

**CİLO DAĞI'NDA BUZUL İZLEMESİ İÇİN ÇOK
ZAMANLI BİR DEĞİŞİM ANALİZİ VE HARİTALAMASI
YAKLAŞIMI GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF A MULTI-TEMPORAL CHANGE
DETECTION AND MAPPING APPROACH FOR
GLACIER MONITORING IN CİLO MOUNTAIN**

MUZAFFER ÇELİK

PROF. DR. SULTAN KOCAMAN GÖKÇEOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Eşim ve kızım için...



ÖZET

CİLO DAĞI'NDA BUZUL İZLEMESİ İÇİN ÇOK ZAMANLI BİR DEĞİŞİM ANALİZİ VE HARİTALAMASI YAKLAŞIMI GELİŞTİRİLMESİ

Muzaffer ÇELİK

Yüksek Lisans, Geomatik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU

Mayıs 2024, 66 sayfa

Bu çalışmada Türkiye'nin Hakkari İli'nde yer alan Cilo Dağı'nda bulunan ve geneli Cilo Buzulları olarak adlandırılan buzulların uzaktan algılama yöntemleri kullanılarak tespiti ve zamansal değişimleri incelenmiştir. Tez kapsamında ulusal ve uluslararası literatürde yer alan buzul izleme çalışmalarının yanı sıra Cilo buzulları ile alakalı yapılan çalışmalar incelenmiş ve bölgeye ait eski çalışmalar da göz önünde bulundurularak bir değerlendirme yapılmıştır. İklim değişiklikleri ve küresel ısınmanın etkilerinin artarak gözlemlendiği günümüz şartlarında buzulların erimekte ve hatta yok olmakta olması çevresel izleme ve küresel iklim değişikliği modelleme açısından bu tür yerel çalışmaların yapılmasını gerekli kılmaktadır. Geçmiş yıllarda Cilo ile ilgili bulunabilen en eski veriler ışığında yapılan çalışmalar erimenin büyüklüğü ile ilgili sonuçlar ortaya koymuştur. Bu tez kapsamında, yıllık olarak elde edilen Sentinel-2 uydu görüntüleri ile erimenin belirli bir periyot içerisindeki hızı ve yönü ile ilgili sayısal veriler elde edilmiştir. Bu verilerin elde edilmesi için literatürde en sık kullanılan buzul tespit indekslerinden olan Normalleştirilmiş Fark Kar İndeksi (Normalized Difference Snow Index - NDSI), Normalleştirilmiş Fark Kar ve Buz İndeksi (Normalized Difference Snow and Ice Index - NDSII), Normalleştirilmiş Fark Buzul İndeksi (Normalized Difference Glacier Index - NDGI) ve Normalleştirilmiş Fark Temel Bileşen Kar İndeksi (Normalized Difference Principal Component

Snow Index - NDPCSI) kullanılmış, referans veriler yardımıyla bu indekslerin sağladığı doğruluklar değerlendirilmiştir. Referans veriler Harita Genel M¼d¼rl¼đ¼ (HGM) tarafından sağlanan HGM K¼re uygulaması ¼zerinde sunulan 2019 yılına ait hava ortofotolarından manuel çizim y¼ntemiyle elde edilmiştir. Değerliklik analizi 2017-2023 yılları arası için gerçekleştirilmiş ve sonuçlar meteorolojik veriler ile ilişkilendirilmiştir. Bu alışma ile buzulların sistematik olarak izlenmesi ve değerimlerinin analizi için bulutsuz Sentinel-2 g¼r¼nt¼lerinin kullanımının uygun olduğu, buzul tespiti için en uygun indeksin de NDSII olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cilo Buzulları, NDSI, NDSII, NDGI, NDPCSI, Değerim Analizi, K¼resel Isınma, İklım Değerikliği, Sentinel-2



ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A MULTI-TEMPORAL CHANGE DETECTION AND MAPPING APPROACH FOR GLACIER MONITORING IN CILO MOUNTAIN

Muzaffer ÇELİK

Master of Science, Department of Geomatics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU

May 2024, 66 pages

In this study, optical remote sensing methods were utilized for the detection and analysis of glaciers located on Mount Cilo in the Hakkari province of Turkey, commonly referred to as the Cilo Glaciers. In addition to a review of glacier monitoring studies in the literature, previous works related to the Cilo Glaciers were analyzed. An evaluation was conducted taking into account the findings from previous studies in the region. Given the increasing effects of climate change and global warming, which are causing glaciers to melt and even disappear, it becomes essential to conduct such studies for environmental monitoring and global climate change modeling purposes. Studies conducted based on the oldest available data related to Cilo in previous years have revealed the extent of melting. Within the scope of this thesis, data concerning the speed and direction of melting within specific periods were obtained using annual Sentinel-2 satellite images. Normalized Difference Snow Index (NDSI), Normalized Difference Snow and Ice Index (NDSII), Normalized Difference Glacier Index (NDGI), Normalized Difference Principal Component Snow Index (NDPCSI), which are among the most frequently used glacier detection indices in the literature, were employed to obtain these data. These indices were compared for their accuracy using reference data, which were obtained from aerial orthophotos from the year 2019 presented on the HGM Küre platform of the General Directorate of Mapping (Harita Genel Müdürlüğü - HGM). A change analysis was conducted between the years 2017

and 2023, and the results were related with the meteorological data. This thesis demonstrated that the use of cloud-free Sentinel-2 images can be recommended for systematic monitoring and tracking changes in glaciers by employing the NDSII index.

Keywords: Cilo Glaciers, NDSI, NDSII, NDGI, NDPCSI, Change Detection, Global Warming, Climate Change, Sentinel-2



TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tezin her adımında yanımda olan ve gerçekleŐmesini sağlayan Prof. Dr. Sultan Kocaman Gökçeoğlu'na teşekkür etmek isterim. Her adımda bilgisi ve sonsuz sabrı ile bu tezi yazmamda en büyük etken kendileridir.

Ardından maddi ve manevi hiçbir desteklerini esirgemeyen aileme özellikle annem Nuran elik'e teşekkür ederim. Bu tezin hayata geçmesine benden daha çok sevineceğinizi biliyorum.

Son olarak da sevgili eşim, dostum, yol arkadaŐım Hediye elik'e sonsuz kere teşekkür ederim. Bu tezi hayata geirebilmem ve sonucuna ulaŐabilmem için vermiş olduğun desteği asla unutmayacağım. İyi ki varsın.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Problem Tanımı ve Amaçlar	2
1.2 Tezin Organizasyonu.....	3
1.3 Tezin Katkısı	4
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1 Yersel Buzul İzleme Çalışmaları.....	5
2.2 Uzaktan Algılama Kullanılarak Yapılan Çalışmalar.....	6
2.3 Cilo Buzulları ile İlgili Yapılan Çalışmalar	9
3. ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER	14
3.1 Çalışma Alanı.....	14
3.2 Sentinel-2 Uydu Verileri	16
3.3 Referans Veriler	20
3.4 Meteorolojik Veriler.....	21
4. YÖNTEM.....	27
4.1 İş Akış Şeması.....	27
4.2 NDSI.....	30
4.2 NDSII	31
4.3 NDGI.....	31
4.4 NDPCSI.....	32
4.5 Uygulamada Kullanılan Yazılımlar	33
5. ANALİZ SONUÇLARI	35

5.1 NDSI Uygulaması ve Sonuçları	35
5.2 NDSII Uygulaması ve Sonuçları	41
5.3 NDGI Uygulaması ve Sonuçları	46
5.4 NDPCSI Uygulaması ve Sonuçları	47
5.5 Sonuçların Karşılaştırılması	50
6. TARTIŞMA	55
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	58
7.1 Bulgular	58
7.2 Gelecek Çalışmalar ve Öneriler	59
KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Sentinel-2 uydusuna ait spektral bant aralıkları(Satimagingcorp, 2024).....	17
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan Sentinel-2 görüntülerinin çekim özellikleri.	18
Çizelge 3.3. Çalışma bölgesi çevresinde bulunan meteorolojik istasyonlar.....	22
Çizelge 5.1. NDSI için farklı eşik değerlerinin 2019 referans verisi ile karşılaştırılması.....	38
Çizelge 5.2. NDSI ile elde edilen oluşan buzul alanları.....	39
Çizelge 5.3. NDSII için farklı eşik değerlerinin 2019 referans verisi ile karşılaştırılması.....	42
Çizelge 5.4. NDSII sonucu elde edilen buzul alanları.....	43
Çizelge 6.1. Varol (2017) tarafından elde edilen buzul alanları (km ²).....	56



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Erinç Buzulu'nun 1901 yılına ait görüntüsü (Maunsel, 1901).	10
Şekil 3.1. Çalışma alanının konumu	15
Şekil 3.2. Çalışma alanının yükseklik modeli.	16
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan 2019 yılı Sentinel-2 verisinin Bant 4, Bant 3, Bant 2 kombinasyonu ile oluşturulan renkli görüntüsü..	19
Şekil 3.4. HGM Küre platformu ana ara yüzü.	20
Şekil 3.5. HGM Küre platformunda buzulların görünümü.	21
Şekil 3.6. HGM Küre platformu üzerinden alınmış buzul bölgelerini gösterir 3B harita.....	21
Şekil 3.7. Google Earth üzerinde istasyon konumlarını gösterir harita.	22
Şekil 3.8. Yıllık ortalama yağışlı gün sayısını gösteren grafik..	23
Şekil 3.9. Yıllara göre ortalama aylık toplam yağış miktarları.	24
Şekil 3.10. Yıllara göre toplam güneşlenme süresi.	24
Şekil 3.11. Yıllara göre toplam kar yağışlı günler.	25
Şekil 3.12. Yıllara göre ortalama sıcaklık.....	26
Şekil 4.1. Çalışmanın iş akış şeması	28
Şekil 4.2. İndeks uygulama ve sonuçlarını gösterir iş akış şeması.....	29
Şekil 5.1. 2017 Yılına ait Sentinel-2A uydu görüntüsünün genel kapsama alanı ve uygulama alanını içeren alt alanı (kesilen).....	36
Şekil 5.2. 2019 yılına ait görüntüye NDSI uygulaması sonucu.....	36
Şekil 5.3. 0.4 eşik değeri ile elde edilen iki değerli 2019 NDSI görüntüsü ve hava fotoğraflarından elde edilen referans buzul sınırları (kırmızı poligon). Beyaz renkler buzulları ifade etmektedir.....	37
Şekil 5.4. Bölgede bulunan buzulların genel alanları... ..	38
Şekil 5.5. Buzulların yıllara göre alansal değişimini gösteren grafik.....	39
Şekil 5.6. Erinç Buzulu'nun NDSI sonuçlarına göre alansal değişimi	40
Şekil 5.7. 2019 yılına ait görüntüye NDSII uygulaması (0.4 eşik değer).....	41
Şekil 5.8. HGM Küre üzerinden çizilen Orta Mia Hvara Buzulu'na ait referans veri (kırmızı) ve 2019 yılı Sentinel-2 NDSII görüntüsü (0.4 eşik değer).....	42
Şekil 5.9. NDSII sonuçlarından elde edilen buzul alanlarının yıllara göre alansal değişimi.....	44
Şekil 5.10. Erinç Buzulu'nun NDSII sonuçlarına göre yıllık değişimi.....	45
Şekil 5.11. Erinç Buzulundan alınan bir kesite ait Bant-3 histogram grafiği.....	46

Şekil 5.12. Erinç Buzulundan alınan bir kesite ait Bant-4 histogram grafiği.....	46
Şekil 5.13. 2019 yılına ait Sentinel-2 görüntüsüne temel bileşen analizi yapıldıktan sonra oluşan bileşenler.....	48
Şekil 5.14. 2017 yılına ait NDPCSI uygulanmış ve 0.4 eşik değerine tabi tutulmuş Sentinel-2 görüntüsü.....	49
Şekil 5.15. HGM Küre uygulamasından alınmış Kervan ve Kelyanur Göllerinin 3B perspektif görüntüsü.....	50
Şekil 6.1. Varol (2017) tarafından hazırlanan verilerin tez kapsamında hazırlanan veriler ile birlikte gösterilmesi.....	56



SİMGELER VE KISALTMALAR

NDSI	Normalleştirilmiş Fark Kar İndeksi (Normalized Difference Snow Index)
NDSII	Normalleştirilmiş Fark Kar ve Buz İndeksi (Normalized Difference Snow and Ice Index)
NDPCSI	Normalleştirilmiş Fark Temel Bileşen Kar İndeksi (Normalized Difference Principal Component Snow Index)
NDGI	Normalleştirilmiş Fark Buzul İndeksi (Normalized Difference Glacier Index)
DEM	Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model)
ESA	Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency)
SNAP	Sentinel Application Platform
API	Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface)
OSGeo	Open Source Geospatial Foundation
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
WET	Islaklık Dönüşümü (Wetness Transformation)
MSI	Multi Spectral Instrument
VGT	Bitki Örtüsü (Vegetation)

1. GİRİŞ

Sanayi öncesi dönemden (1850-1900) itibaren ağırlıklı olarak fosil yakıtların kullanımı, Dünya'nın atmosferindeki ısı hapseden gaz seviyesinin artmasına sebebiyet vermiştir. Bu dönemden sonra yapılan araştırmalar Dünya'nın ortalama sıcaklığının 1 santigrat derece arttığını ortaya koymuştur. Sıcaklık artışının hızlanması sonucu bu artış miktarının her on yılda bir 0.2 santigrat derece daha artacağını öngörmektedir. Bu sıcaklık artışları iklim değişikliğine ve günümüzde etkilerini açıkça görebildiğimiz sonuçlara sebebiyet vermektedir (NASA, 2023).

İnsan etkisi ve fosil yakıt kullanımı ile son zamanlarda hızını iyice arttırmış olan küresel ısınmanın etkilerini izlemek, yorumlamak ve etkilerini azaltmak ve hatta etkilerini geri döndürebilmek için düzenli gözlemlerin yapılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu gözlemlerin düşük maliyetli olması, tekrarlanabilir olması ve otomatik olarak yapılabilmesi düzenli değişimlerin izlenebilmesi için önem arz etmektedir.

Yer gözlem uydu sayılarının artması ile çevresel izleme amaçlı veri tedariki konusunda çekilen sıkıntılar büyük oranda ortadan kalkmıştır. Gelişen teknoloji, yüksek çözünürlüklü görüntü üreten uydu sayısının çoğalmasına ve buna bağlı olarak kullanıcıların düşük maliyetli olarak verilere ulaşabilmesine olanak sağlamıştır. Hatta bazı kurumlar bu verileri ücretsiz olarak sağlamaktadır. Görüntülere ve onlardan üretilen diğer ürünlere ulaşım kolaylığı, bu veriler ile yapılacak uygulamaların ve araştırmaların önünü açmıştır.

Farklı dönemlerde farklı şekillerde oluşmuş olsalar da, buzullar buldukları bölge için önem arz ederler. Bölge için kurak yaz günlerinde hem içme hem de tarım için gerekli sulama kaynağını oluşturan buzullar, Dünya üzerindeki bazı bölgelerde halen hayati önem taşımaktadır. İklim değişikliklerinin hız kazandığı, küresel ısınmanın etkilerinin her geçen gün daha fazla hissedildiği ve görüldüğü göz önünde bulundurularak eriyen buzullar için hızlı önlemler alınma gerekliliği doğmuştur.

Bu tezde optik uydu görüntüleri kullanılarak yeryüzünün klimaları olarak adlandırılan buzulların izlenmesi için mevcut yaklaşımlar incelenmiş ve Türkiye'de bulunan Hakkari İli sınırları içerisindeki Cilo Dağında bulunan Cilo Buzulları için kullanılabilirlikleri denetlenmiştir. Bu

buzullarda var ise değişimlerinin belirlenmesi ve bu değişimlere bağlı olarak çıkarımlarda bulunulması amaçlanmıştır. İzleme çalışmaları, Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency – ESA) tarafından fırlatılan (European Space Agency, Sentinel-2, 2024) ve verileri düzenli olarak alınarak Avrupa Birliği Copernicus programı kapsamında ücretsiz olarak paylaşılan Sentinel-2 uydusunun görüntüleri kullanılarak 2017-2023 yılları arası gerçekleştirilmiş ve çeşitli spektral indeksler karşılaştırılarak en yüksek doğruluğu sağlayan indeks belirlenmiştir.

1.1 Problem Tanımı ve Amaçlar

Buzullar günümüze kadar farklı dönemlerde farklı yöntemler kullanılarak izlenmiş ve değişimleri belirlenmiştir. Eski dönemlerde kullanılan yöntemler gelişen teknoloji ile yerini yenilerine bırakmış olsa da, genel izleme yaklaşımları bölgede bulunma ve fiziki olarak ölçüm yapma gerekliliğinden kaynaklı olarak her zaman zor, tehlikeli ve maliyetli olmuştur. Gelişen yer gözlem uydusu teknolojileri sayesinde bölgeye gitme ve fiziki ölçüm yapma ihtiyacı azalmış ve hatta ortadan kalkmış, lakin uygun hassasiyete ait uydusu görüntülerine ulaşımın maliyetli olması sebebi ile konu ile alakalı çok detaylı çalışmalar yapılamamıştır.

Yapılan eski çalışmalara göz atıldığında genel olarak buzulların durumları hakkında gözlemlerin yer aldığı yazılı belgelerin mevcut olduğu görülmektedir. İlerleyen zamanlarda buzul bölgelerinin çekilen fotoğrafları da bulunmaktadır. Daha sonra yersel ölçümlere başlanarak buzulların gerçek alanlarının belirlenmesi sağlanmış ve değişimlerini izlemek için gerekli altlıklar oluşturulmaya başlanmıştır. Bu işlemlerin buzulların bulunduğu bölgelerde zahmetli ve tehlikeli olması araştırmacıları yeni yöntemler aramaya teşvik etmiştir. Gelişen teknoloji ile birlikte uydusu görüntüleri kullanımı yaygınlaşmış ve yüksek çözünürlüklü verilere erişimin kolaylaşması buzul izleme çalışmaları için kullanılabilir kılmıştır. Bu aşamada uydusu görüntüleri kullanılarak yapılan buzul izleme çalışması bir hayli artmıştır.

Küresel ısınmanın etkilerini gözler önüne serebilmek ve gerekli önlemlerin alınması için buzulların izlenmesi çalışmaları önem taşımaktadır. Küresel ısınmanın en büyük göstergesi olan buzulların, sıcaklık değişimine verdiği hızlı tepkiler sebebi ile araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Bu kapsamda tez için bir buzul belirleme ve bu buzul üzerinde araştırmalar

yapma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu sebeple tez kapsamında çalışma alanı olarak Türkiye sınırları içerisinde yer alan en büyük buzullardan olan Cilo Dağı buzullarının son yıllarda yüksek zamansal ve mekansal çözünürlükle izlenmesine yönelik bir çalışma bulunamamış ve bu sebeple tez araştırmasında Cilo Buzulların incelenmesine karar verilmiştir.

Bu nedenle, bu çalışma kapsamında, Cilo Dağındaki buzulların mekansal ve zamansal izlenmesi için yer gözlem verilerine ve uzaktan algılama tekniklerine dayalı bir yaklaşım geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın temel hedefleri şu şekilde özetlenebilir:

- Sentinel-2 optik uydusuna ait görüntülerin, spektral indekslerin buzullar üzerinde kullanımı ile otomatik değişim izleme yaklaşımı önerilmesi amaçlanmıştır.
- Önerilen yöntemler kullanılarak Hakkari İli'nde bulunan Cilo Buzulları için zamansal analizler yapılarak buzulların büyüklüklerinin karşılaştırılması ve hızlarının belirlenmesi, geleceğe yönelik tahminlerde bulunulması amaçlanmıştır.

Bu hedeflere ulaşmak için, bu tezde Sentinel-2 uydu görüntüleri, 10 m konumsal çözünürlük sağlaması ve verilerinin ücretsiz olarak erişime açık olması sebebi ile tercih edilmiştir. Çeşitli kar ve buz izleme indekslerinin performansı yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları referans veri olarak kullanılarak değerlendirilmiş ve en yüksek başarımı sağlayan indeks belirlenerek buzul izleme amaçlı kullanımı önerilmiştir.

1.2 Tezin Organizasyonu

Bu tez aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır:

- Bölüm 1'de problem tanımı, tezin amaçları ve literatüre sağladığı katkılar açıklanmıştır.
- Bölüm 2'de literatür taramasına yer verilmiş olup bu taramalar yersel olarak yapılanlar, uzaktan algılama kullanılarak yapılanlar ve seçilen çalışma alanı ile ilgili yapılan çalışmalar olarak üç alt bölümde incelenmiştir.

- Bölüm 3'te çalışma alanı ile ilgili genel bilgiler yer alırken ayrıca tez kapsamında kullanılan veriler açıklanmıştır.
- Bölüm 4'te tezin amacı doğrultusunda yapılacak işlemlerin iş akış şeması sunulurken aynı zamanda kullanılan yöntemler ve yazılımlar ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir.
- Bölüm 5'te elde edilen sonuçlara yer verilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.
- Bölüm 6'da yöntemler kıyaslanmış ve veriler ışığında çıkarımlar yapılmıştır. Bu çıkarımlar referans verilerle ve önceki çalışmalarla kıyaslanmıştır.
- Bölüm 7'de ise tezin önemli bulguları sunulurken gelecek çalışmalarla ilgili önerilerde bulunulmuştur.

1.3 Tezin Katkısı

Bu tezde elde edilen sonuçlar ve temel katkılar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Sentinel-2 uydusuna ait görüntülerinin buzul izleme çalışmalarında kullanılabilirliği Cilo Dağı buzulları örneğinde belirlenmiştir.
- Kar ve buz gibi yüksek yansımaya özelliği bulunan yüzey örtülerinin tespiti ve bu amaç için kullanılan indekslerin aynı bölgede test edilerek, avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir.
- Referans veriler kullanılarak en doğru sonucu veren indeks belirlenmiş ve bölge için kullanılabilirliği denetlenmiştir.

Bölge üzerinde yıllık periyotlarda alınan verilerin incelenmesi ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sonucunda buzulların değişimleri ortaya konmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Küresel ısınma ve iklim değışikliklerinin sebep-sonuç ilişkisinin ortaya konması açısından buzullar hep araştırma konusu olmuştur. Günümüze kadar yapılan araştırmalar göz önünde bulundurulduğunda, farklı yaklaşımlar geliştirildiği görülmüştür. Bu yaklaşımlar incelendiğinde ise ortaya çıkan sonuç, teknolojinin gelişmesi ile yapılan araştırmalar doğruluğu ve hassasiyeti artırırken aynı zamanda kolaylaşmıştır. İlk araştırmalar genelde gezi notları olarak tutulurken sonrasında bölgeye yapılan keşif gezileri ile yersel ölçümler yapılmıştır. Bu araştırmalar hem zahmetli olmuş, hem de bölgelerin yapısından kaynaklı olarak ulaşım güçlüğünün yanında her daim tehlikeli kabul edilmiştir. Uzaktan algılama yöntemlerinin gelişmesi ve çeşitlenmesi ile bölgeye gidilmeden yapılan çalışmalar, zorlukları ve tehlikeleri azaltmış veya ortadan kaldırmıştır. Bu çalışmaların ilk zamanlarında maliyetleri yüksek olsa da, günümüzde maliyet konusu da sorun olmaktan çıkmıştır. Ücretsiz olarak sağlanan 10 m çözünürlüklü uydu görüntüleri sayesinde buzul izleme çalışmaları yeterli çözünürlükte kolay bir şekilde ve kullanıcı açısından düşük maliyetle gerçekleştirilebilmektedir. Buzul çalışmalarında kullanılan yöntemlerin zamansal gelişimleri göz önünde bulundurularak yapılan literatür taramasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.

2.1 Yersel Buzul İzleme Çalışmaları

Buzullar ile ilgili çalışmalar çok eskilere dayanmaktadır. Bu çalışmalar her zaman teknolojik araç gereçlerle gerçekleşmemiştir. Dünya genelindeki buzullarla ilgili yapılan çalışmaların çoğu araştırmacıların notlarındaki bölge tarifleri ile sınırlı kalmıştır. Zaman ilerledikçe bu çalışmalara bölge buzullarının fotoğrafları eklenmiştir (Ainsworth, 1842). Bu işlem buzul izleme çalışmaları için bir zemin oluşturmuş ve aynı noktadan aynı şartlarda tekrarlanan fotoğraflar çekilerek buzulların durumları ve hızları tespit edilmeye çalışılmıştır. Ancak bu işlem buzulların tamamının görüntülenememesi gibi sorunlar barındırmaktadır. Yersel ölçü aletlerinin kullanımının artması sonucu buzulların çevresinin tekrarlı ölçümleri ile buzul izleme işlemleri başlamıştır. Yersel aletler hassas ölçü sunması nedeniyle büyük bir avantaj sağlasa da, bölgeye ulaşımın yükselti sebebi ile zor olması, fazla iş gücü gerektirmesi, buzul bölgelerinde hava koşullarının zorlayıcı olması ve genel itibari ile yamaçlarda bulunan buzul bölgelerinin

ölçüm esnasında tehlike arz etmesi bu yönteminde kullanımını kısıtlamıştır. Bu ve buna benzer yersel buzul izleme çalışmalarından bazılarında örnekler aşağıdaki şekilde verilebilir.

1911 yılında Dr. W. Hunter Workman ve F. Bullock Workman Himalayalar'ın doğu Karakurum sırasında bulunan bir buzul olan Siachen buzuluna bir keşif gezisi tertip etmişlerdir. Ardından 1912 yılında bölgede bulunan buzulun detaylı haritalandırılması için bir gezi daha tertip etmişlerdir. Bu gezi sırasında ekiplerine birçok yetkili, asker ve haritacı katılmış ve buzulların haritalamasını yapmışlardır. F.Bullock Workman tarafından hazırlanan 'Survey of the Siachen Glacier' adlı çalışmada bölgeye ulaşım ve karşılaşılan zorluklarla alakalı detaylara yer verilmiştir (Workman, 1912).

Everest Dağı'nın Nepal tarafında bulunan Khumbu bölgesinde yapılan yersel çalışmalar da önem arz etmektedir. 1956 yılında İsviçreli coğrafyacı F. Müller bölgede 8 aylık bir keşif ve araştırma gezisi gerçekleştirmiştir (Müller, 1958). Bu çalışma sonucunda bölgeye ait siyah beyaz fotoğraflar elde edilmiştir. Elde edilen bu görüntüler ilerleyen zamanlarda bölge iklim değişikliğinin ve buzullar üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek için altlık oluşturmuştur. Byers (2007) tarafından yapılan çalışmalara altlık teşkil eden bu görüntülerin yardımı ile 1987, 1996, 1997, 2003 ve 2005 yıllarında aynı bölgede altlık görüntülerin çekim koşulları yeniden oluşturularak görüntüleme yapılmış ve buzulların durumları izlenmiştir. Çalışma buzulların değişimleri hakkında sayısal değerler içermese de ilerleyen dönemlerde uzaktan algılama kullanılarak yapılacak çalışmalar için altlık teşkil edebileceği düşünülmüştür (Byers, 2007).

2.2 Uzaktan Algılama Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Gelişen teknolojik imkanlar sayesinde Dünya üzerindeki detayların izlenmesi ve değişimlerin belirlenmesi kolaylaşmıştır. En büyük katkı ise tartışmasız yer gözlem uydularının çoğalması ve verilerine ulaşımın kolaylaşması ile olmuştur. Dünya genelinde oluşan iklim değişiklikleri ve küresel ısınmanın etkilerinin izlenmesi için günümüzde yer gözlem uydularının çok büyük bir payı vardır. Özellikle buzul izleme çalışmalarında yapılan son araştırmalar da uydu görüntüleri kullanılmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda açıklanmaktadır.

En çok araştırma yapılan alanlardan birisi Avrupa'nın en büyük buzullarından olan Alp Dağları'nda yer alan Aletsch Buzuludur. 2019 yılında Jouvett ve Huss tarafından hazırlanan bir yayında 2017 yılında İsviçre Federal Topografya Dairesinden alınan sayısal yükseklik modeli (SYM) verileri ve Sentinel-2 verileri kullanılarak buzullar üzerinde inceleme yapılmıştır (Jouvett ve Huss, 2019). İnceleme sonucunda buzullardaki küçülmeyi belirlemiş, hazırlamış olduğu modeller yardımı ile geleceğe dair çıkarımlarda bulunmuştur. Yazarlar, karbon emisyonunu her sene belirli oranlarda düşürülse bile buzulların eski günlerine dönemeyeceğini, bunun sebebinin ise buzulların hava değişimlerine tepkilerinin yavaş olması ve bölgedeki su miktarındaki azalmalar olarak belirtmişlerdir (Jouvett ve Huss, 2019).

Yine aynı bölgede 2016 yılında Drolon ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışma düşük çözünürlüklü uydu görüntüleri üzerinde normalize kar indeksi farkı (Normalized Difference Snow Index - NDSI) kullanılarak buzulların mevsimsel durumları hakkında çıkarımlar yapmayı hedeflemiştir. 1998-2014 yılları arasında yapılan bu çalışmada buzullardaki erime ve buzul sınır çizgisindeki değişimler belirlenmiş, ayrıca yapılan araştırma sonucunda NDSI verisinin kış aylarında yaz aylarına göre kar örtüsü fazlalığından kaynaklı olarak daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (Drolon vd., 2016).

2017 yılında Racoviteanu tarafından yayınlanan bir çalışmada, Peru'da bulunan Cordillera Blanca Dağları'nda buzul incelemesi yapılmıştır. Araştırmada 1970 yılında çekilen hava fotoğrafları ve 2003 yılına ait SPOT uydu görüntüleri kullanılmış ve buzulların değişimleri hakkında bilgi verilmiştir. Yöntem olarak NDSI kullanılmış ve buzul alanlarında 1970-2003 arasında %24.4 oranında bir kayıp olduğunu belirlenmiştir. Kaybın doğu ve batı yönlerinde çok az olduğu, büyük buzullardan bağımsız olarak bölgeye dağılmış küçük buzulların büyüklerine göre daha fazla alan kaybettiğini, taş, toprak gibi maddelerle karışık buzulların temiz buzullara göre daha az alan kaybına uğradığını belirtmişlerdir (Racoviteanu vd. 2008).

2007 yılında Luzi ve arkadaşları tarafından yapay açıklıklı radar (Synthetic Aperture Radar – SAR) verileri kullanılarak İtalya Alplerinde bulunan Belvedere buzulları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bölgede bulunan yersel SAR alıcısı verileri kullanılarak buzullar üzerinde risk analizi yapılması planlanmıştır. Yapılan çalışmada buzul hareketi konusunda yeterli arazi ölçümlerinin yapılamamasından kaynaklı olarak kıyas yapılamadığı belirtilmiş, ancak SAR ile alınan verilerin diğer uzaktan algılama çalışmaları ile birlikte kullanılabilmesi ve tehlikeli ve özellikle de dik yamaçlarda bulunan buzulların hızlı hareketlerinin izlenmesi konusunda verimli olabileceğini savunmuşlardır (Luzi vd., 2007).

2017 yılında Dematteis ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada Alpelerde bulunan buzullar üzerinde yersel yapay açıklıklı radar (Ground Based Synthetic Aperture Radar – GB-SAR) verileri kullanılarak hareketleri izlenmiştir. Gelişen teknoloji ile birlikte uyduların tekrar izleme sürelerinin birkaç güne kadar düşmüş olmasını buzul izleme çalışmaları için büyük bir avantaj olduğunu belirtmişlerdir. İtalya'nın kuzey batısında yer alan Aosta Vadisi üzerinde çalışmışlardır. Kullanılan veriler 4 Eylül 2015 ile 15 Ekim 2015 arasında çekilmiş 3567 adet işlenmiş görüntüden oluşmaktadır ve çalışmalar yaklaşık 40 gün sürmüştür. Çalışma esnasında bölgede bulunan meteoroloji istasyonundan alınan veriler de ek olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler optik veriler ile aynı bölgede yapılan başka bir çalışma ile karşılaştırılmış ve aradaki fark konusunda tartışma yapılmıştır. Yapılan çalışma hızlı deformasyon ölçümü gerektiren buzul benzeri yapılarda GB-SAR'ın kullanılabilceğini göstermiştir (Dematteis vd., 2017).

2021 yılında Qinghui ve arkadaşları tarafından yapılan bir buzul izleme çalışmasında Sentinel-1 SAR verileri kullanılmıştır (Qinghui vd., 2021). Çalışma Tibet bölgesinde Kongur Tagh üzerinde bulunan 10 adet buzul üzerinde gerçekleştirilmiştir. 2015 ve 2019 yılları arasında elde edilen Sentinel-1 SAR verileri kullanılarak buzul hareketleri izlenmiş ve bölge üzerinde ileriye dönük tehlike analizleri yapılması planlanmıştır. Kullanılan SAR verileri ile bölgedeki buzulların hareketleri hassas bir şekilde izlenmiş ve çıkarımlarda bulunulmuştur. Buzulların akış yönü ve dönemlerine dair verilere ulaşımlar ve verilerin daha kısa periyotlarla ve daha düzenli aralıklarla elde edilmesi halinde buzul hareketlerine dair daha hassas ve gerçek verilere ulaşılabileceğini savunmuşlardır.

Racoviteanu ve arkadaşları tarafından (2008) yapılan bir çalışma ile Himalayalarda bulunan buzullar incelenmiştir. Bu işlem için Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) (NASA, Terra Instruments, 2024) uydu görüntülerini kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda uzaktan algılama metotlarının avantaj ve dezavantajları üzerine yorumlamalarda bulunmuşlardır. Standartlaşmış bir kayaçlarla karışık buzul kütlesi ayırma metodunun olmamasını bir sorun olarak görülmüş, bölgede yeterli yersel ölçüm ve analiz yapılamamış olmasını da bir eksiklik olarak belirtmişlerdir. Çalışma sırasında karşılaştıkları bir problem de erimenin çoğaldığı yaz dönemlerinde bulutsuz ASTER verisine ulaşımın güç olması olarak dile getirmişler. Ayrıca uzaktan algılama kullanılarak yapılan buzul izleme çalışmalarının su kaynaklarının belirlenmesi, buzul bölgelerinin risklerinin öngörülmesi ve buzulların deniz seviyelerine etkilerinin izlenmesi için avantajlarından bahsetmiştir.

Kumar ve arkadaşları (2020) tarafından Himalayaların Bhutan bölgesinde yapılan bir çalışmada Landsat uydu verileri kullanılarak buzul izleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Metot olarak maksimum olasılık kestirimi kullanılmış ve gözetimli sınıflandırmaya tabi tutulmuştur. Landsat verileri ile buzul izlemesi gerçekleştirilebildiği fakat daha yüksek çözünürlüklü görüntüler ile daha sağlıklı verilere ulaşabileceklerini belirtmişlerdir. Buzulların küresel ısınma ve iklim değişiklikleri sebebi ile son 40 yılda azaldığı sonucuna varmışlardır. Bu azalmanın bölge halkı ve yerleşim yerleri için sorun teşkil edebileceği çıkarımında bulunmuşlardır. Gelecek için buzul değişimlerinin izlenmesi gerektiğini, geleceğe dair çıkarımlarda bulunulması gerektiğini ve buzullar için hassas bölgelerin belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

2.3 Cilo Buzulları ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Bölge ile alakalı bilgilere ulaşılabilen ilk kaynaklar 1842 yılında Ainsworth tarafından yayınlanan “Travels and researches in Asia Minor, Mesopotamia, Chaldea, and Armenia” isimli seyahatnamede bulunmaktadır. Bu eserde yazar, Türkiye ve Orta Doğu’ya yaptığı seyahatleri anlatırken Güneydoğu Toroslarındaki buzullara değinmiş ve Cilo Dağı Buzullarından bahsetmiştir. (Ainsworth, 1842).

1901 yılında Maunsel Cilo Dağı ve Buzullarından bahsetmiş, bölgenin haritasını çizmiştir. Ayrıca Suppa Durek (Erinç) Buzulunun fotoğrafını çekmiştir (Maunsel, 1901). Bu çalışma, Cilo Buzulları ile ilgili çekilen ilk fotoğraf olması nedeni ile önem arz etmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Erineç Buzulu'nun 1901 yılına ait görüntüsü (Maunsel, 1901).

Cilo Buzulları'na 1931 yılında ilk tırmanışı yapan Sperlich ve Krenek buzulların tanınması konusunda öncü olmuştur. Ardından Berlin Üniversitesi'nden Bobek ve ekibi ikinci tırmanışı 1937 yılında 1:50,000 ölçekli tarama ve 1:200,000 ölçekli jeolojik haritalama amacı ile yapmıştır. Böylece bu buzullar hakkında ilk çalışmalar yapılmış, aktif buzullar bu dönemde tespit edilmiştir. En düşük rakımların Erineç buzulu için 2600 m ve Orta Mia Hvara Buzulu için 2550 m olduğu belirlenmiştir. Çalışma sahasının Pleistosen buzullaşmasına maruz kaldığına yer vermiştir. Ayrıca Bobek tarafından Cilo Dağları buzullarının fotoğrafları ve haritaları sunulmuştur (Sarıkaya, 2011).

Ardından 1945 yılında Türkiye Dağcılık Federasyonu'nun düzenlediği bir organizasyonla Asım Kurt liderliğinde Muvaffak Uyanık, Şinasi Barutçu, Reşat İzbrak, Doktor Şaban Örnektekin, Mevlüt Göksan, ve ayrıca yerel rehber (İsmail Yüzgeç) ve dört jandarma eri katırlarla Cilo Dağı'nın en yüksek tepesine çıkmak için Hakkari'ye gitmiştir. Ancak zirveye ulaşamamışlar ve ancak 130 metre mesafede Türk Bayrağı'nı dikmeyi başarmışlardır (Türkunal, 1951).

Reşat İzbrak tarafından 1951 yılında hazırlanan “Cilo ve Nemrut Dağlarıyla Hakkâri ve Van Gölü Çevresinde Coğrafya Araştırmaları” adlı çalışmada, 1945 yılında arazi çalışmaları boyunca gözlemlenen çeşitli incelemeler aktarılmıştır (İzbrak, 1951). Cilo Dağı’nda farklı boyutlarda 10-15 buzulun bulunduğu, bunlardan bazılarının eninin yüzlerce metreyi bulduğu, kalınlıkların ise birçok konumda 10-15 m, bazılarında ise 40 ila 50 m olduğu belirlenmiştir (İzbrak, 1951).

Coğrafyacı akademisyen Sırrı Erinç bölge ile alakalı birçok çalışma gerçekleştirmiştir. Ayrıca bölgede bulunan bir adet buzula da ismini vermiştir (Erinç, 1953). 1952 yılında yayınlamış olduğu “Glacial Evidence of Climatic Variations in Turkey” adlı çalışmasında Türkiye’de bulunan 3 buzulu değerlendirmiştir. Bunlar Erciyes buzulları, Pontid Dağı buzulları ve Cilo buzullarıdır. Bu çalışmada Cilo buzulları kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş, önceki çalışmalar ile kıyaslama yapılarak değişimleri irdelemiştir. Mia Hvara ve Erinç (Suppa Durak) buzulların son yüz yılda üçte birini kaybettiğini belirlemiştir (Erinç, 1952a). Yine aynı yılda yayınlamış olduğu “The Present Glaciation in Turkey” adlı çalışmada, Türkiye’nin 1952 yılı güncel buzullarının envanterini çıkartmış ve güncel buzulların 35° Doğu boylamında ve daha doğusunda kaldığını vurgulamıştır. Ayrıca sürekliliği olan kar çizgilerini tespit etmiştir. Daimi kar çizgisi Toros bölgesinde 3400 - 3500 m, Erciyes Dağı’nda 3500 m, Suphan Dağı’nda 3700 m ve Ağrı Dağı’nda 4000 m olarak belirlenmiştir. Cilo Dağı’nda daimi kar çizgisi 3500 m olmakla birlikte yerelde 3000-3500 m arasında değişmektedir. Cilo Dağı buzul dili ise 2750 metreye kadar inmektedir (Erinç, 1952b). Erinç, 1948 yılında Van’dan Cilo Dağları’na kadar beşeri, iktisadi, topoğrafik, jeomorfolojik ve jeolojik gözlem ve ölçümler yaparak “Van’dan Cilo Dağları’na” adlı eserinde sunmuştur (Erinç, 1953).

Wright tarafından 1962 yılında yayınlanan çalışmada Cilo Dağlarında meydana gelen Pleistosen buzullaşmalarıyla ilgili bilgilere yer verilmiştir. Pleistosen dönemine dair kar sınırları belirlenmiştir (Wright, 1962).

Kurter ve Sungur (1980) Türkiye’deki buzullardan bahsetmiş, bu buzulları üç bölüme ayırmışlardır. Bu bölümlerden ilki Doğu Karadeniz kıyısı boyunca uzanan dağlarda, ikincisi Toros Dağları’nda ve son olarak da birbirinden bağımsız olan volkanik dağlardır. Toros Dağları bölümünde ele alınan Cilo Dağları’na ilişkin on beşten fazla vadi ve dağ buzulunun yer aldığını belirtmişlerdir (Kurter ve Sungur, 1980). 1988 yılında Kurter “Glaciers of Turkey” adlı

çalışmasını yayınlamış ve Türkiye buzullarını yine 3 bölümde inceleyerek toplam buzul alanını 22.9 km² olarak tespit etmiştir (Kurter, 1988).

Yavaşlı ve Ölgen (2008) 1976-2006 yılları arasına ait Landsat (The U.S. Geological Survey, Landsat Missions, 2024) ve Quickbird-2 (The European Space Agency, Quickbird-2, 2024) uydu görüntülerini kullanarak Cilo üzerindeki buzulların 30 yıllık değişimlerini incelemiş ve bu süre zarfında buzulların yarısının eridiği sonucuna varmıştır. Bu değişimin buzul kütleleri ve iklim değişikliği arasındaki bağına değinmişlerdir (Yavaşlı ve Ölgen, 2008). Yavaşlı (2009) “Türkiye Buzullarındaki Değişikliklerinin Uzaktan Algılama ile Belirlenmesi” adlı tezde 1976-2008 arası Landsat verileri kullanılarak buzul değişimleri incelemiştir. Cilo buzulları ile ilgili 31 yıllık zaman diliminde yine buzulların yarısının eridiği sonucuna varmıştır (Yavaşlı, 2009).

Sarıkaya (2011) tarafından hazırlanan “Türkiye’nin Güncel Buzulları” adlı kitapta, Türkiye’nin güncel buzullarını yine Güneydoğu Toroslar, Doğu Karadeniz dağları ve Anadolu Platosuna dağılmış halde yüksek dağlar ve sönmüş volkanlar olarak üç grup olarak ele alınmıştır. ASTER ve Google Earth (Google, About Google, 2024) programlarını kullanarak 2002-2009 yılları arasında alınan görüntüleri incelemiş ve güncel buzulların tespitini yapmıştır. Tespitleri sonucunda Türkiye’de bir adet takke buzulu 50 adet dağ buzulu ve 55 adet kaya buzulu olduğunu belirtmiştir. Cilo Dağı’nda 3.48 km² alana sahip farklı tiplerde 10 adet buzul olduğunu, bunların çoğunlukla doğu ve kuzeydeki dik yamaçlarda, zirveye yakın sirklerin içinde bulunduğunu belirlemiştir (Sarıkaya, 2011). Çiner ve Zreda (2011) geçmiş yıllarda bölgeyle ilgili yapılan çalışmaları baz alarak buzulların yaşları ve oluşum özellikleri ile bölgenin karakteristik özellikleri ile alakalı çıkarımlarda bulunmuştur.

2011 yılında gerçekleştirilen Türk Mühendis ve Mimarlar Odası Birliği (TMMOB) Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Kongresi’nde Bahadır ve Dikbaş tarafından sunulan bildiriye Türkiye’deki buzulların 1990-2000 yılları arasındaki değişimleri incelenmiş, uydu görüntüleri ve CBS kullanılarak alan değişimlerinin sayısal olarak değerlerine yer verilmiştir. Sonuçlar, iklim değişiklikleri ve küresel ısınmanın etkileri de göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler ve geçmiş çalışmalar göz önünde bulundurularak, buzullardaki değişimin 1800 - 1850 yılları arasında başladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Şatır (2016), Landsat-8 ve Rasat (TÜBİTAK Uzay, RASAT, 2024) görüntülerini kullanarak Cilo buzullarını incelemiştir. Farklı zamanlarda alınmış görüntülere Normalized Difference Snow Index (NDSI), Normalized Difference Snow and Ice Index (NDSII), Normalized

Difference Principal Component Snow Index (NDPCSI) ve Wetness Transformation (WET) indekslerini uygulamış ve sonuçları değerlendirmiştir. Bu çalışmada genel olarak indekslerin doğruluk ve hassasiyetine odaklanılmamış olup, buzullardaki erimeye de dikkat çekilmiştir. İndeks sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. NDPCSI indeksinin bölge için sonuç vermediğini belirtmiştir. WET indeksinin diğer indekslere göre daha iyi sonuç verdiği ve genel olarak NDSI ve NDSII gibi kullanılabileceğini savunmuştur (Şatır, 2016).

Varol (2017), hazırlamış olduğu yüksek lisans tezinde Cilo Buzulları ile ilgili çalışmalara yer vermiştir. Geçmişte yapılan çalışmaların derlemelerini yaparak buzullardaki değişimleri incelemiştir. Çalışma her ne kadar düzenli periyotlar ile yapılmasa da buzullardaki değişimlerin yönü ve büyüklüğü ile ilgili sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Tez kapsamında NDSI, NDSII, NDGI ve NDPCSI ile ilgili bilgilere yer vermiş lakin kullanımlarına dair detay belirtmemiştir (Varol, 2017). Tez sonucunda Cilo Buzulları ile ilgili verdiği alan değişimleri güzel bir altlık teşkil etmekte olup bu tez kapsamında kıyaslamalar için kullanılmıştır.

3. ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER

Tezin bu bölümünde, çalışma alanına ait özellikler açıklanmış, kullanılan uydu verileri ve referans veriler sunulmuş ve ayrıca bölgeye ait meteorolojik veriler aktarılmıştır.

3.1 Çalışma Alanı

Irak - Türkiye sınırının yaklaşık 20 km kuzeyinde yer alan buzulların bulunduğu bölge (37.49° K, 44.00° D), Cilo veya Hakkari Dağları olarak isimlendirilmektedir (Şekil 3.1). Hakkari Merkez ilçesi ile Yüksekova ilçesi arasında kalan bu bölge Türkiye'nin en yüksek ikinci zirvesi olan Uludoruk (Reşko) Tepesi'ne ev sahipliği yapmaktadır. Zirve yüksekliği 4135 metredir. Merhum Sırrı Erinç tarafından yapılan çalışmada bilge ortalama daimi kar sınırının yaklaşık 3600 m olduğu belirtilmiştir (Erinç, 1952). Bölgede bulunan buzullar genellikle dağın doğuya veya kuzeye bakan dik yamaçlarında bulunmaktadır (Varol, 2017). Erinç Buzulu, Mia Hvara Buzulları ve Gelyaşın Buzulu bölgede bulunan büyük buzul kütlelerinin başında gelmektedir.

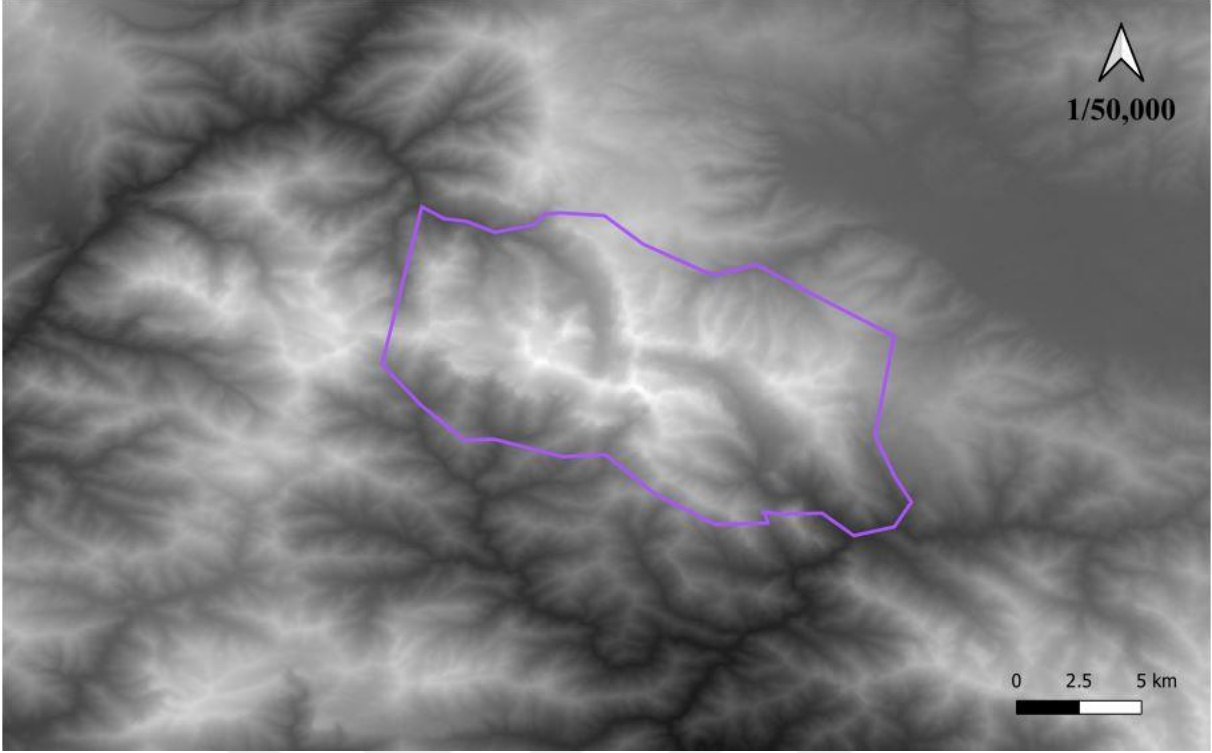
En yüksek noktası 3016 m olan Gelyaşın Buzulu, Uludoruk zirvesinin doğu yamacında bulunur ve yaklaşık 2.1 km uzunluktadır. En yüksek noktası 3354 m olan Erinç Buzulu ise Uludoruk zirvesinin kuzey batısı tarafındadır ve yaklaşık 1.5 km bir uzunluktadır. Mia Hvara Buzulları ise birbirinden üç sırtla ayrılmış üç sirk içindedir ve yerlerine göre Batı, Orta ve Doğu Mia Hvara Buzulları olarak isimlendirilmiştirler (Varol, 2017). Bölgede diğer buzullara göre küçük sayılabilecek 5 adet daha buzul gözlenmiştir. Alansal olarak 0.2 km²'den daha küçüklerdir. Çalışma alanının yükseklik modeli Şekil 3.2'de sunulmuştur.

Cilo Dağı'nda bulunan buzullar ilk olarak Ainsworth (1842) tarafından gözlemlenmiştir. Bu incelemeler sadece seyahat notu olarak kaleme alınmış bu sebeple detay içermemektedir. Maunsell (1901), hazırlanmış olduğu bir çalışmada Erinç Buzulu'nu fotoğraflamıştır ve bu fotoğraf Türkiye buzullarına ait bilinen ilk fotoğraftır. Fotoğraf incelendiğinde, buzulun dil bölgesinin günümüz verileri ile karşılaştırıldığında daha kalın ve geniş olduğu anlaşılmaktadır.

Bölgede ilerleyen yıllarda yapılan çalışmalar ile buzulun eriyerek iki parçaya ayrıldığı Erinc (1952) tarafından belirtilmiştir. 1948 yılında, merhum Sırrı Erinc, bölgeyi incelemiş ve Erinc Buzulu'nun ve Orta Uludoruk Buzulu'nun gerilediğini rapor ederek, iklim değişikliğinin bu buzulların değişiminde büyük bir rol oynadığını belirtmiştir (Sarıkaya, 2011).



Şekil 3.1. Çalışma alanının konumu (merkez enlem: 37.50000, boylam: 43.98438).



Şekil 3.2. Çalışma alanının yükseklik modeli (merkez enlem: 37.50000, boylam: 43.98438, minimum yükseklik: 3130 metre, maksimum yükseklik: 4135 metre).

3.2 Sentinel-2 Uydu Verileri

Bu tezde, Cilo Buzullarındaki değişimlerin yüksek çözünürlükle (10 m) ve zaman serisi olarak izlenebilmesi için Sentinel-2 uydu görüntülerinin uygun olacağı değerlendirilmiştir. ESA tarafından fırlatılmış olan Sentinel uyduları, sentetik açıklı radar (SAR), yüksek çözünürlüklü optik ve hava tahminleri ve çevresel izleme amaçlı düşük çözünürlüklü uydu takımlarından oluşmaktadır. Bunlardan düzenli olarak optik görüntü sağlayan Sentinel-2 uyduları, 5 günde bir düzenli veri sağlamaktadır. Sentinel-2A 23 Haziran 2015, Sentinel-2B ise Mart 2017 yılında Fransız Guyanası'ndan Vega roketi ile fırlatılmış ve yörüngeye yerleştirilmiştir (European Space Agency, Sentinel-2, 2024). Birbirlerinin eşi olan bu uydular aynı yörüngeye yerleştirilmiştir. Aralarında 180° olan uydular bu şekilde yerleştirilerek tekrar çekim süresini 5 gün gibi kısa bir süreye düşürmüştür ve ortalama yükseklikleri 768 km'dir. İkiz uyduların her biri yaklaşık olarak 1.2 ton ağırlığındadır. Yaklaşık ömürleri 3 aylık yörünge kontrol aşaması da dahil 7.25 yıl olarak öngörülmektedir. Batarya ve itici motorları yörüngeden çıkarma

manevraları dahil 12 yıllık bir operasyonu karşılayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Uydu konumları çift frekanslı Global Navigation Satellite System (GNSS) alıcıları tarafından ölçülmektedir. Yörüngesel konum hassasiyeti ise uydu üzerinde bulunan iticiler sayesinde sağlanmaktadır. (European Space Agency, Sentinel-2, 2024).

Sentinel-2 uydusu, üzerinde farklı örnekleme aralıklarına sahip 13 alıcısı olan bir optik görüntüleme algılayıcısı taşır. Multi Spectral Instrument (MSI) Dünya yüzeyinden yansıyan güneş ışınlarını toplayarak pasif olarak çalışır. Uydu yörünge üzerinde ilerledikçe yeni veriler toplar. Gelen ışınlar bir ışın ayırıcı tarafından ikiye ayrılır ve iki ayrı odak üzerine düşürülür. Biri görünür ve yakın kızılötesi (VNIR) bantları diğeri ise kısa dalga kızılötesi (SWIR) bantlarıdır. 13 bant görüntü üreten uydunun 4 bandı 10 m, 6 bandı 20 m, 3 bandı ise 60 m konumsal çözünürlüğe sahiptir (Çizelge 3.1). Görüş alanı (FOV) 290 km'dir. Uyduya ait bantların spektral değerlerini Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Sentinel-2 Bantları	Dalga Boyu (Central Wavelength) (µm)	Çözünürlük (Resolution) (m)
Bant 1 - Kıyı Aerosol (Coastal Aerosol)	0.443	60
Bant 2 - Mavi (Blue)	0.490	10
Bant 3 - Yeşil (Green)	0.560	10
Bant 4 - Kırmızı (Red)	0.665	10
Bant 5 - Bitki Örtüsü Kırmızı (Vegetation Red Edge)	0.705	20
Bant 6 - Bitki Örtüsü Kırmızı (Vegetation Red Edge)	0.740	20
Bant 7 - Bitki Örtüsü Kırmızı (Vegetation Red Edge)	0.783	20
Bant 8 - Yakın Kızıl Ötesi (NIR)	0.842	10
Bant 8A - Bitki Örtüsü Kırmızı (Vegetation Red Edge)	0.865	20
Bant 9 - Su Buharı (Water Vapour)	0.945	60
Bant 10 - Kısa Dalga Kızıl Ötesi İ(SWIR) (Cirrus)	1.375	60
Bant 11 - Kısa Dalga Kızıl Ötesi (SWIR)	1.610	20
Bant 12 - Kısa Dalga Kızıl Ötesi (SWIR)	2.190	20

Çizelge 3.1. Sentinel-2 uydusuna ait spektral bant aralıkları (Satimagingcorp, 2024).

Bu çalışmada, 2017-2023 yılları arasında alınan Sentinel-2 görüntüleri kullanılmıştır. Bölgeye ait görüntülerin kontrolü aşamasında, indirilebilir durumdaki ilk görüntü tarihinin 2016 yılı Ekim ayına ait olduğu görülmüş bu sebeple başlangıç yılı 2017 olarak belirlenmiştir. Görüntülerin çekim tarihi ve saati, çekim açıları gibi özellikleri Çizelge 3.2’de sunulmuştur. Referans olarak aynı alanın 2019 yılının Ağustos ayında çekilmiş hava fotoğrafı bulunmaktadır. Bu nedenle tüm görüntüler, sonuçların mevsimsel değişikliklerden en az derecede etkilenmesini sağlamak için her yılın yine olabildiğince en yakın Ağustos gününden alınmıştır. Şekil 3.3’te çalışmada kullanılan 2019 yılı Sentinel-2 verisinin Bant 4, Bant 3, Bant 2 kombinasyonu ile oluşturulan renkli görüntüsü verilmektedir.

Yıl	Uydu	Tarih	Saat	Yörünge Numarası	Yörünge Yönü
2017	S2A	30.08.2017	07:46:11	135	Alçalan
2018	S2A	25.08.2018	07:46:11	135	Alçalan
2019	S2A	20.08.2019	07:46:11	135	Alçalan
2020	S2A	29.08.2020	07:46:19	135	Alçalan
2021	S2A	29.08.2021	07:46:11	135	Alçalan
2022	S2A	24.08.2022	07:46:21	135	Alçalan
2023	S2B	14.08.2023	07:46:19	135	Alçalan

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan Sentinel-2 görüntülerinin çekim özellikleri.

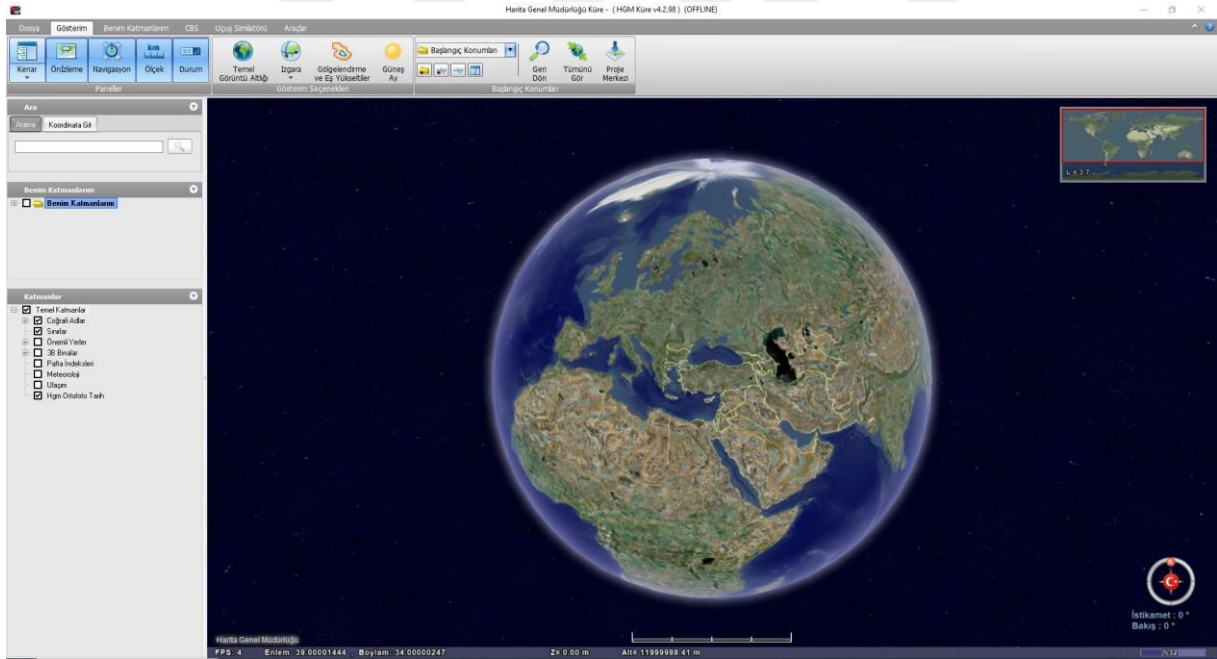


Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan 2019 yılı Sentinel-2 verisinin Bant 4, Bant 3, Bant 2 kombinasyonu ile oluşturulan renkli görüntüsü.

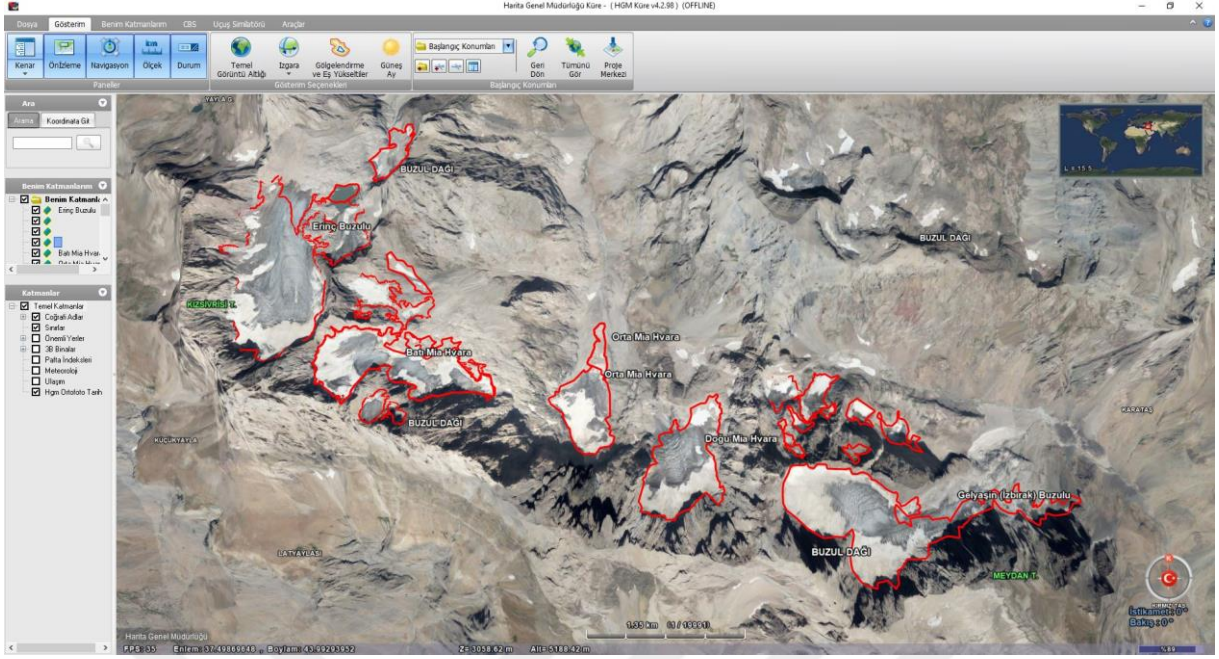
Tez için kullanılan Sentinel-2 verileri 2A işleme seviyesine sahip görüntülerden seçilmiştir. 2A seviyesi Sentinel-2 verileri için en yüksek düzeltme işlemine tabi tutulmuş görüntüler olmasının yanında daha düşük düzeltme işlemine sahip görüntülerin bazıları kullanıcılar ile paylaşılmaktadır. Seviye 0'da veriler temel analiz, bulut maskesi oluşturulması ve kısa dalga kızılötesi piksel değerlerinin yeniden düzenlenmesi gibi işlemlerine tabi tutulmaktadır. Seviye 1 görüntüler 3 adımda işlenmektedir. Bu adımlarda radyometrik düzeltmeler, geometrik görüntüleme modelinin iyileştirilmesi, yeniden örnekleme, yansıma değeri düzeltmeleri, görüntü ön izlemesi ve maske oluşturulması, sahne sınıflandırmaları ve atmosferik düzeltmeler yapılmaktadır. 2A seviyesi tüm bu işlemleri bünyesinde barındıran seviyedir (Sentiwiki, 2024). Tez kapsamında bu düzeltme seviyesine sahip görüntüler kullanılmıştır. Tüm düzeltmelerin yapılmış olması görüntüler üzerinde herhangi bir işlem yapmadan kullanılmasına olanak sağlamıştır.

3.3 Referans Veriler

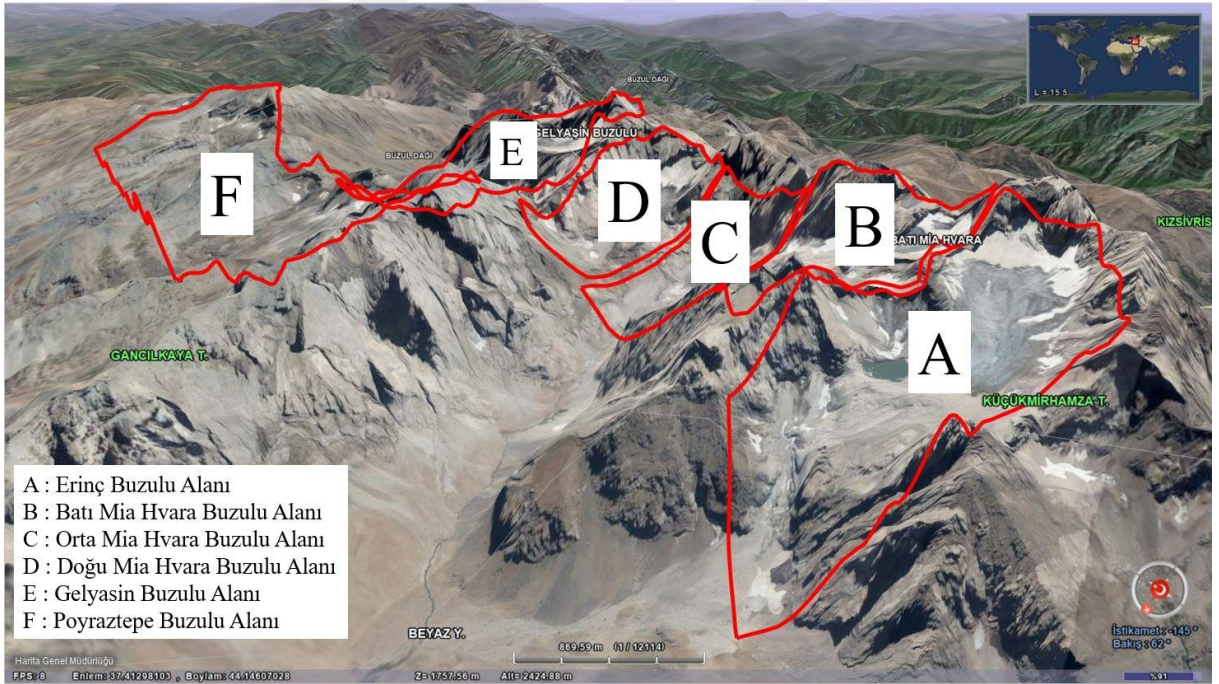
Tez kapsamında kullanılan indekslerin değerlemesi ve kontrolü açısından referans veriler HGM Küre platformu üzerinden alınmıştır. HGM Küre üzerinde çalışma alanına ait bölgede bulunan görüntüsü, yüksek znrlğe sahip olması nedeniyle buzul alanlarının rahat bir şekilde çizilmesine ve ayırt edilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca referans görüntülerin çekim tarihi HGM Küre üzerinde 23.08.2019 olarak belirtilmiştir. Bu nedenle 2019 yılına ait Sentinel-2 uydu grntmzn 20.08.2019 tarihinde alınmıştır. Aralarında sadece 3 günlük bir srenin bulunması referans olarak HGM Küre üzerinden yapılan sayısallaştırmaların kullanılmasına olanak sağlamıştır. HGM Küre üzerinden açılan çalışma bölgesi üzerinde, uygulama üzerinde bulunan Benim Katmanlarım-Kapalı Alan Oluştur adımları izlenerek buzullar kapalı alan oluşturacak şekilde çizilmiş kaydedilmiştir. HGM Küre platformunun ara yüzü şekil 3.4'te gösterilmiştir. şekil 3.5'te ise referans verilerin vektör çizimleri yine platform üzerinde verilmiştir. şekil 3.6'da ise bölge buzullarının 3 boyutlu haritası HGM Küre platformu üzerinden alınan bir görüntü ile verilmiştir.



şekil 3.4. HGM Küre platformu ana ara yüzü.



Şekil 3.5. HGM Küre platformunda buzulların görünümü.

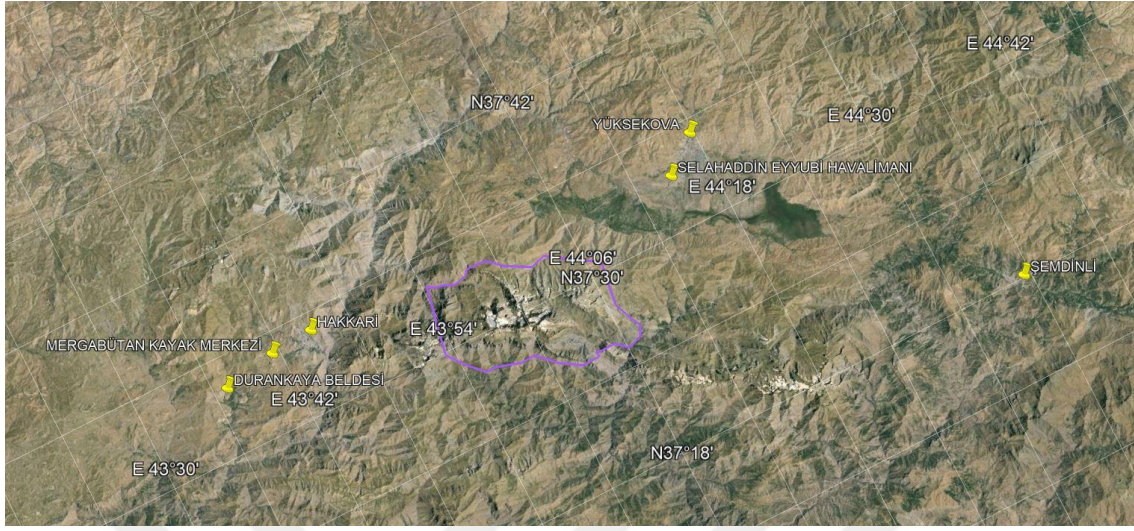


Şekil 3.6. HGM Küre platformu üzerinden alınmış buzul bölgelerini gösterir 3 boyutlu harita.

3.4 Meteorolojik Veriler

Bölgeye ait iklim verileri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na bağlı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Meteorolojik Veri Bilgi Sunum ve Satış Sistemi (MEVBİS) üzerinden sunulan birçok parametre arasından seçilmiş ve talep edilerek alınmıştır. MEVBİS'e göre

Hakkari ilinde 7 istasyon bulunmaktadır. Bu istasyonların konumları Şekil 3.7’de ve çalışma alanına yaklaşık uzaklıkları Çizelge 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.7. Google Earth üzerinde istasyon konumlarını gösterir harita.

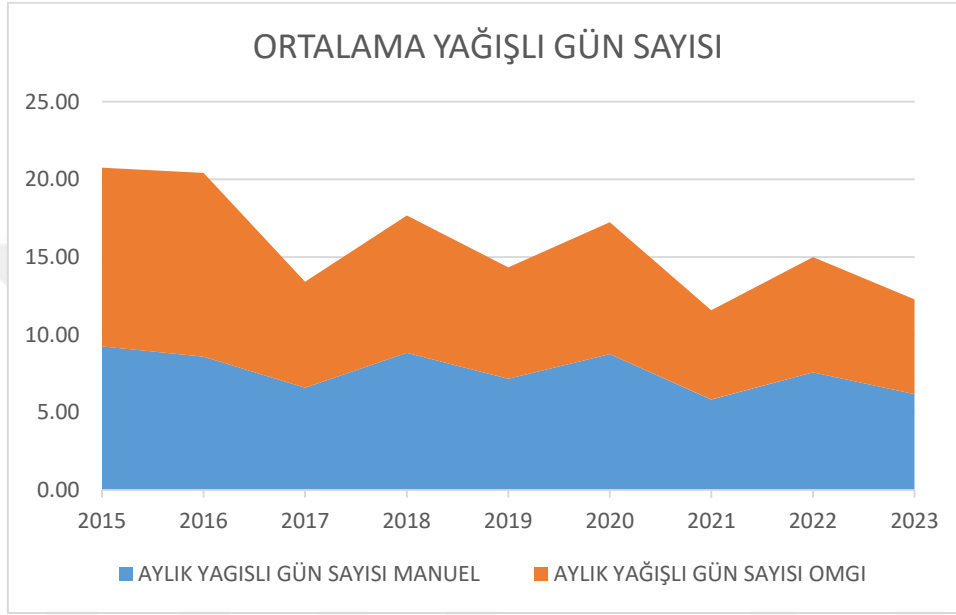
Sıra	İstasyon İsmi	İstasyon No	Çalışma Alanına Uzaklığı
1	Hakkari	17285	25 km
2	Yüksekova	17920	27 km
3	Şemdinli	18234	55 km
4	Hakkari Yüksekova Selahaddin Eyyubi Havalimanı	17815	22 km
5	Hakkari/Durankaya Beldesi	18771	36 km
6	Hakkari Mergabütan Kayak Merkezi	20513	30 km
7	Hakkari Kayak Merkezi	19909	30 km

Çizelge 3.3. Çalışma bölgesi çevresinde bulunan meteorolojik istasyonlar.

Çalışma alanına yakınlıkları sebebi ile Hakkari (İstasyon No: 17285) ve Hakkari Yüksekova Selahaddin Eyyubi Havalimanı (İstasyon No: 17815) istasyonlarından alınan meteorolojik parametreler bu çalışmada kullanılmıştır. Aylık kar yağışlı günler sayısı, aylık ortalama sıcaklık, aylık yağışlı gün sayısı, aylık toplam yağış (manuel), aylık toplam yağış (OMGİ) ve aylık toplam güneşlenme süresi olacak şekilde toplam 7 parametre seçilerek analiz edilmiştir. Alınan meteorolojik veriler 01.01.2015 - 13.11.2023 tarihleri arasında kapsamaktadır.

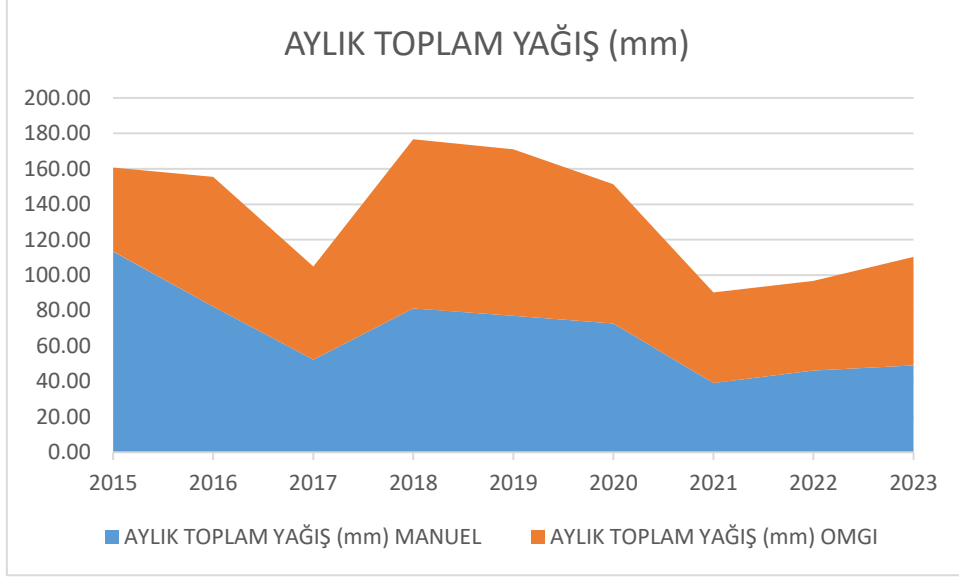
Verilerin temininden sonra inceleme işlemleri yapılmış ve Hakkari Yüksekova Selahaddin Eyyubi Havalimanı istasyonundan alınan verilerde sadece ortalama sıcaklık verilerinin olduğu,

bu verilerin de her yıl ve her ay için olmadığı gözlenmiştir. Bu sebeple sadece 17285 numaralı Hakkari istasyonundan alınan veriler dikkate alınmıştır. Veriler 2015-2023 yılları arası aylık periyotlarla incelenmiş, yıllık ortalamalar analiz edilmiş ve Şekil 3.8’de grafik olarak gösterilmiştir. 2015 – 2017 yılları arası ortalama yağışta azalma görülürken 2018 yılında artış göstermiş, 2019 yılında düşüş göstermiş olsa bile 2017 yılı kadar az olmamıştır. Grafikten de anlaşılacağı üzere 2015 -2023 yılları arası ortalama yağışta bir düzen gözlenmemiştir.



Şekil 3.8. Yıllık ortalama yağışlı gün sayısını gösteren grafik.

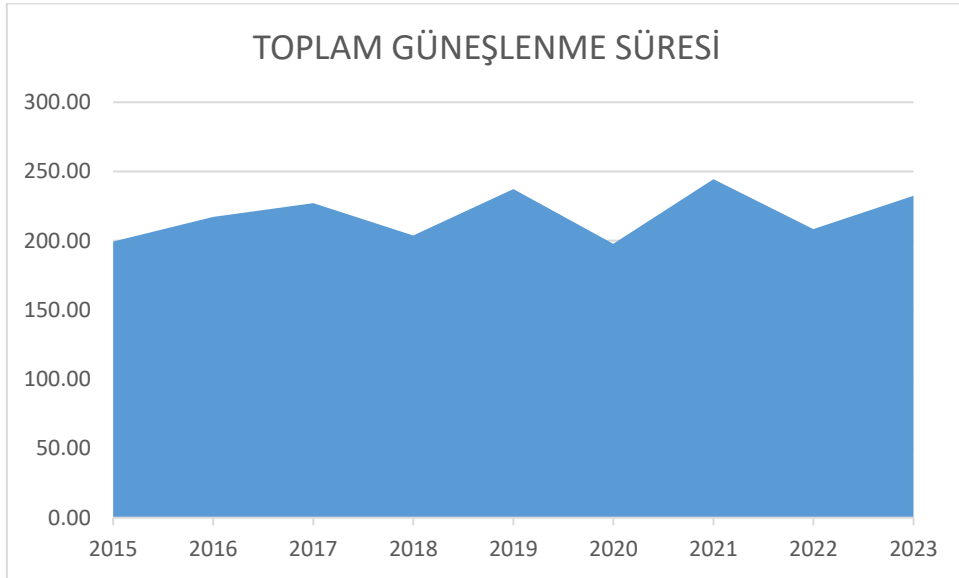
Yıllara göre ortalama aylık toplam yağış miktarını gösteren grafik Şekil 3.9’da verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere 2015 – 2017 yılları arası düşüş gösteren toplam yağış miktarı 2018 yılı itibariyle ciddi bir artış göstermiş ve 2020 yılına kadar hafif azalmalar ile birlikte devam etmiştir.



Şekil 3.9. Yıllara göre ortalama aylık toplam yağış miktarları.

Şekil 3.8 ve 3.9’de de görülebileceği üzere 2015 yılına kıyasla diğer yıllarda az da olsa yağışlı gün sayısı azalma eğilimindedir. Ancak 2017’den sonra ortalama yağış miktarında artış gözlenmiştir.

Meteorolojiden alınan bir diğer veri ise bölgesel toplam güneşlenme süresidir. Yıllara göre toplam güneşlenme süresini gösteren grafik Şekil 3.10’da verilmiş olup, genele bakıldığında güneşlenme sürelerinin yıllık olarak çok farklılık göstermediği görülmektedir.



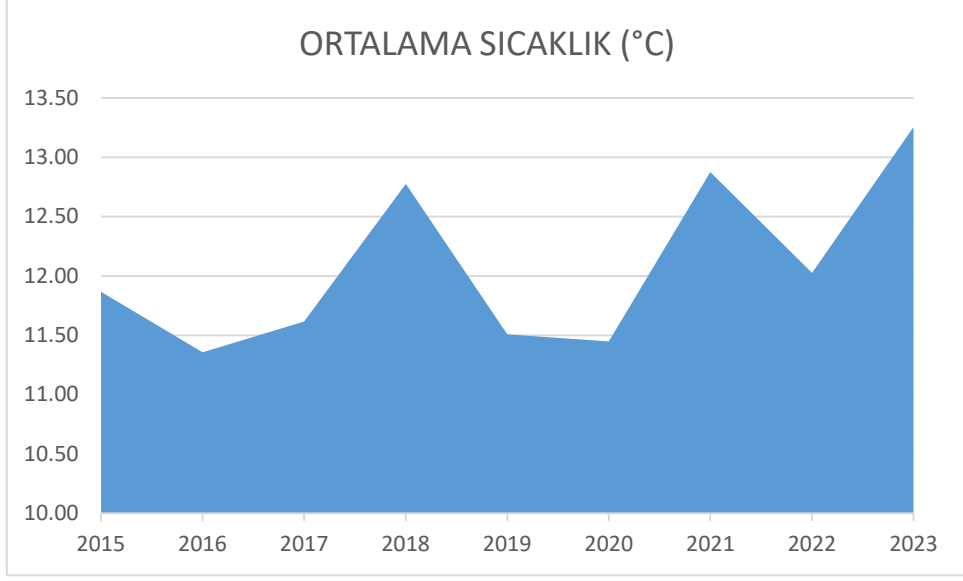
Şekil 3.10. Yıllara göre toplam güneşlenme süresi.

Tez kapsamında incelenen buzulların değişiminde en büyük etkiyi sağlayacak olan kar yağışına ait verileri gösteren grafik Şekil 3.11’de verilmiştir. Yıllara göre toplam kar yağışlı günleri gösteren grafikten de anlaşılacağı üzere 2015-2017 arası çok farklılık göstermeyen gün sayısı 2018 ve 2019 yılında artış göstermiştir. 2020-2021 yılları arasında azalsa bile önceki yıllarda görülen yağışlı gün sayısındaki fazlalığın etkilerinin devam ettiğini düşünülebilir. 2022 yılında tekrar büyük bir artış gösteren kar yağışlı gün sayısının etkisi sonuçlar bölümünde incelenmiştir.



Şekil 3.11. Yıllara göre toplam kar yağışlı günler.

Tez kapsamında incelenen buzulları fazlalıkla etkileyen bir diğer değer olan ortalama sıcaklık verileri de meteorolojiden temin edilmiştir. Temin edilen veriler doğrultusunda oluşturulan yıllara göre ortalama sıcaklık grafik Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Şekil 3.11 ile birlikte ele alındığında, 2018 yılında kar yağışlı gün sayısı artmış olsa da ortalama sıcaklığın da 2018 yılında artmış olması yağın karın buzul üzerinde artı etki yapmayacağı düşünülebilir. Gerçek etkisi ise yöntem bölümünde anlatılan indeksler yardımı ile belirlenmiştir.



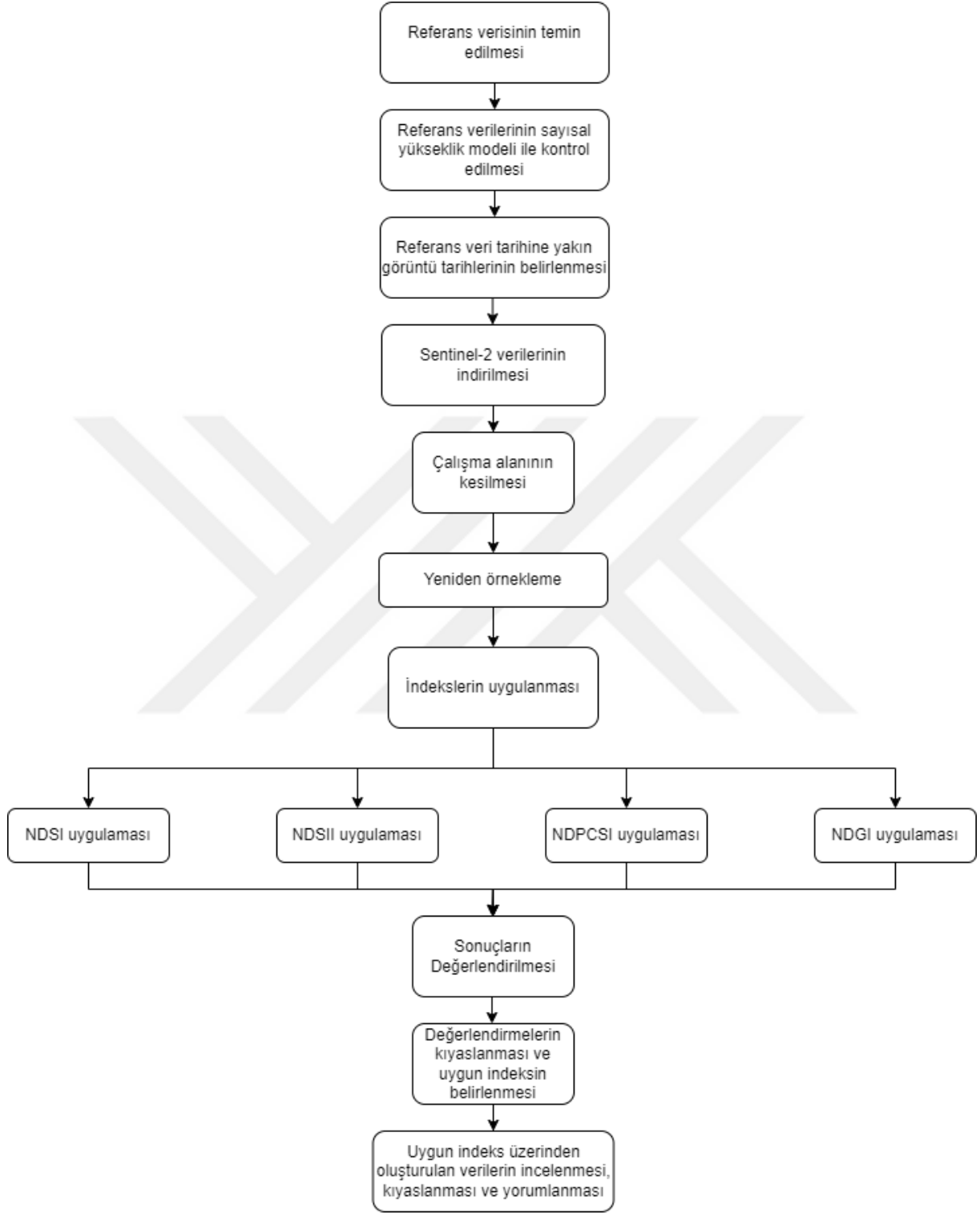
Şekil 3.12. Yıllara göre ortalama sıcaklık.

4. YÖNTEM

Yersel çalışmaların farklı dezavantajları sebebi ile hazırlanan tez kapsamında uzaktan algılama yöntemleri kullanılmıştır. Bu kapsamda Sentinel-2 uydusundan sağlanan görüntüler analizlere tabi tutulmuştur. Gelişen yöntemler göz önünde bulundurularak buzulların çıkarımı ve zamansal değişimlerinin izlenebilmesi için farklı indekslerin kullanılması gerekmektedir. Yapılan literatür taramalarında karşılaşılan farklı indeksler derlenmiş, uygulama alanında denenmiş ve referans verilerimizle karşılaştırılarak en uygun olanı seçilmiştir. Ardından zamansal olarak yapılan çalışmaların sonuçları yorumlanmıştır.

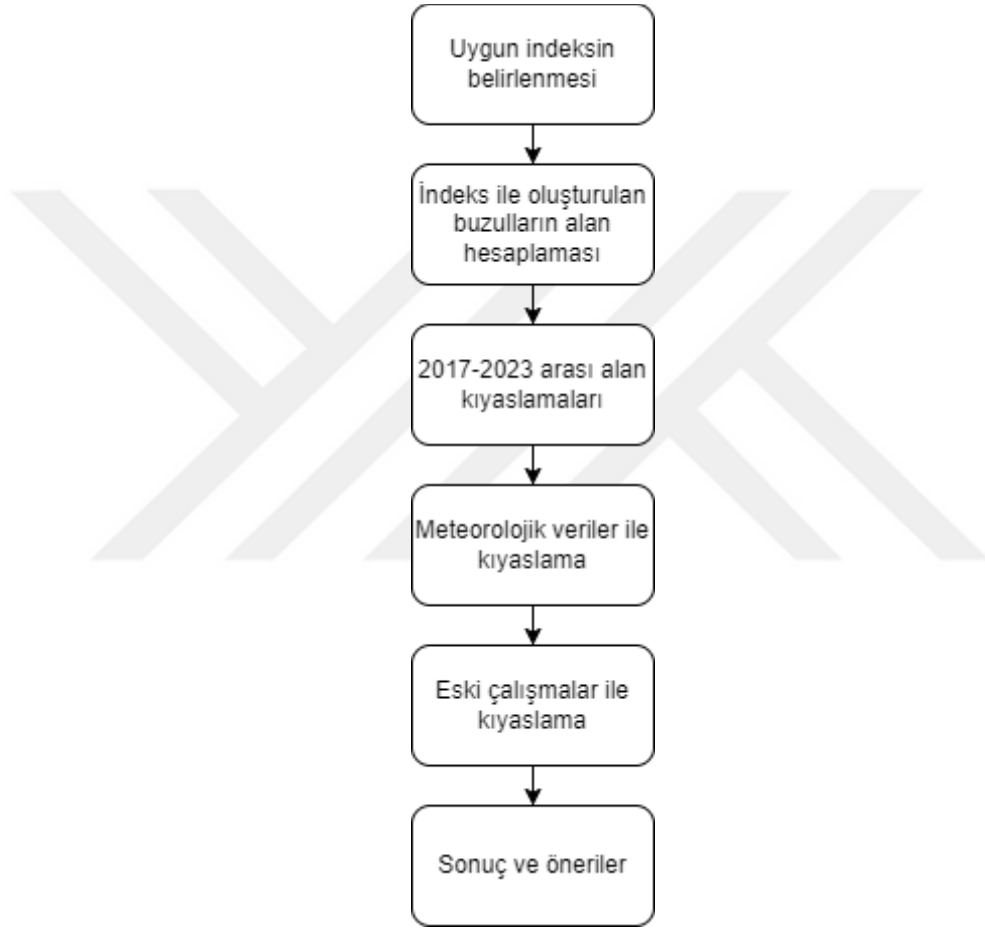
4.1 İş Akış Şeması

Tezin yöntemi birtakım işlem adımları içermektedir. Bu aşamaları gösteren işlem adımlarını içeren iş akış şeması Şekil 4.1’de gösterilmiştir. İlk olarak HGM Küre platformu üzerinden çalışma alanı referans veri olması için çizildi. HGM Küre platformu üzerinden çizilen alanlar 3 boyutlu olarak çizilmiş ve bu şekilde buzulların konumları ile ilgili daha detaylı bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır. Hakkari İli’ne ait sayısal yükseklik modeli (Şekil 3.2.) elde edilmiş ve çizimlerin kontrolü gerçekleştirilmiştir. HGM Küre platformu üzerinden alınan çizimlerin yüksekliklerinin yükseklik modeli ile tutarlı olduğu görülmüştür. Referans verisi ile ilgili kontrollerin ardından bölge ile ilgili görüntülerin temin işlemine başlanmıştır. Görüntülerin referans verisinin alındığı tarihe yakın olmasına özen gösterilmiştir. Ardından çalışma alanını kapsayan Sentinel-2 görüntüleri araştırılmış ve indirilmiştir. Ardından her yıl için indirilen veriler büyük ve işlenmesi zor olduğu için görüntüler üzerinden çalışma alanı kesilerek çıkartılmış, bu sayede daha düşük boyutlarda veriler ile çalışmak kolaylaşmıştır. Ardından indeksler için kullanılacak uygulamalar farklı bantlarda farklı çözünürlüklerde çalışmadığı için elde edilen görüntüler yeniden örnekleme (re-sampling) işlemine tabi tutulmuş ve çözünürlükleri eşitlenmiştir. Bu sayede istenilen tüm bant kombinasyonlarında aritmetik işlemlerin yapılmasına olanak sağlanmıştır. Görüntüler bu adımların ardından indekslerin uygulanması için hazır hale gelmiş ve her bir indeks denenmiştir. İndeksler sonucunda ortaya çıkan veriler incelenmiş ve içlerinden en uygun olarak kullanılacak indeks ya da indeksler seçilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışmanın iş akış şeması.

Uygun indeksin belirlenmesinden sonra bu indeks bütün yıllar için elde edilmiş görüntüler üzerinde uygulanmış ve eşik değerler kullanılarak sonuçlar üzerinden buzulların alan hesaplaması yapılmıştır. Ortaya çıkan alan verileri meteorolojik veriler ile karşılaştırılmış ve çıkarımlar yapılmıştır. Ardından elde edilen alan verileri yıllık olarak kıyaslanmış ve yorumlanmıştır. Daha önceden aynı bölge üzerinden yapılan çalışmalar ile kıyaslamaları yapılmış, gerekli yorumlar ve öneriler yapılmıştır. Bu aşamaları gösteren iş akış şeması Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. İndeks uygulama ve sonuçlarını gösterir iş akış şeması.

4.2 NDSI

Normalized Difference Snow Index (NDSI) yer yüzeyindeki karın tespiti için kullanılan bant aritmetiklerinden en çok kullanılanlardan biridir. Kar, elektromanyetik spektrumun görülebilir kısmında fazla yansıtıcı, yakın ve kısa kızılötesi (near ve short-wave infra-red) kısmında ise düşük yansımaya sahiptir. Bu özellikten yola çıkarak fazla yansımaya yaptığı aralıktaki bant ile düşük yansımaya yaptığı bant oranından faydalanarak kar örtüsünün bulunmasına dayalı bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır.

NDSI indeksinin ilk kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. 1970'lerin ortalarından itibaren kar örtüsü ile bulut ayrımı yapılması için kullanılmıştır. İlk örnekleri Valovcin (1976, 1978) ve Kyle (1978) tarafından yayınlanmıştır.

Valovcin (1976), Air Force Geophysics Laboratory (AFGL) bünyesinde yapmış olduğu çalışmada S192 Multispectral tarayıcı verileri üzerinde incelemelerde bulunmuş, kar, buz ve bulut karakteristikleri hakkında çıkarımlarda bulunmuştur. Spektrumun görülebilir kısmında kar, buz ve bulutun beyaz olarak görüldüğünü ancak spektrumun yakın kızıl ötesi kısmında (S192 Bant 11 1.55 μm - 1.75 μm) sulu bulutların beyaz, buz bulutlarının gri, karın ise siyah görüldüğünü belirlemiştir. Bundan yola çıkarak Bant 6 (0.68 μm – 0.76 μm) ile Bant 11 (1.55 μm - 1.75 μm) arasındaki parlaklık oranının kar, buz ve bulut ayrımı için kullanılabileceği sonucuna varmıştır (Valovcin, 1976).

Valovcin'in (1976) S192 alıcılarında belirlemiş olduğu spektrum aralıklarını kullanarak günümüz uydu görüntülerinin bantlarına uygulanması mümkündür. Literatür taramasında farklı uydularla yapılan benzer uygulamalara bakarak en sık kullanılan uydu ve bant kombinasyonları eşitlikleri Landsat 4-7 için eşitlik 4.1, Landsat 8-9 için eşitlik 4.2 ve Sentinel-2 için eşitlik 4.3'te gösterilmiştir.

$$\text{Landsat 4-7} \quad \text{NDSI} = (\text{Band 2} - \text{Band 5}) / (\text{Band 2} + \text{Band 5}) \quad (\text{Eşitlik 4.1})$$

$$\text{Landsat 8-9} \quad \text{NDSI} = (\text{Band 3} - \text{Band 6}) / (\text{Band 3} + \text{Band 6}) \quad (\text{Eşitlik 4.2})$$

$$\text{Sentinel-2} \quad \text{NDSI} = (\text{Band 3} - \text{Band 11}) / (\text{Band 3} + \text{Band 11}) \quad (\text{Eşitlik 4.3})$$

4.2 NDSII

Xiao (2000) tarafından yayınlanan bir makalede kar ve buz örtüsünün belirlenmesi için SPOT-4 VGT (Terra Scope, SPOT-VGT, 2024) sensörünün kullanılabilirliğini savunulmuştur. SPOT-4 Vegetation (VGT) sensörünün 4 banta sahip olması ve LANDSAT TM2 bandına eşdeğer bir bantının bulunmaması sebebi ile NDSI kullanımının VGT sensörü için söz konusu olmadığı belirtmiştir. Landsat TM'nin 3 bandının (TM1, TM2, TM3), birbirlerine göre korelasyonunun fazla olmasından ve bu alanda yapılan diğer çalışmalarda TM3 bandının buz ve kar örtüsünün tespiti konusunda kullanışlı bir bant olduğu verisine dayanarak yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. SPOT-4 VGT sensöründe bulunan kırmızı ve orta-kızılötesi bantlarının Landsat TM3 ve TM5 bantlarına eşdeğer olduğunu belirleyip, kar ve buz örtüsünün belirlenmesi için kullanılabilirliğini savunmuştur. Bu sonuçlardan yola çıkarak Normalized Difference Snow and Ice Index ismini verdiği yeni bir indeksin formülünü vermiştir. Xiao vd. (2001) tarafından önerilen bu formüller Landsat TM için Eşitlik 4.4 ve SPOT-4 VGT için Eşitlik 4.5'te verilmiştir.

$$\text{Landsat} \quad \text{NDSII} = (\text{TM3} - \text{TM5}) / (\text{TM3} + \text{TM5}) \quad (\text{Eşitlik 4.4})$$

$$\text{SPOT-4 VGT} \quad \text{NDSII} = (\text{B2} - \text{MIR}) / (\text{B2} + \text{MIR}) \quad (\text{Eşitlik 4.5})$$

Tezde kullanılan veriler Sentinel-2 uydu görüntüleri olduğu için, spektral bantların özellikleri de göz önünde bulundurularak formüller Sentinel-2'ye uyarlandığında Eşitlik 4.6'da gösterildiği gibi kullanılması uygun bulunmuştur.

$$\text{Sentinel-2} \quad \text{NDSII} = (\text{B4} - \text{B11}) / (\text{B4} + \text{B11}) \quad (\text{Eşitlik 4.6})$$

4.3 NDGI

2005 yılında Kargel ve arkadaşları tarafından yapılan bir yayında buz örtüsünün 4 bileşenden oluştuğu öne sürülmüştür. Bunları kar, buz, buz ile karışık kayalık türleri ve kayalık türleri olarak

sınıflandırmışlardır (Kargel vd. , 2005) . Bu sınıfların detaylı ayrıştırılması için 2009 yılında Keshri ve arkadaşları Normalized Difference Glacier Index (NDGI) isimli yeni bir indeks oluşturmuşlardır (Keshri vd. , 2009). Bu indeksi Himalayalarda bulunan Chenab havzasında ASTER verisi kullanarak denemişlerdir. Bu veriler yardımı ile buzul örtüsünün daha doğru sınıflandırılabilmesi için buzul örtüsünün 4 bileşenin spektral değerlerindeki farkları iyi değerlendirip ayrıştırılması gerektiğinin savunmuşlardır. Bu bağlamda ASTER verileri için en uygun bant kombinasyonunun yeşil (B1) ve kırmızı (B2) olduğu sonucuna varmış ve NDGI için bu bantları kullanmışlardır.

ASTER görüntüsünün bantlarının yansıma değerlerini Sentinel-2 ile karşılaştırarak en uygun bant kombinasyonunun yeşil (B3) ve kırmızı (B4) olduğu anlaşılmış, tez kapsamında NDGI bu şekilde hesaplanmıştır ve Eşitlik 4.7’de gösterildiği gibi kullanılması uygun görülmüştür.

$$\text{Sentinel-2} \quad \text{NDGI} = (B3 - B4) / (B3 + B4) \quad (\text{Eşitlik 4.7})$$

4.4 NDPCSI

Bu yöntem görüntüye ait bantların temel bileşen analizine (Principle Component Analysis - PCA) tabi tutularak kar örtüsünü bulmayı amaçlar. İlk olarak Sibandze vd.(2014) tarafından 2014 yılında kullanılmıştır.

Temel bileşen analizi, görüntü işlemede yaygın kullanılan bir istatistiksel yöntemdir. Bu yöntem fazla sayıda olan bantlar içerisindeki verileri varyansı fazla olacak şekilde tekrardan oluşturmayı, bu işlemi yaparken boyutu küçültmeyi amaçlar. Bu sayede eldeki veri setinin boyutu küçülmüş olur. Aynı zamanda görüntü işleme alanında bant sayısı aynı olmasına rağmen bantlar arası varyans artmış olduğu için yorumlanacak bantların sayısı azalmış olur. Sınıflandırma yapılacak görüntülerde büyük avantaj sağlamaktadır.

Sibandze ve arkadaşları da bu yöntemi 2014 yılında Güney Afrika’da yer alan Koue Bokkeveld dağında kar örtüsünü bulmak için NDSI ile birlikte kullanmış ve kıyaslamasını yapmıştır. Bu yöntemi Landsat 8 level 1A görüntülerinin kullanarak yapmışlardır. Landsat 8’in yeşil bant (0.53-0.59 µm) ve kısa-dalga kızılötesi bantını (1.57-1.65 µm) kullanarak NDSI hesaplamasını

yapmışlardır. NDSI'nin kar örtüsünü bulma konusunda sulak arazi sorununa dikkat çekerek, NDSI uygulanmış görüntüye literatürde en sık kullanılan 0.4 eşik değerine ek olarak 0.11 değeri ile sulu arazi eşik değeri uygulayarak kar örtüsünü bulmaya çalışmıştır. Ardından Landsat 8'in bantlarını temel bileşen analizine tabi tutmuştur. Oluşan temel bileşen bantlarından en fazla veriyi içeren birinci ve ikinci bantları kar örtüsünün tespiti için kullanmaya karar vermiştir. Her ne kadar birinci bileşende kar örtüsüyle diğer yüzey örtüleri arasında yüksek kontrast ayrımı kolaylaştırıyor olsa da ikinci bileşende durumun farklı olduğunu belirtmiştir. İkinci bileşende hem kar örtüsünün hemde su yüzeyinin ışığı soğurması sebebi ile aralarındaki kontrastın düştüğünü ve ayrımın zorlaştığı kanaatine varmış, ancak yüksek bilgi içeriğinden dolayı ilk iki bileşeni kullanmaya karar vermiştir.

Sonuçları değerlendirdiğinde ise, NDPCSI'nin NDSI'dan daha fazla doğru sınıflandırma oranına sahip olduğunu, sulu yüzey ve gölge ayrımında daha başarılı olduğu sonucuna vararak kullanılabileceğini savunmuştur (Sibandze vd., 2014).

Tez kapsamında NDPCSI için görüntülere temel bileşen analizi uygulandıktan sonra oluşan bileşenler içinden en parlak ve en karanlık bileşenlerin kullanılması uygun görülmüş, bu bağlamda Sentinel-2 için uygun görülen Eşitlik 4.8'de gösterilmektedir.

$$\text{NDPCSI} = (\text{Pcbrightest} - \text{PCdarkest}) / (\text{PCbrightest} + \text{PCdarkest}) \text{ (Eşitlik 4.8)}$$

4.5 Uygulamada Kullanılan Yazılımlar

Tez kapsamında elde edilen Sentinel-2 uydu görüntülerini incelemek ve işlemek için ESA tarafından geliştirilen ve açık olarak paylaşılan Sentinel Application Platform (SNAP) yazılımı kullanılmıştır. SNAP çeşitli uzaktan algılama verilerinin kullanımını, görüntülenmesini ve işlenmesini sağlayan, üzerinde çeşitli API (Application Programming Interface)'ler barındıran bir yazılımdır. Scientific Toolbox Exploitation Platform (STEP) üzerinden erişilebilen ücretsiz bir yazılımdır (STEP, 2024).

ESA ve Avrupa Birliği (AB) tarafından desteklenen Copernicus programı kapsamında sunulan scihub.copernicus.eu web sitesinden indirilen görüntüleri bir bütün olarak görüntülemesi ve

işlemesi sebebi ile tez kapsamında bu yazılımdan fazlası ile faydalanılmıştır. Aynı zamanda içerisinde bant aritmetiği ile ilgili bulunan uzantılar sayesinde NDSI, NDSII, NDGI ve NDPCSI işlemlerinin yapılması sağlanmıştır.

SNAP yazılımının yanı sıra hem yapılan işlemleri doğrulayabilmek adına ve bazı durumlarda kullanım kolaylığı sağlaması sebebi ile yine ücretsiz bir yazılım olan QGIS’de kullanılmıştır. QGIS yazılımı, OSGeo Vakfına (Open Source Geospatial Foundation) tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu bir CBS yazılımıdır (OSGeo, 2024). Ücretsiz olarak kullanıma sunulan bu program, tez kapsamında SNAP uygulaması ile yapılan işlemlerin kontrol edilmesi için yardımcı yazılım olarak kullanılmıştır.

HGM Küre sistemi, PiriReis Bilişim Teknolojileri Limited Şirketi’nin CitySurf Globe platformu üzerinde Harita Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilmiştir (HGM Küre, 2024). HGM Küre yazılımı kullanılarak tez çalışma alanında bulunan buzulların çizimleri gerçekleştirilmiş ve bu çizimler görüntü yılı için referans verisi olarak kullanılmıştır.

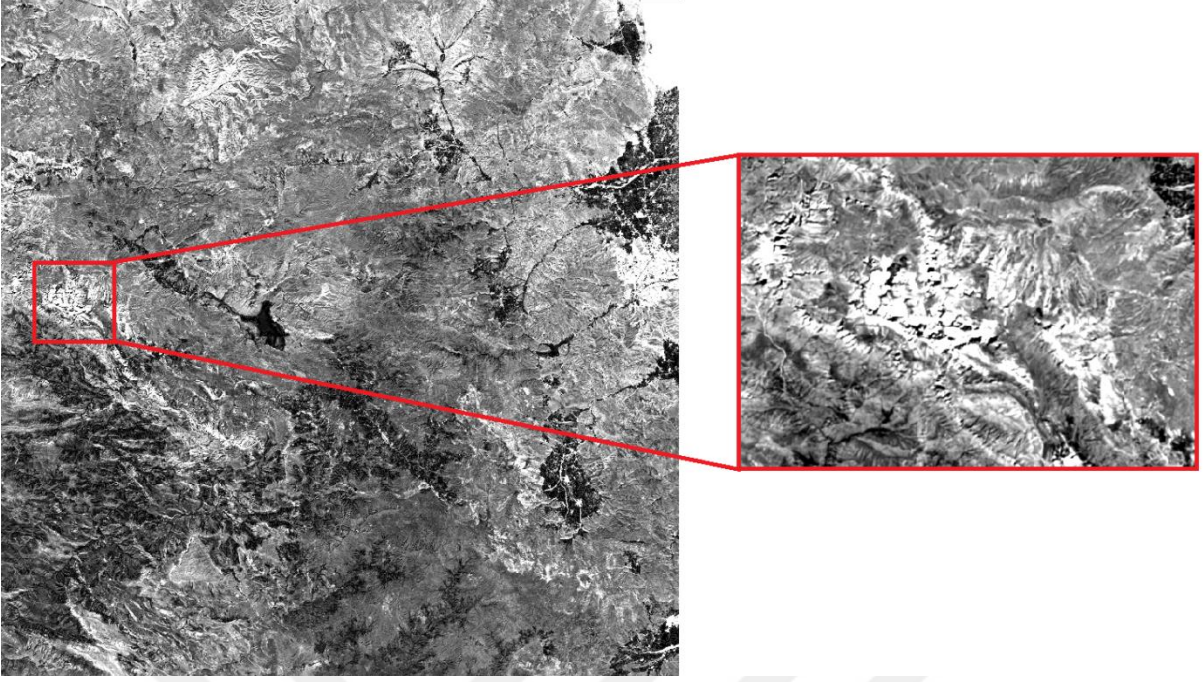
5. ANALİZ SONUÇLARI

Tez kapsamında buzullar üzerindeki değişimleri gözlemek için literatür taramasından elde edilen indekslerin her biri ayrı ayrı uygulanmış ve sonuçlar gözlenmiştir. Çalışma alanı ile ilgili referans verilere en uygun sonuçları veren indeksler dikkate alınmış ve değerlendirilmiştir. Başarılı bulunmayan indeksler ile alakalı sonuçlar yorumlamaya dahil edilmemiştir.

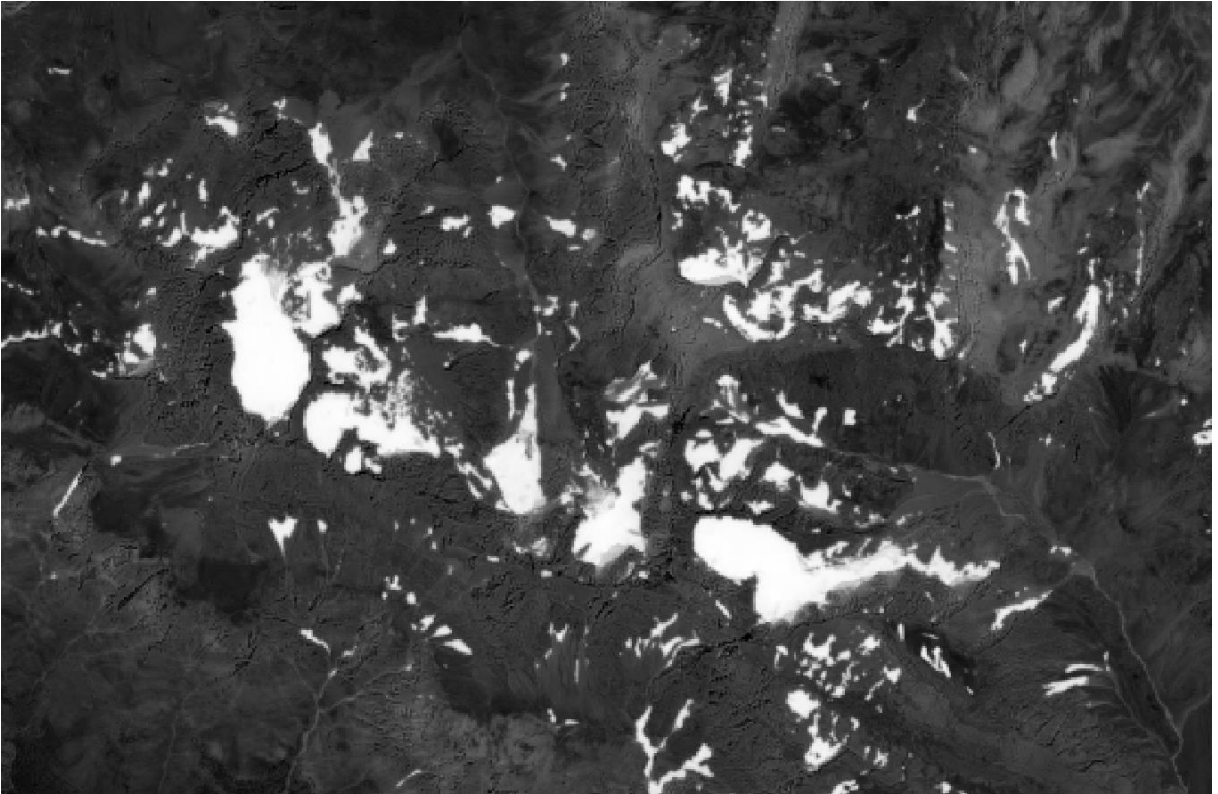
5.1 NDSI Uygulaması ve Sonuçları

Cilo Buzullarının tespiti için ilk olarak Sentinel-2 den indirilen görüntülere NDSI uygulanmıştır. Bu işlem için öncelikle scihub.copernicus.eu adresinden temin edilen görüntülerin boyutunu Cilo Buzulları'nın yaklaşık konumunu içerisine alacak şekilde kesilmiştir. Bu işlem için Sentinel-2 için hazırlanmış olan SNAP uygulaması kullanılmıştır. Raster-subset yolunu izleyerek gerekli koordinatlar girildikten sonra oluşan görüntü hem alan olarak hem de sayısal ortamda kapladığı alan olarak küçülmüştür. Şekil 5.1'de görülen görüntünün kesilmemiş hali yaklaşık 1.3 gb iken uygulama için gerekli kısmın kesilmiş hali (subset) ise yaklaşık 200 mb boyutundadır. Ardından oluşan dosya içerisinde Bant 3 ve Bant 11 farklarının toplamlarına oranı olacak şekilde bir aritmetik işleme tabi tutulmuş ve yeni görüntüler kaydedilmiştir. Şekil 5.2'de ise 2019 yılına ait görüntüye NDSI uygulaması sonucu görsel olarak sunulmuştur.

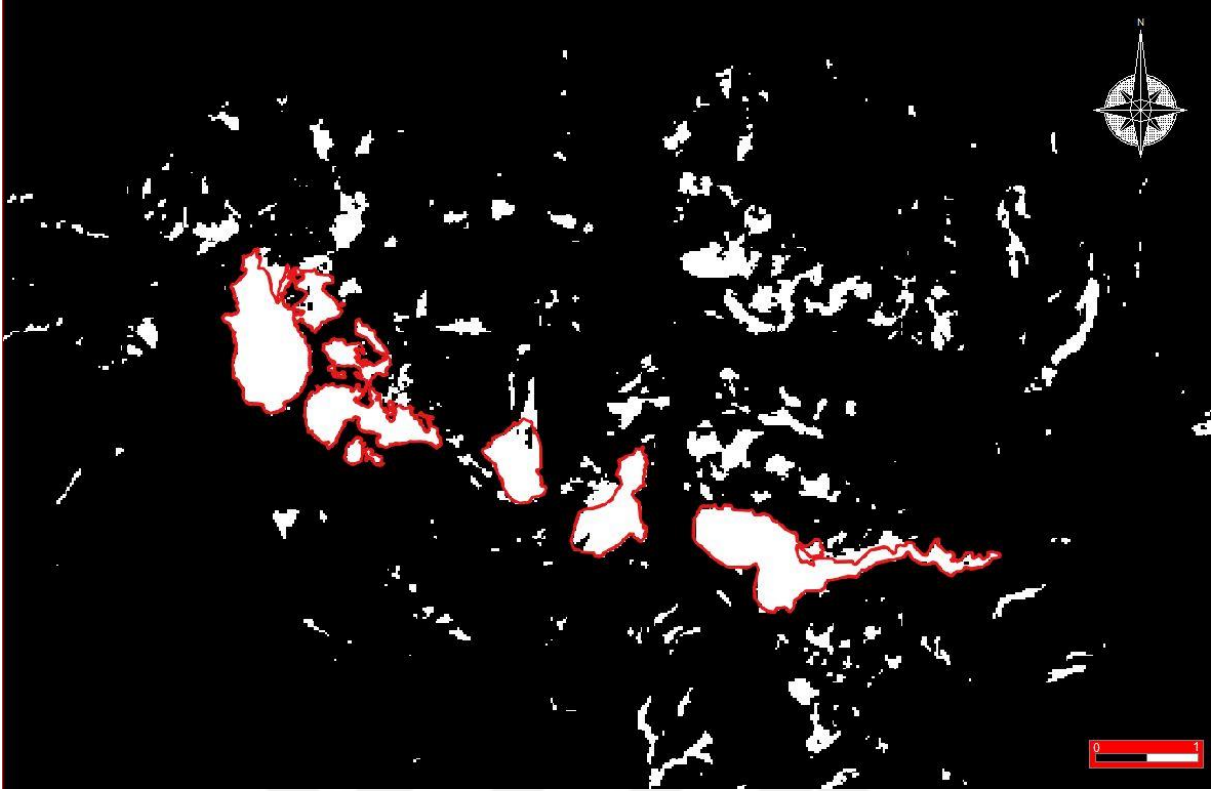
Literatürde NDSI için genellikle kullanılan eşik değerinin 0.4 olduğu görülmüştür. HGM Küre uygulamasından elde edilen 2019 yılına ait referans verilerle karşılaştırma sonucunda eşik değerinin 0.4 olmasının Cilo Buzulları için de uygun olacağı görülmüş ve uygulama bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3'te hava fotoğraflarından üretilen referans poligonlar (kırmızı renkle görselleştirilmiştir) ve 0.4 eşik değeri ile elde edilen iki değerli (binary) Sentinel-2 2019 NDSI görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 5.1. 2017 Yılına ait Sentinel-2A uydu görüntüsünün genel kapsama alanı ve uygulama alanını içeren alt alanı (kesilen).



Şekil 5.2. 2019 yılına ait görüntüye NDSI uygulaması sonucu.

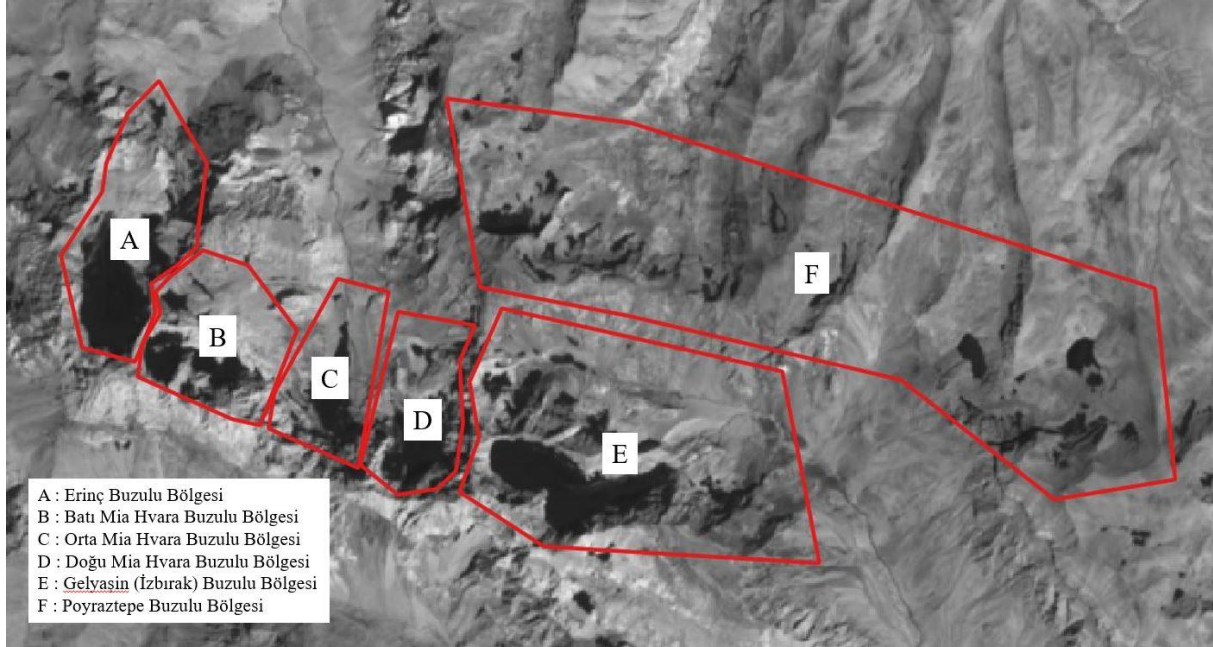


Şekil 5.3. 0.4 eşik değeri ile elde edilen iki değerli 2019 NDSI görüntüsü ve hava fotoğraflarından elde edilen referans buzul sınırları (kırmızı poligon). Beyaz renkler buzulları ifade etmektedir.

Eşik değerler belirlenirken, referans verilerden elde edilen alanlar ile 2019 yılı Sentinel-2 görüntülerinden elde edilen NDSI verilerine farklı eşik değerleri uygulanarak iki değerli görüntüler elde edilmiş, vektörizasyon uygulanarak elde edilen alanlar karşılaştırılmıştır. Vektörizasyon işlemi için QGIS uygulaması kullanılmıştır. Alan hesabı yapılırken bölgesel olarak buzullar bir bütün olarak alınmamış, bütünlüğünü korumuş buzul kütleleri tekil olarak ele alınmıştır. Çizelge 5.1’de 0.3, 0.4 ve 0.5 eşik değerlerine ait sonuçlar sunulmuştur. Çizelge 5.1’de üzerinde de görülebileceği üzere 0.4 eşik değeri uygulanmış görüntülerden elde edilen alan verilerinin 2019 verileri ile arasındaki farkın en az olduğu fark edilmiş ve eşik değeri olarak 0.4 kullanılmıştır. Diğer yıllara ait Sentinel-2 görüntülerinden elde edilen NDSI sonuçlarına da 0.4 eşik değeri kullanılarak devam edilmiştir.

Vektörizasyon sonucunda oluşan dağınık kar örtüsü ve buzul verilerinin bir bütün olarak ele alınabilmesi için tezin ilk aşamalarında yapılan literatür taramaları da göz önünde bulundurularak buzulların geçmiş zamanlarda bulunduğu alanlar Şekil 5.4’te kapalı bir alan oluşturacak şekilde çizilmiştir. Burada hedeflenen, vektörizasyon sonucunda oluşan parçalı

verilerin hangi buzul alanına dahil olduğuna karar verebilmektedir. Kapalı alanlar içerisinde bulunan vektörlerin alan sorgulamaları yapılarak buzul sınıflandırması yapılmış ve alanları toplanmıştır.



Şekil 5.4. Bölgede bulunan buzulların genel alanları.

NDSI	2019 Referans Verisi	0.3 Eşik Değer	Fark	0.4 Eşik Değer	Fark	0.5 Eşik Değer	Fark
Erinç	918,903.65	937,600.00	-0.020	902,800.00	0.018	865,200.00	0.058
Batı Mia Hvara	427,002.57	455,600.00	-0.067	413,200.00	0.032	389,200.00	0.089
Orta Mia Hvara	305,327.34	316,000.00	-0.035	299,600.00	0.019	284,400.00	0.069
Doğu Mia Hvara	385,008.96	407,200.00	-0.058	378,800.00	0.016	349,200.00	0.093
Gelyaşın	928,594.50	946,800.00	-0.020	918,400.00	0.011	861,200.00	0.073
Poyraztepe	35,460.60	38,400.00	-0.083	34,000.00	0.041	31,600.00	0.109

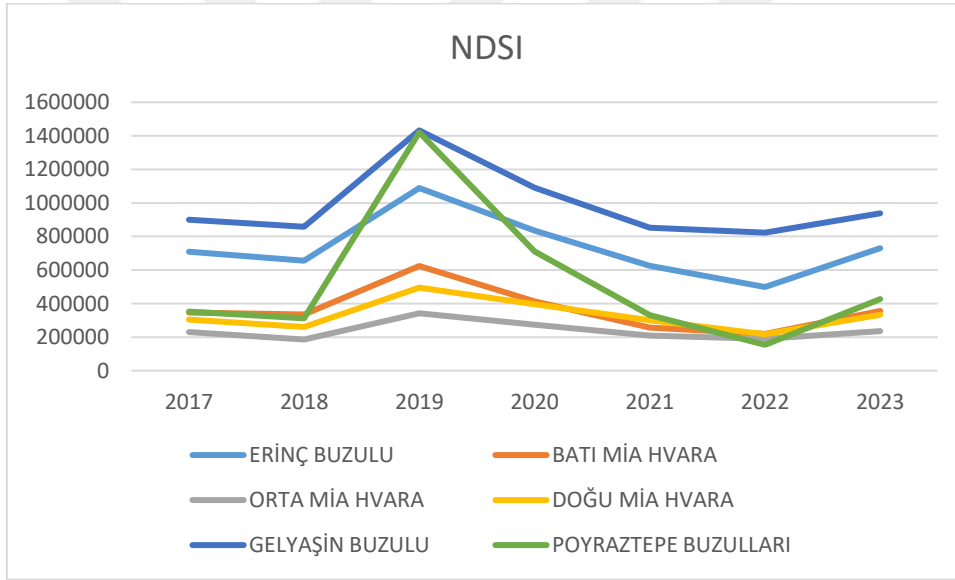
Çizelge 5.1. NDSI için farklı eşik değerlerinin 2019 referans verisi ile karşılaştırılması.

Birimler metre cinsindedir.

Yorumlama aşaması için, bu işlemler 0.4 eşik değeri ile 2017-2023 görüntülerine ayrı ayrı uygulanmış ve elde edilen alanlar Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Ayrıca Şekil 5.5’te yıllara göre alansal değişim grafik olarak verilmiştir. Çizelge ve grafiklerde görülebileceği üzere, farklı yıllarda iniş ve çıkışlar görülmüştür. Bu değer değişimlerinin diğer iklimsel ve çevresel parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

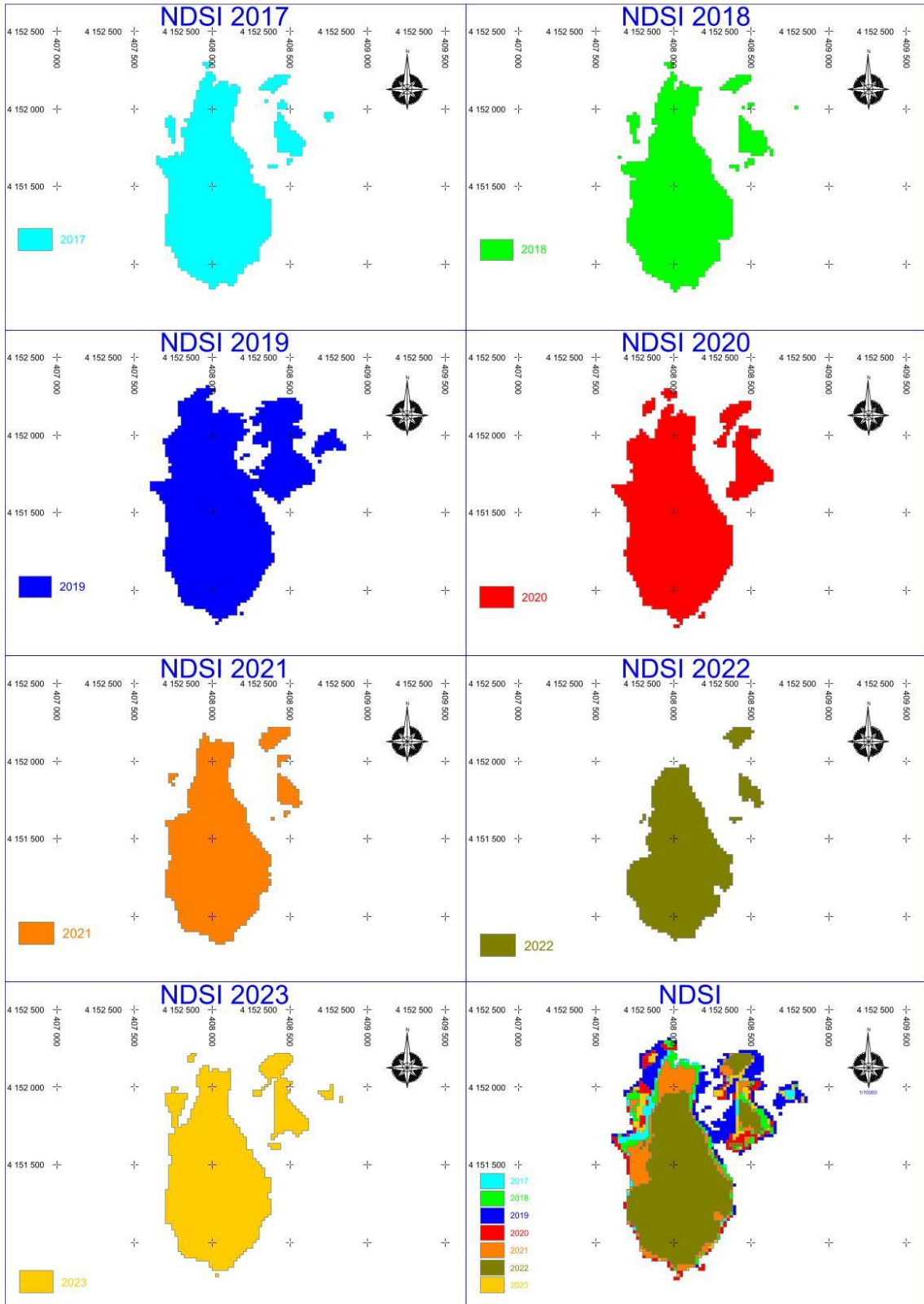
YILLAR BUZULLAR	NDSI 2017	NDSI 2018	NDSI 2019	NDSI 2020	NDSI 2021	NDSI 2022	NDSI 2023
ERİNÇ	709,600 m ²	655,200 m ²	1,088,800 m ²	836,000 m ²	626,000 m ²	498,800 m ²	729,600 m ²
BATI MİA HVARA	346,400 m ²	335,200 m ²	624,000 m ²	412,400 m ²	256,400 m ²	219,200 m ²	356,400 m ²
ORTA MİA HVARA	230,800 m ²	185,600 m ²	342,000 m ²	274,800 m ²	209,200 m ²	189,600 m ²	234,800 m ²
DOĞU MİA HVARA	303,600 m ²	260,400 m ²	495,200 m ²	395,600 m ²	301,200 m ²	217,200 m ²	333,200 m ²
GELYAŞIN	899,200 m ²	857,200 m ²	1,432,800 m ²	1,090,000 m ²	853,200 m ²	822,800 m ²	938,800 m ²
POYRAZTEPE	352,400 m ²	312,400 m ²	1,420,800 m ²	710,400 m ²	332,000 m ²	154,000 m ²	426,000 m ²

Çizelge 5.2. NDSI ile elde edilen oluşan buzul alanları. Birimler metre cinsindedir.



Şekil 5.5. Buzulların yıllara göre alansal değişimini gösteren grafik.

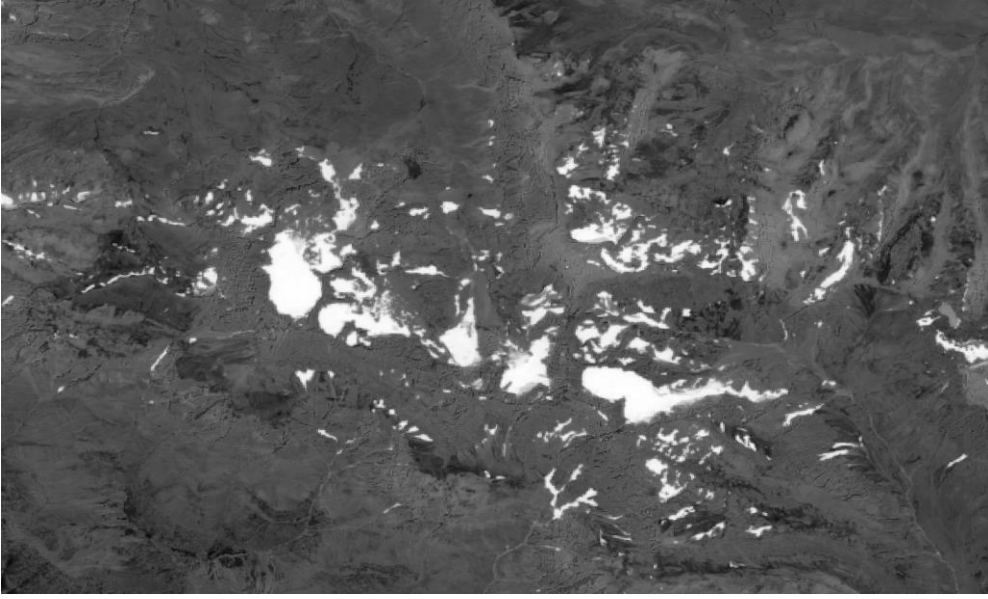
NDSI uygulanmış görüntü 0.4 eşik değerine tabi tutulduktan sonra ortaya çıkan sonuçların vektörize edilmesi ile buzul sınırları ortaya çıkarılmıştır. Ortaya çıkan sonuçların sayısal değerleri belli olsa da buzulların değişimlerinin görsel değerlemesi için Erinç Buzulu Şekil 5.6'da yıllara göre gösterilmiştir. Yıllık sonuçlar değerlendirildiğinde en fazla değişimin buzulun kuzey ve yükseltisi daha az olan bölgelerinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.6 Erinc Buzulu'nun NDSI sonuçlarına göre yıllık değişimi.

5.2 NDSII Uygulaması ve Sonuçları

Cilo Buzullarının tespiti için ilk olarak Sentinel-2 den elde edilen görüntüye NDSII uygulanmıştır. NDSII temelde Bant 4 ve Bant 11 farklarının toplamına oranını hesaplayan bir aritmetik işlemdir. Şekil 5.7’da 2019 yılı için elde edilen NDSII görüntüsü verilmiştir. Şekil 5.8’de ise Orta Mia Hvara Buzulu’na ait referans veri ve 0.4 eşik değeri ile üretilen NDSII görüntüsünün sunulmuştur.



Şekil 5.7. 2019 yılına ait görüntüye NDSII uygulaması (0.4 eşik değeri)



Şekil 5.8. HGM Küre üzerinden çizilen Orta Mia Hvara Buzulu'na ait referans veri (kırmızı) ve 2019 yılı Sentinel-2 NDSII görüntüsü (0.4 eşik değeri).

Yapılan literatür taramasında standart kabul edilen bir eşik değeri bulunmadığı için 2019 referans verileri ile karşılaştırma işlemine gidilmiştir. Farklı eşik değerleri uygulanan NDSII görüntümüzde oluşan buzul alanları 2019 HGM Küre üzerinden elde etmiş olduğumuz referans verileri ile karşılaştırılarak en yakın değeri bulunmaya çalışılmıştır. Referans verinin yılı 2019 olduğundan dolayı kıyaslama 2019 NDSII görüntüsü üzerinden yapılmıştır. NDSII sonucu oluşan görüntüye farklı eşik değerleri denenmiş, sonuçların alan değerleri 2019 HGM Küre üzerinden alınan referans verileri ile kıyaslanmıştır. Çizelge 5.3'te 0.3, 0.4 ve 0.5 eşik değerlerine ait alan verileri verilmiş olup aralarındaki farkın en az olduğu 0.4 eşik değerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

NDSII	2019 Referans Verisi	0.3 Eşik Değeri	Fark	0.4 Eşik Değeri	Fark	0.5 Eşik Değeri	Fark
Erinç	918,903.65	954,800.00	-0.039	918,400.00	0.001	877,200.00	0.045
Batı Mia Hvara	427,002.57	471,200.00	-0.104	422,800.00	0.010	399,200.00	0.065
Orta Mia Hvara	305,327.34	321,600.00	-0.053	307,200.00	-0.006	291,200.00	0.046
Doğu Mia Hvara	385,008.96	414,800.00	-0.077	384,000.00	0.003	355,200.00	0.077
Gelyaşın	928,594.50	957,200.00	-0.031	927,200.00	0.002	868,000.00	0.065
Poyraztepe	35,460.60	40,400.00	-0.139	34,800.00	0.019	31,600.00	0.109

Çizelge 5.3. NDSII için farklı eşik değerlerinin 2019 referans verisi ile karşılaştırılması.

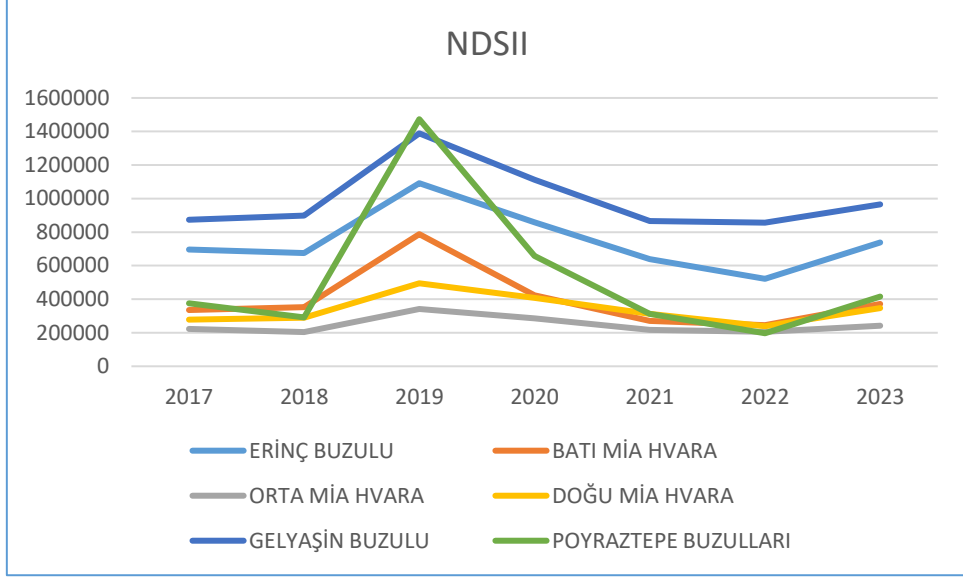
Birimler metre cinsindedir.

Seçilen eşik değere göre NDSII 2017-2023 yılları arasında seçilen görüntülere aynı şekilde uygulanmıştır. Sonuçlar vektör haline dönüştürülerek buzul bazlı alan hesabına geçilmiştir. Bu şekilde buzul ve kar örtüsü kapalı bir alan içerisinde kalmış ve alan hesabı yapılması sağlanmıştır. Bölge ile alakalı yapılan literatür incelemesi ile elde edilen veriler ışığında bölgede bulunan 6 buzul alanı önceki yıllarda belirlenen buzul alanları dikkate alınarak geniş bir alan belirlenmiş (Şekil 5.4) ve alan hesabı için bu alan içerisinde kalan tüm vektörler göz önünde bulundurulmuştur.

Geçmişten günümüze kadar yapılan araştırmalar göz önünde bulundurularak çizilen buzul alanları içerisinde kalan vektörlerin alanları sorgulanarak bir tabloya işlenmiştir. Alanlar metre kare olarak hesaplanmış ve bu şekilde Çizelge 5.4'te verilmiştir. Ayrıca şekil olarak Şekil 5.9'de sunulmuştur. Grafik üzerinde görüldüğü üzere buzul alanlarında 2017-2018 arası bir düşme varken 2019 yılında büyük bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca bu artışın tüm buzullar için aynı olmadığı da gözlenmiştir. Bu değişimlerin yine meteorolojik ve çevresel parametrelerle ilişkilendirilmesi uygun olacaktır.

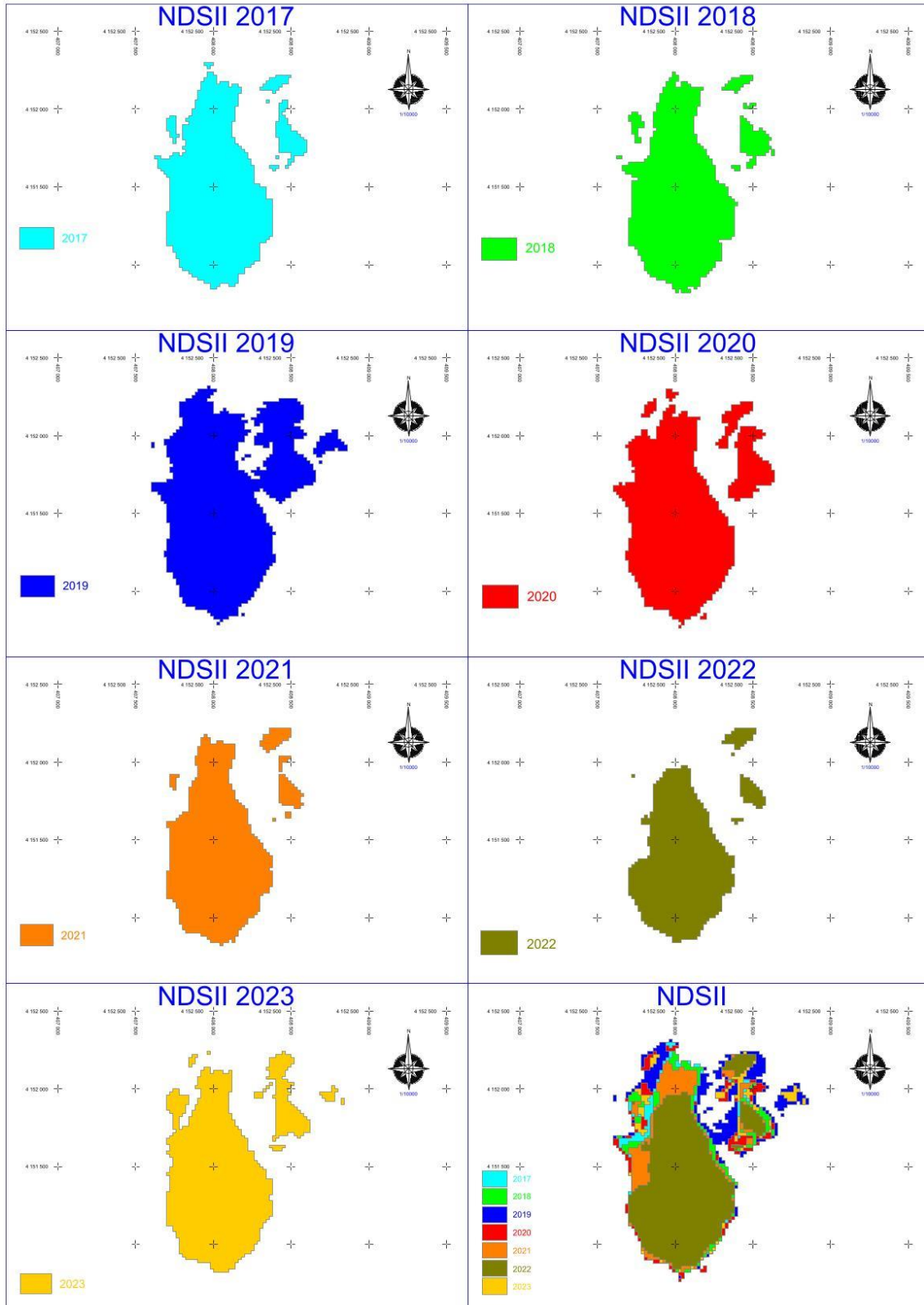
YILLAR BUZULLAR	NDSII 2017	NDSII 2018	NDSII 2019	NDSII 2020	NDSII 2021	NDSII 2022	NDSII 2023
ERİNÇ	695,600 m ²	674,800 m ²	1,091,600 m ²	858,400 m ²	639,200 m ²	521,600 m ²	737,600 m ²
BATI MİA HVARA	334,800 m ²	353,200 m ²	787,800 m ²	422,800 m ²	270,800 m ²	245,200 m ²	371,200 m ²
ORTA MİA HVARA	222,000 m ²	204,000 m ²	341,600 m ²	286,000 m ²	216,800 m ²	205,200 m ²	242,000 m ²
DOĞU MİA HVARA	278,400 m ²	289,600 m ²	494,800 m ²	407,200 m ²	312,800 m ²	238,800 m ²	346,800 m ²
GELYAŞIN	873,200 m ²	898,400 m ²	1,388,800 m ²	1,112,800 m ²	865,200 m ²	856,400 m ²	965,600 m ²
POYRAZTEPE	374,800 m ²	290,800 m ²	1,473,200 m ²	658,000 m ²	312,400 m ²	196,800 m ²	415,200 m ²

Çizelge 5.4. NDSII sonucu elde edilen buzul alanları.



Şekil 5.9. NDSII sonuçlarından elde edilen buzul alanlarının yıllara göre alansal değişimi.

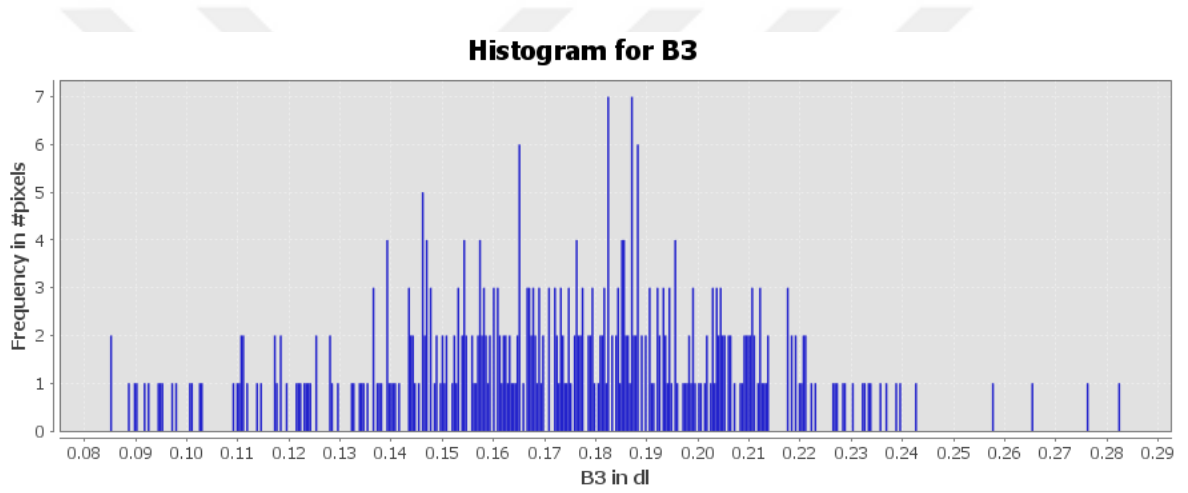
NDSII uygulanmış görüntü 0.4 eşik değerine tabi tutulduktan sonra ortaya çıkan sonuçların vektörize edilmesi ile buzul sınırları ortaya çıkarılmıştır. Ortaya çıkan sonuçların sayısal değerleri belli olsa da buzulların değişimlerinin görsel değerlemesi için Erinç Buzulu Şekil 5.10'da yıllara göre gösterilmiştir. Yıllık sonuçlar değerlendirildiğinde en fazla değişimin buzulun kuzey ve yükseltisi daha az olan bölgelerinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



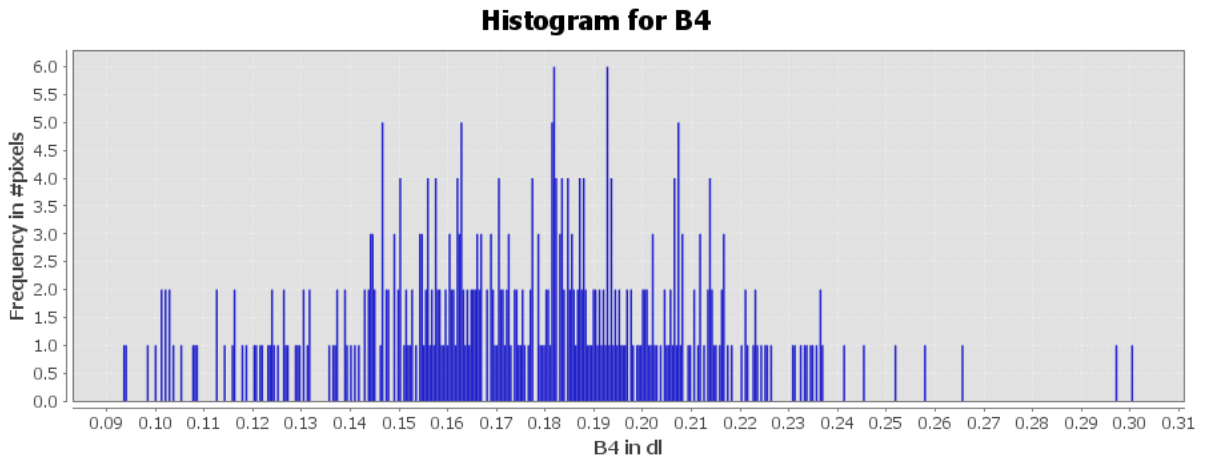
Şekil 5.10 Erinc Buzulu'nun NDSII sonuçlarına göre yıllık değişimi.

5.3 NDGI Uygulaması ve Sonuçları

Sentinel-2 görüntüleri NDGI indeksi için $(B3 - B4) / (B3 + B4)$ olacak şekilde bir aritmetik işleme tabi tutulmuştur. Literatür taramalarında elde edilen NDGI indeksi ve kullanılan bantların yansıma değerleri dikkate alınarak yapılan bu işlemin sonucu çalışma alanında istenilen sonuçları vermemiştir. Bunun sebebi ile ilgili olarak çalışma alanında Erinç Buzunun bulunduğu bölgeden alınan bir kesit üzerinde histogram incelemesi yapılmıştır (Şekil 5.11 ve 5.12). Çıkan sonuçların Bant 3 ve Bant 4 için çok yakın oldukları gözlemlenmiştir.



Şekil 5.11. Erinç Buzulundan alınan bir kesite ait Bant-3 histogram grafiği.

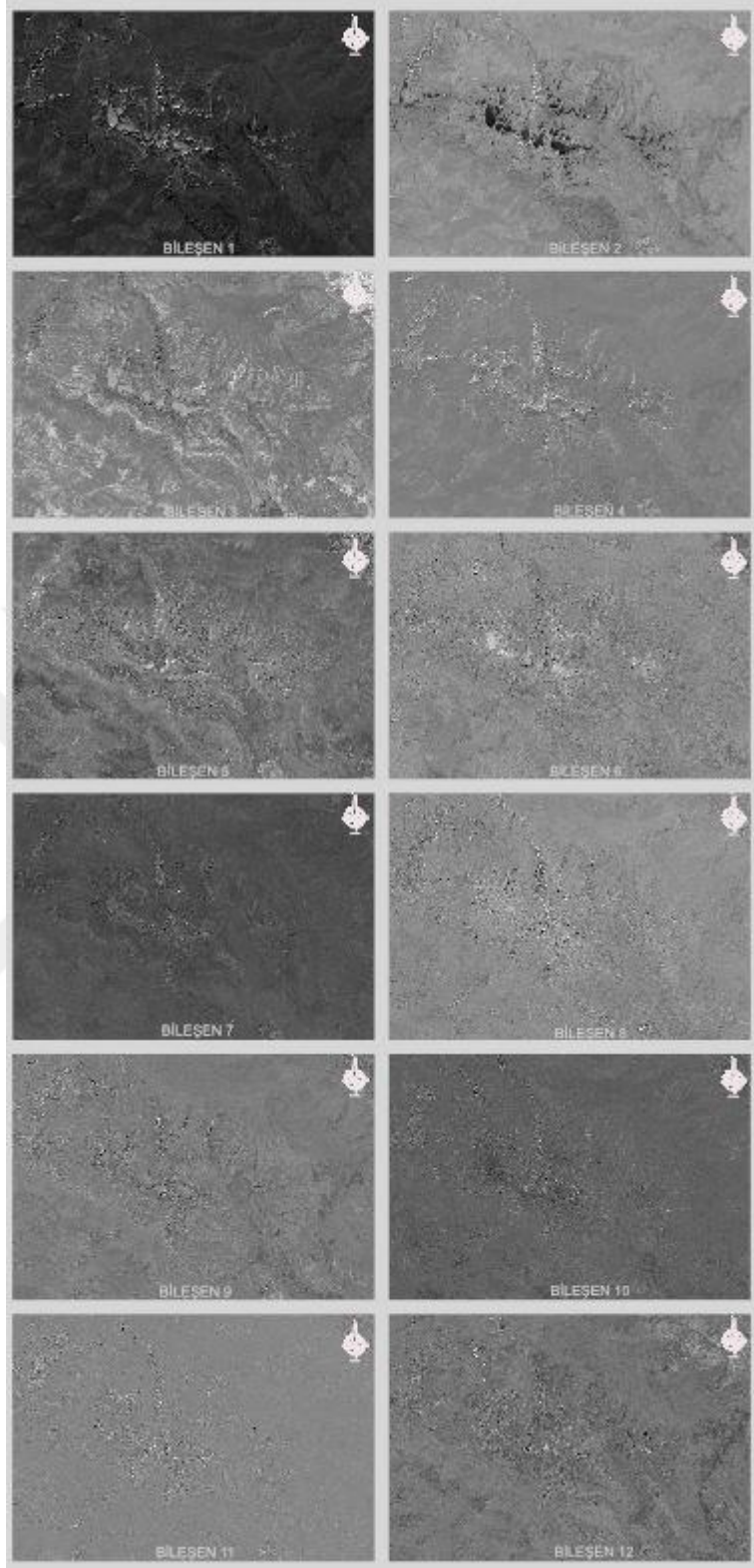


Şekil 5.12. Erinç Buzulundan alınan bir kesite ait Bant-4 histogram grafiği.

NDGI indeksinin aritmetik formülü iki bant arasındaki farka göre sonuç verdiğiinden dolayı Sentinel-2 görüntüsüne ait Bant-3 ve Bant-4 yansıma değerlerinin birbirine çok yakın olması bu indeks için kullanılabilir bir sonuç vermemiştir. Bu sebeple tez kapsamında buzul çıkarımı için kullanılmamıştır.

5.4 NDPCSI Uygulaması ve Sonuçları

NDPCSI (Sibandze vd., 2014), temel bileşen analizi (PCA) kullanılarak elde edilen bir indekstir. Bunun için SNAP yazılımı kullanılarak Sentinel-2 görüntüleri PCA işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem ile bantlar arası korelasyonun giderilmesi ve birbirlerinden içerdikleri bilgiler bakımından bağımsız bantlar (Şekil 5.13.) oluşturulması hedeflenmiştir. Elde edilen bileşenler içinden çalışma alanı ile ilgili en parlak ve en karanlık bileşenlerin Bileşen-1 (en karanlık), Bileşen (en parlak) olduğu belirlenmiştir. Ancak buzul alanlarının görsel analizinde en karanlık görüntüyü veren Bileşen-2, en parlak görüntüyü veren bileşenin ise Bileşen-3 olduğu görülmüştür. Tez kapsamında amaç buzul alanlarının izlenmesi olduğu için bu bileşenler NDPCSI için daha öncesinde belirlenen formüle uygun olarak SNAP yazılımında aritmetik işleme tabi tutulmuş ve değişik eşik değerleri ile test edilmiştir. Aynı işlemler Bileşen-1 ve Bileşen-2 için de yapılmış olup sağlıklı sonuçlar alınamamıştır.



Şekil 5.13. 2019 yılına ait Sentinel-2 görüntüsüne temel bileşen analizi yapıldıktan sonra oluşan bileşenler.

Çalışma alanında bulunan buzulları en belirgin gösteren eşik değeri 0.4 olarak belirlenmiş ve uygulanmıştır (Şekil 5.14). Ancak oluşan görüntüde sadece buzul alanları değil bölgenin geri kalanında buzul veya kar örtüsü olmadığı halde yansımaya değeri veren pikseller ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.14. 2017 yılına ait NDPCSI uygulanmış ve 0.4 eşik değerine tabi tutulmuş Sentinel-2 görüntüsü.

Görüntüden de anlaşılacağı üzere buzul bulunan bölgelerde iyi sonuç veren görüntü diğer bölgelerde de yansımaya değeri vermesinden dolayı otomatik çıkarım için uygun değildir. Bölge üzerinde NDPCSI uygulaması sonucunda yansımaya değeri veren bölgelerin ayrıca incelenmesi, neden yansımaya değeri verdiğine dair fikir sahibi olunmasına olanak sağlayabilir. Bölge üzerinde maske kullanılması indeks sonucunda sadece buzulların elde edilmesine yardımcı olabilir. Tez amacı gereği buzul çıkarımında otomatikleşme gereksinimi şu aşama için maske kullanılmasını gerektirmediği için herhangi bir maske kullanılmamıştır. Bu indeks her ne kadar tez çalışmasının amacına uygun olarak kullanılamasa da üzerinde incelemeler yapılması faydalı olabilir. Buzul bölgesi diğer alanlardan ayrı olarak ele alındığı takdirde buzul izleme çalışmalarında bölgesel olarak kullanılabilir.

5.5 Sonuçların Karşılaştırılması

Tez için yapılan literatür taramalarında en çok kullanılan indeksler belirlenmiş olup, bu indeksler çalışma alanında kullanılmıştır. NDSI ve NDSII indeksleri bölgedeki kar ve buz örtüsü hakkında referans verisi ile uyum sağlayarak kar ve buz örtüsünün zamansal değişiminin izlenmesini sağlamıştır. NDGI ve NDPCSI indekslerin sonuçları inceleyebilir olsa da buzul izleme çalışmaları için otomatik çıkarım konusunda sonuç vermemiştir. Bu sebeple sadece NDSI ve NDSII indeks sonuçları izleme açısından değerlemeye alınmış ve incelenmiştir.

NDSI verileri HGM Küre üzerinden 2019 yılına ait referans verileri ile karşılaştırılmış ve bölgede bulunan büyük buzullar ile 0.4 eşik değeri aralığında uyumlu olduğu görülmüş ve alan hesaplamaları buna göre yapılmıştır. Ancak çalışma alanında bulunan Kervan ve Kelyanur Göllerinin (Şekil 5.15) indeks görüntüleri incelendiğinde, çalışma alanının kuzey doğu tarafında bulunan Kervan Gölü NDSI uygulanmış görüntüde buzul olarak tespit edildiği görülmüştür. Kervan Gölü'nün 1 km doğusunda bulunan Kelyanur Gölü ise 0.4 eşik değerinde buzul olarak sınıflandırılmamıştır. HGM Küre uygulamasından iki gölün de yaklaşık 3000 metre rakımda olduğu görülmektedir. Coğrafi olarak Kervan Gölü'nün etrafının yüksek rakımlı tepelerle çevrili olması ortalama güneşlenme süresini düşürdüğünden, görüntünün alındığı dönemde buzlu olma ihtimali yüksektir.



Şekil 5.15. HGM Küre uygulamasından alınmış Kervan ve Kelyanur Göllerinin 3B perspektif görüntüsü.

Buzul izleme çalışmalarının otomatikleştirilmesi adına NDSI değerlerinin su kaynaklarını buzul olarak algılaması bir dezavantaj oluşturmaktadır. Buzul izleme konusunda etkinliği göz önünde bulundurularak izleme alanında ve yakınında olan sulu bölgelerin kontrol alanı dışında bırakılması NDSI değerlerinin yine de kullanılabilmesine olanak sağlayabilir.

Tez kapsamında Cilo buzulları bölgesinde Sentinel-2 görüntülerine NDSI uygulanmış ve sonuç veriler gösterilmiştir. Grafik 5.1 de gösterilen alan değişime bakılacak olursa 2017'den 2018'e buzul alanlarında azalma mevcutken 2019 yılında büyük bir artış gözlenmiştir. Bu bölgenin meteorolojik verilerine göre (Şekil 3.11) yıllık olarak toplam kar yağışlı gün sayısı 2018 ve 2019'da yaklaşık olarak aynıyken Şekil 3.12'de gösterilen yıllık ortalama sıcaklık verilerinde 2019 yılında ortalama sıcaklıkta büyük bir düşüş gözlenmiştir. Bu verilerden yola çıkarak 2018 ve 2019 da görülen kar yağışlı gün sayısının artması 2019 yılındaki düşük ortalama sıcaklıkla birlikte erimenin azalmasını ve o yıl için kar birikiminin fazla olmasına sebebiyet verdiği söylenebilir. Sonuç olarak Şekil 5.5'te 2019 yılında buzul alanlarında bir artış görülmüştür. 2020 yılında ortalama sıcaklığın yaklaşık olarak 2019 yılı ile aynı olmasına rağmen toplam kar yağışlı gün sayısındaki azalma 2020 yılında buzul alanlarında azalmaya sebebiyet verirken 2021 ve sonrasında ortalama sıcaklığın artması ile buzul alanlarında 2022'ye kadar düşüş devam etmiştir. 2022 yılında ortalama sıcaklıktaki bir miktar düşüğe ek olarak kar yağışlı gün sayısındaki artış ile birlikte toplam alanda artış gözlenmiştir. Meteorolojik veriler ışığında NDSI sonuçlarını özetlendiğinde;

- Erinç Buzulu için 2017 yılında NDSI sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.71 km² iken 2022'de yaklaşık %40'lık bir azalma göstererek 0.50 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.73 km² olmuştur.
- Batı Mia Hvara Buzulu için 2017 yılında NDSI sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.35 km² iken 2022'de yaklaşık %60'lık bir azalma göstererek 0.22 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.36 km² olmuştur.
- Orta Mia Hvara Buzulu için 2017 yılında NDSI sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.23 km² iken 2022'de yaklaşık %20'lık bir azalma göstererek 0.19 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.23 km² olmuştur.

- Doğu Mia Hvara Buzulu için 2017 yılında NDSI sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.30 km² iken 2022'de yaklaşık %36'lık bir azalma göstererek 0.22 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.33 km² olmuştur.
- Gelyaşın Buzulu için 2017 yılında NDSI sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.90 km² iken 2022'de yaklaşık %9'lık bir azalma göstererek 0.82 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.94 km² olmuştur.
- Poyraztepe Buzulu için 2017 yılında NDSI sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.35 km² iken 2022'de yaklaşık %58'lık bir azalma göstererek 0.15 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.43 km² olmuştur. Poyraztepe Buzulunu bölgedeki diğer buzullardan ayıran özelliği diğer buzulların genel olarak bir bütün bulunması, Poyraztepe Buzulunun ise bölgede irili ufaklı bir çok buzuldan meydana gelmesidir. Bu sebeple bu buzul diğer buzullara göre sıcaklık değişimlerine daha hızlı tepki vermektedir.

Bölge üzerinde yüksek doğruluk veren diğer indeks NDSII olmuştur. NDSI indeksine kıyasla sulu bölgelerin kar ve buz örtüsüyle ayrımı konusunda daha etkili olan bu indeks bölge üzerinde otomatik buzul izleme çalışmaları için daha uygun bir indeks olarak öne çıkmaktadır.

NDSII için HGM Küre üzerinden 2019 yılına ait buzul verileri alınmış ve 2019 yılı Sentinel-2 uydu görüntülerine NDSII uygulanmıştır. Eşik değeri olarak en uygun değer literatür taramaları da göz önünde bulundurularak 0.4 olarak belirlenmiş ve referans verileri ile uyumlu olduğu görülerek diğer yıllar içinde aynı eşik değeri uygulanmıştır. Çıkan sonuçlar vektöre çevrilerek alan hesaplaması yapılmıştır.

NDSII uygulanmış görüntüler üzerinde yapılan ve Şekil 5.9'de gösterilen alan değişimine bakıldığında, 2017'den 2018'e buzul alanlarında azalma mevcutken 2019 yılında büyük bir artış gözlenmiştir. Bu aşamada bölge meteorolojik verilerine bakılmıştır. Şekil 3.11'de yıllık olarak toplam kar yağışlı gün sayısı 2018 ve 2019'da yaklaşık olarak birbiri ile aynıyken Şekil 3.12'de gösterilen yıllık ortalama sıcaklık verilerinde 2019 yılında ortalama sıcaklıkta büyük bir düşüş gözlenmiştir. Bu verilerden yola çıkarak 2018 ve 2019 da görülen kar yağışlı gün

sayısının artması 2019 yılındaki düşük ortalama sıcaklıkla birlikte erimenin azalmasını ve o yıl için kar birikiminin fazla olmasına sebebiyet vermiştir. Sonuç olarak Şekil 5.8’de 2019 yılında buzul alanlarında bir artış görülmüştür. 2020 yılında ortalama sıcaklığın yaklaşık olarak 2019 yılı ile aynı olmasına rağmen toplam kar yağışlı gün sayısındaki azalma 2020 yılında buzul alanlarında azalmaya sebebiyet verirken 2021 ve sonrasında ortalama sıcaklığın artması ile buzul alanlarında 2022’ye kadar düşüş devam etmiştir. 2022 yılında ortalama sıcaklıktaki bir miktar düşüğe ek olarak kar yağışlı gün sayısındaki artış ile birlikte toplam alanda artış gözlenmiştir. Meteorolojik veriler ışığında NDSII sonuçları özetlenirse;

- Erinç Buzulu için 2017 yılında NDSII sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.69 km² iken 2022’de yaklaşık %33’lük bir azalma göstererek 0.52 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.74 km² olmuştur.
- Batı Mia Hvara Buzulu için 2017 yılında NDSII sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.33 km² iken 2022’de yaklaşık %32’lik bir azalma göstererek 0.25 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.37 km² olmuştur.
- Orta Mia Hvara Buzulu için 2017 yılında NDSII sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.22 km² iken 2022’de diğer buzullara göre çok az bir miktar küçülerek 0.21 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.24 km² olmuştur.
- Doğu Mia Hvara Buzulu için 2017 yılında NDSII sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.28 km² iken 2022’de yaklaşık %17’lik bir azalma göstererek 0.24 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.35 km² olmuştur.
- Gelyaşin Buzulu için 2017 yılında NDSII sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.87 km² iken 2022’de diğer buzullara göre çok az bir miktar küçülerek 0.86 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.96 km² olmuştur.

- Poyraztepe Buzulu için 2017 yılında NDSII sonuçlarına göre toplam buzul alanı 0.37 km² iken 2022’de yaklaşık %85’lik bir azalma göstererek 0.20 km² olmuştur. 2022 sonrası ise yağış miktarında artışa ek olarak ortalama sıcaklığın düşmesi ile 0.42 km² olmuştur. Poyraztepe Buzulunu bölgedeki diğer buzullardan ayıran özelliği diğer buzulların genel olarak bir bütün bulunması, Poyraztepe Buzulunun ise bölgede irili ufaklı birçok buzuldan meydana gelmesidir. Bu sebeple bu buzul diğer buzullara göre sıcaklık değişimlerine daha hızlı tepki vermektedir.

Buzulların izlenmesi söz konusu olduğunda NDSI ve NDSII indekslerinin ikisi de başarı ile takip sağlamaya elverişlidir. Sulu bölgelerde NDSII verilerinin kullanılmasının daha sağlıklı sonuçlar verebileceği de ortaya çıkmıştır. Bulguların meteorolojik verilerle birlikte incelenmesi bölgesel hız ve yönün bulunması konusuna ışık tutması bakımından önem arz etmektedir.

6. TARTIŞMA

Bu çalışmada Cilo Buzullarının incelenmesinde Sentinel-2 görüntülerinden üretilen dört farklı spektral indeks (NDSI, NDSII, NDGI ve NDPCI) değerlendirilmiş, bunlardan NDSI ve NDSII indekslerinin hız ve büyüklük belirleme konusunda kullanımının uygun olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak uzun zamanlı izleme için bölgede yapılan diğer çalışmaların da incelenmesi gerekmektedir.

Sonuçlar meteorolojik parametreler ile birlikte yorumlandığında daha anlamlı hale gelmektedir. Tez kapsamında incelenen bölgede buzulların sürekli azalması söz konusu değil gibi gözükse de artışların meteorolojik veriler ışığında dönemsel kar yağışların fazlalığı ve ortalama sıcaklıklardaki düşüşler sonucunda olduğu görülmüştür. Bir kar kütesinin buzul olarak adlandırılabilmesi için yıllar boyunca sürekli kar birikiminin olması ve oluşan birikintilerin oluşturduğu basınç ile kar kütesinin sertleşmesi gerekmektedir (USGS - The United States Geological Survey, 2024). 2019 yılındaki kar kütesinin buzullar etrafında yoğunlaşması bir sonraki yılda görülen sıcaklık artışı ve yağış azlığı sebebi ile buzula dönüşmeden kütenin erimesi sonucunu doğurarak buzul kütesine bir fayda sağlamamaktadır.

Tez konusunda seçilen bölge üzerinde yapılan diğer çalışmalar 2016 yılına kadar mevcuttur. Çalışmada zaman aralığı 2017-2023 arası seçilmiş olup, bu zaman diliminde başka çalışma ile karşılaşılmadığı için bir kıyaslama yapmak mümkün olmamıştır. Ancak bu çalışmanın önceki yıllarda yapılan çalışmalar açısından devam niteliği taşıması nedeniyle elde edilen verilerin tutarlılığı konusunda bir kıyas yapmak mümkündür.

Bölge ile alakalı ilk çalışmalar 1940 yılında Bobek tarafından yapılmıştır. Sonraki yıllarda bu bölgede en çok çalışma yapanlardan biri ise Sırrı Erinç'tir. Erinç 1952 ve 1953 yıllarında çalışmalarda bulunmuştur. Ardından bölge ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Son olarak 2016 yılında Mehmet Varol bölge ile ilgili kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Çalışmasında önceki yıllara ait veriler ışığında bir alan izlemesinde bulunmuştur.

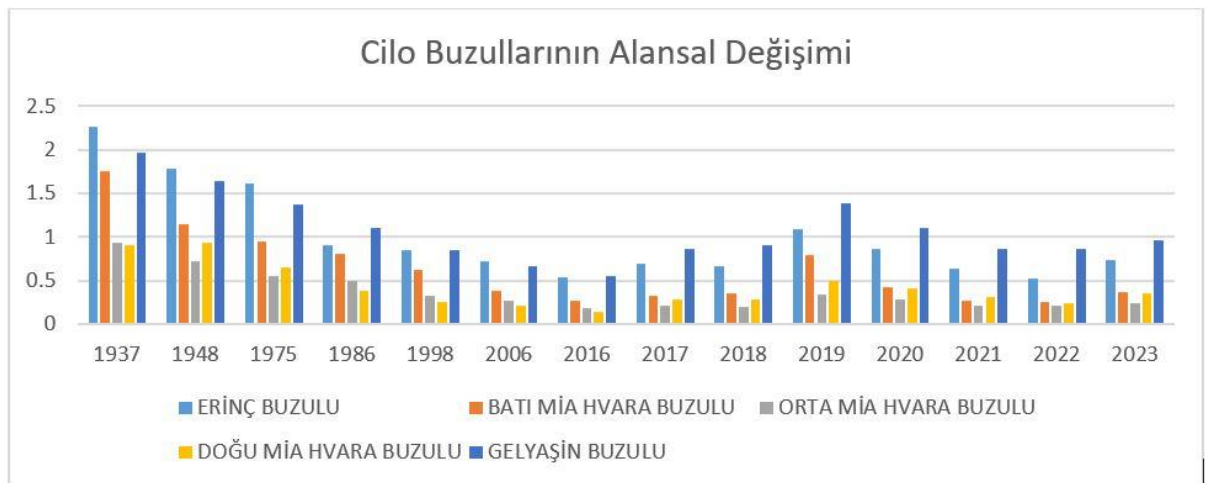
Tez kapsamında elde edilen Sentinel-2 görüntüleri 2017 yılından başlaması sebebi ile Varol (2017) tarafından elde edilen veriler ile kıyaslama yapılması uygun görülmüştür. Varol (2017), 1937 ve 1948 yıllarında buzullar ile ilgili yapılan yersel ölçümleri de kullanarak alansal

değişimi 1975 yılı Landsat 2- MSS, 1986 yılı Landsat 5 – TM, 1998 yılı Landsat 5 – TM, 2006 yılı Landsat 5 – TM ve 2016 yılı Landsat 8 – OLI görüntülerini kullanarak izlemiştir. Çalışmada buzul tespiti için kullanılabilecek indekslere yer verilse de, alan değerlerini hangi indekse dayalı olarak çıkardığı açıklanmamıştır. Geçmiş sonuçları da derleyerek Çizelge 6.1 de sunulan alansal değerleri paylaşmıştır. 79 yıllık bir zaman dilimi içerisinde 7 farklı yılın değerlerine yer verdiği tablosunda alan değişimi izlendiğinde doğrusal bir azalma söz konusudur.

BUZUL İSİMLERİ	YIL	1937	1948	1975	1986	1998	2006	2016
ERİNÇ BUZULU		2.26	1.78	1.61	0.91	0.85	0.72	0.54
BATI MİA HVARA BUZULU		1.75	1.15	0.95	0.81	0.62	0.39	0.27
ORTA MİA HVARA BUZULU		0.94	0.73	0.56	0.49	0.33	0.27	0.19
DOĞU MİA HVARA BUZULU		0.9	0.93	0.65	0.39	0.26	0.21	0.15
GELYAŞIN BUZULU		1.96	1.64	1.38	1.1	0.85	0.67	0.55

Çizelge 6.1. Varol (2017) tarafından elde edilen buzul alanları (km²).

Bu tez çalışmasında ise 7 yıl olarak elde edilen görüntüler üzerinden inceleme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Varol (2017) tarafından elde edilen sonuçlarla birleştirilerek grafik gösterimi hazırlanmıştır (Şekil 6.1). Şekilden de anlaşılacağı üzere Varol (2017) tarafından hazırlanan veriler 2016 yılına kadar olan süreçte buzulların düzenli olarak eridiğini göstermektedir. Ancak bu verilerin yaklaşık 80 yıllık bir süreyi kapsadığı ve bu süre zarfında 7 farklı yıl olarak verilerin alındığı göz önünde bulundurularak düzenli bir düşüş görülmesi beklenebilir.



Şekil 6.1. Varol (2017) tarafından hazırlanan verilerin tez kapsamında hazırlanan veriler ile birlikte gösterilmesi.

Bu tez kapsamında ele alınan yıllık periyotlardaki görüntülerin düzensiz alan büyüklükleri göstermesi ise tamamen bölgesel meteorolojik parametreler ile alakalıdır. Her ne kadar 2019 ve 2020 yıllarında alansal büyümeler gözükse de, bu değerler bölgesel yağış miktarındaki artış ve ortalama sıcaklık düşüşlerine bağlıdır. Bu dönemlerde kar ve buzul büyüklüklerinde görülen artışlar uzun vadeli olmamasından kaynaklı olarak buzul oluşumunda bir etkiye sahip değildir. İlerleyen yıllarda görülen sıcaklık artışları ve yağış miktarındaki düşüşler sonucu azalan alan geçmiş yıllardaki artışların buzul değil kar örtüsü olduğunu ortaya koymaktadır.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında Sentinel-2 verileri üzerinde farklı indeksler kullanılarak Cilo Buzullarının inceleme ve izlemesi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde elde edilen sayısal veriler ışığında ortaya çıkan sonuçlar derlenmiş ve yorumlanmıştır.

7.1 Bulgular

Tez kapsamında Cilo buzulları ele alınmış olup, yapılan literatür araştırmaları sonucu en sık kullanılan indekslerin (NDSI, NDSII, NDGI, NDPCSI) Sentinel-2 görüntülerine uygulanması ile buzulların alansal olarak yüksek doğrulukla tespit edilip edilemeyeceği incelenmiştir. Ayrıca başarılı bulunan NDSII yardımı ile buzulların değişim ve hızları incelenmiştir. İndeks sonuçlarına göre ortaya çıkan verilerden alınan alansal değerler buzulların büyüklüklerindeki değişimlerin izlenmesi sağlamıştır.

Literatür taramalarından elde edilen NDSI ve NDSII indekslerinin kullanımı tez çalışmasının amaçlarına uygun bulunmuştur. Sentinel-2 görüntülerine bu indeksler ayrı ayrı uygulanmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. İndeks sonuçlarına farklı eşik değerleri uygulanmış ardından bu değerler ile 2019 yılına ait referans verileri karşılaştırılarak en uygun eşik değerinin bulunması hedeflenmiştir. Referans veri olarak 2019 yılına ait hava fotoğrafları ve sayısal yükseklik modelinden elde edilen buzul sınırları alansal olarak en yüksek doğruluğu sağlayan NDSI ve NDSII eşik değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. En yüksek alansal tutarlılığın her iki indeks için de 0.4 eşik değerinde elde edildiği bulunmuştur. NDPCSI sonuçlarına uygulanan eşik değerlerinin ise buzul bölgelerinde sonuç verse bile sahanın diğer kısımlarında da buzul tespit etmesi sonuçların otomatik buzul izleme çalışmaları için uygun olmadığını ortaya koymuştur. Bu nedenle bu indeks izleme amaçlı kullanılmamıştır. NDGI indeksi ise aynı şekilde başarısız sonuçlar üretmiş ve kullanılmamıştır.

Cilo Buzullarında geçmişten günümüze kadar yapılan çalışmalara bir bütün olarak bakıldığında buzullarda yüksek oranda erime olduğu görülmektedir. Satır (2016) çalışması göz önünde bulundurulduğunda 1937 den 2023 yılına gelindiğinde bölgenin en büyük buzullarından olan

Erinç buzulunun yaklaşık olarak %30'luk kısmının günümüze ulaştığı görülmektedir. Poyraztepe bölgesinde bulunan irili ufaklı buzulların çoğunun günümüzde yok olduğu, görüntü alınan dönemlerde çoğu bölgenin yüksek yağış kaynaklı kar örtüsü olduğu düşünülmektedir.

Tez kapsamında kullanılan Sentinel-2 verilerinin indeksler yardımı ile buzul izleme çalışmalarında kullanılabileceği hatta bu işlemlerin otomatik hale getirilerek sürekli izleme amacı ile kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır. Sentinel-2'nin yüksek çözünürlüğe sahip görüntüleri sayesinde izleme çalışmalarında elde edilen hassasiyet yüksektir. Aynı zamanda görüntüleme periyotlarının kısa olması sayesinde izleme çalışmaları aktif ve düzenli olarak gerçekleştirilebilir. Profesyonel ve amatör olarak bu konu üzerinde çalışmak isteyen kişiler için Sentinel-2 verilerinin ücretsiz erişimde olması da bu konuda çok büyük bir avantaj sağlamaktadır. Tez genelinde yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak Sentinel-2 verilerinin sadece bu tez için değil, gelecekte yapılacak olan benzer çalışmalar için kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Diğer yandan sonuçlardan kar etkisinin arındırılması amacıyla doğru mevsimlerde alınan görüntülerinin kullanılması elzemdir. Aynı zamanda sonuçların meteorolojik parametrelerle de ilişkilendirilerek değerlendirilmesi kar etkisinin azaltılması açısından önemlidir. Yüksek kar yağışı ve düşük sıcaklık yaşanan yıllarda izlemenin yapılmaması daha uygun olacaktır.

7.2 Gelecek Çalışmalar ve Öneriler

Tez çalışmasında 2019 yılına ait hava ortofotoları ve sayısal yükseklik modellerine HGM Küre uygulaması üzerinden ulaşılarak referans veriler üretilmiş, buna dayanarak Sentinel-2 görüntülerinden buzul izleme için uygun indeksler ve eşik değerleri bulunmuştur. Ancak ileride yapılacak olan çalışmalarda referans verilerin daha hassas olabilmesi için bölgede bazı buzullar için yersel ölçümlerin yapılması indeksler üzerinde kullanılan eşik değerlerinin daha hassas seçilebilmesine olanak sağlayabilir. Yersel ölçümlerin olanak sağlamadığı eğimi yüksek ve tehlikeli bölgelerde insansız hava aracı platformundan alınacak veriler yardımı ile ölçümler yapılabilir. Referans verilerde sağlanan hassasiyet indekslerin eşik değeri seçiminde büyük önem taşımaktadır. Aynı şekilde konumsal çözünürlük de önemlidir.

Geçmişe kıyasla buzul kütlelerinin büyük ölçüde erimiş olması ve bölgede gelişen turizm göz önünde bulundurularak bölgeye ulaşımın ve ölçüm alınmasının geçmişe nazaran daha kolay olduğu ortadadır. Bu etkenler göz önünde bulundurularak farklı yöntemler ile referans verilerin ve bunların doğruluğunun artırılması önceliklidir.

Tezin ortaya çıkarmış olduğu sonuçlar göz önünde bulundurularak NDSI ve NDSII indekslerinin kullanımı yaygınlaştırılarak ilerleyen dönemlerde yerel ve küresel düzeyde buzulların aktif izlemesi gerçekleştirilebilir. Sürekli olarak elde edilebilecek Sentinel-2 verileri kullanılarak otomatik bir izleme sistemi geliştirilebileceği düşünülmektedir. Bu sistem sayesinde buzulların sadece kar örtüsünün kalktığı yaz aylarında alınan veriler ile değil yıl genelinde sürekli bir izleme çalışması ile daha kapsamlı değerlere ve çıkarımlara ulaşılabilir. Kış aylarında gerçekleşen yağışlar sonucu oluşan kar örtüsünün azlığının veya çokluğunun yaz aylarında buzullar üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu gözlemlenebilecektir.

Böyle bir otomatik izleme sisteminin gerekli kurumlar ile işbirliği kurması buzulların yok olma ihtimaline karşı önlemler alınmasını kolaylaştıracaktır. Buzulların bölgesel olarak önemleri göz önünde bulundurularak gerekli önlemlerin ivedilikle alınabilmesi için devlet desteği önem arz etmektedir. Devlet kurumlarının altyapısı ve imkanları kullanılarak daha hassas veriler ile daha doğru sonuçlara ulaşmak kolaylaşacaktır. Yapılan akademik çalışmalar bir sorunu ortaya çıkarabilse de sorunun çözümü için daha büyük araştırmaların yapılması ve uygulanabilmesi gerekmektedir. Bu aşamada gerekli algının yaratılması ve insanların bilgilendirilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda çalışma alanı ile alakalı bazı öneriler şu şekildedir;

- Tez kapsamında kullanılan indekslerin buzul izleme çalışmalarını kolaylaştırabileceği hatta otomatikleştirebileceği gösterilmiştir. Bu bağlamda bölgede düzenli periyotlar ile yapılacak çalışmaların meteorolojik veriler ile değerlendirilerek buzulların takibinin yapılması sağlanabilir.
- Bölgede bulunan buzullar hem bölge için hem de ülke için önemlidir. Bu bağlamda buzullar ile ilgili yapılan çalışmaların artırılması önem arz etmektedir. Bu tez kapsamında uzaktan algılama yöntemleri ile bazı yaklaşımlar öne sürülmektedir. Ancak böl-

genin önemi göz önünde bulundurularak yersel izleme ve ölçümlerin yapılması da gerekmektedir. Bu sayede buzulların durumları ve gelecekları hakkında daha kesin veriler ışığında hareket edilebilir.

- Buzullardaki erimeler yaz ve kış turizminin yapıldığı bölge için olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Kırılan buzullar bölgeye turistik amaçla gelen insanları ve spor meraklılarını tehlikeye atmaktadır. Bu konuda güvenlik önlemlerinin alınması ihtiyacı doğmuştur.
- Buzulların korunması amacı ile yapılan çeşitli çalışmalara mevcuttur. Bölge üzerinde yapılacak araştırmalar ile birlikte uygun maliyetli ve etkin koruma önlemleri alınabilir. Buzulları geçmiş günlerdeki fiziksel durumuna ulaştırmak mümkün olmasa bile en azından eriyerek ortadan kalkmasının önüne geçilebilir.

KAYNAKLAR

Ainsworth, W. (1842). Travels and Researches in Asia Minor, Mesopotamia, Chaldea, and Armenia (Vol. 2). John W. Parker..

Bahadır M. (2011). "Türkiye'deki Aktüel Buzul Alanlarının CBS ve UA ile Değişim Analizi (1990-2000),," TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi , Ankara, Turkey, pp.1-10, 2011

Byers, A. C. (2008). An assessment of contemporary glacier fluctuations in Nepal's Khumbu Himal using repeat photography. Himalayan Journal of Sciences, 4(6), 21–26. <https://doi.org/10.3126/hjs.v4i6.979>

Drolon, Vanessa & Maisongrande, Philippe & Berthier, Etienne & Swinnen, Else & Huss, Matthias. (2016). Monitoring of seasonal glacier mass balance over the European Alps using low-resolution optical satellite images. Journal of Glaciology. -1. 1-16. 10.1017/jog.2016.78.

Erinç, S., (1952a). Glacial Evidences of the Climatic Variations in Turkey, Geografiska Annaler., sayı: 1-2, 89-98.

Erinç, S., (1952b). The Present Glaciation in Turkey: Proceedings of the VIIIth General Assembly, XVIIth Congr. Inter. Geogr., 326-330.

Erinç, S., (1953). Van'dan Cilo Dağlarına, İ.Ü. Coğr. Enst. Derg. Sayı: 3-4, 84-106.

Erinç, S., (2010). Jeomorfoloji II (Güncelleştirilenler Ahmet Ertek ve Cem Güneysu), Der Yayınları, İstanbul.

European Space Agency, Sentinel-2, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2> (Erişim tarihi: 24 Nisan 2024).

Luzi, Guido & Pieraccini, Massimiliano & Mecatti, D. & Noferini, Linhsia & Macaluso, G. & Tamburini, Andrea & Atzeni, C.. (2007). Monitoring of an Alpine Glacier by Means of Ground-Based SAR Interferometry. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE. 4. 495 - 499. 10.1109/LGRS.2007.898282.

Google Earth. <https://www.google.com/earth/about/> (Erişim tarihi: 24 Nisan 2024).

İzbrak, R., (1951). Cilo Dağı ve ile Van Gölü Çevresinde Coğrafya Araştırmaları, Ankara Üniversitesi, Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Yayınları No. 67, Coğrafya Enstitüsü No. 4.

Jouvet G, Huss M. (2019). Future retreat of Great Aletsch Glacier. *Journal of Glaciology*. 2019;65(253):869-872. doi:10.1017/jog.2019.52

Kargel, Jeffrey S., et al. (2005). Multispectral imaging contributions to global land ice measurements from space. *Remote sensing of environment* 99.1-2: 187-219, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.004>.

Keshri, Amit & Shukla, Aparna & Gupta, R.. (2009). ASTER ratio indices for supraglacial terrain mapping. *International Journal of Remote Sensing - INT J REMOTE SENS*. 30. 519-524. 10.1080/01431160802385459.

Kumar, Mithun & Al-Quraishi, Ayad & Mondal, Ismail. (2020). Glacier changes monitoring in Bhutan High Himalaya using remote sensing technology. *Environmental Engineering Research*. 26. 10.4491/eer.2019.255.

Kurter A., (1988). Glaciers of Turkey, In Williams R. S., Ferrigno J. G., *Glaciers of the Middle East and Africa*, U.S. Geological Survey 1386-G-1.

Kurter A., Sungur K., (1980). Present Glaciation in Turkey, *World Glacier Inventory – Proceedings of Rierderalp Workshop*, IAHS-AISH Publ.No: 126, 155-160.

Kurter, A., (1979). Türkiye'nin Morfoklimatik Bölgeleri. İstanbul: İ.Ü Coğrafya Enstitüsü yayını.

Maunsell, Francis Richard. (1901). Central Kurdistan. *the Geographical Journal* 18/2 pp.121-144.

Müller F. (1958). Eight Months of Glacier and Soil Research in the Everest Region. In: *The Mountain World 1958/59*. New York: Harper and Brothers Publishers. p 191–208.

NASA (2024). Global Warming vs Climate Change. <https://climate.nasa.gov/global-warming-vs-climate-change/> (Erişim tarihi:25 Nisan 2024).

NASA, Terra Instruments, <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/aster> (Erişim tarihi: 24 Nisan 2024).

Dematteis, Niccolo & Luzi, Guido & Giordan, Daniele & Zucca, Francesco & Allasia, Paolo. (2017). Monitoring Alpine glacier surface deformations with GB-SAR. Remote Sensing Letters. 8. 947-956. 10.1080/2150704X.2017.1335905.

OSGeo, About OSGEO and QGIS, <https://www.osgeo.org/about/> (Erişim tarihi: 25 Nisan 2024).

Zhu, Qinghui & Ke, Chang-Qing & Li, Haili. (2021). Monitoring glacier surges in the Kongur Tagh area of the Tibetan Plateau using Sentinel-1 SAR data. Geomorphology. 390. 107869. 10.1016/j.geomorph.2021.107869.

Racoviteanu, Adina & Arnaud, Yves & Williams, Mark & Ez, Julio. (2008). Decadal Changes in Glacier Parameters in the Cordillera Blanca, Peru, Derived from Remote Sensing. Journal of Glaciology - J GLACIOLOGY. 54. 10.3189/002214308785836922.

Racoviteanu, Adina E., Mark W. Williams, and Roger G. Barry. (2008). "Optical Remote Sensing of Glacier Characteristics: A Review with Focus on the Himalaya" Sensors 8, no. 5: 3355-3383. <https://doi.org/10.3390/s8053355>

Sarıkaya, M. A., (2011). Türkiye'nin Günel Buzulları, Fiziki Coğrafya Kurumları: Sistemantik ve Bölgesel, Türk Coğrafya Kurumu Yayınları, Sayı 6: 527-544, İstanbul.

Sarıkaya, Mehmet & Ciner, Attila & Zreda,. (2011). Quaternary Glaciations of Turkey. 10.1016/B978-0-444-53447-7.00030-1.

Sarıkaya, M. (2011). Türkiye'nin günel buzulları. Fiziki Coğrafya Araştırmaları; Sistemantik ve Bölgesel, Türk Coğrafya Kurumu Yayınları, 1.

Satellite Imaging Corporation, Sentinel 2A, <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/sentinel-2a/>, (Erişim tarihi:15 Ocak 2024).

Satir, Onur. (2016). Comparing the satellite image transformation techniques for detecting and monitoring the continuous snow cover and glacier in Cilo mountain chain Turkey. Ecological Indicators. 69. 261 - 268. 10.1016/j.ecolind.2016.04.032.

Sentiwiki, S2 Products, <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-products>, (Erişim tarihi: 22 Mayıs 2024).

Sibandze, Phila & Mhangara, Paidamwoyo & Odindi, John & Kganyago, Mahlatse. (2014). A Comparison of Normalised Difference Snow Index (NDSI) and Normalised Difference Principal Component Snow Index (NDPCSI) techniques in distinguishing snow from related cover types. South African Journal of Geomatics. 3. 197-209. 10.4314/sajg.v3i2.6.

STEP, European Space Agency. <https://step.esa.int/main/> (Erişim tarihi: 6 Nisan 2024).

Terra Scope, SPOT-VGT, <https://docs.terrascope.be/#/Satellites/SPOT-VGT/MissionInstruments> (Erişim tarihi: 24 Nisan 2024).

The European Space Agency, Quickbird-2, <https://earth.esa.int/eogateway/missions/quickbird-2> (Erişim tarihi: 23 Nisan 2024).

The U.S. Geological Survey, Landsat Missions, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions> (Erişim tarihi: 23 Nisan 2024).

The U.S. Geological Survey, What is Glacier, <https://www.usgs.gov/faqs/what-glacier> (Erişim tarihi: 08 Mart 2024).

TÜBİTAK Uzay, RASAT, <https://uzay.tubitak.gov.tr/tr/uydu-uzay/rasat> (Erişim tarihi: 24 Nisan 2024).

Türkunal, S. (1951). Hakkâri dağları hakkında jeolojik not . Türkiye Jeoloji Bülteni , 3 (1) , 25-44 .

Workman, F. B. (1912). Survey of the Siachen Glacier. Bulletin of the American Geographical Society, 44(12), 897–903.

Wright, H. E., (1962). Pleistocene glaciation in Kurdistan, Eiszeitalter und Gegenwart, v. 12, 131-164.

Xiao, Xiangming & Shen, Zhenxi & QIN, XIAOGUAN. (2001). Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: a Normalized DiVerence Snow and Ice Index. International Journal of Remote Sensing. 22. 10.1080/01431160010002902.

Varol,M. (2017). Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Yöntemleri Kullanılarak Cilo (Buzul) Dağları'nda Aktif Buzul ve Şekillerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı, Hatay.

Yavaşlı, D. D. ve Ölgen, K., (2008). Assesing the Variation of Recent Glaciers in Buzul (Cilo) Mountain Remote Sensing and Meteorological Data, International Conference on Geographic Information Systems (IGIS), 2-5 July, s:163-170, Istanbul.

Yavaşlı, D. D., (2009). Türkiye Buzullarındaki Değişikliklerin Uzaktan Algılama ile Belirlenmesi, Basılmamış Yüksek lisans Tezi, Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı, İzmir.

Yeşilyurt, S. ve Doğan, U., (2010). Munzur Dağları'nın buzul jeomorfolojisi: CBS ve uzaktan algılama yöntemleri ile bir değerlendirme. TÜCAUM VI. Ulusal Coğrafya Sempozyumu (3-5 Kasım 2010) Bildiriler Kitabı.