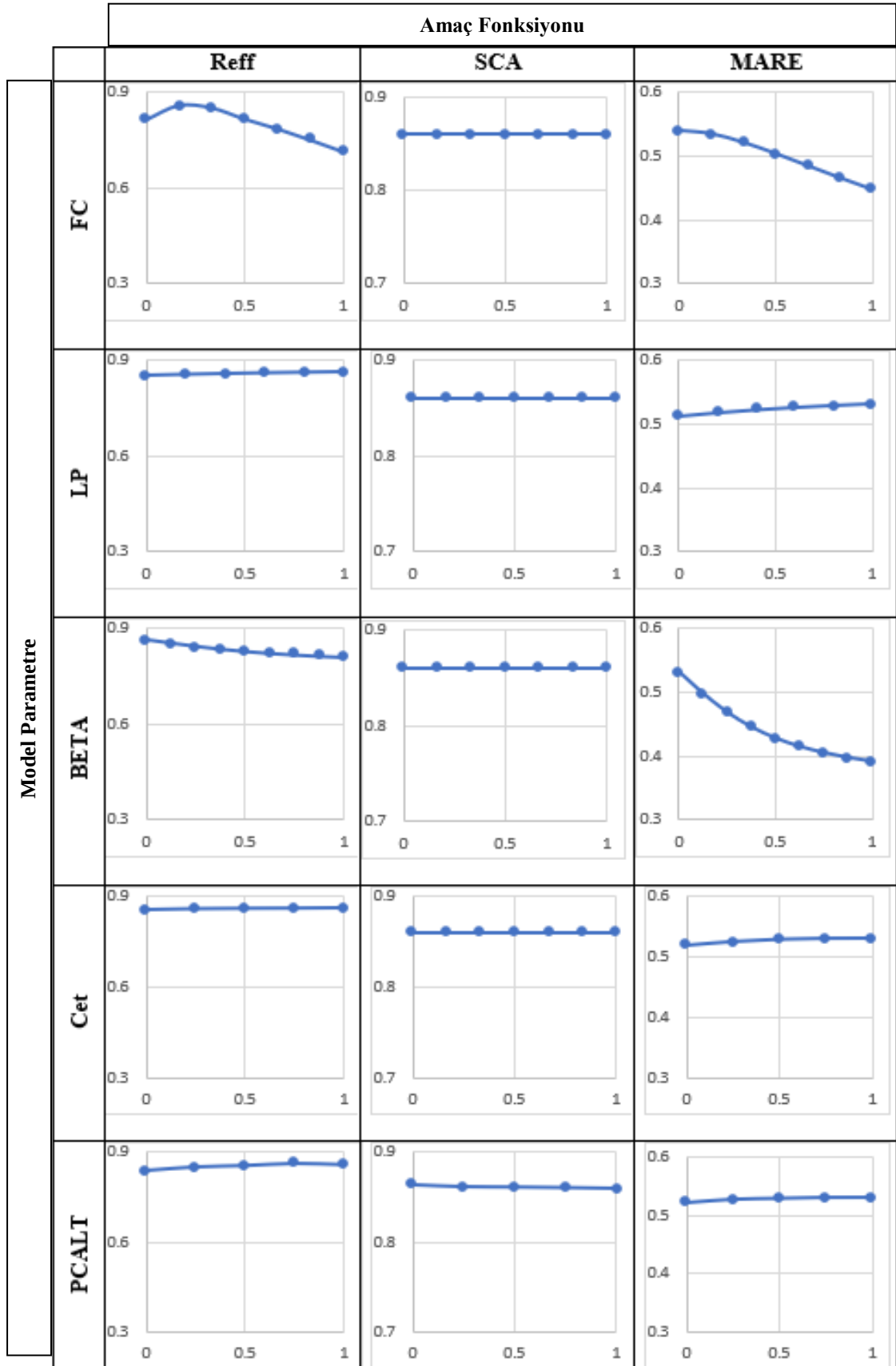
4.2.4.1. Hassasiyet Analizi

Hidrolojik modellemede daha önce, modelin sunduğu farklı kalibrasyon yöntemleri (Genetik Algoritma Optimizasyonu ve Powell, Monte Carlo Simülasyonu) ile kalibrasyon dönemi (2003-2009) ve validasyon dönemi (2010-2015) için çalışma yapılmıştır. Bu yöntemlerle havza açısından temsiliyeti en kuvvetli parametre setleri elde edilmeye çalışılmıştır. 500,000 MC simülasyonu ile yapılan tek ve çok kriterli yapılar sayesinde, havza sadece yüksek akımlara göre değil, bunun yanında düşük akımlar ve kar kaplı alan değişimleri gözeterek incelenmiştir. Bu etkenler gözetilirken, model parametrelerinin modeldeki farklı amaç fonksiyonları başarısına karşı ne derece duyarlı olduğunu bilmek önemlidir. Bu nedenle, modelin en hassas parametrelerini ve bu parametrelerin hangi hidrolojik süreçte etkili olduğunu belirlemek amacıyla model hassasiyet analizi yapılmıştır. Hassasiyet analizi sırasında parametrelerin,

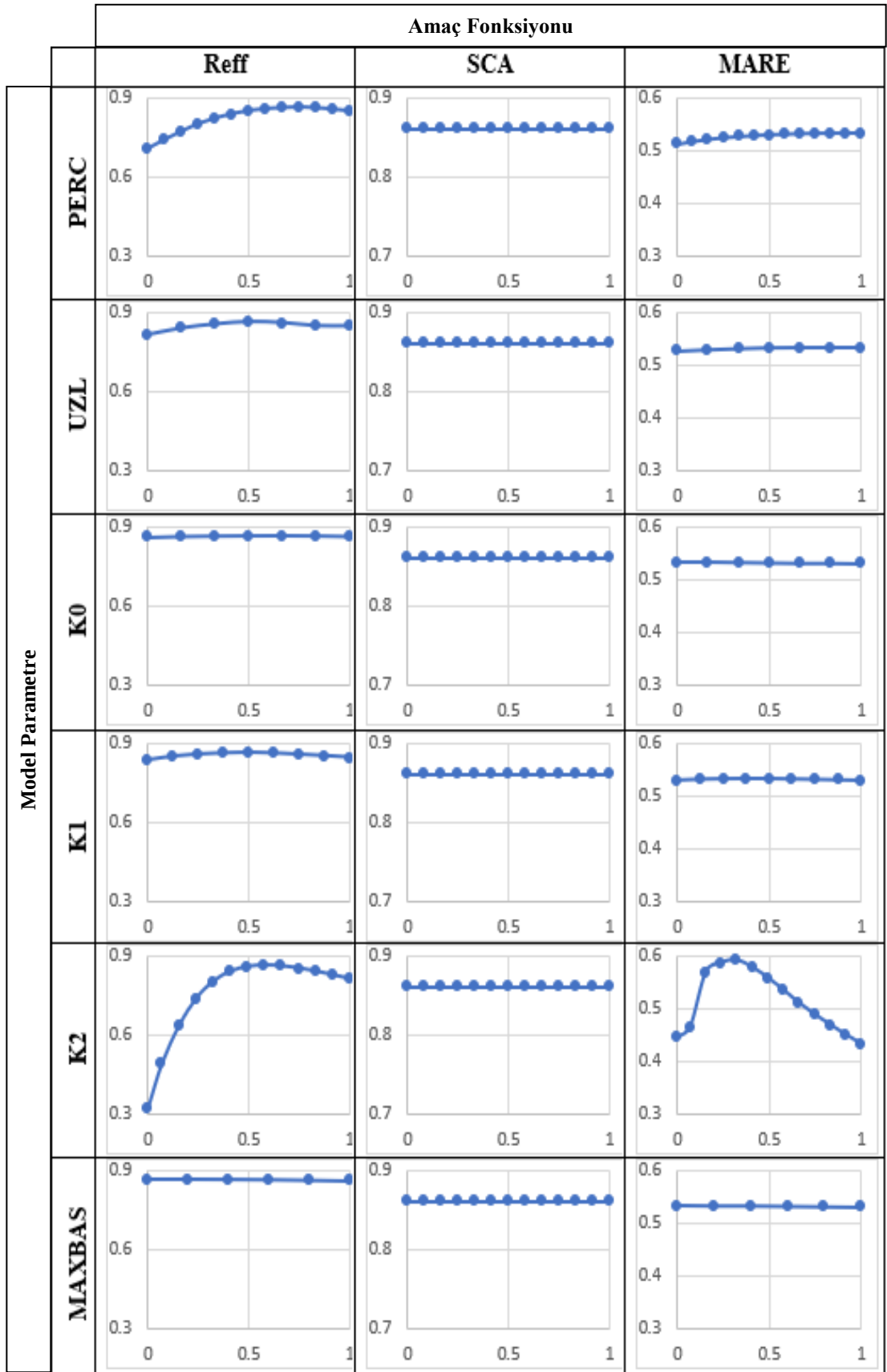
Reff, SCA ve MARE amaç fonksiyonlarına göre duyarlılıkları ayrı ayrı incelenmiştir. Bunu yaparken tüm değişkenler sabit tutulup, her parametre değeri tek tek değiştirilerek hidrografa ve kullanılan amaç fonksiyonlarındaki başarı değerlerinin değişimine bakılmıştır. Parametreler değiştirilirken, MC yöntemi ile kalibre edilerek elde edilen uygun parametre aralıkları gözetilmiştir. Daha sonra, her parametre normalize edilerek 0-1 aralığında aldıkları değerlere göre modeldeki hassasiyetleri kıyaslanmıştır. Buna göre, grafiklerde x eksenini her parametrenin normalize edilmiş değerini temsil ederken, y eksenini ise kullanılan amaç fonksiyonlarının 0 ve 1 aralığındaki başarı değerini vermektedir. Şekil 4.18’de parametrelerin model içerisinde ne kadar hassas olduğunu anlamamıza yardımcı olan hassasiyet analiz grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.18. Model parametrelerinin farklı amaç fonksiyonlarına göre hassasiyet analizleri



Şekil 4.18. (Devam) Model parametrelerinin farklı amaç fonksiyonlarına göre hassasiyet analizleri



Şekil 4.18. (Devam) Model parametrelerinin farklı amaç fonksiyonlarına göre hassasiyet analizleri

Şekil 4.18’de verilen her parametrenin farklı amaç fonksiyonları ile belirlenen hassasiyet analizi grafiklerine göre, hangi parametrenin modelde daha hassas olduğu değerlendirilmiştir. Model başarısı ve yüksek akımların tutarlılığının etkili olduğu Reff amaç fonksiyonuna göre yapılan hassasiyet analizinde, modelin kar rutinde bulunan TT, CFMAX, SP ve SFCF parametrelerinin herbirinin hassas olduğu gözlenmiştir. TT ile CFMAX birlikte çalışan parametrelerdir; birinin yüksek olması diğerinin düşük olmasını gerektirmektedir. Yapılan çalışma sonucunda, bu iki parametrenin bütün amaç fonksiyonlarına göre hassas olduğu ve model başarısı ile hidrografa olan etkilerinin fazla olduğu belirlenmiştir. Kar rutinde bulunan SP parametresi sezonsal bir parametredir ve akım tutarlılıkları ile kar kaplı alan değişimine olan hassasiyeti az da olsa vardır. SFCF ise kar doğrulama faktörü olduğu için TT ve CFMAX parametrelerinin değerlerine göre hassasiyet göstermektedir. Model başarısı açısından hassasiyeti oldukça yüksek bir parametredir. HBV modeli kar erimesiyle de akım üreten bir hidrolojik model olduğu için kar rutinde bulunan parametreler, doğal olarak kar kaplı alan değişimi kriteri (SCA) göz önüne alındığında diğer rutinlerde bulunan model parametrelerine göre daha hassas olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kar rutinde bulunan parametrelerin düşük akımlara karşı da hassas olduğu özellikle CFMAX ve SFCF parametreleriyle gözlenmektedir. Kar rutinde bulunan CFR ve CWH parametreleri için literatürde olan diğer çalışmalarda olduğu gibi sabit değerler uygun görülmüştür, bu nedenle hassasiyet analizi çalışmasında kullanılmamışlardır.

Toprak nemi rutini parametrelerinden biri olan FC, etkili yağışların akım rutinine iletilmesi ve toprak nemi rutinde depolanması ayrımında model içerisinde önemli bir rol oynamaktadır. Düşük bir FC değeri, toprağın su tutma kapasitesinin çok düşük olduğu ve dolayısıyla buharlaşma ve terleme için daha az miktarda suyun mevcut olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle FC, toprak nemi rutinde hidrografın şeklini ve model başarısını en çok etkileyen parametredir. Hem yüksek akımlar hem de düşük akımlardaki başarı kriterlerine karşı oldukça hassas olan FC parametresi, ayrıca buharlaşma ve terlemeyle olan ilişkisinden dolayı hacim hatası kontrolüne karşı da en önemli parametrelerden biridir. Mevcut toprak nemi referans alınarak gerçek buharlaşma ve terlemeyi belirleyen LP parametresi, çalışmada kullanılan amaç fonksiyonları düşünüldüğünde hassaslık derecesi oldukça zayıftır. Benzer şekilde, Cet parametresi de buharlaşma ve terlemeyle ilişkili bir model parametresi olduğundan başarı kriterlerine etkisi yok denecek kadar azdır. Bir diğer toprak nemi parametresi olan BETA, toprak

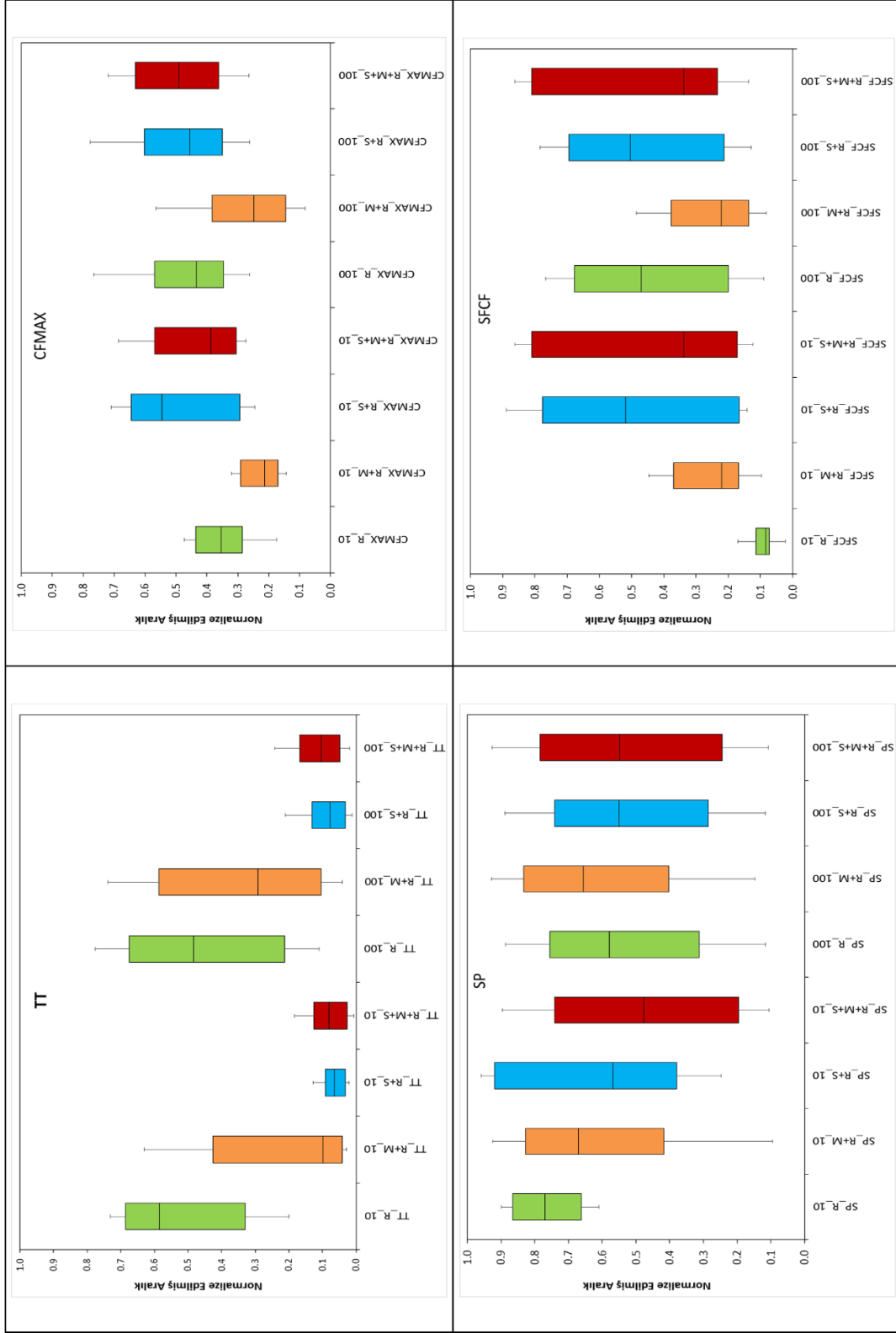
nemi ile toprağın su tutma kapasitesi arasındaki oranı temsil etmektedir. Net yağış ile toprağın su tutma kapasitesini artıran ve fazla suyun akıma katılmasına yardımcı olan bir parametredir. Dolayısıyla hidrografın şeklini etkileyen hassas bir parametre konumundadır. Özellikle düşük akımlara karşı hassasiyeti oldukça fazladır. Toprak nemi rutinde bulunan parametrelerin beklendiği üzere kar kaplı alan değişimine karşı hassasiyetleri yoktur.

PERC ve K2 akım rutinde birlikte çalışan parametrelerdir. Daha yüksek bir PERC değeri, akım modülünde bulunan üst zondan alt zona doğru bir akış oluşturur ve böylece alt zonda daha fazla suyun akıma katkı sağlamasına olanak tanımaktadır. Bu, yüksek ve düşük K2 değeriyle birleştirildiğinde, düşük akım serilerindeki hatayı belirlemektedir. Bu çalışmada, PERC parametresi düşük akımlara olan hassaslığının yanı sıra yüksek akımların başarısına karşı da ciddi bir hassaslığı söz konusudur. PERC parametresinin birlikte çalıştığı K2 parametresinin de bütün model parametreleri içerisinde hem yüksek akımlara hem de düşük akımlara olan ciddi etkisinden dolayı en hassas parametre olduğu söylenebilir. K0 parametresi, rezervuar eşik değerini temsil eden UZL değerini aştığında etkili olan ve yüzey akımını kontrol eden bir parametredir. Bu durum, toprak suya doymun olduğunda ve yağış miktarının fazla olduğu durumlarda bu iki parametrenin hidrografın şekline ve model başarısına etkisinin olduğunu gösterebilir. Fakat bu çalışmada, birlikte çalışan K0 ve UZL parametreleri kullanılan amaç fonksiyonlarına göre değerlendirildiğinde hassasiyetleri zayıf parametrelerdir. K1 parametresi ise, yüzey altı akışını kontrol eden bir parametredir ve model başarısına karşı hassaslığı zayıf görülmektedir. Hidrografın son halini belirleyen MAXBAS parametresi kullanılan amaç fonksiyonlarına göre hassas olmayan bir parametredir ve bu çalışmada sabit tutulabilecek niteliktedir. Akım ve öteleme modülü parametrelerinin beklendiği üzere kar kaplı alan değişimine karşı hassasiyetleri yoktur. PCALT ve TCALT parametreleri havzanın fiziksel özelliklerini temsil eden parametrelerdir. Gözlenmiş yağış ve sıcaklık verilerini, modele tanıtılan 10 yükseklik aralığına göre modelin ürettiği değerler haline getiren parametrelerdir. Bu iki parametreden, özellikle TCALT parametresi model başarısına, akım tutarlılıklarına ve kar kaplı alan değişimine karşı hassasiyeti olan parametredir.

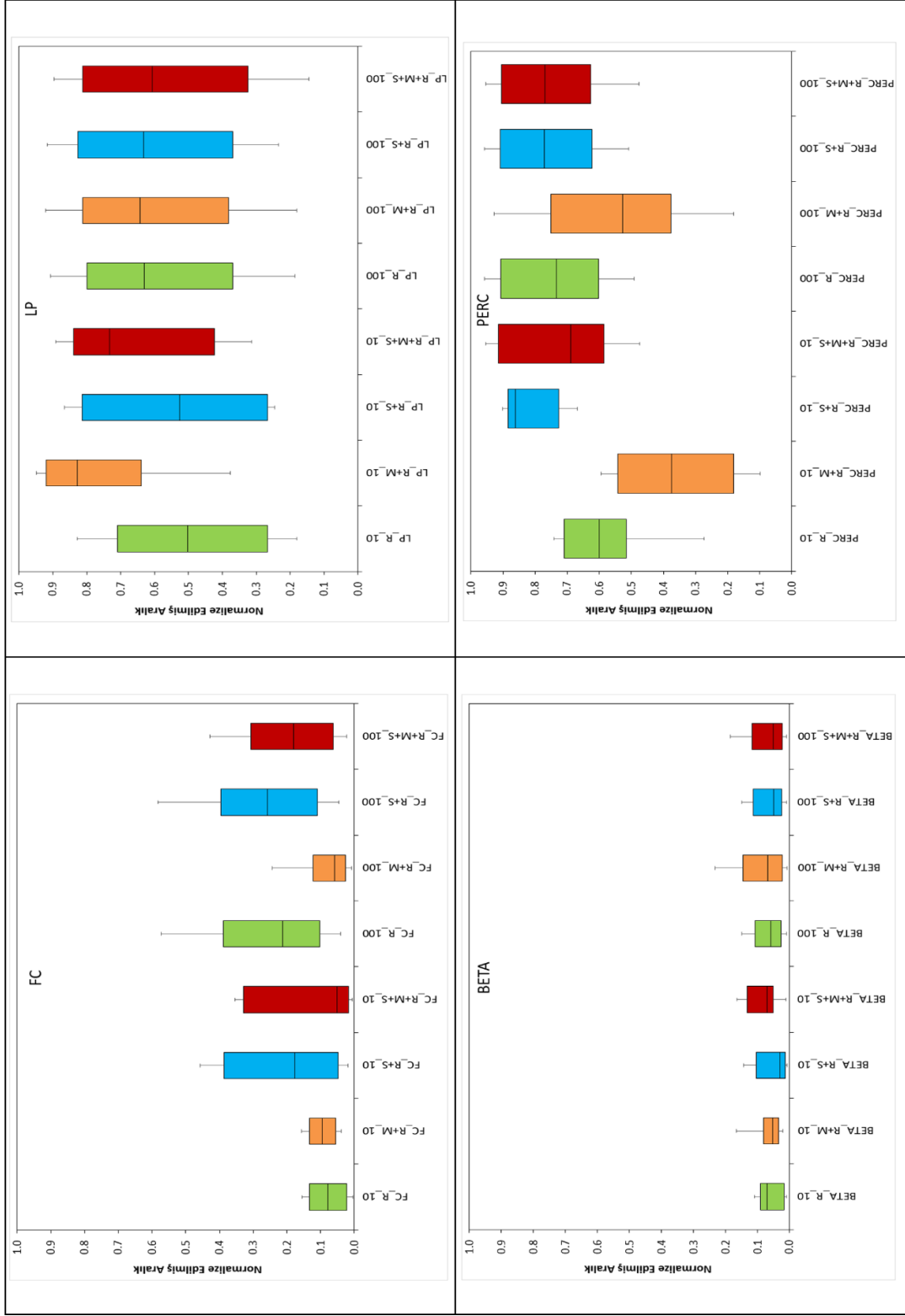
4.2.4.2. Belirsizlik Analizi

Hidrolojik modellerin genel olarak kullanım amacı havzayı temsil edecek optimal bir parametre seti bulmaktır. Kalibrasyon sürecinde üretilen birçok farklı parametre seti, model başarısını artırarak hidrografta aynı benzerliği yakalayabilmektedir. Bu süreçte elde edilen iyi bir parametre seti, başka süreçler için kullanıldığında yanlış set olabilmektedir. Bu nedenle, kalibrasyon sürecinde havzayı temsil edecek optimal bir parametre seti elde edilirken, model başarısına etkisinin yanı sıra modelin güvenilir olmasına da katkı sağlaması gerekmektedir. Veri belirsizliği, model belirsizliği, tahmin belirsizliği model güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu çalışmada, daha önce 500,000 MC simülasyonu ile tek ve çok kriterli yöntemler oluşturularak, model parametrelerinden kaynaklanan belirsizlikleri araştırmak amaçlanmıştır. Bu parametreler genellikle fiziksel tabanlı olmayan ve ölçülemeyen parametrelerdir. Model parametrelerinin modeldeki farklı amaç fonksiyonlarına karşı, hidrolojik süreçte belirsizliklerini tespit etmek amacıyla model belirsizlik analizi yapılmıştır. MC simülasyonu ile kalibrasyon dönemi (2003-2009) için elde edilen en iyi 10 ve 100 parametre setleri, model belirsizlik çalışmaları için kullanılmıştır. Bu hedef doğrultusunda, Reff, SCA ve MARE amaç fonksiyonları ve bunların kombinasyonları ile üretilen parametre setlerinin belirsizlikleri incelenmiştir. Bunu yaparken her parametre değeri normalize edilerek 0 ve 1 aralığında aldıkları değerlere göre modeldeki belirsizleri kıyaslanmıştır. Buna göre, verilen belirsizlik analizi grafiklerinin y eksenleri her parametrenin normalize edilmiş değerlerini temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan 16 parametrenin belirsizlik analizleri kutu grafikleri şeklinde verilirken, belirtilen kutular her parametrenin % 25 ile % 75 arasında aldığı değerleri temsil etmektedir. Böylece en iyi 10 ve 100 parametre setlerinin verildiği grafiklerden, parametrelerin %50'sini kapsayan değerlerinin nerelerde toplandığını ve ortalama değerlerinin nasıl değiştiğini göstermek hedeflenmiştir. Ayrıca kutuların iki ucunda bulunan hata çubukları, sırasıyla en iyi 10 ve 100 parametre setlerinin % 10-25 ve % 75-90 değerlerini temsil etmektedir. Belirsizlik analizinde üzerinde durulan esas konu, her parametrenin % 25 ile % 75 arasında aldığı değerlerin farklı amaç fonksiyonları kullanılarak parametre belirsizlikleri üzerinde ne kadar etkili olduğunu belirlemektir. Bu nedenle, model parametrelerinin farklı kriterlerdeki belirsizlik analizleri kutu grafikleri ile Şekil 4.19-4.22'de verilmiştir.

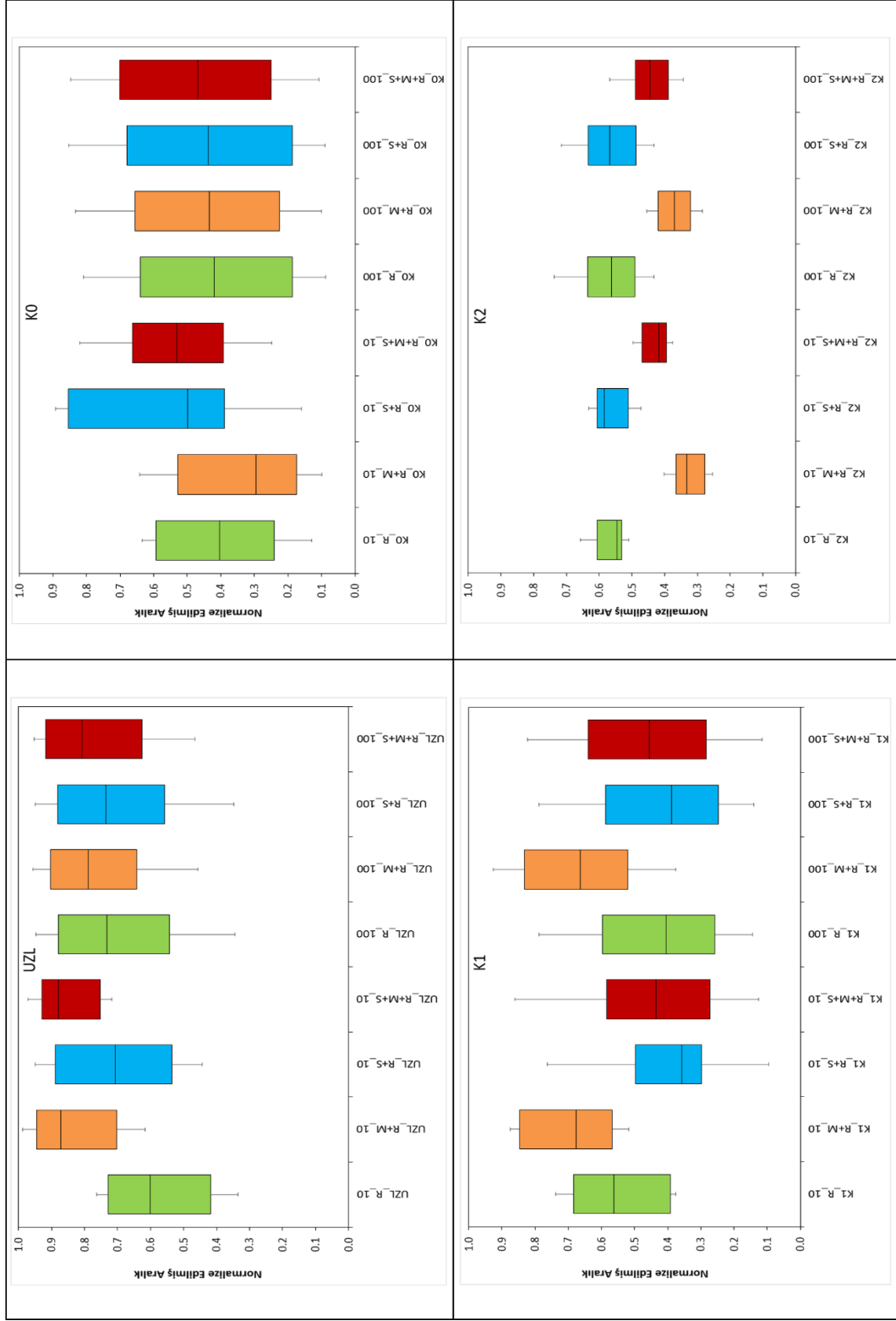
Model başarısının yanı sıra ileride yapılacak tahmin çalışmaları için de modelin güvenilir ve belirsizliğinin azaltılmış olması gerekmektedir. Bu amaçla yapılan model parametrelerinin belirsizlik analizi grafiklerine göre, hangi parametrelerin belirsizliği artırdığı ve azalttığı araştırılmıştır. 3 farklı amaç fonksiyonu kriterlerine göre yapılan bu çalışmada; sadece yüksek akım başarısının hedeflendiği Reff kriteri, yüksek akım ve düşük akımların birlikte ağırlıklandırılarak düşünüldüğü Reff+MARE (R+M) kriteri, yüksek akım başarılarının yanı sıra kar kaplı alan değişiminin de göz önüne alındığı Reff+SCA (R+S) kriteri ve hem yüksek akım başarısı hem düşük akımlarda ki uyum hem de havzadaki kar kaplı alan değişiminin birlikte düşünüldüğü Reff+MARE+SCA (R+M+S) performans kriterleri belirsizlik analizi çalışması için kullanılmıştır. Bu kriterlere göre yapılan çalışmada, daha önce 500,000 MC simülasyonu ile belirlenen en iyi 10 ve 100 parametre seti kullanılmıştır. Belirsizlik analizinin belirtildiği kutu grafiklerinde, yeşil renkte olan kutular Reff amaç fonksiyonunu, turuncu renkte olan kutular Reff+MARE kriterini, mavi renkte olan kutular Reff+SCA kriterini ve kırmızı renkte olan kutular ise kullanılan bütün amaç fonksiyonlarının birleşiminden oluşan performans kriterini temsil etmektedir. Belirsizlik analizi grafiklerinde, tek bir amaç fonksiyonu kullanıldığında modelin belirsizliğini artırarak modelin güvenilirliğini azaltan parametreler belirlenmiştir. Modelin belirsizliğini azaltması için de, farklı amaç fonksiyonları birleştirilerek çok kriterli yapı kullanılmıştır. Grafik sonuçlarından anlaşılabacağı üzere, modelleme çalışmasında kullanılan farklı amaç fonksiyonları kombinasyonları ile model parametrelerinin belirsizliği azalmış veya aynı kalmıştır. Kar modülü parametrelerinden biri olan CFMAX, çok kriterli yapı ile belirsizliği değişmemiştir. Aynı şekilde, toprak nemi modülü parametrelerinden biri olan BETA, bu çalışmada belirsizliği değişmeyen bir başka parametredir. Geriye kalan diğer 14 parametredeki belirsizlik bu çalışmada kullanılan çok kriterli yöntemle azalmıştır ve doğal olarak model güvenilirliği artmıştır. Belirsizlik analizi grafiklerinde verilen ve her parametrenin 0 ile 1 aralığında normalize edilmiş %50'lik değerlerinin (%75 ile %25 farkları) sayısal olarak değişimi Tablo 4.10'da verilmiştir. Tablo 4.10'da özetlenen sayısal sonuçlara göre de, model parametrelerinin çok kriterli yapı ile belirsizliğin hangi model parametreleri üzerinde ne derece değiştiği belirlenmeye çalışılmıştır. %50 kısım göz önüne alındığında bazı parametrelerde belirsizlik değişmiyor olabilir, ancak %10 ile %90 arası değerlere bakıldığında az da olsa belirsizliğin azaldığı görülmektedir.



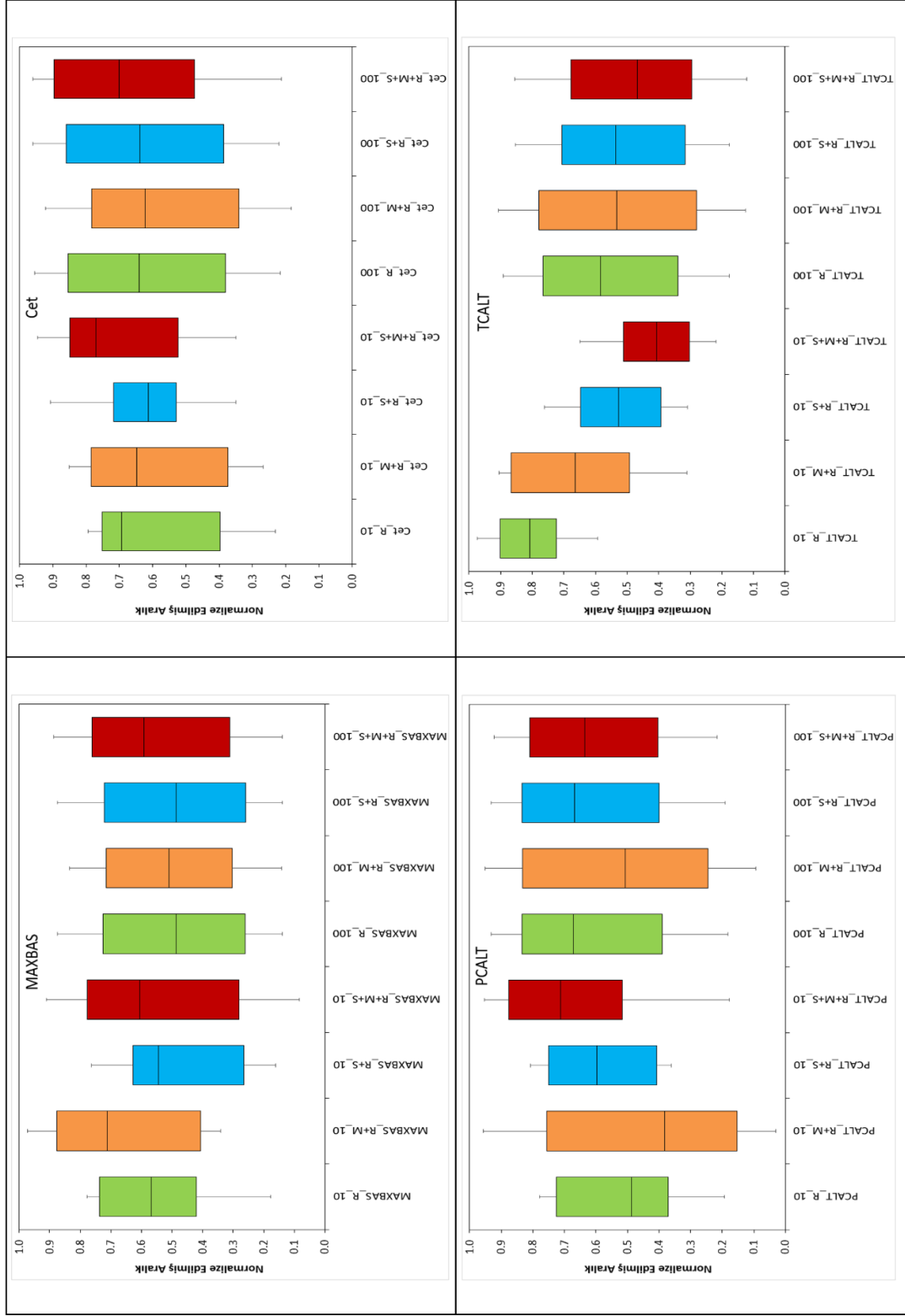
Şekil 4.19. TT, CFMAX, SP ve SFCF parametrelerinin belirsizlik analiz sonuçları



Şekil 4.20. FC, LP, BETA ve PERC parametrelerinin belirsizlik analiz sonuçları



şekil 4.21. UZL, K0, K1 ve K2 parametrelerinin belirsizlik analiz sonuçları

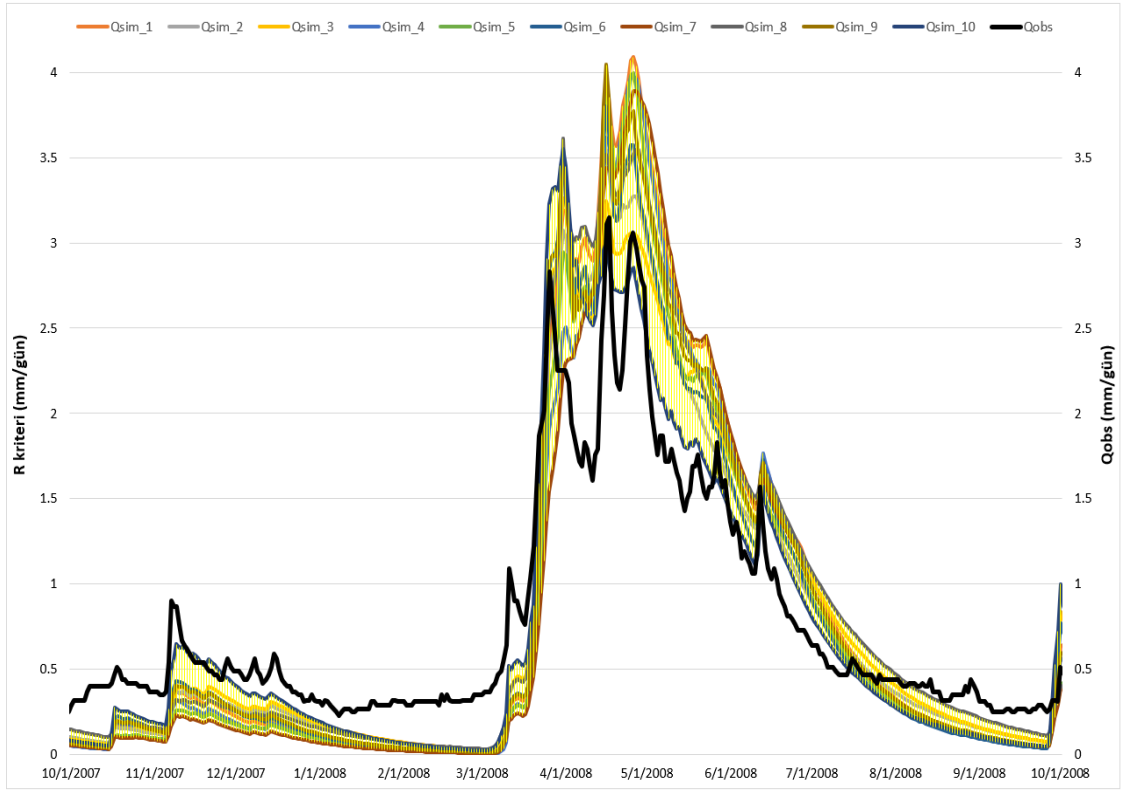


Şekil 4.22. MAXBAS, Cet, PCALT ve TCALT parametrelerinin belirsizlik analiz sonuçları

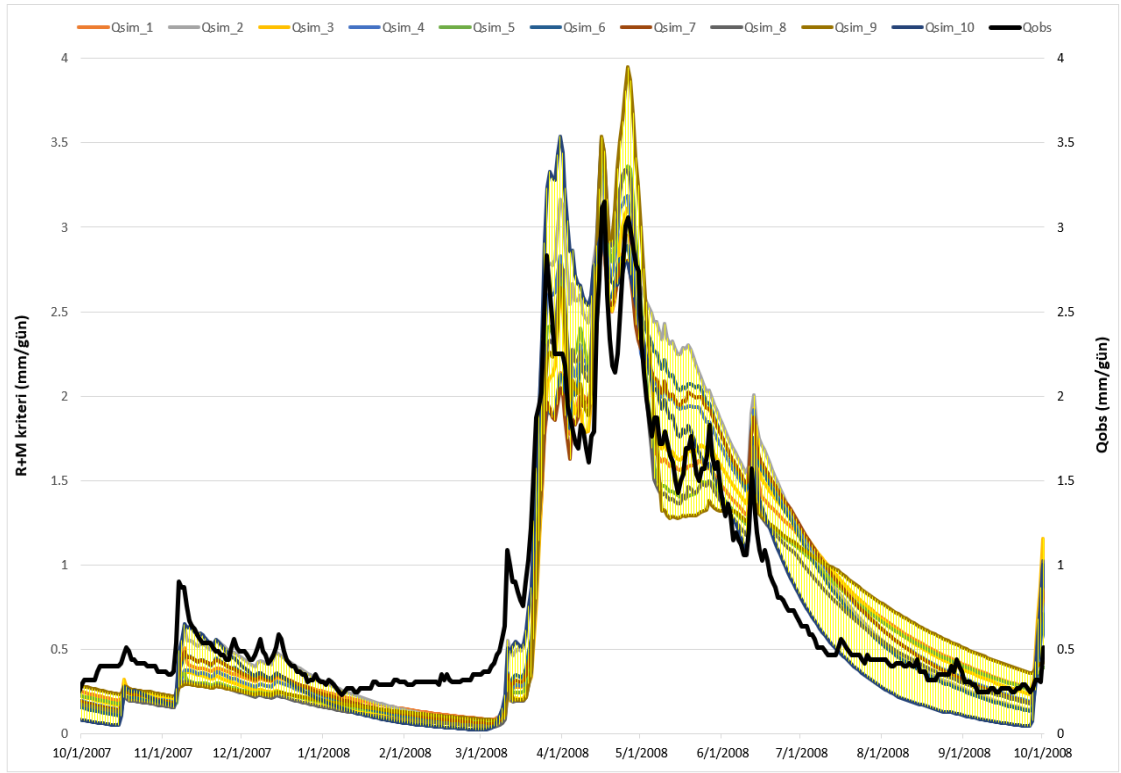
Tablo 4.10. Farklı amaç fonksiyonları ve bunların kombinasyonları ile yapılan belirsizlik analizi sonuçlarının en iyi 100 parametre setine göre %50 (%75-%25) değerlerindeki değişimi

Parametre	Kriterler			
	R	R+M	R+S	R+M+S
TT	0.46	0.49	0.09	0.12
CFMAX	0.22	0.23	0.26	0.27
SP	0.44	0.43	0.45	0.54
SFCF	0.48	0.24	0.48	0.57
FC	0.29	0.09	0.29	0.25
LP	0.43	0.42	0.46	0.49
BETA	0.08	0.13	0.08	0.10
PERC	0.30	0.37	0.29	0.27
UZL	0.34	0.26	0.32	0.29
K0	0.45	0.43	0.49	0.45
K1	0.34	0.31	0.34	0.35
K2	0.14	0.10	0.14	0.10
MAXBAS	0.47	0.41	0.46	0.45
Cet	0.47	0.44	0.47	0.42
PCALT	0.44	0.59	0.44	0.40
TCALT	0.42	0.50	0.25	0.39

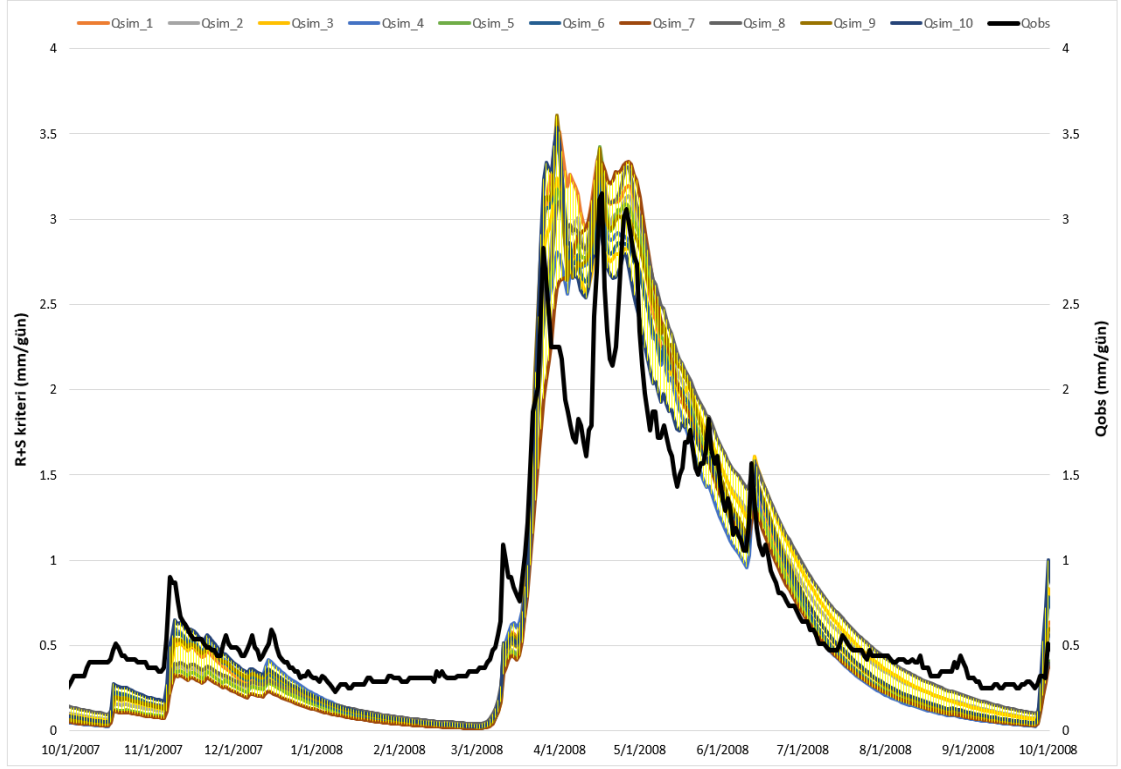
Kullanılan amaç fonksiyonlarına göre parametrelerdeki belirsizlik azalabileceği gibi artadabilmektedir. Bu duruma örnek olarak, birçok parametrenin belirsizliğinin yapılan çalışma ile azaldığı belirlenmiştir ancak, CFMAX parametresinin belirsizliğinin yapılan çalışma ile azalmadığı görülmektedir. Ayrıca bu çalışmanın hidrograf üzerindeki etkisini görebilmek adına 2008 su yılı seçilmiş ve uygulanan 4 farklı kriterin en iyi 10 model parametresine göre simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.23-4.26).



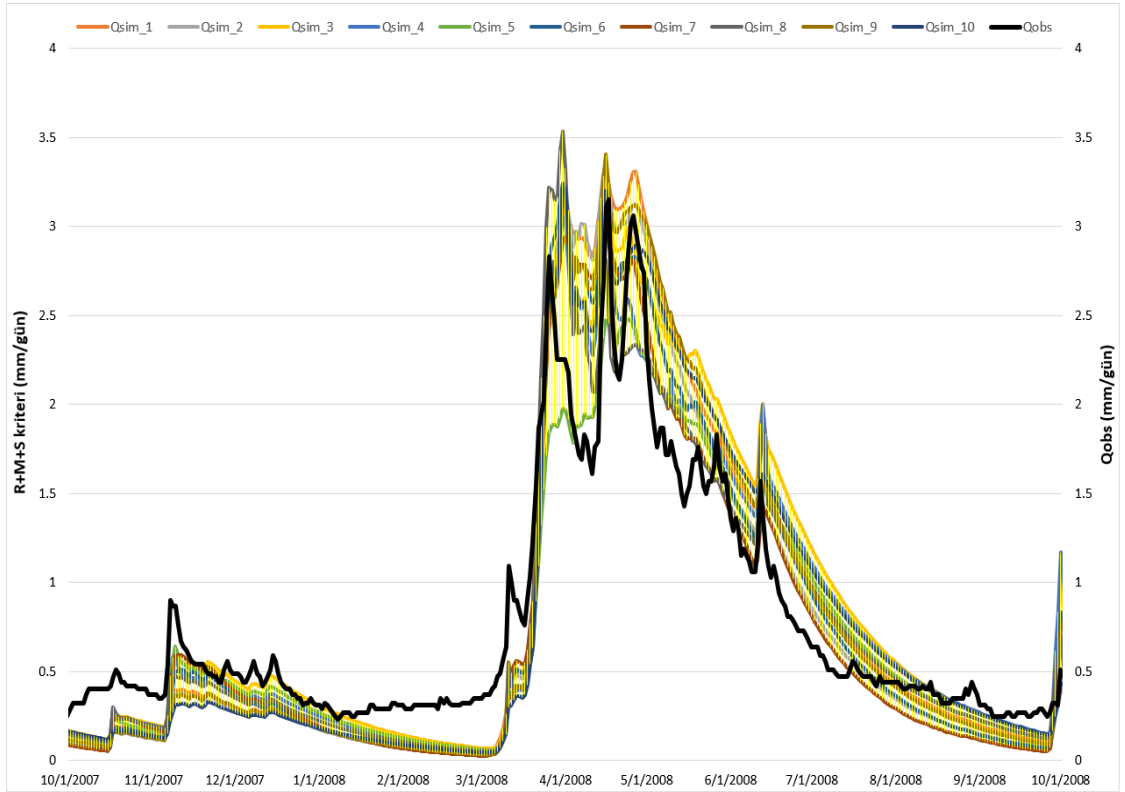
Şekil 4.23. R kriterine göre incelenen 2008 su yılı hidrografi



Şekil 4.24. R+M kriterine göre incelenen 2008 su yılı hidrografi



Şekil 4.25. R+S kriterine göre incelenen 2008 su yılı hidrografi



Şekil 4.26. R+M+S kriterine göre incelenen 2008 su yılı hidrografi

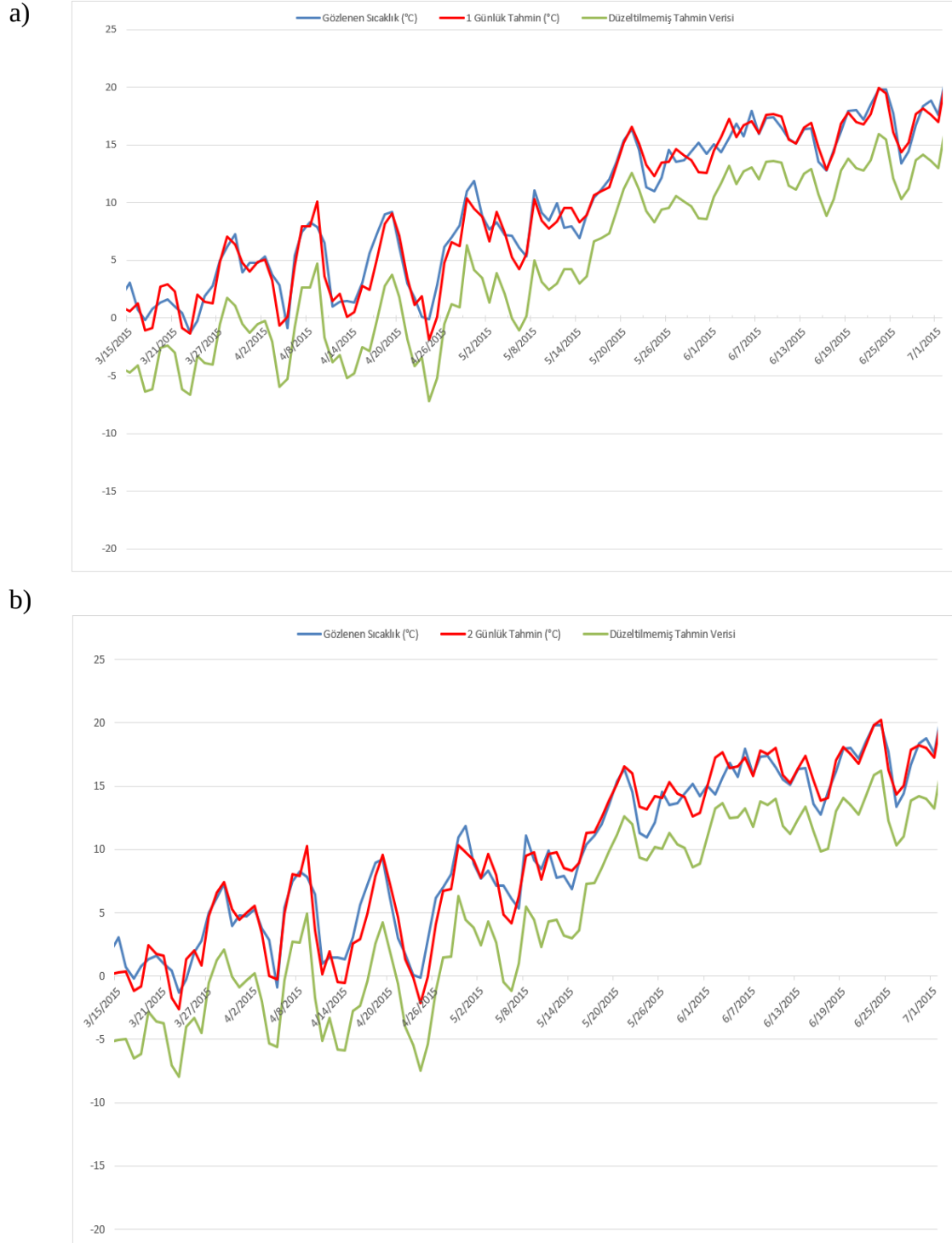
4.3. Akım Tahmini

Yağış-akış ilişkisinin ve artan nüfus temelinde su talebinin değiştirilmesi, su kaynaklarının etkin kullanımına duyulan ihtiyacı göstermektedir. Bu nedenle, hidrolojik modelleme ile desteklenen su kaynaklarının planlanması ve işletmesi çalışmaları daha büyük sorunlar haline gelmektedir. Hidrolojik akım tahmini ile erken uyarı sistemi geliştirilebilir, taşkın ve kuraklık etkileri en aza indirilebilir ve rezervuarlar daha verimli bir şekilde işletilebilirler. Bu ihtiyaçların bir sonucu olarak, taşkın kontrolü, rezervuar işletmesi ve su kaynakları yönetiminde karar desteği için sayısal hava tahmin verileri hidrolojik modellere girdi olarak kullanılabilir (Anderson vd., 2002, Jasper vd., 2002, Westrick vd., 2002, Jonsdottir ve Porarinsson 2004, Kunstmann ve Stadler 2005, Tekeli vd., 2005, Nagler ve diğ. 2008, Şorman vd., 2009, Şensoy ve Uysal 2012, Yücel vd., 2015).

4.3.1. Sayısal hava tahmin verileri

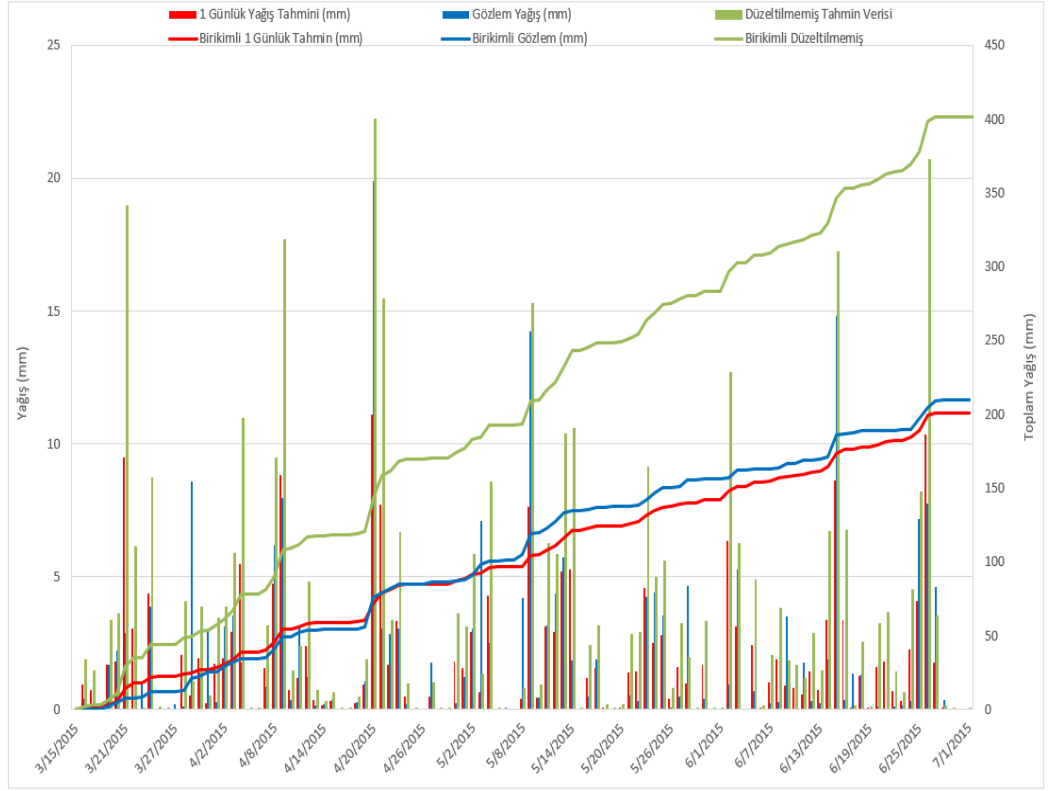
Sayısal hava tahminleri, hava durumuna dair güncel gözlemlerin alınması ve bu verilerle gelecekteki hava durumunu tahmin etmek için bilgisayar modelleri ile işlenmesi üzerine tasarlanmıştır. Havanın mevcut durumunu bilmek, verileri işleyen sayısal modeller kadar önemlidir. Güncel hava durumu değerleri ölçüm istasyonlarından, gelecek hava durumu tahmin değerleri ise oluşturulan atmosferik modellerden elde edilir. Türkiye’de hava tahminlerini sağlayan resmi kurum Meteoroloji Genel Müdürlüğü’dür. Sayısal hava tahminleri yöntemine göre olasılıksal ya da deterministik değerlerden oluşmaktadır. Tahmin olasılıksal işlem üzerinden yapıldıysa birden fazla olası sonuç içerir. Deterministik tahmin işleminde tek bir tahmin değeri vardır. Bu çalışmada 2015 su yılı için WRF (Weather Research and Forecasting) modelinden elde edilmiş E23A004 Havzası’na ait 1 ve 2 günlük deterministik sayısal hava tahmin verileri, hidrolojik modelde akım tahmini için kullanılmıştır. WRF modeli, atmosferik araştırma ve tahmin ihtiyaçları için dizayn edilmiş yeni nesil orta ölçekli sayısal hava tahmini sistemidir (http-5). WRF modelinden elde edilen 1 ve 2 günlük ortalama sıcaklık tahminleri üzerinde, gözlenmiş yer verileriyle uyumu artırmak için lineer eğilimli düzeltme yapılmıştır. Bu işlem, 2013 ve 2014 yer verileriyle WRF modelinden elde edilen veriler arasında lineer bir ilişki kurularak 2015 verilerine uygulanmıştır. Buna göre +5°C derece altındaki verilere 5.32°C, +5°C derece üzerindeki verilere ise 4.01°C eklenmiştir. Gözlenen yağış ve WRF modelinden elde edilen 1 ve 2 günlük yağış verileri ile birikimli

yağış verileri arasında lineer bir ilişki kurulduğunda, WRF verileri gözlenen yağış verilerine göre yaklaşık iki kat daha fazladır. Bu nedenle, WRF verileri ikiye bölünerek akım tahmini için hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.27 – Şekil 4.28).

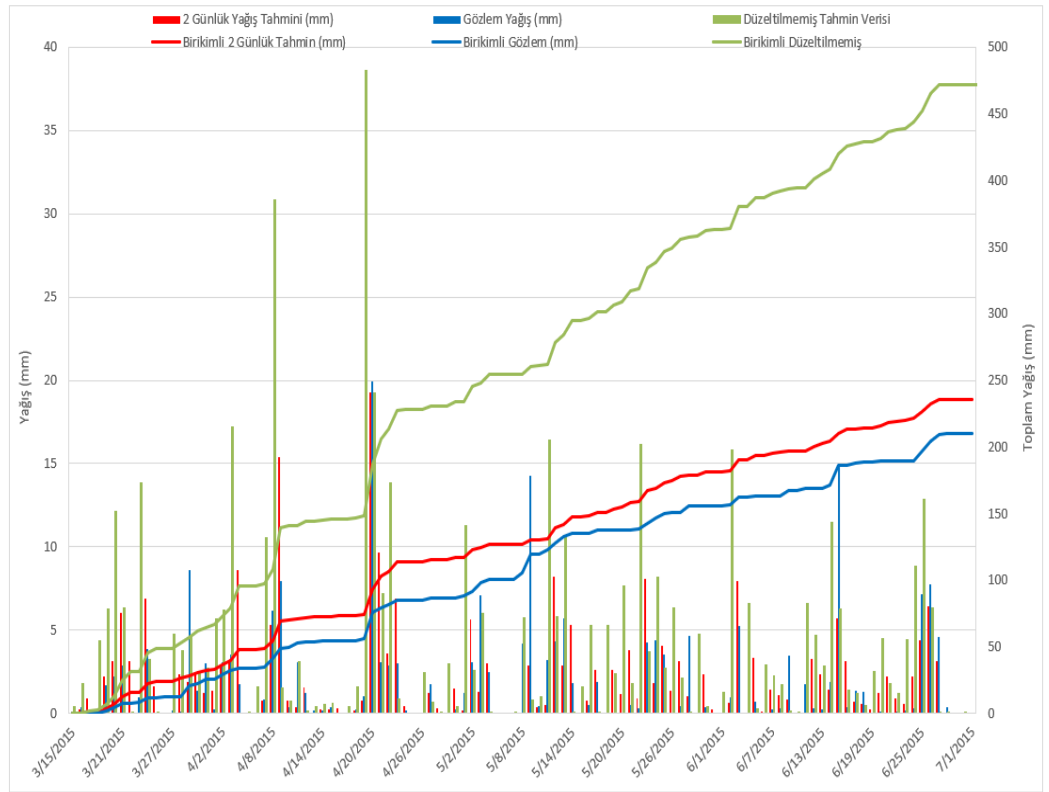


Şekil 4.27. E23A004 Havzası'nın WRF tahmin ve gözlenen ortalama sıcaklık grafikleri (15 Mart – 1 Temmuz 2015) a) 1 günlük b) 2 günlük

a)



b)



Şekil 4.28. E23A004 Havzası'nın WRF tahmin ve gözlenen toplam yağış ile birikimli yağış grafikleri (15 Mart – 1 Temmuz 2015) a) 1 günlük b) 2 günlük

4.3.2. Hidrolojik model tahmin çalışması

HBV Light modelinin tahmin modülü bulunmamaktadır. Bu nedenle akım tahmin işlemi daha önce yapılan çalışmalar ve elde edilen farklı parametre setleri ile gerçekleştirilmiştir. Temin edilen en uzun ve sağlıklı WRF verileri 2015 su yılına ait olduğu için akım tahmini bu yıl üzerinde yapılmıştır. E23A004 Havzası'nın kar erime dönemi olan ve aynı zamanda en yüksek akım değerlerinin görüldüğü 15 Mart 2015 ile 1 Temmuz 2015 tarihleri arası tahmin periyodu olarak belirlenmiştir. Akım tahmin çalışmasında, 1 ve 2 günlük WRF tahmin verileri (sıcaklık ve yağış) kullanılmıştır. Bu çalışma yapılırken, modelin tahmin periyoduna kadar olan durumunu korumak adına 2003 su yılından 15 Mart 2015 tarihine kadar olan dönem ısınma (warm up) periyodu olarak düşünülmüştür. Isınma (warm up) ile model, akım tahmini için hazır hale getirilmiştir.

Monte Carlo yöntemi ile daha önce yapılan kalibrasyon-validasyon çalışmalarında, dört farklı amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Belirlenen amaç fonksiyonları ile oluşturulan farklı performans kriterleri sayesinde tekil ve çok kriterli çalışmalar yapılmıştır. Kalibrasyon çalışmasında modelin başarısını yükselten dört farklı performans kriterinin en iyi 10 parametre seti validasyon çalışması için kullanılmıştır. Buna göre, toplamda 40 tane en iyi parametre seti belirlenmiştir. Akım tahmin çalışmasında belirlenen parametre setleri tek tek uygulanmış ve bunlar arasından da bazı parametreler tahmin çalışması için uygun görülmemiştir. Bunu yaparken; tahmin periyodu, eldeki veri seti, havzanın belirlenen dönemdeki koşulları ve modelin durumu gibi etkenler gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, oluşturulan 40 parametre setinden akım tahmin çalışması için farklı amaç fonksiyonları kriterlerinden en iyi 10 parametre seti belirlenmiştir. Bu seçim yapılırken, kullanılan parametre setlerinin yüksek akım ve düşük akımları arasındaki başarı oranı ile kar çekilme eğrilerindeki tutarlılıklar dikkate alınmıştır. Ayrıca yapılan tahmin çalışmasının güvenilirliği için tek bir “en iyi” parametre seti yerine, farklı koşullara uyan en iyi 10 parametre seti bu çalışma için seçilmiştir. Belirlenen parametre setlerinin özellikleri ile 1 ve 2 günlük WRF verileri kullanılarak her bir performans kriteri için elde edilen ayrı ayrı başarı değerleri Tablo 4.11’de verilmiştir. Bu parametreler ile yapılan akım tahmin çalışmasının, gözlenen akım (Qobs) ile uyumu 1 ve 2 günlük tahmin akımları sırasıyla Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da verilmiştir.

Tablo 4.11. Akım tahmin çalışması için belirlenen en iyi 10 parametre setinin özellikleri ve performansları

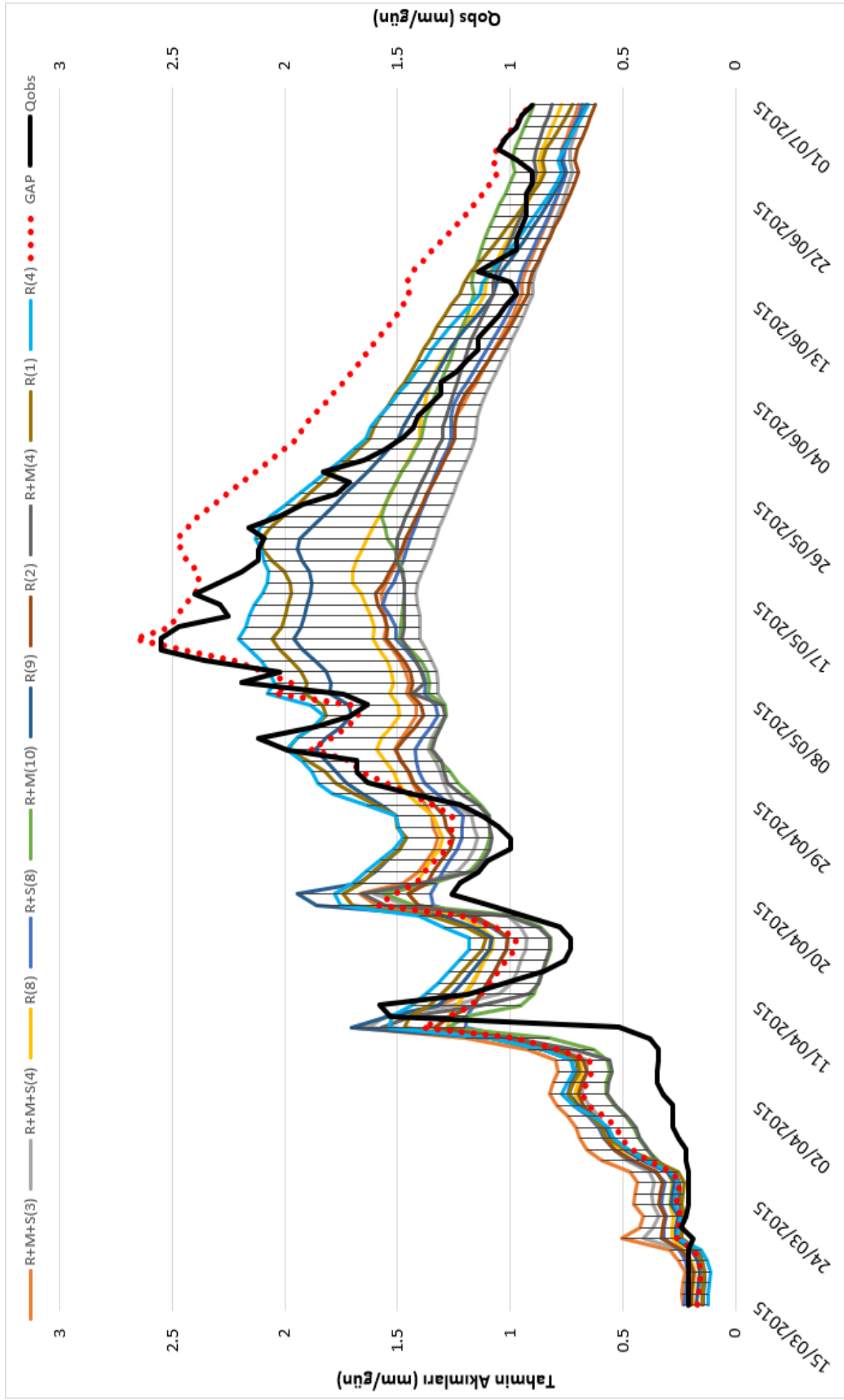
Parametre Seti	Amaç fonksiyonlarına göre başarı yüzdeleri (%)					
	Reff		SCA		MARE	
	WRF1	WRF2	WRF1	WRF2	WRF1	WRF2
R+M+S (3)	79.51	55.37	86.70	85.78	59.74	52.10
R+M+S (4)	79.50	56.14	86.75	85.00	69.26	60.91
R (8)	82.06	63.69	84.96	84.04	68.45	58.45
R+S (8)	80.92	69.70	84.92	84.87	68.81	63.09
R+M (10)	80.23	65.85	84.63	82.75	71.50	67.01
R (9)	75.23	33.22	83.37	81.40	64.09	52.39
R (2)	84.10	70.62	85.62	84.41	70.03	63.14
R+M (4)	85.40	57.43	84.14	81.73	75.10	65.70
R (1)	67.76	32.82	81.68	80.34	61.23	49.16
R (4)	60.96	31.15	79.46	77.82	57.77	46.11
GAP	80.25	57.02	82.73	82.07	68.53	58.90

R: Reff M: MARE S: SCA

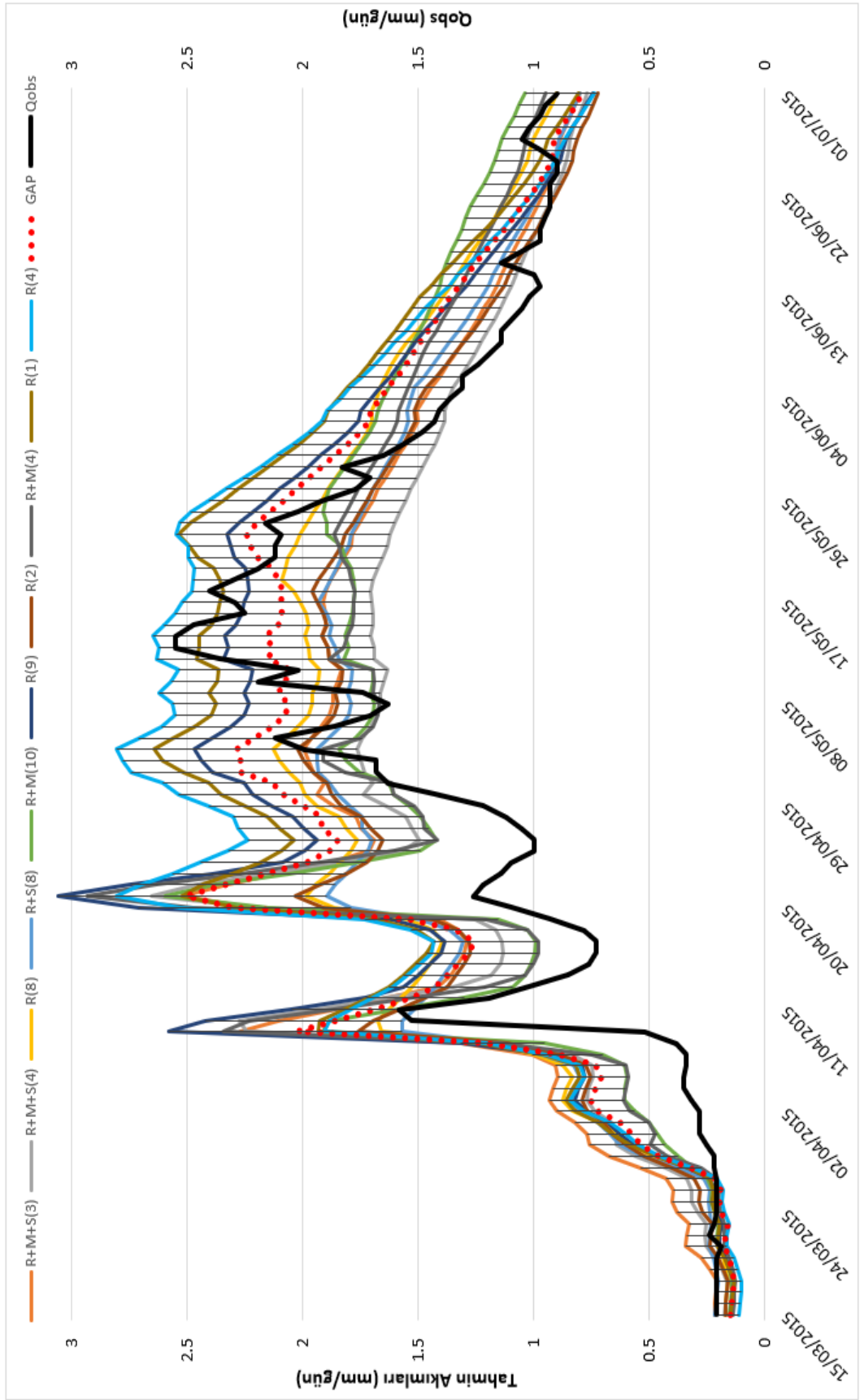
Tabloda verilen parametre setlerinin kodlanma şeklinin daha kolay anlaşılabilmesi için R+M+S (3) parametresi örneklenmek istenirse: Kalibrasyon çalışmalarında kullanılan ve bütün amaç fonksiyonlarının birleşiminden oluşan (Reff, MARE, SCA - R+M+S) performans kriterine göre, ilk 10 parametre seti içerisinde genel model başarı sıralamasında üçüncü parametre setini ifade ettiği söylenebilir. Aynı şekilde verilen diğer parametre setleri de bu örnekteki gibi kodlanmıştır. Daha önce yapılan kalibrasyon-validasyon çalışmalarında elde edilen en yüksek başarı değerlerine göre parametrelerin tablodaki sıralamaları belirlenmiştir.

Tablo 4.11’de verilen WRF1 ve WRF2 ifadeleri, 1 ve 2 günlük WRF tahmin verileri kullanılarak ayrı ayrı elde edilen başarı değerlerini göstermektedir. Bu sonuçlara göre, beklendiği üzere 10 parametre seti ile 1 günlük sıcaklık ve yağış tahminleri kullanılarak yapılan akım tahmin çalışması gözlenen akım ile daha tutarlı bir davranış göstermiştir. Çünkü, tahmin süresi yaklaştıkça tahmin belirsizliği azalarak tutarlılığın artması beklenmektedir. WRF2 verileriyle yapılan akım tahminleri hem WRF1’e göre hem de gözlenen akımlara göre daha yüksek değerler vermektedir. Bu, WRF2’nin daha yüksek yağış değerleri vermesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca Tablo 4.11’de her bir sütunda kalın olarak verilen başarılar, farklı performans kriterleri kullanılarak elde edilen parametre setleriyle yapılan en iyi tahmin sonuçlarını belirtmektedir.

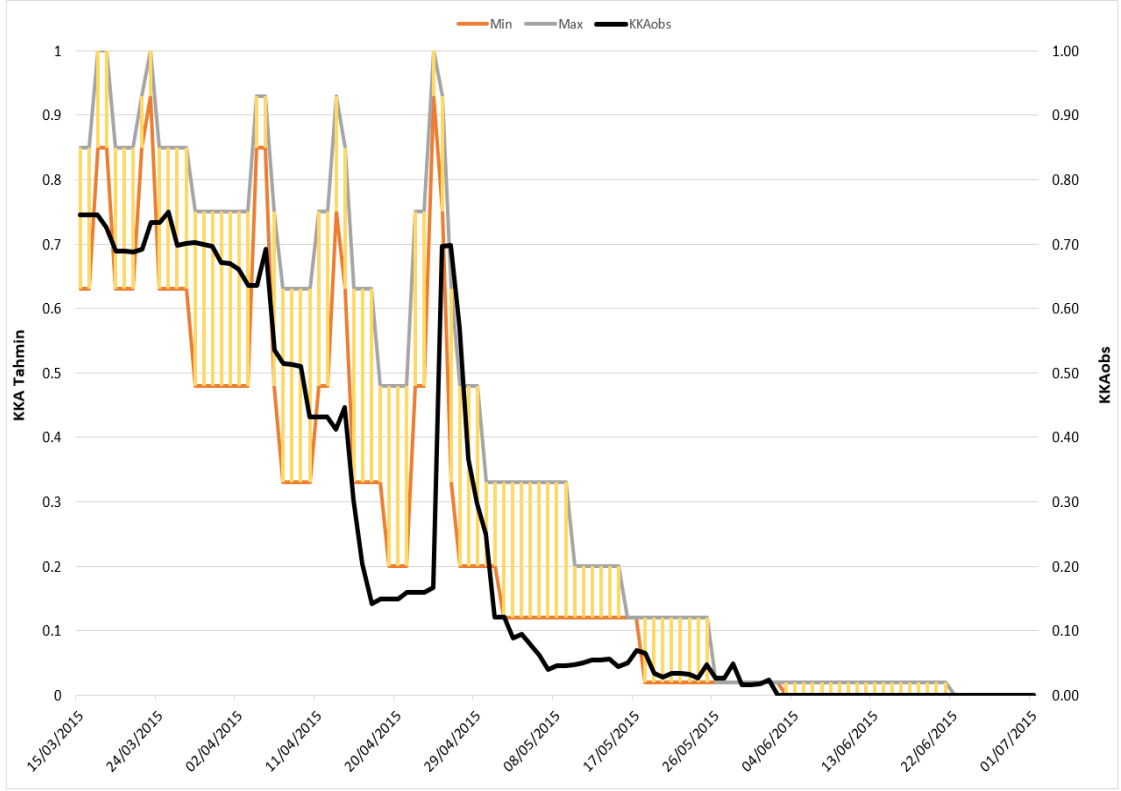
Tahminler farklı parametre setleri kullanarak oluşturulduğu için akım olasılıkları (ensemble) olarak üretilmiş ve tahmin belirsizliği azaltılmaya çalışmıştır. Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilen akım tahminleri genelde akım yükselme zaman ve piklerini başarılı tutturmakta, Mayıs sonrası akım çekilmesini (azalmasını) de aralık içinde barındırmaktadır. Fakat, GAP yöntemiyle elde edilen en iyi parametre setleri kullanılarak yapılan akım tahmin çalışmasında, en başarılı tahmin sonuçlarına ulaşamamakla birlikte belirsizliğinin de diğer parametre setlerine göre yüksek olduğu özellikle akımın çekilme döneminde görülmektedir. 1 günlük tahminde pik artana kadar aralık içinde kaldığı, daha sonra sınırların dışına çıktığı görülmektedir. 2 günlük tahminde ise hep aralık içinde kaldığı gözlenmektedir. Ayrıca, WRF1 ve WRF2 verileri kullanılarak yapılan tahmin çalışması çıktıları, uydu verilerinden elde edilen kar kaplı alan (KKA) değişimleri ile kıyaslanmıştır. Bu sonuçlar da Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir. Tahmin çalışmalarında elde edilen grafiklere göre, kar kaplı alanların çekilme dönemi başarıları Tablo 4.11'de görüldüğü üzere yüksektir. Fakat, gözlenmiş kar daha erken erirken, tahminlerde kar erimesinin daha geç olduğu gözlenmektedir.



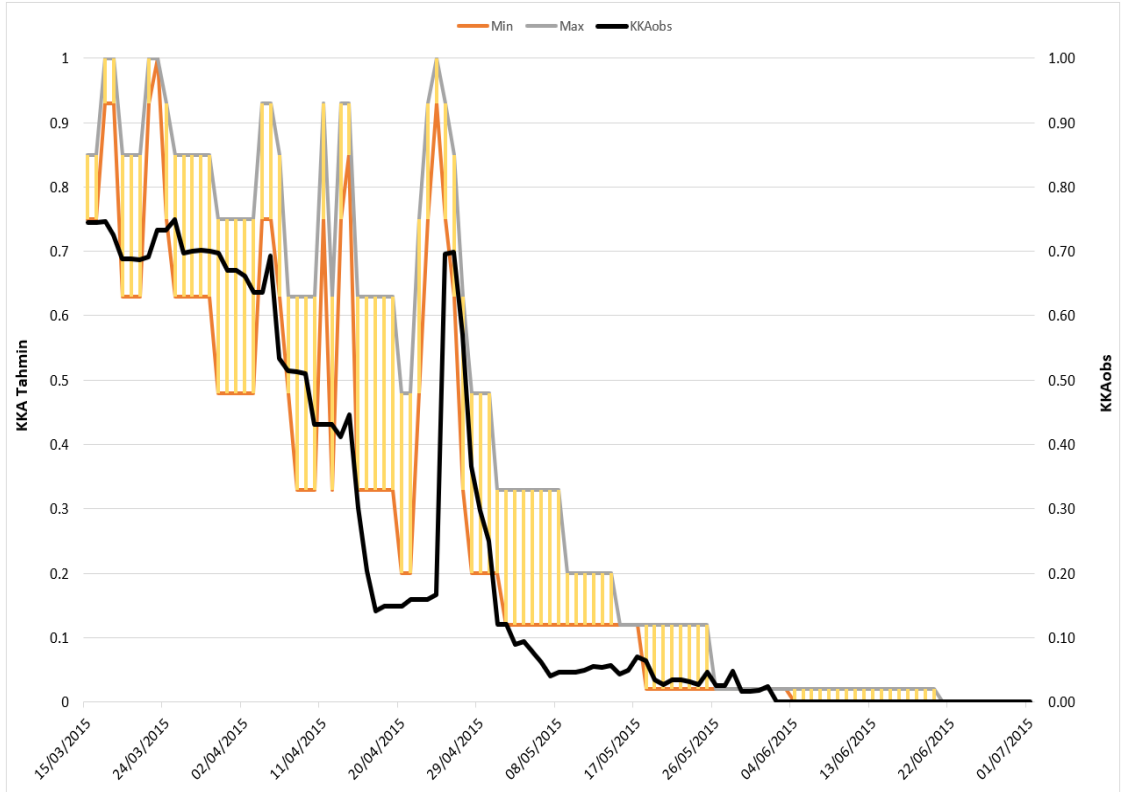
Şekil 4.29. 1 günlük WRF verileri kullanılarak elde edilen akım tahminleri ve aralıkları



Şekil 4.30. 2 günlük WRF verileri kullanılarak elde edilen akım tahminleri ve aralıkları



Şekil 4.31. 1 günlük WRF verileri kullanılarak elde edilen kar kaplı alan tahminleri ve aralıkları



Şekil 4.32. 2 günlük WRF verileri kullanılarak elde edilen kar kaplı alan tahminleri ve aralıkları

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Türkiye'nin kar potansiyeli yüksek dağlık doğu bölgelerindeki yıllık toplam akım hacminin büyük bir bölümü, bahar ve ilk yaz ayları süresince kar erimesinin meydana getirdiği akımlardan oluşmaktadır. Bu nedenle özellikle büyük enerji barajlarının bulunduğu Çoruh Havzası'nda kış aylarında biriken kar miktarının alansal ve zamansal olarak takip edilmesi ülkenin su kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması açısından önemlidir.

Çoruh (Bayburt) Havzası, 1537-3244 m yükseklik bandında değişmekte ve ortalama yüksekliği 2190 m'dir. Doğu Karadeniz Bölgesi'nin genel özelliklerini taşıyan bu havza ortalama %35 eğimle oldukça yüksek ve dağlık bir alandır. Havzanın 1783 km²'lik toplam alanının %72'lik kısmı %20'den fazla eğimli yerlerden oluşmaktadır. Havzanın yüksek eğimli olması kar erimesi açısından oldukça önemli olmasına rağmen kar örtüsünün görüntülenmesini ve verilere ulaşılabilirliğini zorlaştırmaktadır. Şehirleşme yok denilecek kadar az olan bu havzada genel olarak tarım, otlak ve çıplak araziler alana hakimdir.

Havzada yapılan inceleme ve çalışmalar 2003 su yılı ve sonrası üzerinde yapılmıştır. Havza içinde ve çevresinde konumlanmış farklı yüksekliklerde yer alan 15 Meteoroloji Gözlem İstasyonu'ndan yağış ve sıcaklık verileri temin edilmiştir. Bu veriler işlenip düzenlenerek hidrolojik modelleme çalışması için uygun hale getirilmiştir. Ortalama değerler baz alınarak yağış, sıcaklık ve akım verileri elde edilmiştir. Yağış verilerine göre ortalama aylık en fazla yağış Mayıs ayında 69.3 mm iken en az yağış Ağustos ayında 17.3 mm'dir. Havzaya 1 yılda düşen ortalama toplam yağış ise 463.4 mm'dir. Sıcaklık verilerine bakıldığında ise en yüksek sıcaklık Ağustos ayında 20.1 °C iken en düşük sıcaklık Ocak ayında -6.4 °C'dir. Akım verilerinde ise en yüksek akım Mayıs ayında 53.2 m³/s iken en düşük akım Şubat ayında 5.2 m³/s'dir. Eksik olan 2012 su yılına ait akım verileri ise Çoruh-İspir Köprüsü Akım Gözlem İstasyonu ile yapılan korelasyon çalışması ile tamamlanmıştır. İki istasyon arası yapılan çalışmada R²=0.92 bulunmuştur. Tüm bu veriler incelendiğinde 2006 su yılı en ıslak yıl olurken 2014 su yılının en kurak yıl olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmanın bir diğer hedefi ise mevcut veriler kapsamında havzanın günlük kar potansiyelini belirleyerek kurulacak olan yağış-akış ilişkisine destek vermektir. Kar

potansiyelinin yüksek olduğunun bilindiği bu havza, şehirleşmenin olmadığı yüksek dağlık bölgeler ve derin, dik yamaçlardan oluşmaktadır. Bu sebeple yeterli yer ölçüm verileri bulunmadığından uzaktan algılama teknikleriyle kar miktarını mekansal ve zamansal olarak takip etmek su kaynaklarının verimli bir şekilde işletilmesi için önemlidir. Bu doğrultuda farklı mekansal çözünürlüklere sahip 3 ayrı uydudan elde edilen günlük karla kaplı alan verilerinden yararlanılmıştır. Bunu yaparken karın birikme döneminde, birkaç uydunun harmanlanmış görüntülerinden oluşan ve buluttan daha az etkilenen veriler sunduğu için IMS görüntüleri tercih edilmiştir. Karın erime döneminde ise daha doğal bir patern izlediği için MODIS uydu görüntülerinden faydalanılmıştır. Bazı günlerde iki uydunun gözlemlerinde yaşanan aksaklıklarından dolayı MSG-SEVIRI uydusundan da yararlanılmıştır. Böylece havzanın kar kaplı alan analizi gerçekleştirilmiştir.

Kar kaplı alan analizi gerçekleştirilirken kullanılan uydular arasında çözünürlüğü 500 m ile en yüksek olan MODIS uydusunun doğruluğunu tespit etmek amacıyla farklı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda daha iyi mekansal çözünürlüğe sahip Landsat (30 m) uydusu ile yer gözlem verilerinden yararlanılmıştır. Landsat uydusunun farklı versiyonlarına ait görüntüler, çeşitli indeksler (NDSI, NDVI, NDWI) ile işlenerek 4 farklı sınıf (kar, kara, su ve orman) altında toplanmıştır. Daha sonra MODIS uydusundan elde edilen görüntülerle, ikili ve etkili kar kaplı alan karşılaştırmaları yapılarak, toplam başarıların verildiği sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre, ikilide % 82.6 ile % 88, etkilide ise % 71.3 ile % 79.8 arasında değişen tutarlılık (doğruluk) değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca MODIS görüntülerine ait bulut veya kararsız bölgeler çıkarıldığında ise toplam başarının ikilide % 88.2 ile % 93, etkilide ise % 76 ile % 84.4 arasında değerlere yükseldiği görülmektedir. Elde edilen Landsat ve MODIS etkili kar kaplı alan haritaları, yer gözlem verileriyle de karşılaştırılarak MODIS uydusunun doğruluğu tespit edilmeye çalışılmıştır. 13 yer gözlem verisi ile kıyaslanan MODIS uydusuna ait 3 görüntüde başarı değerleri hesaplanmıştır. Bu başarılar ikili ve etkili MODIS için, % 84.6 (11/13) ile % 100 (13/13) arasında değişen değerlere sahiptir. Çalışma sonuçlarından elde edilen ikili kar kaplı alanın etkiliye göre başarısının yüksek olmasının sebebi MODIS uydusunun Landsat'a göre daha kaba çözünürlüğe sahip olması ve fazla kar göstermesidir. Aynı zamanda bu çalışmadan çıkarılacak bir diğer sonuç ise, uydular ile kar kaplı alan tespiti yapılırken NDSI indeksinin, kar olarak belirlenmiş 0.4 ve üzeri olan eşik değerinin bu bölgede özellikle son yıllarda daha aşağı çekilebilmesinin gerekliliği gösterilmeye

çalışılmıştır. Ancak bu değerler çalışma alanı olarak seçilen bölge için geçerli olup diğer alanlar için de bu testlerin yapılması gerekmektedir.

Çalışma alanının mansabında yer alan Türkiye'nin önemli enerji barajlarının verimli bir şekilde işletilebilmesinin yolu başarılı bir hidrolojik modellemeyi geçmektedir. Bu amaçla ilgili havza HBV modelinin Light versiyonu için kurulmuştur. Havzanın yağış-akış ilişkisinin belirlendiği bu modelde, toplam 4 modül ve 18 parametre bulunmaktadır. Bu çalışmada iki farklı kalibrasyon yöntemi denenmiştir. Bunlardan ilki, otomatik kalibrasyon ile havzayı belirlenen periyotlarda temsil edebilecek en iyi parametre seti üreten GAP (Genetic Algorithm and Powell) metodudur. Bu yöntemle, kalibrasyon dönemi (2003-2009) için elde edilen Reff/NSE başarı değeri 0.864 olurken, validasyon dönemi (2010-2015) için 0.774 bulunmuştur. Belirlenen en iyi parametre seti ile KSE çıktıları elde edilmiş ve KKA ile karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile karın birikme ve erime döneminde KKA ve KSE'nin birlikte hareket ettiği görülmüştür. Bu çalışmada, sadece gözlenen ve modellenen akımın uyumuna göre elde edilen ve bu doğrultuda tek bir parametre seti ile başarılı sonuçlar veren kalibrasyon-validasyon çalışmalarının, daha doğru ve güvenilir bir akım tahmini için geliştirilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür. Bu amaçla, hem düşük ve yüksek akımlar arası uyum hem de ek veri seti olarak kullanılan günlük kar kaplı alanlar arası uyum gözetilerek çok kriterli kalibrasyon çalışması yapılmıştır. Tanımlanan parametre aralığında normal dağılıma uyumlu rassal model parametre setleri üreten MC (Monte Carlo) simülasyonu bu çalışma kapsamında kullanılan diğer bir yöntemdir. Bu bağlamda, belirtilen kriterler doğrultusunda seçilen 3 farklı amaç fonksiyonu (Reff/NSE, SCA ve MARE) ve bunların kombinasyonları ile oluşturulmuş performans kriterleri, aynı birimlere dönüştürülüp eşit ağırlıklandırılarak kullanılmışlardır. Farklı performans kriterlerine göre koşullara en iyi uyan 10 ve 100 parametre setleri üretilmiştir. Elde edilen sonuçlardan anlaşılabileceği üzere, model kalibre edilirken seçilen parametre setlerinin sadece tek bir amaç fonksiyonuna göre olursa genel başarının düşeceği, çok kriterli bir kombinasyonla kalibrasyon yapıldığında genel başarının hem kalibrasyon hem de validasyon çalışmalarında artacağı belirlenmiştir.

Bu çalışma ile çok kriterli kalibrasyon yönteminin, kullanılan amaç fonksiyonlarına göre genel model başarısını etkilediği belirlenmiştir. Fakat elde edilen parametre setlerinin ne derece hassas ve belirsiz olduğu üzerinde çalışmalar yapmak, modelin

güvenilirliğini belirlemek adına önemlidir. Bu nedenle, elde edilen parametre setleri ile belirsizlik ve hassasiyet analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu sonuçlara göre, kar modülünde bulunan TT, CFMAX ve SFCF parametreleri kullanılan bütün amaç fonksiyonları üzerinde en hassas olanlardır. Aynı zamanda K2 ve FC parametrelerinin de yüksek ve düşük akımların uyumuna karşı etkili oldukları görülmektedir. Ayrıca çok kriterli yöntemle, neredeyse bütün parametrelerin belirsizliği azalmıştır. Bu da, yapılan çok kriterli çalışmanın model üzerinde güvenilirliğinin arttığını ortaya koymaktadır.

Model parametreleri hazırlandıktan sonra tahmin aşamasına geçilmiştir. 1 ve 2 günlük WRF tahmin verileri kullanılarak 2015 su yılı üzerinde yapılan akım tahmin çalışmalarına göre, tahminler Nisan ayında gözlenen akımın yükselmeye başlaması ve Haziran'daki akım düşüşü ile uyum göstermektedir. Akım tahmin çalışmasında özellikle karın erime döneminde olduğu ve yüksek akımların olduğu 15 Mart - 1 Temmuz tarihleri seçilmiştir. Tek ve çok kriterli amaç fonksiyonlarından elde edilen en iyi 10 parametre seti, bu çalışma için seçilen tahmin akımlarını oluşturmaktadır. Ayrıca akım tahmin çalışması yapılırken gözlenen kar kaplı alan değerlerinin tahmin verileriyle uyumu da değerlendirilmiştir. En iyi 10 parametre seti ile yapılan akım tahmin çalışmasında hem akımların uyumu hem de kar kaplı alanların gözlem verileriyle tutarlılıkları ayrı ayrı belirlenmiştir. Buna göre pik akımlar arası uyum başarısı en yüksek 0.854 olarak hesaplanmış, düşük akımlar arası uyum için 0.751 değerinde bir başarı sağlanmış ve kar kaplı alanların tutarlılık başarısı ise en yüksek 0.868 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, tahmin verilerinin süresi uzadıkça elde edilen akım tahmin başarısının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca veri güncellemesinin daha sık yapıldığı bir durumda başarı oranının artacağı da söylenebilir.

Modelin farklı amaç fonksiyonlarını tek bir performans kriteri üzerinde değerlendirerek tek bir parametre seti üretmek yerine, havzayı temsil edebilecek birden çok parametre seti üreterek başarılı bir hidrolojik modelleme çalışmasının yürütülebileceği söylenebilir.

Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda güncel verilere daha hızlı ulaşabilmek için akım istasyonlarının kamu kurumlarınca otomatikleştirilip, dağlık alanlara da havza temsiliyetini artırmak amacıyla yeni istasyonların kurulması önerilebilir.

Kar kaplı alan tespitlerinin; çalışılan bölgeye, arazi kullanımına, sezona ve bölge karakteristiğine göre NDSI eşik değerinin indirilebileceği ve farklı özellikteki uydularla bu çalışmanın gerçekleştirilebileceği söylenebilir. Ayrıca gelecekte aynı havza üzerinde yapılacak olan hidrolojik modelleme çalışmalarında sadece kar kaplı alan değil, toprak nemi ve yer altı su seviyeleri gibi veriler de gözetilerek çok kriterli çalışma gerçekleştirilebilir.

Parametre ve verilerden kaynaklı belirsizlikler, yüksek ve düşük akımlar için ayrı ayrı çalışılabilir (Engin vd., 2017). Aynı zamanda akım tahmin çalışması için sadece 1 ve 2 günlük tahmin verileri yerine daha uzun süreli hava tahmin verileriyle olasılıklı tahmin (Ensemble Prediction System - EPS) çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKÇA

- Abebe, A.N., Ogden, F.L. ve Pradhan, N.R. (2010). Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall-runoff model: Implications for parameter estimation. *Journal of Hydrology*, 389 (3-4), 301-310.
- Allen, R.C., Durkee, P.A. ve Wash, C.H. (1990). Snow/cloud discrimination with multispectral satellite measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 29, 994-1004.
- Anderson, M.L., Chen, Z.Q., Kavvas, M.L., Feldman, A. (2002). Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7 (4), 312-319.
- BAP1207F117, (2012-2016). Cloud Reduction Methods and Validation using Modified Satellite Products in the Mountainous Eastern part of Turkey, Anadolu Üniversitesi.
- Baumgartner, M.F. ve Rango, A. (1995). A microcomputer based alpine snowcover analysis system (ASCAS). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61 (12), 1475-1486.
- Beldring, S. (2002). Multi-criteria validation of a precipitation-runoff model. *Journal of Hydrology*, 257 (1-4), 189-211.
- Bergström, S. ve Lindström, G. (2015). Interpretation of runoff processes in hydrological modelling-experience from the HBV approach. *Hydrological Processes*, 29 (16), 3535-3545.
- Bergström, S., Lindström, G. ve Pettersson, A. (2002). Multi-variable parameter estimation to increase confidence in hydrological modeling. *Hydrological Processes*, 16 (2), 413-421.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H. (2013). *Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales*. UK: Cambridge University Press.

- Burgess, T.M. ve Webster, R. (1980). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. *Journal of Soil Science*, 31, 315-331.
- Butts, M.B., Payne, J.T., Kristensen, M., Madsen, H. (2004). An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 298 (1-4), 242-266.
- Crawford, N.H. ve Linsley, R.K. (1966). Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. *Department of Civil Engineering Technical Report 39*, CA: Stanford University.
- Crosetto, M., Tarantola, S. ve Saltelli, A. (2000). Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 81 (1), 71-79.
- Dozier, J. (1989). Spectral signatures of alpine snow cover from Landsat Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22.
- Duethmann, D., Peters, J., Blume, T., Vorogushyn, S., Güntner, A. (2014). The value of satellite derived snow cover images for calibrating a hydrological model in snow dominated catchments in Central Asia. *Water Resources Research*, 50 (3), 2002-2021.
- Engin, B.E., Yücel, I. ve Yilmaz, A. (2017). Assessing different sources of uncertainty in hydrological projections of high and low flows: case study for Omerli Basin, Istanbul, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, Springer International Publishing, 189-347.
- Finger, D., Vis, M., Huss, M., Seibert, J. (2015). The value of multiple data set calibration versus model complexity for improving the performance of hydrological models in mountain catchments. *Water Resources Research*, 51 (4), 1939-1958.
- Finger, D., Pellicciotti, F., Konz, M., Rimkus, S., Burlando, P. (2011). The value of glacier mass balance, satellite snow cover images, and hourly discharge for improving the performance of a physically based distributed hydrological model. *Water Resources Research*, 47 (7), W07519.

- Frank, J.L., Itten, I.K. ve Staez, K. (1988). Improvement in NOAA AVHRR snow cover determination for runoff prediction. *IEEE IGARS*, pp.433-435.
- Frei, A., Tedesco, M., Lee, S., Foster, J., Hall, D.K., Kelly, R., Robinson, D.A. (2012). A review of global satellite derived snow products. *Advances in Space Research*, 50 (8), 1007-1029.
- Guneriussen, T., Bjerke, P.L., Hallikainen, M., Hilbrunner, D., Johnsen, H., Jaaskelainen, V., Kolberg, S.A., Koskinen, J., Maltzer, C., Pullianen, J., Sand, K., Solberg, R., Standley, A., Wiesmann, A. (2000). Research and Development of Earth Observation Methods for Snow Hydrology, SnowTools Final Report. *NORUT Report*, 431/47-00.
- Gündoğdu K. S., Demir A. O. ve Akkaya Aslan, Ş. T. (2001). Göletlerin Bazı Hidrolojik Analizlerinin Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) Ortamında Yapılma Olanakları, I. Ulusal Sulama Kongresi, 8-11 Kasım, 247-253, Antalya.
- Hall, D.K. ve Martinec, J. (1985). Remote sensing of ice and snow. *Chapman and Hall*, London, 189.
- Hall, D.K., Riggs, G.A. ve Salomonson, V.V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing of Environment*, 54, 127–140.
- Hall, D.K. ve Riggs, G.A. (2007). Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes*, 21, 1534-1547.
- Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V.V., DiGirolamo, N.E., Bayr, K.J. (2002). MODIS snow cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1), 181-194.
- Harlin, J. ve Kung, C.S. (1992). Parameter uncertainty and simulation of design floods in Sweden. *Journal of Hydrology*, 137 (1-4), 209-230.
- Harrison, A.R. ve Lucas, R.M. (1989). Multi-spectral classification of snow using NOAA AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (4-5), 907-916.

- Helfrich, S.R., McNamara, D., Ramsay, B.H., Baldwin, T., Kasheta, T. (2007). Enhancements to, and forthcoming developments in the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS). *Hydrological Processes*, 21 (12), 1576-1586.
- Hu, X., Bailey, J.O., Barret, E.C., Kelly, E.J. (1993). Monitoring snow area and depth with integration of remote sensing and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (17), 3529-3268.
- Jasper, K., Gurtz, J. ve Lang, H. (2002). Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 267 (1-2), 40-52.
- Jonsdottir, J.F. ve Porarinnsson, J.S. (2004). Comparison of HBV models, driven with weather station data and with MM5 meteorological model data. *Orkustofnun Hydrological Services*, Report No. OS-2004/017.
- Killingtveit, A. ve Saelthun, N.R. (1995). *Hydrology*. Norway: NIT, Trondheim.
- Klein, A.G., Hall, D.K. ve Riggs, G.A. (1998). Improving snow cover mapping in forests through use of a canopy reflectance model. *Hydrological Processes*, 12, 1723-1744.
- Kunstmann, H. ve Stadler, C. (2005). High resolution distributed atmospheric-hydrological modelling for Alpine catchments. *Journal of Hydrology*, 314 (1-4), 105-124.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201 (1-4), 272-288.
- Maat, W. H. (2015). Simulating discharges and forecasting floods using a conceptual rainfall-runoff model for the Bolivian Mamoré basin. MSc thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands.
- Madsen, H. (2003). Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in Water Resources*, 26 (2), 205-216.

- Madsen, H., Wilson, G. ve Ammentorp, H.C. (2002). Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 261 (1), 48-59.
- Martinec, J. ve Rango, A. (1987). Interpretation and utilization of areal snow cover data from satellites. *Annals of Glaciology*, 9, 166-169.
- Merz, R., Parajka, J. ve Blöschl, G. (2009). Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resources Research*, 45 (9), W09405.
- Nagler, T. ve Rott, H. (1997). The application ERS-1 SAR for snowmelt runoff modeling. M.F. Baumgartner, G.A. Schultz ve A.I. Johnson (Editörler), *Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences* içinde (s. 119-126). Rabat: IAHS Publication.
- Nagler, T., Rott, H., Malcher, P., Müller, F. (2008). Assimilation of meteorological and remote sensing data for snowmelt runoff forecasting. *Remote Sensing of Environment*, 112 (4), 1408-1420.
- Nash, J.E. ve Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282-290.
- Nolin, A.W. (2010). Recent advances in remote sensing of seasonal snow. *Journal of Glaciology*, 56 (200), 1141-1150.
- Parajka, J. ve Blöschl, G. (2008). The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 358 (3-4), 240-258.
- Parajka, J. ve Blöschl, G. (2012). MODIS-based snow cover products: validation, and hydrologic applications. *Multiscale Hydrologic Remote Sensing: Perspectives and Applications*, CRC Press, 185-212.
- Parajka, J., Merz, R. ve Blöschl, G. (2007). Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes*, 21 (4), 435-446.
- Rango, A. (1994). Application of remote sensing methods to hydrology and water resources. *Hydrological Sciences Journal*, 34 (4), 309-320.

- Rango, A. (1996). Spaceborne remote sensing for snow hydrology applications. *Hydrological Sciences Journal*, 41 (4), 477-494.
- Rango, A., Salomonson, V.V. ve Foster, J.L. (1977). Seasonal streamflow estimation in the Himalayan region employing meteorological snowcover observations. *Water Resources Research*, 13 (1), 109-112.
- Riggs, G.A., Hall, D.K. ve Salomonson, V.V. (1994). A snow index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *IEEE IGARS*, 1942-1944.
- Riggs, G.A., Hall, D.K. ve Roman, M.O. (2016). MODIS Snow Products Collection 6 User Guide.
- Robinson, D.A., Dewey, K.F. ve Heim, R.R. (1993). Global snow cover monitoring: an update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74 (9), 1689-1696.
- Rott, H. (1978). Zur Schneekartierung in alpinen Einzugsgebieten aus Satellitenbildern. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie*, 14 (1), 81-93.
- Rott, H., Nagler, T., Glendinning, G., Wright, G., Miller, D., Gauld, J., Caves, R., Ferguson, R., Quegan, S., Turpin, O., Clark, C., Johansson, B., Gyllander, A., Baumgartner, M., Kleindienst, H., Voigt, S., Pirker, O. (2000). Hydrology of Alpine and High Latitude Basins (HYDALP). *Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Mitteilungen*, 4.
- Salomonson, V.V. ve Appel, I. (2004). Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment*, 89 (3), 351-360.
- Salomonson, V.V. ve Appel, I. (2006). Development of the Aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44 (7), 1747-1756.
- Seibert, J. (1997). Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nordic Hydrology*, 28 (4/5), 247-262.
- Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Science*, 4 (2), 215-224.

- Seibert, J. (2005). HBV light version 2, user's manual. *Stockholm University, Department of Physical Geography and Quaternary Geology*.
- Seibert, J. ve Vis, M. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment runoff model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16 (9), 3315-3325.
- Seidel, K., Brush, W. ve Steinmeier, C. (1994). Experiences from real time runoff forecasts by snow cover remote sensing, *IEEE IGARSS*.
- Sieber, A. ve Uhlenbrook, S. (2005). Sensitivity analyses of a distributed catchment model to verify the model structure. *Journal of Hydrology*, 310 (1-4), 216-235.
- Singh, V.P. (1995). Computer models of watershed hydrology. *Water Resources Pub.*, 1130, pp.
- Sleziak, P., Szolgay, J., Hlavcova, K., Parajka, J. (2016). The impact of the variability of precipitation and temperatures on the efficiency of a conceptual rainfall-runoff model. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 24 (4), 1-7.
- Sommer, W. ve Fiel, R. (2009). Snow Pack Analyser for snow water equivalent and liquid water content. *Sommer Mess-Systemtechnik*, Strassenheuser 27, A-6842 Koblach, Austria.
- Sorooshian, S. ve Gupta, V.K. (1995). Model calibration. V.P. Singh (Editör), *Computer models of watershed hydrology* içinde (s. 23-68). Colorado: Water Resources Publication.
- Sucu, S. ve Dinç, T. (2008). Çoruh havzası projeleri. Ankara, İnşaat Mühendisleri Odası, "TMMOB 2.Su politikaları kongresi, Bildiriler kitabı", C. 1, s. 33-38
- Sürer, S. (2015). *The use of multimetric framework in calibrating the HBV model*. Ph.D. Thesis. Ankara: The Graduate School of Natural and Applied Sciences of The Middle East Technical University.
- Şensoy, A. ve Uysal, G. (2012). The value of snow depletion forecasting methods towards operational snowmelt runoff estimation using MODIS and numerical weather prediction data. *Water Resources Management*, 26 (12), 3415-3440.

- Şorman, A.A. (2011). Yukarı Fırat Havzası'nda arazi ölçümleri, uydu teknolojileri, hava tahmin verileri ve hidrolojik modeller kullanılarak kar potansiyelinin dönemsel ve akımların günlük tahmini, Proje No: 108Y161, Eskişehir.
- Şorman, A.A., Şensoy, A., Tekeli, A.E., Şorman, A.Ü., Akyürek, Z. (2009). Modelling and forecasting snowmelt runoff process using the HBV model in the eastern part of Turkey. *Hydrological Processes*, 23 (7), 1031-1040.
- Tekeli, A.E., Akyürek, Z., Şorman, A.A., Şorman, A.Ş., Şorman, A.Ü. (2005). Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing of Environment*, 97 (2), 216-230.
- Udnaes, H.C., Alfnes, E. ve Andreassen, L.M. (2007). Improving runoff modelling using satellite derived snow covered area. *Hydrology Research*, 38 (1), 21-32.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C., Rodhe, A. (1999). Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. *Hydrological Sciences Journal*, 44 (5), 779-797.
- Usul, N. (2013). *Engineering Hydrology*. Ankara: METU Press.
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre and post processing tools. *Environmental Modelling & Software*, 24 (10), 1209-1222.
- Western, A.W. ve Grayson, R.B. (2000). Soil moisture and runoff processes at Tarrawarra. R.B. Grayson, G. Blöschl (Editörler), *Spatial patterns in catchment hydrology-observations and modelling* içinde (s. 209-246). UK: Cambridge University Press.
- Westrick, K.J., Storck, P. ve Mass, C.F. (2002). Description and evaluation of a hydrometeorological forecast system for mountainous watersheds. *Weather and Forecasting*, 17, 250-262.
- Wiesnet, D.R., Ropelewski, C.F., Kukla, G.J., Robinson, D.A. (1987). A discussion of the accuracy of NOAA satellite derived global seasonal snow cover measurements. *IAHS publications*, Vol. 166, 291-304.

- Wriedt, G. ve Rode, M. (2006). Investigation of parameter uncertainty and identifiability of the hydrological model WaSiM-ETH. *Advances in Geosciences*, 9, 145-150.
- Yin, Z., Lei, T., Yan, Q., Chen, Z., Dong, Y. (2013). A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 101-107.
- Yücel, İ., Önen, A., Yılmaz, K.K., Gochis, D.J. (2015). Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite based rainfall. *Journal of Hydrology*, 523, 49-66.
- http-1: www.eea.europa.eu/themes/publications/landcover (Erişim tarihi: 14.05.2017)
- http-2: www Landsat.gsfc.nasa.gov (Erişim tarihi: 11.03.2017)
- http-3: www.earthexplorer.usgs.gov.html (Erişim tarihi: 08.04.2017)
- http-4: www.land.copernicus.eu.html (Erişim tarihi: 18.05.2017)
- http-5: www.wrf-model.org (Erişim tarihi: 30.03.2018)