

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ ALANLARININ ARAZİ ÖRTÜSÜ
DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

Aleksandra MELNIK

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ ALANLARININ ARAZİ ÖRTÜSÜ
DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

Aleksandra MELNIK

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NÜKLEER GÜÇ SANTRALI ALANLARININ ARAZİ ÖRTÜSÜ DEĞİŞİMLERİNİN
İNCELENMESİ

Aleksandra MELNIK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NÜKLEER GÜÇ SANTRALI ALANLARININ ARAZİ ÖRTÜSÜ DEĞİŞİMLERİNİN
İNCELENMESİ

Aleksandra MELNIK
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 19/07/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Nusret DEMİR (Danışman)

Doç. Dr. Serdar SELİM

Prof. Dr. Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU

ÖZET

NÜKLEER GÜÇ SANTRALI ALANLARININ ARAZİ ÖRTÜSÜ DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ

Aleksandra MELNIK

Yüksek Lisans Tezi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri

Danışman: Doç. Dr. Nusret DEMİR

Temmuz 2023; 73 sayfa

Bu tezin amacı, uzaktan algılama tekniklerini kullanarak Nükleer Güç Santrallerinin (NGS) çevresindeki arazi örtüsü değişikliklerini araştırmaktır. Özellikle, çalışma Chernobyl ve Kalinin Nükleer Enerji Santralleri' ne odaklanarak, zaman içindeki arazi örtüsü değişikliklerini analiz etmek ve izlemek için Landsat verilerini kullanılmıştır. Ayrıca, tez çevreye potansiyel etkileri açısından termal deşarj sorununu incelemektedir.

Araştırma metodolojisi, birkaç on yılı kapsayan çok zamanlı Landsat görüntülerinin toplanması ve ön işlemlerini içermektedir. Çalışma alanlarındaki bitki örtüsü dinamiklerini ve su kütlelerini değerlendirmek için Normalize Fark Bitki İndeksi (NDVI), Normalize Fark Su İndeksi (NDWI), SAVI (Toprak Ayarlı Bitki İndeksi), ARVI (Atmosferik Dirençli Bitki İndeksi), EVI (Arttırılmış Bitki İndeksi) VARI (Görünür Atmosferik Dirençli İndeks), NDII (Normalize Fark Kızılötesi İndeks) ve MSI (Nem Stres İndeksi) gibi çeşitli spektral indeksler hesaplanacaktır.

Tez kapsamında yapılan analiz, nükleer enerji santrallerinin çevredeki ekosistemlere uzun vadeli etkileri hakkında bilgi sağlayacaktır. Ayrıca, çalışma, özellikle nükleer enerji santrallerinin soğutma suyu deşarjının termal imzasına odaklanarak termal deşarj sorununu araştıracaktır. Gelişmiş termal kızılötesi uzaktan algılama teknikleri, NGS'lerden kaynaklanan termal akımının dağılımını ölçmek için kullanılacaktır.

Bu araştırmanın bulguları, nükleer enerji santrallerinin çevresindeki arazi örtüsü dinamikleri ve termal deşarj desenleri hakkında daha iyi bir anlayışa katkı sağlayacaktır. Ayrıca, çalışma, nükleer enerji santrali tesislerinin sürekli izlenmesi ve değerlendirilmesi için değerli bir araç olarak uzaktan algılamanın etkinliğini gösterecektir.

ANAHTAR KELİMELEER: Arazi Örtüsü değişimi, Çevresel Etki, Çernobil NGS, Değişim Tespiti, Kalinin NGS, Landsat Görüntüleri, Nükleer Güç Santrali, Spektral İndisler, Termik Kirlenme, Uzaktan Algılama, Yüzey Su Sıcaklığı, Zaman Serileri

JÜRİ: Doç. Dr. Nusret DEMİR

Doç. Dr. Serdar SELİM

Prof. Dr. Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU

ABSTRACT

INVESTIGATION OF LAND COVER CHANGES OF NUCLEAR POWER PLANT AREAS

Aleksandra MELNIK

MSc Thesis in Space Science and Technologies

Supervisor: Assoc. Prof. Nusret DEMIR

July 2023; 73 pages

The aim of this thesis is to investigate the land cover changes in the vicinity of nuclear power plants (NPPs) using remote sensing techniques. Specifically, the study focuses on the Chernobyl and Kalinin Nuclear Power Plants, employing Landsat data to analyze and monitor land cover variations over time. Additionally, the thesis examines the issue of thermal discharge and its potential impact on the surrounding environment.

The research methodology involves the collection and preprocessing of multi-temporal Landsat imagery, spanning several decades, to generate a comprehensive land cover classification. Various spectral indices, such as Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), SAVI (Soil- Adjusted Vegetation Index), ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), VARI (Visible Atmospherically Resistant Index), NDII (Normalized Difference Infrared Index) and MSI (Moisture Stress Index) will be calculated to assess vegetation dynamics and water bodies in the study areas.

The thesis will utilize change detection algorithms to identify and quantify land cover changes within the NPP regions. This analysis will provide insights into the long-term impacts of nuclear power plant operations on the surrounding ecosystems.

Furthermore, the study will investigate the thermal discharge issue associated with NPPs, particularly focusing on the thermal signature of cooling water release into adjacent water bodies.

The findings of this research will contribute to a better understanding of the land cover dynamics and thermal discharge patterns in the vicinity of nuclear power plants. The results can be utilized by environmental managers and policymakers to monitor and mitigate the environmental impact of NPP operations, particularly in terms of land cover changes and thermal discharge effects. Moreover, the study will demonstrate the effectiveness of remote sensing as a valuable tool for ongoing monitoring and assessment of nuclear power plant facilities.

KEYWORDS: Change Detection, Chernobyl NPP, Environmental Impact, Kalinin NPP, Land cover changes, Landsat Data, Nuclear Power Plants, Spectral Indices, Surface Water Temperature, Thermal Discharge, Time Series

COMMITTEE: Doç. Dr. Nusret DEMIR

Doç. Dr. Serdar SELİM

Prof. Dr. Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU

ÖNSÖZ

*“Düşünce, insanın bütün itibarını oluşturur;
bu nedenle iyi düşünmeye çalışın, tek ahlak budur.”*

B. Pascal

“Daha iyi düşünmeye çalışmak” – kanaatimce bilimsel yolculuğuna adım atmış veya atmaya düşünen her bireyin birincil amaçlarından biri olmalıdır. Benim de bu güzel, ama o kadar da zorlu serüvenin yapı taşı olan ilkelerinden biri de buydu. Yüksek lisans sürecinin olumlu sonuçlanması durumunda ise bence değerli olan alınacak ‘Master of Science’ ünvanından ziyade, bir tık daha güzel ve sistematik düşünme yeteneğidir ve edinilen bilgilerdir.

Bu serüven benim için hiç kolay olmadı. Beklemediğim bir şekilde hayatımdaki muhtemelen en global değişimler Yüksek Lisans süresince yaşadım: 3 farklı iş, 3 farklı şehir ve 2 ülke ve evlilik.

Konun seçimi aslında çocukluğuma dayanır. Bir zamanlar küçük bir kız çocuğu iken Çernobil olayına merak sarmanın ardından nükleer fiziğe karşı ilgi duymaya başladım. Yıllar geçti ve lisans eğitimini tamamladıktan sonra yüksek lisans 1. Sınıf öğrencisiyken Türkiye’de halen inşaat halinde olan Akkuyu Nükleer Güç Santrali projesinde yer alma fırsatım oldu. Çocukluğumda merak edip araştırdığım bu devasa enerji üreten mekanizmaların yapım aşamasının içinde olmak inanılmaz heyecan vericiydi. O zaman yüksek lisansını yaptığım ana bilim dalını çalıştığım alanı ile birleştirmek fena bir fikir olmadığını düşündüm ve işe koyuldum. Akkuyu Nükleer Projesinden sonra beni aynı derecede ilginç ola başka bir proje daha beni bekliyordu – Bangladeş’te inşa edilen Rooppur NGS. Orada, teknoloji ve uzay çağında olan bu dünyanın diğer köşelerinde insanların elektrik gibi, temiz su ve hava gibi temel ihtiyaçlarından yoksun olduğunu gördüm ve bu, seçtiğim konunun ne kadar önemli olduğunu bir daha bana hatırlamamı sağladı.

Bu süreçinde sonsuz sabrı, desteği ve anlayışı için danışman hocama olan Doç. Dr. Nusret Demir’e teşekkürlerimi sunmak isterim. “Akademisyen ve bilim insanı profili nasıl olmalıdır?” denildiği zaman ilk olarak şüphesiz Nusret hocam aklıma gelir. Yüksek Lisans, Lisans eğitiminin devamı olduğundan dolayı Lisans boyunca alma-mater olan Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesinin Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümünde bizim daha “iyi düşünmek” için yol gösteren hocalarıma teşekkür etmesem olmaz. Prof. Dr. Ali Kılçık, Dr. Burçin Dönmez, Prof. Dr. Timur Şahin, Doç. Dr. Serdar Selim, Prof. Dr. Hicran Bakış, Dr. Volkan Bakış, Doç. Dr. Murat Kaplan hocalarımla katkısı paha biçilemez.

En yakın arkadaşım, yoldaşım, dert kardeşim olan pırlanta gibi bir hanımefendi Çiğdem Esendağlı’ya iyi bir dost olduğun için teşekkür eder ilk adımlar attığı ama o kadar da ciddi bir yol katettiği kariyerinde başarılar diliyorum.

Ve son olarak, Yüksek Lisans süresince hayatıma giren eşim Aleksei Basov’a ne kadar teşekkür etsem azdır. Daima yanımda olan, destekleyen, zor zamanlarında kin tutmayıp sabreden, hasta olduğumda bakan, mutlu olduğumda mutluluğu benimle paylaşan, üzülünce benimle üzülen ve mutlu olmam için elinden geleni her şey yapan canım eşim, iyi ki varsın, iyi ki benim eşimsin.

Daha iyi düşünmeye dileği ile....

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1 Nükleer Enerji.....	3
2.2. Nükleer Güç Santrali	4
2.2.1. Çernobil Kazasının Kısa Tarihi.....	5
2.3. İyonlaştırıcı Radyasyon.....	7
2.3.1 İyonlaştırıcı Radyasyonun Çevreye Olan Etkileri.....	8
2.3.1.1. Bitkiler ve Hayvanlar Üzerindeki Etkiler.....	8
2.3.1.2. Tarım Üzerindeki Etkiler.....	9
2.3.1.3 Su Kaynakların Üzerindeki Etkiler.....	9
2.4. Uzaktan Algılama.....	10
2.4.1 Uzaktan Algılamada Arazi Örtüsü Değişimi.....	10
2.4.2. Uzaktan Algılamanın Nükleer Santral Çevresi Analizinde Kullanımı.....	11
3. MATERYAL VE METOD.....	13
3.1. Veri.....	13
3.2. Çalışma Alanı.....	14
3.2.1. Çernobil Nükleer Güç Santrali.....	14
3.2.2. Kalinin Nükleer Güç Santrali.....	15
3.3. Metot.....	17
3.3.1. Ön İşleme	17
3.3.2. Zaman Serileri Analizi.....	18
3.3.2.1. NDVI.....	19
3.3.2.2. ARVI.....	20
3.3.2.3. SAVI.....	20

3.3.2.4. NDVI.....	21
3.3.2.5. VARI.....	21
3.3.2.6. NDII.....	21
3.3.2.7. MSI.....	22
3.3.2.8. Zaman Serilerinin Oluşturulması.....	22
3.3.3 Yüzey Su Sıcaklığının Belirlenmesi	23
4. BULGULAR VE TARTIşMA	
4.1. Arazi Örtüsü Değişimi.....	26
4.2. Yüzey Su Sıcaklığı	53
4.2.1. Çernobil NGS.....	53
4.2.2. Kalinin NGS.....	55
5. SONUÇLAR.....	62
5.1. Arazi Örtüsü Değişimi.....	62
5.2. Yüzey Su Sıcaklığı.....	63
6. KAYNAKLAR.....	65
7. EKLER.....	73
ÖZGEÇMİş	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Nükleer Güç Santrali Alanlarının Arazi Örtüsü Değişimlerinin İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../2023

Aleksandra Melnik

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

K	: Kelvin
Km	: Kilometre
m	: Metre
σ	: Boltzmann sabiti
h	: Planck sabiti
s	: Saniye
kWh	: Kilowatt saat
J	: Joule
μm	: Mikrometre

Kısaltmalar

AÜ	: Akdeniz Üniversitesi
NDVI	: Normalize Fark Bitki Örtüsü İndeksi
EVI	: Geliştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi
LSWT	: Yüzey Su Sıcaklığı
UA	: Uzaktan Algılama
NGS	: Nükleer Güç Santrali
SAVI	: Toprakla Düzeltilmiş Bitki Örtüsü
ARVI	: Atmosferik Dirençli Bitki Örtüsü İndeksi
VARI	: Görünür Atmosferik Direnç İndeksi
NDII	: Normalize Fark Kıızıl Ötesi İndeksi

MSİ : Nem Stres İndeksi

SAR : Sentetik aralıklı radar

keV : Kilo elektron volt

IAEA : Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (kaynak: https://www.kureselamaclar.org/).....	3
Şekil 2.2 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile nükleer enerji ve diğer nükleer teknolojiler arasındaki bağlantılar. Not: koyu renkler bağlantıları gösterir; açık renkler bağlantı olmadığını gösterir.....	4
Şekil 2.3. Nükleer fisyon.....	5
Şekil 2.4. RBMK reaktörün şeması.....	6
Şekil 2.5. Chernobyl hariç tutma bölgesinin sınırları ve kaza yaşanan 4. reaktörün konumu harita üzerinde gösterimi.....	7
Şekil 2.6. a) 1986 yılında inşa edilen geçici koruma sığınak; b) 2019 yılında inşaatı tamamlanan yeni güvenli sığınak.....	7
Şekil 3.1. Çernobil hariç tutma bölgesinin sınırları, kaza yaşanan 4. reaktörün konumu ve Pripyat şehrinin harita üzerinde gösterimi.....	15
Şekil 3.2. Kalinin Nükleer Güç Santralinin harita üzerinde gösterimi ve ESA arazi örtüsü. Çalışma alanı, santral etrafındaki 11 km’lik yarıçaplı gözlem bölgesidir.....	15
Şekil 3.3 Zaman serileri analizine ait iş akış şeması.....	18
Şekil 3.4. z-değerlerinin tamsayı değerleri için olasılık yüzdeleri (standart sapmalar); yüzdelik değerleri yaklaşık olarak gösterilmiştir.....	23
Şekil 3.5. Su yüzey sıcaklığı belirlenmesinde izlenen adımlarını içeren akış şeması....	24
Şekil 4.1. Çernobil farklı yıllara ait NDVI haritası.....	26
Şekil 4.2. Kızıl orman bölgesine ait 1985, 1986 ve 2022 yılına ait NDVI haritası; kırmızı ile işaretlenen bölge kızıl ormanın sınırlarını temsil etmektedir.....	27
Şekil 4.3. Çernobil 1986’dan başlayarak her on yıldaki NDVI anomali haritaları.....	28
Şekil 4.4. Çernobil farklı yıllara ait ARVI haritaları.....	28
Şekil 4.5. Çernobil 1986’dan başlayarak her on yıldaki ARVI anomali haritaları.....	29
Şekil 4.6. Çernobil farklı yıllara ait SAVI haritaları.....	29
Şekil 4.7. Çernobil 1986’dan başlayarak her on yıldaki SAVI anomali haritaları.....	30
Şekil 4.8. Çernobil farklı yıllara ait EVI haritaları.....	30

Şekil 4.9. Çernobil 1986'dan başlayarak her on yıldaki EVI anomali haritaları.....	31
Şekil 4.10. Çernobil farklı yıllara ait VARI haritaları.....	31
Şekil 4.11. Çernobil 1986'dan başlayarak her on yıldaki VARI anomali haritaları.....	32
Şekil 4.12. Çernobil farklı yıllara ait NDII haritaları.....	32
Şekil 4.13. Çernobil 1986'dan başlayarak her on yıldaki NDII anomali haritaları.....	33
Şekil 4.14. Çernobil farklı yıllara ait MSI haritaları.....	33
Şekil 4.15. Çernobil 1986'dan başlayarak her on yıldaki MSI anomali haritaları.....	34
Şekil 4.16. a) NDVI, b) ARVI, c) SAVI, d) EVI, e) NDII, f) VARI, g) MSI indekslerinin farklı yıllara ait görüntü farkı; kırmızı renk negatif, mor renk pozitif değişimi temsil etmektedir.....	35
Şekil 4.17. a) 1985/1986 belirli bir bölgenin MSI fark görüntüsü b) 1985/1986 belirli bir bölgenin ARVI fark görüntüsü.....	37
Şekil 4.18. Çernobil bölgesinin 1984 ile 2022 arasında ortalama değer NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin zaman serisi grafikleri: a) yıllık ortalama NDVI, b) yıllık ortalama ARVI, c) yıllık ortalama SAVI, d) yıllık ortalama EVI, e) yıllık ortalama NDII, f) yıllık ortalama MSI, g) yıllık ortalama MSI.....	39
Şekil 4.19. Çernobil bölgesinde NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin regresyon analizi.....	41
Şekil 4.20. Çernobil için korelasyon matrisi.....	43
Şekil 4.21. Kalinin bölgesine ait NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indeks haritaları.....	44
Şekil 4.22. Kalinin bölgesinin 1984 ile 2022 arasında ortalama değer NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin zaman serisi grafikleri: a) yıllık ortalama NDVI, b) yıllık ortalama ARVI, c) yıllık ortalama SAVI, d) yıllık ortalama EVI, e) yıllık ortalama NDII, f) yıllık ortalama MSI, g) yıllık ortalama MSI.....	47
Şekil 4.23. Kalinin bölgesinde NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin regresyon analizi.....	49
Şekil 4.24. Çernobil ve Kalinin NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin regresyon analizi.....	52
Şekil 4.25. Çernobil NGS soğutma havuzunun yüzey sıcaklığının zaman içinde değişimi; olay öncesi ve sonrası görüntüler 22 Nisan ve 29 Nisan 1986 tarihlerindeki yüzey su sıcaklığını göstermektedir.....	54
Şekil 4.26. Ukrayna'nın 1984-2021 yılları arasındaki yıllık ortalama sıcaklık verileri.....	55

Şekil 4.27. Çernobil Soğutma Havuzu Yüzey Su Sıcaklığı (2016-2021)	56
Şekil 4.28. Kalinin NGS'nin göl tipi soğutma havuzuyla birlikte su temini dönüş sisteminin a) temel gösterimi b) temel şeması.....	56
Şekil 4.29. Rusya'nın 1984-2021 yılları arasındaki yıllık ortalama sıcaklık verileri.....	57
Şekil 4.30. Kalinin NGS soğutma havuzunun yüzey sıcaklığının zaman içinde değişimi.....	58
Şekil 4.31. a) Sıcaklık ölçümleri için seçilen 7 noktanın Udomlya, Pesvo ve Sucha göllerin üzerinde konumu; b) alınan noktaların zaman içerisinde (1984-2022) sıcaklık değişimi.....	59
Şekil 4.32. 1985, 1987, 2007 ve 2015 yıllarında Aralık-Mart arasında Kalinin NGS soğutma göllerinin sıcaklık değişimi.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Alfa, beta ve gama radyasyon türleri ve özellikleri (Gudkov vd. 2019).....	8
Çizelge 3.1. Farklı Landsat Uydu Görevlerine ait sensörlerin mekânsal ve zamansal çözünürlükleri.....	14
Çizelge 4.1. Çernobil zaman seri eğrilerinin trend doğrusu ile uyumu.....	38
Çizelge 4.2. Kalinin zaman seri eğrilerinin trend doğrusu ile uyumu.....	46
Çizelge 4.3. İndeksler arası R kareli değer tablosu.....	48
Çizelge 4.4. Kalinin ve Chernobyl arasındaki indekslerin R^2 değerleri.....	51
Çizelge 7.1. Kalinin NGS' soğutma göllerinin farkı noktalarında 1984-2022 yüzey sıcaklık ölçümleri.....	73

1. GİRİŞ

Nükleer santraller, artan elektrik talebini karşılamak için güvenilir ve tutarlı bir enerji kaynağı sağlayarak birçok ülke için önemli bir enerji üretim kaynağı olmuştur. Bununla birlikte, nükleer santrallerin inşası ve işletilmesi, çevre üzerinde önemli etkilere sahip olabilir. Nükleer santrallerle ilgili en önemli çevresel endişelerden biri, inşaat, işletme ve hizmetten çıkarma gibi faaliyetlerden kaynaklanabilecek arazi kullanım değişikliğidir. Başka bir endişe nedeni ise 1986 yılında meydana gelen ve tarihin en ciddi nükleer felaketlerinden biri olan Çernobil nükleer santral kazasıdır. Patlama ve ardından santralden radyoaktif madde salımı, çevredeki alanlar üzerinde önemli çevresel ve sağlık etkileri yaratmıştır. Kaza, binlerce insanın tahliyesine ve santral çevresinde yasak bölge oluşturulmasına yol açmıştır. Hariç tutma bölgesi, yaklaşık olarak 2.600 kilometrekarelik bir alanı kapsayarak, dünyadaki en büyük insan yapımı yasaklama bölgelerinden biri olmasını sağlar (Anonim t.y.-l; Bondarkov vd. 2011). Dışlama bölgesi, radyasyona maruz kalmanın karasal ekosistemler üzerindeki uzun vadeli etkilerini incelemek için fırsatlar sunan benzersiz bir ekolojik laboratuvar haline gelmiştir (Møller ve Mousseau 2006). Hariç tutma bölgesindeki arazi örtüsü değişikliklerinin doğasını ve kapsamını anlamak, kazanın çevresel etkilerini değerlendirmek ve kirlenmiş alanların yönetimine yönelik stratejiler geliştirmek için önemlidir.

Nükleer santrallerin çevresindeki arazi örtüsü değişikliklerinin araştırılması, nükleer enerji üretiminin çevresel etkileri hakkında bilgi sağlayabileceği için çok önemli bir araştırma alanıdır. Arazi örtüsü değişikliği, diğer faktörlerin yanı sıra ekolojik sistemleri, su kaynaklarını, hava kalitesini ve insan sağlığını etkileyebilir olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, arazi örtüsü değişikliklerinin kapsamını ve doğasını anlamak, nükleer santrallerin sürdürülebilirliğini ve çevresel etkisini değerlendirmek için önemlidir.

Bu yüksek lisans tezi, nükleer santral alanları ile ilişkili arazi örtüsü değişikliklerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu araştırmanın amacı uzaktan algılama yöntemleri ve uydu bazlı görüntüleri kullanılarak nükleer santrallerin ana çevre elemanları olan bitki örtüsü ve su kaynakları etki edip etmediğini, etmesi durumunda ise etkinin şiddeti ne olduğunu göstermektir. Arazi örtüsündeki değişimi için geniş zaman aralığına ait multispektral ve termal Landsat uydu verileri kullanılarak Normalize Fark Bitki İndeksi (NDVI), Normalize Fark Su İndeksi (NDWI), SAVI (Toprak Ayarlı Bitki İndeksi), ARVI (Atmosferik Dirençli Bitki İndeksi), EVI (Arttırılmış Bitki İndeksi) VARI (Görünür Atmosferik Dirençli İndeks), NDII (Normalize Fark Kızılötesi İndeks) ve MSI (Nem Stres İndeksi) gibi spektral indekslerinin çıkarılıp haritalandırılması ilgili alanlarının zaman içindeki değişikliklerini izlemek ve özelliklerinin durumu hakkında değerli bilgiler çıkarmak için olanak sağlar. Buna ek olarak, daha niceliksel sonuca ulaşmak amacıyla zaman serisi analizi kapsamında her bir indeks için elde edilecek zaman serileri arazi örtüsü ve çevre koşullarındaki değişiklikleri incelememize izin verir. Nükleer santrallerin neden olduğu diğer önemli bir konu ise termik kirlenme olup, nükleer santrallerden ısıtılmış suyun deşarjı nedeniyle nehirler veya göller gibi su kütlerinin sıcaklığı arttığında meydana gelir (Kirillin vd. 2013). Isıtılmış su bir sucül ekosisteme salındığında birden fazla sorun aynı anda ortaya çıkar. Nükleer santrallerden kaynaklanan termik kirlenme, önemli bir çevresel sorundur ve uzaktan algılama, etkilerini izlemek için değerli bir araç olabilir. Uzaktan algılama teknikleri uygulayarak nükleer santrallerin neden olduğu termik kirlenme ilgili yapılmış nispeten az çalışmaların bulunması, bu yüksek lisans tezini özgün kılan diğer bir unsurdur ve araştırmacılar ve çevre yöneticileri

için termal kirliliğinin çevre üzerindeki etkisini daha iyi anlayabilmelerine ve etkilerini azaltmak için stratejiler geliştirmelerine olanak sağlar.

Geniş zaman aralığındaki (Çernobil analizi için 37 yıllık) verilere ihtiyaç duyulduğundan dolayı, 1972 yılından beri veri toplanan Landsat 3, 5, 7 ve 8 uydularına ait veriler seçilmiştir. Landsat verilerin diğer avantajları arasında ücretsiz erişebilirlik, yüksek çözünürlük ve çok çeşitli alanlarda uygulama bulunmaktadır.

Büyük miktarda uydu görüntüsünü işlemek ve analiz etmek için bulut tabanlı, açık kaynak kodlu ve ücretsiz Google Earth Engine (GEE) platformu seçilmiştir. Büyük ölçekli veri işleme, iş birliği özellikleri, önceden işlenmiş verilere erişimi gibi avantajların sunulması, GEE'yi araştırmacılar için değerli bir araç haline getirir.

Daha kapsamlı bir anlayışa ve bütüncü sonuca ulaşılması için sadece nükleer kazadan etkilenen bölgeleri değil, aynı zamanda nispeten uzun süredir elektrik üreten ve normal işletme durumunda olan Kalinin Nükleer Güç santralinin etrafındaki alan da bu çalışmada dikkate alınacaktır. Bu araştırmanın bulguları, nükleer enerji santrallerinin çevresel etkileri hakkında bilgi sağlayacak ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmak için strateji ve politikaların geliştirilmesine bilgi sağlaması hedeflenmektedir. Genel olarak, bu çalışmanın nükleer santral faaliyetleri ile arazi örtüsü değişiklikleri arasındaki ilişkinin anlaşılmasına katkıda bulunmasının yanı sıra enerji ve çevre sektörlerinde karar vericiler için değerli bilgiler sağlaması beklenmektedir.

Bu tezin amaçları birden fazla yönü takip etmektedir. Cevaplanacak temel sorular şunlardır:

- Nükleer kaza sonrasında arazi örtüsündeki bir değişim mevcut mudur?
- Nükleer kazadan etkilenen bölgede yıllar içinde çevresinde ne tür değişiklikler gözlemleniyor? Değişimin trendi nedir?
- Kazadan kaynaklı arazi örtüsündeki değişim mevcut ise daha önce yapılmış çalışmaların sonuçları ile uyum içinde midir?
- Normal işletim durumunda olan bir santral çevresinde arazi örtüsünde değişim mevcut mudur?
- Nükleer santrallerin neden olduğu termik kirlilik uzaktan algılama yöntemleri kullanılarak neler gözlemlenebilir? Elde edilen soğutma havuzunun sıcaklık bilgileri bize neler sağlar?

2. KAYNAK TARAMASI

2.1 Nükleer Enerji

Artan dünya nüfusu ile tüketim artışı, iklimi değiştiren sera gazı emisyonlarını artırma eğilimindedir. Fosil yakıtları yakmak, ormanları kesmek ve hayvancılık yapmak, iklimi ve dünyanın sıcaklığını giderek daha fazla etkilemektedir. Sürdürülebilir bir geleceğe ulaşmak için özellikle dikkate değer bir çerçeve, 2030 yılına kadar daha sürdürülebilir bir dünya yaratmayı amaçlayan birbiriyle bağlantılı 17 küresel hedefi içeren Birleşmiş Milletleri'nin Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'dır (SKA) (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (kaynak: <https://www.kureselamaclar.org/>)

Günümüzde 440 güç reaktöründen sağlanan nükleer enerji dünyada üretilen enerjinin %10'unu karşılaşmanın yanı sıra (World Nuclear Association 2022) küresel olarak, nükleer enerji santralleri tüm düşük karbonlu elektriğin dörtte birinden fazla üretmektedir (IAEA 2021). Şekil 2.1, nükleer teknolojiler ile SKA'nın her biri arasındaki bağlantıları göstermektedir. Görüldüğü gibi, nükleer teknolojileri birçok hedefi desteklemekle kalmayıp, özellikle nükleer enerji SKA'nın içerisinde olan enerji, ekonomik büyüme ve iklim eylemlerine katkıda bulunur.

Buna rağmen enerji üretimi amacıyla kullanılan nükleer enerji, avantajları ve dezavantajları nedeniyle tartışmalı enerji kaynaklarından biridir. Fosil yakıtlara göre nükleer yakıtın olağanüstü yüksek enerji yoğunluğu, avantajlı bir fiziksel özellik olmasına rağmen diğer tüm endüstriyel faaliyetlerde olduğu gibi üretimi de risksiz değildir. Bunun temel nedeni, 26 Nisan 1986 yılında Çernobil ve 2011 yılında tsunami nedeniyle Japonya'da Fukushima Nükleer Güç Santrallerinde meydana gelen büyük nükleer kazalardır. Bugüne kadar gerçekleşen kaza sayısı az olmasına rağmen kazaların etkilediği alan ve etkisinin süreceği zaman uzun olduğundan dolayı her zaman tartışılmaya ve incelenmeye konu olacaktır.

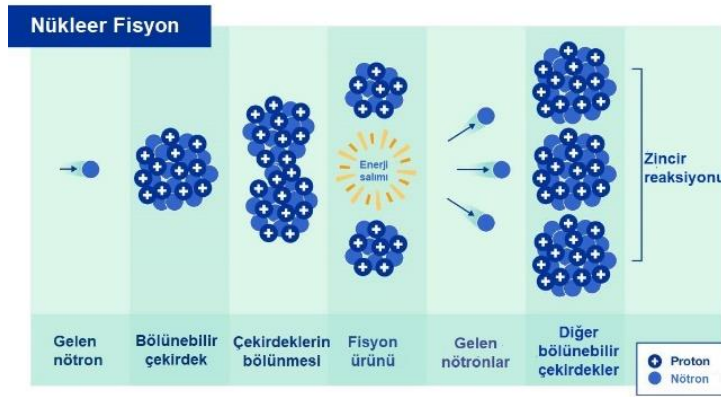


Şekil 2.2. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile nükleer enerji ve diğer nükleer teknolojiler arasındaki bağlantılar. Not: koyu renkler bağlantıları gösterir; açık renkler bağlantı olmadığını gösterir

2.2. Nükleer Güç Santrali

Nükleer Güç Santrali: elektrik üretmek için nükleer fisyon sürecini kullanan bir elektrik santral türüdür. Ana bileşenlerinden biri olan nükleer reaktör, enerjinin salımı ile sonuçlanan, kontrol ve kendi kendini idame ettiren bir zincirleme fisyon reaksiyonunu düzenlemek için tasarlanmış bir cihazdır. Reaktörde ana madde olarak uranyum kullanılır, bu metal Dünya'nın kabuğunda hafif radyoaktif bir şekilde bulunur. Uranyum, bir nükleer reaktörde kullanılmadan önce öğütme, dönüştürme, zenginleştirme ve yakıt üretimi gibi adımlardan geçer (Anonim t.y.-s).

Nükleer reaktör içindeki atomların hareketi sonucunda açığa çıkan enerji, suyu ısıtarak güçlü bir ısıtma işlemine neden olur ve bu da buhar üretimini sağlar (Anonim t.y.-m). Bu buhar, jeneratöre bağlı olan türbini döndürerek elektrik üretimini sağlar. Nükleer santraller, kontrol altında tutulan radyoaktif maddelerin ve radyasyonun santral dışına yayılmamasını sağlamak için çeşitli önlemler alır. Bu önlemler, normal işleyiş sırasında veya olası bir kaza durumunda radyoaktif maddelerin güvenli bir şekilde muhafaza edilmesini ve çevreyle olan izolasyonunu sağlar (Anonim t.y.-m).



Şekil 2.3. Nükleer fisyon

2.2.1. Çernobil Kazasının Kısa Tarihi

Çernobil Kazası, nükleer enerjinin sivil kullanım tarihindeki en ciddi kazadır ve 14 Mayıs 1986 tarihinde Sovyet Komünist Partisi'nin eski Genel Sekreteri Mihail Gorbachev tarafından duyurulmuştur. Uzmanlar, dördüncü ünitenin planlı bir şekilde kapatılması sırasında reaktörün kapasitesinin aniden arttığını ve önemli miktarda buhar emisyonu ve ardından hidrojen oluşumuna yol açtığını, bunun sonucunda patlama ve reaktörde hasar meydana geldiğini ve ilgili radyoaktif salınımın gerçekleştiğini belirtmişlerdir (Anonim t.y.-d).

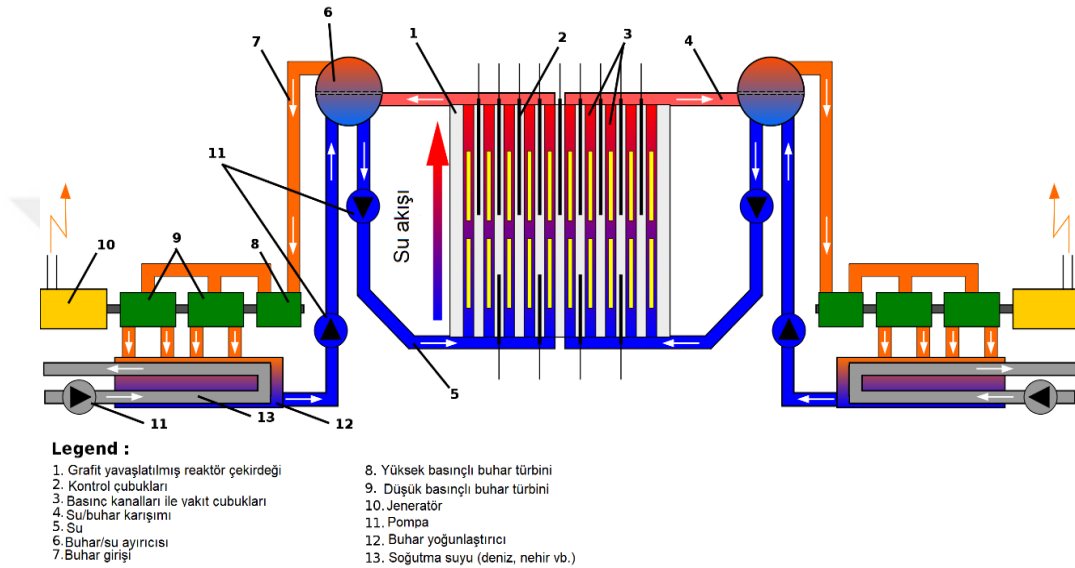
Çernobil kazasının nedeni tartışmalı konularından biridir. Fakat reaktör fiziği açısından sadece iki versiyon mantıklı sayılabilir (Gorbachev 2002). 25-29 Ağustos 1986 tarihlerinde Uluslararası Atom Enerjisi Kurumunun talebi üzerinde Viyana'da gerçekleşen İnceleme Toplantısında Sovyet bilimi insanları ve mühendisleri kazanın doğasını ve meydana gelen yapısal hasarın boyutunu kontrolsüz reaktivite kaynaklı güç seviyesinde meydana gelen ani artış ile açıklamanın mümkün olduğunu belirtmişlerdir. (International Nuclear Safety Advisory Group 1992). Söz konusu ani artış, reaktör durumunu belirleyen reaktivite karakteristiklerine ait boşluk¹ ve güç katsayılarının² işaretleri ve büyüklüğünden tarafından mümkün kılındığı söylenmiştir. Bunlar dikkatsizlik sonucu operatörler tarafından testlere hazırlanırken ve test ilerledikçe soğutma sıvısı akışını azaltan pompa yavaşlamasının etkisiyle kurulmuştu (International Nuclear Safety Advisory Group 1992). 1986 yılında Viyana Konferansı'nın ardından, Çernobil kazasının nedenleri konusunda derinlemesine analitik çalışmaların yürütüldüğü ve 1992 yılında yayınlanan raporda sunulan bulgulara göre, söz konusu kaza aşağıdaki

¹ Çekirdekteki su, çok düşük yoğunluklu bir malzemeyle, yani buhar, gazlar vb. ile değiştirilirse, negatif bir reaktivite değişikliği meydana gelir. Buna reaktivitenin boşluk katsayısı denir. Reaktivitenin boşluk katsayısı, çekirdek suyunun boş yüzdesi başına (buhar kabarcıkları) reaktivitedeki değişiklik olarak tanımlanır. Boşluk katsayısı, çekirdekteki konumun, su fraksiyonunun ve su sıcaklığının bir fonksiyonudur.

² Güç katsayısı, reaktivitedeki bir değişiklikle ilişkili reaktör gücündeki değişikliği tanımlar ve reaktör gücünü bir kilovat değiştirmek için gereken reaktivite miktarı olarak tanımlanır.

temel faktörlerin etkileşimi sonucu meydana gelmiştir: reaktörün fiziksel özellikleri; kontrol elemanlarının spesifik tasarım özellikleri ve reaktörün getirilmiş olduğu yetkisiz durum.

Sovyet yapımı olan RBMK (Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalny, yüksek güçlü kanal tipi reaktör), suyla soğutulan ve yavaşlatıcı olarak grafit kullanan, ayrı yakıt kanallarına sahip bir reaktördür. 1964-66 yıllarında tasarlanan bu reaktör, diğer güç reaktörlerinden oldukça farklı bir yapıya sahiptir. Grafit yavaşlatıcı ve su soğutucunun bir araya geldiği bu kombinasyon, dünya genelinde mevcut olan diğer reaktörlerde bulunmayan özgün bir özelliktir.



Şekil 2.4. RBMK reaktörün şeması

Kaza, şimdiye kadar kaydedilen çevreye en büyük kontrolsüz radyoaktif salınımı ile sonuçlanmış olup, Uluslararası Nükleer Olay Ölçeğinde en yüksek seviye olan 7 ile ölçeklendirilmiştir. Özellikle salınan kısa ömürlü iyot-131 ve uzun ömürlü sezyum-137 gibi maddeler nedeniyle, halkın maruz kaldığı radyasyon dozu açılarından önemlidir. Açığa çıkan maddelerin çoğu toz ve moloz olarak yakınlarda biriktirirken, daha hafif olanlar ise rüzgarla Ukrayna, Beyaz Rusya ve hatta İskandinav ve Avrupa üzerinden taşınmıştır. Patlamaların etkisiyle, iki personel hayatını kaybetmiş, akut radyasyon sendromundan³ dolayı da 28 acil durum ekibi ve santral çalışanı yaşamını yitirmiştir. Ayrıca, 5000'den fazla tiroit kanseri vakası kaydedilmiştir.

Hasarlı reaktörün kalıcı korunabilmesi için sahayı radyoaktiviteden temizlemek, bir sonraki görev olarak belirlenmiştir. Sovyetler Birliği'nin her yanından yaklaşık 200,000 kişi, 1986 ve 1987 yılları arasında temizleme ve kurtarma operasyonunda yer almıştır. Kazadan sadece 36 saat sonra, santrale 3 km uzaklıktaki Pripjat şehri tamamen tahliye edilmiş; ayrıca 14 Mayıs'a kadar, 30 kilometrelik bölgede yaşayan 116,000 kişi daha tahliye edilmiştir. Santralin çevresindeki 30 kilometrelik alan, "Yasak Bölge" veya

³ Kısa bir süre boyunca iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalınması nedeniyle ortaya çıkan klinik durumdur ve semptomları arasında mide-bağırsak sorunları, baş ağrıları, yanıklar ve ateş bulunur.

"Hariç Tutma Bölgesi" olarak adlandırılmış ve kalıcı olarak ıssızlaşmıştır.

Çevrenin radyoaktif kirlenmesini sınırlamak ve diğer reaktörlerin faaliyetine devam etmesine olanak sağlamak amacıyla, hızlı bir şekilde (Ekim 1986'da) 4. ünite üzerine beton bir sığınak inşa edilmiştir (Şekil 2.5.a). Bu geçici çözüm, yapının zayıf ve dayanıksız olması nedeniyle 2019 yılında, yeni güvenli sığınak yapısının tamamlanmasıyla yer değiştirmiştir (Şekil 2.5.b).



(a)



(b)

Şekil 2.5. a) 1986 yılında inşa edilen geçici koruma sağıanak; **b)** 2019 yılında inşaatı tamamlanan yeni güvenli sığınak

2.3. İyonlaştırıcı Radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon, madde ile etkileşime girdiğinde atomik düzeyde değişikliklere neden olan atomlardan veya moleküllerden elektronları koparabilecek kadar enerjiye sahip bir radyasyon türüdür. Bu tür değişiklikler genellikle iyonların üretimi ile sonuçlanır. Yüksek dozlarda iyonlaştırıcı radyasyon vücuttaki hücre veya organlara zarar verebilir ve hatta ölüme neden olabilir (Anonim t.y.-o).

İyonlaştırıcı radyasyon, kararsız (radyoaktif) atomların daha kararlı hale geçebilmek için yaydığı enerji salarken meydana gelir. Bu radyoaktif atomlar bozunuma uğrarken iyonize radyasyon formunda enerji salar (alfa ve beta parçacıklar, gama ışınları veya nötron). Alfa radyasyonun yaydığı alfa parçacıklar cildimize zarar verecek kadar nüfuz edemez ve bir kâğıt parçasıyla durdurulabilir, fakat nefes, gıda veya içeceklerle vücut içine alındığında iç dokuları direkt olarak etkileyebilir ve dolayısıyla sağlığa zarar verebilir (Anonim t.y.-r).

Beta radyasyonunda çekirdek tarafından alfa parçacıklarından daha fazla nüfuz etme kabiliyetine sahip ve 1-2 santimetre su tabakasını geçebilen elektronlar salınır. Genellikle beta radyasyonunun durdurmak için birkaç santimetre kalınlığındaki alüminyum kâğıt yeterlidir (Anonim t.y.-r).

Gamma ışınları yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. Çok nüfuz edici olup çok kalın kurşun tabaka haricinde hemen hemen tüm maddelerden geçebildiğinden dolayı daha fazla koruma gerektirir (Anonim t.y.-r).

Çizelge 2.1. Alfa, beta ve gama radyasyon türleri ve özellikleri (Gudkov vd. 2019)

İyonlaştırıcı radyasyonun türü	Keşfeden, yıl	Radyasyon türü	Enerji, keV	Havada maksimum seyahat uzaklığı, cm	Görelî biyolojik etkinlik	Kütle, atomik birim	Dalga boyu, nm
Alfa bozunum	E. Rutherford (1899)	parçacıklar	2000-11000	2-10	20	4	-
Beta bozunum	E. Rutherford (1899)	parçacıklar	20-20000	100 -2500	1	3×10^{-4}	-
Gama ışınları	P.U. Villard (1900)	em dalgaları	5 -6000	> 15000	1	-	< 0.1

2.3.1. İyonlaştırıcı Radyasyonun Çevreye Olan Etkileri

2.3.1.1. Bitkiler ve Hayvanlar Üzerindeki Etkiler

İyonlaştırıcı radyasyonun çevre üzerindeki en önemli etkilerinden biri, canlı organizmalara verebileceği zarardır. Yüksek düzeyde radyasyona maruz kalma hem bitkilerde hemde hayvanlarda hücre hasarına, mutasyonlara ve hatta ölüme neden olabilir. Gudkov vd. (2019) tarafından belirtildiğine göre, sabit yaşam tarzları nedeniyle çoğu olumsuz çevresel baskıdan dolayı kaçamadıklarından dolayı bitkiler koşullara uyum sağlamak için bir takım anatomik, fizyolojik ve biyokimyasal ayarlamalar geliştirilmiştir (Møller ve Mousseau 2015). Örneğin, bitkiler, insanlar da dahil olmak üzere diğer canlı organizmalar için ölümcül olabilen bir radyasyon seviyesinin zararlı etkilerine dirençlidir. İnsan vücudu için ölümcül doz 5 Gy⁴ olurken, çoğu bitkiler 50 Gy ve hatta bazıları 1000 Gy'lik seviyesindeki dozlara dayanabilir.

Buna karşı, iyonlaştırıcı radyasyon bitkilerin yaşamsal faaliyetlerinin çoğu yönüne etkilemektedir (Gudkov vd. 2019). Bu, DNA'nın durumu, antioksidan sistemlerin durumu ve bütün temel fizyolojik süreçlere (fotosentez aktivitesi ve solunum, taşıma süreçleri, mineral beslenme vd.) gibi birçok parametre değişimine neden olabilmektedir. Deneyler, çam ağaçlarının (Pinus cinsi) ışınlamaya en duyarlı olanlar arasında olduğunu göstermiştir (IAEA 1991). Çernobil nükleer santralinin etrafındaki alanın çoğu iğne yapraklı ormandı ve radyonüklidlerin orman örtüsü tarafından yakalanmasından dolayı 600 hektarlık bir alanda çam ağaçlarında toplu ölüm gözlemlenmiştir (Beresford ve Copplestone 2011). Bitkilerin biriktirmiş oldukları radyonüklidler geniş bir aralıkta değişim gösteriyordu ve toprak tipine bağlıydı (Alexakhin vd. 2007).

Hayvanların ise radyasyonuna maruz kalmanın birkaç yolu vardır: 1) radyoaktif toz, duman veya gaz halindeki radyonüklidlerin solunması, 2) radyonüklidlerin yutulması, 3) doğrudan gamma ışınlarına maruz kalınmasıdır (Møller ve Mousseau 2006). Tüm organizmalarda, hücre içi DNA radyasyona duyarlıdır ve düşük miktarda radyasyona maruz kaldığında kolayca kırılır. Genel olarak, düşük doz hızlarında mutasyon oranı ve doz hızı arasında doğrusal bir ilişki gözlemlenirken, yüksek doz hızlarında üstel bir yanıt vardır (Møller ve Mousseau 2006).

Çernobil, radyasyonun etkileriyle ilgili araştırmalar için en kapsamlı 'doğal' laboratuvarı oluşturmaya rağmen felaketinin ekolojik sonuçları hakkında çok az

⁴ Gray (Gy) Uluslararası Birim Sisteminde kullanılan bir birim olup, radyasyonuna maruz kalan bir maddede soğrulan enerji miktarının ölçümünde kullanılır.

araştırma yapılmıştır (Møller ve Mousseau 2006). Buna ek olarak, Çernobil Dışlama Bölgesindeki radyasyonun yaban hayatı üzerindeki etkileri konusunda fikir birliği eksikliği halen mevcuttur (Beresford ve Copplestone 2011; Lecomte-Pradines vd. 2019).

2.3.1.2. Tarım Üzerindeki Etkiler

İyonlaştırıcı radyasyonun tarım üzerindeki etkileri, ışınlama süresine, radyasyon türüne ve bitki türlerinin radyasyona duyarlılığına bağlı olarak olumsuz ve olumlu sonuçlar doğurabilir. Düşük dozlardaki radyasyon, bitkilerde gen mutasyonlarına yol açarak, daha yüksek verim elde edilmesi veya olumsuz koşullara tolerans sağlayacak yeni çeşitlerin geliştirilmesi gibi istenilen özelliklere sahip bitkilerin üretilmesine olanak tanıyabilir. Aynı zamanda, zararlı böceklerin sterilizasyonu yoluyla popülasyonlarının kontrol edilmesi ve bozulmayı engelleyen mikroorganizmaların büyümesinin bastırılmasıyla meyve ve sebzelerin korunması amacıyla da kullanılabilir.

Ancak, nükleer santrallerin neden olduğu radyoaktif kirlilik, ekimleri tüketmeye güvenli olmayacak seviyelere getirebilir. Alexakhin vd. (2007) tarafından belirtildiğine göre, Çernobil kazası, ekolojik yönü açısından, makul bir şekilde tarımsal bir kaza olarak adlandırılabilir ve bunun nedenleri şunlardır:

- 1) etkilenen bölgede gıda maddelerin tüketimi, nüfusun kazara ışınlanmasının önde gelen kaynaklarından biriydi,
- 2) etkilenen bölgede yaşayan nüfus çoğunlukla köy topluluğudur;
- 3) köy halkının maruz kaldığı ışınlama dozları şehir popülasyonundan daha yüksekti;
- 4) tarımsal üretim, etkilenen bölgenin ekonomisinin en önemli segmentiydi;
- 5) tarımsal önlemlerin alınmasıyla popülasyon maruz kaldıkları dolazların azalması, teknolojik olarak dış ışınlamanın azaltılmasından daha etkiliydi (Korneyev vd. 1988).

Kaza alanının etrafındaki dışlama bölgesi içinde eski tarım arazileri, öngörülebilir gelecekte insan kullanımına uygun olmayacaktır. Dışlama bölgesinin ötesinde bile, tarım arazileri terk edilmiştir veya tarımsal alan ciddi şekilde azalmıştır (Wehrden vd. 2012).

2.3.1.3. Su Kaynaklarının Üzerindeki Etkiler

İyonlaştırıcı radyasyon, sucul bitki ve hayvanlarına zarar vererek su ekosistemleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu etkiler, hem doğrudan radyasyona maruz kalma yoluyla hem de gıda zincirinde radyoaktif kirleticilerin birikmesi sonucu ortaya çıkabilir. Çernobil bölgesinin akvatik ortamı, soğutma havuzunu da içerecek şekilde, bu bölgenin en ciddi radyasyon kirliliği yaşayan su kütlelerinden birisidir. Kaza sonrası, Dnieper ve Pripriyat nehirlerinin beslenme havzaları yaygın bir şekilde kirlenmiş durumdadır (Alexakhin vd. 2007). Dnieper nehri üzerinden içme suyu tüketimi nedeniyle yaklaşık 8 milyon kişi, ayrıca balık tüketimi ve tarım amaçlı su kullanımı sonucunda da 32 milyon kişi, ek dozlara maruz kalmıştır.

2.4. Uzaktan Algılama

Geniş anlamda, Uzaktan algılama doğrudan cisimlere fiziksel temas olmaksızın

bilgi alma ve değerlendirme olarak nitelendirilebilir. Söz konusu yeryüzünün incelenmesi, uzaktan algılama belirli bir bölgeden yayınlamış veya yansıtmış ışınımını ölçerek onun fiziksel özelliklerini algılama ve izleme sürecidir. Uzaktan algılama teknikleri, dünya yüzeyinin elektromanyetik spektrumun çeşitli dalga boyu bölgelerinde görüntülerinin alınmasına izin verir ve alınan görüntünün özelliklerinde biri ise elektromanyetik spektrumunda temsil ettiği dalga boyu bölgesidir. Bazı görüntüler elektromanyetik spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgelerindeki yansıyan güneş radyasyonunun temsil ederken, diğerleri dünya yüzeyi tarafından yayılan, termal kızılötesi dalga boyu bölgesindeki ölçümleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Uzaktan algılama yöntemleri pasif ve aktif olarak ikiye ayrılır. Pasif uzaktan algılama sistemleri nesne veya çevredeki alanlar tarafından yayılan veya yansıtılan ışınımını toplarken, aktif UA sistemleri ise nesne veya alanları üzerine yaymış oldukları enerjileri hedeften yansıyan veya geri saçılan ışınımını algılar ve ölçer.

2.4.1. Uzaktan Algılamada Arazi Örtüsü Değişimi

Uzaktan algılama, geniş alanlarda arazi örtüsündeki değişiklikleri tespit etmek için yaygın olarak kullanılan güçlü bir araçtır. Arazi örtüsü hakkında doğru bilgilere sahip olması bilimin birçok alanında izleme, analiz ve raporlama için önemlidir. Arazi örtüsü, bitki örtüsünü, su kaynaklarını, toprağı tanımlarken arazi örtüsündeki değişim, doğal çevreyi ve insan faaliyetlerini birçok yönde etkileyen kritik bir konudur. Arazi örtüsünün ve arazi örtüsü değişiminin geniş alanlar üzerinde tutarlı ve sağlam bir şekilde izlenmesi ve haritalanması, uydu verileri ile mümkün olmaktadır (Gómez et al. 2016).

Uzaktan algılama değişim tespiti, değişken, gelişen ve sürekli genişleyen araştırma alanıdır. Yıllar boyunca uzaktan algılanmış verilerinin işlenmesi için birçok yöntem geliştirilmiş ve söz konusu bu yöntemler farklı değerlendirme çalışmalarında göz altında alınmıştır (Weiss vd. 2020; Gómez et al. 2016; Tewkesbury vd. 2015; Hussain vd. 2013; Hansen ve Loveland 2012; Singh 1989;). Gomez (2016) tarafından yapılan çalışmada, zaman serilerin sunduğu geniş alan ve yıllık bazında olan bilgileri ile ilgili sorunları ve olanaklarını değerlendirilmiştir. Yazar'a göre, zaman serisi verileri, arazi örtüsü haritalaması için yeni olanaklar yaratırken, birtakım zorluklar beraberinde getirmektedir. Ayrıca, arazi örtüsü haritalandırılmasında zaman serileri verilerini içeren tek veya optimal yöntemin olmadığını belirtmektedir.

Bilindiği üzere, Landsat verileri küresel ölçekli orta mekânsal çözünürlüğe sahip verilerinin en uzun kaydını oluşturmaktadır. Bu da uzun zaman aralığına sahip değişim analizi ve zaman serilerinin oluşturmalarını mümkün kılmaktadır. Günümüzde, geniş alan arazi örtüsü değişimini belirlemede kullanılan çeşitli yöntemler mevcuttur; ancak ileride geliştirilecek yeni yöntemler, büyük veri hacmi ve işleme kapasitesine uyum sağlayarak ve tek sahneli işleme süresini azaltarak bu alanda daha etkin olacaktır (Hansen ve Loveland 2012).

Gerekçe ve koşullara bağlı olarak geçmiş yıllarda çeşitli arazi örtüsü değişimi teknikleri geliştirilmiştir. Günümüzde uzaktan algılanmış verileriyle değişim tespit analizi en geniş bakışıyla piksel bazlı ve obje bazlı olarak iki kategoride değerlendirilebilir (Hussain vd. 2013). Birincisi, temel analiz birimi olarak görüntüdeki pikseli baz alan, klasik sayılabilir piksel tabanlıdır. İkinci grup ise, önce görüntü nesneleri oluşturmayı ve daha sonra bunları analizde kullanımı üzerinde duran obje tabanlı gruptur. Öbür yandan, değişim tespit süreci kabaca: a) veri ön işleme, b) değişim tespiti tekniğinin

seçimi ve c) doğruluk değerlendirme olarak ayrılabilir. Veri ön işleme aşaması, radyometrik, atmosferik ve topografik düzeltilmeler ve geometrik düzeltme ile ilgili konuları ele alır. Uygun değişim tespit analizi ise tekniğin seçilmesi çalışmanın objektifliği ile ilgilidir (Hussain vd. 2013). Değişim tespiti tekniklerinde, görüntü cebirine dayanan birçok yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Görüntü farklılaştırma, görüntü oranlama, regresyon analizi, bitki indeksi farkı, değişim vektörü analizi ve temel bileşen analizi gibi bu yöntemler arasındadır. Ayrıntılı değişimi ölçmek için sınıflandırma tabanlı karşılaştırma, belki de hem pikseli hem de nesneyi içerebilen değişim tespiti çalışmalarında benimsenen en yaygın metodolojidir. Ayrıca yapay sinir ağları, destek vektör makineleri ve karar ağacı gibi makine öğrenmesi ve CBS bazlı metotlar da değişim çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Hussain vd. 2013). Söz konusu nesne tabanlı görüntü algılama tekniklerine dayanan değişim tespit metotları, yüksek çözünürlüklü görüntülerinin analizinde klasik piksel bazlı yöntemlere göre avantajları nedeniyle daha sık kullanılmaktadır. Nesne bazlı değişim tespit yöntemlerinin şüphesiz yararları olsa da bir analiz birimi olarak piksel bazlı yöntemler hala çok geçerlidir (Tewkesbury vd. 2015). Bu nedenle, uzaktan algılanan optik görüntü değişim tespiti bir bütün olarak ele alınmalıdır.

2.4.2. Uzaktan Algılamanın Nükleer Santral Çevresi Analizinde Kullanımı

Yukarıda belirtildiği gibi, en ciddi nükleer kaza 26 Nisan 1986'da Ukrayna'daki (o zamanlar Sovyetler Birliği'nin bir parçası olan) Çernobil nükleer santralinde meydana gelmiştir. Ancak, uydu bazlı uzaktan algılama verileri kullanılarak Çernobil nükleer santrali hakkında yayınlanmış nispeten az sayıda akademik çalışmaya rastlanmaktadır. Gemitzi (2020) tarafından yapılan bir çalışmada 2000 ile 2020 zaman aralığında Çernobil Güç Santralini çevreleyen 30, 60 ve 90 km'lik bölgelerindeki bitki örtüsü verimliliği MODIS uzaktan algılama Normalized Difference Vegetation Index kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, bitki örtüsü verimliliği ve fenoloji⁵ söz konusu olduğunda, insan faaliyetlerinin olmamasının bitki örtüsü dinamikleri üzerindeki olumlu etkisini göstermiştir. Ancak bu araştırma, kaza öncesi ve sonrası bitki örtüsü durumunu dikkate almamıştır. Buna karşı, Landsat 4-5, 7 ve 8'den elde edilen daha geniş zaman aralığındaki veriler ve saha örnekleri kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışma, NDVI'nin ölçülen radyasyon değerlerinden bağımsız olduğunu göstermiştir (Santos vd. 2019). Benzer sonuçları elde eden bir diğer çalışma ise, 1984, 1986 (patlamadan birkaç gün sonrası), 1987, 2002/2003 ve 2010/2011 dönemlerini içeren toplam 5 periyot boyunca Landsat TM görüntülerini kullanarak NDVI, SAVI, ARVI, VARI, NDII ve MSI bitki indekslerinin değerlerini incelemiştir. Bu çalışma, patlama ve radyasyon kirlenmesi ile ilişkilendirilen bitki örtüsü durumunda doğrudan bir değişiklik olmadığını göstermiştir (Aneta Modzelewska vd. 2020). Çok zamanlı Landsat görüntülerinin denetimsiz değişim algılama analizi, Çernobil çevresindeki bitki örtüsünde belirgin bir olumsuz değişim gözlemlenmesine rağmen, özellikle 2000 yılına kadar daha fazla miktarda olumlu değişimin olduğunu ortaya koymuştur (Davids ve Douglis 2007).

Bunun yanı sıra, SAR verilerinin olaydan 8 yıl sonra bile kaza alanındaki ekolojik

⁵ Canlıların gelişme periyotları içerisinde meydana gelen çeşitli gelişme safhalarını inceleyen bilim dalına FENOLOJİ denir.

durumun incelenmesinde yararlı olduğunu ve iğne yapraklı ormanların durumu aracılığıyla alanın mekânsal dağılımının ve hasar seviyesinin haritalanmasına yardımcı olabildiğini gösteren çalışmalar mevcuttur (Zakharov 1999; Zakharov vd. 2003). 1984 – 1995 dönemi için SPOT-4 verilerin yardımıyla yapılan radyoekolojik koşullardaki değişikliklerin karşılaştırmalı analizi de radyonüklidlerin çam ormanları üzerinde en büyük etkiyi oluşturduğunu göstermiştir (Lyalko vd. 2000). Çernobil bölgesinin uydu bazlı uzaktan algılanmış verileri kullanılarak yapılmış ilk çalışma Richter vd. (1986) tarafından öne sürülmüştür. Söz konusu çalışmada kazadan 3 gün sonraki hasar görmüş reaktörün parlaklık sıcaklığını belirlemeyi ve buna karşılık gelen kinetik yüzey sıcaklığını tahmin etmeyi başarmıştır.

Söz konusu Kalinin Nükleer Güç Santrali günümüze kadar uzaktan algılama verileri kullanılarak yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Kalinin NGS'in çevresine olan etkisini ele alan mevcut çalışmalar sadece yerinde alınan veriler üzerinde odaklanmış olup soğutma havuzu ve kıyı iklimine, su kimyasına ve suyun bitki örtüsüne, atmosferine ve yırtıcı memeli hayvanlarının popülasyonuna olan etkiler üzerine araştırmaları içermektedir. Sonuçlar, Kalinin NGS'nin kıyı iklimi üzerindeki etkisinin çok küçük olmasının yanı sıra soğutma havuzundaki suyu ısıtıldığından dolayı havuz yüzeyinden buharlaşmayı artırdığını göstermiştir (Obyazo vd. 2020). Buna karşılık olarak, santralden gelen ısıtılmış su akışının, su kütlelerinin sıcaklık koşullarında önemli bir değişikliğe, su mineralizasyonunda, hidrokarbonat, sülfat, kalsiyum ve magnezyum konsantrasyonlarında artışa neden olduğu tespit edilmiştir (Grigoryeva vd. 2019). Atmosfere salınan radyasyon kaynaklı olmayan zararlı atıklar bakımından ise Kalinin NGS önemli bir hava kirliliği kaynağı olmamasının yanı sıra (Shandala vd. 2004) araştırmanın sonuçlarına göre tesisin yırtıcı memelilerin vahşi popülasyonları üzerinde hiçbir etkisi bulunmamaktadır (Korablev vd. 2011). Kalinin NGS çevresinde radyasyon durumunun izlenmesi amacıyla Il'in vd. (2004) tarafından yapılan analizde 1999-2001 yıllarında 15 kontrol noktasında 150' den fazla çevresel nesne, yerel gıda maddesi ve içme suyundan numune alınmış ve gerekli ölçümler yapılmıştır. Alınan numune ve verilere uygulanan çeşitli yöntemler ve elde edilen izleme sonuçları, Çernobil kazasının etkisiyle 1986-1987 döneminde elde edilen sonuçlar dışında, radyasyon durumunun temel parametrelerinde herhangi bir önemli değişikliğin işaretlenmediğini göstermiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Veri

Bu bölümde, uzaktan algılama teknikleri kullanılarak Çernobil ve Kalinin Nükleer Santralleri çevresindeki arazi örtüsü değişikliklerinin araştırılması için kullanılan veri kaynakları sunulmaktadır. 1984 yılından günümüze uzanan Landsat uydu görüntüleri içerisinde barındıran geniş bir uydu görüntüleri koleksiyonuna ve analiz araçlarına erişim sağlayan Google Earth Engine (GEE) platformu bu çalışma için birincil veri kaynağı olacaktır.

U.S. Geological Survey (USGS) ve NASA tarafından yönetilen Landsat programı, Dünya gözlem amaçları için tutarlı ve yüksek kaliteli uydu görüntüleri sağlamada etkili olmuştur. Landsat uyduları, zaman içinde arazi örtüsü değişikliklerinin ve çevresel dinamiklerin analizini sağlayan multispektral ve termal verileri sunar. Bu araştırma için Landsat 5, Landsat 7 ve Landsat 8 misyonlarından Landsat verileri kullanılacaktır.

Google Earth Engine, araştırmacıların çok çeşitli uydu görüntülerine ve jeo-uzamsal verilere erişmesine ve bunları analiz etmesine olanak tanıyan bulut tabanlı bir platformdur. Diğerlerinin yanı sıra Landsat, Sentinel ve MODIS dahil olmak üzere çeşitli uydu görevlerinden geniş bir veri arşivi sunar. GEE, verimli veri işleme ve analizine izin veren, kullanıcı dostu bir arayüz ve güçlü bilgi işlem yeteneklerine sahiptir.

Multispektral ve termal görüntüleri içeren Landsat verileri, Google Earth Engine platformunda mevcuttur. Landsat uyduları, düzenli aralıklarla görüntü alarak, zaman içinde arazi örtüsü değişikliklerini incelemek için değerli bir kaynak sağlar. GEE'deki Landsat arşivi, Landsat 5, 7 ve 8 görevlerinden alınan verileri içerir ve analiz için uzun vadeli ve tutarlı bir veri seti sağlar.

1984'ten günümüze kadar olan süreçte, Landsat uydu görüntüleri çalışma bölgesindeki uzun vadeli arazi örtüsü değişikliklerinin incelenmesine olanak tanır. Analiz amaçları doğrultusunda, Landsat 5, 7 ve 8 görevlerine ait *Koleksiyon 2 Tier 1 Seviye 2* Yüzey Yansıtma (SR) değerlerini içeren uydu görüntüleri seçilmiştir. Landsat Koleksiyon 2, algoritma geliştirme ve veri erişimi ile dağıtım yeteneklerindeki ilerlemeleri uygulayan çeşitli veri ürünü geliştirmelerini beraberinde getirmiştir (Anonim t.y.-j). Landsat Koleksiyon 2, Landsat 1-9'dan Seviye-1 verilerini ve Landsat 4-9'dan Seviye-2 ve Seviye-3 ürünlerini içermektedir. Tile 1 verileri ise, en yüksek radyometrik ve konumsal kaliteye sahiptir. Bu veriler, hassas arazi işleme süreçlerine tabi tutulmuş ve Landsat sensörleri arasında ara-kalibrasyon yapılmıştır, USGS tüm zaman serisi analizleri için Seviye 1 verilerinin kullanılmasını önermektedir (Anonim t.y.-k). Landsat uyduları, görevlerine bağlı olarak farklı mekânsal çözünürlüklerde görüntüler yakalarlar. Farklı Landsat görevleri ve ilişkili uzamsal çözünürlükler aşağıda sıralanmıştır:

Landsat 4 ve 5 (TM): Landsat 4 ve 5 görevlerindeki Thematic Mapper (TM) sensörü, mekânsal çözünürlüğü yaklaşık 30 metreye çıkararak arazi örtüsü ve arazi kullanımı hakkında daha ayrıntılı bilgi sağlıyor.

Landsat 7 (ETM+): Landsat 7 üzerindeki Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) sensörü, TM sensörüyle yaklaşık 30 metrelik benzer bir uzamsal çözünürlüğü korudu.

Landsat 8 (OLI/TIRS): Landsat 8 üzerindeki Operasyonel Arazi Görüntüleyici (OLI) ve Termal Kızılötesi Sensör (TIRS), çeşitli mekânsal çözünürlüklerde veri sağlar. OLI

sensörü, verileri yaklaşık 30 metrelik bir mekânsal çözünürlükte yakalarken, TIRS sensörü, yaklaşık 100 metrelik daha kaba bir çözünürlükte termal verileri yakalar (Anonim t.y.-p).

Zamansal çözünürlük, uydu tarafından çekilen ardışık görüntüler arasındaki zaman aralığını temsil eder. Landsat görüntülerinin zamansal çözünürlüğü, görev ve verilerin mevcudiyetine bağlı olarak değişir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Farklı Landsat Uydu Görevlerine ait sensörlerin mekânsal ve zamansal çözünürlükleri

Uydu/ Sensör	Mekânsal Çözünürlük (m)	Zamansal Çözünürlük (gün)
Landsat TM	Spektral bant 1-5, 7: 30 Spektral bant 6: 120	16
Landsat ETM+	Spektral bant 1-5, 7: 30 Spektral bant 6: 60	16
Landsat OLI/TIRS	Spektral bant 1-7: 30 Spektral bant 9: 30 Spektral bant 10-11: 100	16

3.2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, farklı bölgelerde bulunan Çernobil ve Kalinin nükleer santrallerinin çevresini kapsamaktadır. Çernobil NGS, Ukrayna'nın kuzeyindeki Pripyat kasabası yakınlarında yer alırken Kalinin NGS, Rusya'nın batısındaki Udomlya şehri yakınlarında bulunuyor. Karşılaştırma için ele alınacak olan Kalinin NGS'nin seçimi uzun zamandır kazasız bir şekilde işletim halinde olmasına ve Çernobil NGS ile benzer coğrafik konumuna ve iklim koşullarına sahip olmasına dayanmaktadır.

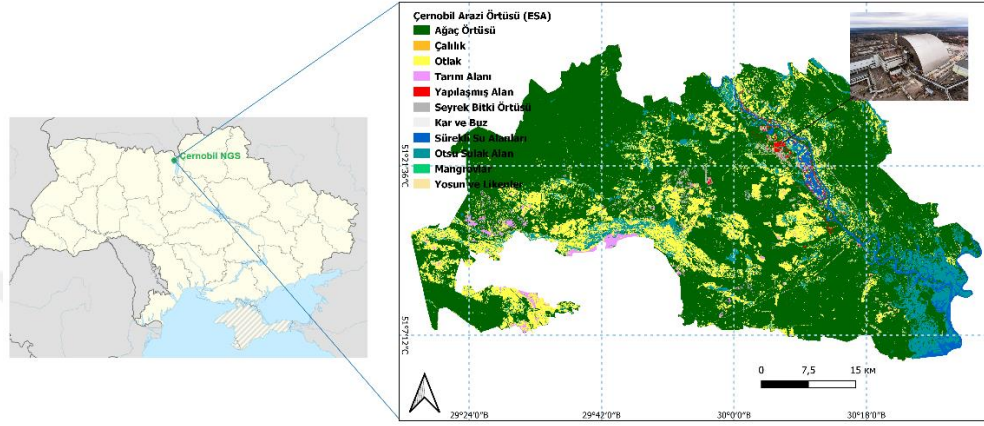
3.2.1. Çernobil Nükleer Güç Santrali

Ukrayna'nın kuzeyindeki Pripyat kasabası yakınlarında bulunan Çernobil Nükleer Santrali, 26 Nisan 1986'da meydana gelen feci nükleer kazayla biliniyor. Çernobil NGS, Ukrayna'nın başkenti Kiev'in yaklaşık 130 kilometre kuzeyinde, Kiev Bölgesinde yer almaktadır. Santral kompleksi yaklaşık 30 km²'lik bir alanı kaplar ve Pripyat Nehri'nin yakınında bulunmaktadır (Şekil 3.1). Yakın çevre, ormanlık alanlar, sulak alanlar, tarım arazileri ve terk edilmiş insan yerleşimlerinin birleşiminden oluşmaktadır. Pripyat'ın iklimi, nemli, karasal iklim olarak karakterize edilir. Pripyat, sıcaklıkta önemli mevsimsel değişiklikler yaşar. Yazlar nispeten sıcaktır ve en yoğun sıcaklıklı aylar olan Temmuz ve Ağustos aylarında ortalama sıcaklıklar +20°C ila +25°C arasında değişir (Anonim t.y.-c). Kışlar soğuktur ve ortalama sıcaklıklar donma noktasının altına düşer. En soğuk ay olan Ocak, -4°C ile -6°C arasında değişen ortalama sıcaklıklara sahiptir. Yıllık ortalama yağış miktarı 605 mm'dir (Anonim t.y.-b).

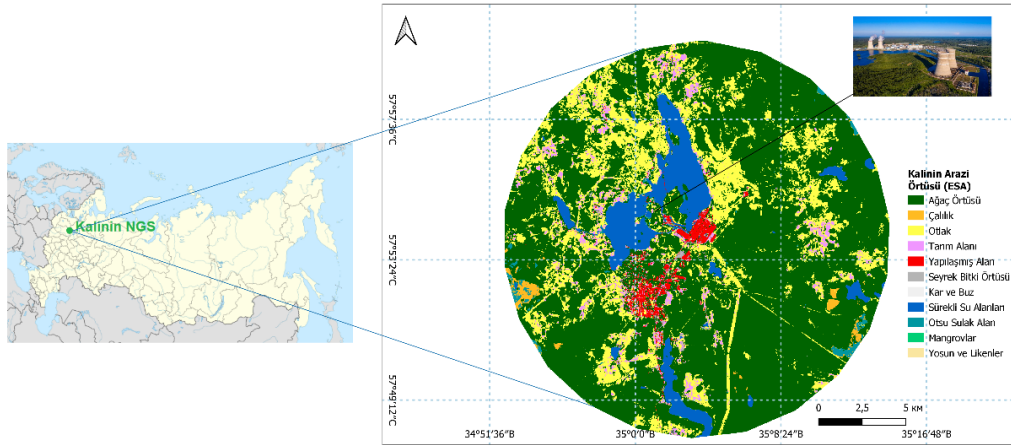
Çernobil NGS'yi çevreleyen çalışma alanı, nükleer kaza ve ardından insan yerleşimlerinin terk edilmesinden kaynaklanan uzun vadeli arazi örtüsü değişikliklerini araştırmak için bir fırsat sunmaktadır.

3.2.2. Kalinin Nükleer Güç Santrali

Kalinin NGS, Rusya'nın Tver bölgesine bağlı Udomlya kasabasında, Moskova'ya 330 km ve St. Petersburg'a 400 km uzaklıkta yer almaktadır (Şekil 3.2). Nükleer santral, her biri 1000 MW kapasiteli basınçlı su reaktörlü (VVER-1000) dört işletme güç ünitesi içermektedir. Nükleer santralin ilk güç ünitesinin inşaatı 1974 yılında başlamıştır. Mayıs 1984'te Kalinin NGS'nin 1 numaralı güç ünitesi şebekeye bağlanmıştır. Buna paralel olarak, gücü Aralık 1986'da devreye alınan 2. güç ünitesinin inşası gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Çernobil hariç tutma bölgesinin sınırları, kaza yaşanan 4. reaktörün konumu ve Pripjat şehrinin harita üzerinde gösterimi.



Şekil 3.2. Kalinin Nükleer Güç Santralinin harita üzerinde gösterimi ve ESA arazi örtüsü. Çalışma alanı, santral etrafındaki 11 km'lik yarıçaplı gözlem bölgesidir.

İkinci güç ünitesinden oluşan ikinci etabın inşaatına ise 1984 yılında başlanmıştır. Kalinin NGS'nin 3. ve 4. güç ünitesinin devreye alınması sırasıyla 2004'te ve 2012'de gerçekleştirilmiştir. Halihazırda Kalinin NGS'nin 4 güç ünitesinin tümü nominalin %104'ü kadar bir termik güç seviyesinde çalışmaktadır (Rosenergoatom 2021). Basınçlı su reaktörlerinde hem soğutma hem de yavaşlatmasında normal su kullanılır. Bu tip reaktörlerinde birincil soğutma döngüsü yüksek basınç altında reaktörün

çekirdeğinden akarken, ikinci devresinde üretilen buhar türbin çalıştırır. Bu iki döngü birbirinden ayrıdır ve bu nedenle ikincil döngüdeki su radyoaktif maddelerle kirlenmez. Pesvo gölü kıyasında yer alan Udomlya şehrinin yüzölçümü 9 km^2 ve 2020 yılı itibarıyla nüfusu 27.641'dir (Anonim t.y.-t). Udomlya ve Pesvo Gölleri, Kalinin NGS için soğutma havuzları olarak kullanılıyor. Udomlya ılıman bir karasal iklime sahiptir. Kışlar uzun ve orta derecede soğuktur. En soğuk ay ise ortalama $-8,4$ derece ile Şubat ayıdır. Yaz sıcak ve kısadır. En sıcak ayı ise ortalama $+18,5$ derece ile Temmuz ayıdır. Yıllık ortalama yağış miktarı 675 mm 'dir.



3.3. Metot

Bu bölüm, Çernobil ve Kalinin bölgelerinin zaman serisi analizi ve soğutma havuzunun yüzey suyu sıcaklığının ölçümü ve haritalanması için kullanılan yöntemleri sunmaktadır.

3.3.1. Ön İşleme

Bu bölüm, 1984'ten 2022'ye kadar olan zaman dilimini kapsayan Landsat veri setine uygulanan ön işleme adımlarını kapsamaktadır. Veri kümesi, Google Earth Engine (GEE) veri koleksiyonundan aktarılmış ve halihazırda atmosferik düzeltmeye tabi tutulmuş yüzey yansıtma değerlerine sahip *Koleksiyon 2* görüntülerden oluşmaktadır. Görünür, yakın kızılötesi, kısa dalga kızılötesi ve yüzey sıcaklık bantlar dahil olmak üzere analiz için gerekli bantlar çıkarılmıştır. Veri seti, Çernobil Hariç Tutulma ve Kalinin NGS'nin 11 km'lik izleme alanını kapsayan ilgi bölgelerini içermektedir. Uzun vadeli zamansal dinamikleri yakalamak amacıyla 1984'ten 2022'ye kadar olan görüntüleri içeren veri seti oluşturulmuştur.

Çernobil Hariç Tutma Bölgesinin alan sınırların vektör formatında temin edilmesi için açık kaynaklı mekânsal veri tabanı olan Open Street Map kullanılarak Ukrayna'nın ülke, il ve ilçe sınırları Geofabrik downloads (Anonim t.y.-h) indirme sunucu servisinden indirilmiştir. İndirilen veriler, geometri ve ilişkili özniteliklerle tanımlanan nesneleri depolamak için bir vektör biçimi olan "shapefile" formatında sunulmaktadır (Anonim 1998). Ukrayna ve şehirlerinin şekil dosyası QGIS yazılımına aktarıldıktan sonra öznitelik tabloların yardımıyla belirlenen ilgi alanı analizde kullanılmak üzere ayrı bir şekil dosyası olarak çıkarılmıştır.

Kalinin NGS'nin gözlem bölgesi 11 km'lik yarıçaplı bir dairedir ve ilgili şekil dosyası QGIS yazılımı yardımıyla merkezi 1, 2, 3, ve 4 numaralı güç ünitelerinin havalandırma borularını sayılarak (Rosenergoatom 2021) 11 km'lik daire çizilerek temin edilmiştir. Her iki ilgi alanlarına ait vektörel formda şekil dosyaları ayrı ayrı olarak GEE platformunun içine aktarılmıştır.

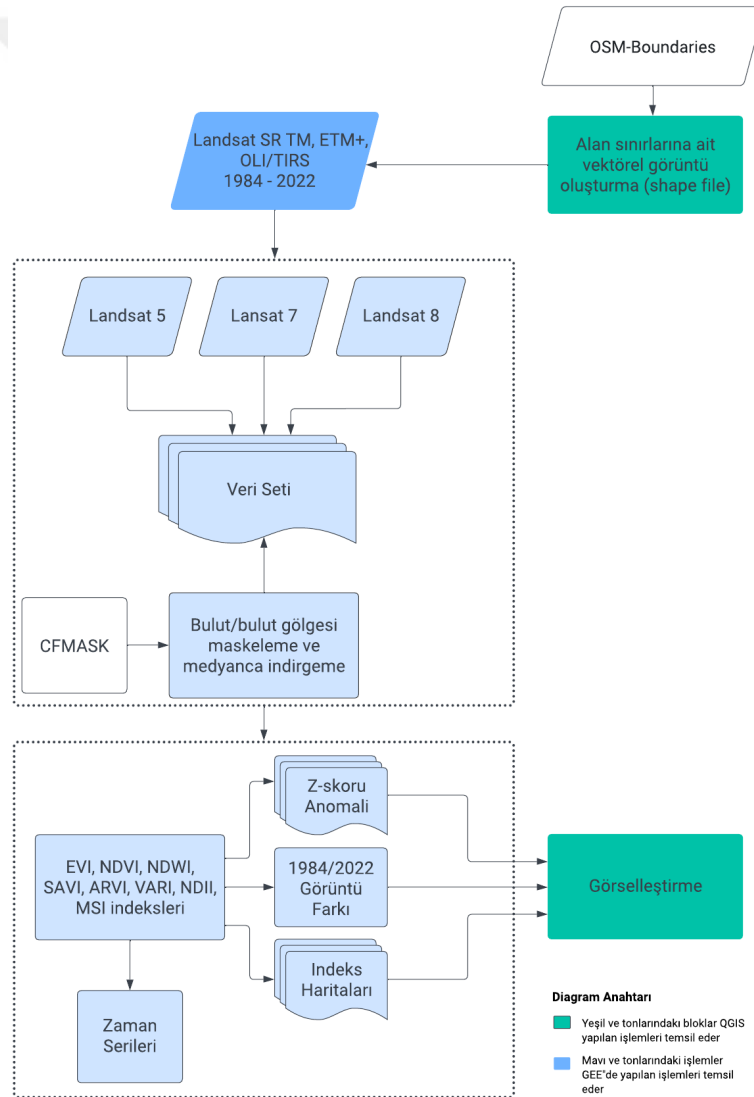
Uzun zaman periyodunu kapsayan veri setinin oluşturulması için Landsat 5, Landsat 7 ve Landsat 8 uydu misyonlarının sağlamış uydu görüntülerin tek bir veri seti içerisinde birleştirilmesi gerekmektedir. Farklı sensörlere ait verilerin tek bir veri seti altında kullanılmasına rağmen, GEE tarafından Koleksiyon 2 verileri için herhangi bir düzeltmeye gerek olmadığı ve yüzey yansıtma ürünleri ek bir ayarlamaya ihtiyaç duymadan son derece uygun ve güvenilir olduğu bilgisi verilmiştir (Anonim t.y.-g).

Ancak, farklı Landsat görevleri arasında bant isimleri ve yapılandırmalarındaki farklılıklardan dolayı, üç veri seti koleksiyonunu birleştirmeden önce tutarlılığı sağlamak için yeniden adlandırma adımı uygulanmıştır. Yeniden adlandırma süreci, her Landsat görevinin bantlarını standartlaştırılmış bir bant adı setine eşleme işlemini içeriyordu, bu sayede verinin sorunsuz entegrasyonu ve analizi mümkün olmuştur. Örneğin, Landsat 5'teki yakın kızılötesi bandının adı "SR_B4" ve Landsat 8'de "SR_B5" olduğundan dolayı, her ikisinin bant adları uygun olabilmesi için "NIR" olarak yeniden adlandırılabilir. Landsat Collection 2 Level-2 verileri yüzey yansıtma ve yüzey sıcaklığı değerleri sunarken veri kullanmadan önce ölçekleme katsayılarının uygulanması gerekmektedir. Bu ölçekleme katsayıları genellikle yüzey yansıtma ve yüzey sıcaklık değerlerini daha da hassaslaştırmak ve farklı görüntüler ve zaman dilimleri arasında tutarlılık ve karşılaştırılabilirlik sağlamak için gereklidir (Anonim t.y.-i).

Bant yeniden adlandırma ve ölçek katsayılarının uygulama adımlarından an sonra, Landsat 5, 7 ve 8'den Landsat veri seti koleksiyonları tek bir veri setinde birleştirilmiştir. Bulutların ve bulut gölgelerinin analiz üzerindeki etkisini azaltmak için *CFMask* algoritması, genellikle Landsat görüntülerinde yaygın olarak kullanılan bir algoritmadır ve Kalite Değerlendirme (QA) bandı genellikle görüntü koleksiyonunun bir parçası olarak sunulur (Foga vd. 2017). Bu bant, piksel sınıflandırmasının kalitesi ve güvenilirliğiyle ilgili bilgiler içerir ve özellikle bir pikselin bulut, bulut gölgesi, açık veya diğer kategorilerden hangisine sınıflandırıldığını belirtmektedir.

3.3.2. Zaman Serileri Analizi

Çernobil ve Kalinin bölgelerinin zaman serisi analizi, 1894'ten 2022'ye kadar bölgedeki uzun vadeli dinamikleri ve değişimleri anlamak için önemli bir araçtır. Bu analiz için iş akış şeması, sürecin adımlarını gösteren Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Zaman serileri analizine ait iş akış şeması

1984-2022 yıllarını kapsayan görüntü veri kümesi oluşturulduktan sonra, her bir yıl için bir liste oluşturulmuştur. Liste üzerindeki her yıl için 30 Mayıs ve 30 Eylül olmak üzere başlangıç ve bitiş tarihleri belirlenmiş ve bu tarihleri kullanarak veri kümesi filtrelenerek indirgenmiş bir koleksiyon elde edilmiştir. Böyle bir başlangıç ve bitiş tarihin seçimi altında yatan sebep ise, mevsimsel ve fenolojik farklılıklardan kaçınmak için farklı yıllara ait görüntülerin aynı ay veya mevsim içinde olması gerektiğidir. Aykırı ve aşırı değerlerin etkisi azaltılarak her bir yıl için temsil edici bir değer elde edilebilmesi için koleksiyonlar üzerinde medyan değeri hesaplanmıştır. Bu şekilde, yıl içi değişkenlik ve mevsimsel dalgalanmaların etkisini minimize ederek veri setindeki genel desenlerin ve eğilimlerin daha net bir şekilde anlaşılmasını sağlanabilir. Zaman serisi analizinin yapılabilmesi için çeşitli indekslerden yararlanılmıştır. Bu indeksler, çalışma alanının zaman içindeki belirli özellikleri hakkında değerli bilgilerin sağlanması beklenir. Bu çerçevede, çalışmada tercih edilen NDVI, SAVI, ARVI, EVI, VARI, NDII ve MSI bitki indeksleri, analiz sürecinin temel bileşenleri olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın temel dayanaklarından biri, Aneta Modzelewska vd. (2020) tarafından yapılan araştırmadır. Bu çalışmada, 1984, 1986, 1987, 2002/2003 ve 2010/2011 dönemleri için Landsat TM görüntüleri kullanılarak NDVI, SAVI, ARVI, VARI, NDII ve MSI bitki indekslerinin değerleri araştırılmıştır. Aneta Modzelewska ve ekibinin çalışması daha dar bir coğrafi alanda ve daha kısa bir zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmanın tasarımı, geniş bir zaman aralığı boyunca, özellikle de "Yasak Bölge" içerisinde yer alan tüm alanı kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. Bu seçim, indekslerin uzun vadeli etkileri ve değişimleri daha iyi anlamak amacıyla yapılmıştır. NDVI indeksi tek başına toprak ve atmosfer gibi etkenleri göz önüne almadığından, farklı indekslere başvurarak ve bu indeksler arasındaki ilişkileri değerlendirerek daha akılcı bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu nedenle, NDVI indeksinin yanı sıra, toprak ve atmosfer gibi etkileri göz önünde bulunduran ARVI, VARI, EVI, SAVI indekslerin değerleri incelenmiş ve aralarındaki ilişkiler tespit edilmiştir. Ayrıca, MSI ve NDII indeksleri, su içeriğini yansıtmaya yetenekleri nedeniyle özellikle seçilmiştir. Ayrıca, J. Xue ve Su (2017) çalışması da bu indekslerin önemine dikkat çekmiştir. Bu çalışma, bitki örtüsünü değerlendirmek için kullanılan indekslerin gelişimi ve uygulamaları üzerinde durmuş ve bu indekslerin önemli araçlar olduğunu vurgulamıştır. Bu indekslerin seçimi, araştırmanın genel hedefleriyle uyumlu olarak gerçekleştirilmiş ve indeksler arası ilişkilerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlamıştır, ayrıca bu indekslerin çalışmanın amaçlarına olan uygunluğunu desteklemektedir.

3.3.2.1. NDVI

Rouse J.W. vd. (1974) tarafından önerilen Normalize Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) bitki örtüsünün yeşilliğini ölçmek için kullanılır ve bitki yoğunluğunu anlamada ve bitki sağlığındaki değişiklikleri değerlendirmede yararlıdır. NDVI indeksi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3.1)$$

Burada NIR – yakın kızıl ötesi ve RED – kırmızı bölgelerindeki spektral reflektans değerlerini ifade eder. Söz konusu fark, yeşilliklerin varlığına duyarlıdır, çünkü yeşil bitki

örtüsü genellikle klorofil absorpsiyonu nedeniyle kırmızıda sinyali azaltırken, yakın kızılötesinde sinyali artırır. NDVI -1 ile 1 arasında değerler alır ve negatif değerler su alanlarını ifade ederken, 1'e yakın değerler yoğun bitki örtüsünü ifade etmektedir (Anonim t.y.-q). Ancak NDVI, toprak parlaklığı, atmosfer, bulut ve bulut gölgesi gibi etkilerine karşı hassastır (Jinru Xue ve Su 2017).

3.3.2.2. ARVI

NDVI indeksinin atmosferik özelliklerine olan bağıllığını azaltmak için Atmosferik Dirençli Bitki Örtüsü indeksi (Kaufman ve Tanré 1992) tarafından önerilmiştir. Simülasyonlar, ARVI'nin NDVI ile benzer bir dinamik aralığa sahip olduğunu, ancak atmosferik etkilere karşı NDVI'dan ortalama olarak dört kat daha az hassas olduğunu göstermiştir. ARVI indeksin ifadesi denklem (3.2) içerisinde yer almaktadır.

$$ARVI = \frac{(NIR - RB)}{(NIR + RB)} \quad (3.2)$$

Burada RB, Mavi (BLUE) ve Kırmızı arasındaki farktır ve:

$$RB = RED - \gamma(BLUE - RED) \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. γ – aerosol tiplerine bağlı olan atmosferik düzeltme katsayısı ve ARVI'nin atmosferik etkilere karşı direnci, bu parametrenin tespitinin başarısına bağlıdır (Bannari vd. 1995). Bu değer 0 olduğunda, ARVI indeksi NDVI indeksine eşittir ve aerosol modeli önceden bilinmediği durumlarda $\gamma = 1.0$ çoğu uzaktan algılama uygulaması için daha iyi bir düzeltmeye izin vermektedir. Bu durumda denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$ARVI = \frac{NIR - (2RED - BLUE)}{NIR + (2RED - BLUE)} \quad (3.4)$$

3.3.2.3. SAVI

Daha önce gösterildiği gibi NDVI, bitki örtüsünün parlaklığı ve gölgesi ve toprak arka plan parlaklığı gibi çevresel faktörlerine karşı hassas olduğunu gösterilmiştir (Jinru Xue ve Su 2017). Huete (1988) tarafından kırmızı ve yakın kızıl ötesi dalga boylarını içeren spektral indekslerinden toprak parlaklığı etkilerini minimize etmek için bir dönüşüm tekniği sunulmuştur. Böylece Toprakla Düzeltilmiş Bitki Örtüsü (SAVI) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)(1 + L)}{(NIR + RED + L)} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki bağıntı NDVI'nin toprak arka plan duraylılığını arttırmak için kurulmuştur; burada L , NDVI'nin toprak arka planına duyarlılığını artıran toprak

iyileştirme indeksidir. L indeksi 0 ile 1 arasında değişir ve alacağı değer analize tabi tutulan bölgenin bitki örtüsü yoğunluğuna bağlıdır (Huete 1988). Çok düşük bitki yoğunluğu $L=1$, orta bitki yoğunluğu $L= 0.5$ ve daha yüksek bitki yoğunluğu $L= 0,25$ olarak alınabilir. En yaygın çevre koşullarında L değeri 0,5 civarındadır ve böylece bağıntı:

$$SAVI = \frac{1.5 * (NIR - RED)}{(NIR + RED + 0.5)} \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir.

3.3.2.4. EVI

Doğal koşullar altında, toprak ve atmosfer NDVI üzerinde toplu bir etkiye sahiptir (Jinru Xue ve Su 2017) . Liu ve Huete (1995) tarafından NDVI'deki toprak ve atmosfer etkiler incelenmiştir. Toprak ve atmosfer etkileri birbiriyle etkileşim halinde olduğu ve bitki örtüsüyle değişkenlik gösterdiği için, bitki indeksleri üzerinde çok karmaşık bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardı. Toprak ve atmosfer arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak, bir gürültüyü azaltmak diğerlerini artırabileceği için aynı anda hem toprak hem de atmosfer etkilerini düzeltecek bir parametreye ihtiyaç duyulur. Bu parametre Artırılmış Bitki İndeksi (EVI) olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Huete vd. 1997):

$$EVI = 2.5 \frac{NIR - RED}{(NIR + 6RED - 7.5BLUE) + 1} \quad (3.7)$$

Burada 2,5 kazanç katsayısı, 6 ve 7,5 aerosol saçılımını ve emilimini düzeltmek için tasarlanmış katsayılardır ve 1 örtü arka plan düzeltme faktörüdür.

3.3.2.5. VARI

Görünür Atmosferik Dirençli İndeksin (VARI) atmosferik etkilerine karşı minimum düzeyde hassas olduğunu ve bitki oranının %10'dan daha küçük bir hatayla tahmin edilmesine olanak sağladığını bulunmuştur (Gitelson vd. 2002). VARI indeksinin matematiksel ifadesi 3.8 numaralı denklem ile ifade edilmiştir.

$$VARI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE} \quad (3.8)$$

Gitelson vd. tarafından yapılan çalışma göstermiştir ki, görünür aralıktaki bitki örtüsünden gelen yanıtta ince farklılıklara rağmen, önerilen indeksin orta ila yüksek bitki oranına duyarlılığı NDVI' dan çok daha fazladır.

3.3.2.6. NDII

Normalize Fark Kızıl Ötesi İndeksi (NDII), bitki örtüsünün su içeriğindeki değişikliklere duyarlı bir yansıma ölçümüdür. NDII, Normalize bir fark formülasyonu

kullanır ve indeks değerleri artan su içeriği ile artar. Uygulamalar arasında mahsul tarım yönetimi, orman örtüsü izleme ve bitki örtüsü stres tespiti yer alır (Hardisky, Klemas, ve Smart 1983).

$$NDII = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \quad (3.9)$$

Burada SWIR1- kısa dalga kızılötesi bandını ifade eder, indeksin alacağı değerler -1 ile 1 arasında değişmektedir.

3.3.2.7. MSI

(Raymond Hunt ve Rock 1989) tarafından önerilen Nem Stres İndeksi, yaprak su içeriğinin artmasına duyarlı olan bir yansıma ölçümüdür. Bitki örtüsündeki yaprakların su içeriği arttıkça, 1599 nm civarındaki soğurma kuvveti artar. 819 nm'deki absorpsiyon ise su içeriğinin değişiminden neredeyse etkilenmediğinden dolayı referans olarak kullanılır. Uygulamalar arasında bitki örtüsü stres analizi, üretkenlik tahmini ve modellemesi, yangın tehlikesi durum analizi ve ekosistem fizyolojisi çalışmaları yer alır. MSI, diğer su bitki indekslerine göre ters çevrilir; daha yüksek değerler daha fazla su stresini ve daha az su içeriğini gösterir.

$$MSI = \frac{SWIR1}{NIR} \quad (3.10)$$

Bu indeksin alacağı değerler 0 ile > 3 arasında değişir ve yeşil bitkiler genellikle 0.4 ile 2 arasındadır.

3.3.2.8 Zaman Serilerinin Oluşturulması

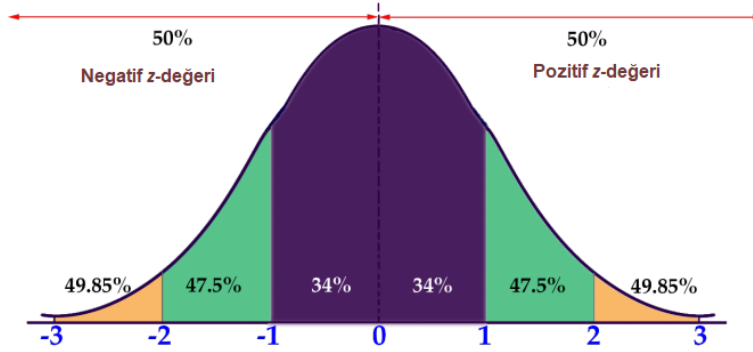
Bölgelerin zamansal trendlerini anlamak için, 3.3.2.1, 3.2.2.2, 3.3.2.3, 3.3.2.4, 3.3.2.5, 3.3.2.6 ve 3.3.2.7 bölümlerinde verilen spektral indeksleri hesaplandıktan sonra elde edilen piksel değerleri üzerinden ortalama değeri alınmış ve ardından bir trendle uyumlu hale getirilerek yıllık zaman serileri oluşturulmuştur. Bu adım, belirli bir zaman aralığı boyunca (1984-2022) verileri analiz etmeyi ve içerdikleri temel trendi veya deseni belirlemeyi içermektedir. Zaman serilerini bir trendle uyumlu hale getirerek, verilerin zaman içindeki genel yönelimini yakalamayı ve nicelendirmeyi amaçlanmıştır. Böylece analiz edilen değişkenlerin uzun vadeli davranışını ve değişikliklerini daha iyi anlaşılmasını sağlayıp araştırma için değerli içgörüler sunmaktadır.

Zamansal eğilimlerinin daha iyi anlaşılması için yıllık anomaliler (z-skor) tüm veri kümesi için (EVI, NDVI, ARVI, SAVI, MSI, NDII, VARI) elde edilmiştir. Bir değişken için z-skoru aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$z = \frac{X_y - \bar{X}}{\sigma} \quad (3.11)$$

Burada X_y – analize tabi tutulan yıla ait hesaplanan indeksin almış olduğu piksel değeri, $\bar{X}_y$ – 1984-2022 arasındaki indeksin ortalama değeri ve σ – standart sapmayı ifade etmektedir. z-skoru, verilerinin ortalamasından ne kadar ve hangi yönde saptığını

göstermektedir. -1 ile 1 arasındaki (yani ortalamanın 1 standart sapması içindeki) tüm z değerlerinin, verilerdeki normal değişimi temsil ettiği kabul edilir (Anderson vd. 2010).



Şekil 3.4. z-değerlerinin tamsayı değerleri için olasılık yüzdeleri (standart sapmalar); yüzdelik değerleri yaklaşık olarak gösterilmiştir

3.3.3 Yüzey Su Sıcaklığının Belirlenmesi

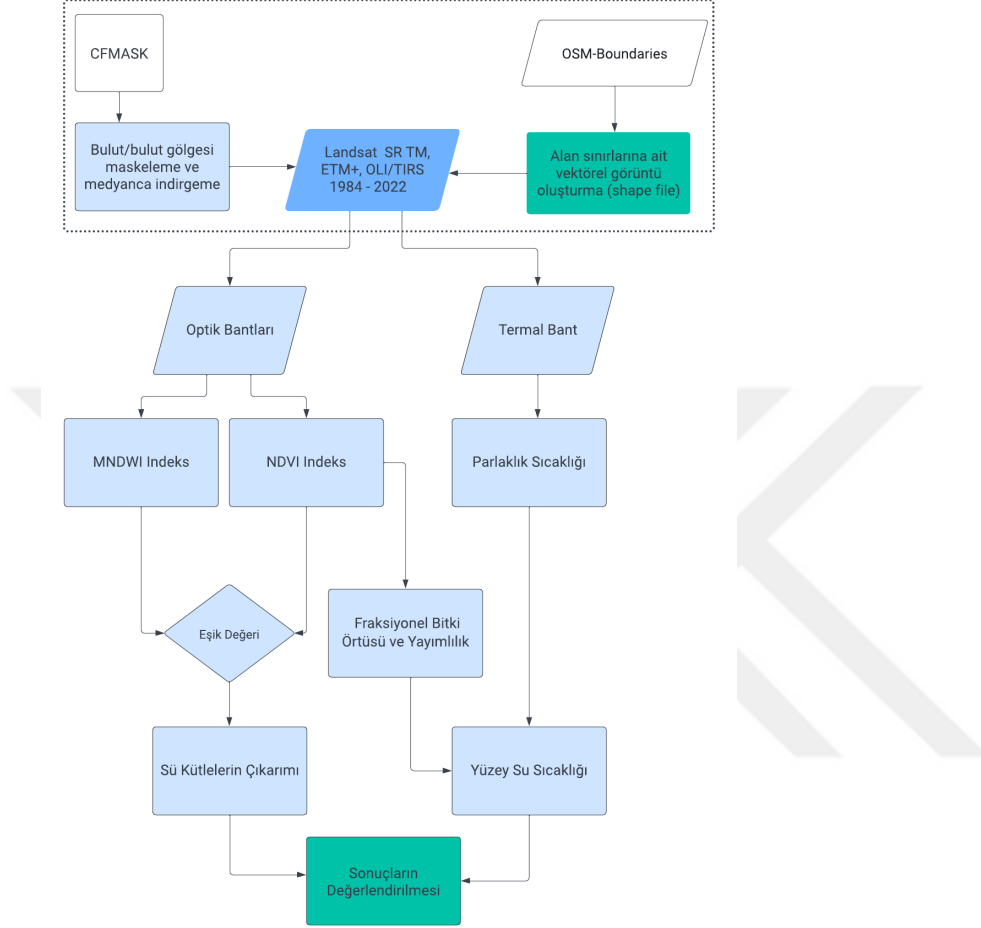
Ekolojik ve hidrolojik süreçleri incelemek yüzey su dinamiklerinin araştırılmasında önemli bir rol oynar (Huang vd. 2018). Yüzey sıcaklığını belirlemek için kullanılan yöntem (Sobrino, Jiménez-Muñoz, ve Paolini 2004) tarafından önerilmiştir. Analiz sırasında izlenen adımlar Şekil.3.5'te yer almaktadır.

Su kütlelerin çıkarılmasında kullanılan su indeks yöntemi suyun güçlü yansımaya ve zayıf yansımaya gösterdiği iki bandı kullanarak oran işlemiyle hesaplanan su çıkarım yöntemlerinden biridir (Zhou vd. 2015). Normalize fark bitki indeksi (NDVI), Normalize fark su indeksi (NDWI) ve modifiye edilmiş Normalize fark su indeksi (MNDWI) gibi yaygın olarak kullanılan indeks modelleri bulunmaktadır. Deneysel sonuçlar, NDVI-MNDWI modelinin çeşitli topoloji yapısına sahip hibrit bölgelerinde su sınırını yüksek doğrulukla elde edebildiğini göstermektedir (Aslan ve Koc-San 2021; Zhou vd. 2015). McFeeters (1996) tarafından öne sürülen NDWI (Normalize Fark Su İndeksi) (3.12) daha sonra Xu (2006) tarafından yakın kızıl ötesi (NIR) bandını yakın/orta kızıl ötesi bandı ile (MIR/SWIR) değiştirip modifiye edilerek MNDWI (Modifiye Edilmiş Normalize Fark Su İndeksi) indeksi olarak önerilmiştir (3.13).

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (3.12)$$

$$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad (3.13)$$

NDWI'nın NIR bandı yerine SWIR/MIR bandını kullanarak yapılan iyileştirme suyu diğer su olmayan özelliklerden hızlı ve doğru bir şekilde ayırt edebildiğini göstermiştir (Xu 2006).



Şekil 3.5. Su yüzey sıcaklığı belirlenmesinde izlenen adımlarını içeren akış şeması

Su alanlarının çıkarılması NDVI ve MNDWI verilerine eşik değeri belirlenerek gerçekleştirilmiştir. Uygun eşik değerlerini elde etmek için, deneme-yanılma yöntemine dayanarak en iyi sonuca ulaşılan kadar farklı NDVI ve MNDWI değerleri kullanılarak bu işlem tekrar edilmiştir (Aslan ve Koc-San 2021). $MNDWI_{eşik\ deger} < DN < NDVI_{eşik\ deger}$ koşulunu sağlayıp sonuçta elde edilen iki bileşenli su maskesi (1 - su olan, 0 - su olmayan) su olmayan değerlerden arındırılarak su alanları çıkarılmış ve elde edilen raster verisi vektör haline getirilmiştir.

Yüzey sıcaklığının hesaplanmasında (Artis ve Carnahan 1982) tarafından yapılan çalışmada geliştirmiş oldukları ve aşağıda yer alan bağıntı kullanılmıştır.

$$LSWT = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda T_B}{\rho} \right) \cdot \ln(\epsilon)} \quad (3.14)$$

Burada λ – yayılmış parlaklığın merkezi bant dalga boyunu (11.45 μm) (Giannini vd. 2015); $\rho = h \cdot c / \sigma$, σ -Boltzmann sabiti ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K), burada h -Planck sabiti ($6.626 \cdot 10^{-34}$ J*s), c – ışık hızı ($2.998 \cdot 10^8$ m/s), T_B – parlaklık sıcaklığı (Landsat 5 ve 7 için Bant 6 ve Landsat 8 için Bant 10) ve ε – yayımlılığını ifade etmektedir. Artis ve Carnahan (1982) tarafından belirtildiği gibi Kruse vd. (1962) yayımlık, bir yüzeyin ışıma kabiliyetini ideal bir yayıcı veya kara cismin ışıma kapasitesiyle karşılaştıran bir oran olarak tanımlamıştır. (Sobrino vd. 2004) tarafından yayımlılık şu şekilde verilmiştir:

$$\varepsilon = 0.004 P_v + 0.986 \quad (3.15)$$

Burada P_v – bitki oranı olup

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad (3.16)$$

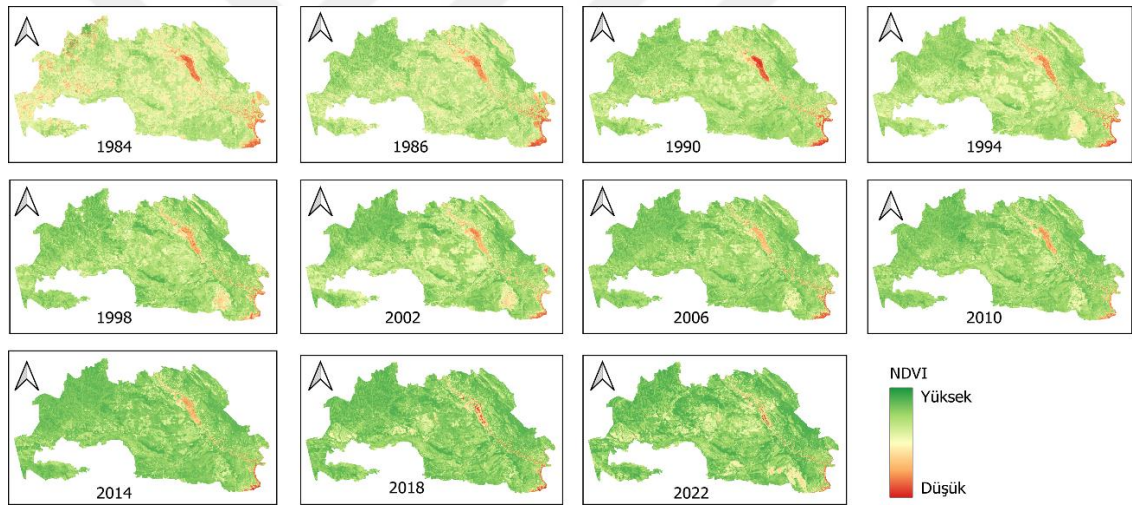
olarak ifade edilmektedir (Carlson ve Rizley 1997).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Arazi Örtüsü Değişimi

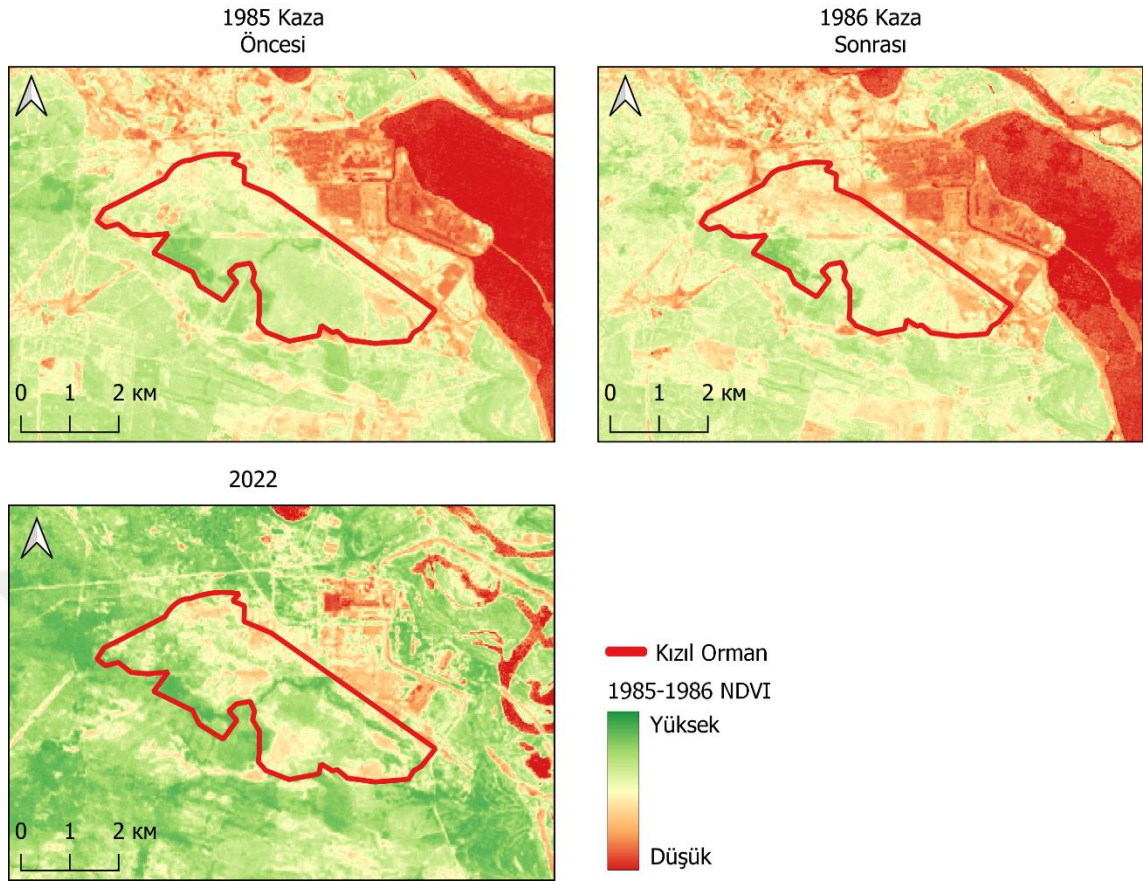
Bu bölümde, Çernobil ve Kalinin NGS'lerin bulunduğu bölgelerine ait farklı spektral indislerin (NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI) analizinden elde edilen bulgular sunulacak ve tartışılacaktır. Analiz, spektral indislerin zamansal ve mekânsal değişimleri keşfetmeye odaklanmaktadır ve bu değişimlerin ilgili bölgelerinin bitki örtüsü dinamiklerini anlama açısından önemini vurgulamaktadır. Gerek Çernobil gerek Kalinin NGS bölgelerinde hesaplanan spektral indislerde yıllar içinde bir artış gözlemlenmiştir, bu da bitki büyümesinde veya biokütlesinde pozitif bir eğilimi temsil etmektedir.

Bu çalışmada incelenen spektral indeksler arasında yer alan NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), bitki örtüsünün nezdinde sağlığın ve yoğunluğun bir yansımasıdır. Şekil.4.1. Çernobil bölgesinde 1984, 1986, 1990, 1994, 1998, 2002, 2006, 2010, 2014, 2018 ve 2022 yıllarına ait NDVI değerleri içeren görüntüler sunulmaktadır.



Şekil 4.1. Çernobil farklı yıllara ait NDVI haritaları

Koyu yeşil alanlar yüksek bitki yoğunluğuna işaret ederken, daha açık yeşil veya sarı/kırmızı alanlar daha düşük bitki yoğunluğunu göstermektedir. NDVI haritası, NDVI haritaları Çernobil alanında ilginç desenler ortaya koymaktadır, santralin normal işletim durumunda olan 1984 yılındaki NDVI değerleri 1986, yani kazanın meydana geldiği yıldan daha az olduğunu görülmektedir. Buna karşı, reaktör alanına yakın bölgeler, daha düşük NDVI değerlerini göstererek, nükleer olayın etkisine bağlı olarak azalmış bitki yoğunluğunu işaret etmektedir. Kaza sonrasında yüksek soğurulan gama dozu çam ağaçlarının iğnelerinde bulunmuştur (Expert Group "Environment" 2005). Bu küçük orman alanı, ağaçların ölmesi ve kırmızımsı kahverengi bir renk almasıyla "Kırmızı Orman" olarak bilinmeye başlamıştır. Bu, alandaki organizmalar üzerinde radyasyon zararının en açık şekilde gözlemlenebilir etkisi olarak değerlendirilmektedir. NDVI indeksinin bu bölgedeki değişimi Şekil.4.2`de gösterilmiştir.

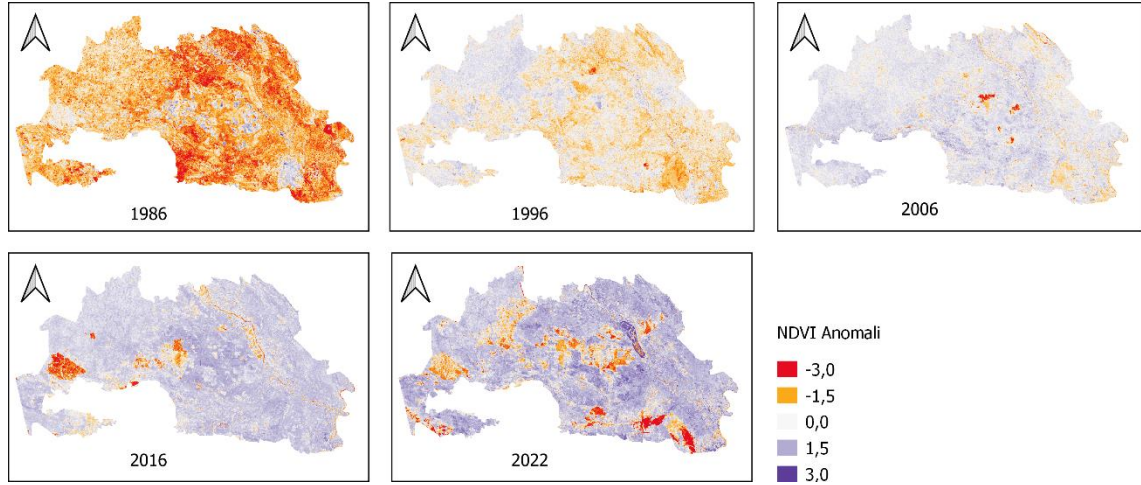


Şekil 4.2. Kızıl orman bölgesine ait 1985, 1986 ve 2022 yılına ait NDVI haritası; kırmızı ile işaretlenen bölge kızıl ormanın sınırlarını temsil etmektedir

Şekil 4.2.'den 2022 yılında Kızıl ormanın ve etrafındaki alanına ait bitki örtüsünün yüksek oranda iyileştiği açıkça görülmektedir.

Su yüzeyleri genellikle düşük NDVI değerlerine sahip olup, genellikle negatif (-1 ila 0 arası) değerler görülür. Yıllar geçtikçe NDVI indeksi su alanlarında belirgin bir azalma göstermektedir. Bu durum, su kaynaklarının azalması en başta kuraklık veya insan faaliyetleri olmaması gibi faktörlerle ilişkilendirilebilir fakat 2005 yılında yayınlanan raporda (Expert Group “Environment” 2005) 2005 yılında soğutma havuzunun seviyesi ortalama Pripyat nehrinden yapay olarak 6 ile 7 m arasında tutulup santralin soğutma sistemleri nihayet kapatıldıktan sonra havuza su pompalanmasının sonlandırıldığını belirtilmektedir. Böylece soğutma havuzunun NDVI değerlerinin pozitif değerlere doğru artması, soğutma havuzunun sınırlarının gerildiği ve zamanla bitki örtüsü ile kaplandığı ile ilişkilendirilebilir.

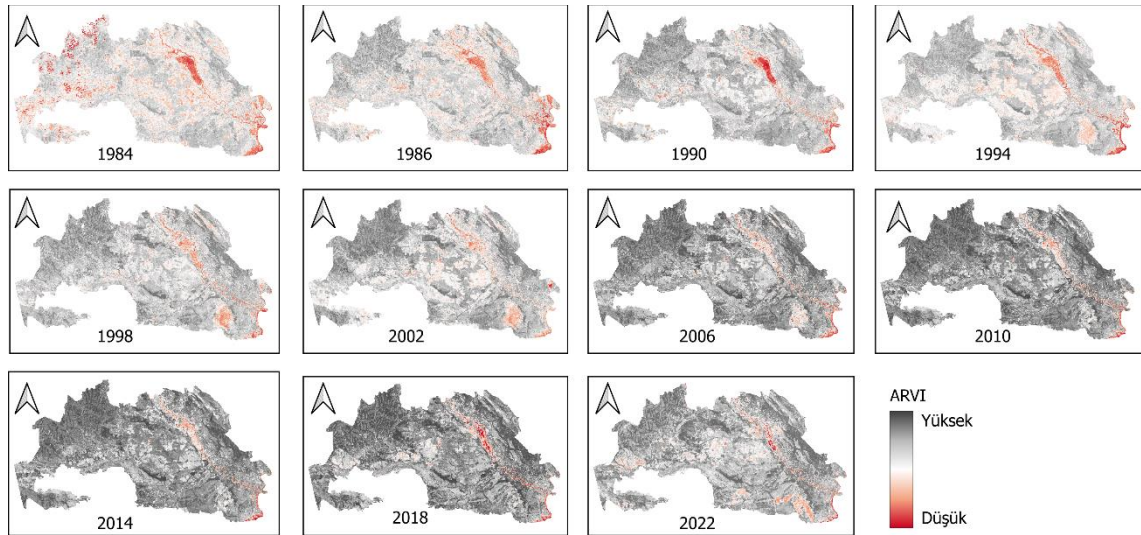
NDVI normal veya beklenen değerlerinden olan sapmalarını tespit etmek için kaza 1986 yılından başlayarak 10 yıllık zaman periyodundaki anomali haritaları oluşturulmuştur (Şekil. 4.3).



Şekil 4.3. Çernobil 1986'dan başlayarak her on yıldaki NDVİ anomali haritaları

Elde edilen anomali değerleri her 10 yılda bir yıllık değerlerin 38 yılın popülasyon dağılımının içindeki göreceli istatistiksel konumunu belirlemektedir. -1 ile 1 arasındaki anomali değerleri, verilerde normal varyasyonu temsil ettiği kabul edilir ve haritalarda açık sarı ile ve açık mor rengi ile gösterilmiştir. -3 ve +3 yakın değerler aşırı değerler, yani anomalileri gösterir. 1986 yılına ait anomali haritası aşırı negatif değerler fazla olduğundan harita üzerindeki kırmızı renk baskındır ve olay sonrasında yayılan aşırı radyasyon ile ilişkilendirilebilir. Buna karşın, zaman geçtikçe negatif değerlerin azaldığı ve pozitif değerlerin arttığı görülmektedir.

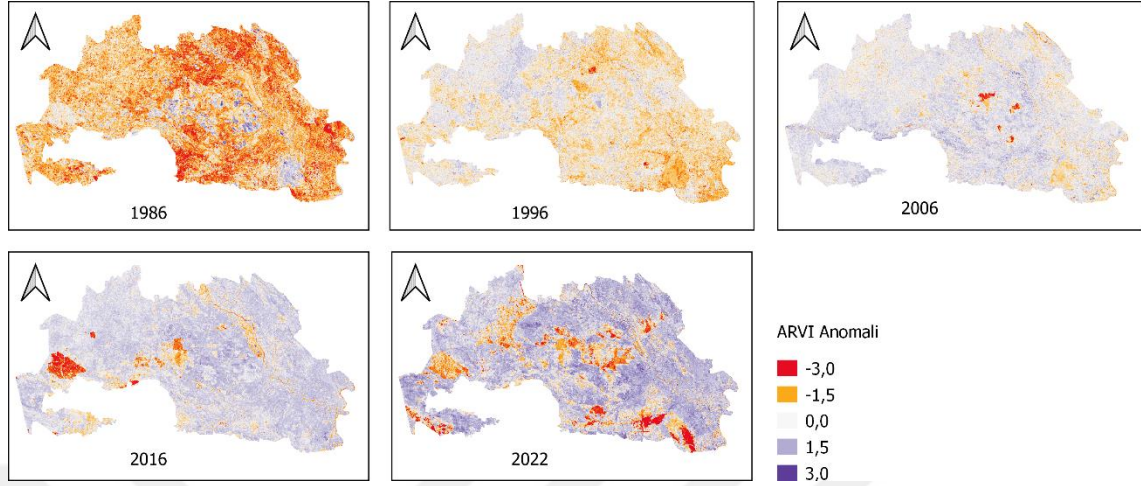
ARVI indeksi bitki sağlığını ve canlılığının mekânsal dağılımını temsil etmekle kalmayıp, ayrıca atmosferik etikleri de hesaba katmaktadır. İlgili bölgenin ARVI haritaları Şekil 4.4'te yer almaktadır.



Şekil 4.4. Çernobil farklı yıllara ait ARVI haritaları

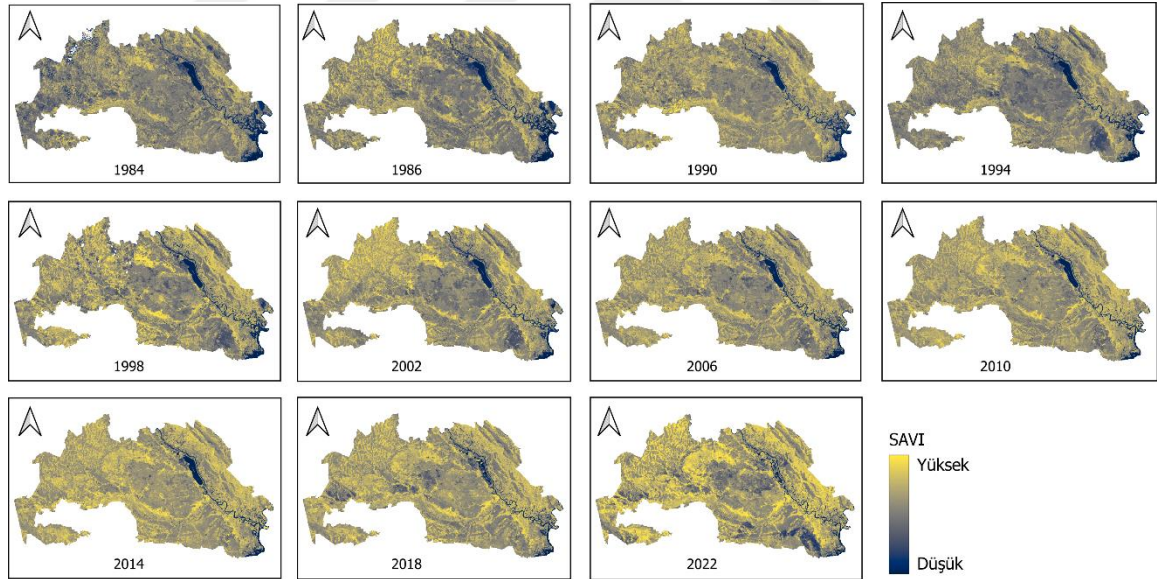
ARVI haritalarında koyulaşan gri renk pozitif değişimi gösterir ve söz konusu bu eğilim yıllar içerisinde net bir şekilde gözlemlenmektedir. ARVI indeksinin anomali haritalarına

bakıldığında NDVI indeksine ait anomali haritaları ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



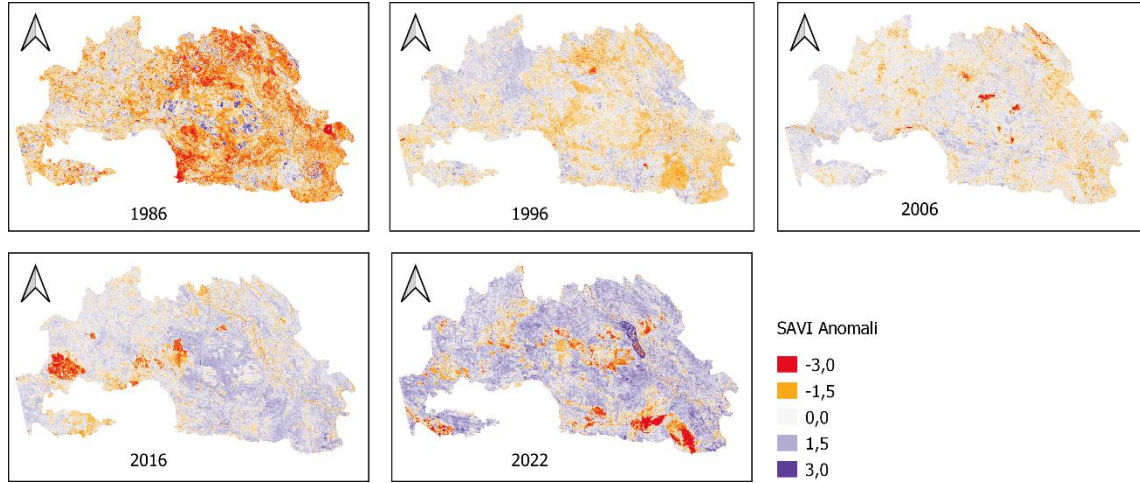
Şekil 4.5. Çernobil 1986'dan başlayarak her on yıldaki ARVI anomali haritaları

SAVI indeksi toprak etkilerini dikkate alarak bitki sağlığı ve yoğunluğunun mekânsal dağılımını temsil eder.



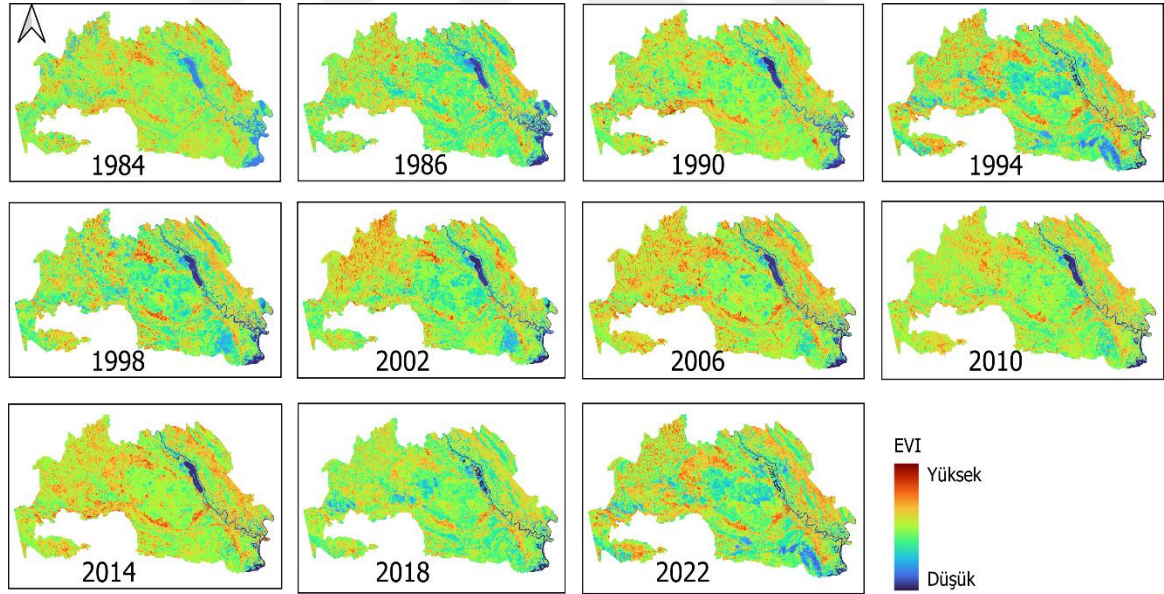
Şekil 4.6. Çernobil farklı yıllara ait SAVI haritaları

Şekilde 4.6'da iyileşmenin en fazla olduğu yıl 2022 olarak görülmektedir ve genel dağılım NDVI ve ARVI indeksi ile uyum içerisindedir. Fakat SAVI indeksi için en fazla pozitif değişimin meydana geldiği yer 2022 yılı olurken NDVI ve SAVI için en yoğun iyileşme 2014 ve 2018 yılında gözlemlenmektedir.



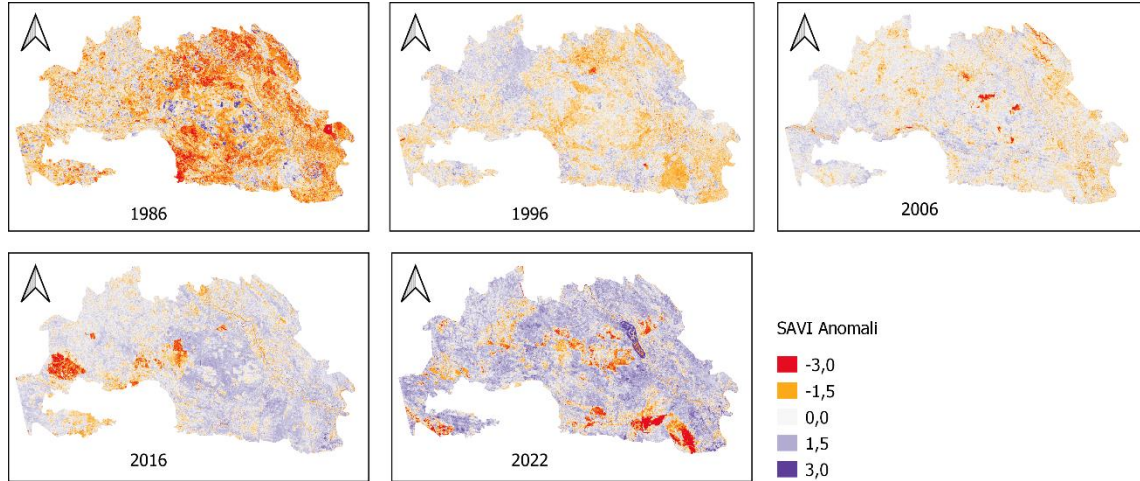
Şekil 4.7. Çernobil 1986’den başlayarak her on yıldaki SAVI anomali haritaları

Bu çalışma kapsamında elde edilen diğer bir bitki indeksi olan EVI, NDVI indeksinde olduğu gibi bitki örtüsünün mekânsal dağılımını gösterir ve farklı bitki örtüsü seviyelerine sahip alanları sergiler. Daha yüksek EVI değerleri daha sağlıklı ve yoğun bitki örtüsüne işaret eder. Şekil 4.8’deki EVI haritalarında düşük EVI değerleri mavi, yüksek değerler ise kırmızı rengi ile görselleştirilmiştir.



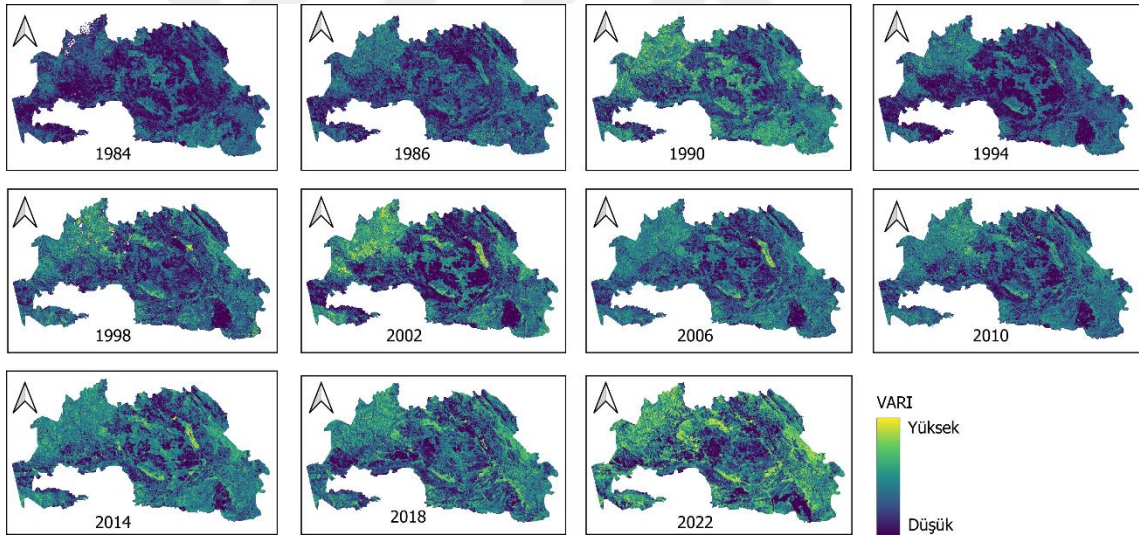
Şekil 4.8. Çernobil farklı yıllara ait EVI haritaları

EVI indeksi haritaları da diğer bitki indekslerinde olduğu gibi soğutma havuzunun küçüldüğünü göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre, 2014 ve 2022 yıllarında en belirgin iyileşme görülmüştür. Bu yıllarda bitki örtüsündeki yoğunluk ve sağlığın arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, bitki büyümesi ve canlılığının zaman içinde toparlandığını ve bölgedeki çevresel koşulların iyileştiğini işaret etmektedir. Bu bilgiler, ekosistemlerin restorasyonu ve doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimi açısından önemli ipuçları sunmaktadır.



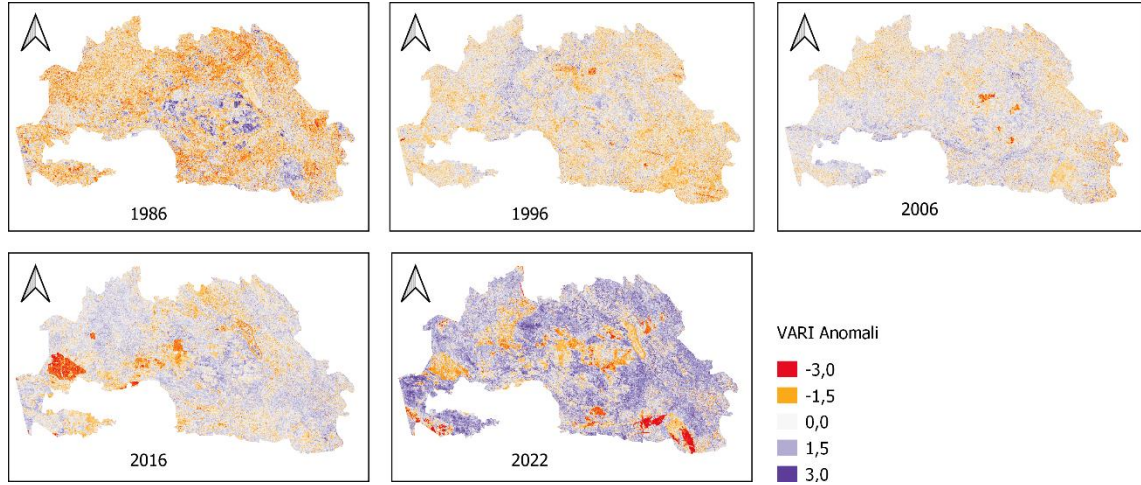
Şekil 4.9. Çernobil 1986’den başlayarak her on yıldaki EVI anomali haritaları

VARI indeksi, bitki canlılığının görünür spektrumdaki mekânsal dağılımını atmosferik etkileri hesaba katarak temsil eder. Daha yüksek VARI değerleri daha sağlıklı ve canlı bitki örtüsünü işaret ederken, düşük değerler daha seyrek veya stresli bitki örtüsünü gösterir.



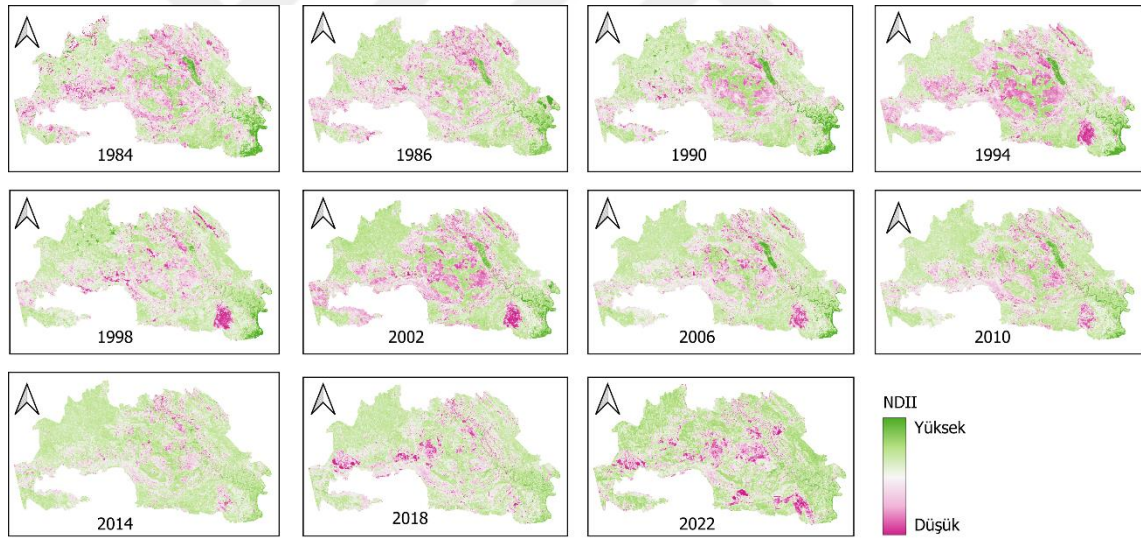
Şekil 4.10. Çernobil farklı yıllara ait VARI haritaları

VARI indeksi haritalarına bakıldığında diğer indekslerde olduğu gibi değerlerin zamanla arttığı gözlemlenmektedir. Analiz sonuçlarına göre, bitki örtüsünün yoğunluğu ve sağlığı zaman içinde artış göstermiştir. Bu durum, bölgedeki bitki örtüsünün iyileşme sürecinde olduğunu ve çevresel koşulların olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, iyileştirme çabalarının ve çevresel koruma önlemlerinin başarılı olduğunu ve ekosistem sağlığının geliştirildiğini göstermektedir.



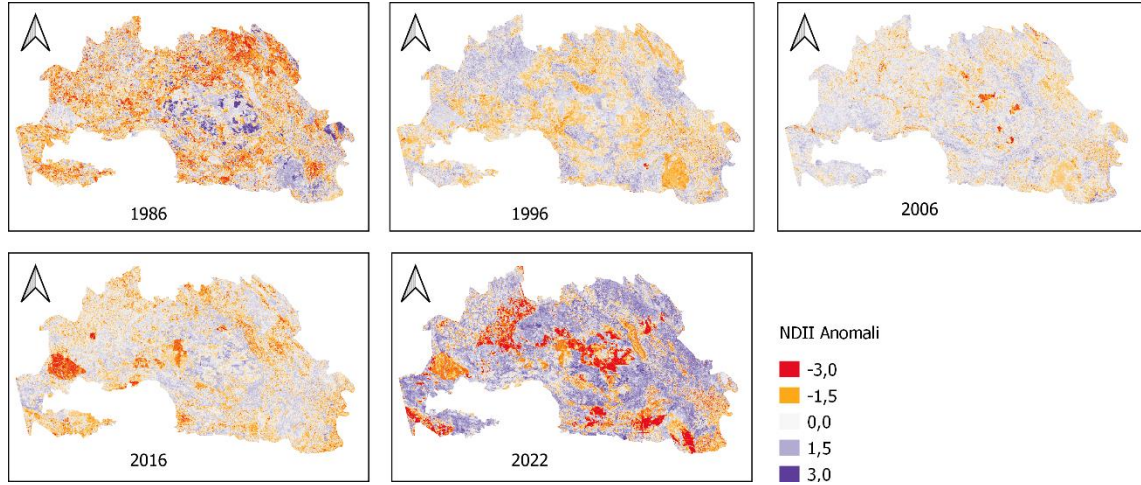
Şekil 4.11. Çernobil 1986’den başlayarak her on yıldaki VARI anomali haritaları

NDII indeksi değerleri daha yüksek nem içeriği ve daha sağlıklı bitkileri işaret ederken, daha düşük değerler su stresi veya daha kuru koşulları gösterir. Bu indeks, farklı ekosistemlerde suyun kullanılabilirliği ve bitki sağlığının izlenmesi ve analiz edilmesi için özellikle faydalıdır.



Şekil 4.12. Çernobil farklı yıllara ait NDII haritaları

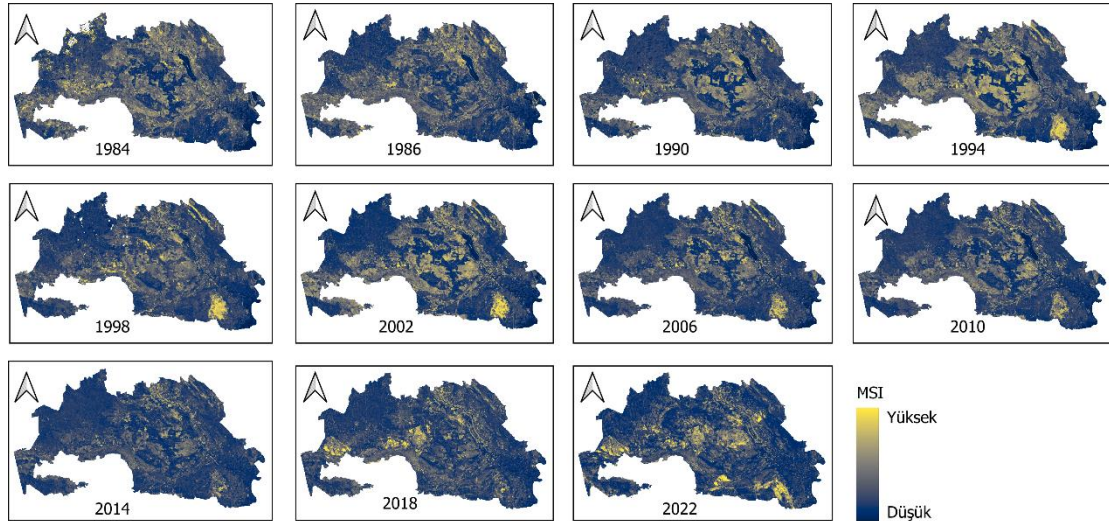
NDII haritalarına bakıldığında, diğer indekslerde olduğu gibi zamanla artış gösteren bir iyileşme görülmediği ve hatta 1984 yılındaki değerlerin 1986 yılından daha düşük olduğu görülmektedir. Kazanın ardından yapılan çeşitli önlemler ve müdahaleler, su kaynaklarının iyileşmesine katkıda bulunmuş olabilir. Ancak, sonuçlar uzun vadede tam bir iyileşme sağlanmamış şekilde değerlendirilebilir.



Şekil 4.13. Çernobil 1986’den başlayarak her on yıldaki NDII anomali haritaları

NDII anomali haritaları, diğer indekslerle benzer desenler sergilemektedir ancak dikkat çeken nokta hem pozitif hem de negatif aşırı değerlerin daha fazla olduğudur. Pozitif aşırı değerler bölgelerde su kaynaklarının bolluğu, iyi sulanmış tarım arazileri veya sağlıklı ekosistemler gibi faktörler etkili olabilir. Öte yandan, negatif aşırı değerler, bitki örtüsünün normalden daha az yoğun veya sağlıklı olduğunu gösterir. Bu tür bölgelerde kuraklık, su kaynaklarının azlığı veya toprak erozyonu etkisi gibi faktörler rol oynayabilir.

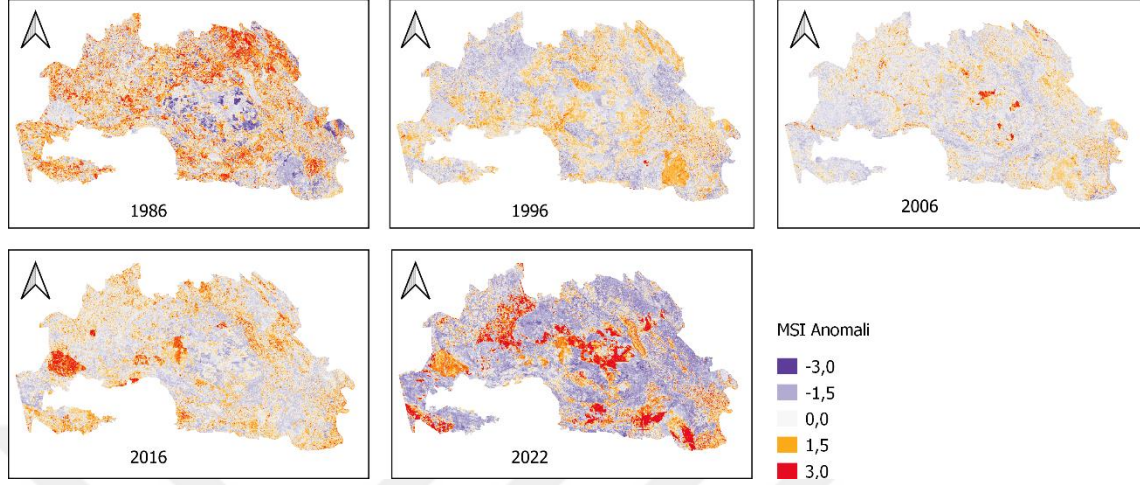
NDII indeksi olduğu gibi MSI indeksi ve oluşturulan MSI haritaları bitki örtüsünün nem koşullarını ve su stresi seviyelerini değerlendirmeye yönelik bilgiler sunar. Ancak MSI indeksi su bitki indekslerine göre tersine işaretlenir; daha yüksek değerler daha fazla su stresi ve daha az su içeriği anlamına gelir.



Şekil 4.14. Çernobil farklı yıllara ait MSI haritaları

Şekil. 4.14’te sunulan MSI haritalarında sarı renk yüksek, yani su stresin yüksek olduğu yerleri temsil ederken, negatif değerler olup koyu lacivert rengindeki bölgeler nem koşullarının daha iyi olduğu yerleri göstermektedir. NDII indeks haritalarında da olduğu,

MSI (Moisture Stress Index) haritalarında da Chernobyl bölgesinde 38 yıllık bir dönemde pozitif veya negatif bir değişim net bir şekilde gözlenmemektedir. Bununla birlikte, su stresinin fazla olduğu yılların 1984 ve 1994 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15. Çernobil 1986’den başlayarak her on yıldaki MSI anomali haritaları

Her bir indeks için yapılan görüntü farkı haritaları, bitki örtüsü veya çevresel değişkenlerin zaman içindeki değişimlerini ve mekânsal desenlerini anlaşılmasına yardımcı olur. Bu haritalar, iki zaman periyodu veya konum arasındaki indeks değerlerindeki farkları göstererek önemli değişikliklerin olduğu bölgeleri vurgular. Görüntü farkı haritalarını inceleyerek, ilgili indeks değerlerinde belirgin artış veya azalış yaşamış bölgeler belirlenebilir. Bu bölgeler bitki yoğunluğundaki değişiklikler, su içeriği veya diğer çevresel faktörlerin zaman içindeki değişimlerini gösterebilir. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen her bir indeks için kaza öncesi/sonrası görüntü farkı, kaza olduğu yıl ile 2022 yılı arasındaki görüntü farkı ve son dönem içerisinde değişimleri tespit etmek için 2022 yılının tüm veri setinin ortalamasından farkı aşağıdaki bağlantıları kullanılarak hesaplanmıştır:

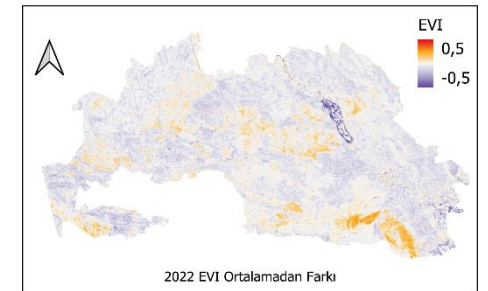
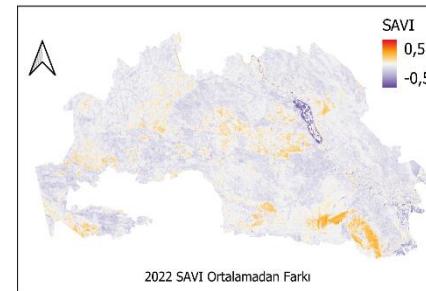
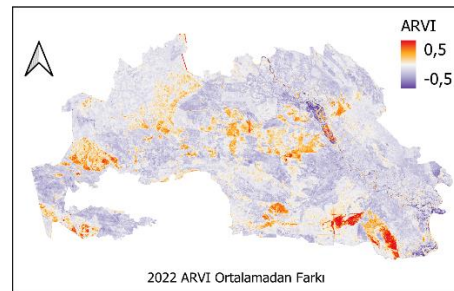
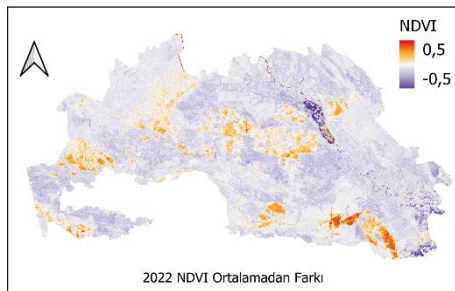
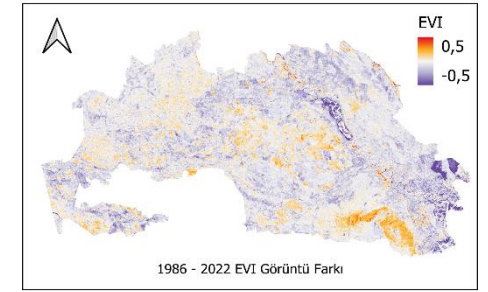
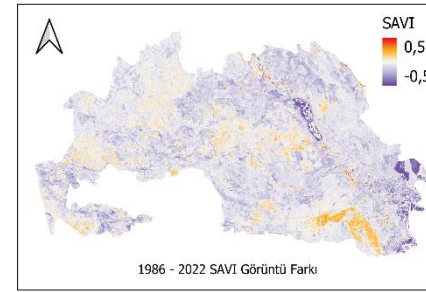
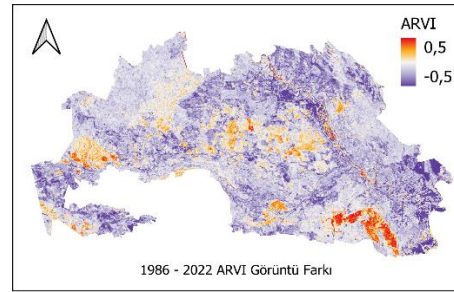
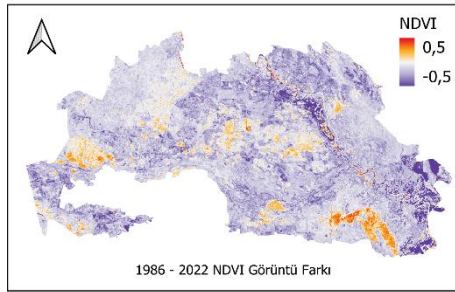
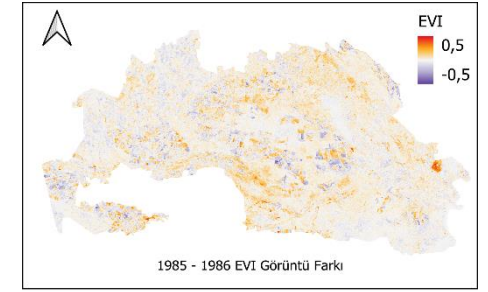
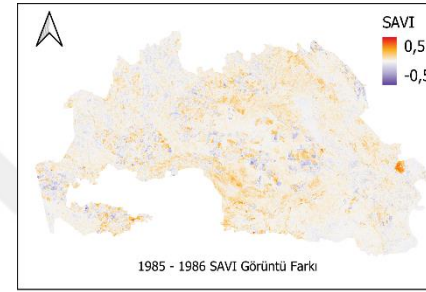
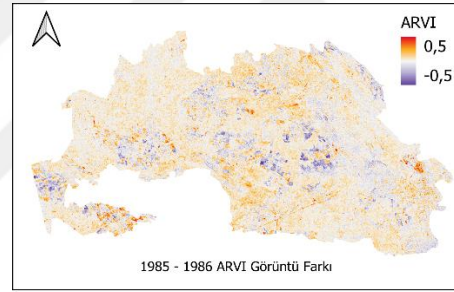
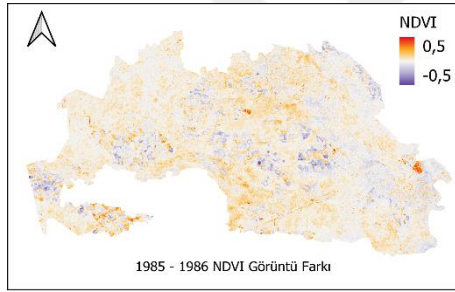
$$DIFF_{1985-1986} = I_{1985} - I_{1986} \quad (4.1)$$

Bağıntıda I_{1985} , I_{1986} – bir indeksin sırasıyla 1986 ve 2022 değerlerini ifade eder. Buna benzer şekilde 1986 ile 2022 yılının arasındaki fark:

$$DIFF_{1986-2022} = I_{1986} - I_{2022} \quad (4.2)$$

$$AVDIFF_{2022} = \bar{I} - I_{2022} \quad (4.3)$$

4.3. numaralı bağıntı içerisinde $\bar{I}$ – indeksin tüm yıllardan alınan ortalama değerini ifade etmektedir. Elde edilen fark görüntüleri Şekil.4.16 ‘da sunulmuştur.

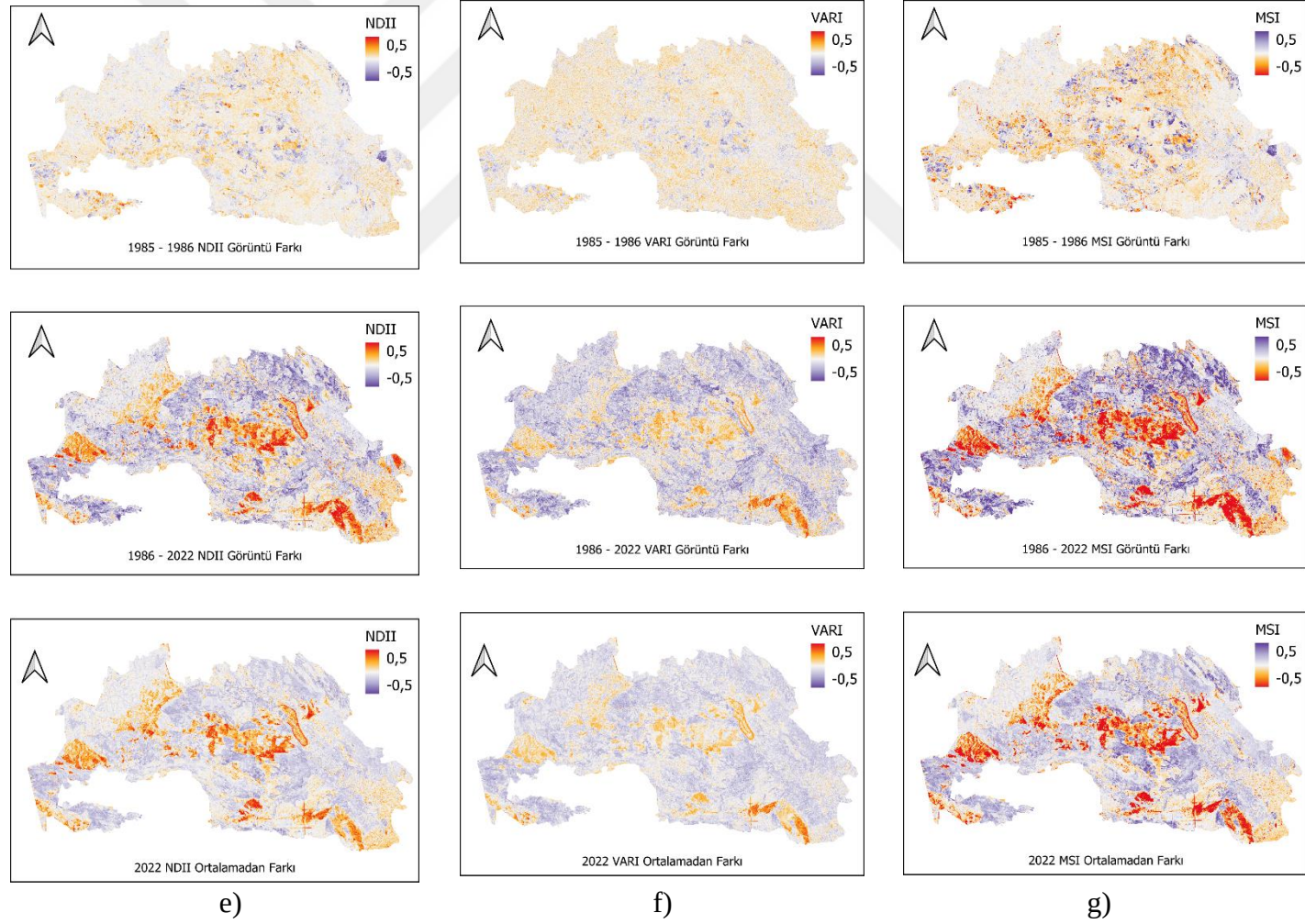


a)

b)

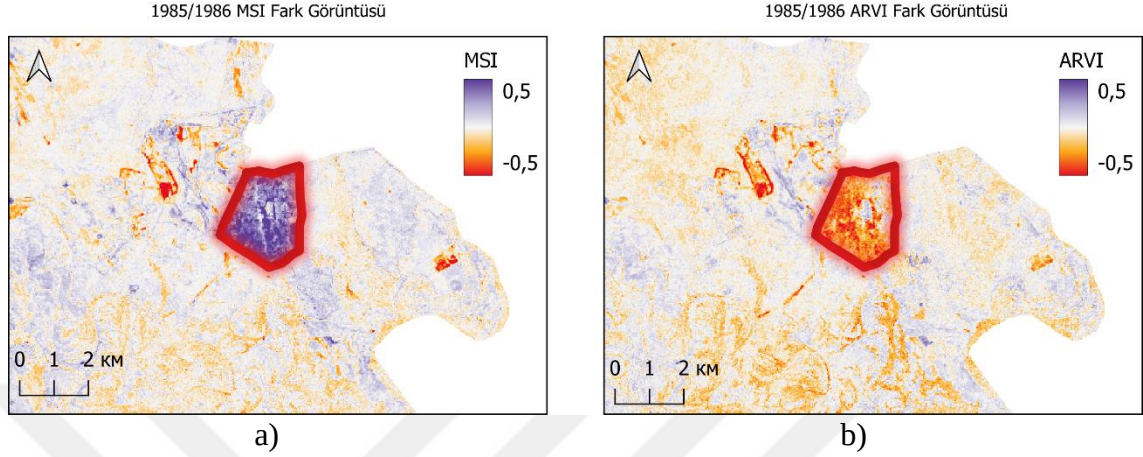
c)

d)



Şekil 4.16. a) NDVI, b) ARVI, c) SAVI, d) EVI, e) NDII, f) VARI, g) MSI indekslerinin farklı yıllara ait görüntü farkı; kırmızı renk negatif, mor renk pozitif değişimi temsil etmektedir

1985-1986 fark görüntülerine bakıldığında MSI ve NDII indeks haricindeki diğer indekslerin genel deseni benzer niteliktedir. Bir bölge, MSI ve NDII fark haritalarında özellikle dikkat çekmektedir, çünkü NDVI veya ARVI fark görüntülerinde azalma görülürken, MSI ve NDII tam tersine iyileşme göstermektedir.



Şekil 4.17. a) 1985/1986 belirli bir bölgenin MSI fark görüntüsü **b)** 1985/1986 belirli bir bölgenin ARVI fark görüntüsü

Bu bölgede su stresi azalmış ve su içeriği artmış gibi görünmektedir. Bu durum, bölgedeki su kaynaklarının artışı, yağış miktarındaki değişimler veya diğer faktörlerle ilişkili olabilir. Öte yandan, NDVI ve diğer indeksler öncelikle bitki örtüsünün yoğunluğunu ve sağlığını ölçer. Klorofil içeriği ve yaprak örtüsü yapısı gibi faktörlere duyarlıdır ve su stresinden başka sıcaklık, besin maddesi mevcudiyeti veya bitki bileşimi gibi faktörler tarafından da etkilenebilir. Bitki dinamiklerinin karmaşık olduğunu ve gözlenen sonuçları etkileyen birden fazla faktörün etkileşime girebileceğini dikkate almak önemlidir. Aynı alandaki MSI ve NDVI indeks değerleri arasındaki farklar, bitki bileşiminin farklılık göstermesi, türlerin su stresine uyum sağlama kabiliyeti veya yerel çevresel koşullar gibi faktörlere bağlı olabilir. Söz konusu bölge ise, içerisinde bulunan Zahlybje adlı bir köyde yaşayan insanların 1986 yılında gerçekleşen tahliye çalışmaları bilgisi dışında hiçbir bilgiye rastlanmamıştır (Bazhan vd. t.y.).

1984 ile 2022 yıllarına ait ortalama NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII ve MSI değerlerin değişimi zaman serisi grafiğinden değerlendirilebilir (Şekil 4.18.). Grafiğe her yıl için ortalama değerleri yansıtılmış olup, bitki dinamikleri ve potansiyel uzun vadeli değişimler hakkında bilgi vermektedir. Grafikte yıllar geçtikçe, tüm indeks değerlerinde yavaş bir iyileşme görülmekte ve bitki sağlığında artış eğilimi gözlenmektedir. Zaman serisi grafiği, doğrusal regresyon modeli ile uyumlu hale getirilmiş ve belirleme katsayısı (R-kare) hesaplanmıştır. Zaman serisi grafiğini doğrusal regresyon modeli ile uyumlu hale getirilmenin ve belirleme katsayısı (R-kare) hesaplanmasının amacı, değişkenler arasındaki ilişkinin zaman içindeki eğilimini ve gücü değerlendirmektir. Bu yöntem, verilerdeki genel deseni ve değişkenliği anlamamıza yardımcı olurken, doğrusal modelin gözlemlenen veri noktalarına ne kadar iyi uyduğunu nicel olarak değerlendirmemizi sağlar. Belirleme katsayısı -1 ile 1 arasında değerler alır. Negatif değerler negatif ilişkiyi, pozitif değerler ise pozitif ilişki olduğunu gösterir. Regresyon belirleme katsayısı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.1)$$

Burada y_i – bağımlı değişkenin gerçek değeri, $\bar{y}$ – bağımlı değişkenlerin ortalaması ve $\hat{y}_i$ – bağımlı değerin tahmin edilen değeridir.

Örneğin, Söz konusu NDVI indeksine ait R-kare değerinin 0.82 olması uydurulan doğrunun veri dağılımını iyi temsil ettiğini göstermektedir. Uydurulan trend doğrusunun R-kare cinsinden verilere olan uyumu Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

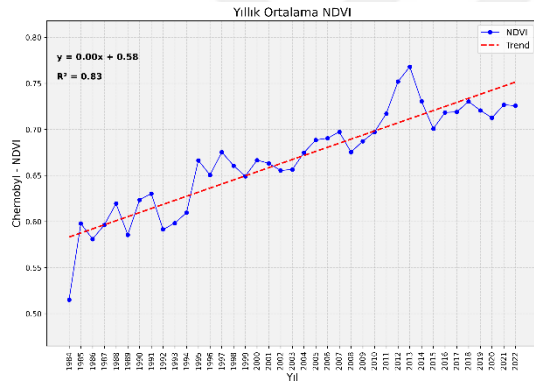
Çizelge 4.1. Çernobil zaman seri eğrilerinin trend doğrusu ile uyumu

Spektral İndeks	Lineet Fit Doğrusu, R^2
NDVI	0.83
ARVI	0.75
SAVI	0.69
EVI	0.49
VARI	0.29
NDII	0.26
MSI	0.25

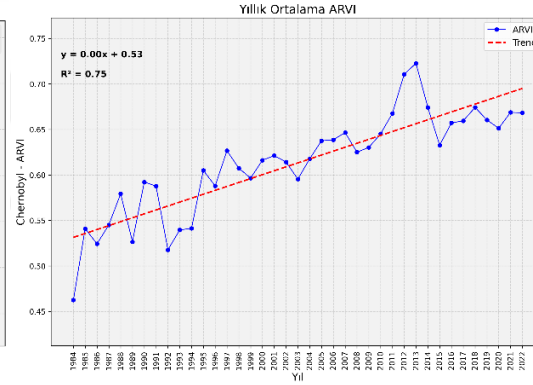
1984 yılından 2022 yılına kadar tüm indekslerin zaman serileri incelendiğinde, göze çarpan bir trend ortaya çıkar. Bu trend, MSI indeksi dışında, diğer indekslerde pozitif yönlü bir gelişmeyi yansıtmaktadır. Ancak, MSI indeksi ters orantılı olduğundan, pozitif değerler aslında olumsuz koşulları ifade etmektedir. Diğer indekslerde ise zamanla ortalama değerlerin arttığı gözlenmektedir, bu da bölgedeki bitki sağlığının ve canlılığının geliştiğini işaret etmektedir.

En dikkat çekici nokta ise en yüksek değerlerin genellikle 2013 yılında gözlemlenmiş olmasıdır. Bu yılda, bitki indekslerinin doruk noktalarına ulaşarak canlılığın zirve yaptığı görülmüştür. Öte yandan, bazı indekslerde en düşük değerler ise farklı yıllarda ortaya çıkmıştır. NDVI, ARVI ve SAVI indekslerinin en düşük değerleri 1984 yılında, EVI indeksinin en düşük değeri ise 1994 yılında gözlenmiştir. VARI indeksi ise en düşük değerini 1995 yılında kaydetmiştir. Ayrıca, NDVI ve MSI indeksleri 1989 yılında en düşük seviyelere ulaşmıştır.

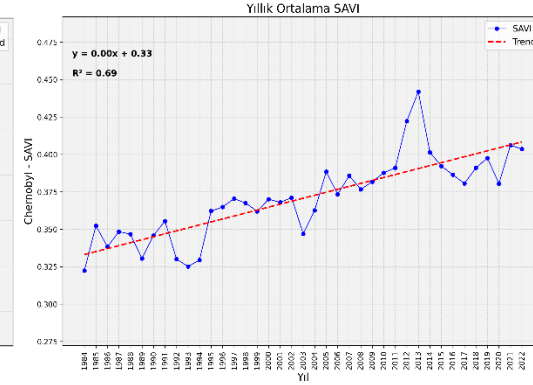
Elde edilen veriler, zaman içinde bölgedeki bitki örtüsünün gelişim gösterdiğini ve sağlıklı bir canlılık sergilediğini yansıtmaktadır. Gemitzi (2020), Santos vd. (2019) Davids ve Doulgeris (2007) tarafından yapılan çalışmalar elde edilen sonuçları destekler niteliktedir. Çernobil bölgesindeki indekslerde görülen artış, insana bağlı etkinliklerin azalması ve 2016 yılında inşa edilen yeni koruyucu yapı gibi faktörlerle kuvvetli bir şekilde ilişkilendirilebilir. İnsan etkilerinin sınırlanması ve ileri koruma önlemlerinin hayata geçirilmesiyle birlikte, bölgenin çevresel koşullarında gerçekleşen bu önemli değişimler, indekslerde gözlenen olumlu eğilimleri güçlendirmiştir.



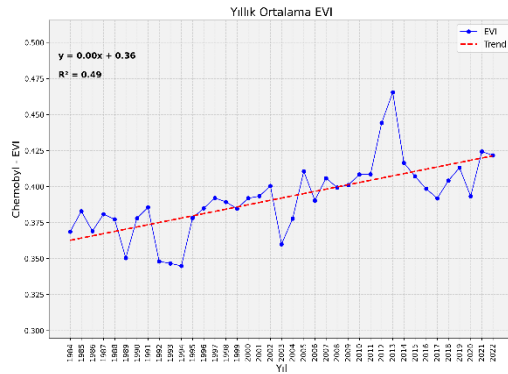
a)



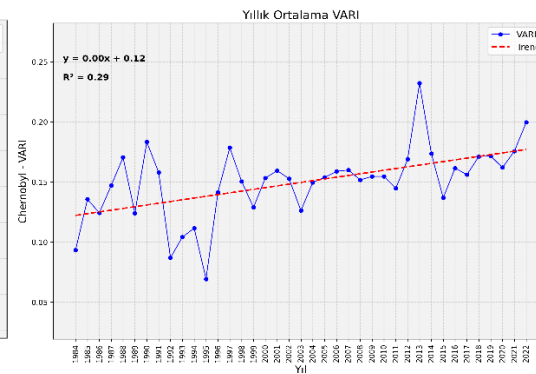
b)



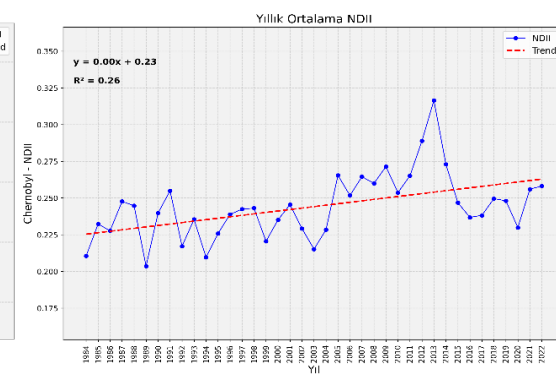
c)



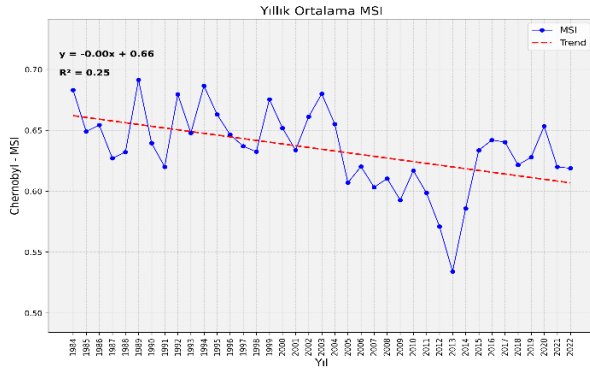
d)



e)



f)



g)

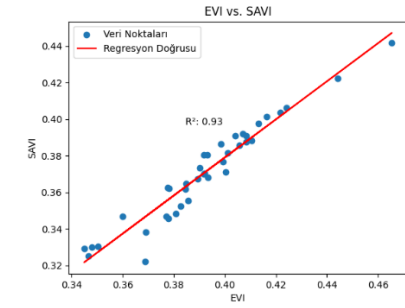
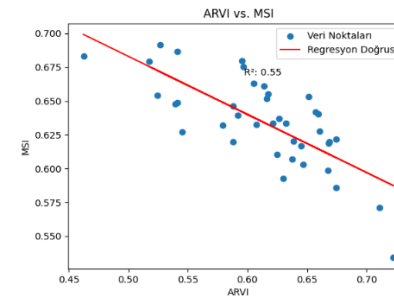
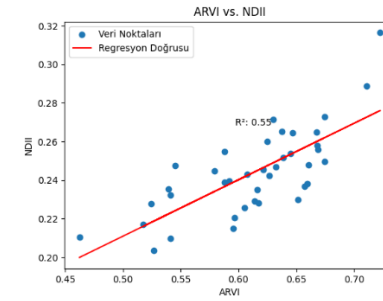
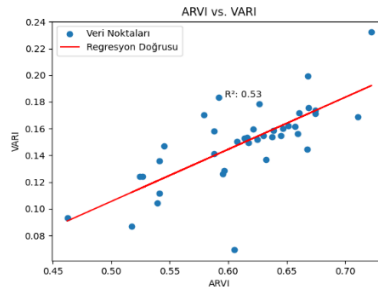
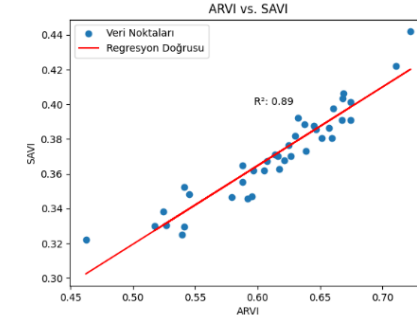
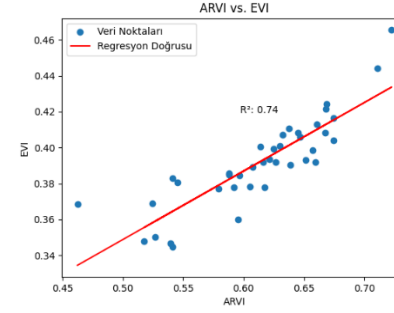
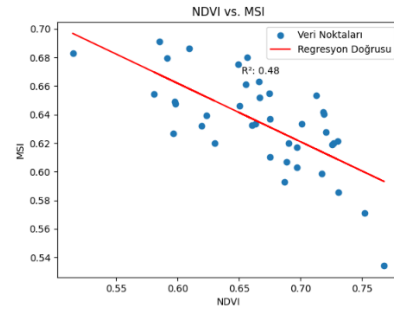
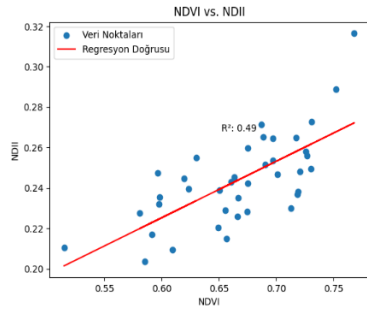
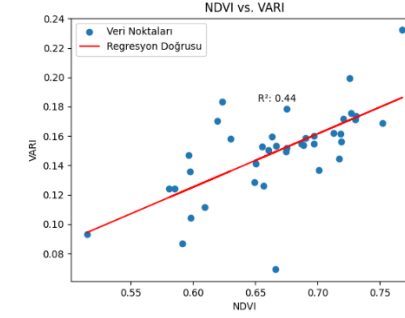
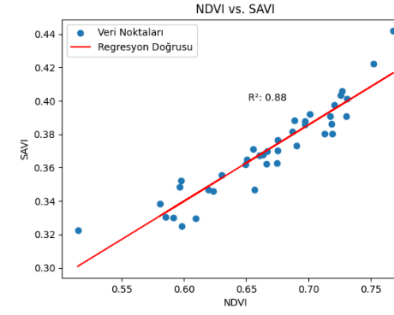
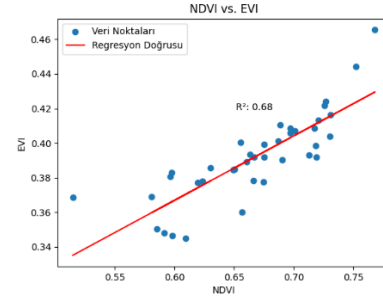
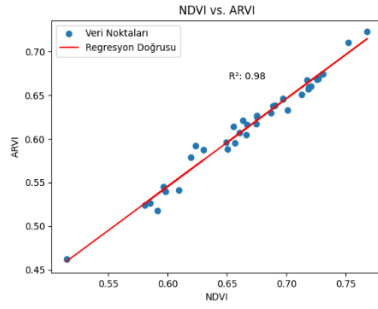
Şekil 4.18. Çernobil bölgesinin 1984 ile 2022 arasında ortalama değer NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin zaman serisi grafikleri: **a)** yıllık ortalama NDVI, **b)** yıllık ortalama ARVI, **c)** yıllık ortalama SAVI, **d)** yıllık ortalama EVI, **e)** yıllık ortalama NDII, **f)** yıllık ortalama MSI, **g)** yıllık ortalama MSI

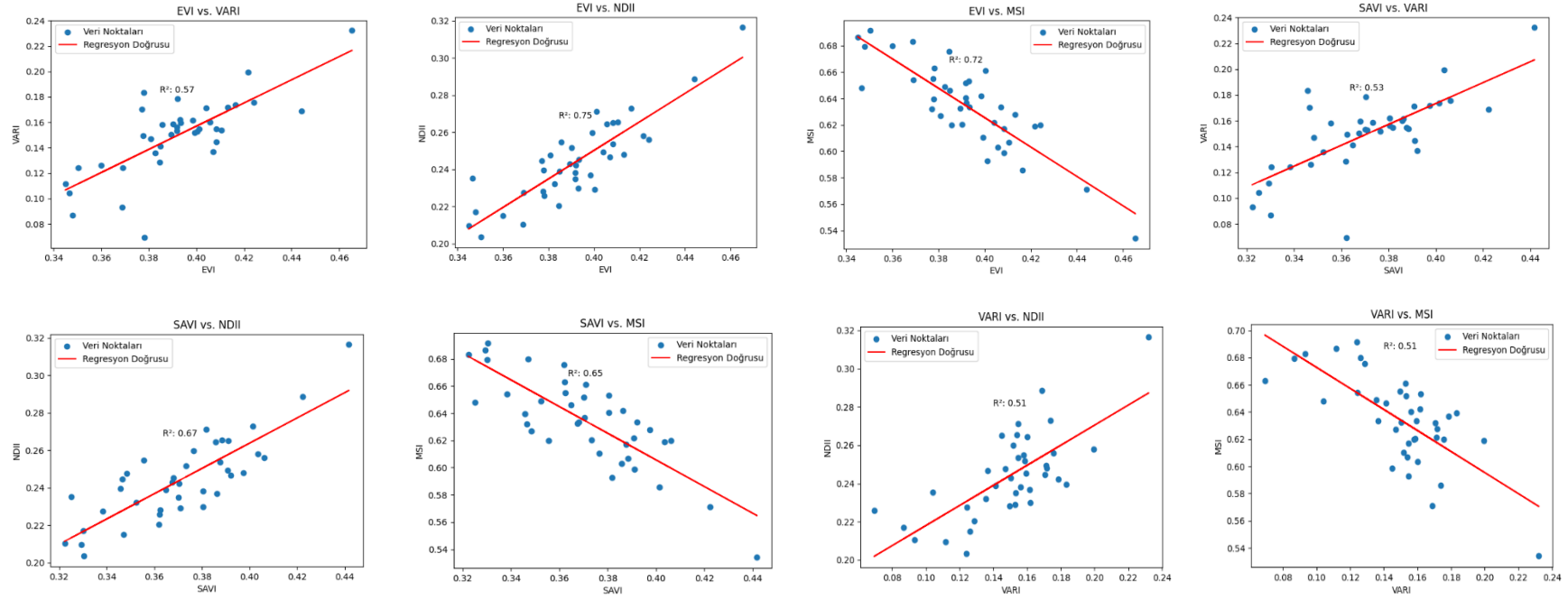
Çernobil bölgesinde gerçekleşen felakete rağmen, indekslerin verileri gösteriyor ki 1986 yılındaki değerler olağanüstü düşük seviyelerde değildir. Aslında, tüm indekslerin ortalamaları incelendiğinde, 1984 yılının ortalama değerlerinin 1986 yılından daha düşük olduğu görülmektedir. Büyük patlama ve radyasyon kirlenmesine rağmen reaktöre yakın bölge hariç 1986 yılında bitki örtüsü üzerinde doğrudan bir değişiklik gözlenmemiştir. Çernobil bölgesinde daha küçük alanı kapsayan Aneta Modzelewska vd. (2020) çalışmasında benzer sonuçlar elde edilmiştir.

1984 yılında indekslerin en düşük değer aldığına olası sebebi, 2021 yılında açıklanan belgelere göre, Çernobil Nükleer Santrali'nde meydana gelen olaylardır. Bu belgelere göre, nükleer santralin faaliyetleri sırasında 1982 yılında önemli miktarda radyoaktif madde salınımı yaşandığı ve 1984 yılında ise acil durumlar meydana geldiği belirtilmektedir (Anonim t.y.-u) . Bu olaylar, bitki örtüsü üzerinde olumsuz etkiler yaratmış olabilir ve bu da indekslerin düşük değerlerini açıklayabilir.

Bir başka ilginç durum ise, 2013 yılında en yüksek değerlere sahip olan indekslerin aniden azalıp 2015 yılında aşırı derecede değer kaybetmesidir. Bu olayın olası nedeni, 2015 yılında meydana gelen şiddetli yangınlar olabilir (Anonim t.y.-a). Yangınlar, bölgedeki bitki örtüsünü etkileyerek indeks değerlerinde belirgin bir düşüşe neden olması olası bir durumdur. İkinci net bir düşüş 2020 yılında görülür ve aynı 2015 yılında olduğu gibi meydana gelen yangınlarıyla ilişkilendirilebilir (Anonim t.y.-e; Jenner 2020).

Regresyon analizi ile tüm indeksler arasında yapılan ilişki analizi sonucunda elde edilen ve Şekil 4.19'da sunulan grafikler, dikkate değer bir perspektif sunmaktadır. Sunulan görsel grafikler, indeksler arasındaki korelasyonun gücünü yansıtarak, hangi indekslerin birlikte değiştiğini ve nasıl bir ilişki içinde olduklarını bize göstermektedir. Sonuçlar, MSI hariç indeksler arasında pozitif bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. MSI ters orantılı bir indeks olduğundan diğer indeksler ile negatif bir korelasyonu vardır. İndeksler arasındaki R^2 değerleri ayrıca çizelge 4.3.'te sunulmuştur.

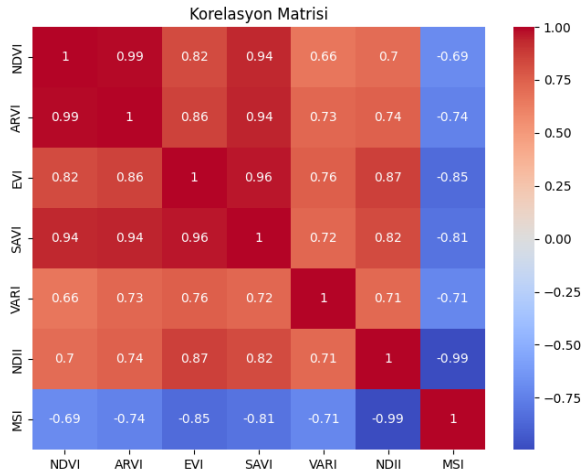




Şekil 4.19. Çernobil bölgesinde NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin regresyon analizi

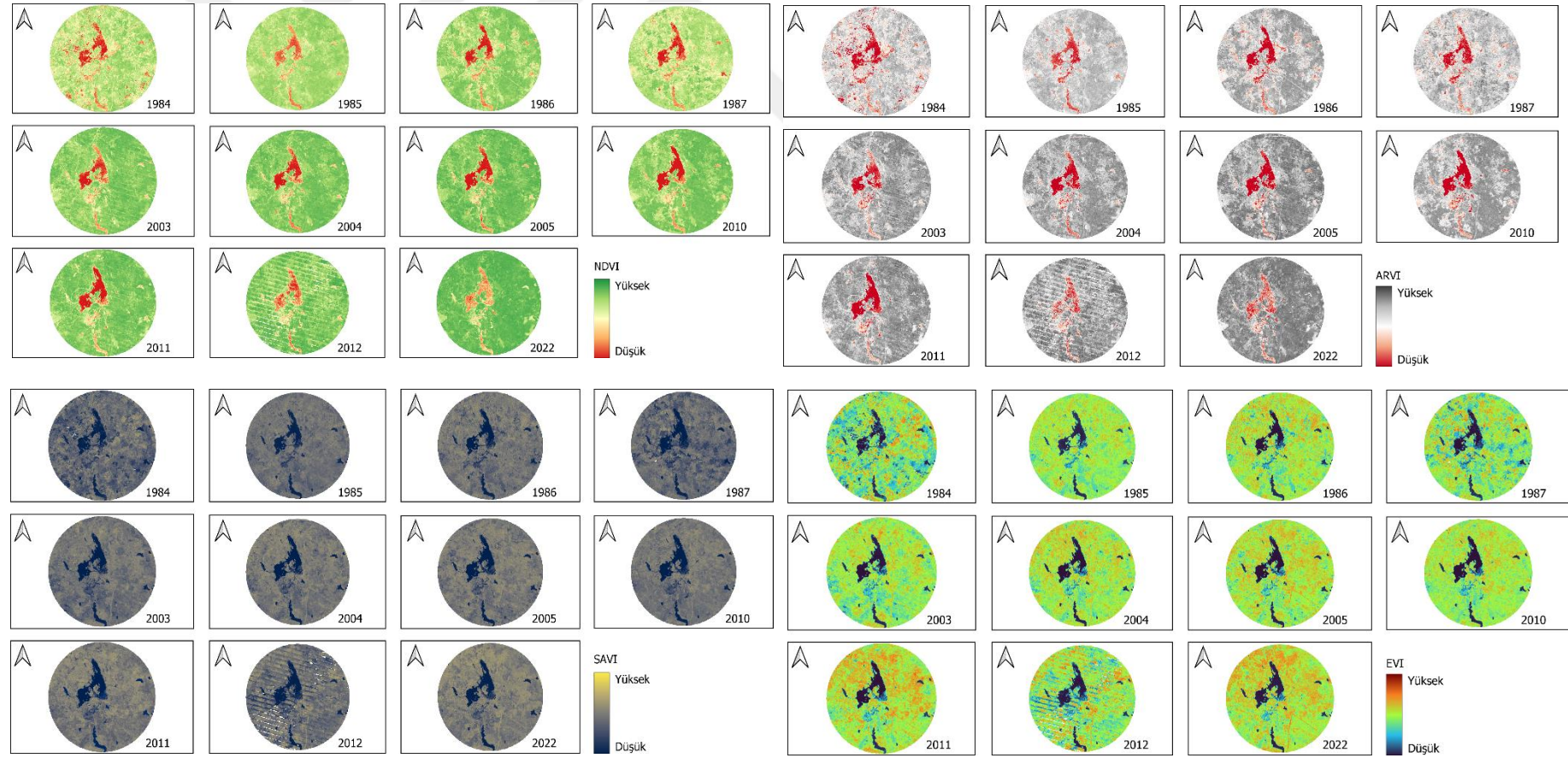
Regresyon analizine dayalı olarak elde edilen sonuçlara göre, NDVI vs. ARVI, NDVI vs. SAVI, ARVI vs. SAVI, EVI vs. SAVI arasında en yüksek R kare değeri elde edilmiştir. Bu ilişkiler, bitki sağlığı ve canlılığıyla ilgili indeksler arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Özellikle NDVI ve ARVI arasındaki tam korelasyon dikkat çekicidir, bu da bu iki indeksin benzer bilgiyi taşıdığını ve birbirlerini tamamlayıcı şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, MSI ve NDII indeksleri diğer indekslerle genel olarak daha düşük korelasyona sahiptir. Bu durum, MSI ve NDII indekslerinin farklı ölçümleri yansıttığını ve bitki örtüsüyle ilgili diğer faktörlerin etkisini daha belirgin bir şekilde gösterdiğini işaret etmektedir. Bu indeksler, su stresi ve nem içeriği gibi spesifik bitki özelliklerini değerlendirmede daha önemli bir rol oynar. Bu sonuçlar, bitki örtüsünün sağlığı ve canlılığı üzerindeki farklı etkenlerin ve faktörlerin karmaşıklığını vurgulamaktadır.

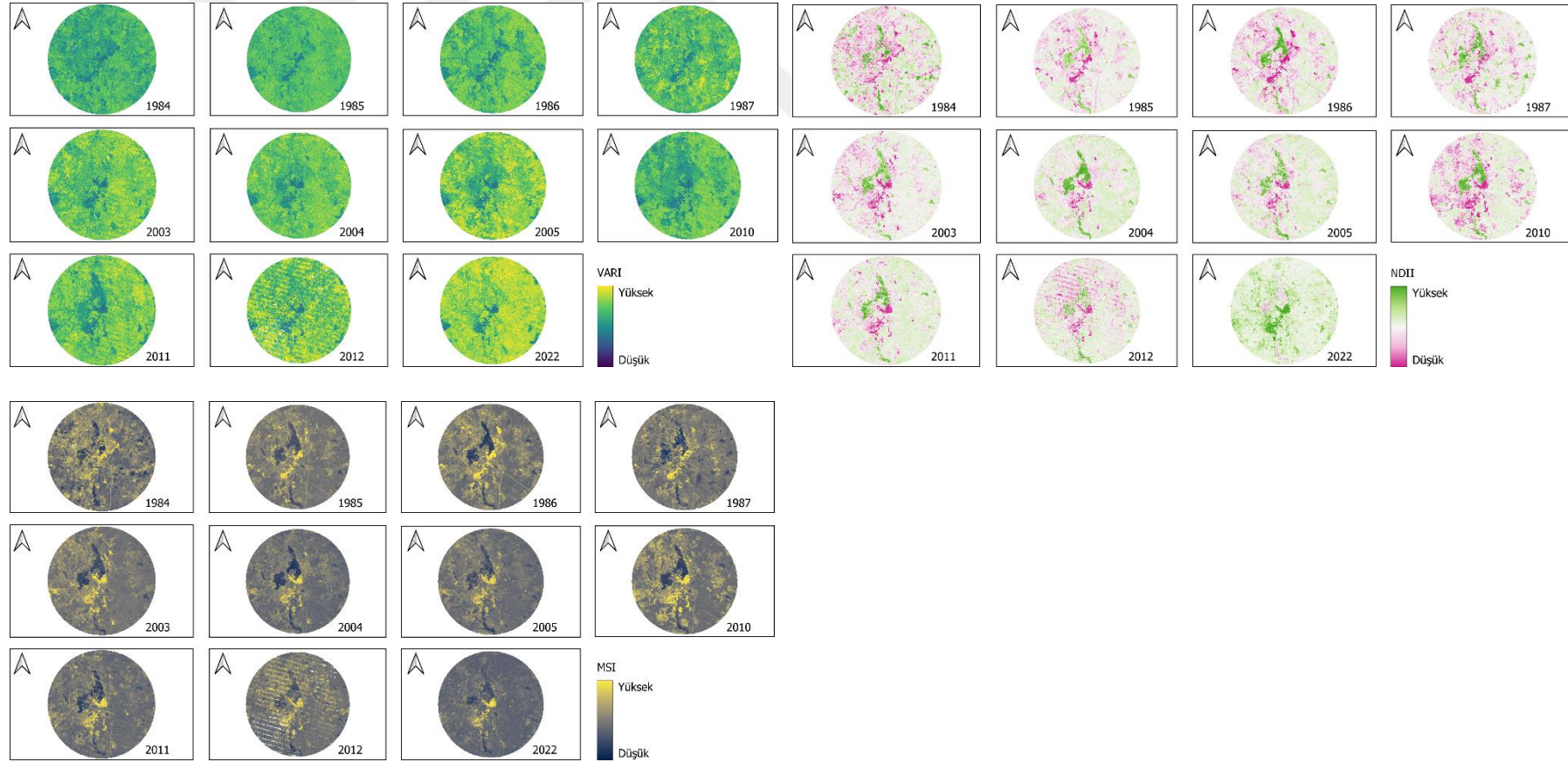
Bu çalışma kapsamında, indeksler arasındaki ilişkileri daha görsel bir şekilde sunmak amacıyla bir korelasyon matrisi oluşturulmuştur (Şekil 4.20). Bu matris, indeksler arasındaki bağıntıları ve birbirleriyle olan ilişkileri açıkça ortaya koymaktadır. Korelasyon matrisi, indekslerin birbirleriyle olan ilişkisini ifade eden korelasyon katsayılarına dayanmaktadır. Pozitif korelasyon, indekslerin birlikte artış veya azalış eğiliminde olduğunu gösterirken, negatif korelasyon ise bir indeksin artışıyla diğer indeksin azalma eğiliminde olduğunu gösterir. Korelasyon matrisi, veri setindeki indekslerin birbirleriyle olan ilişkisini görsel olarak temsil etmektedir ve aralarındaki güçlü veya zayıf korelasyonları belirlemeye yardımcı olmaktadır.



Şekil 4.20. Çernobil için korelasyon matrisi

Karşılaştırma amacıyla, Çernobil ile benzer coğrafya ve iklim özelliklerine sahip, hiçbir kaza veya benzeri olayın meydana gelmediği Kalın Nükleer Güç Santrali ve çevresi de aynı analizlere tabi tutulmuştur. Bu analizler sonucunda elde edilen indeks haritaları Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmalı çalışma, Çernobil’deki indeks değerlerinin doğal faktörlerden ziyade nükleer kazadan kaynaklanan etkilerle ilişkili olup olmadığını anlamak için yapılmıştır.





Şekil 4.21. Kalinin bölgesine ait NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indeks haritaları

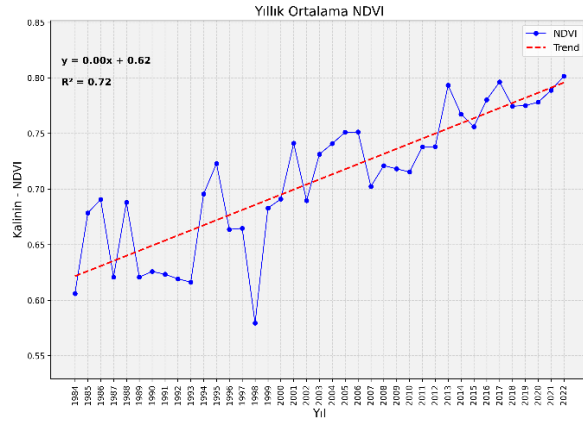
Kalinin Nükleer Güç Santrali'nin birinci bloğu 1984, ikinci bloğu 1986, üçüncü bloğu 2004 ve dördüncü bloğu ise 2011 yılında devreye alınmıştır. Bu yılların seçilmesi, indeks haritalarının oluşturulmasında kullanılmış olup her bir bloğun faaliyete geçtiği önceki ve sonraki yıl olarak belirlenmiştir (Şekil 4.21). Özellikle 1984 yılından 2011 yılına kadar gerçekleşen inşaat çalışmalarına rağmen indekslerde bir iyileşme gözlemlenmektedir. Bu durum, Kalinin Nükleer Güç Santrali'nin devreye alınmasıyla birlikte olumlu etkilerin ortaya çıktığını ve indeks değerlerinde artış olduğunu göstermektedir. Kalın Nükleer Güç Santrali çevresindeki alanların zaman serileri, Çernobil zaman serileri gibi pozitif bir değişim gösterse de dağılımları yıllar içinde daha salınımlıdır (Şekil 4.22). Bu durum, bölgedeki çevresel faktörlerin ve etkilerin zaman içinde değişkenlik gösterdiğini ve farklı dönemlerde farklı düzeylerde etkilerin ortaya çıktığını göstermektedir. Bu salınımlı dağılımlar, bölgenin karmaşık doğal ve insana bağlı faktörlerle etkileşimine işaret etmektedir.

Tüm indeks zaman serileri değerlendirildiğinde, 1998 yılında belirgin bir negatif tepe noktası gözlemlenmektedir. Bu tepe noktasının olası nedeni, 1985 yılında başlayan inşaat çalışmalarının, 1986 yılında Çernobil nükleer santralinde meydana gelen kazadan dolayı dondurulması ve daha sonra 1997 yılında tekrar devam etmesidir. Bu durum, inşaat çalışmalarının başlamasıyla birlikte bölgedeki doğal ve insana bağlı faktörlerde değişikliklerin meydana geldiğini ve indeks değerlerinde belirgin bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Daha sonra inşaat çalışmalarının devam etmesiyle birlikte ise indeks değerlerinde bir toparlanma ve artış gözlemlenmiştir. Bu karmaşık etkileşimlerin daha kapsamlı bir şekilde araştırılması, bölgedeki değişimlerin tam anlamıyla anlaşılabilmesi için önemlidir.

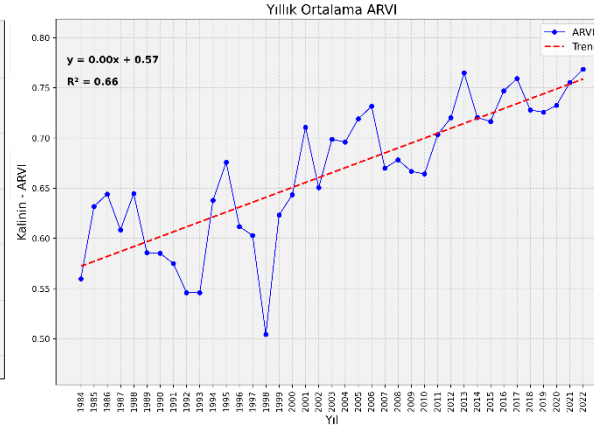
Çizelge 4.2.Kalinin zaman seri eğrilerinin trend doğrusu ile uyumu

Spektral İndeks	Lineet Fit Doğrusu, R ²
NDVI	0.72
ARVI	0.66
SAVI	0.5
EVI	0.35
VARI	0.59
NDII	0.36
MSI	0.35

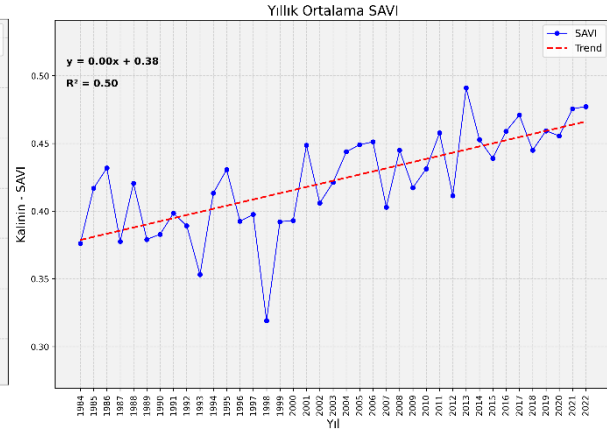
Çernobil ile karşılaştırıldığında, Kalinin NGS zaman serilerine uyumlu olan doğruların R-kare değerleri daha düşüktür (Çizelge 4.2). Bu durum, Kalinin NGS bölgesine ait ortalama indeks değerlerinin daha salınımlı olduğundan kaynaklanmaktadır. Bu gözlem, Çernobil ve Kalinin NGS bölgelerinin farklı dinamiklere sahip olduğunu ve indeks değerlerinin farklı şekillerde değişebileceğini göstermektedir.



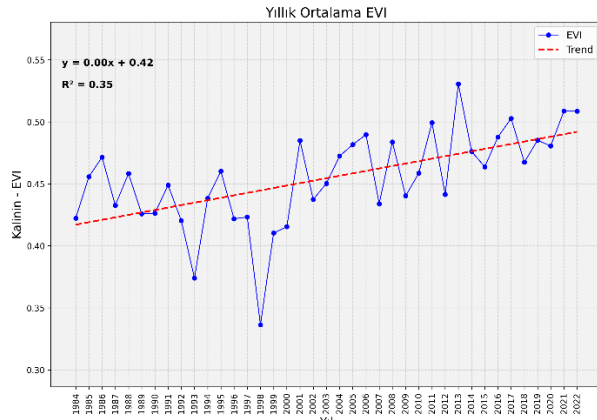
a)



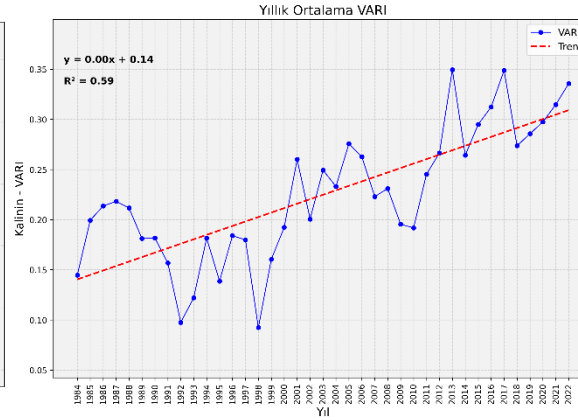
b)



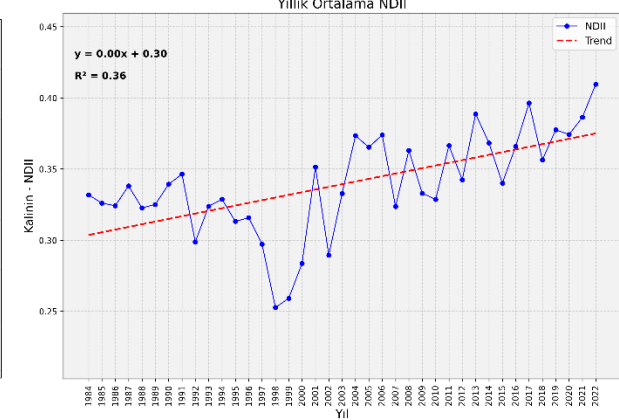
c)



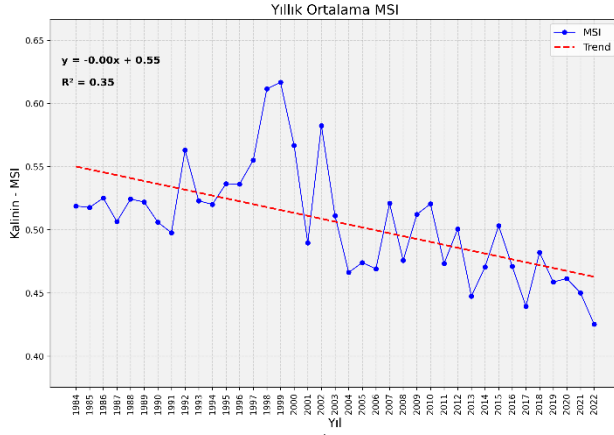
d)



e)



f)



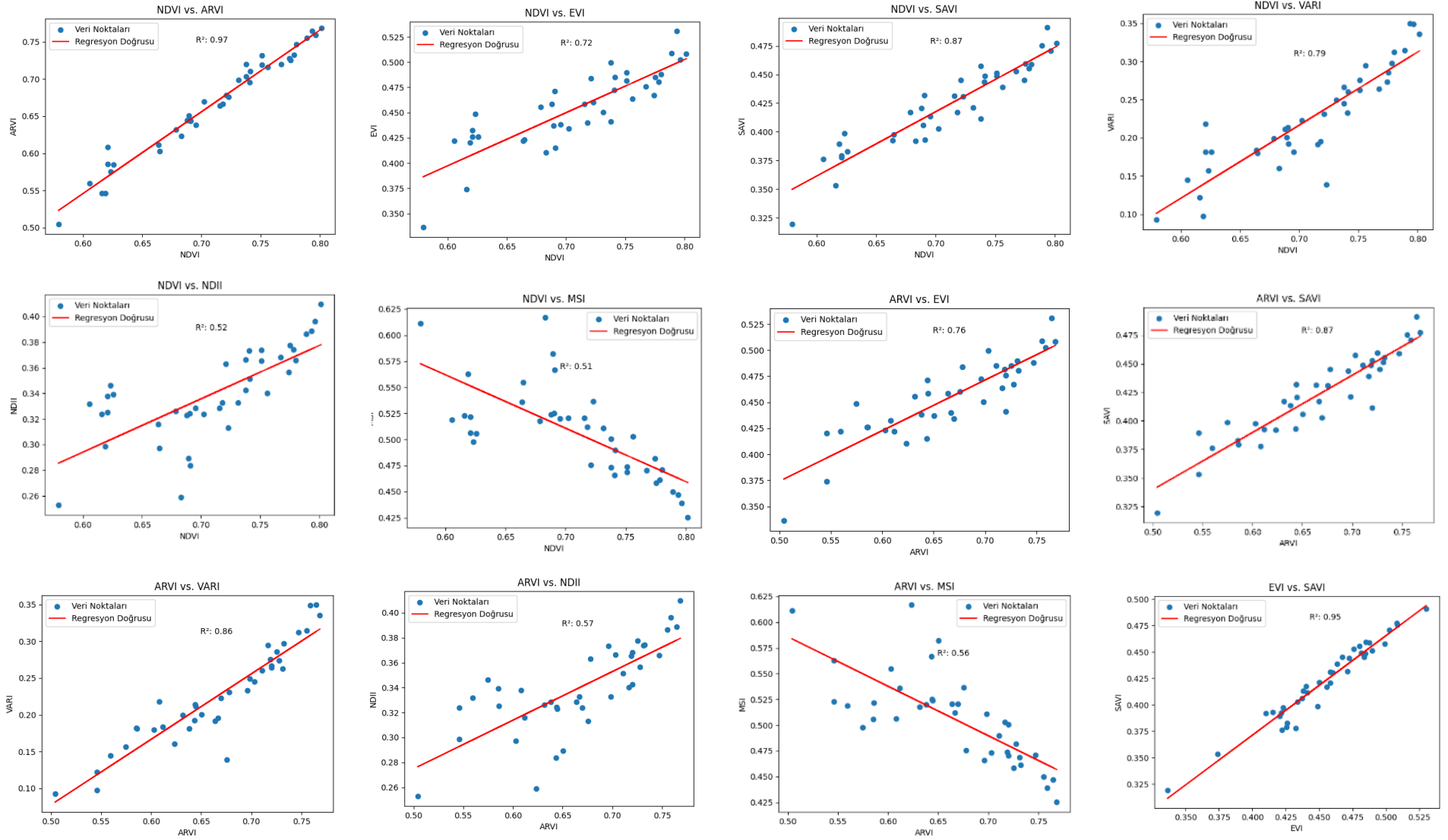
g)

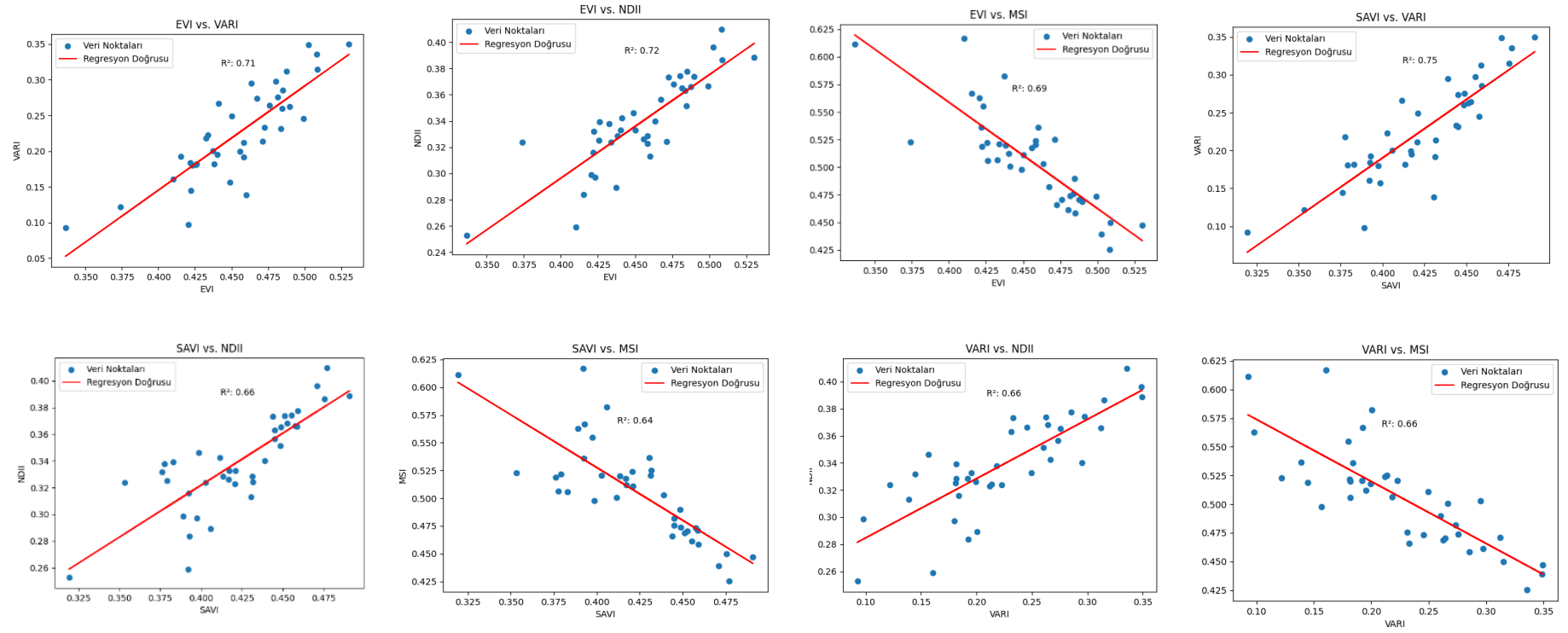
Şekil 4.22. Kalinin bölgesinin 1984 ile 2022 arasında ortalama değer NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin zaman serisi grafikleri: **a)** yıllık ortalama NDVI; **b)** yıllık ortalama ARVI; **c)** yıllık ortalama SAVI; **d)** yıllık ortalama EVI; **e)** yıllık ortalama NDII; **f)** yıllık ortalama MSI; **g)** yıllık ortalama MSI

Çizelge 4.3. İndeksler arası R kareli değer tablosu

	Chernobyl, R^2	Kalinin, R^2
NDVI vs. ARVI	0,98	0,97
NDVI vs. EVI	0,68	0,72
NDVI vs. SAVI	0,88	0,87
NDVI vs. VARI	0,44	0,79
NDVI vs. NDII	0,49	0,52
NDVI vs. MSI	0,48	0,51
ARVI vs. EVI	0,74	0,76
ARVI vs. SAVI	0,89	0,87
ARVI vs. VARI	0,53	0,86
ARVI vs. NDII	0,55	0,57
ARVI vs. MSI	0,55	0,56
EVI vs. SAVI	0,93	0,95
EVI vs. VARI	0,57	0,71
EVI vs. NDII	0,75	0,72
EVI vs. MSI	0,72	0,69
SAVI vs. VARI	0,53	0,75
SAVI vs. NDII	0,67	0,66
SAVI vs. MSI	0,65	0,64
VARI vs. NDII	0,51	0,66
VARI vs. MSI	0,51	0,66
NDII vs. MSI	0,99	0,99

Kalinin ve Çernobil bölgeleri arasındaki indeks analizlerine dair yapılan incelemeler, bize şu önemli noktayı göstermektedir: R^2 değerlerine bakıldığında, her iki bölgede de indeksler arasında yakın R^2 değerlerine rastlanmaktadır. Ancak,





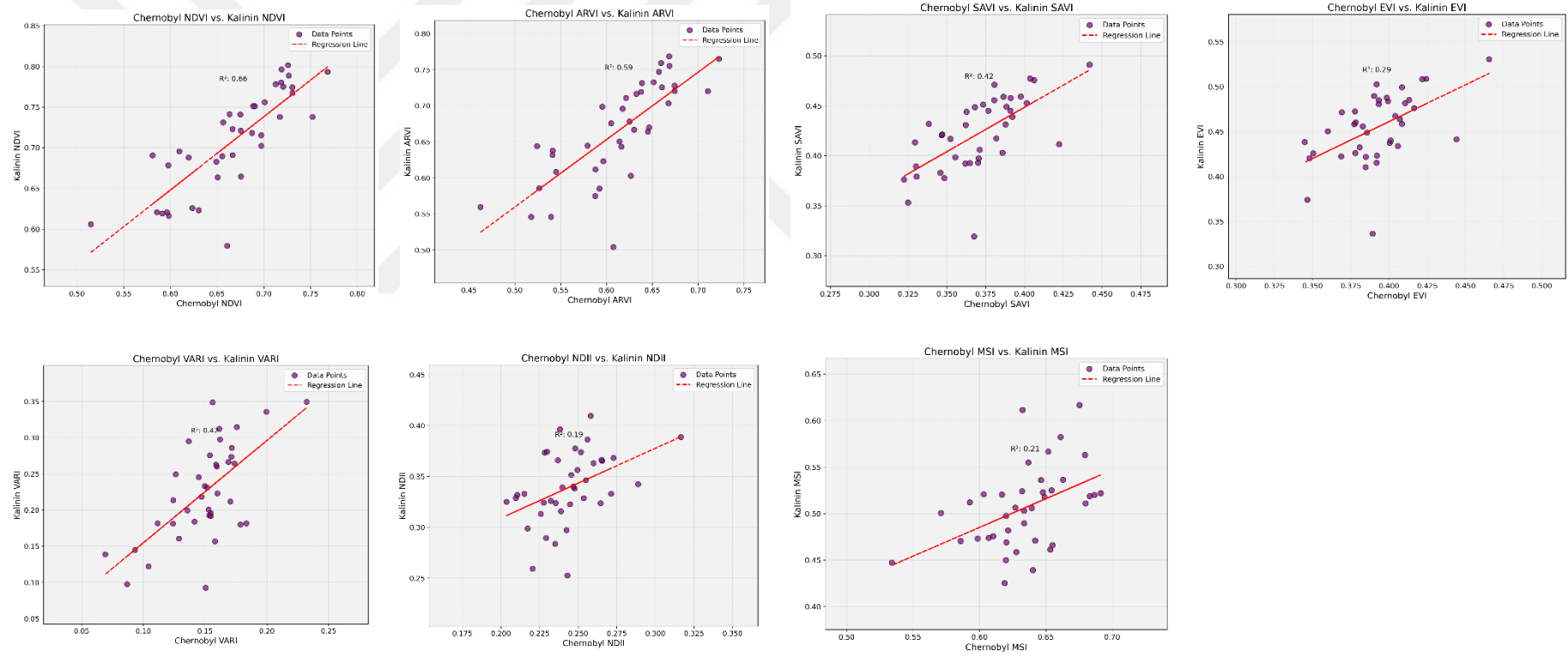
Şekil 4.23. Kalinin bölgesinde NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin regresyon analizi

Çernobil bölgesindeki ilginç bir durum şöyle ortaya çıkmaktadır: VARI indeksi diğer indekslerle olan R^2 değeri görece daha düşüktür. Bu durum, Çernobil bölgesinde VARI indeksinin diğer indekslerle arasındaki ilişkinin daha zayıf olduğunu işaret etmektedir. Bu farklılık, her iki bölgenin indeksler arasındaki ilişkilerinin karmaşıklığını ve Çernobil bölgesindeki dinamiklerin diğer bölgelerden farklı olabileceğini vurgulamaktadır. VARI indeksi, doğası gereği bitki örtüsünün yeşil-kırmızı kısmının yeşil+kırmızı bitki örtülerinin oranını elde etmek amacıyla kullanılmaktadır (Gitelson vd. 2002). Bu indeksin alt kısmında ise mavi reflektansının eksilmesi, atmosferik ve aerosol gibi etkenlerin etkisini minimize etmektedir. Diğer bitki indekslerinin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda, aerosol etkisini minimize eden mavi bandının ve buna bağlı olarak aerosol miktarının daha detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Çernobil nükleer enerji santrali alanında, Mayıs 1986 ortalarında hava radyasyon doz hızı ve hava aktivite konsantrasyonunda yüksek seviyeler gözlenmiştir. Bu durum, bölgenin nispeten homojen bir şekilde ince dağılmış nükleer yakıt ve kısa ömürlü radionüklid aerosollerle kontamine olması ve ayrıca dağılmış nükleer yakıt parçacıklarının veya fragmanlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Çernobil Forum Expert Group 'Çevre' raporunda, kazadan yaklaşık 20 yıl sonra, tozun beton duvarlara, zeminlere ve tavanlara nüfuz ettiği ve havada aerosol formunda bulunduğu belirtilmektedir (Expert Group "Environment" 2005). Bu nedenle, VARI indeksinin diğer indekslerle düşük korelasyon göstermesine yol açan faktörler arasında, VARI indeksindeki mavi banttaki farklılık da yer alabilir. Ancak, Çernobil bölgesindeki aerosol varlığının bu farklılığın nedeni olduğunu kesin bir şekilde belirtmek için daha fazla araştırma gerekmektedir. Mavi bandın aerosol etkisini minimize ettiği ve bu etkinin VARI indeksinin korelasyonunu etkileyebileceği bir olasılık olarak değerlendirilebilir. Bu konuda daha fazla çalışma yapılması, aerosol etkisinin VARI indeksiyle ilişkisini daha net bir şekilde anlamamıza yardımcı olabilir.

Çernobil bölgesinde elde edilen tüm indeks değerleri, Kalinin bölgesinde bulunan değerlerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırma sonuçları, her iki bölgenin bitki örtüsü ve çevresel faktörleri arasındaki ilişkileri anlamak için önemli bir adımdır. Arasındaki ilişkilerinin anlaşılması için uygulanan regresyon analizinin sonuçlarına ait grafikler Şekil.4.24' te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Kalinin ve Çernobil arasındaki indekslerin R^2 değerleri

Spektral İndeks	Chernobyl vs. Kalinin, R^2
NDVI	0.66
ARVI	0.59
SAVI	0.42
EVI	0.29
VARI	0.42
NDII	0.19
MSI	0.21



Şekil 4.24. Çernobil ve Kalinin NDVI, ARVI, SAVI, EVI, VARI, NDII, MSI indekslerinin regresyon analizi

Bu analiz, Çernobil ve Kalinin bölgelerinin bitki örtüsü ve çevresel koşullarının farklılıklarını ve benzerliklerini belirlemek amacıyla yapılan ayrıntılı bir çalışmanın bir parçasıdır.

Çernobil ve Kalinin bölgelerine ait indeksler karşılaştırıldığında, göreceli olarak yüksek bir korelasyonun Kalinin NDVI ve ARVI indeksi ile Çernobil bölgesine ait NDVI ve ARVI indeksi arasında gözlemlendiği ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar, iki bölgenin bitki örtüsü ve iklim koşullarının benzerliklerini yansıtmaktadır. Diğer indeksler üzerinde yapılan analizler ise şu şekildeydi: her iki bölgenin EVI, SAVI ve VARI indeksleri arasında orta düzeyde bir korelasyon gözlenirken, NDII ve MSI indeksleri arasında ise düşük bir korelasyon tespit edilmiştir. Gerek Kalinin gerekse Çernobil bölgelerine ait hesaplanan çeşitli indekslerin zaman içindeki dağılımına bakıldığında, her iki durumda da kaza sonrası bitki örtüsü oranının arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum, nükleer kazadan bağımsız olarak değerlendirilebilir.

4.2. Yüzey Su Sıcaklığı

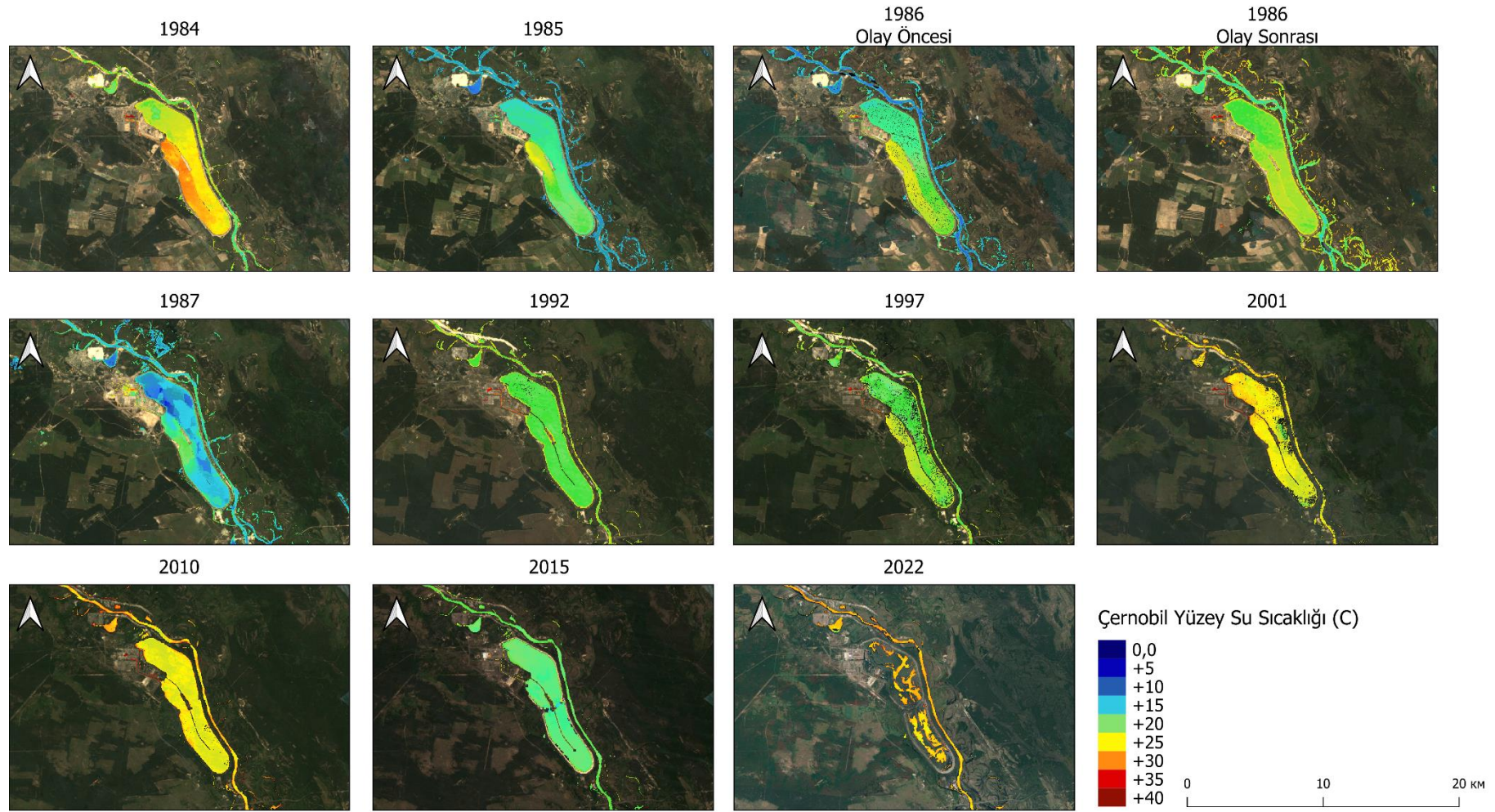
4.2.1. Çernobil NGS

Bu bölümde elde edilen bulgular, Kalinin ve Çernobil nükleer güç santrallerinin soğutma havuzlarındaki yüzey suyu sıcaklığındaki değişimlerin analizini içermektedir. Bulgular, zamansal eğilimleri, mevsimsel varyasyonları ve potansiyel farklılıkları açığa çıkararak, Çernobil NGS'nin su yüzeyi sıcaklığı, kaza öncesi, kaza sonrası ve 2022 yılına kadar süren dört bloğun aşamalı olarak kapatıldığı dönemde incelenmiştir. Aynı şekilde, Kalinin NGS için su sıcaklığı değişimi, her bloğun devreye alınması (1984, 1986, 2004, 2011) öncesinde ve sonrasında analiz edilmiştir.

Çernobil Soğutma Havuzu, eski Çernobil NGS ve Pripyat Nehri arasında konumlanmaktadır. Daha önce 4.1 Bölümünde belirtildiği gibi, 2005 yılında yayınlanan bir raporda 2000 yılında son bloğun kapatılmasına rağmen soğutma havuzunun su seviyesi, Pripyat Nehri'nin yapay olarak ortalama su seviyesinden 6-7 metre yüksek tutulduğunu ancak soğutma sistemleri nihayet kapatıldığında ve havuza su pompalanması sonlandığında bu durumun değişeceğini belirtilmiştir. 2014 yılında Ukrayna, maliyeti düşürmek amacıyla Pripyat Nehri'nden havuza su pompalamayı durdurdu. Bu karar, tasarruf sağlama amacıyla alınan bir adım olarak kaydedilmiştir (Anonim t.y.-d).

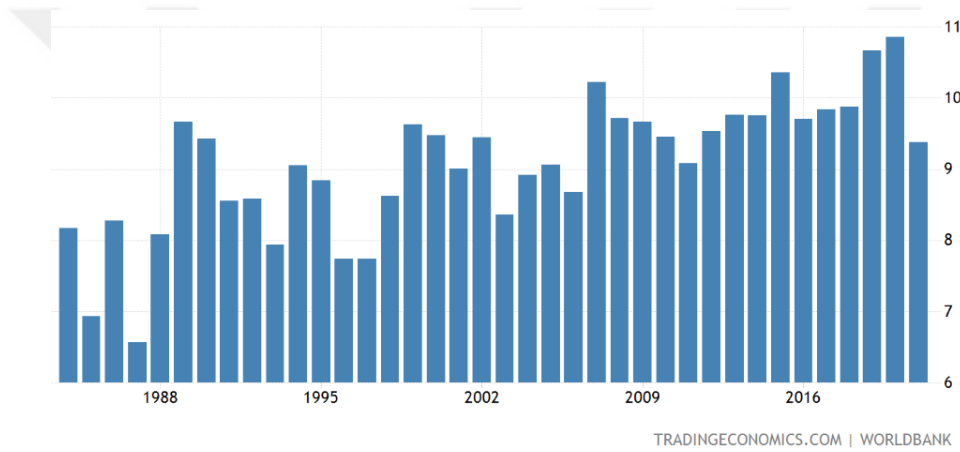
Çernobil Soğutma Havuzunun yüzey sıcaklığını ifade eden farklı yıllara ait görüntülerin oluşturulması Bölüm 3.3.3'te açıklanan yöntemler kullanılarak oluşturulmuştur. Bu görüntüler, araştırmanın metodolojisine dayalı olarak elde edilmiş ve Şekil 4.25'te sunulmuştur. Bu görüntüler, kazadan önceki yılları ve özellikle Nisan 22 1986 tarihini, kaza sonrası ise Nisan 29 1986 tarihini içermektedir. Ayrıca, diğer görüntüler ise farklı yıllara ait verileri bugüne kadar kapsamaktadır. Soğutma Havuzunun yüzey suyu sıcaklığını ifade eden görüntüler arasında, kaza öncesi ve sonrası olan Nisan 22 ve 29 tarihlerinin yanı sıra, Nisan 15 ve Ağustos 30 gibi yaz sezonunu kapsayan görüntüler bulunmaktadır.

22 Nisan tarihindeki soğutma havuzunun sıcaklığına baktığımızda yaklaşık +25°C civarında olduğu ve nükleer santralden gelen su akımının etkisinin görüldüğü gözlenmektedir. Öte yandan, 29 Nisan tarihinde havuzdaki su sıcaklığının dağılımının neredeyse homojen olduğu ve 26 Nisan'da meydana gelen kazanın reaktörün kapatıldığını işaret ettiği anlaşılmaktadır. 1986 ve 1987 yıllarında yapılan çalışmalar



Şekil 4.25. Çernobil NGS soğutma havuzunun yüzey sıcaklığının zaman içinde değişimi; olay öncesi ve sonrası görüntüler 22 Nisan ve 29 Nisan 1986 tarihlerindeki yüzey su sıcaklığını göstermektedir

(Richter vd. 1986; SADOWSKI FRANK G. ve COVINGTON STEVEN G. 1987) elde edilen sonuçları desteklemektedir. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar, 29 Nisan tarihindeki homojen su sıcaklığı dağılımının reaktör kapatılmasına işaret ettiği bulgularıyla uyumlu bir şekilde ortaya konmuştur. 1987 yılında Çernobil NGS'nin soğutma havuzunun su sıcaklığı, +5°C dereceye kadar düşerek en soğuk yıl olarak kaydedilirken, 2001 yılında ise yaklaşık +25°C derece civarında ölçülmüştür. Önemle belirtilmelidir ki, Çernobil NGS'nin 1, 2 ve 3 blokları sırasıyla 30 Aralık 1996, 11 Ekim 1991 ve 15 Aralık 2000 tarihlerinde devre dışı bırakılmıştır. Tüm blokların 2000 yılından sonra devre dışı kalmasına rağmen, 2001 ve 2010 yıllarında santral bölgesinden soğutma havuzuna yaklaşık +35 derece sıcak su girişi gözlemlenmiştir. Buna karşılık, 2015 yılında su sıcaklığı neredeyse homojen olup yaklaşık +20°C derece olarak ölçülmüştür. Bu durumun nedeni, 2014 yılında soğutma havuzunun su pompalanmasının durdurulmasıyla ilişkilendirilebilir. Su yüzey sıcaklığı yıldan yıla değişebilir ve bu değişimler genellikle o yılın hava koşullarıyla ilişkilidir. Şekil 4.26, Ukrayna'nın 1984-2021 yılları arasındaki yıllık ortalama sıcaklık verilerini sunmaktadır.

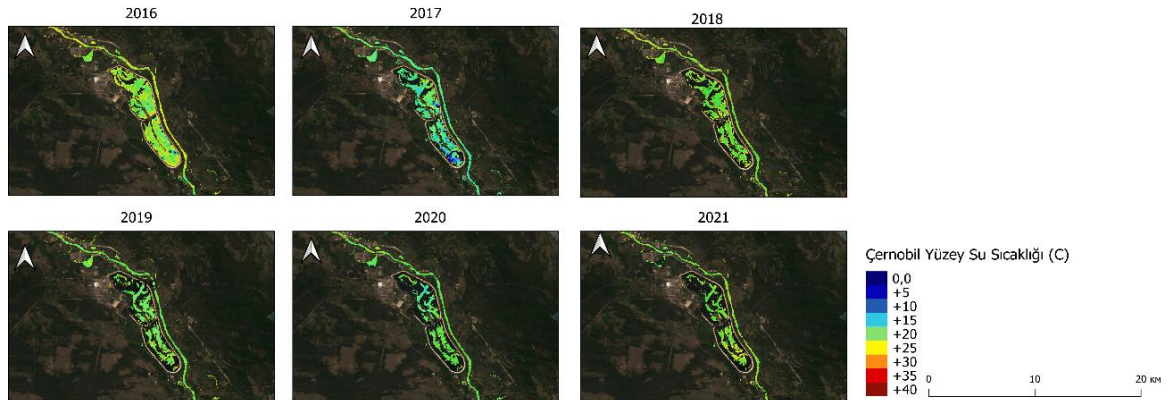


Şekil 4.26. Ukrayna'nın 1984-2021 yılları arasındaki yıllık ortalama sıcaklık verileri

Açıkça görülüyor ki, 1987 yılında en düşük sıcaklık gözlemlenirken, 2010 ve 2020 yıllarında maksimum değere ulaşılmıştır. 2015 yılı, en yüksek 3. sıcaklık değerine sahip olmasına rağmen, bu yılda soğutma havuzunun yüzey su sıcaklığı diğer yıllara kıyasla daha düşüktür. Bu durum, 2014 yılında su pompalanmasının durdurulmasıyla sıcaklığın dengeye geldiği şeklinde yorumlanabilir. 2022 yılına ait verilere bakıldığında ise son derece ilginç sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Soğutma havuzunun başlangıçta yüzey alanı 12.7 km² ve 1981 yılında 3. ve 4. reaktörlerin devreye girmesiyle birlikte soğutma havuzuna yeni bir bölüm eklenmiş ve rezervuar mevcut boyutlarına ulaşmıştır, yani yüzey alanı 22.9 km² olarak genişlemiştir (Bugai vd. 1997). 2022 yılında yapılan hesaplamalara göre, soğutma havuzunun yüzey alanının 22,9 km²'den 5,81 km²'ye düştüğü belirlenmiştir. Bu durum, başlangıç yüzey alanına kıyasla %75'lik bir kayıp olduğunu göstermektedir. 2016 yılından 2022 yılına kadar gözlemlenen yüzey su alanının azalması Şekil 4.27'de sunulmuştur. Bu durumda, 2005 yılında planlanan ve ekoloji üzerinde önemli bir etkiye sahip olan Çernobil Havuzunun su seviyesinin başarıyla düşürüldüğü söylenebilir.

4.2.2. Kalinin NGS

Bu çalışma kapsamında incelenen Kalinin NGS, dört aktif enerji ünitesinin türbin ve yardımcı ekipmanları için bir soğutma sistemi olan Kalinin NGS su deposunu (Kalinin

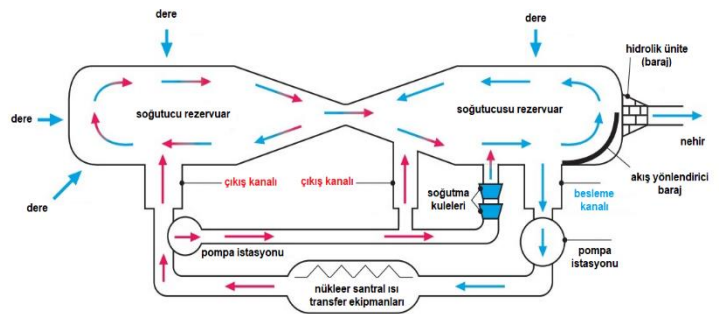


Şekil 4.27. Çernobil Soğutma Havuzu Yüzey Su Sıcaklığı (2016-2021)

NGS soğutma gölleri) içermektedir. Bu sistem, Pesvo ve Udomlya göllerini içeren bir dizi gölden oluşmaktadır (Kalinin NPP 2014). NGS'de, su kaynaklarının soğutulması için kullanılan geri dönüş suyu temin sistemi, iletişim halindeki göllerin özel olarak seçildiği bir olaydır. Bu sistemde, ısıtılmış suyun deşarjı Pesvo Gölü'ne yönlendirilirken, su temini ise Udomlya Gölü'nden sağlanır. Su seviyesinin düzenlenmesi ise Syezha Nehri üzerinde bulunan bir baraj-kapak sistemi ile kontrol edilmektedir.



a)



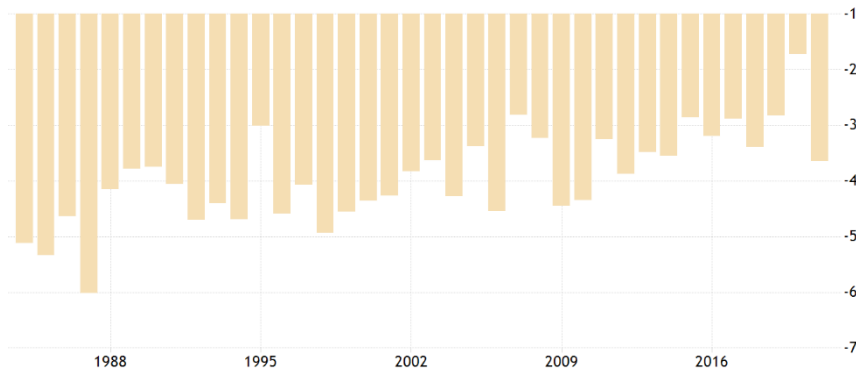
b)

Şekil 4.28.Kalinin NGS'nin göl tipi soğutma havuzuyla birlikte su temini dönüş sisteminin **a)** temel gösterimi **b)** temel şeması

Üçüncü ve dördüncü enerji bloklarının devreye alınmasıyla (2004 ve 2011), dört adet soğutma kulesi ve iki adet ek tahliye kanalı devreye girmiştir. Bu durum, su kaynaklarına ısı transferi şemasını değiştirmiş ve göl alanında termal yükün yeniden dağılımına neden olmuştur (Kalinin NPP 2014). 4 bloğun başlangıç kompleksinin bir parçası olarak, Udomlya Gölü'nün kuzey kısmına yönlendirici bir baraj da dahil edilmiştir. Barajın inşası, ısıtılmış suyun yaklaşık yarısını Udomlya Gölü'nün kuzey ucuna boşaltmayı ve gölün tüm suyunun daha homojen bir şekilde ısınmasını sağlamayı mümkün kılmıştır

(Şekil 4.28). Udomlya gölünün soğutma kapasitesini artırmak için, Udomlya gölünün yüksek bölgelerine doğru su tahliye kanalı inşa edilmiştir. Bu kanal, ısıtılmış suyu Udomlya gölünün kuzey ucuna yönlendirmektedir. Kalinin NGS'nin su dönüşüm sisteminin anlaşılması, UA aracılığıyla elde edilecek sonuçların daha iyi anlaşılmasına ve yorumlanmasına yardımcı olacaktır.

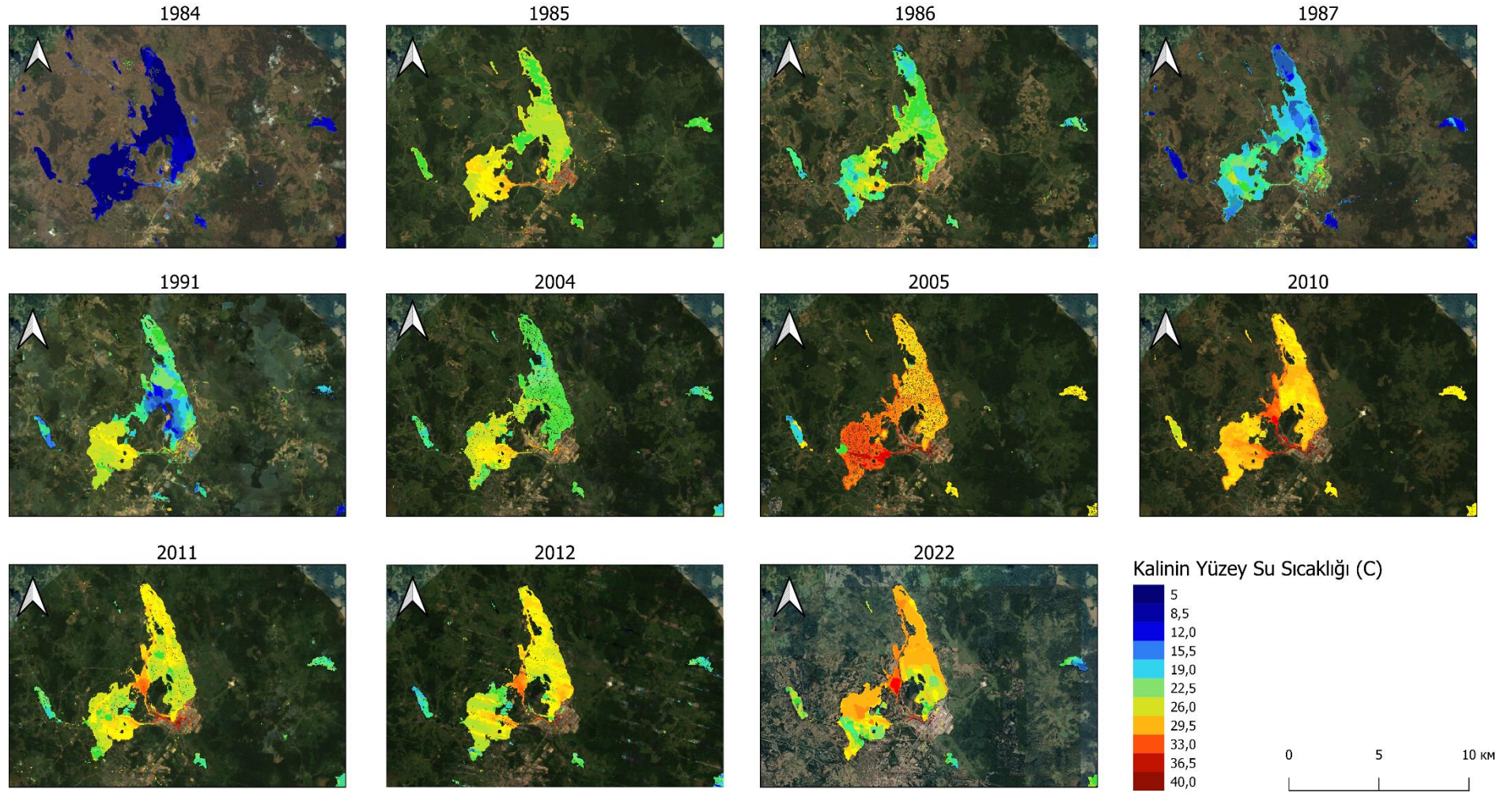
Bölüm 3.3.3.'te sunulan yöntem ve Landsat 5, 7 ve 8 görüntülerinin kullanılmasıyla, Kalinin nükleer güç santralının her bir ünitesinin devreye alınmadan önceki ve sonraki yılları içinde, ayrıca 2022 yılında yüzey su sıcaklığı analizi yapılmıştır. Bu analizler, santralin işletme sürecindeki su sıcaklığı değişimlerini anlamamıza yardımcı olmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.30'de sunulmuştur. Genel olarak bakıldığında, 1984'ten 2022'ye kadar su sıcaklık dağılımında değişiklikler görülmekle birlikte, açıkça su sıcaklığının arttığı gözlemlenmektedir. Birinci ünitenin devreye alındığı 1984 yılında su sıcaklığı +5°C ile +12°C arasında değişmektedir. Ancak, 1985 yılında en düşük su sıcaklığı +22 olarak ölçülmüştür. Bu durum, birinci ünitenin devreye alınmasından sonra Udomlya ve Pesvo göllerinin 1984 yılından itibaren geri dönüşümlü su temini sistemine dahil edilmesi ve suyun sıcaklık düzenlemeleri yapıldıktan sonra göllerin sıcaklık rejiminin değişmesinden kaynaklanmaktadır (Kalinin NPP 2014). Buna rağmen, 1987 yılında ikinci ünitenin devreye alınmasına rağmen su sıcaklığında bir düşüş gözlenmiştir. Çernobil durumunda olduğu gibi, 1987 yılında su sıcaklığının düşmesi hava koşullarıyla ilişkilendirilebilir. Rusya'nın 1984-2021 yılları arasındaki yıllık ortalama sıcaklıklarına bakıldığında (Şekil 4.29), bu yılın Ukrayna'da olduğu gibi en soğuk yıllardan biri olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, 1987 yılındaki su sıcaklığındaki düşüşün, genel hava koşullarının etkisiyle gerçekleştiği söylenebilir.



TRADINGECONOMICS.COM | WORLDBANK

Şekil 4.29. Rusya'nın 1984-2021 yılları arasındaki yıllık ortalama sıcaklık verileri

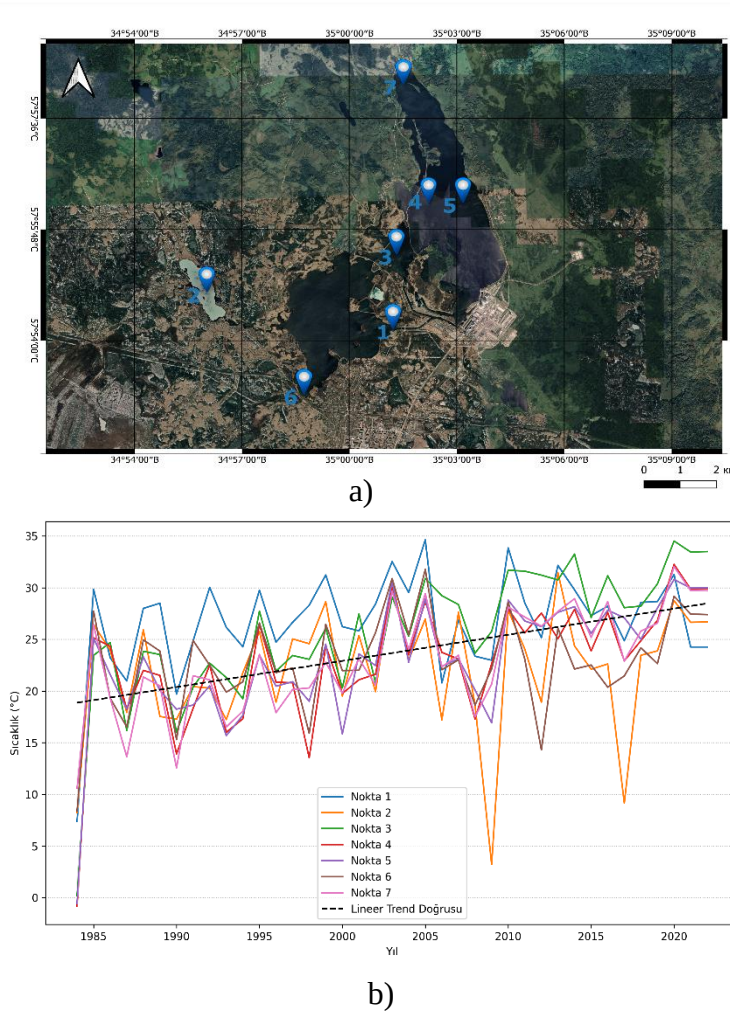
Şekil 4.30'da, santralden gelen sıcak suyun çıkış noktası Udomlya ve Pesvo göllerine boşaltıldıktan sonra sıcak su dağılımı açıkça görülmektedir. Gözlemlenen su dağılımı, Şekil 4.28'de gösterilen şemaya uygun bir şekilde dağıldığı gözlenmiştir. Gözlemlere göre, santralden gelen sıcak suyun Pesvo ve Udomlya göllerine boşaltıldığı ve Udomlya gölüne kuzeyine yönlendirildikten sonra soğuyup dağıldığı açık bir şekilde Şekil 4.30'de görülmektedir. Bu veriler, suyun sıcaklık dağılımının santral çıkışından göllere olan etkisini net bir şekilde göstermektedir. Bu olay, ilginç bir durumu ortaya koymaktadır. Uzaktan algılamanın sağladığı bu avantaj, sürekli santral izlemede kullanılabilir ve su kaynaklarının etkin bir şekilde yönetilmesine katkı sağlayabilir. Ayrıca, bu tür analizler çevresel etkilerin izlenmesi ve potansiyel risklerin belirlenmesi açısından da önemlidir.



Şekil 4.30. Kalinin NGS soğutma havuzunun yüzey sıcaklığının zaman içinde değişimi

Ayrıca elde edilen görüntüler, Kalinin NGS'nin su yönetimi ve altyapısının zaman içinde yapılan geliştirmeleri yansıtarak su tahliye kanalın 2005 yılında ve akış yönlendirici barajın 2011 yılından sonra inşa edildiğini göstermektedir.

Daha kesin sonuçlar elde etmek amacıyla, göl sisteminin Şekil 4.31'de gösterildiği gibi farklı noktalarında UA yöntemiyle sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiş ve her nokta için zaman grafiği elde edilmiştir. Bu yöntem, geniş bir alanda veri toplama imkânı sağlayarak, su sıcaklığındaki değişimleri daha detaylı bir şekilde analiz edilmesini mümkün kılmıştır.



Şekil 4.31. a) Sıcaklık ölçümleri için seçilen 7 noktanın Udomlya, Pesvo ve Sucha göllerin üzerinde konumu; **b)** alınan noktaların zaman içerisinde (1984-2022) sıcaklık değişimi

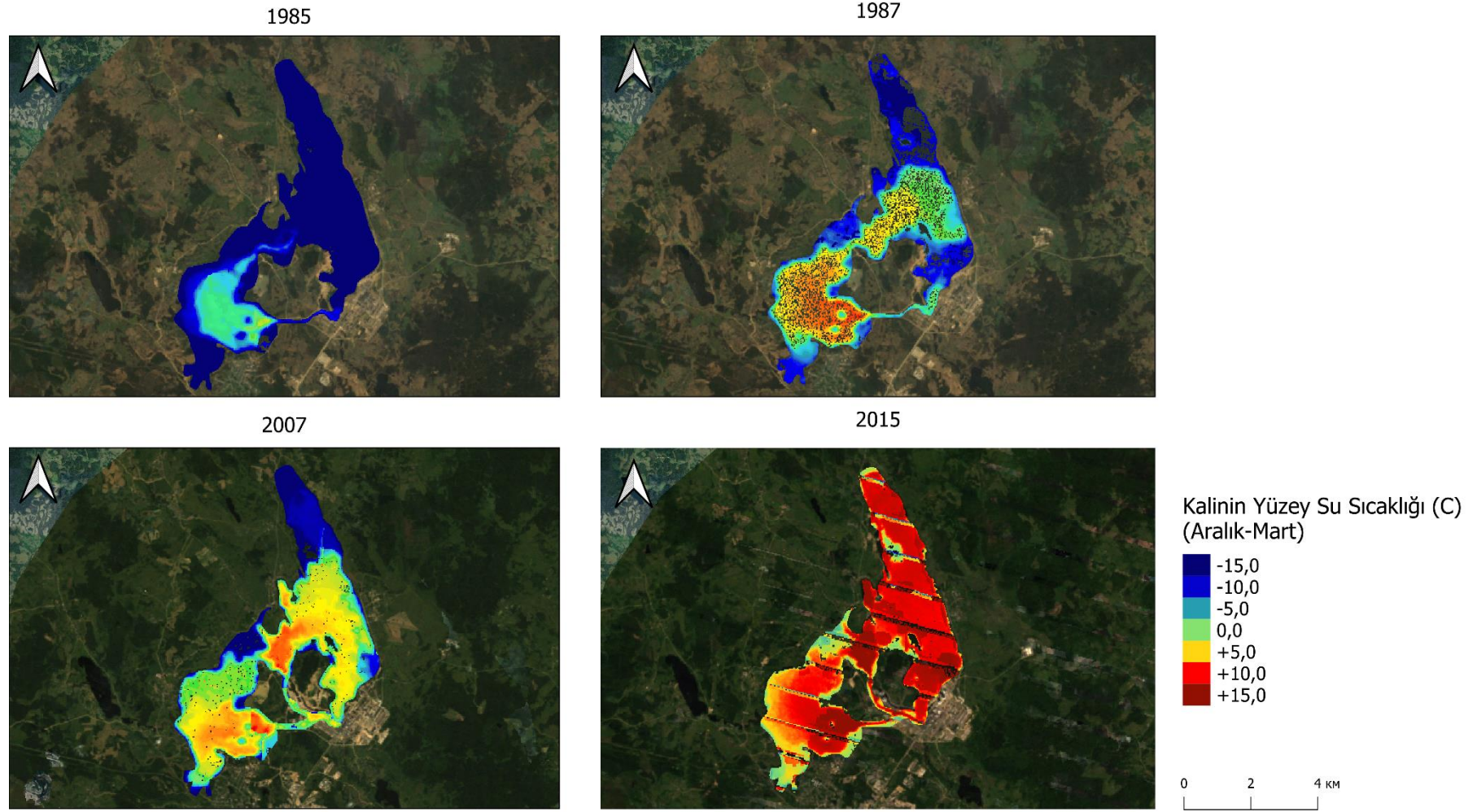
Şekil 4.31. b)'de 1. nokta, Pesvo gölünün çıkış kanalını; 2. nokta, Pesvo ve Udomlya göllerindeki su seviyesini düzenleyen Syucha gölünü; 3. nokta, Udomlya ve Pesvo göllerinin birleştiği bölgeyi; 4., 5. ve 7. noktalar, su akışını yönlendiren barajların çıkış bölgelerini ve 6. nokta, Pesvo gölünün güney ucundaki bölgeyi temsil etmektedir. Bu noktalar üzerinden alınan ortalama değerler kullanılarak oluşturulan trend doğrusu incelendiğinde, Nisan-Ağustos döneminde (yaz bahar- yaz mevsimi) 1984 yılından 2022

yılına kadar su sıcaklığının +19°C dereceden +29°C dereceye kadar, yani +10 °C dereceye kadar bir artış gözlemlendiği görülmektedir.

Kalinin NGS, 2013 yılında elektrik üretimindeki artışın çevre üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla 19-26 Mayıs tarihleri arasında birinci, ikinci ve üçüncü ünitelerde özel gözlemler gerçekleştirmiştir. Bu gözlemler kapsamında 22 farklı noktadan su örnekleri alınmış ve elde edilen sonuçlar ilgili raporda yayınlanmıştır. (Kalinin NPP 2014). Rapor sonuçlarına göre, 2013 yılında Udomlya gölünden alınan numune suyunun sıcaklığı +25,8°C olarak ölçülmüştür. Bu çalışma dahilinde, Udomlya gölünün kuzeyindeki 7. noktada yapılan ölçümlerde ise su sıcaklığının +26.08 °C olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, raporda belirtilen Pesvo gölünün çıkış kanalındaki sıcaklık değeri +32,3°C derece olarak verilirken, bu çalışma kapsamında 1. noktada ölçülen sıcaklık ise +32,16°C olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, Udomlya gölünde 5. nokta bölgesinde raporda verilen değer +26,5°C iken, bu çalışmada ölçülen sıcaklık +27,6°C olarak belirlenmiştir. Bu veriler, rapor sonuçlarıyla karşılaştırıldığında elde ettiğimiz sonuçları doğrulamaktadır (belirlenen yedi noktadaki sıcaklık değerleri, ek bölümdeki Çizelge 7.1'de sunulmuştur).

2019 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, 1974-2016 yılları arasında Udomlya gölünün sıcaklık verileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar, Kalinin NGS'nin soğutma suyunda aylık ortalama su sıcaklığının arttığını ortaya koymuştur (Obyazov V.A. vd. 2019). Özellikle Nisan-Mayıs aylarında bu artışın 10-12 derece üzerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, küresel bir ısınmanın etkisiyle, soğutma suyu sıcaklığının artmasıyla birlikte yerel olarak hava sıcaklığında da bir artış yaşandığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yapılan çalışmalar sonuçlarıyla uyum içerisindedir ve genel olarak 1984 yılından sonra net bir sıcaklık artışının meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, uzaktan algılama tekniklerinin etkinliğini ve verilerin doğruluğunu desteklemektedir.

Kalinin NGS tarafından kış aylarında boşaltılan sıcak su akımlarının gerçekleştiği göllerde suyun donmaması, dikkate değer bir husustur. Bu durum, nükleer santralin soğutma sisteminden gelen sıcak suyun göle verilerek su sıcaklığının yükseltilmesiyle ilişkilidir. Şekil 4.32, 15 Aralık- 30 Mart tarihleri arasında farklı yıllara ait Udomlya ve Pesvo göllerinin sıcaklık durumunu göstermektedir. 1985 yılına ait görüntüye baktığımızda, gölün büyük bir kısmının -10 C derece civarında, yani donmuş halde olduğunu görmekteyiz. Santralden Pesvo gölüne doğru akan sıcak suyun çıkışı ve göllere dağılımı net bir şekilde görülmektedir ve akışın sıcaklığı yaklaşık olarak 0 C ile +5 C derece arasındadır. Bu görüntü, soğuk kış aylarında göllerin donma durumu ve sıcak suyun etkisiyle oluşan akışın açıkça gözlemlenebildiğini göstermektedir. 1986 yılında 2. ünitenin devreye girmesiyle birlikte 1987 yılına ait görüntüde, suyun sıcaklığının daha da yükseldiği ve santralden çıkış bölgesinde +10 dereceye kadar çıktığı gözlemlenmektedir. Aynı zamanda, 1985 yılıyla karşılaştırıldığında, sıcak suyun göllere dağıldığı alanın daha geniş olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, nükleer santralin kapasitesinin artması ve daha fazla sıcak suyun göllere yönlendirilmesiyle ilişkilendirilebilir. 2004 yılında devreye alınan 3. blok ve o süre zarfında inşa edilen ek su tahliye kanalı sayesinde artık sıcak su, 3 farklı noktadan göle aktarılmaktadır. Bu noktalar, 1. ve 2. ünitelerin çıkış kanalları, 3. ünitenin çıkış kanalı ve soğutma kulelerinden gerçekleşen boşaltım noktasıdır. Çıkış kanallarında su sıcaklığı yaklaşık olarak +10 derece civarında bulunmakta olup dağıldıkça giderek düşmektedir: +7, +5, 0, -5 ve -10 derece değerlerine kadar. Bu şekilde suyun farklı noktalardan göle aktarılması, daha geniş bir alanın etkilenmesini sağlamaktadır. 2011 yılında 4. ünitenin işleme alınmasından sonra 3. ve 4. ünitelerin



Şekil 4.32. 1985, 1987, 2007 ve 2015 yıllarında Aralık-Mart arasında Kalinin NGS soğutma göllerinin sıcaklık değişimi

kapasitede çalıştığı 2015 yılında su sıcaklığındaki artış daha da belirgin hale gelmiştir. Çıkış noktalarındaki su sıcaklığı +15 dereceye kadar yükselmekte ve göllerin genel su sıcaklığı dağılımı +5 ile +10 derece arasında bulunmaktadır. Sadece bazı bölgelerde su sıcaklığı negatif değerler alırken, çoğunlukla göllerin kış aylarında donmadığı gözlemlenmektedir. 2015 yılındaki Kalinin NGS'nin soğutma göllerindeki su sıcaklığının artmasının nedeni, o yılın aşırı sıcak hava koşullarına bağlanabilir. 4.29'da belirtilen Rusya'daki ortalama sıcaklık verilerine göre, 2015 yılının en sıcak yıllardan biri olduğu görülmektedir. Bu sıcak hava durumu, Kalinin NGS'nin göllerindeki su sıcaklığını etkilemiş ve yükselmesine sebep olmuştur. 2014 yılında yayınlanan raporda kış döneminde su alanlarında büyük ölçekli donmayan su bölgelerinin oluşması, suyun buharlaşmasını artırarak yerel mikroiklimi etkilediğini ve kıyı metal yapılarının, tellerin ve diğer yapıların buzlanmasına neden olduğunu belirtmektedir (Kalinin NPP 2014). Obyazov V.A. vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada belirtilen bilgilere göre, su rezervuarının soğutma suyundaki en yüksek sıcaklık değeri, 4. enerji bloğunun devreye alınmasından sonra XXI. yüzyılın ilk on yılının sonunda ve ikinci on yılının başında ulaşılmıştır. Bu sıcaklık artışı, su rezervuarındaki buz rejiminde değişikliğe neden olmuştur. Eski dönemde, istasyonun devreye alınmasından önce Aralık-Mart ayları arasında göl tamamen buzla kaplıyken, son yıllarda buzdaki durum sadece belirli koylarda meydana gelmektedir. Bu sonuçlar Obyazov'un çalışmalarına dayanmaktadır. Bulduğumuz sonuçlar, yapılan diğer çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu olduğunu açıkça göstermektedir. Elde ettiğimiz sonuçlar, diğer çalışmaların bulgularıyla tutarlılık göstermektedir. Bu uyum, verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Bu durum, araştırmamızın sağlam bir temele dayandığını ve sonuçların güvenilir bir şekilde yorumlanabileceğini vurgulamaktadır.

5. SONUÇLAR

5.1. Arazi Örtüsü Değişimi

Uzun bir dönem boyunca değişiklikleri tespit etmek için, uzaktan algılama yöntemleri önemli araçlar olarak değerlendirilmektedir. Uzaktan algılama yöntemleri, Landsat uydularının sağladığı uzun dönemli veri setleri ile birlikte, çevresel koşulların ve bitki örtüsü dinamiklerinin geniş bir zaman aralığında izlenmesini mümkün kılan önemli araçlar olarak kabul edilmektedir.

Landsat 5, 7 ve 8 verileri ile Çernobil ve Kalinin NGS çevresindeki alanlar, NDVI, ARVI, EVI, SAVI, VARI, NDII ve MSI gibi indeksler ve ilgili indeks haritaları kullanılarak ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiş ve zaman serileri ile desteklenmiştir. Bu çalışma kapsamında, indeksler arasındaki ilişkilerin yanı sıra, Çernobil bölgesi ile herhangi bir kaza yaşanmamış olan Kalinin nükleer güç santrali arasında regresyon analizi gerçekleştirilerek kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır.

Çernobil nükleer kazasının bölge üzerindeki etkileri doğrudan tespit edilmemiştir. Bununla birlikte, kaza öncesi indeks değerlerinin 1986'dan sonraki değerlerle karşılaştırılması, daha düşük indeks değerlerinin gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum potansiyel olarak 1984 yılında meydana gelen fakat 2021 yılına kadar Dünya çapında bilinmeyen nükleer kaza ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, reaktöre yakın olan ve "Kızıl Orman" olarak bilinen yakındaki ormanda, radyasyonun etkisi açıkça görülebilmektedir. İndeks haritaları incelendiğinde, kazadan önce ve sonra bitki

örtüsünde meydana gelen farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu durum, iğne yapraklı ağaçların radyasyona karşı hassasiyetinden kaynaklanmaktadır (IAEA 1991; Netsvetov vd. 2023; Zakharov 1999).

İnsan etkisinin olmadığı durumlarda, tüm indekslerde iyileşme gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bazı yıllarda orman yangınları gibi olaylar, bitki örtüsünde zaman içinde olumsuz tepe noktalarına sebep olmuştur. Ancak, bu tür bozulmalara rağmen genel bir iyileşme gözlemlenmiştir ve radyasyona karşı koruyucu ve önleyici tedbirlerin etkinliği kanıtlanmıştır. Bu tedbirler, radyasyonun etkilerini hafifletmede önemli bir rol oynamış ve bitki örtüsünde olumlu bir değişime katkıda bulunmuştur.

Kalinin nükleer güç santrali, farklı yıllarda (1984, 1986, 2004 ve 2011) inşa edilen dört bloktan oluşmasına rağmen, bitki örtüsünde olumlu değişiklikler göstermiştir. Santralin inşası ve işletmesi, bitki büyümesini olumsuz etkilememiştir.

Çernobil bölgesinde hesaplanan indeksler arasındaki ilişkiyi temsil eden R^2 değerleri, VARI indeksi ile diğer indeksler arasında düşük bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Bunun aksine, Kalinin nükleer güç santrali için hesaplanan VARI indeksi, diğer indekslerle güçlü bir korelasyona sahiptir. VARI indeksinin aerosol gibi faktörlere olan hassasiyeti göz önüne alındığında, bu bulgu Çernobil bölgesinin atmosferinde radyoaktif aerosollerin varlığına işaret ettiği şekilde değerlendirilmektedir. Daha kesin sonuçlar elde etmek için, özellikle radyasyon etkilenen bölgelerde farklı bölgelerde daha fazla analiz yapılmalıdır.

Gelecekteki araştırmalar, ek bilgiler toplamak ve kapsamlı sonuçlar çıkarmak için diğer nükleer güç santrallerinin incelenmesine odaklanmalıdır.

5.2. Yüzey Su Sıcaklığı

Sonuç olarak, yapılan analizler ve incelenen veriler doğrultusunda, Çernobil Soğutma havuzunun zaman içindeki yüzey su sıcaklığında belirgin değişimlerin olduğu gözlemlenmiştir. Kazadan önce ve sonra gerçekleştirilen ölçümler, su sıcaklığındaki farklılıkları ortaya koymaktadır. Ayrıca, soğutma havuzunun yüzey alanında %75 kadar da önemli bir azalma tespit edilmiştir. Bu bulgular, Çernobil Nükleer Güç Santrali'nin işletme süreci ve etkisi hakkında daha derin bir anlayış sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmaların, bu değişimlerin çevresel etkilerini ve su kaynaklarının sürdürülebilirliğini değerlendirmeye odaklanması önemlidir.

Kalinin Nükleer Güç Santrali'nin su yönetim sistemi ve su sıcaklığı değişiklikleri üzerine gerçekleştirilen analizler, su kaynaklarının etkin yönetimi için önemli bilgiler sunmaktadır. Göllerin farklı noktalarında yapılan ölçümlerle elde edilen veriler, Kalinin NGS'nin su yönetimi ve altyapısının zaman içindeki gelişimlerini yansıtmaktadır. Bu analizlerde elde edilen bulgular, Kalinin NGS'nin çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılan çalışmalarla uyum içerisindedir.

1984-2022 dönemi incelendiğinde, su sıcaklığının zaman içinde arttığı gözlemlenmiştir. İlk ünite devreye alındığında (1984), su sıcaklığı $+5^{\circ}\text{C}$ ile $+12^{\circ}\text{C}$ arasında değişirken, 1985 yılında en düşük su sıcaklığı $+22^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Ancak, 1987 yılında ikinci ünite devreye alınmasına rağmen su sıcaklığında bir düşüş kaydedilmiştir. Bu düşüşün hava koşullarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Genel olarak, Kalinin NGS'nin su sıcaklığındaki artışın, santralden göllere akan sıcak suyun etkisiyle olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca, uzaktan algılama yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde de kış aylarında Kalinin NGS tarafından boşaltılan sıcak suyun göllerin donmamasını sağladığı tespit

edilmiştir. Göllerin sıcaklık durumu incelendiğinde, uzaktan algılama verileriyle de sıcak suyun etkisiyle göllerin donmadığı ve su akışının açıkça görüldüğü gözlemlenmiştir.

Uzaktan algılama teknikleri, su örnekleme ve ekolojik araştırmalarla elde edilen veriler, enerji santralının çevresel sürdürülebilirlik ve koruma tedbirlerinin optimize edilmesine yönelik devam eden çabalara katkıda bulunmaktadır. Çevresel etkilerin izlenmesi ve anlaşılmasıyla, gerekli önlemlerin uygulanması mümkün olur ve bölgenin uzun vadeli ekolojik sağlığı sağlanır.



6. KAYNAKLAR

Alexakhin, R. M., N. I. Sanzharova, S. V. Fesenko, S. I. Spiridonov, ve A. V. Panov. 2007. *CHERNOBYL RADIONUCLIDE DISTRIBUTION, MIGRATION, AND ENVIRONMENTAL AND AGRICULTURAL IMPACTS*.

Anderson, Liana O., Yadvinder Malhi, Luiz E. O. C. Aragão, Richard Ladle, Egidio Arai, Nicolas Barbier, ve Oliver Phillips. 2010. "Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies". *New Phytologist* 187(3):733-50. doi: 10.1111/j.1469-8137.2010.03355.x.

Aneta Modzelewska, Anna M. Jarocinska, Paulina Pochrybniak, ve Marek Mostowski. 2020. "The vegetation condition changes near Chernobyl based on Landsat TM".

Anonim. 1998. *ESRI Shapefile Technical Description*.

Anonim. t.y.-a. "Arson suspected cause of forest fire near Chernobyl - World Nuclear News". Geliş tarihi 20 Haziran 2023 (<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Arson-suspected-cause-of-forest-fire-near-Chernoby>).

Anonim. t.y.-b. "Chernobyl climate: weather by month, temperature, rain - Climates to Travel". Geliş tarihi 10 Ağustos 2023 (<https://www.climatestotravel.com/climate/ukraine/chernobyl>).

Anonim. t.y.-c. "Climate Chernobyl (Cherkasy), averages - Weather and Climate". Geliş tarihi 10 Ağustos 2023 (<https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine,Chernobyl-ua,Ukraine>).

Anonim. t.y.-d. "Cooling Pond | EROS". Geliş tarihi 25 Haziran 2023 (<https://eros.usgs.gov/media-gallery/earthshot/cooling-pond>).

Anonim. t.y.-e. "Fire raging near Ukraine's Chernobyl poses radiation risk, say activists | Reuters". Geliş tarihi 20 Haziran 2023 (<https://www.reuters.com/article/us-ukraine-chernobyl-fire-idUKKCN21V1QW>).

Anonim. t.y.-f. "First Address on Chernobyl – Seventeen Moments in Soviet History". Geliş tarihi 06 Ağustos 2023 (<https://soviethistory.msu.edu/1985-2/meltdown-in-chernobyl/meltdown-in-chernobyl-texts/first-address-on-chernobyl/>).

Anonim. t.y.-g. "Frequently Asked Questions | Google Earth Engine | Google for Developers". Geliş tarihi 11 Haziran 2023 (https://developers.google.com/earth-engine/faq#is_cross-sensor_landsat_surface_reflectance_harmonization_needed).

Anonim. t.y.-h. "Geofabrik Download Server". Geliş tarihi 09 Ağustos 2023 (<https://download.geofabrik.de/>).

- Anonim. t.y.-i. “How do I use a scale factor with Landsat Level-2 science products? | U.S. Geological Survey”. Geliş tarihi 11 Haziran 2023 (<https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-use-a-scale-factor-landsat-level-2-science-products>).
- Anonim. t.y.-j. “Landsat Collection 2 Surface Reflectance | U.S. Geological Survey”. Geliş tarihi 10 Ağustos 2023 (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance>).
- Anonim. t.y.-k. “Landsat Collections | Center for Earth Observation”. Geliş tarihi 10 Ağustos 2023 (<https://yceo.yale.edu/landsat-collections>).
- Anonim. t.y.-l. “Largest radioactive exclusion zone | Guinness World Records”. Geliş tarihi 06 Ağustos 2023 (<https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/100405-largest-radioactive-exclusion-zone>).
- Anonim. t.y.-m. “Nuclear Power Reactors | How does a nuclear reactor work? - World Nuclear Association”. Geliş tarihi 29 Haziran 2023 (<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>).
- Anonim. t.y.-n. “Nuclear Power Today | Nuclear Energy - World Nuclear Association”. Geliş tarihi 20 Nisan 2023 (<https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>).
- Anonim. t.y.-o. “Radiation Basics | US EPA”. Geliş tarihi 29 Haziran 2023 (<https://www.epa.gov/radiation/radiation-basics>).
- Anonim. t.y.-p. “What are the band designations for the Landsat satellites? | U.S. Geological Survey”. Geliş tarihi 06 Ağustos 2023 (<https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>).
- Anonim. t.y.-q. “What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)? - GIS Geography”. Geliş tarihi 11 Haziran 2023 (<https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>).
- Anonim. t.y.-r. “What is Radiation? | IAEA”. Geliş tarihi 06 Ağustos 2023 (<https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-radiation>).
- Anonim. t.y.-s. “What is Uranium? How Does it Work - World Nuclear Association”. Geliş tarihi 06 Ağustos 2023 (<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/what-is-uranium-how-does-it-work.aspx>).
- Anonim. t.y.-t. “Город Удомля: численность населения, достопримечательности, транспорт, климат, городская карта”. Geliş tarihi 21 Mayıs 2023 (<https://gorodarus.ru/udomlya.html>).

- Anonim. t.y.-u. “СБУ рассекретила новые документы о катастрофе на Чернобыльской АЭС - ТРК Звезда Новости, 26.04.2021”. Geliş tarihi 20 Haziran 2023 (<https://tvzvezda.ru/news/20214261358-yMZcQ.html>).
- Artis, David A., ve Walter H. Carnahan. 1982. *Survey of Emissivity Variability in Thennography of Urban Areas*. C. 12.
- Aslan, N., ve D. Koc-San. 2021. “Investigation of the changes of lake surface temperatures and areas: Case study of burdur and Egirdir Lakes, Turkey”. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 43(B3-2021):299-304. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-299-2021.
- Bannari, A., D. Morin, F. Bonn, ve A. R. Huete. 1995. “A review of vegetation indices”. *Remote Sensing Reviews* 13(1-2):95-120. doi: 10.1080/02757259509532298.
- Bazhan, O. H. (Oleh Hryhorovych), Andrii Kohut, H. V. Boriak, O. G. (Олег Григорович) Бажан, Андрій Когут, Г. В. Боряк, Sluzhba bezpeky Ukraïny. Haluzevyi derzhavnyi arkhiv, Instytut istorii Ukraïny (Natsional'na akademiiâ nauk Ukraïny), Ukraïns'kyi instytut natsional'noi pam'iaty, Служба безпеки України. Галузевий державний архів, Інститут історії України (Національна академія наук України), ve Український інститут національної пам'яті. t.y. *Chornobyl's'ke dos'ie KGB : vid budivnytstva do avarii : zbirnyk dokumentiv pro katastrofu na Chornobyl's'kiï AES*.
- Beresford, Nicholas A., ve David Copplestone. 2011. “Effects of ionizing radiation on wildlife: What knowledge have we gained between the chernobyl and fukushima accidents?” *Integrated Environmental Assessment and Management* 7(3):371-73. doi: 10.1002/ieam.238.
- Bondarkov, Mikhail D., Boris Ya Oskolkov, Sergey P. Gaschak, Sergey I. Kireev, Andrey M. Maksimenko, Nikolai I. Proskura, G. Timothy Jannik, ve Eduardo B. Farfán. 2011. “Environmental radiation monitoring in the Chernobyl Exclusion Zone-history and results 25 years after”. *Health Physics* 101(4):442-85.
- Bugai, Dmitri A., Robert D. Waters, Sergei P. Dzhepo, ve Alexander S. Skalsk'ij. 1997. “The cooling pond of the Chernobyl nuclear power plant: A groundwater remediation case history”. *Water Resources Research* 33(4):677-88. doi: 10.1029/96WR03963.
- Carlson, Tobu N., ve David A. Riziley. 1997. *On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index*.

- Davids, Corine, ve Anthony Doulgeris. 2007. "Unsupervised change detection of multitemporal Landsat imagery to identify changes in land cover following the Chernobyl accident". *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 3486-89. doi: 10.1109/IGARSS.2007.4423597.
- Expert Group "Environment". 2005. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience*.
- Foga, Steve, Pat L. Scaramuzza, Song Guo, Zhe Zhu, Ronald D. Dilley, Tim Beckmann, Gail L. Schmidt, John L. Dwyer, M. Joseph Hughes, ve Brady Laue. 2017. "Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products". *Remote Sensing of Environment* 194:379-90. doi: 10.1016/J.RSE.2017.03.026.
- Gemitzi, Alexandra. 2020. "Are vegetation dynamics impacted from a nuclear disaster? The case of chernobyl using remotely sensed ndvi and land cover data". *Land* 9(11):1-20. doi: 10.3390/land9110433.
- Giannini, M. B., O. R. Belfiore, C. Parente, ve R. Santamaria. 2015. "Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: Comparison of different methods using airborne thermal data". *Journal of Engineering Science and Technology Review* 8(3):83-90. doi: 10.25103/jestr.083.12.
- Gitelson, Anatoly A., Yoram J. Kaufman, Robert Stark, ve Don Rundquist. 2002. "Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction".
- Gómez, Cristina, Joanne C. White, ve Michael A. Wulder. 2016. "Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 116:55-72. doi: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.03.008.
- Gorbachev, Boris I. 2002. *The Causes and Scenario of the Chernobyl Accident, and Radioactive Release on the CHNPP Unit-4 Site*.
- Grigoryeva, I. L., A. B. Komissarov, V. V. Kuzovlev, ve E. A. Chekmareva. 2019. "Influence of Thermal Pollution on the Ecological Conditions in Cooling Reservoirs". *Water Resources* 46:S101-9. doi: 10.1134/S0097807819070091.
- Gudkov, Sergey V., Marina A. Grinberg, Vladimir Sukhov, ve Vladimir Vodeneev. 2019. "Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants". *Journal of Environmental Radioactivity* 202:8-24.
- Hansen, Matthew C., ve Thomas R. Loveland. 2012. "A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data". *Remote Sensing of Environment* 122:66-74. doi: 10.1016/J.RSE.2011.08.024.

- Hardisky, M. A., V. Klemas, ve R. M. Smart. 1983. "The Influence of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on-the Spectral Radiance of *Spartina alterniflora* Canopies".
- Huang, Chang, Yun Chen, Shiqiang Zhang, ve Jianping Wu. 2018. "Detecting, Extracting, and Monitoring Surface Water From Space Using Optical Sensors: A Review". *Reviews of Geophysics* 56(2):333-60. doi: 10.1029/2018RG000598.
- Huete, A. R. 1988. *A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)* 295. C. 25.
- Huete, A. R., H. Q. Liu, ° K Batchily, ve W. Van Leeuwen. 1997. "A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS". *REMOTE SENS. ENVIRON* 5:440-51.
- Hussain, Masroor, Dongmei Chen, Angela Cheng, Hui Wei, ve David Stanley. 2013. "Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 80:91-106. doi: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2013.03.006.
- IAEA. 1991. *Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards*.
- IAEA. 2021. *nuclear-energy-for-a-net-zero-world*.
- Il'in, L. A., N. K. Shandala, E. V. Petukhova, N. Ya. Novikova, Yu. A. Schagin, A. N. Lebedev, D. V. Zavarykin, E. B. Antipin, L. G. Bugaeva, ve A. A. Golovenko. 2004. "Monitoring of radiation hygienic situation in the vicinity of Kalinin nuclear power plant (16 years of operation)". *Meditinskaya Radiologiya I Radiatsionnaya Bezopasnost'* 49(5):14-23.
- International Nuclear Safety Advisory Group. 1992. *THE CHERNOBYL ACCIDENT: UPDATING OF INSAG-1 INSAG-7*.
- Jenner, Lynn. 2020. "Wildfire Breaks Out Near Chernobyl".
- Kalinin NPP. 2014. *ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГООБЛОКОВ № 2, 3 КАЛИНИНСКОЙ АЭС НА МОЩНОСТИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ 104% ОТ НОМИНАЛЬНОЙ*.
- Kaufman, Yoram J., ve Didier Tanré. 1992. "Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(2):261-70. doi: 10.1109/36.134076.

- Kirillin, Georgiy, Tom Shatwell, ve Peter Kasprzak. 2013. "Consequences of thermal pollution from a nuclear plant on lake temperature and mixing regime". *Journal of Hydrology* 496:47-56. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.05.023.
- Korablev, P. N., M. P. Korablev, ve N. P. Korablev. 2011. "The state of predatory mammal populations in the impact zone of the Kalinin Nuclear Power Plant as inferred from their phene pool". *Russian Journal of Ecology* 42(4):288-95. doi: 10.1134/S1067413611040096.
- Lecomte-Pradines, C., C. Adam-Guillermin, S. Gashchak, C. Bradshaw, D. Copplestone, ve N. A. Beresford. 2019. *More than thirty years after the Chernobyl accident: what do we know about the effects of radiation on the environment?*
- Liu, Hui Qing, ve Alfred0 Huete. 1995. *A Feedback Based Modification of the NDVI to Minimize Canopy Background and Atmospheric Noise*. C. 33.
- Lyalko, V. I., A. Ya Hodorovsky, A. I. Sakhatsky, A. T. Azimov, Z. M. Sportjuk, ve O. N. Sibirtseva. 2000. "Satellite Monitoring of Forest of the Chernobyl Disaster Influence Area for Ecological and Fire Risk Assessment". *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII(B7)*:805-12.
- McFeeters, S. K. 1996. "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features". *International Journal of Remote Sensing* 17(7):1425-32. doi: 10.1080/01431169608948714.
- Møller, Anders Pape, ve Timothy A. Mousseau. 2006. "Biological consequences of Chernobyl: 20 years on". *Trends in Ecology and Evolution* 21(4):200-207.
- Møller, Anders Pape, ve Timothy A. Mousseau. 2015. "Strong effects of ionizing radiation from Chernobyl on mutation rates". *Scientific Reports* 5. doi: 10.1038/srep08363.
- Netsvetov, Maksym, Yulia Prokopuk, Dmytrii Holiaka, Marcin Klisz, Annabel J. Porté, Radosław Puchałka, ve Maksym Romensky. 2023. "Is there Chornobyl nuclear accident signature in Scots pine radial growth and its climate sensitivity?" *Science of The Total Environment* 878:163132. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.163132.
- Obyazov, V. A., A. Yu Vinogradov, ve A. V. Kuchmin. 2020. "Assessment of Kalinin NPP Impact on the Thermic Regime of the Cooling Reservoir and on the Littoral Climate". *Atomic Energy* 127(3):174-80. doi: 10.1007/s10512-020-00606-6.
- Obyazov V.A., Vinogradov A.U., ve Kuchmin A.V. 2019. "ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЛИНИНСКОЙ АЭС НА ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ И КЛИМАТ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ". 158-63.

- Raymond Hunt, E., ve Barrett N. Rock. 1989. *Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near-and Middle-Infrared Reflectances*. C. 30.
- Richter, Rudolf, Frank Lehmann, Rupert Haydn, ve Peter Volk. 1986. "Analysis of LANDSAT TM images of chernobyl". *International Journal of Remote Sensing* 7(12):1859-67. doi: 10.1080/014311686008948979.
- Rosenergoatom. 2021. *REPORT on environmental safety for 2020*.
- Rosenergoatom. t.y. *Report on environment safety for 2021*.
- Rouse J.W., Haas R.H., Shell J.A., ve Deering D.W. 1974. "MONITORING VEGETATION SYSTEMS IN THE GREAT PLAINS WITH ERTS".
- SADOWSKI FRANK G., ve COVINGTON STEVEN G. 1987. "Processing and Analysis of Commercial Satellite Image Data of the Nuclear Accident near Chernobyl, U.S.S.R."
- Santos, Pedro, Neftali P. Sillero, Zbyszek Boratyński, ve Ana Claudia M. Teodoro. 2019. "Landscape changes at Chernobyl". S. 70 içinde. SPIE-Intl Soc Optical Eng.
- Shandala, N. K., V. A. Komleva, M. V. Borovkov, E. V. Petukhova, N. Ya. Novikova, L. G. Bugaeva, S. A. Galkin, ve E. G. Metlyaev. 2004. "Pollution of supervised area of Kalinin nuclear power plant by non-radiation components of industrial releases into the atmosphere and discharges of waste waters". *Meditinskaya Radiologiya I Radiatsionnaya Bezopasnost'* 49(6):15-26.
- Singh, Ashbindu. 1989. "Review Article: Digital change detection techniques using remotely-sensed data". *International Journal of Remote Sensing* 10(6):989-1003. doi: 10.1080/01431168908903939.
- Sobrino, José A., Juan C. Jiménez-Muñoz, ve Leonardo Paolini. 2004. "Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5". *Remote Sensing of Environment* 90(4):434-40. doi: 10.1016/j.rse.2004.02.003.
- Tewkesbury, Andrew P., Alexis J. Comber, Nicholas J. Tate, Alistair Lamb, ve Peter F. Fisher. 2015. "A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques". *Remote Sensing of Environment* 160:1-14.
- Wehrden, Henrik von, Joern Fischer, Patric Brandt, Viktoria Wagner, Klaus Kümmerer, Tobias Kuemmerle, Anne Nagel, Oliver Olsson, ve Patrick Hostert. 2012. "Consequences of nuclear accidents for biodiversity and ecosystem services". *Conservation Letters* 5(2):81-89. doi: 10.1111/J.1755-263X.2011.00217.X.

- Weiss, M., F. Jacob, ve G. Duveiller. 2020. "Remote sensing for agricultural applications: A meta-review". *Remote Sensing of Environment* 236. doi: 10.1016/j.rse.2019.111402.
- Xu, Hanqiu. 2006. "Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery". *International Journal of Remote Sensing* 27(14):3025-33. doi: 10.1080/01431160600589179.
- Xue, J., ve B. Su. 2017. "Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications". *Journal of Sensors* 2017. doi: 10.1155/2017/1353691.
- Xue, Jinru, ve Baofeng Su. 2017. "Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications". *Journal of Sensors* 2017.
- Zakharov, A. I. 1999. "On the influence of Chernobyl nuclear disaster on the coniferous forests state in the surrounding area using SIR-C/X SAR data". *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 4:2128-30. doi: 10.1109/igarss.1999.775052.
- Zakharov, A. I., L. Zakharova, V. P. Sinilo, ve M. V. Sorochinsky. 2003. "Monitoring of the Forests State in the Chernobyl Area using Remote Sensing Data". *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 4(August):2474-76. doi: 10.1109/igarss.2003.1294480.
- Zhou, Weifeng, Zhanqiang Li, Shijian Ji, Chengjun Hua, ve Wei Fan. 2015. "A new index model NDVI-MNDWI for water object extraction in hybrid area". Ss. 513-19 içinde *Communications in Computer and Information Science*. C. 482. Springer Verlag.

7. EKLER

Çizelge 7.2. Kalinin NGS' soğutma göllerinin farkı noktalarında 1984-2022 yüzey sıcaklık ölçümleri

	1984,°C	1985,°C	1986,°C	1987,°C	1988,°C	1989,°C	1990,°C	1991,°C	1992,°C
1	7,37	29,85	23,22	20,97	28	28,5	19,7	24,85	30,03
2	8,25	26,43	-	17,92	-	17,54	17,27	20,43	20,28
3	0,19	23,45	24,7	16,18	23,85	23,53	16,03	20,37	22,7
4	-0,82	25,15	24,33	18,21	22	21,51	13,91	18,32	22,53
5	-0,56	25,13	21,6	18,25	23,3	20,06	18,24	18,65	20,5
6	8,38	27,75	19,31	16,53	24,95	23,87	15,3	24,89	22,5
7	10,6	26,42	-	13,63	21,36	20,5	12,56	21,48	21,08
	1993,°C	1994,°C	1995,°C	1996,°C	1997,°C	1998,°C	1999,°C	2000,°C	2001,°C
1	26,17	24,28	29,76	24,72	26,65	28,3	31,24	26,23	25,83
2	17,24	-	25,75	18,92	-	24,58	-	19,51	25,38
3	21,31	19,25	27,74	21,91	23,44	23,07	26,07	20,3	27,46
4	16,01	17,31	26,45	20,85	20,8	13,54	24,38	19,76	21,09
5	15,68	17,65	23,48	20,47	20,9	19,01	24,54	15,85	23,6
6	19,89	20,89	26,58	21,78	22,24	15,91	26,46	21,98	22,01
7	16,52	18,05	23,54	17,91	20,15	20,3	22,79	19,79	23,11
	2002,°C	2003,°C	2004,°C	2005,°C	2006,°C	2007,°C	2008,°C	2009,°C	2010,°C
1	28,42	32,53	29,53	34,64	20,79	26,87	23,37	22,98	33,86
2	19,94	-	23,02	26,96	17,21	-	18,68	3,22	27,81
3	-	29,09	25,3	30,9	29,23	28,37	23,66	25,77	31,7
4	-	30,04	23,51	28,68	23,74	23,1	17,29	22,63	27,94
5	22,47	30,6	22,79	28,93	22,38	23,13	20,1	16,93	28,8
6	25,65	30,89	25,43	31,77	22,06	23,02	18,64	22,13	28,6
7	20,57	29,66	23,98	29,43	22,34	23,46	17,51	20,67	28,12
	2011,°C	2012,°C	2013,°C	2014,°C	2015,°C	2016,°C	2017,°C	2018,°C	2019,°C
1	28,53	25,17	32,16	29,79	27,3	28,21	24,87	28,58	28,67
2	24,06	18,92	-	24,36	22,11	22,62	9,15	23,46	23,89
3	31,6	31,22	30,75	33,26	27,1	31,16	28,07	28,22	30,38
4	25,63	27,55	25,07	27,91	23,88	27,61	22,92	24,87	26,84
5	26,78	26,24	27,62	28,17	25,59	27,83	27,09	25	28,04
6	23,09	14,3	26,08	22,13	22,52	20,37	21,46	24,18	22,65
7	27,16	26,28	27,7	28,94	25,19	28,66	22,89	25,8	26,57
	2020,°C	2021,°C	2022,°C						
1	31,28	24,26	24,26						
2	28,75	26,65	26,7						
3	34,52	33,46	33,5						
4	32,26	29,87	29,9						
5	30,8	29,97	30						
6	29,18	27,45	27,4						
7	32,04	29,73	29,7						

ÖZGEÇMİŞ

ALEKSANDRA MELNIK

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2020-2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Ana Bilim Dalı, Antalya
Lisans 2013-2020	Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Data Processing Specialist	Leading	Silent Wings, Rusya/Moskova
Leading Specialist in non-conformity department 2022-2023	Non- management	Roppuur Nükleer Güç Santrali Rosatom AtomStroyExport, Bangladesh
Radyason Yöneticisi 2021-2022	Güvenliği Grup	Akkuyu Nükleer Güç Santrali Titan Holding, MSU -90, Mersin/ Türkiye

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Bakış, V., Z. Eker, H. Bakış, S. Kayacı, G. Yücel, E. Tunç, Ö. Taşpınar, Y. Yalçın, A. Melnik, and Ç. Esendağlı. 2022. "Orbital Period Changes in IO Cep, IM Cep and TX Ari: Path to Masses of Distant Components." *New Astronomy* 93. doi: 10.1016/j.newast.2021.101754.