

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MISIR VE BUĞDAYIN FENOLOJİK DEVRELERİNİN ZAMAN SERİLİ UYDU
GÖRÜNTÜLERİ VE RANDOM FOREST YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Elifnaz TORUN

TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA ANABİLİM DALI

ANKARA
2024

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MISIR VE BUĞDAYIN FENOLOJİK DEVRELERİNİN ZAMAN SERİLİ UYDU GÖRÜNTÜLERİ VE RANDOM FOREST YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Elifnaz TORUN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. G. Duygu SEMİZ

Bu çalışmada 2016-2023 yıllarında Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Haymana Araştırma ve Uygulama çiftliğinde yetiştirilen silajlık mısır ve buğday bitkilerinin büyüme sezonu başlangıcı, büyüme sezonu sonu ve fenolojik evrelerinin Sentinel-2 uydu görüntülerinin analizinden elde edilen Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü Fark İndeksi (NDVI) oranı ve sıcaklık verileri kullanılarak hesaplanan Kümülatif Büyüme Derece Gün değerleri ile tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada silajlık mısır ve buğday bitkilerinin seçilmesinin önemi: (1) Gıda güvenliği açısından ve iklim değişikliğine olan hassasiyetleri bakımından birçok çalışmaya konu olmuş model bitkiler olmaları, (2) Mısır ve buğdayın belirgin fenolojik özelliklere sahip olması açısından hem yersel gözlemlerle hem de uydu tabanlı indislerle fenolojik evrelerinin nispeten daha kolay tahmin edilebilmesi, (3) Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliğinde mısır ve buğday bitkilerinin belirtilen zaman aralığında kesintisiz olarak yetiştirilmiş ve kayıtlarının geriye dönük olarak güvenilir bir biçimde tutulmuş olması şeklinde sıralanabilmektedir. NDVI zaman serilerindeki gürültülü verileri düzeltmek ve model doğruluğunu artırmak için veri ön işleme adımı Savitzky-Golay algoritması ve Çift Lojistik Fonksiyon kullanılmıştır. Sezon başlangıcı, sonu ve fenolojik evrelerin tahmininde Random Forest algoritması kullanılmıştır. Model sonuçları Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliği kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda silajlık mısır bitkisi için fenolojik evre tahmininin doğruluğu 0.88-1.00 arasında, buğday (sulamaya ve yağışa dayalı yetiştiricilik) bitkisi için ise 0.94-0.99 arasında değiştiği belirlenmiştir.

Mayıs 2024, 123 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bitki fenolojisi, uzaktan algılama, büyüme derece gün, vejetasyon indeksi, NDVI, makine öğrenmesi

ABSTRACT

Master Thesis

MODELING OF PHENOLOGICAL PHASES OF MAIZE AND WHEAT VIA TIME-SERIES SATELLITE IMAGES AND RANDOM FOREST METHOD

Elifnaz TORUN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Agricultural Structures and Irrigation Department

Supervisor: Prof. Dr. G. Duygu SEMİZ

In this study, it was aimed to predict the beginning of the growing season, the end of the growing season and phenological stages of silage maize and wheat plants grown in Ankara University, Faculty of Agriculture, Haymana Research and Application Farm in 2016-2023 with the Normalized Vegetation Difference Index (NDVI) ratio obtained from the analysis of Sentinel-2 satellite images and Cumulative Growth Degree Days values calculated using temperature data. The importance of selecting maize and wheat for silage in the study can be listed as follows: (1) they are model crops that have been the subject of many studies in terms of food security and their sensitivity to climate change, (2) maize and wheat have distinct phenological characteristics and their phenological stages can be predicted relatively more easily with both ground observations and satellite-based indices, (3) maize and wheat crops have been grown continuously in Haymana Research and Application Farm during the specified time interval and their records have been kept reliably retrospectively. Savitzky-Golay algorithm and Double Logistic Function were used in the data preprocessing step to correct the noisy data in NDVI time series and to increase the model accuracy. Random Forest algorithm was used to predict the beginning and end of the season and phenological stages. As a result of the study, it was determined that the accuracy of phenological stage prediction for silage maize ranged between 0.88-1.00 and for wheat (irrigation and rainfall-based cultivation) ranged between 0.94-0.99.

May 2024, 123 pages

Key Words: Plant phenology, remote sensing, growing degree day, vegetation index, NDVI, machine learning

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime başladığım günden beri akademik çalışmalarımı yönlendiren, tez çalışmamın planlanmasında ve araştırılmasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemedi katkıda bulunan, eleştirileriyle beni her zaman düşünmeye ve daha iyisini yapmaya yönlendiren, akademik etiği öğreten, bana her zaman destek olan ve yol gösteren danışman hocam sayın Prof. Dr. G. Duygu SEMİZ'e, çalışmalarım sırasında bana önemli katkılarda bulunan ve yardımlarını esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. Halit APAYDIN'a, bana her zaman destek olan, bilgilerini paylaşan ve yol gösteren hocalarım Dr. Sertan AVCI ve Dr. M. Sevba ÇOLAK'a, her zaman yanımda olan ve desteğini hissettiren arkadaşlarım Araş. Gör. A. Cengiz YILDIRIM'a ve Yük. Zir. Müh. Afshin SHAHBAZI'ye, arazi çalışmalarımı yürütürken her türlü bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan ve desteklerini sunan Zir. Müh. Enes Furkan Coşkunlu'ya ve her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 1002A-Hızlı Destek programı kapsamında “123O795- Mısır ve Buğdayın Fenolojik Evrelerinin Zaman Serili Uydu Görüntüleri ve Büyüme Derece Gün Yaklaşımıyla Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi ve Fenolojik Evrelerin ve Toplam Büyüme Mevsimi Sürelerindeki Zamansal Değişimin İncelenmesi” konulu proje ile desteklenmiştir.

Elifnaz TORUN
Ankara, Mayıs 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iv
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1 Materyal	17
3.1.1 Çalışma alanı	17
3.1.2 Yersel veriler.....	19
3.1.3 Meteorolojik veriler	22
3.1.4 Uydu verileri.....	23
3.2 Yöntem	24
3.2.1 Büyüme derece günlerin (BDG) hesaplanması	24
3.2.2 Fenolojik gelişimin (PD) hesaplanması	25
3.2.3 Termal sezon uzunluğu (TSU) trend analizi.....	26
3.2.4 NDVI zaman serilerinin elde edilmesi.....	27
3.2.5 Veri önileme	29
3.2.5.1 Verilerin düzeltilmesi.....	29
3.2.5.2 Verilerin uyarlanması.....	32
3.2.6 Büyüme sezonu başlangıcı (BSB) ve büyüme sezonu sonunun (BSS) belirlenmesi.....	33
3.2.7 Fenolojik devrelerin Random Forest algoritması ile tahmini.....	33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
4.1 Kümülatif Büyüme Derece Gün Değerleri (KBDG) ve Fenolojik Gelişim (PD).....	35
4.2 Termal Sezon Uzunluğunun (TSU) Trendi	44
4.3 NDVI zaman serileri	46

4.4 Veri önışleme sonuçları	50
4.5 Fenolojik Gelişim (PD) ve NDVI _{oranı} korelasyonu	56
4.6 Büyüme sezonu başlangıcı ve büyüme sezonu sonunun tahmin sonuçları	58
4.7 Fenolojik devrelerin Random Forest ile tahmini	66
5. SONUÇ	73
KAYNAKLAR	77
EKLER.....	85
EK 1 NDVI Haritaları	86
EK 2 Silajlık Mısır Bitkisinin Yıllara göre Fenolojik Evrelerinin Uzunluğu, NDVI Oranı ve KBDG Değerleri.....	89
EK 3 Buğday Bitkisinin Yıllara göre Fenolojik Evrelerinin Uzunluğu, NDVI Oranı ve KBDG Değerleri.....	97
EK 4 2016-2023 Yılları Veri Önışleme Sonucu Oluşturulan NDVI eğrileri.....	110
ÖZGEÇMİŞ.....	121

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AAT	Active Accumulated Temperature- Aktif Birikimli Sıcaklık
AIC	Akaike Information Criterion -Akaike Bilgi Kriterleri
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer- Gelişmiş Çok Yüksek Çözünürlüklü Radyometre
BBCH	Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry
BDG	Büyüme Derece Gün
BIC	Bayesian Information Criterion- Bayesian Bilgi Kriterleri
BISE	Best Index Slope Extraction- En İyi İndeks Eğimi Çıkarma
BSB	Büyüme Sezonu Başlangıcı
BSS	Büyüme Sezonu Sonu
BSU	Büyüme Sezonu Uzunluğu
°C	Santigrat
CO ₂	Karbondioksit
CV	Coefficient of Variance- Varyasyon Katsayısı
da	Dekar
DLF	Double Logistic Function- Çift Lojistik Fonksiyon
ESA	European Space Agency- Avrupa Uzay Ajansı
EVI	Enhanced Vegetation Index- Gelişmiş Bitki Örtüsü İndeksi
GEE	Google Earth Engine
GIMMS	Global Inventory Modeling and Mapping Studies- Küresel Envanter Modelleme ve Haritalama Çalışmaları
HMM	Hidden Markov Models- Saklı Markov Modelleri
KBDG	Kümülatif Büyüme Derece Gün
km	Kilometre
Lowess	Locally Weighted Scatterplot Smoothing- Yerel Ağırlıklı Dağılım Grafiği Düzeltme
LSP	Land Surface Phenology- Arazi Yüzeyi Fenolojisi
LST	Land Surface Temperature- Arazi Yüzeyi Sıcaklığı
LSWI	Land Surface Water Index- Arazi Yüzeyi Su İndeksi

m	Metre
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer- Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer- Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi
MTCI	MERIS Terrestrial Chlorophyll Index -Karasal Klorofil İndeksi
MVI	Mean Value Iteration- Ortalama Değer İterasyonu
nm	Nanometre
NARR	North American Regional Reanalysis- Kuzey Amerika Bölgesel Yeniden Analiz
NASS	USDA National Agricultural Statistics Service- ABD Tarım Bakanlığı Ulusal Tarım İstatistikleri Servisi
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index- Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü Fark İndeksi
NIR	Near Infrared- Yakın Kızılötesi
NOAA	USA National Oceanic and Atmospheric Administration- ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi
PD	Phenological Development- Fenolojik Gelişim
PPI	Plant Phenology Index- Bitki Fenoloji İndeksi
RF	Random Forest
RMSE	Root Mean Square Error- Ortalama Karekök Hatası
SAVI	Soil-adjusted Vegetation Index- Toprak Ayarlı Bitki Örtüsü İndeksi
SNR	Signal-to-noise ratio- Sinyal Gürültü Oranı
SR	Simple Ratio- Basit Oran
SWIR	Short Wave Infrared- Kısa Dalga Kızılötesi
TSF	Two-Step Filtering- İki Adımlı Filtreleme
USDA	United States Department of Agriculture- Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı
VNIR	Visible and Near Infrared- Görünür ve Yakın Kızılötesi
VI	Vegetation Index- Vejetasyon İndeksi
WDRVI	Wide Dynamic Range Vegetation Index- Geniş Dinamik Aralık Vejetasyon İndeksi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Çalışmanın grafik özeti	17
Şekil 3.2 Çalışma alanı.....	18
Şekil 3.3 Çalışma alanı parsellerine ait vektör veriler	29
Şekil 4.1 Silajlık mısır bitkisi 2016-2019 yılları fenolojik evrelerdeki KBDG değerlerinin dağılımı	40
Şekil 4.2 Silajlık mısır bitkisi 2020-2023 yılları fenolojik evrelerdeki KBDG değerlerinin dağılımı	41
Şekil 4.3 Buğday bitkisinin 2016-2020 yılları büyüme sezonları boyunca fenolojik evrelerdeki KBDG değerlerinin dağılımı.....	42
Şekil 4.4 Buğday bitkisinin 2020-2023 yılları büyüme sezonları boyunca fenolojik evrelerdeki KBDG değerlerinin dağılımı.....	43
Şekil 4.5 Silajlık mısır termal sezon uzunluğu trendi	45
Şekil 4.6 Buğday bitkisi termal sezon uzunluğu trendi	46
Şekil 4.7 Silajlık mısır bitkisi 2016-2023 yılları büyüme sezonlarına ait ham NDVI değerleri	46
Şekil 4.8 Buğday bitkisi (sulamaya dayalı yetiştiricilik) 2016-2023 yılları büyüme sezonlarına ait ham NDVI değerleri	47
Şekil 4.9 Buğday bitkisi (yağışa dayalı yetiştiricilik) 2016-2023 yılları büyüme sezonlarına ait ham NDVI değerleri	47
Şekil 4. 10 Silajlık mısır bitkisi 2017 büyüme mevsimi NDVI haritası	48
Şekil 4. 11 Buğday bitkisi (sulamaya dayalı yetiştiricilik) 2017-2018 büyüme mevsimi NDVI haritası	49
Şekil 4.12 Silajlık mısır bitkisi 2022 yılı uyarlanan NDVI zaman serisi eğrisi.....	55
Şekil 4.13 Buğday bitkisi (sulamaya dayalı yetiştiricilik) 2022 yılı uyarlanan NDVI zaman serisi eğrisi	55
Şekil 4.14 Buğday bitkisi (yağışa yetiştiricilik) 2022 yılı uyarlanan NDVI zaman eğrisi	56
Şekil 4.15 Silajlık mısır bitkisi için 2016-2019 yılları BSB ve BSS tahminleri.....	59
Şekil 4.16 Silajlık mısır bitkisi için 2020-2022 yılları BSB ve BSS tahminleri.....	60

Şekil 4.17 Buğday (sulamaya dayalı tarım) bitkisinin 2016-2020 yılları büyüme sezonları boyunca BSB ve BSS tahminleri.....	61
Şekil 4.18 Buğday (sulamaya dayalı tarım) bitkisinin 2020-2023 yılları büyüme sezonları boyunca BSB ve BSS tahminleri.....	62
Şekil 4.19 Buğday (yağışa dayalı tarım) bitkisinin 2016-2020 yılları büyüme sezonları boyunca BSB ve BSS tahminleri.....	63
Şekil 4.20 Buğday (yağışa dayalı tarım) bitkisinin 2020-2023 yılları büyüme sezonları boyunca BSB ve BSS tahminleri.....	64



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Çalışma alanına ait bazı meteorolojik parametrelerin uzun yıllar (1927-2023) ortalaması	19
Çizelge 3.2 Buğday bitkisinin büyüme ve gelişim dönemleri-Zadoks skalası	19
Çizelge 3.3 Mısır bitkisinin büyüme ve gelişme dönemleri (O’Keeffe, 2009).....	20
Çizelge 3.4 Silajlık bitkisinin yıllara göre fenolojik evre tarihleri	21
Çizelge 3.5 Buğday bitkisinin yıllara göre fenolojik evre tarihleri.....	22
Çizelge 3.6 Sentinel-2 uydusu bant özellikleri	23
Çizelge 4.1 Silajlık mısır bitkisi KBDG ve PD değerleri	37
Çizelge 4.2 Buğday bitkisi KBDG ve PD değerleri.....	38
Çizelge 4.3 Mann-Kendall trend analizi sonuçları.....	44
Çizelge 4.4 Silajlık mısır bitkisinin düzeltme algoritmaları performans göstergeleri	50
Çizelge 4.5 Buğday (sulamaya dayalı yetiştiricilik) bitkisi düzeltme algoritmaları performans göstergeleri.....	52
Çizelge 4.6 Buğday (yağışa dayalı yetiştiricilik) bitkisi düzeltme algoritmaları performans göstergeleri.....	52
Çizelge 4.7 Silajlık mısır PD ve NDVIoranı korelasyonu	56
Çizelge 4.8 Buğday (sulamaya dayalı yetiştiricilik) PD ve NDVIoranı korelasyonu.....	57
Çizelge 4.9 Buğday (yağışa dayalı yetiştiricilik) PD ve NDVIoranı korelasyonu	57
Çizelge 4.10 Silajlık mısır bitkisi için model sonuçları	68
Çizelge 4.11 Buğday bitkisi (sulamaya dayalı yetiştiricilik) için model sonuçları	69
Çizelge 4.12 Buğday bitkisi (yağışa dayalı yetiştiricilik) için model sonuçları	71

1. GİRİŞ

Hızla artan dünya nüfusu ve buna bağlı olarak artan gıda talebi, doğal kaynaklar üzerinde ciddi bir baskı yaratmaktadır. Toprak ve su kaynakların bozulma ve tükenme hızı, sürekli artan demografik baskı karşısında hızlanmıştır (Miller-Rushing vd. 2010). Mevcut su kaynaklarının miktar ve kalitesinin azalması, artan sıcaklıklar, ormanların tahribi, çölleşme, toprak erozyonu ve tuzluluk gibi faktörler doğal çevreyi bozarak ülkemizde de olduğu gibi birçok ülkenin gıda güvenliğini ve ekonomik kalkınmasını tehdit etmektedir (Demirbaş ve Aydın, 2020).

Ülkemizin doğal kaynak zenginliği ve artan talebin karşılanmasına yönelik oluşabilecek problemler göz önünde bulundurulduğunda, Türkiye'nin sürdürülebilir bir kaynak geliştirme ve izleme planına ihtiyacı vardır. Bu doğrultuda, mevcut doğal kaynakların haritalanması, izlenmesi ve gelecek senaryolarının tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda tarımsal araştırmalar, tarım sektörünün karşılaştığı zorlukları çözmek için yenilikçi ve güçlü teknolojileri tasarlamak ve uygulamak amacıyla yürütülmektedir (Pakdemirli vd. 2021).

Çeşitli bitki yaşam döngüsü olaylarının zamanlamasının izlenmesini içeren bitki fenolojisi, bitki örtüsü ile çevresel faktörler arasındaki karmaşık etkileşimin anlaşılmasında büyük önem taşımaktadır (Schwartz, 2003). Bitkilerin çiçeklenme, meyve verme ve yapraklanma gibi fenolojik evreleri, iklim koşullarındaki değişikliklere duyarlıdır. Bu evreler, bir bitkinin özellikle iklim değişikliği bağlamında çevresel değişikliklere tepkisinin temel göstergeleridir (Richardson vd. 2013, Zheng ve Zhu, 2017). İklim değişikliğinin yol açtığı sıcaklık ve yağış düzenindeki değişikliklerden kaynaklanan fenolojik değişimlerin, ekosistem dinamikleri, tarımsal üretkenlik ve biyolojik çeşitlilik üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır (Richardson vd. 2018).

Aşırı hava olaylarının artan sıklığı gibi ayırt edici özellikleriyle iklim değişikliği, fenolojik evrelerin zamanlaması ve süresi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, daha yüksek sıcaklıkların tetiklediği erken çiçeklenme zamanları, bitkilerin çiçek açması ile tozlaşma arasında uyumsuzluklara yol açarak tozlaşma başarısını ve ekosistem

sağlığını etkileyebilmektedir. Benzer şekilde, yapraklanma ve meyve verme zamanlarındaki değişiklikler çeşitli hayvanlar için gıda bulunabilirliğini etkileyebilir, böylece daha geniş ekolojik ağlar ve süreçler etkilenebilmektedir (Miller-Rushing vd. 2010). İklim değişikliğinin bitki fenolojisi üzerindeki etkisi, sıcaklık ve yağış modellerindeki değişiklikler nedeniyle fenolojik döngülerde önemli değişiklikler olduğunu gösteren araştırmalarla giderek daha belirgin hale gelmektedir (Cleland vd. 2007).

Fenolojik evrelerin izlenmesine yönelik geleneksel yöntemler, doğruluklarına ve ayrıntılarına rağmen yoğun emek gerektiren ve sınırlı mekânsal kapsama sahip yer tabanlı gözlemlere dayanmaktadır (Schwartz, 2013, Richardson vd. 2018). Ancak uzaktan algılama ve görüntü işleme teknolojilerinin gelişimi ile günümüzde fenoloji çalışmalarında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Tarımda yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüğe sahip uydu verileri kullanılarak elde edilen bilgiler, tarımsal sistemlerin sağlığının belirlenip ölçülebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu tekniklerin kullanımı, tarıma bağlı çevre sorunları azaltılırken üretim kârlarını artıracak yönetim kararlarının hızlı ve verimli bir şekilde alınmasına yardımcı olmaktadır (Piao vd. 2019).

Bitki örtüsü özelliklerini en üst düzeye çıkarmak için elektromanyetik spektrumun iki veya daha fazla bandının matematiksel kombinasyonları olarak tanımlanan Vejetasyon İndeksleri (VI), bitki fenolojisini tahmin etmek için en yaygın kullanılan uzaktan algılama ürünleridir (Zhong vd. 2014, Tsouros vd. 2019, Ibarra vd. 2020, Cong vd. 2021). Bu kapsamda Normalize Edilmiş Vejetatif Değişim İndeksi (NDVI) ve Gelişmiş Vejetasyon İndeksi (EVI) yaygın olarak kullanılan uzaktan algılama tabanlı VI'lardır.

NDVI, yeşil bitki örtüsünün oranını değerlendirerek bitki sağlığına yönelik güvenilir bir ölçü sağlamaktadır. Geniş coğrafi alanlarda bitki örtüsü ve sağlığı hakkında tutarlı ve ölçülebilir veriler sunma yeteneği, NDVI'yı büyük ölçekli ekolojik izlemede önemli bir araç haline getirmektedir (Tucker, 1979).

Uzaktan algılama teknikleri, temel iki fenolojik gösterge olan Büyüme Sezonu Başlangıcı (BSB) ve Büyüme Sezonu Sonunun (BSS) belirlenmesine olanak sağlamaktadır. BSB, uzun bir fotosentetik uyku hali döneminden hemen sonra yeşillenmede keskin bir artış olarak tanımlanmaktadır (White vd. 2009). Sezonun başlangıcı uzaktan algılama ile yaygın olarak NDVI veya EVI eğrilerinin kullanımıyla belirlenebilmektedir. BSB, genellikle VI değerlerinde önemli bir artışın olduğu tarihe işaret etmektedir (Kelsey vd. 2021). BSS ise belirli bitki parametrelerinde belirgin bir düşüş anını göstermektedir. Bu nedenle, uydu verilerine dayalı fenolojik olayları tespit etmeye yönelik yöntemlerin çoğunda çeşitli eşik değerleri kullanılmaktadır (Zanker, 2022).

Bitki fenolojisinde uzaktan algılama yöntemlerinin kullanılmasının temeli, tarım ve çevre bilimi, klimatoloji, uydu görüntüleri ve veri analizi gibi teknolojik alanlar da dahil olmak üzere disiplinlerarası bilimlere dayanmaktadır. Bu bağlamda uzaktan algılamanın avantajı, özellikle küresel iklim değişikliği tehlikesi altında, bitki fenolojisindeki uzun vadeli eğilimlerin ve mekânsal modellerin incelenmesinde gerekli olan tutarlı, uzun vadeli ve büyük ölçekli gözlemleri kolaylaştırma yeteneğidir (Richardson vd. 2013).

Uzaktan algılamanın avantajlarına rağmen, tek başına kullanımı sınırsız değildir. Uydu görüntülerinin uzamsal çözünürlüğü bazen kısa süreli ve keskin geçiş olmayan fenolojik evreleri yakalamak için yetersiz kalabilir böylece belirli fenolojik aşamalar NDVI sinyallerine belirgin bir şekilde yansımaz. Bu nedenle, NDVI zaman serilerinin yer gözlemleriyle entegre edilmesine giderek daha fazla önem verilmektedir. Bu durum, uydu verilerinden türetilen fenolojik ölçümlerin doğrulanmasına ve iyileştirilmesine olanak tanıyarak bitki yaşam döngülerinin daha doğru ve kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır (Keenan ve Richardson, 2015).

Bitki örtüsünün büyümesi ve fenolojisi büyük ölçüde taban (baz) sıcaklığı ve termal birikim tarafından düzenlenmektedir. Büyüme, fotosentez, su ve besin alımı ve taşınması, enzim aktivitesi, diğer biyolojik ve kimyasal aktiviteler gibi bitki fonksiyonları sıcaklığa bağlı olarak gelişmektedir (Howell vd. 1997, Zhou ve Wang, 2018). Bitki fenoloji modelleri, büyüme mevsiminin termal eğilimleri bitki gelişimindeki olaylarla ilişkilendirmektedir (Schwartz vd. 2006, Allen vd. 2020). Bitki modellerinde, fenolojik

evreler kümülatif sıcaklık temelinde simüle edilmektedir (Boschetti vd. 2009, Ruiz ve Ospina, 2016). Bu nedenle, belirli bir taban sıcaklığına dayalı olarak hesaplanan Büyüme Derece Günler (BDG) büyüme mevsimi üzerinde birincil etkilere sahiptir ve son yüzyıldaki önemli sıcaklık değişimleri ile değişiklik gösterebilmektedir (Yin vd. 2019). BDG toplamı hesaplanırken kullanılan baz sıcaklıklar deneysel olarak belirlenmekte ve her bitki türü için farklı değerler almaktadır (Ahrens, 2014).

Büyüme mevsimi başlangıç tarihi ve uzunluğu, farklı iklim bölgeleri arasında büyük farklılıklar gösterebilir. Mevsimden mevsime değişkenlik, sıcaklık farklılıklarından dolayı bitki büyüme evreleri tarihlerinin önemli ölçüde farklılık göstermesine de neden olabilir. Bu nedenle bitki gelişimi, takvim günlerinden çok bitkinin maruz kaldığı ısı miktarı ile daha yakından ilişkilidir (Zanker, 2022). BDG yaklaşımı ile zaman içinde sıcaklık verilerinin toplanması sonucunda fenolojik olayların zamanlaması tahmin edilebilmektedir. Ancak, BDG tek başına bitki büyümesini etkileyen tüm çevresel faktörleri kapsamayabilir.

BDG'yi, NDVI ve yer gözlemleriyle entegre etmek, fenolojik değerlendirmeye çok yönlü bir yaklaşım sunarak sıcaklığa dayalı büyüme modellerini, gözlemlenebilir bitkisel değişikliklerle ilişkilendirmeye olanak sağlamaktadır. Bu kombinasyon, uzaktan algılamanın mekânsal ve zamansal çözünürlüğünü BDG modelinin sıcaklık hassasiyetiyle bütünleştirmektedir. Böylece fenolojik evre tahmininin doğruluğu artmakta ve bitki-çevre etkileşimlerinin değerlendirilmesinde daha geniş bir kapsam elde edilmektedir (Zhang vd. 2009, Mfuka, 2019).

Bu çalışmada, 2016-2023 yılları arasında Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliğinde yetiştirilen silajlık mısır ve buğday bitkileri için Sentinel-2 uydu görüntülerinden elde edilen NDVI zaman serilerinden türetilen NDVI oranı ve meteorolojik veriler ile hesaplanan BDG'lerden yararlanarak temel bitki fenoloji parametrelerinin Random Forest (RF) algoritması ile tahmin edilmesi ve yer verileri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Boschetti vd. (2009) çalışmalarında Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi (MODIS) NDVI 16 günlük kompozitlerin 5 yıllık (2001-2005) zaman serisini, sezon başlangıcı (BSB), sezon zirvesi ve sezon sonu (BSS) gibi temel fenolojik bilgileri otomatik olarak elde etmek için TIMESAT programı ile analiz etmiştir. Çalışmada uzaktan algılama tahminleri, çiftçilerden elde edilen ekim-hasat tarihleri gibi verilerle karşılaştırılmıştır. Uydulardan elde edilen tahminler ile termal birim birikimine dayalı geleneksel BDG yöntemiyle üretilen tahminler arasında iyi bir korelasyon ($R^2 = 0.92$) gözlenmiştir. Uzaktan algılama ve BDG yöntemlerini entegre eden bir prosedür kullanılarak BSS'ye ilişkin iyileştirilmiş tahminlerin elde edilebileceği bildirilmiştir.

Sakamoto vd. (2010) yaptıkları çalışmada, uzaktan algılama verileri ile bitki fenolojik evrelerinin tespit edilmesinde tahmin doğruluğunu artırmaya odaklanmışlardır. Çalışmalarının temel amacı, MODIS sensöründen elde edilen Geniş Dinamik Aralık Bitki Örtüsü İndeksi (WDRVI) verilerinin zaman serisi analizi yoluyla mısır ve soya fasulyesi bitkilerinin temel fenolojik evrelerini belirlemek için İki Adımlı Filtreleme (TSF) yöntemi olarak adlandırılan bir yöntem geliştirmektir. Bu yöntem, WDRVI verilerinin dalgacık tabanlı bir filtre kullanılarak düzgünleştirilmesini ve ardından bitkilerin fenolojik evrelerini belirlemek için bu düzgünleştirilmiş verilerle bir model geliştirilmesini içermektedir. Çalışmada TSF yöntemi, Nebraska'da iki sulamaya dayalı tarım alanı ve bir yağışa dayalı tarım alanı için altı yıl boyunca (2003-2008) MODIS verilerinden türetilen WDRVI verilerine uygulanmıştır. Sonuçlar yersel gözlemler ile doğrulanmış ve mısır ve soya fasulyesinin temel fenolojik evrelerini tahmin etmede yüksek doğruluk göstermiştir. Mısır bitkisi fenolojik evre tahmini için ortalama karekök hatası (RMSE) 2.9 ila 7.0 gün arasında ve soya fasulyesi için ise 3.2 ila 6.9 gün arasında değişiklik göstermiştir.

Atkins vd. (2012), çalışmalarında bitki örtüsü fenolojik parametrelerini tahmin etmek amacıyla kullanılan zaman serisi verilerini düzeltmek için kullanılan algoritmaların performansını karşılaştırmıştır. Bu kapsamda, Fourier analizi, asimetrik Gauss modeli, çift lojistik model ve Whittaker filtresi kullanılmıştır. Araştırmada, Hindistan alt kıtasını

kapsayan sekiz günlük aralıklarla birleştirilmiş 2004-2006 yılları arasındaki Seviye 3 Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi (MERIS) Karasal Klorofil İndeksi (MTCI) verileri kullanılmıştır. Kullanılan algoritmalara göre oluşturulan dört model Hindistan'daki başlıca bitki örtüsü türlerinin temsili örnek zaman serilerine uyarlanmış ve uyumun kalitesi analiz edilmiştir. Düzeltilmiş veriler, önemli bir fenolojik parametre olan büyüme mevsim başlangıcı tahmin etmek için kullanılmıştır. Modeller RMSE, Akaike Bilgi Kriterleri (AIC) ve Bayesian Bilgi Kriterleri (BIC) kullanılarak değerlendirilmiştir. Çift lojistik ve asimetrik Gauss modellerin, yılda birden fazla büyüme mevsimi olan alanlar için iyi performans göstermediği bildirilmiştir. Bu modellerden elde edilen yeşilliğin başlangıcındaki ortalama mutlak sapma, kuru yaprak döken bitki örtüsü tipinde en yüksek (3 ila 4 hafta) ve yaprak dökmeyen bitki örtüsünde en düşük (1 hafta) değerlerde bulunmuştur. Tüm tekniklerin Hindistan'ın tropikal iklimle karakterize edilen güneybatı ve kuzeydoğu bölgelerinde tutarlı sonuçlar verdiği bildirilmiştir.

Vrieling vd. (2013) yaptıkları çalışmada ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (NOAA) Gelişmiş Çok Yüksek Çözünürlüklü Radyometre (AVHRR) sensörlerinden alınan 30 yıllık NDVI verilerini kullanarak Afrika'daki büyüme döneminin uzunluğunu analiz etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, Küresel Envanter Modelleme ve Haritalama Çalışmaları (GIMMS) NDVI veri seti kullanılmıştır. Çalışmada NDVI eşik değerleri, büyüme sezonu başlangıcı için yıllık en yüksek NDVI ve büyüme sezonu sonu için en düşük NDVI değerlerinin ortalamasına ayarlanmıştır. NDVI değeri bu eşik değerlerini geçtiğinde sezon başlangıcı ve sonu belirlenmiştir. Çalışmada, Spearman korelasyon katsayısı kullanılarak her piksel için zamansal ortalama büyüme sezonu uzunluğu değişkenliği ve eğilimleri hesaplanmış ve $p < 0.05$ ve $p < 0.010$ 'da önemli eğilimler belirlendiği bildirilmiştir.

You vd. (2013) yaptıkları çalışmada, Çin'deki 43 farklı tarım alanı için BSB ve BSS'yi belirlemek için uydu verileri ile bitki fenolojisi yönelik yapılan çalışmalarda kullanılan eşik değerlerini tanımlamak için yeni bir yöntem kullanılmıştır. Yöntemde, 8 km uzamsal çözünürlüğe ve 15 günlük zamansal çözünürlüğe sahip 2000-2003 NOAA AVHRR uydu verileri kullanılmıştır. Veri ön işleme aşamasından sonra NDVI için zaman serileri (N), NDVI eğrisinin eğimi (S) ve NDVI değeri ile karsız çıplak arazi için temel NDVI değeri

arasındaki fark (D) oluşturulmuştur. Her bölge için, uzaktan algılama verilerine ve 261 tarımsal meteoroloji istasyonunda 2003 yılına ait gözlemlenen BSB ve BSS verilerine dayanarak N, D ve S için optimum eşik değerleri kümesi belirlenmiş ve sonuçlar, önerilen yeni NDS eşik yönteminin doğruluğu ile uzaktan algılama verileriyle BSB ve BSS tespiti için diğer üç yöntemin sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Dört yöntemin de bulguları, 110 tarımsal meteoroloji istasyonu için 2000'den 2002'ye kadar BSB / BSS verileriyle karşılaştırılmıştır. Araştırma bulgularının, geliştirilen NDS eşik yönteminin diğer yöntemlere kıyasla anlamlı derecede daha yüksek bir doğruluğa sahip olduğunu gösterdiği bildirilmiştir.

Liu ve Zhan (2016) yaptıkları çalışmada Çin'in Shaanxi bölgesindeki tarım alanları için uydu görüntülerinden elde edilen VI'lar ile bitki fenolojisini tahmin etmişlerdir. Çalışmada uydu görüntülerinden oluşturulan zaman serilerinin düzeltilmesinde Savitzky-Golay filtresi ve Çift Lojistik Fonksiyon (DLF) algoritmaları kullanılmış ve bu algoritmaların performansı da değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan iki yöntemden elde edilen bitki fenolojisi ile yer gözlemleri arasındaki hatalar 10 günden fazla bulunmuştur. Kullanılan yöntemlerden Savitzky-Golay filtresinin, oluşturulan zaman serilerinde daha fazla ayrıntıyı koruyabildiği, DLF'nin ise bitki dinamiklerinin genel eğilimini tanımlamada daha iyi sonuç verdiği bildirilmiştir.

Liu vd. (2016) yaptıkları çalışmada, Kuzey Amerika'daki 14 yaprak dökmeyen iğne yapraklı orman alanındaki 107 saha yıllık CO₂ akışı verilerini kullanarak, MODIS verilerine dayalı olarak BSB ve BSS'yi tahmin etmek için bir model geliştirmiştir. Araştırmacılar, NDVI ve EVI dahil olmak üzere yaygın olarak kullanılan VI'ların, bu orman alanında BSB ve BSS tarihlerini tahmin etmede başarılı sonuçlar vermediğini belirtmiştir. Çalışma bulgularında, MODIS arazi yüzey sıcaklığı (LST) tahminlerinin, BSB tahmininde tek bir VI'ya göre daha iyi performans gösterdiği ve varyasyon katsayısı (CV) ile ifade edilen LST'nin değişkenliğinin (CV_LST), orman arazi yüzeyi fenolojisindeki (LSP) değişiklikleri tespit etmede LST'nin kendisinden daha faydalı olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle, VI ve CV_LST'nin çarpımını kullanan yeni bir model geliştirilerek ve BSB ve BSS için sırasıyla 11.7 ve 5.6 günlük ortalama hatalarla LSP'nin temsili önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Araştırmacılar, sıcaklık değişkenliğinin fenolojik

modellemede gözden kaçırılan bir rol oynadığını ve gölgelik yeşilliği ile sıcaklığın bir kombinasyonunun, gelecekteki ekosistem modellerinin yaprak orman fenolojisinin tahminini geliştirmenin yararlı bir yolu olabileceğini bildirmişlerdir.

Ren vd. (2017) yaptıkları çalışmada, 2007-2015 yılları arasında ABD'nin Orta Batı bölgesindeki bitki fenolojisini tespit etmek için 16 günlük MODIS EVI zaman serisi verilerini kullanmıştır. Araştırmada, mısır ve soya fasulyesi için temel bitki fenolojisi ölçümleri, BSB ve BSS değerleri tahmin edilmiştir. Araştırma alanı gibi geniş ölçekli bölgeler için MODIS verileri ile tahmin edilen BSB ve BSS değerlerinin büyük ölçüde zaman serisi verilerinin doğasına, analitik yöntemlere ve bitki fenolojisi tespiti için seçilen eşik değerlerine bağlı olduğunu tespit edilmiştir. Girdi olarak tüm MODIS EVI zaman serisi verileri dizisi kullanıldığında, BSB değerlerinin, ABD Tarım Bakanlığı (USDA) bitki gelişim raporlarından alınan çimlenme-çıkış tarihleriyle karşılaştırıldığında tutarsız olduğu ancak kar örtüsünün etkilerini azaltmak için kış mevsimi EVI görüntüleri zaman serisi verilerinden çıkarıldığında çok daha tutarlı BSB tahmininin elde edildiği bildirilmiştir. MODIS EVI zaman serilerinin düzgünleştirilmesi için Savitzky-Golay filtresi kullanılmıştır. Hem mısır hem de soya fasulyesinin BSB tahmini için %25'lik bir eşik değerinin bitki gelişim raporlarından alınan tarihler ile en iyi genel uyumu oluşturduğu bulunmuştur. BSB tahmini için RMSE değerleri mısır ve soya fasulyesi için sırasıyla 4.81 ve 5.30 gün olarak bulunmuştur. Mısır bitkisi BSS tahmini için alınan %40'lık eşik değeri için R^2 değeri 0.82, RMSE ise 5.16 gün olarak bulunmuştur. Orta Batı ABD'nin güney bölgesinin daha erken BSB ve BSS tarihlerine sahip olduğu rapor edilmiştir.

Zheng ve Zhu (2017) yaptıkları çalışmada Tibet Platosundaki mera alanları için MODIS C5 ve C6 verilerinden türetilmiş NDVI zaman serileri ile belirlenen bitki fenolojisinin (sezon başlangıcı (BSB) ve sezon sonu (BSS)) karşılaştırmalı analizini gerçekleştirmiştir. Çalışma bulgularında bölgesel ortalama BSBC5/BSBC6 ve BSSC5/BSSC6 değerlerinin yıllar arasında tutarlı farklılıklar gösterdiği ve bu değerler arasındaki eğilimlerde büyük mekânsal farklılıkların bulunduğu belirtilmiştir. Çalışmada, uydu verilerinden türetilen bitki fenolojisi yersel gözlemlerle karşılaştırılmış ve BSBC5'in, yersel gözlemlerden elde edilen yeşillenme tarihlerinde BSBC6'dan daha tutarlı olduğu bulunmuştur. C5

verilerinde türetilmiş NDVI değerlerinin, çalışma alanında BSB'nin izlenmesi için C6 NDVI değerlerinden daha uygun olduğu ancak bunu doğrulamak için daha fazla yersel gözlemler ile oluşturulmuş fenolojik kayıtlara ihtiyaç duyulduğu bildirilmiştir.

Çiçek ve Kurucu (2018) yaptıkları çalışmada çoklu bant görüntülerinden yararlanarak Orta Anadolu'da yaygın olarak yetiştirilen bitki türlerinden pancar ve patates bitkilerinin fenolojik evreleri boyunca yaptıkları yansıma değerlerini belirlemiştir. Çalışmada, veri alınan uyduya bağlı olarak görüntü alma sıklığı arttıkça ekimden sonraki süreçte sulama, gübreleme vb. tarımsal uygulamaların spektral yansıma ile ilişkilerinin belirlenebilirliğinin arttığı bildirilmiştir. Çalışma ile oluşturulan fenolojik evrelerdeki bitki türü bazlı spektral yansıma değerlerinden bir referans katalog değeri oluşturulması, parsel düzeyinde bitki çeşitlerinin kayıt altına alınması ve izlenmesi amaçlanmıştır.

Testa vd. (2018) çalışmalarında MODIS verilerinden elde edilen EVI, NDVI ve WDRVI'yı kullanarak oluşturduğu zaman serilerinden yararlanarak 50 orman arazisi için 2001-2012 yılları arasında büyüme mevsimi başlangıcı ve büyüme mevsimi sonu tarihlerini tahmin etmiştir. Çalışmada MOD09GQ/MOD09GA ürünlerinden elde edilen günlük yansıma ve 2001-2012 yılları için MOD13Q1 veri setinden elde edilen 16 günlük kompozit VI'lar kullanılmıştır. Çalışmada, zaman serilerinde çeşitli faktörler (bulut, kar, yansımalar vb.) nedeniyle oluşan gürültülü verileri elimine etmek için veri düzgünleştirme yöntemi uygulanmış ve bu şekilde zaman serilerindeki eğilimleri görmek adına daha sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada uydu görüntülerinden elde edilen VI'ları analiz ederek elde edilen mevsim başlangıcı ve sonu değerleri yer gözlemleri ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Düzgünleştirme algoritması uygulanan zaman serisi değerlerinin yer gözlemleri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği bildirilmiştir.

Tunca vd. (2018) yaptıkları çalışmada, uzaktan algılama teknikleri kullanılarak ayçiçeği bitkisinin büyüme dönemi boyunca spektral yansıma oranlarındaki değişiklikleri değerlendirmek ve bu ölçümlerin tarımsal izleme için kullanılma potansiyelini araştırmayı hedeflemiştir. Çalışma Amasya ili Merzifon ilçesindeki ayçiçeği tarlalarında yürütülmüştür. Spektral yansıma ölçümleri, 2016 yılı büyüme mevsimi boyunca ayçiçeği bitkisinin farklı büyüme evrelerinde bir spektrometre kullanılarak yapılmıştır.

Yapılan ölçümler NDVI, Toprak Ayarlı Bitki Örtüsü İndeksi (SAVI) ve Basit Oran (SR) gibi çeşitli indeksler kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma bulguları, spektral yansım oranlarının büyüme mevsimi boyunca bitki örtüsü miktarı ve büyüme seviyesi gibi faktörlerden etkilenecek önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Bu değişimlerin NDVI, SAVI ve SR endeksleri ile etkili bir şekilde belirlendiği bildirilmiştir.

Çiçek (2019) yaptığı çalışmada Ankara ili Haymana ilçesi ve Kayseri ili Bünyan ilçesinde yaygın olarak tarımı yapılan buğday, arpa, patates, nohut, pancar, kabak, mısır, yulaf, çavdar, yonca bitkilerinin ekili alan ve gelişme durumlarının uydu görüntülerinden izlenebilmesi için bitkilerin fenolojik evreleri boyunca yaptıkları yansımaları belirlenmeyi amaçlamıştır. Çalışmada Landsat-8 ve Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Uydu görüntülerinden elde edilen yansım değerleri AgroVisio uygulaması kullanılarak İç Anadolu Bölgesinde yaygın olarak tarımı yapılan bitki türleri için bir referans katalog değeri oluşturmak amacıyla kullanılmıştır.

Ghamghami vd. (2019) yaptıkları çalışmada İran'ın Karaj şehrinde bulunan mısır tarlasında çimlenme- çıkıştan fizyolojik oluma kadar olan fenolojik evrelerini belirlemek amacıyla kümülatif büyüme derece gün (KBDG) değeri, veri madenciliği ve uzaktan algılama teknolojilerini kullanmıştır. Çalışmada, veri madenciliği aşamasında karar ağaçlarını oluşturmak amacıyla KBDG değeri ve Landsat-7 uydu görüntülerinden oluşturulmuş NDVI değeri kullanılmıştır. NDVI zaman serilerindeki gürültülü verileri filtrelemek amacıyla DLF algoritması kullanılmıştır. Mısır bitkisinin fenolojik evrelerinin başlangıcına dair tahminlerde C5.0 veri madenciliği algoritması sonuçlarına ilişkin ortalama mutlak hata değeri yaklaşık olarak 2.6-5.3 gün, KBDG modeli için ise 3.9-10.7 gün olarak bildirilmiştir.

Huang vd. (2019) yaptıkları çalışmada, dinamik eşik yöntemine dayalı olarak belirlenen bitki fenolojisi doğruluğunu araştırmıştır. Çalışmada farklı bitkiler için BSB ve BSS tahminlerinde kullanılacak eşik değeri bitkiye özgü olacak şekilde yer gözlemlerine bağlı olarak belirlenmiş ve uydu verileri tabanlı tahminlerin doğruluğu karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda NDVI ve EVI tabanlı tahminlerin doğruluğu analiz edilmiştir. Referans yersel gözlem verileri 2015 ve 2016 yıllarında pirinç, buğday ve mısır bitkilerinin BSB

ve BSS değerlerini içermektedir. Çalışma bulgularında değiştirilmiş dinamik eşik yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği ve yaygın olarak kullanılan %20 ve %50 eşik değerlerinin tüm bitkiler için optimal olmadığı vurgulanmıştır. Pirinç bitkisi için EVI tabanlı BSB tahminlerinin doğruluğunun, NDVI tabanlı olan tahminler ile karşılaştırıldığında genellikle daha yüksek olduğu ancak mısır için NDVI tabanlı tahminlerin daha yüksek doğruluk sağladığı bildirilmiştir. BSS açısından, pirinç ve mısır bitkileri için EVI tabanlı tahminlerin daha yüksek doğrulukla sonuç verdiği ancak buğday için NDVI tabanlı tahminlerin yersel veriler ile daha tutarlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Karkauskaite vd. (2019) yaptıkları çalışmada iklim değişikliği ile bitki fenolojisinin ilişkisini ortaya koyabilmek amacıyla Kuzey Yarımküre orman alanlarında MODIS verilerini kullanarak BSB'yi tahmin etmiştir. Çalışmada Bitki Fenoloji İndeksi (PPI), NDVI ve EVI kullanılmıştır. PPI, NDVI ve EVI'dan türetilen büyüme mevsimi başlangıcı değerleri arasındaki mekânsal- zamansal ilişkiler incelenmiştir. Çalışma sonucunda PPI değerlerinin NDVI ve EVI değerlerine göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğu ve Kuzey Yarımkürede büyüme mevsimi başlangıcı tarihlerinin erken tarihlerde başlamaya yönelik bir trendde olduğu bildirilmiştir.

Kaya ve Polat (2019) yaptıkları çalışmada Şanlıurfa ilinin Ceylanpınar ilçesinde ardışık iki büyüme mevsimi için Landsat-8 ve Sentinel-2 uydu görüntülerinden oluşturulan NDVI değerleri ile buğday bitkisinin fenolojik evreleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda NDVI değerlerindeki değişimlerin yer gözlemleri ile belirlenen bitki fenoloji evreleri ile uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir.

Narin (2019) yaptığı çalışmada Sentinel-2 uydu görüntülerinin kullanımı ile elde edilen VI'lar ile ayçiçeği bitkisinin fenolojik evrelerini Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry (BBCH) kod ölçeğinde incelemeyi ve verim tahmini yapmayı amaçlamıştır. Çalışma sonuçları istatistiksel olarak karesel ortalama hata ile değerlendirilmiş ve ayçiçeği bitkisinin fenolojik evrelerinin belirlenmesinde en yüksek doğruluk çiçek tablası oluşumu evresinde elde edilmiştir. Ayrıca Narin (2019), çalışmasında Sentinel-2 uydu verilerinin ayçiçeği bitkisinin fenolojik evrelerinin

izlenmesinde ve güvenilirliği yüksek oranda verim tahmini yapılmasında kullanılabileceğini öne sürmüştür.

Yin vd. (2019), çalışmalarında 1960-2011 yılları arasında Çin'deki BDG ve büyüme sezonu değerlerini, bitki örtüsü büyümesi için üç temel baz sıcaklık değeri için 0, 5 ve 10 °C'ı seçerek, homojenleştirilmiş günlük ortalama sıcaklıklara sahip 536 meteoroloji istasyonu verilerine dayalı olarak geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışma bulguları hem BDG hem de büyüme sezonunun yıllık ortalama sıcaklığa karşı pozitif duyarlılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, BSB'nin 4.86-6.71 gün ilerlediği, BSS'nin 4.32-6.19 gün geciktiği ve seçilen baz sıcaklığa bağlı olarak 1960-2011 döneminde Çin'de büyüme sezonunun 10.76-11.02 gün uzadığı bildirilmiştir. BDG değerlerinin tutarlı bir şekilde, 52 yıl boyunca toplam 218.92-339.40 °C derece gün arttığı ve bu artış eğilimlerinin daha düşük baz sıcaklığa dayalı olan tahminlerde daha belirgin olduğu bildirilmiştir.

Yücel vd. (2019) ülkemizde yaygın olarak yetiştirilen sebze türlerinden domates bitkisinin BDG değerlerinin modellenmesi konusunda Çukurova bölgesinde bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada domates bitkisinin her fenolojik evresine ait BDG değerleri hesaplanmış, bu değerlerin sıcaklık ve yağış ile ilişkisi irdelenmiştir. BDG değerleri açısından Mersin ilinin, Çukurova bölgesi genelinde domates yetiştiriciliğinde daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada domates bitkisinin fenolojik evreleri için seçilen temel (baz) sıcaklık değerlerine göre çoklu doğrusal olmayan regresyon denklemleri türetilmiş ve bu denklemlerin kullanımı ile domates bitkisinin gelişimi ve fenolojik evreleri hakkında önceden bilgi sahibi olunacağı bildirilmiştir.

Qian vd. (2019) yaptıkları çalışmada Iowa'da aynı fenolojik evredeki mısır bitkilerinin büyüme koşullarını değerlendirmek için uzaktan algılama verileri ve meteorolojik verilerin birleşimini içeren bir yaklaşım önermiştir. Çalışmada NDVI zaman serileri ve aktif birikimli sıcaklık (AAT) değerleri kullanılmıştır. Uydu görüntüleri, bulutluluk ve atmosferik yansılardan etkilenebileceği için gürültülü verileri elimine etmek adına çalışmaya konu olan 11 yıllık mısır bitkisi büyüme mevsimi için elde edilen NDVI zaman serileri Savitzky-Golay filtresi ve en iyi indeks eğimi çıkarma (BISE) yöntemleri ile yeniden oluşturulmuştur. Önerilen yöntem sadece bitki büyüme koşuluna yönelik değil

aynı zaman bitki fenolojisine dair de bilgi sağlamaktadır. Bu nedenle çalışma sonucunda potansiyel olarak NDVI ve AAT verilerinin kullanımının bitki fenolojisindeki değişiklikleri ölçebileceği ve verim tahmini iyileştirmeye yardımcı olabileceği bildirilmiştir.

Diao (2020) yaptığı çalışmada, uydu tabanlı fenolojik ölçümler ile yersel bitki büyüme gözlemleri arasındaki boşluğu doldurmayı amaçlamıştır. Çalışmanın yöntemi, bu kapsamda üç temel bileşenden oluşmaktadır: Zaman serisine dayalı fenolojik ön işleme, modelleme ve karakterizasyon. Bu yöntem, 2002'den 2017'ye kadar MODIS uydu verilerine ve yer tabanlı gözlemlere uygulanmıştır. Sonuçlar, uzaktan algılanan veriler ile yer tabanlı gözlemler arasında önemli bir korelasyon olduğunu, R^2 değerlerinin 0.6'dan büyük ve RMSE'nin çoğu aşama için bir haftadan az olduğunu göstermiştir. Diao (2020), mısır ve soya fasulyesinin çimlenme-çıkış, fizyolojik olum gibi çeşitli fenolojik evrelerinin belirlenmesinde uzaktan algılama tabanlı yöntemlerin yüksek düzeyde doğruluğa sahip olduğunu bildirmiştir.

Ibarra vd. (2020) çalışmalarında geniş alanlarda mısır bitkisinin fenolojik gelişimini izlemek için yersel gözlemler ile uzaktan algılama verilerinin birleşimini içeren bir metodoloji önermiştir. Önerilen metodolojinin doğruluğu için fenolojik gelişim (PD) ile VI'lar (NDVI ve EVI) arasında istatistiksel analizler yapılmıştır. Yer gözlemleri ile belirlenen PD ile VI'lara bağlı olarak tahmin edilen PD, RMSE ile değerlendirilmiştir. Sonuçların, NDVI için 0.9154 R^2 ve 0.1307 RMSE ve EVI için 0.9124 R^2 ve 0.1219 RMSE değerleri ile kabul edilebilir bir korelasyon gösterdiği rapor edilmiştir. Ayrıca Ibarra vd. (2020) çalışma sonucunda VI'lar ile fenolojik evreleri izleme hassasiyetinin %92'den fazla olduğunu bildirmiştir.

Shen vd. (2020) yaptıkları çalışmada bitki örtüsünün, sonraki ilkbahar fenolojisini etkilemesi muhtemel kritik bir biyotik faktör olan sonbahar fenolojisine odaklanmıştır. Çalışmada, 1982'den 2015'e kadar olan dönemde GIMMS NDVI veri setinden alınan BSB ve BSS verilerini kullanarak, kuzey orta ve yüksek enlemlerde BSS ile bir sonraki yıl BSB arasındaki ilişki incelenmiştir. BSB'deki yıllar arası değişikliklerin, çoğunlukla Kuzey orman alanlarında olmak üzere toplam piksellerin %26.4'ünde bir önceki yıl

BSS'deki değişikliklerle önemli ölçüde ($p < 0.05$) ilişkili bulunduğu ve BSS'deki 1 günlük ilerlemenin genellikle takip eden BSB'deki yaklaşık 0.5 ila 1.0 günlük ilerleme ile sonuçlandığı bildirilmiştir.

Evans ve Shen (2021) çalışmalarında buğday bitkisinde verim tahmini için uzaktan algılanan fenoloji, iklim verileri ve makine öğreniminin kullanımını araştırmıştır. Çalışmada Landsat NDVI zaman serilerinden fenolojik olayların zamanlamasını belirlemek, fenolojik ve mevsimsel iklim metriklerini türetmek için mekânsal ağırlıklı büyüme eğrisi tahmini kullanılmıştır. Çalışmada 2003-2019 yılları arasında metrikler ve verim arasındaki ilişkiler araştırılmış ve verimi tahmin etmek için altı istatistiksel ve makine öğrenimi modelini karşılaştırılmıştır. Fenolojik metrikler BSB, BSS ve sezon zirvesi olarak tanımlanmıştır. BSB ve BSS, ağırlıklı büyüme eğrisinde NDVI'nın en düşük NDVI'dan %20 daha yüksek olduğu günler ve sezonun zirvesi ise en yüksek NDVI değerinin görüldüğü gün olarak belirlenmiştir. Sadece fenolojik ölçütleri kullanan doğrusal karma modelin, mevsimsel iklim ölçütlerini de kullanan doğrusal olmayan modellere benzer performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Landsat NDVI zaman serileri ile uzaktan algılanan fenoloji, iklim verileri ve makine öğrenmesi kullanılarak buğday bitkisinin fenolojisinin ve veriminin uzun vadeli tahminlerinin üretilebileceği bildirilmiştir.

Löw vd. (2021) yaptıkları çalışmada Sentinel-1 Sentetik Açıklıklı Radarın (SAR) buğday, şekerpancarı ve kanola bitkilerinin fenolojik evrelerini belirleme potansiyelini araştırmıştır. Çalışmada 2017 büyüme sezonu boyunca elde edilen interferometrik (InSAR) ve polarimetrik (PolSAR) özelliklerden oluşturulan zaman serisi kullanılmıştır. Oluşturulan zaman serisindeki kırılma noktaları ve ekstrem değerler fenolojik evrelerin ayırt edilmesini sağlamıştır. Şekerpancarı, buğday ve kanola bitkilerinin fenolojik evrelerinin yer gözlemleri ile belirlenmesinde BBCH ölçeği kullanılmıştır. Yer gözlemleri ve zaman serilerine dayalı tahminler arasında sıfır ila beş gün arasında değişiklik gözlenmiştir. Çalışma sonuçlarına dayanarak PolSAR ve InSAR özelliklerinin birleştirilmesinin fenoloji tahminlerinde faydalı sonuçlar verdiği bildirilmiştir.

Zhang ve Li (2021) yaptıkları çalışmada 2013-2019 yılları arasında Çin'in Yunnan Bölgesinde bulunan orman arazileri için büyüme mevsiminin başlangıcını tahmin etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada belirtilen zaman aralığına ait mevcut tüm Landsat ve Sentinel-2 uydu verileri kullanılmıştır. Uydu görüntülerinden elde edilen farklı indekslerin (EVI, NDVI, LSWI) doğruluk potansiyelini belirlemek adına lojistik regresyon modeli kullanılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar doğrultusunda EVI'nın daha düşük tutarlılık gösterdiği ve 2013-2019 yılları arasında büyüme mevsiminin başlangıcı tahmininde bu üç indekse göre elde edilen sonuçların ortalama ± 4 gün değiştiği bildirilmiştir.

Diao ve Li (2022), çalışmalarında sensör ve toprak bazlı bitki fenolojik karakterizasyonlarını bağdaştırmak için yüzeye yakın PhenoCams ve yüksek çözünürlüklü PlanetScope NDVI zaman serilerini sistematik olarak değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada iki kritik bitki fenolojik evresi çimlenme-çıkış ve fizyolojik olum kullanarak, ABD'deki çeşitli tarım alanları için hem PhenoCam hem de PlanetScope görüntülerinden fenolojik özellikler elde edilmiştir. Çalışma bulguları, NDVI zaman serilerine dayalı tahminlerin, yersel veriler ile çimlenme-çıkış evresinde iyi bir uyum gösterdiğini (RMSE yaklaşık 1 hafta, sapma yaklaşık 0-9 gün ve R^2 yaklaşık 0.65-0.75) ortaya koymuştur. Fizyolojik olum yani büyüme mevsimi sonunda ise RMSE yaklaşık 5-10 gün, sapma yaklaşık 0-8 gün ve R^2 yaklaşık 0.6-0.75 olarak rapor edilmiştir.

Zanker (2022) çalışmasında Kuzey Amerika Bölgesel Yeniden Analiz (NARR) veri setinden hesaplanan BDG'ler ile MODIS verilerinden elde edilen NDVI değerlerini kullanarak, Kuzey Dakota'daki mısır tarlalarında parsel bazlı ekim tarihlerini tahmin etmeyi amaçlamıştır. Çalışmasında elde ettiği bulguları NASS bitki gelişim raporlarından elde edilen eyalet çapındaki ortalama ekim tarihleri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada kullanılan uydu tabanlı VI-BDG yöntemindeki iki değişken 2003-2020 yılları için haftalık olarak NASS verilerine göre değerlendirilmiş ve en yüksek 0.96 R^2 ile ilişki bulunmuştur. Çalışmada hesaplanan ekim tarihi ortalama farkı 1.3 gün ve RMSE 3.6 gündür. Zanker (2022), çalışma sonuçlarına bağlı olarak uzaktan algılama görüntüleri ve meteorolojik verilerin birleştirilmesi ile tarımsal değerlendirmeler ve modelleme

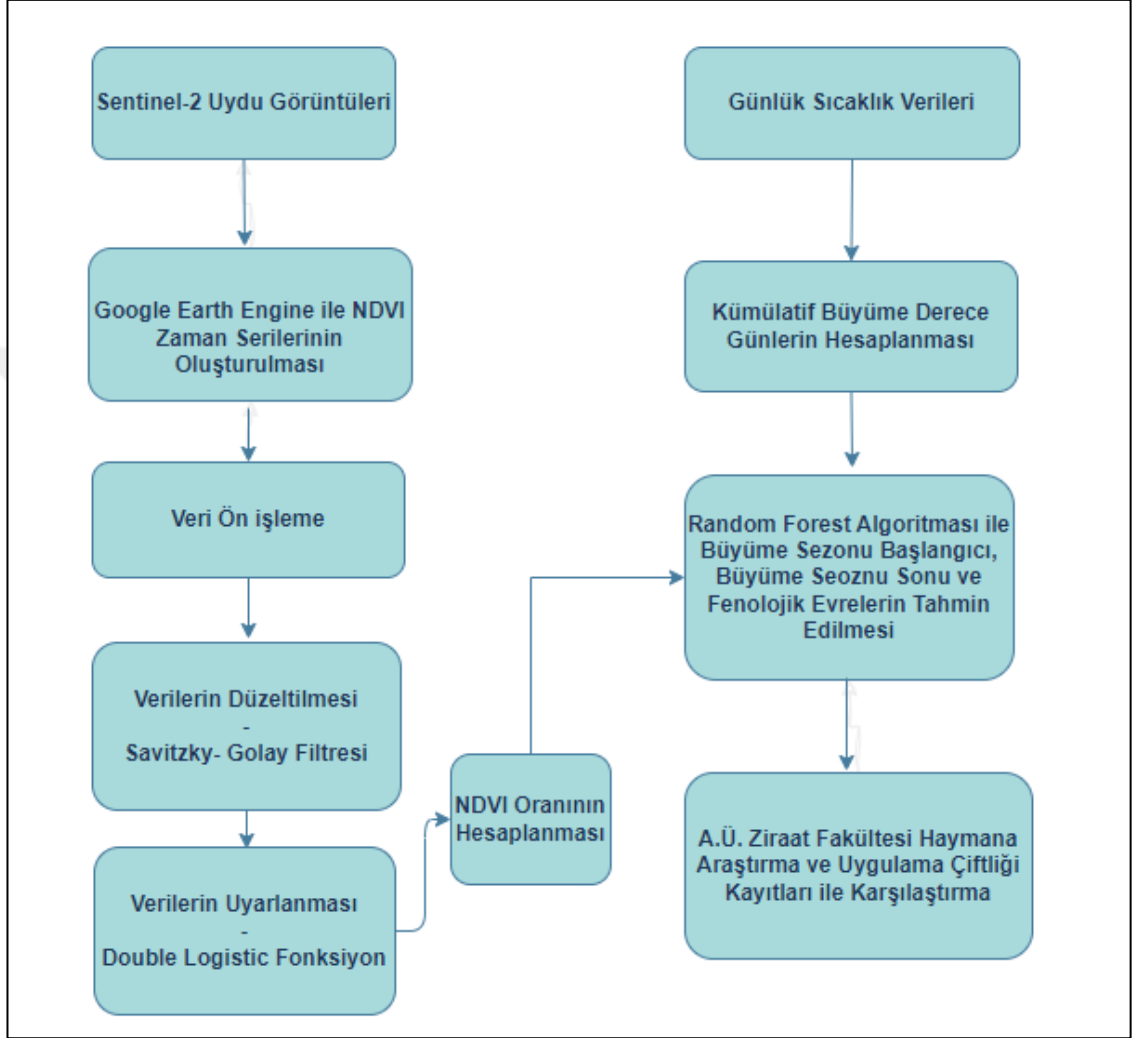
alışmaları için tarla düzeyinde ekim tarihlerinin tahmininde uygulanma potansiyeline sahip olduğunu bildirmiştir.

Murguia-Cozar vd. (2023) alışmalarında Sentinel-2 uydu görüntülerinden mısır bitkisinin fenolojik aşamalarını denetimli sınıflandırma modelleri aracılığıyla ayırt etmeyi sağlayan ana göstergeleri ve özellikleri belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışmada eğitim verileri, bir büyüme mevsimi boyunca ekili arazilerin izlenmesiyle elde edilmiştir. Göstergeler ve özellikler, izleme tarihleri boyunca elde edilen 41 Sentinel-2 görüntüsünden çıkarılmıştır. Bu görüntülerle,  denetimli (doğrusal diskriminant, destek vektör makinesi ve k-en yakın komşular (kNN)) sınıflandırıcıyı eğitmek için doku, bitki örtüsü ve renk göstergeleri hesaplanmıştır. Çıkarılan 86 özellikten 45'inin, gelişim aşamasına göre doğruluğu ve eğitilen sınıflandırma modellerinin genel doğruluğunu en st düzeye çıkarmaya katkıda bulunduğu bulunmuştur. İkinci dereceden destek vektör makinesi modelinin, %82.3'lk genel doğruluk oranıyla mısır bitkisi fenolojisinin belirlenmesinde en iyi sınıflandırıcı olduğu bildirilmiştir.

şenel vd. (2023) yaptıkları çalışmada 2002-2020 yılları arasındaki dönem için günlük MODIS yüzey yansıma verileri (MOD09GA) aracılığıyla Türkiye'deki doğu kayını (*Fagus orientalis*) ormanlarının fenolojik değişimlerini araştırmayı amaçlamıştır. Çalışmada NDVI değerleri tüm Türkiye için hesaplanmış olup sonrasında doğu kayını ormanları için maskelenmiştir. Bu "Fagus pikselleri" daha sonra en düşük %80 uzamsal ve yıllık %20 zamansal kapsama ile filtrelenmiştir. Düzgünleştirme ve yeniden yapılandırma için zaman serilerine iki yöntemin bir kombinasyonu uygulanmış ve BSB, BSS ve sezon uzunluğu parametreleri çıkarılmış ve bu parametrelerin 19 yıllık dönemdeki eğilimleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, -0.8 gün yıl⁻¹ sen eğimi ile yaygın olarak bildirilen daha erken BSB modeliyle uyumlu bulunmuştur. Çalışmada ayrıca BSB ile ortalama, en yüksek ve en düşük sıcaklık, BDG ve soğutma saatleri arasındaki ilişkiler de incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, her ikisi de şubat-Mart aralığı için olmak üzere, ortalama BSB eğilimi ile kümülatif soğutma saatleri ve kümülatif BDG arasında 2 °C taban sıcaklığı ile en anlamlı korelasyonların bulunduğu bildirilmiştir. Araştırmacılar, Türkiye'de fenolojik gözlem ağına ihtiyaç duyulduğunu rapor etmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın grafik özeti Şekil 3.1’de verilmiştir.



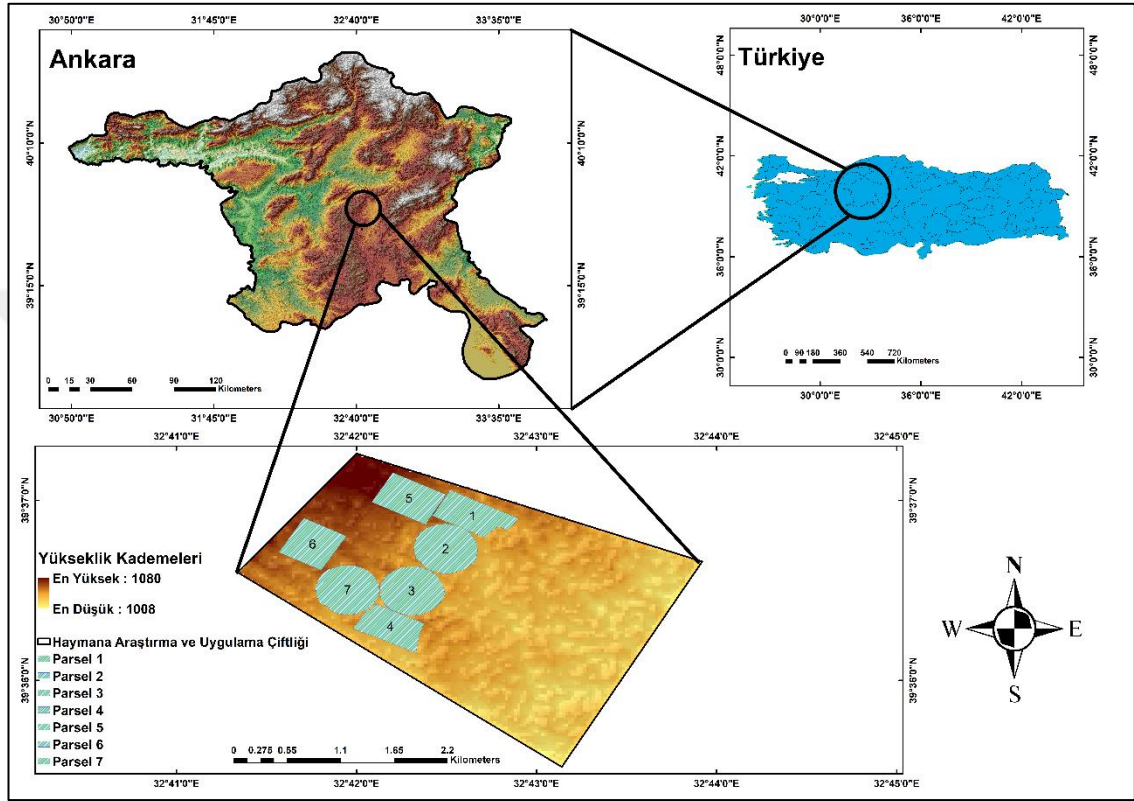
Şekil 3.1 Çalışmanın grafik özeti

3.1 Materyal

3.1.1 Çalışma alanı

Tez çalışması, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliğinde silajlık mısır ve buğday parsellerinde (Şekil 3.2) yürütülmüştür. Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliği, 1983 yılında 4200 da arazi üzerine kurulmuş olup toplam

3100 da'lık bir alanda tarım yapılmaktadır. Çiftlik, deniz seviyesinden 1060 m yükseklikteki bulunmaktadır. Çiftlikte tarımsal üretim, tarla bitkileri, bahçe bitkileri ve hayvancılık olmak üzere üç ana birim ile yürütülmektedir. Çiftlikte başlıca yetiştirilen bitkiler ise buğday, arpa, silajlık mısır ve yoncadır.



Şekil 3.2 Çalışma alanı

Haymana ilçesinde kışları soğuk, yazları ise sıcak ve kurak olan yarı kurak iklim özellikleri görülmektedir. Ortalama yıllık sıcaklık değeri 12 °C iken aylık ortalama en yüksek sıcaklık değeri 30.5 °C ile ağustos ayında, aylık ortalama en düşük sıcaklık değeri ise -3.2 °C ile ocak ayında görülmektedir (Anonim, 2023). Haymana ilçesine ait bazı meteorolojik parametrelerin uzun yıllar ortalaması Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Çalışma alanına ait bazı meteorolojik parametrelerin uzun yıllar (1927-2023) ortalaması (Anonim, 2023)

	Aylar												Yıllık
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Ortalama Sıcaklık (°C)	0.2	1.7	5.7	11.3	16.1	20.0	23.4	23.5	18.9	13.2	7.3	2.6	12.0
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	4.2	6.5	11.5	17.4	22.4	26.7	30.3	30.5	26.1	20.0	13.1	6.6	17.9
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	-3.2	-2.3	0.7	5.4	9.7	13.0	15.9	16.0	11.9	7.1	2.5	-0.7	6.3
Ortalama Yağış Miktarı (mm)	40.3	35.2	39.3	41.7	50.9	36.1	14.2	12.7	17.8	27.3	31.2	44.4	391.1
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	2.6	3.7	5.0	6.4	8.2	9.8	11.0	10.5	9.1	6.6	4.6	2.5	6.7

3.1.2 Yersel veriler

Çalışmada kullanılan yersel veriler 2016-2022 yılları için Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliği kayıtlarından elde edilmiştir. 2023 yılına ait veriler ise arazi çalışması ile yerinde gözlemlenerek elde edilmiştir. Bu kapsamda buğday bitkisinin fenolojik evrelerini belirlemek için Zadoks skalası kullanılmıştır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 Buğday bitkisinin büyüme ve gelişim dönemleri-Zadoks skalası (Zadoks vd. 1974)

Fenolojik Evre	Tanımlaması
Çimlenme	Koleoptil oluşumu
Kardeşlenme	Kardeşlerin oluşmaya başlaması (3-4 kardeş yeterli)

Çizelge 3.2 Buğday bitkisinin büyüme ve gelişim dönemleri-Zadoks skalası (Zadoks vd. 1974) (devam)

Fenolojik Evre	Tanımlaması
Sapa kalkma	Yaprak kınının dikleşmesi, sapın oluşması, boğum ve boğum aralarının görülmesi
Başaklanma - Çiçeklenme	Bayrak yaprağının kınından başak ucunun çıkması, başağın kından tamamen kurtulmasıyla ilk anterlerin görülmesi, başağın üst ve orta kısmına doğru anter çıkışının devam etmesi
Süt olum	Tanenin şekilsel olarak oluşması ve tanede süt kıvamında besin maddelerinin (çoğunlukla proteinlerin ve az miktarda karbonhidratların) birikmesi
Hamur olum	Tane içinin önce boza kıvamında (yumuşak-gevşek hamur) sonra katı (koyu) hamur kıvamında olması
Döllenme - erme	Tohumların döllenmesi ve hasat için fizyolojik oluma hazır hale gelmesi
Fizyolojik olum	Tanenin sadece su kaybetmesi ve olgunlaşması

Mısır bitkisinin fenolojik evrelerinin belirlenmesinde Çizelge 3.3 dikkate alınmıştır. Silajlık mısırdaki son iki evre olan çukurlaşma ve fizyolojik olum görülmediği için bu evreler çalışmada dikkate alınmamıştır.

Çizelge 3.3 Mısır bitkisinin büyüme ve gelişme dönemleri (O’Keeffe, 2009)

Fenolojik Evre	Tanımlaması
Çimlenme ve çıkış (VE)	Koleoptil oluşumu
V1-V2	İlk iki yaprağın çıkışı
V3-V4	Üçüncü ve dördüncü yaprağın çıkışı
Tepe püskülü çıkışı	Püskül oluşumu ve üreme evresine geçiş
Koçan püskülü	Tepe püskülünün görünmesinden sonra koçan püskülünün çıkışı
Süt olum	Tanelerin açık sarı bir renk alması ve süt beyazı sıvıyla dolmasıyla
Hamur olum	Taneler daha sarı hale gelir ve birçoğunda çentik oluşur

Çizelge 3.3 Mısır bitkisinin büyüme ve gelişme dönemleri (O’Keeffe, 2009) (devam)

Fenolojik Evre	Tanımlaması
Çukurlaşma (Çentik olum)	Neredeyse tüm taneler tamamen çentiklenmesi ve tanelerin tepesinde sert nişasta oluşumunun başlaması
Fizyolojik olum	Çekirdeğin fizyolojik olgunluğa ulaşması ve siyah tabaka oluşumu

Silajlık mısır ve buğday bitkileri için 2016-2023 yılları fenolojik evre tarihleri sırasıyla Çizelge 3.4 ve çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Silajlık bitkisinin yıllara göre fenolojik evre tarihleri

Fenolojik Evre	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Ekim	02/05	08/05	07/05	06/05	04/05	03/05	09/05	15/05
Çimlenme ve çıkış (VE)	09/05	15/05	14/05	13/05	11/05	10/05	16/05	22/05
V1-V2	16/05	22/05	21/05	20/05	18/05	17/05	23/05	29/05
V3-V4	31/05	06/06	05/06	04/06	02/06	01/06	28/05	13/06
Tepe püskülü çıkışı	04/08	10/08	29/07	11/08	13/08	14/08	28/07	14/08
Koçan püskülü	11/08	17/08	05/08	18/08	20/08	21/08	04/08	24/08
Süt olum	18/08	23/08	12/08	24/08	27/08	29/08	12/08	01/09
Hamur olum ve Hasat	10/10	08/10	05/10	23/09	19/09	20/09	02/10	18/09

Çizelge 3.5 Buğday bitkisinin yıllara göre fenolojik evre tarihleri

Fenolojik Evre	2016 - 2017	2017 - 2018	2018 - 2019	2019 - 2020	2020 - 2021	2021 - 2022	2022 - 2023
Ekim	07/10/16	09/10/17	08/10/18	14/10/19	21/10/20	18/10/21	24/10/22
Çimlenme	17/10/16	16/10/17	15/10/18	21/10/19	28/10/20	25/10/21	31/10/22
Kardeşlenme	02/03/17	03/03/18	03/03/19	05/03/20	08/03/21	10/03/22	15/03/23
Sapa kalkma	17/03/17	18/03/18	18/03/19	20/03/20	23/03/21	25/03/22	02/04/23
Başaklanma - Çiçeklenme	25/05/17	24/05/18	26/05/19	27/05/20	26/05/21	26/05/22	28/05/23
Süt olum	16/06/17	15/06/18	17/06/19	18/06/20	17/06/21	17/06/22	18/06/23
Hamur olum	29/06/17	28/06/18	30/06/19	01/07/20	30/06/21	30/06/22	01/07/23
Döllenme - Erme	05/07/17	04/07/18	06/07/19	07/07/20	06/07/21	06/07/22	08/07/23
Fizyolojik olum	20/07/17	19/07/18	21/07/19	22/07/20	21/07/21	21/07/22	23/07/23

3.1.3 Meteorolojik veriler

Çalışma alanına ait meteorolojik veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) sağlanmıştır. Çalışma alanına 300 m uzaklıkta bulunan 17733 istasyon numaralı Haymana Tarım meteoroloji istasyonu verileri kullanılmıştır. Veriler 2005-2023 yılları için günlük ortalama sıcaklık değerlerinden oluşmaktadır.

3.1.4 Uydu verileri

Çalışmada NDVI zaman serilerinin oluşturulmasında Sentinel-2 uydu verileri kullanılmıştır. Copernicus Sentinel-2 uydusu, güneşle eşzamanlı yörüngeye yerleştirilmiş ve birbirlerine 180° açıyla fazlanmış kutupsal yörüngeli iki uydu takımından (2A,2B) oluşmaktadır.

Sentinel-2 uydusu, yörünge genişliği (290 km) ve yüksek zamansal çözünürlüğe (tek uydu ile ekvator yakınında 10 gün, bulutsuz koşullarda 2 uydu ile 5 gün, orta enlemlerde 2-3 gün) sahiptir. Sentinel-2, 13 spektral bantı örnekleyen bir optik cihaz taşımaktadır: 10 m'de dört bant, 20 m'de altı bant ve 60 m mekânsal çözünürlükte üç bant (Anonim, 2015). Sentinel-2 uydusu bant özellikleri Çizelge 3.6'de verilmiştir.

Çizelge 3.6 Sentinel-2 uydusu bant özellikleri (Anonim, 2015)

Bant	Çözünürlük (m)	Dalga Boyu (nm)	Özellik
B1	60	443	Ultra Mavi (Kıyı ve Aerosol)
B2	10	490	Mavi
B3	10	560	Yeşil
B4	10	665	Kırmızı
B5	20	705	Görünür ve Yakın Kızılötesi (VNIR)
B6	20	740	Görünür ve Yakın Kızılötesi (VNIR)
B7	20	783	Görünür ve Yakın Kızılötesi (VNIR)
B8	10	842	Görünür ve Yakın Kızılötesi (VNIR)
B8a	20	865	Görünür ve Yakın Kızılötesi (VNIR)
B9	60	940	Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR)
B10	60	1375	Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR)
B11	20	1610	Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR)
B12	20	2190	Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR)

Yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüğe sahip olduğu için çalışmada kullanılmak üzere Sentinel-2 uydusu seçilmiştir. Çalışma kapsamında, NDVI ve CI değerlerinin belirlenmesinde 10 m çözünürlüklü B4 ve B8 verileri kullanılmıştır.

3.2 Yöntem

3.2.1 Büyüme derece günlerin (BDG) hesaplanması

Büyüme Derece Gün (BDG), büyüme mevsimi boyunca bitkilerin büyümesini ve gelişimini tahmin etmek için kullanılmaktadır. BDG'lerin hesaplanmasındaki temel, gelişmenin yalnızca sıcaklığın bazı alt gelişme eşiğini veya temel sıcaklığı (T_{baz}) aşması durumunda gerçekleşeceğidir (Ahrens, 2014).

Günlük ortalama hava sıcaklığı, bitkinin gelişebileceği en düşük kritik hava sıcaklığının altında olduğunda, o gün, bitkinin fizyolojik gelişimine katkıda bulunmaz (BDG=0) (Ghamghami vd. 2019).

Çalışmada, mısır bitkisi için en yüksek ve en düşük kritik hava sıcaklığı değerleri sırasıyla 30 °C ve 10 °C, buğday bitkisi için ise baz sıcaklık değeri 0 °C alınmıştır (Sammis vd. 1985, Li vd. 2012, Ibarra vd. 2020). Mısır bitkisi için BDG hesaplaması aşağıdaki eşitlikler (Ghamghami vd. 2019) kullanılarak yapılmıştır.

$$BDG = T_a - T_{cmin} , \quad \text{eğer} \quad T_a < T_{cmax} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

$$BDG = T_{cmax} - T_{cmin} , \quad \text{eğer} \quad T_a \geq T_{cmax} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

$$BDG = 0 , \quad \text{eğer} \quad T_a \leq T_{cmin} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Mısır dışındaki bitkiler için günlük BDG'yi hesaplamak için yaygın ve temel bir formül, günlük ortalama sıcaklık değerinden büyümenin devam etmesi için gereken en düşük sıcaklığı (baz sıcaklığı) çıkarmaktır. Buğday bitkisi için BDG hesaplaması aşağıdaki eşitlik (Li vd. 2012, Ibarra vd. 2020) kullanılarak yapılmıştır.

$$BDG = T_a - T_{baz} \quad (\text{Eşitlik 4})$$

Eşitliklerde;

BDG= Günlük büyüme derece günleri (°C gün⁻¹),

T_a = Günlük ortalama hava sıcaklığı (°C),

T_{baz} = Seçilen bitki için baz (temel) hava sıcaklığı (°C),

T_{max} = Seçilen bitkinin gelişebileceği en yüksek kritik hava sıcaklığı (°C),

T_{min} = Seçilen bitkinin gelişebileceği en düşük kritik hava sıcaklığıdır (°C).

Mısır ve buğday gibi bitki türleri için farklı BDG eşitliklerinin kullanılmasının nedeni, bu bitkilerin farklı büyüme ve gelişme karakteristiklerine sahip olmalarıdır. İki bitki türü, çimlenme, büyüme hızı, fenolojik evreler ve hasat zamanlaması gibi konularda farklılıklar göstermektedir.

Mısır bitkisi, 10 C⁰'nin altında ve 30 C⁰'nin üzerinde gelişimini durdurmaktadır. Buğday bitkisi için ise 0 C⁰'nin üzerinde üst sınır olmaksızın gelişim devam etmektedir (McMaster ve Wilhelm, 1997, Allen vd. 2020). Bu nedenle, mısır ve buğday bitkileri için ayrı eşitlikler kullanılmaktadır.

BDG'ler, 2016-2022 yılları için Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliği kayıtları, 2023 yılı için ise arazi çalışması ile elde edilen fenolojik evre tarihleri dikkate alınarak bitkilerin ekim tarihinden hasat tarihine kadar hesaplanmıştır. Her bir fenolojik evredeki KBDG toplamalarının evrelerdeki ortalama KBDG değerlerinden sapmaları incelenmiştir.

3.2.2 Fenolojik gelişimin (PD) hesaplanması

Kümülatif Büyüme Derece Gün (KBDG) değerleri, bitki gelişimini izlemede güvenilir bir yöntemdir (Allen vd. 2020) çünkü belirli bir bitkinin büyüme mevsimi boyunca bir sonraki fenolojik evreye geçebilmesi için T_{baz} sıcaklık eşliğini aşp belirli bir miktarda BDG biriktirmesi gerekmektedir. Örneğin; buğday bitkisi 2100 ila 2400 BDG biriktirdiğinde hasat edilebilmektedir. Belirli fenolojik evreler arasındaki KBDG değerleri arasındaki anlamlı sapmalar büyüme sezonu uzunluğundaki (BSU) değişimler hakkında bilgi vermektedir (Ahrens, 2014). PD, KBDG değerleri kullanılarak aşağıdaki denklem ile oransal bir değer olarak hesaplanmaktadır (Ibarra vd. 2020):

$$PD = \frac{KBDG_{IT}}{KBDG_{hasat}} \quad (\text{Eşitlik 5})$$

Eşitlikte;

PD= Fenolojik gelişim,

KBDG_{IT}= Ekim tarihinden ilgili tarihe kadar biriken BDG (°C) ve

K=Bitkinin ekim tarihinden fizyolojik olgunluğuna kadar biriken BDG (°C)'dir.

NDVI_{Oranı} değerleri ile PD değerlerinin istatistiksel ilişkisi, Pearson korelasyon katsayısı (r) (Pearson, 1895) ve belirtme katsayısı (R²) (Nagelkerke,1991) ile değerlendirilmiştir.

3.2.3 Termal sezon uzunluğu (TSU) trend analizi

TSU, sezonun başlangıcından (ekim) sezon sonuna (hasat) kadar geçen süreyi ifade etmektedir. BSU'nun trendinin belirlenmesinde Mann-Kendall trend analizi (Mann, 1945, Kendall, 1948) yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda MGM'den alınan en eski tarihli meteorolojik veriler ile (2005) silajlık mısır ve buğday bitkileri için BSU hesaplanmıştır. Hesaplamalarda 2016-2023 yılları için Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliğinden alınan ekim-hasat tarihi kayıtları dikkate alınarak hesaplanan KBDG'lerden yararlanılmıştır. Ekim-hasat tarihi için Haymana yöresine uygun olarak silajlık mısır için ekim tarihi 1 Mayıs, buğday için ise 1 Ekim olarak alınmıştır. Hasat tarihi ise 2016-2023 yılları için hasada kadar toplanan KBDG'lerin ortalaması (silajlık mısır için 1340 KBDG, buğday için 2400 KBDG) elde edilerek belirlenmiştir. TSU'nun trendi açıklanan şekilde analiz edilmiştir.

Mann-Kendall trend analizi, zaman serisi verilerindeki eğilimleri tespit etmek için yaygın olarak kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir. Test, belirli bir dönemdeki eğilimlerin varlığını ve gücünü değerlendirmektedir (Douglas vd. 2000). Mann-Kendall istatistiği (S) (Mann, 1945, Kendall, 1948) için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (\text{Eşitlik 6})$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i-5)}{18} \quad (\text{Eşitlik 7})$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{eğer } S > 0 \\ 0, & \text{eğer } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{eğer } S < 0 \end{cases} \quad (\text{Eşitlik 8})$$

Eşitliklerde;

n= Veri sayısı,

x_i, x_j = i ve j zaman noktalarındaki veri değerleri,

sgn= Negatif değerler için -1, sıfır için 0 ve pozitif değerler için 1 sonucu veren işaret fonksiyonu,

Var (S)= Varyans,

m= Bağlı grupların sayısı,

t_i = i kapsamındaki bağların sayısı,

Z= Standart normal değişkendir.

Mann-Kendall trend analizinde sıfır hipotezi trend olmadığını, alternatif hipotez ise iki taraflı testte trend olduğu veya tek taraflı testte yukarı ya da aşağı yönlü trend olduğunu ifade etmektedir.

3.2.4 NDVI zaman serilerinin elde edilmesi

NDVI, yakın kızılötesi (NIR) bandın yansımaya oranı ve kırmızı bandın yansımaya oranı arasındaki farkın, toplamı ile normleştirilmesi yoluyla Eşitlik 9 ile hesaplanmaktadır (Rouse vd. 1973). NDVI hesaplanırken bu iki bandın spektral yansımaya oranının kullanılmasının temel olarak iki nedeni bulunmaktadır: (1) Sağlıklı bitki örtüsünde yaprakların hücresel yapısının elektromanyetik spektrumun NIR bölgesindeki güneş radyasyonunu daha güçlü bir şekilde yansıtması, (2) bitki yapraklarındaki klorofilin,

fotosentezde kullanılmak üzere kırmızı ışığı güçlü bir şekilde emmesi ve yalnızca küçük bir kısmını yansıtmasıdır.

NDVI, -1 ila +1 arasında değer almaktadır. Bitki büyüme mevsimi boyunca sıfırdan küçük NDVI değerleri çöl, çıplak toprak, bulut, kar, su kütlesi ve buzul; büyüme mevsiminde sıfırdan büyük NDVI değerleri ise mevcut bitki örtüsünü tanımlamaktadır. Yağmur ormanları gibi yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda NDVI değerleri bire yaklaşmaktadır. NDVI değerlerindeki zamansal değişiklikler bitki büyüme döngüsünü tespit etmek için ve potansiyel olarak ekim-hasat tarihlerinin hesaplanmasında kullanılabilir (Sajedi- Hosseini vd. 2018).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

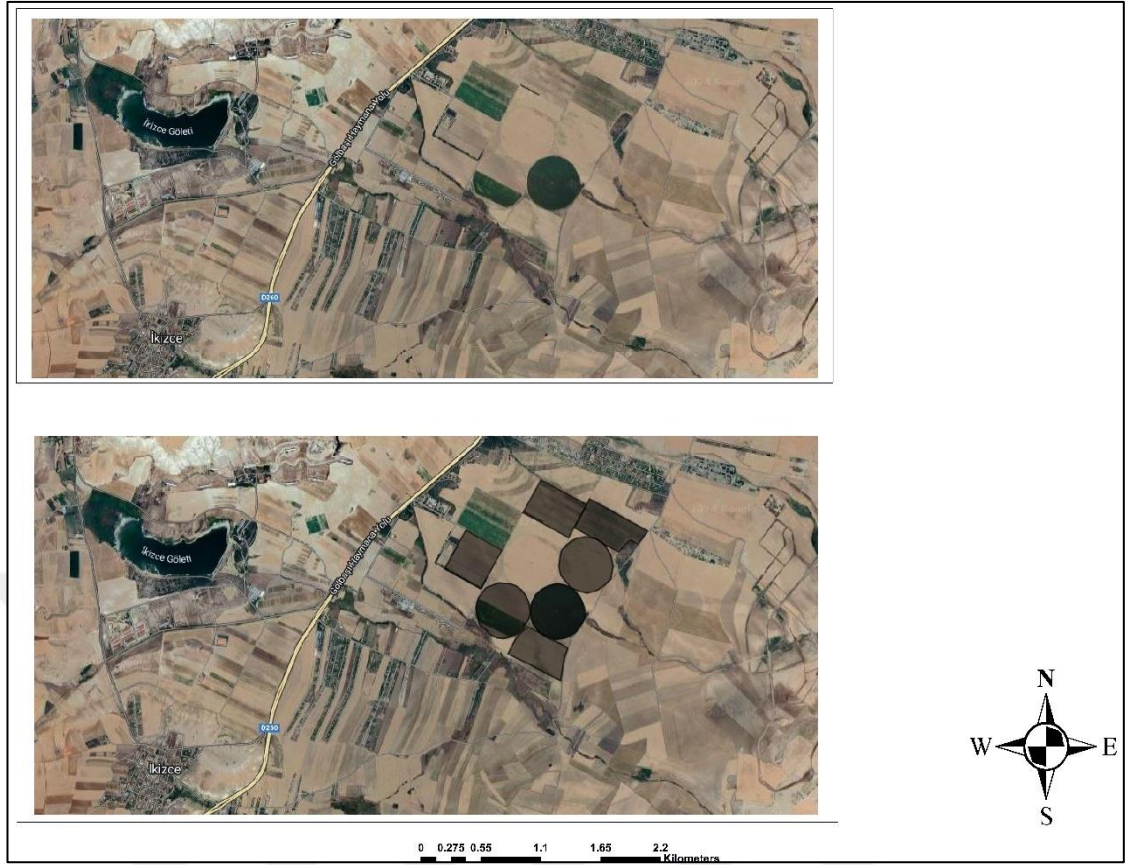
Eşitlikte;

ρ_{NIR} = Yakın kızılötesi bandın spektral yansım oranı,

ρ_{RED} = Kırmızı bandın spektral yansım oranıdır.

Çalışma kapsamında NDVI zaman serileri, silajlık mısır ve buğday parsellerinin vektör verilerinin Google Earth Engine'e (GEE) çalışma alanı olarak tanımlanması ve 2016-2023 yılları arasında bitkilerin büyüme mevsimleri süresince analiz edilmesi ile elde edilmiştir. Bu kapsamda Sentinel-2A B4 ve B8 bantlarının yansım oranları kullanılmıştır.

Vektör veriler oluşturulurken öncelikle Google Earth'den arazi parsellerinin sınır koordinatları elde edilmiştir. Bu koordinatlar Python'da GeoPandas kütüphanesi kullanılarak vektör veri formatına dönüştürülmüştür. Vektör veriler elde edildikten sonra ArcGIS yazılımında açılıp OpenStreetMap katmanları eklenerek koordinatların doğruluğu kontrol edilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Çalışma alanı parsellerine ait vektör veriler

3.2.5 Veri önışleme

3.2.5.1 Verilerin düzeltilmesi

Uydu görüntüleri ile bitki fenolojisinin izlemesi ve fenolojik aşamaların belirlenmesi, geniş bir dizi tutarlı, uzamsal olarak çakışan gözlemin mevcudiyetine dayanır ve çoğunlukla zaman serisi analizi yoluyla yürütölmektedir (Colombo vd. 2011, Testa vd. 2018). Zaman serisi verileri, fenoloji yorumlaması için ana kaynaklardır. Bununla birlikte, çeşitli faktörler (bulut, kar, anizotropik yansımalar vb.) nedeniyle, elde edilen veriler kaçınılmaz olarak, yorumlanan fenolojinin doğruluğunu azaltan güröltölü veriler içerir. Bu nedenle, bitki fenolojisi belirlenmeden önce verilerin düzeltilmesi (smoothing) önemli bir prosedürdür (Qian vd. 2019).

Veri düzeltme, zaman serilerindeki eğilimleri daha iyi görmek için yapılmaktadır. Uydu verileri bir düzeltme algoritması uygulanarak önceden işlenir ve ardından fenolojik aşamaların zamanlamasını tahmin etmek için verilerin bir tahmin modeline uyarlanması gibi bir dizi işlem uygulanır (Liu ve Zhan, 2016).

Çalışma kapsamında NDVI zaman serileri, Savitzky-Golay Filter (Eşitlik 10), Lowess (Yerel Ağırlıklı Dağılım Grafiği Düzeltme) (Eşitlik 11) ve Spline Smoothing (Eşitlik 12) algoritmaları kullanılarak düzeltilmiştir. Bu yöntemlerin performansları üç açıdan karşılaştırılmıştır: (1) Gürültülü veriyi azaltma yeteneği (Sinyal-gürültü oranı, SNR (Eşitlik 13)), (2) kök ortalama kare hatası (RMSE), (3) R^2 . Karşılaştırma sonucunda en iyi performansı veren yöntem seçilmiştir.

Savitzky-Golay algoritması, gürültü azaltma ve verilerin düzeltilmesi için kullanılan bir dijital filtreleme tekniğidir. Düşük dereceli polinomları verilerin küçük alt kümelerine uydurarak çalışır (Savitzky ve Golay, 1964). Eşitlik 10 ile formüle edilmektedir.

$$y'_i = \sum_{j=0}^m c_j y_{i+j} \quad (\text{Eşitlik 10})$$

Eşitlikte;

y'_i = i noktasındaki düzeltilmiş değer,

y_{i+j} = i noktasının komşuluğunda gözlemlenen değer,

c_j = Konvolüsyon katsayısıdır.

Lowess, verilerin dağılım grafiklerini düzgünleştirmek için kullanılan parametrik olmayan bir regresyon yöntemidir. Yöntem ile verilerin alt kümelerine çoklu ağırlıklı regresyon çizgileri uyarlanarak altta yatan eğilimi yakalayan yumuşak bir eğri elde edilir (Cleveland ve Devlin, 1988). Lowess algoritması Eşitlik 11 ile ifade edilmektedir.

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (\text{Eşitlik 11})$$

Eşitlikte;

n = Toplam veri sayısı,

$\hat{y}_i$ = i noktasındaki düzeltilmiş değer,

y_j = j noktasında gözlemlenen değer,

w_{ij} = i noktasında düzeltme için j 'inci noktaya atanan değerdir.

Spline düzeltme algoritması, parçalı polinomlar uydurarak verileri düzeltmek için kullanılan esnek bir parametrik olmayan regresyon yöntemidir. Verilerin aralıklara bölünmesini ve her aralıkta polinom fonksiyonlarının uydurulmasını içerir (Hastie vd. 2009). Spline algoritması Eşitlik 12'deki parçalı polinom denklemi ile ifade edilmektedir.

$$y(x) = \sum_{i=1}^n \beta_i h_i(x) \quad (\text{Eşitlik 12})$$

Eşitlikte;

$y(x)$ = Düzeltilmiş fonksiyon,

β_i = Polinom bazlı fonksiyonun katsayısı,

h_i = Temel fonksiyondur.

Veri düzeltme algoritmalarının performansının değerlendirilmesinde kullanılan sinyal-gürültü oranı (SNR), istenen sinyalin seviyesini arka plan gürültüsü seviyesi ile karşılaştırarak bir sinyalin kalitesini ölçmede kullanılan bir ölçüttür (Proakis, 2007). Genel olarak SNR, fenolojik çalışmalarda araştırmacıların veri kalitesini değerlendirmesine, sinyal tespitini geliştirmesine, çevresel değişikliklere duyarlılığı artırmasına, sağlam istatistiksel analizler sağlamasına ve çalışmalar arası karşılaştırmaları ve sentezi kolaylaştırmasına olanak tanıyan değerli bir ölçüttür (Dash vd. 2008). SNR, Eşitlik 13 ile hesaplanmaktadır.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Sinyal seviyesi}}{\text{Gürültü seviyesi}} \right) \quad (\text{Eşitlik 13})$$

Eşitlikte;

Sinyal seviyesi= İstenilen sinyalin seviyesi,

Gürültü seviyesi = Arka plan gürültü seviyesidir.

3.2.5.2 Verilerin uyarlanması

Verilerin düzeltilmesi, genel eğilim veya örüntüyü korurken bir veri kümesindeki gürültüyü veya değişkenliği azaltma sürecini ifade etmektedir. Verilerin uyarlanması ise verilerdeki değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlayan matematiksel bir fonksiyon ya da model bulmayı içermektedir (Liu vd. 2022).

Düzeltilmiş verilere bir model uyarlamak (fitting), zaman içindeki eğilimlerin ölçülmesini sağlamaktadır. Uyarlama, verileri en iyi şekilde tanımlayan parametrelerin belirlenmesi ve gelecekteki değerlerin tahmin edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Akima, 1970, Cole, 1988).

Özetle, düzeltme gürültüyü azaltmaya ve görselleştirmeye yardımcı olurken, uyarlama eğilimleri ölçmeye, tahminler yapmaya ve NDVI zaman serisi verilerinin altında yatan dinamikleri yorumlamaya olanak tanımaktadır. Her iki süreç de uzaktan algılama verilerinden anlamlı bilgiler elde etmek ve ekosistem dinamiklerini anlamak için büyük önem taşımaktadır (Kalvāns vd. 2015).

Çalışmada, düzeltilen NDVI zaman serileri literatürde başarılı sonuçlar verdiği bildirilen (Liu ve Zhan, 2016, Liu vd. 2023, Zhang vd. 2023) Double Logistic (DLF) fonksiyon ile uyarlanmıştır. DLF, büyüme veya bozulma süreçleri gibi sigmoidal davranış sergileyen verileri modellemek için kullanılan bir eğri uyarlama tekniğidir.

Bir bükülme noktasında buluşan iki sigmoidal eğriden oluşan verilere bir çift lojistik fonksiyonun uyarlanmasını içermektedir (Hill vd. 2006). DLF, Eşitlik 14 ile tanımlanmaktadır.

$$f(x) = a + \frac{b}{1+e^{-c(x-d)}} + \frac{e}{1+e^{-g(x-f)}} \quad (\text{Eşitlik 14})$$

Eşitlikte, x bağımlı değişkeni, a, b, c, d, e, f ve g ise model parametrelerini ifade etmektedir.

DLF ile uyarlanan NDVI değerleri kullanılarak silajlık mısır ve buğday için NDVI oranı (Eşitlik 15) hesaplanmıştır. Bu değerler BSB, BSS ve fenolojik evre tahmininde kullanılmıştır.

$$NDVI_{oranı} = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (Eşitlik 15)$$

Eşitlikte; NDVI, günlük NDVI değerini, $NDVI_{max}$ ve $NDVI_{min}$ ise sırasıyla NDVI eğrisinin aldığı en yüksek ve en düşük değerlerini ifade etmektedir. $NDVI_{oranı}$ 0 ile 1 arasında değer almaktadır (White vd. 2009).

3.2.6 Büyüme sezonu başlangıcı (BSB) ve büyüme sezonu sonunun (BSS) belirlenmesi

Büyüme sezonu başlangıcı (BSB), uzun bir fotosentetik uyku hali döneminden hemen sonra yeşillenmede keskin bir artış olarak tanımlanmaktadır (White vd. 2009). "Sezon başlangıcı" terimi, büyüme mevsiminin başlangıcıdır ve genellikle NDVI değerlerinde önemli bir artışın olduğu tarihe işaret etmektedir. Eğrinin yükselmeye başladığı zaman noktası BSB olarak değerlendirilmektedir. Bitki parametrelerinde belirgin düşüşün gözlemlendiği zaman ise Büyüme Sezonu Sonu (BSS) olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada BSB materyal bitkiler için ekim tarihi, BSS ise hasat tarihi olarak değerlendirilmiştir.

3.2.7 Fenolojik devrelerin Random Forest algoritması ile tahmini

Çalışma kapsamında silajlık mısır ve buğday bitkilerinin BSB, BSS ve fenolojik evrelerinin tahmininde RF algoritması kullanılmıştır. RF, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde yaygın olarak kullanılan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. RF, karar ağaçları (decision trees) temeline dayanır ve birçok karar ağacının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. RF, rastgele örnekleme, karar ağaçlarının oluşturulması, rastgele özellik seçimi, en iyi bölme seçimi ve ansambl oluşturma gibi temel adımlardan oluşmaktadır (Breinman, 2001, Liaw ve Wiener, 2002).

RF, sınırlı veri setleriyle bile yüksek doğrulukta sonuçlar elde edebilme kapasitesine sahiptir, çünkü birden fazla karar ağacının entegrasyonunu içeren ansambl oluşturma yöntemini kullanır. Bu yöntem, her bir ağacın bağımsız hatalarını minimize eder ve modelin genelleme kabiliyetini artırır. Literatür incelemeleri, RF'nin aşırı öğrenme riskini azaltarak küçük veri setlerinde dahi yüksek performans sergileyebildiğini doğrulamaktadır (Breiman, 2001). Bu nedenle çalışmada RF yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada fenolojik evrelerin tahmininde $NDVI_{oranı}$ ve KBDG değerleri bağımsız değişkenler (x) olarak kullanılmıştır. Fenolojik evre ise bağımlı değişken (y) olarak alınmıştır. Model olarak 100 ağaç ($n=100$) kullanılan RF Classifier tercih edilmiştir. Veri seti %75 eğitim ve %25 test olmak üzere rastgele bir şekilde bölünmüştür. Model sonuçları RF algoritmasının performans göstergeleri olan doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F_1 skoru ile değerlendirilmiştir.

Performans göstergelerinden doğruluk, sınıflandırma problemlerinde doğru sınıflandırılan örneklerin oranını ifade etmektedir. Hassasiyet, gerçek pozitiflerin (true positives) toplam pozitif tahminlere oranıdır. Duyarlılık, gerçek pozitiflerin toplam pozitif örnekler içindeki oranıdır. F_1 skoru ise hassasiyet ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır (Breiman, 2001).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Kümülatif Büyüme Derece Gün Değerleri (KBDG) ve Fenolojik Gelişim (PD)

Silajlık mısır ve buğday bitkileri için 2016-2023 yılları arasında her fenolojik evrenin başlangıç ve bitişindeki KBDG ve PD değerleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 incelendiğinde, mısır bitkisinin fenolojik evrelerdeki ortalama KBDG ve PD değerleri sırasıyla; Çimlenme evresinde KBDG 23.84, PD 0.02; V1-V2 evresinde KBDG 62.84, PD 0.05; V3-V4 evresinde KBDG 139.80, PD 0.10; Tepe püskülü çıkışı evresinde KBDG 831.44, PD 0.62; Koçan püskülü çıkışı evresinde KBDG 930.50, PD 0.69; Süt olum evresinde KBDG 1014.71, PD 0.76; Hamur olum ve hasat evresinde KBDG 1343.73, PD 1.00 olarak belirlenmiştir.

Ghamghami vd. (2019) yaptıkları çalışmada dane mısır bitkisinin hasat zamanına kadar ortalama 1621 KBDG biriktirdiğini bildirmiştir. Ibarra vd. (2020) yaptıkları çalışmada mısır (dane) bitkisi için fenolojik evrelerdeki ortalama KBDG ve PD değerlerini sırasıyla Tepe püskülü çıkışı evresinde KBDG 850, PD 0.59; Süt olum evresinde KBDG 1150, PD 0.79 olarak belirlemişlerdir. Sonuçta tepe püskülü çıkışı ve süt olum evrelerinde KBDG ve PD değerleri bu çalışma ile uyumlu bulunmuştur.

Buğday bitkisi için ise; Çimlenme evresinde KBDG 101.74, PD 0.04; Kardeşlenme evresinde KBDG 590.70, PD 0.24; Sapa kalkma evresinde KBDG 656.67, PD 0.27; Başaklanma- çiçeklenme evresinde KBDG 1347.63, PD 0.55; Süt olum evresinde KBDG 1756.31, PD 0.72; Hamur olum evresinde KBDG 1999.46, PD 0.81; Döllenme-erme evresinde KBDG 2133.79, PD 0.87; Fizyolojik olum-hasat evresinde KBDG 2456.01, PD 1.00 olarak belirlenmiştir. Bu veriler hem silajlık mısır hem de buğday bitkisinin gelişim süreçlerinde KBDG ve PD değerlerinin nasıl değiştiğini göstermektedir.

Miller vd. (2001) alışmalarında buğday bitkisinin fenolojik evrelerdeki ortalama KBDG değerlerini sırasıyla; çimlenme evresinde 260.50; Sapa kalkma evresinde 633; Başaklanma-ieklenme evresinde 1538; Döllenme-erme evresinde 2399.50; Hamur olum evresinde 1896.50; Fizyolojik olum ve hasatta ise 2543.50 olarak belirlemiştir. Dar vd. (2018) alışmalarında buğday bitkisinin fenolojik evrelerdeki ortalama KBDG değerlerini sırasıyla; çimlenme evresinde 289.50; Kardeşlenme evresinde 557; Sapa kalkma evresinde 751; Başaklanma-ieklenme evresinde 966; Süt olum evresinde 1038; Hamur olum evresinde 1527; Fizyolojik olum ve hasatta ise 1731 olarak bildirmiştir. Çalışma bulguları Dar vd. (2018) ile “Kardeşlenme” evresinde , Miller vd. (2001) ile ise büyük ölçüde uyum göstermektedir.

Çizelge 4.1 Silajlık mısır bitkisi KBDG ve PD değerleri

	Yıllar															
Fenolojik Evreler	2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023	
	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG
Çimlenme ve Çıkış (VE)	0.00	3.2	0.00	4.00	0.00	3.20	0.00	5.10	0.00	0.00	0.01	11.40	0.00	1.80	0.00	4.70
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.01	12.6	0.03	41.90	0.01	19.10	0.01	11.50	0.00	4.10	0.03	41.60	0.02	26.80	0.03	33.10
V1-V2	0.01	14.7	0.03	43.90	0.02	24.50	0.01	16.80	0.01	11.80	0.03	43.60	0.02	30.50	0.03	35.60
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.03	46.3	0.04	50.70	0.05	67.70	0.05	59.80	0.05	67.60	0.07	87.90	0.04	62.20	0.05	60.50
V3-V4	0.04	51.20	0.04	51.50	0.05	95.60	0.06	77.00	0.06	77.8	0.07	95.00	0.05	65.80	0.06	64.00
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.07	88.90	0.07	103.50	0.12	164.80	0.16	193.4	0.09	119.40	0.14	195.1	0.07	100.40	0.12	152.90
Tepe Püskülü	0.07	98.00	0.08	111.20	0.012	171.90	0.17	203.80	0.09	121.30	0.14	196.00	0.08	111.40	0.12	157.70
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Çıkışı	0.58	791.8	0.60	831.80	0.53	736.30	0.70	820.20	0.67	915.60	0.73	997.50	0.48	667.90	0.69	890.40
Koçan Püskülü	0.59	806.20	0.61	846.80	0.54	749.60	0.71	831.40	0.68	927.30	0.74	1007.60	0.49	682.40	0.70	911.70
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.65	890.60	0.67	927.70	0.59	821.70	0.77	903.70	0.73	993.20	0.79	1081.00	0.55	770.10	0.82	1056.00
Süt Olum	0.67	906.30	0.68	940.00	0.60	833.70	0.77	909.20	0.74	1003.50	0.80	1093.40	0.56	800.10	0.83	1069.90
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.71	963.60	0.72	998.50	0.64	896.20	0.81	951.70	0.79	1075.90	0.87	1192.50	0.63	876.30	0.90	1163.00
Hamur Olum ve Hasat	0.72	976.10	0.73	1007.70	0.65	906.20	0.82	963.90	0.80	1088.70	0.88	1208.80	0.64	890.20	0.91	1176.20
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.00	1362.70	1.00	1386.30	1.00	1399.40	1.00	1174.10	1.00	1363.60	1.00	1370.4	1.00	1399.9	1.00	1293.40

Çizelge 4.2 Buğday bitkisi KBDG ve PD değerleri

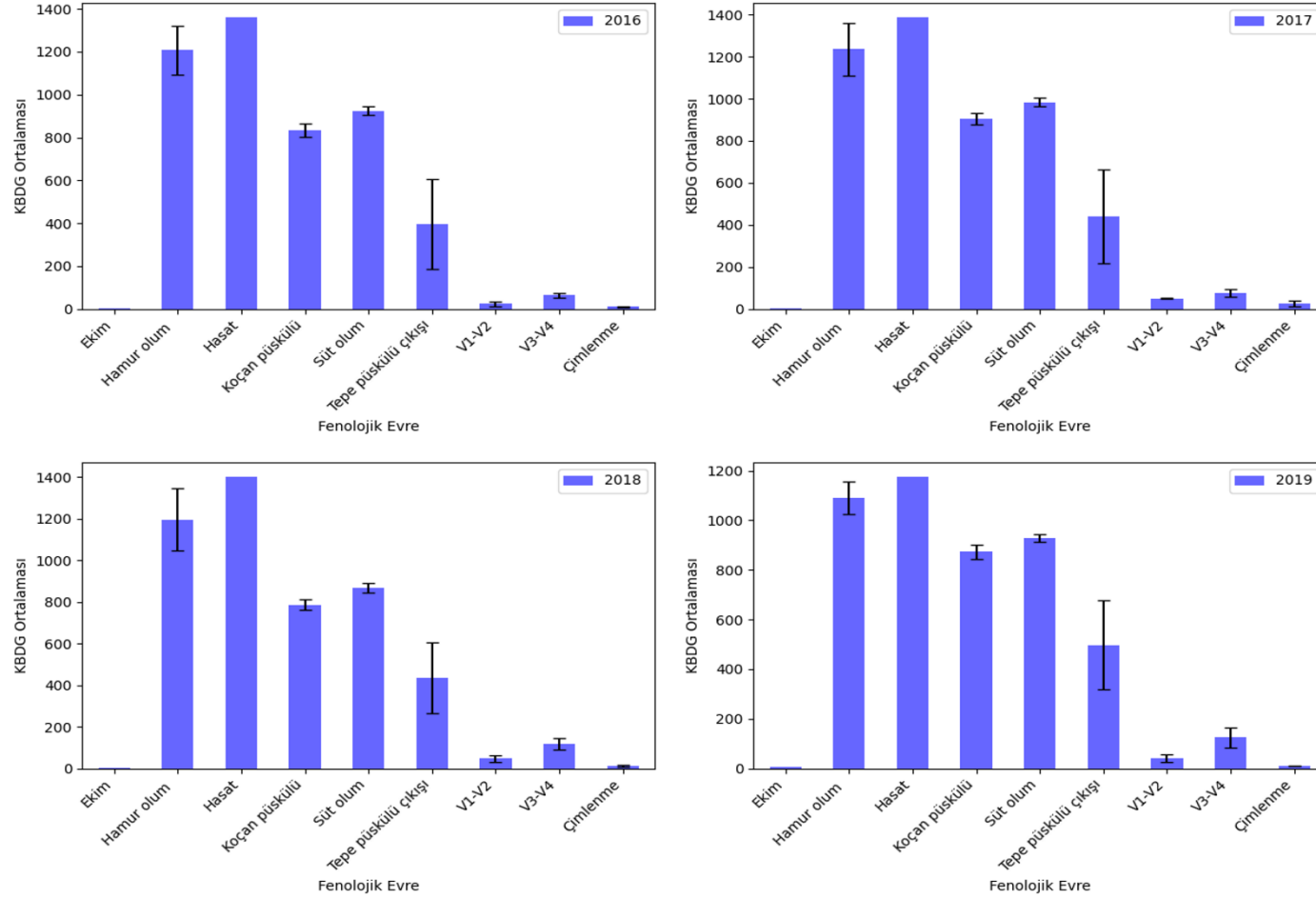
	Yıllar													
Fenolojik Evreler	2016/2017		2017/2018		2018/2019		2019/2020		2020/2021		2021/2022		2022/2023	
	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG	PD	KBDG
Çimlenme	0.01	16.10	0.00	9.80	0.01	12.50	0.00	5.10	0.01	13.40	0.01	11.10	0.01	10.70
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.06	145.60	0.03	81.70	0.05	110.90	0.04	106.30	0.05	118.80	0.03	78.20	0.03	70.70
Kardeşlenme	0.07	160.70	0.03	92.10	0.05	125.60	0.05	118.20	0.05	132.10	0.03	82.00	0.03	80.74
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.18	410.60	0.24	650.60	0.26	644.70	0.23	556.70	0.25	645.60	0.25	601.10	0.26	625.60
Sapa kalkma	0.18	410.60	0.24	657.60	0.26	647.00	0.24	563.60	0.25	647.30	0.25	601.10	0.26	631.70
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.19	422.70	0.28	764.70	0.30	723.00	0.27	642.80	0.28	714.50	0.25	602.10	0.30	726.90
Başaklanma	0.19	422.70	0.29	777.60	0.30	731.00	0.27	645.80	0.28	714.50	0.25	602.10	0.31	739.40
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Çiçeklenme	0.43	960.20	0.60	1613.60	0.56	1379.80	0.55	1321.80	0.57	1471.00	0.56	1340.90	0.56	1346.10
Süt olum	0.43	974.20	0.60	1630.00	0.57	1396.30	0.56	1334.40	0.58	1491.40	0.56	1361.40	0.56	1361.00
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.68	1533.60	0.74	2004.00	0.74	1803.30	0.70	1662.00	0.71	1817.80	0.74	1780.60	0.70	1692.90
Hamur olum	0.69	1550.80	0.75	2022.20	0.74	1820.70	0.70	1677.70	0.71	1835.00	0.75	1800.40	0.71	1708.20
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.79	1772.00	0.83	2243.60	0.84	2042.80	0.80	1902.80	0.81	2082.00	0.84	2019.60	0.80	1933.40
Döllenme	0.80	1797.00	0.84	2266.60	0.84	2058.90	0.81	1924.90	0.82	2106.40	0.85	2038.30	0.81	1954.70
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erme	0.85	1913.40	0.88	2372.90	0.89	2164.20	0.86	2044.70	0.86	2211.30	0.89	2136.30	0.86	2093.70
Fizyolojik olum	0.86	1933.80	0.89	2393.20	0.89	2185.60	0.87	2067.30	0.87	2231.10	0.89	2151.20	0.87	2111.00
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.00	2251.40	1.00	2704.10	1.00	2444.10	1.00	2381.90	1.00	2577.20	1.00	2410.90	1.00	2422.50

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de silajlık mısır bitkisinin her bir fenolojik evredeki KBDG toplamalarının evrelerdeki ortalama KBDG değerlerinden sapmaları verilmektedir. İncelenen yıllar boyunca gözlemlenen sıcaklık toplamalarının standart sapmaları, belirli evrelerdeki sıcaklık değişkenliğinin derecesini ortaya koymaktadır. Örneğin, incelenen tüm yıllarda “Tepe püskülü çıkışı” ve “Hamur olum” evrelerinde gözlemlenen standart sapmaların yüksek olması, sıcaklık toplamalarının bu evrelerde dalgalanmalar gösterdiğine işaret etmektedir. 2018 ve 2022 yıllarında “Tepe püskülü çıkışı” evresinde diğer yıllara göre gözlemlenen daha düşük standart sapma, bu evredeki sıcaklık toplamının ortalama değere göre daha stabil hale geldiğini göstermektedir.

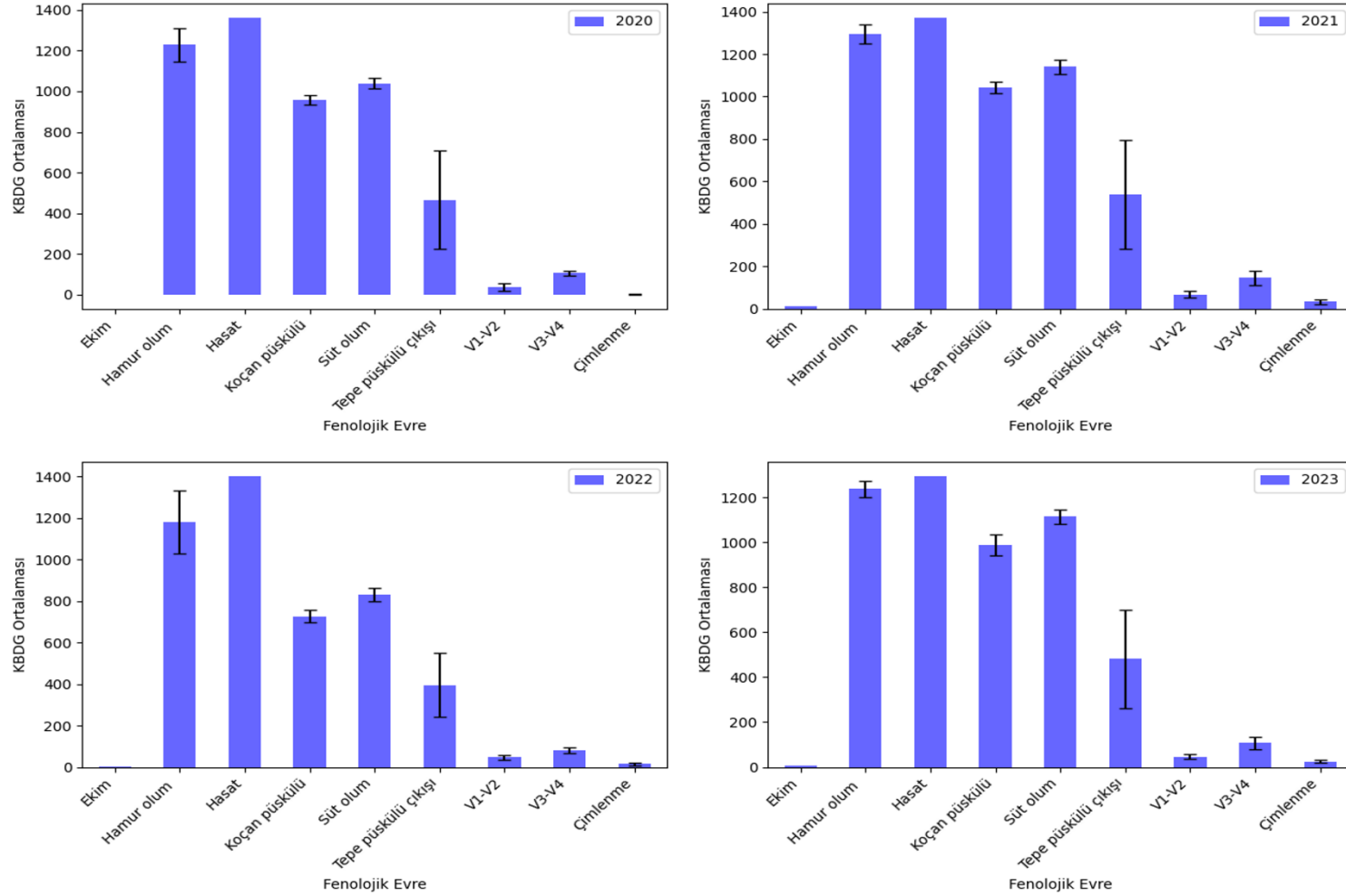
Fenolojik evrelerde KBDG değerlerinin ortalamadan yüksek sapmalara sahip olması evrelerin uzunluğu ile de ilişkilidir. “Çimlenme”, “V1-V2”, “V3-V4” gibi daha kısa süren fenolojik evrelerde sapmaların daha düşük olmasının sebebi evreler süresince sıcaklık toplamalarının geniş bir aralıkta olmamasıdır.

EK 2’deki grafikler incelendiğinde, 2018 ve 2022 yılları için “Tepe püskülü çıkışı” evresinde standart sapmada görülen düşüş, bu evrenin uzunluğunun ilgili yıllarda daha kısa olmasından dolayı gözlemlenmiştir.

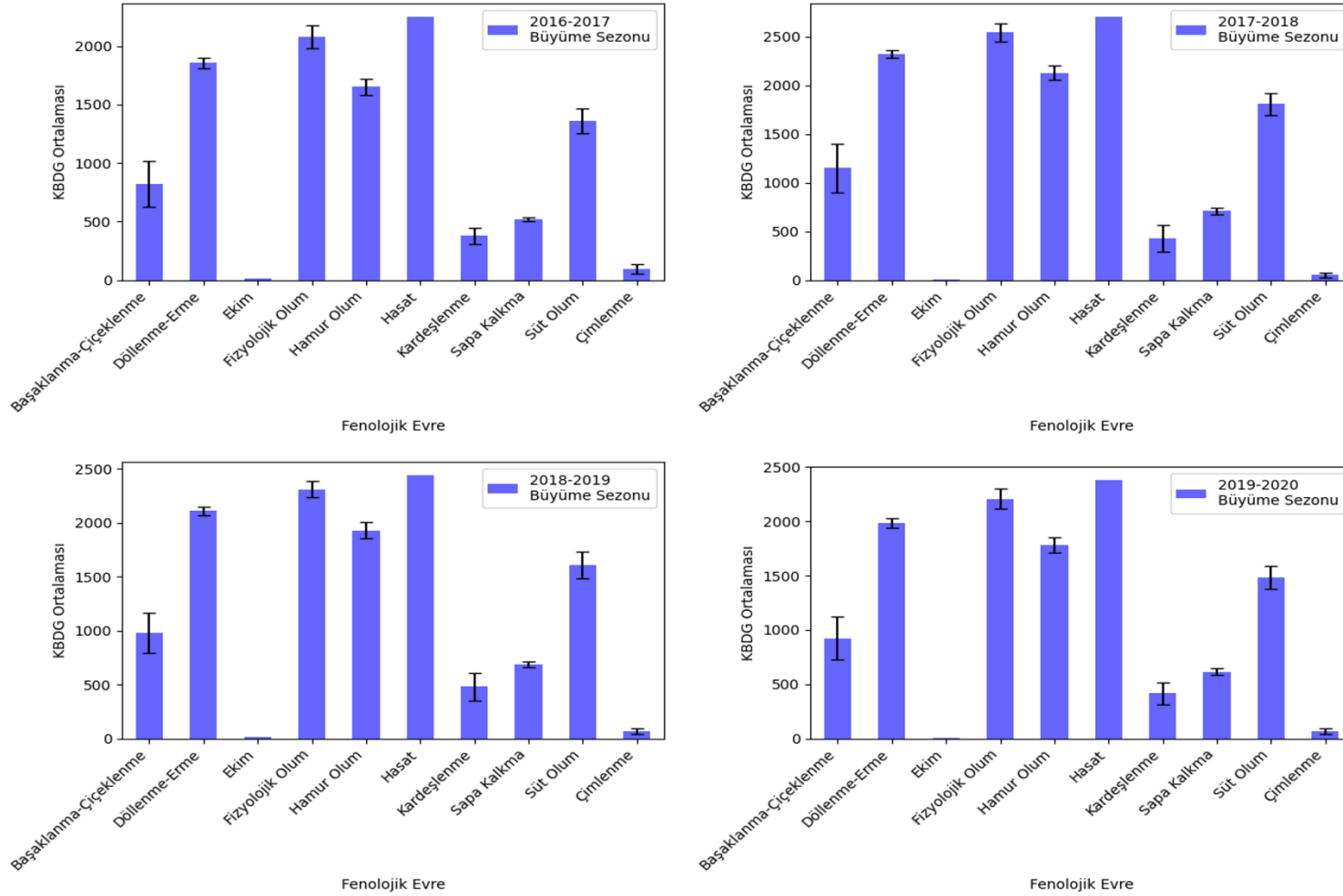
Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 incelendiğinde silajlık mısır bitkisine benzer şekilde, buğday bitkisinin fenolojik evrelerine ait KBDG değerlerindeki en yüksek sapmalar EK 3’ten de görüldüğü üzere en uzun evreler olan “Kardeşlenme” ve “Başaklanma-çiçeklenme” dir. Bu evrelerdeki sapmaların yüksek olması evrelerdeki sıcaklık toplamalarının geniş bir aralıkta değiştiğini işaret etmektedir. “Fizyolojik olum” evresindeki yüksek sapmalar ise hasat öncesinde sıcaklık toplamalarının önemli ölçüde değişkenlik gösterdiğini göstermektedir.



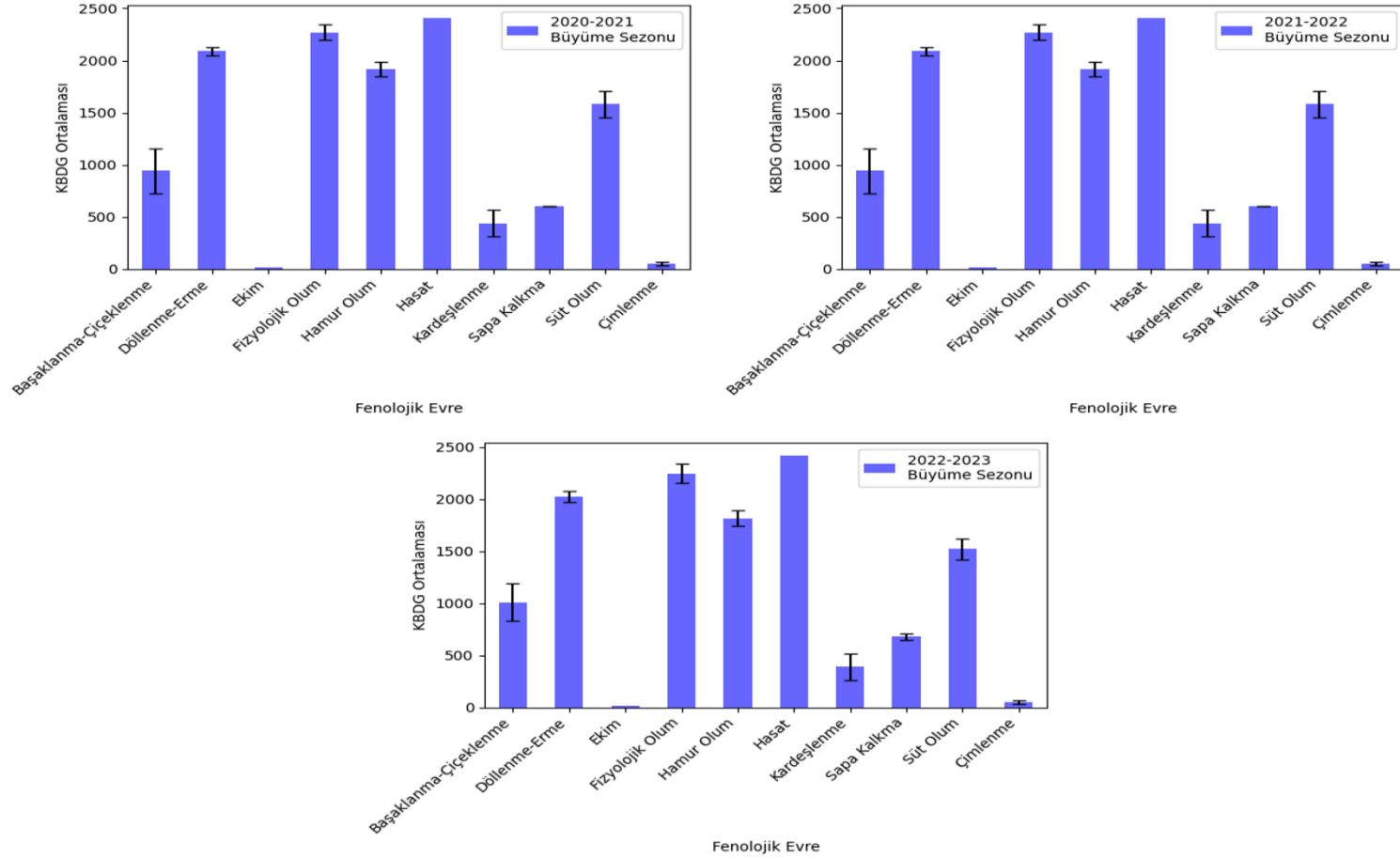
Şekil 4.1 Silajlık mısır bitkisi 2016-2019 yılları fenolojik evrelerdeki KBDG değerlerinin dağılımı



Şekil 4.2 Silajlık mısır bitkisi 2020-2023 yılları fenolojik evrelerdeki KBDG değerlerinin dağılımı



Şekil 4.3 Buğday bitkisinin 2016-2020 yılları büyüme sezonları boyunca fenolojik evrelerdeki KBDG değerlerinin dağılımı



Şekil 4.4 Buğday bitkisinin 2020-2023 yılları büyüme sezonları boyunca fenolojik evrelerdeki KBDG değerlerinin dağılımı

4.2 Termal Sezon Uzunluğunun (TSU) Trendi

Silajlık mısır ve buğday bitkilerinin KBDG değerlerine göre belirlenen termal sezonu uzunluğuna ait Mann-Kendall trend analizi sonuçları Çizelge 4.3'te, verilerin dağılımı ise Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Mann-Kendall trend analizi sonuçları

	Kendall Tau	p-değeri	Anlamlılık Düzeyi	Trend
Silajlık mısır	0.071	0.674	0.05	yok
Buğday	0.006	0.972	0.05	yok

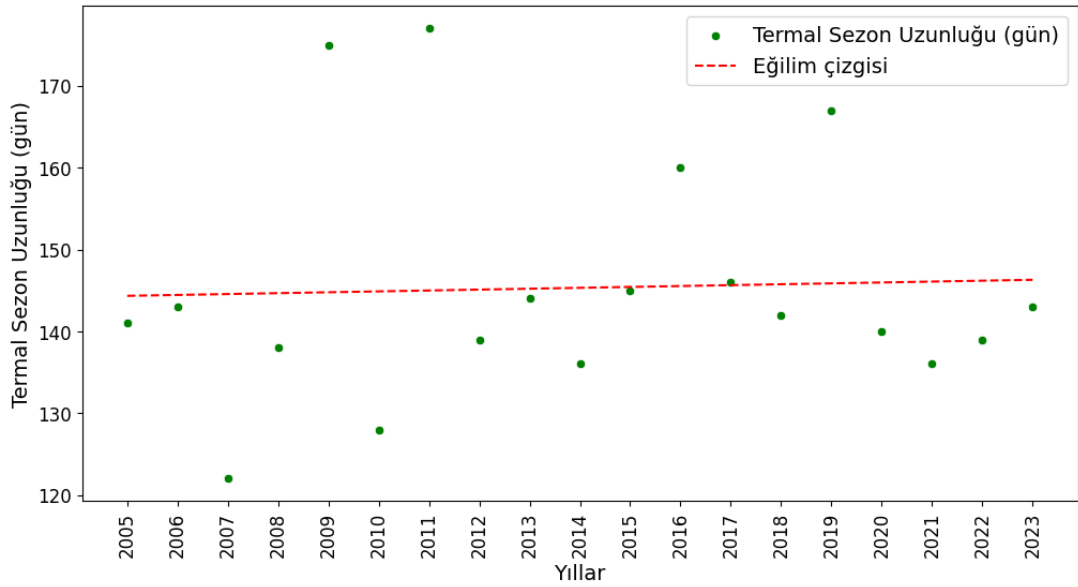
Mann-Kendall trend analizi sonuçlarına göre, her iki bitki için de TSU'da anlamlı bir trend gözlenmemiştir. Silajlık mısır için Kendall Tau değeri 0.071 ve p-değeri 0.674 olarak belirlenmiştir; bu sonuçlar, %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir trendin olmadığını göstermektedir. Buğday için ise Kendall Tau değeri 0.006, ve p-değeri 0.972'dir; bu da istatistiksel olarak anlamlı bir değişim olmadığını ifade etmektedir.

Robeson (2002) yaptığı çalışmada Illinois eyaletinde 1906-1997 döneminde günlük hava sıcaklığı değerlerinden yararlanarak TSU'daki eğilimleri incelemiştir. Çalışmasında BSB ve BSS için son don ve ilk don tarihlerini kullanmıştır. Çalışma bulgularının TSU'nun 20. Yüzyıl boyunca kabaca bir hafta uzadığını bildirmiştir. Dong vd. (2012) 1960-2009 yılları arasında Tibet Platosundaki meteoroloji istasyonlarından alınan günlük ortalama sıcaklık ölçümlerine dayanarak TSU'nun trendini incelemiştir. Çalışma bulgularının son 50 yıl boyunca, bölgesel ortalama TSU'nun 3.29 gün/on yıl oranında önemli bir artış gösterdiği ve bu değişimin TSU'nun daha erken tarihlerde başlaması ile sonuçlandığı bildirilmiştir.

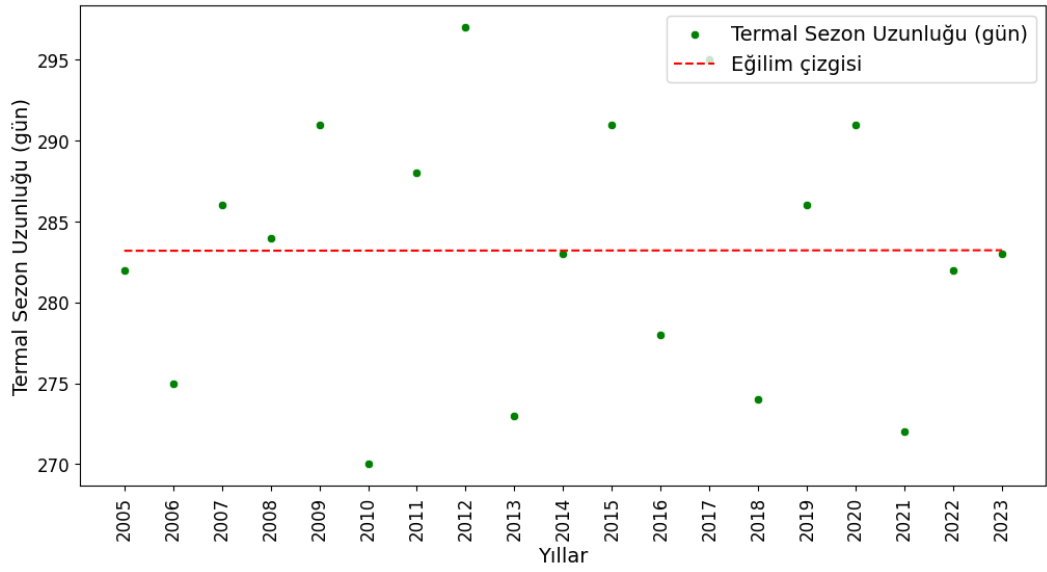
Liu vd. (2020) yaptıkları çalışmada 1981-2010 yılları için Çin'de başlıca mısır yetiştirilen bölgelerdeki meteoroloji istasyonlarından alınan ortalama sıcaklık değerleri ile TSU'daki değişimleri incelemiştir. TSU'nun araştırma alanı genelinde uzadığını ve ortalama

sıcaklık değerlerinin yüksek olduğu yıllarda TSU'nun azaldığını bildirmişlerdir. Kukul ve Irmak (2018) çalışmalarında 1900-2014 yıllar için kıta ABD'si genelinde mısır, soya fasulyesi, sorgum, ilkbahar buğdayı, kış buğdayı ve pamuk bitkileri için ilk don (BSS), son don (BSB) ve BSU trendini BDG'ler ile değerlendirmişlerdir. Çalışma bulgularında son don tarihlerinin 5.4 gün/ yüzyıl daha geç, ilk don tarihlerinin 6.9 gün/yüzyıl daha erken gerçekleştiği ve TSU'nun yıllık 50 °C/yüzyıl oranında arttığını bildirmişlerdir.

İki bitki için de TSU'da trend görülmemesinin sebebi, analiz edilen dönemin (2005-2023) nispeten kısa bir süre olması ve iklim değişikliğinin TSU üzerindeki etkisini belirgin şekilde ortaya koymakta yeterli olmamasıdır.



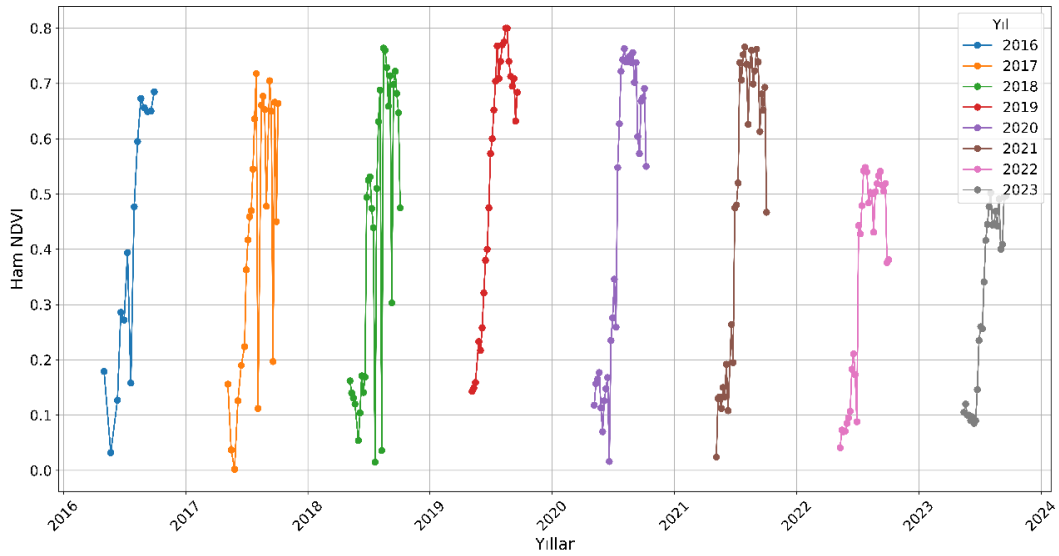
Şekil 4.5 Silajlık mısır termal sezon uzunluğu trendi



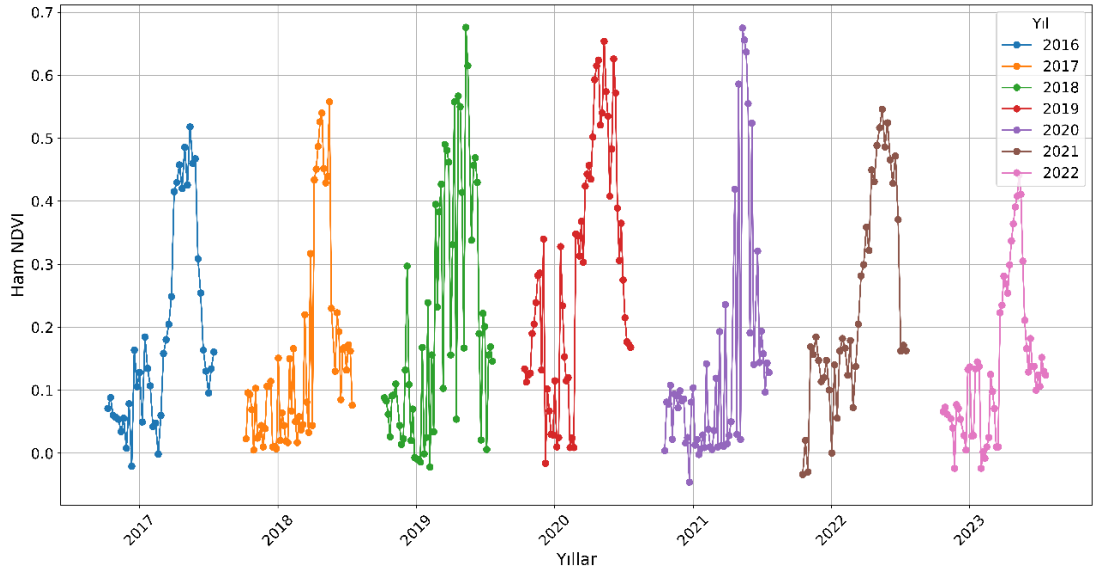
Şekil 4.6 Buğday bitkisi termal sezon uzunluğu trendi

4.3 NDVI zaman serileri

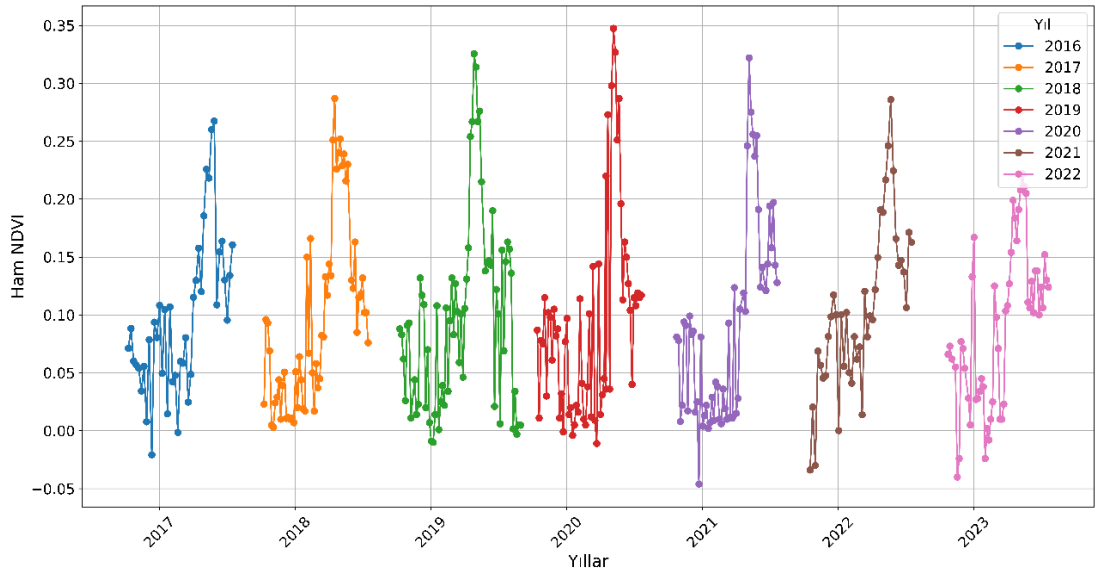
Silajlık mısır ve buğday (sulamaya ve yağışa dayalı yetiştiricilik sınıfları) bitkileri için 2016-2023 yılları büyüme sezonlarına ait ham NDVI değerleri Şekil 4.7-4.9'da verilmiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 incelendiğinde özellikle kış aylarında buğday bitkisinin NDVI değerlerinde dalgalanmaların olduğu görülmüştür.



Şekil 4.7 Silajlık mısır bitkisi 2016-2023 yılları büyüme sezonlarına ait ham NDVI değerleri

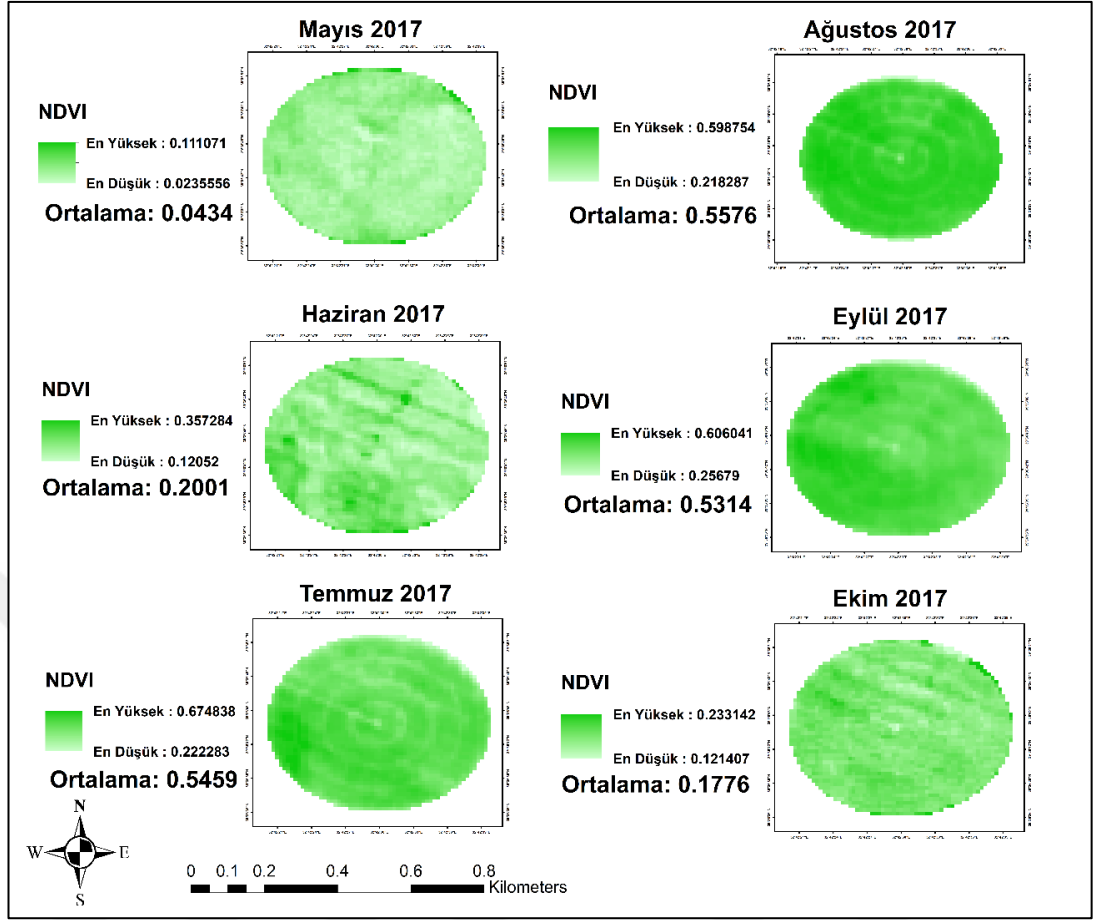


Şekil 4.8 Buğday bitkisi (sulamaya dayalı yetiştiricilik) 2016-2023 yılları büyüme sezonlarına ait ham NDVI değerleri

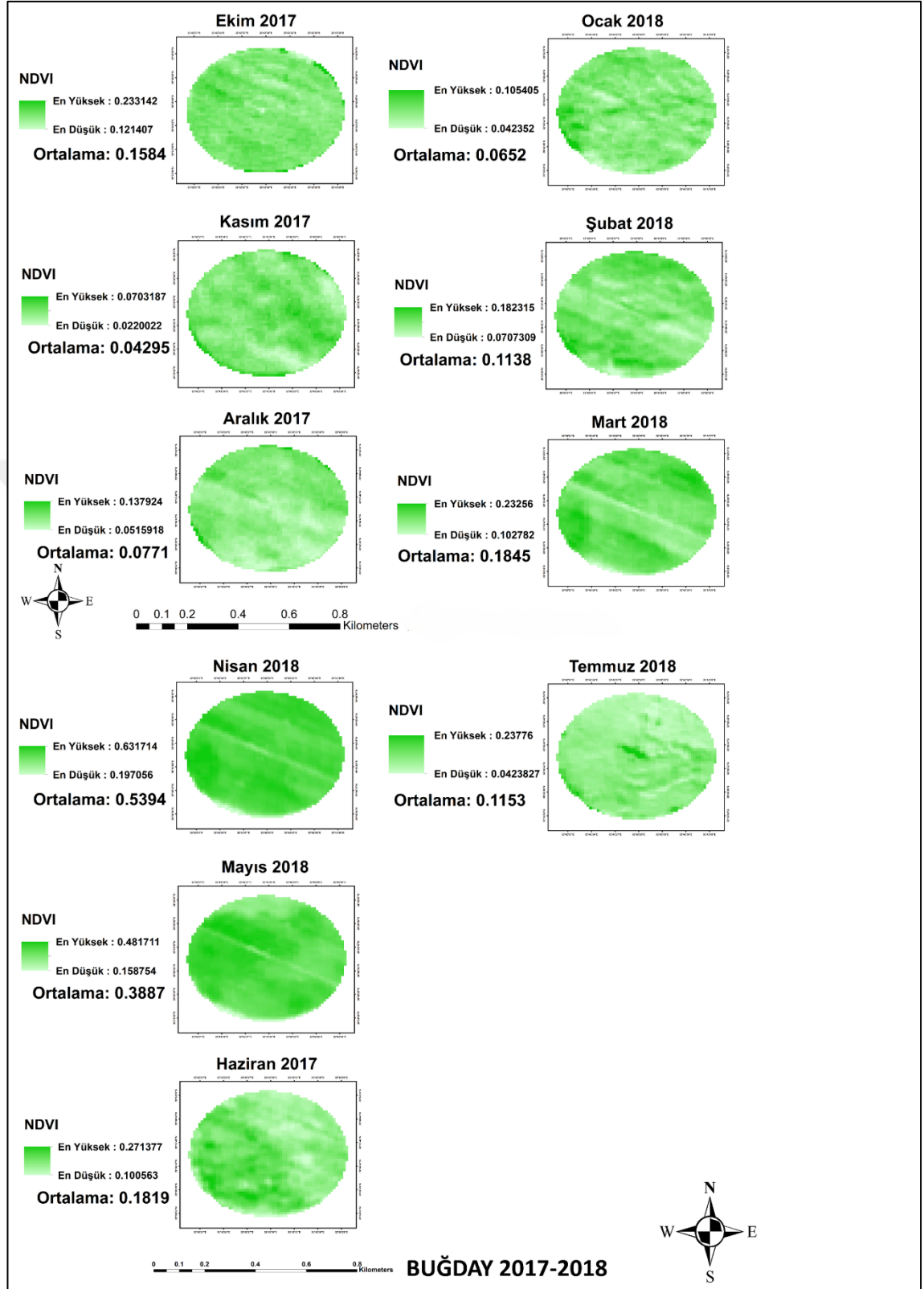


Şekil 4.9 Buğday bitkisi (yağışa dayalı yetiştiricilik) 2016-2023 yılları büyüme sezonlarına ait ham NDVI değerleri

Silajlık mısır ve buğday (yağışa dayalı yetiştiricilik) bitkileri NDVI haritalarına bir örnek olarak 2017 yılı aylık NDVI haritaları Şekil 4.10 ve 4.11’de verilmiştir. 2016-2023 yılları büyüme sezonları için yıllık NDVI haritaları EK 1’de verilmiştir.



Şekil 4.10 Silajlık mısır bitkisi 2017 büyüme mevsimi NDVI haritası



Şekil 4.11 Buğday bitkisi (sulamaya dayalı yetiştiricilik) 2017-2018 büyüme mevsimi NDVI haritası

4.4 Veri önışleme sonuçları

Silajlık mısır ve buğday bitkilerinin 2016-2023 yılları NDVI zaman serilerinin düzeltilmesinde kullanılan Savitzky-Golay, Lowess ve Spline Smoothing algoritmalarının performans göstergeleri Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.4 incelendiğinde Savitzky-Golay algoritmasının mısır üzerinde NDVI zaman serilerini düzeltmede, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında genel olarak daha yüksek R^2 değerleri, daha düşük RMSE değerleri ve daha yüksek SNR değerleri ile daha başarılı olduğu görülmektedir. Özellikle 2019-2023 yılları arasında yöntemin üstünlüğü belirginleşmiştir. Bu performans göstergeleri, Savitzky-Golay filtresinin veri setindeki gürültüyü azaltırken verinin temel yapısını koruyarak daha kesin ve güvenilir sonuçlar sağladığını göstermektedir.

Çizelge 4.4 Silajlık mısır bitkisinin düzeltme algoritmaları performans göstergeleri

Yıllar	Metot	Performans Göstergeleri		
		R^2	RMSE	SNR
2016	Lowess	0.87	0.09	8.19
	Savitzky-Golay	0.92	0.07	10.31
	Spline	0.88	0.09	8.37
2017	Lowess	0.77	0.12	6.31
	Savitzky-Golay	0.78	0.12	5.63
	Spline	0.85	0.10	7.25
2018	Lowess	0.73	0.13	5.55
	Savitzky-Golay	0.78	0.12	5.63
	Spline	0.89	0.08	8.66
2019	Lowess	0.94	0.06	11.88
	Savitzky-Golay	0.95	0.06	13.09
	Spline	0.90	0.08	9.03
2020	Lowess	0.92	0.07	10.01
	Savitzky-Golay	0.96	0.05	13.56
	Spline	0.90	0.08	9.67
2021	Lowess	0.92	0.08	10.44
	Savitzky-Golay	0.96	0.05	13.76
	Spline	0.91	0.08	9.76

Çizelge 4.4 Silajlık mısır bitkisinin düzeltme algoritmaları performans göstergeleri (devam)

Yıllar	Metot	Performans Göstergeleri		
		R^2	RMSE	SNR
2022	Lowess	0.92	0.06	10.21
	Savitzky-Golay	0.95	0.05	12.51
	Spline	0.82	0.08	5.95
2023	Lowess	0.89	0.05	8.26
	Savitzky-Golay	0.94	0.04	11.99
	Spline	0.74	0.08	3.93

Çizelge 4.5 ve 4.6 incelendiğinde Savitzky-Golay algoritmasının buğday bitkisi üzerinde NDVI zaman serisi değerlerini düzeltmede, diğer yöntemlerle (Lowess ve Spline) karşılaştırıldığında genel olarak performansı değişkenlik göstermektedir. Ancak özellikle sulamaya dayalı yetiştiricilikte, yüksek R^2 değerleri, düşük RMSE değerleri ve yüksek SNR değerleri ile diğer yöntemlerden daha başarılı olduğu görülmektedir. Örneğin, 2019/2020 dönemi için Savitzky-Golay metodu R^2 değeri 0.96, RMSE değeri 0.04 ve SNR değeri 18.68 ile en iyi performansı sergilemiştir.

Buğday yağışa dayalı yetiştiricilikte ise Savitzky-Golay algoritmasının performansı zaman içinde dalgalanmalar göstermiş, ancak 2022/2023 döneminde R^2 değeri 0.87, RMSE değeri 0.02 ve SNR değeri 12.55 ile yine yüksek bir performans sergilemiştir. Bu sonuçlar, Savitzky-Golay algoritmasının buğday bitkisinin NDVI zaman serilerinin düzeltilmesinde, özellikle belirli dönemlerde, diğer yöntemlere göre daha etkili sonuçlar verebildiğini göstermektedir.

Çizelge 4.5 Buğday (sulamaya dayalı yetiştiricilik) bitkisi düzeltme algoritmaları performans göstergeleri

Yıllar	Metot	Performans Göstergeleri		
		R ²	RMSE	SNR
2016/2017	Lowess	0,95	0,03	16,42
	Savitzky-Golay	0,96	0,03	17,69
	Spline	0,91	0,05	13,91
2017/2018	Lowess	0,82	0,06	10,57
	Savitzky-Golay	0,84	0,06	10,92
	Spline	0,93	0,04	14,61
2018/2019	Lowess	0,60	0,12	7,16
	Savitzky-Golay	0,64	0,11	7,69
	Spline	0,96	0,04	16,71
2019/2020	Lowess	0,88	0,06	14,29
	Savitzky-Golay	0,92	0,05	15,85
	Spline	0,96	0,04	18,68
2020/2021	Lowess	0,92	0,07	10,01
	Savitzky-Golay	0,95	0,04	14,87
	Spline	0,73	0,09	7,82
2021/2022	Lowess	0,92	0,05	15,38
	Savitzky-Golay	0,93	0,04	16,00
	Spline	0,92	0,05	15,38
2022/2023	Lowess	0,91	0,04	13,76
	Savitzky-Golay	0,94	0,03	15,76
	Spline	0,88	0,04	12,83

Çizelge 4.6 Buğday (yağışa dayalı yetiştiricilik) bitkisi düzeltme algoritmaları performans göstergeleri

Yıllar	Metot	Performans Göstergeleri		
		R ²	RMSE	SNR
2016/2017	Lowess	0,79	0,03	11,35
	Savitzky-Golay	0,81	0,03	11,76
	Spline	0,80	0,03	11,74
2017/2018	Lowess	0,87	0,03	12,89
	Savitzky-Golay	0,90	0,02	13,83
	Spline	0,89	0,02	13,57
2018/2019	Lowess	0,82	0,03	11,30
	Savitzky-Golay	0,83	0,03	11,56
	Spline	0,91	0,02	14,16

Çizelge 4.6 Buğday (yağışa dayalı yetiştiricilik) bitkisi düzeltme algoritmaları performans göstergeleri

Yıllar	Metot	Performans Göstergeleri		
2019/2020	Lowess	0,61	0,05	7,63
	Savitzky-Golay	0,71	0,04	8,96
	Spline	0,67	0,05	8,35
2020/2021	Lowess	0,84	0,03	11,46
	Savitzky-Golay	0,85	0,03	11,57
	Spline	0,81	0,04	10,57
2021/2022	Lowess	0,85	0,03	13,47
	Savitzky-Golay	0,77	0,03	11,50
	Spline	0,65	0,04	9,66
2022/2023	Lowess	0,82	0,03	11,39
	Savitzky-Golay	0,87	0,02	12,55
	Spline	0,72	0,04	9,43

Bu sonuçlar, Savitzky-Golay algoritmasının hem silajlık mısır hem de buğday bitkisinde NDVI zaman serisi verilerinin düzeltilmesi için etkili bir yöntem olduğunu desteklemekte ve bu algoritmanın bitki sağlığı ve verimlilik analizlerinde güvenilir bir araç olarak kullanılmasının (Liu ve Zhan, 2016, Ren vd. 2017, Qian vd. 2019) nedenlerini ortaya koymaktadır. Savitzky-Golay algoritmasının bitki indekslerinin zaman serisi analizinde genel olarak başarılı sonuçlar verdiği ve bu alanda yaygın olarak tercih edildiği literatürde de (Bian vd. 2010, Cao vd. 2018, Chen vd. 2023) belirtilmektedir. Bian vd. 2010) çalışmalarında MODIS NDVI zaman serilerini yeniden yapılandırmak için Ortalama Değer İterasyonu (MVI), Fourier ve Savitzky-Golay yöntemlerinin performanslarını karşılaştırmıştır. Yöntemlerin performansları netlik indeksi (g) ile değerlendirilmiştir. Fourier yönteminde g değeri 0.021, MVI yönteminde 0.03 ve Savitzky-Golay yönteminde ise 0.039 olarak bulunmuştur. Savitzky-Golay yöntemine dayalı yeniden yapılandırma yönteminin hem görüntü görsel efektlerinde hem de NDVI zamansal profillerinde daha iyi bir sonuç verdiği bildirilmiştir. Cao vd. (2018) çalışmalarında MODIS NDVI zaman serilerindeki gürültülü verileri elimine etmek için Savitzky- Golay, Asimetrik Gaussian, DLF ve Hants yöntemlerini kullanmış ve algoritmaların performansını değerlendirmiştir. Çalışma bulgularında Savitzky-Golay algoritmasının en iyi sonucu verdiği bildirilmiştir. Çalışmalarında ayrıca bu yöntemin geliştirilerek yeni bir modifikasyonu olan STSG (Spatiotemporal-Savitzky-Golay) algoritmasının kullanımının gürültülü veri azaltımında

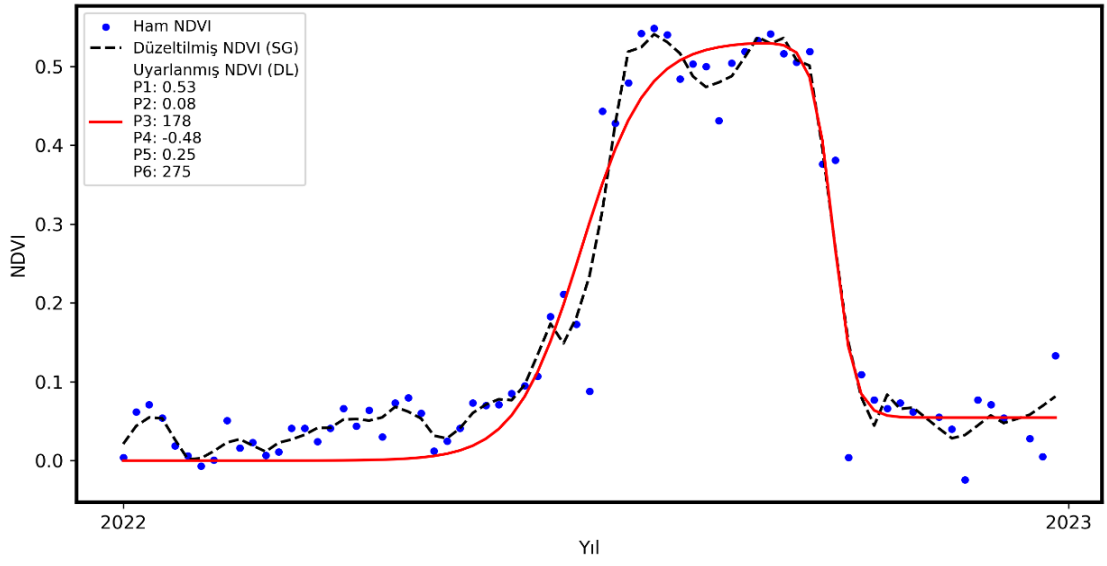
daha iyi sonuçlar verdiğini de rapor etmişlerdir. Bu nedenle, çalışmada Savitzky-Golay filtresinin seçilmiş olması, istatistiksel performans göstergeleriyle ve algoritmanın teorik avantajlarıyla tutarlı bulunmuştur.

Savitzky-Golay algoritması ile düzeltilen NDVI zaman serileri DLF ile uyarlanmış. Silajlık mısır ve buğday (sulamaya ve yağışa dayalı yetiştiricilik) bitkilerinin NDVI zaman serilerinin DLF ile uyarlanmasında elde edilen sonuçlara bir örnek olarak 2022 büyüme mevsimi eğrileri Şekil 4.12-14'te verilmiştir. 2016-2023 yıllarına ait eğriler ise EK 4'te verilmiştir.

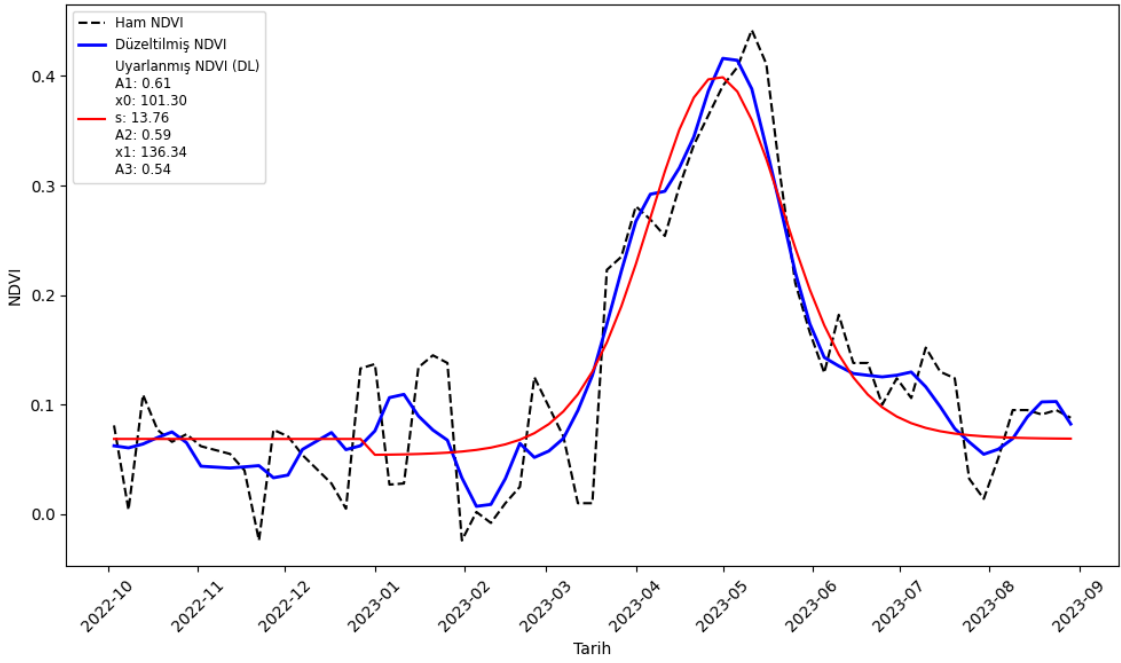
Her üç şekilde de DLF ile uyarlanmış kırmızı eğri, mevsimsel bitki aktivitesinin genel eğilimini temsil ederken, ham ve Savitzky- Golay algoritması ile düzeltilmiş verilere kıyasla daha pürüzsüz ve gürültüden arındırılmış bir profil sunmaktadır. Bu, DLF yönteminin, atmosferik gürültü ve bulutluluk gibi rastgele hata kaynaklarını filtreleyerek bitki örtüsü fenolojisinin daha tutarlı bir göstergesini sağlamada etkili olduğunu göstermektedir.

DLF'nin NDVI zaman serisi analizindeki uygulaması, fenolojik değişiklikleri ve bitki büyümesinin mevsimsel dinamiklerini doğru bir şekilde yakalamadaki etkinliğini gösteren çalışmalar literatürde kapsamlı şekilde yer almıştır. Örneğin, Cai vd. (2017) tarafından yürütülen bir çalışmada, MODIS'ten elde edilen NDVI verilerinin işlenmesi için DLF fonksiyonu da dahil olmak üzere çeşitli uyarlama yöntemleri karşılaştırılmıştır. Araştırma bulgularında DLF'nin başarılı sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

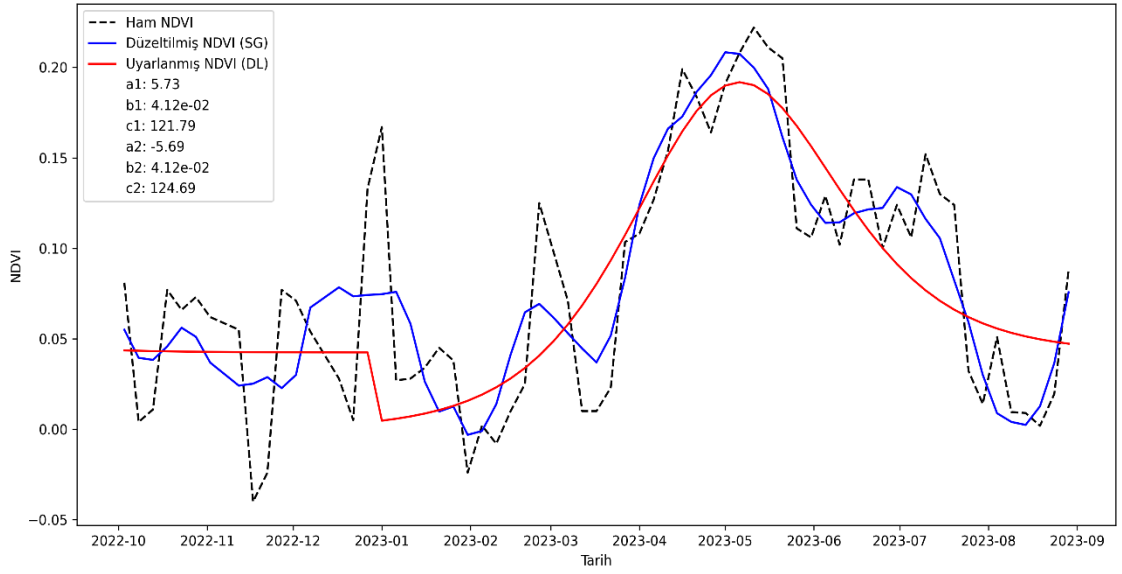
Yang vd. (2019) çalışmasında, Sentinel-2'den NDVI zaman serisi verilerini yeniden yapılandırmak için DLF'yi kullanmıştır, yöntemin özellikle bulutsuz veri noktalarını tutmada ve aykırı değerleri belirlemede etkili olduğunu bildirmiştir. Ghamghami vd. (2019) çalışmalarında Landsat-7 NDVI zaman serilerindeki gürültülü verileri filtrelemek amacıyla DLF algoritmasını kullanmıştır. Çalışma bulgularında algoritmanın zaman serilerini uyarlarken başarılı performans gösterdiği ve bitki fenolojisini yakalamada iyi sonuç verdiği bildirilmiştir.



Şekil 4.12 Silajlık mısır bitkisi 2022 yılı uyarlanan NDVI zaman serisi eğrisi



Şekil 4.13 Buğday bitkisi (sulamaya dayalı yetiştiricilik) 2022 yılı uyarlanan NDVI zaman serisi eğrisi



Şekil 4. 14 Buğday bitkisi (yağışa yetiştiricilik) 2022 yılı uyarlanan NDVI zaman eğrisi

DLF ile uyarlanan NDVI değerlerinden $NDVI_{oranı}$ (Eşitlik 16) değerleri BSB, BSS ve fenolojik devrelerin tahmininde RF algoritmasında kullanılmak üzere elde edilmiştir.

4.5 Fenolojik Gelişim (PD) ve $NDVI_{oranı}$ korelasyonu

$NDVI_{oranı}$ değerleri ile PD değerlerinin istatistiksel ilişkisi, yaygın metrikler olan r ve R^2 ile değerlendirilmiş, sonuçlar Çizelge 4.7-4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.7 Silajlık mısır PD ve $NDVI_{oranı}$ korelasyonu

Yıl	Pearson Korelasyon Katsayısı (r)	Determinasyon Katsayısı (R^2)
2016	0.992	0.983
2017	0.789	0.622
2018	0.993	0.986
2019	0.842	0.709
2020	0.945	0.893
2021	0.928	0.861
2022	0.874	0.765
2023	0.980	0.959

Çizelge 4.7 incelendiğinde silajlık mısırın fenolojik gelişiminin ve büyüme evrelerinin takibinde NDVI oranlarının etkili bir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. 2017 ve 2019 yıllarında NDVI_{oranı} değerleri PD ile nispeten daha düşük korelasyon göstermiştir. Özellikle yüksek korelasyonlu yıllarda, bu oranlar tarımsal yönetimde ve hasat zamanlamasında kritik kararlar alınırken değerli bilgiler sağlayabilir.

Çizelge 4.8 Buğday (sulamaya dayalı yetiştiricilik) PD ve NDVI_{oranı} korelasyonu

Yıl	Pearson Korelasyon Katsayısı (r)	Determinasyon Katsayısı (R ²)
2016	0.268	0.072
2017	0.292	0.086
2018	0.246	0.060
2019	0.438	0.192
2020	0.416	0.173
2021	0.479	0.229
2022	0.228	0.052

Çizelge 4. 9 Buğday (yağışa dayalı yetiştiricilik) PD ve NDVI_{oranı} korelasyonu

Yıl	Pearson Korelasyon Katsayısı (r)	Determinasyon Katsayısı (R ²)
2016	0.560	0.313
2017	0.563	0.317
2018	0.574	0.330
2019	0.711	0.506
2020	0.677	0.458
2021	0.622	0.387
2022	0.493	0.243

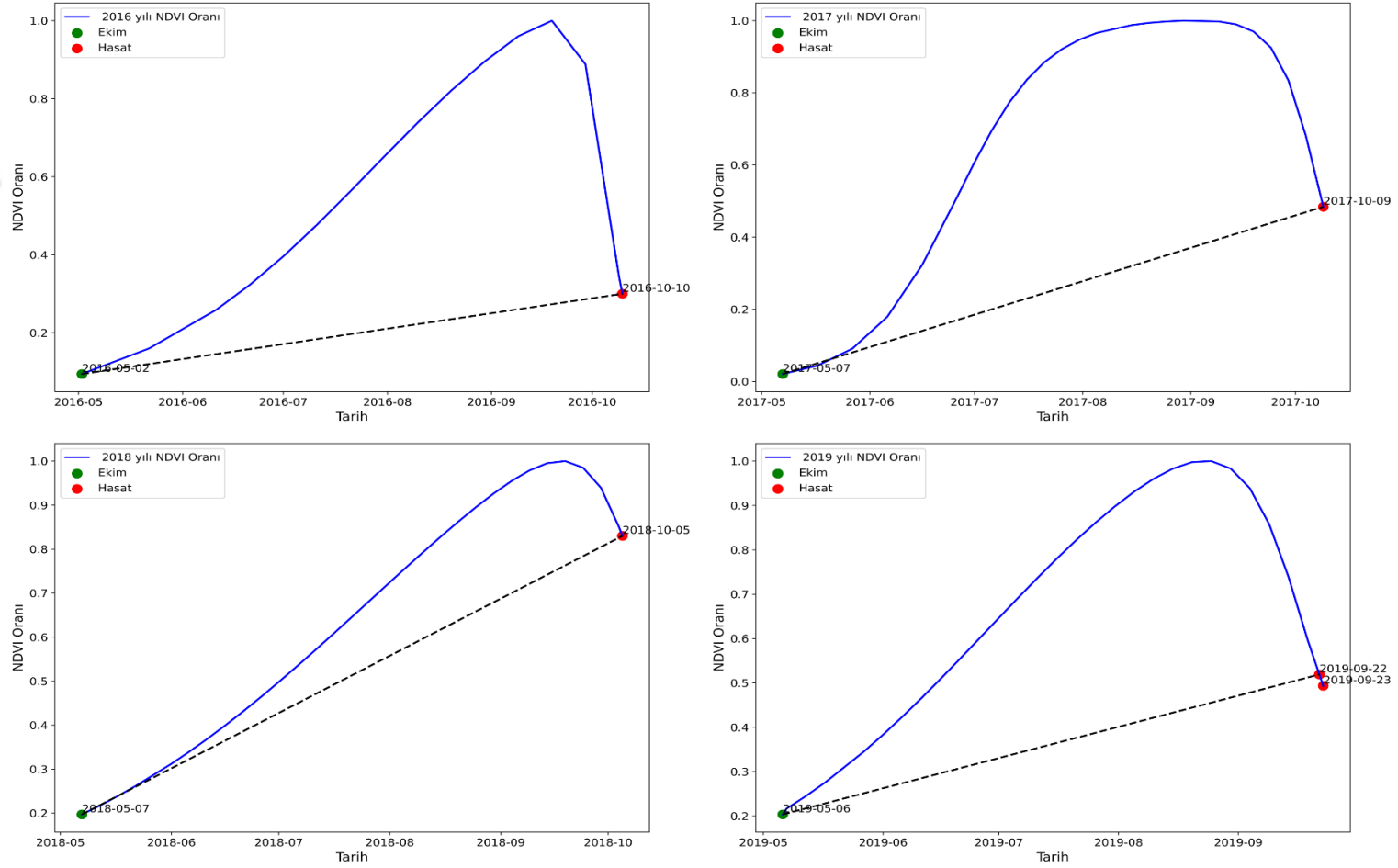
Buğday (sulamaya ve yağışa dayalı yetiştiricilik sınıfları) üzerinde yapılan analizler, NDVI oranları ve PD değerleri arasında farklı korelasyon düzeylerini ortaya koymuştur. Buğday yağışa dayalı yetiştiricilik sınıfı için elde edilen sonuçlar, genel olarak sulamaya dayalı yetiştiricilik sınıfına kıyasla daha yüksek korelasyon değerleri göstermektedir. Bu durum, buğday bitkisi yağışa dayalı yetiştiricilik sınıfı NDVI değerlerinin, bitkinin fenolojik gelişimiyle daha tutarlı bir ilişki içinde olduğunu düşündürmektedir. Ayrıca buğday bitkisi, sararmış ve olgunlaşmış haldeyken hasat edilmektedir. Bu dönemde NDVI değerleri düşük olur, çünkü bitki daha az yeşil alan ve daha düşük fotosentetik

aktiviteye sahiptir. Bu durumun, PD ile NDVI oranları arasında düşük bir korelasyonun gözlemlenmesine yol açtığı söylenebilir.

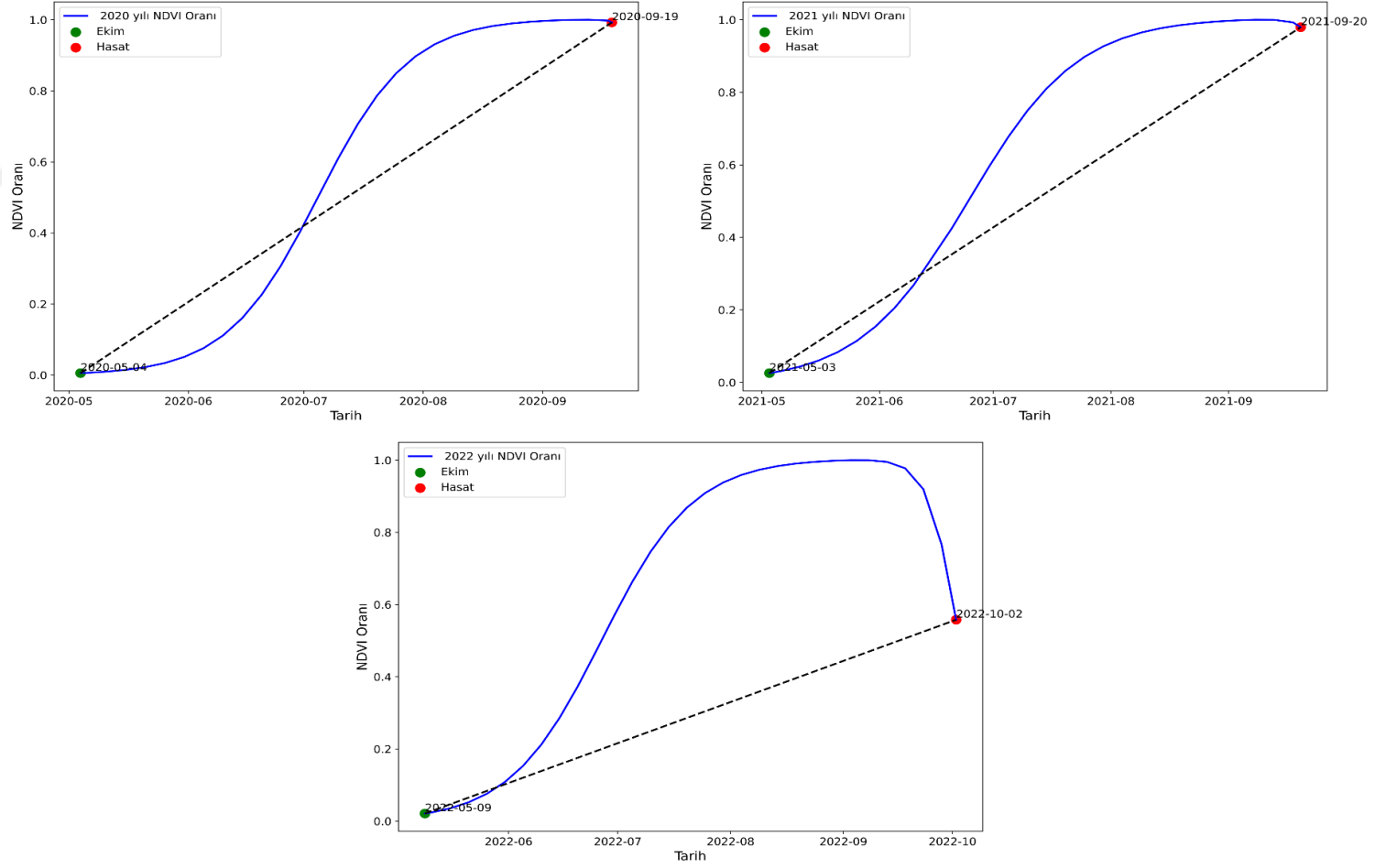
4.6 Büyüme sezonu başlangıcı ve büyüme sezonu sonunun tahmin sonuçları

BSB (ekim) ve BSS (hasat), $NDVI_{oranı}$ ve KBDG değerlerinin RF algoritmasında kullanılması ile tahmin edilmiştir. Silajlık mısır bitkisine ait 2016-2023 yılları için BSB ve BSS tahminleri Şekil 4.10-11’da verilmiştir.

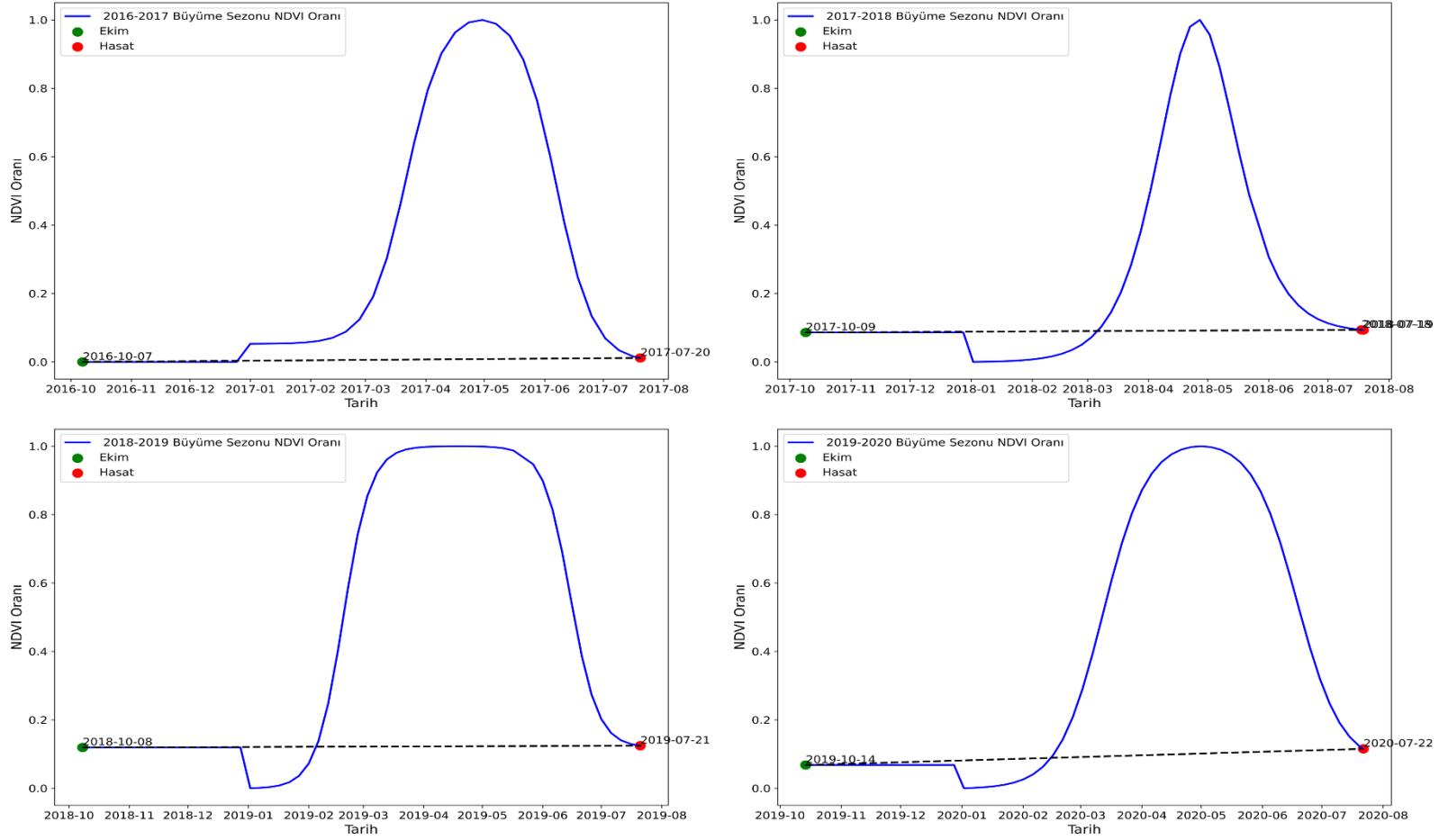
Şekil 4.15-16 incelendiğinde 2022 ve 2023 yılları hariç RF algoritmasının silajlık mısır bitkisinin BSB ve BSS tarihlerini %100 doğrulukla tahmin ettiği görülmektedir. 2022 yılında BSS tarihi hasattan bir gün öncesi (22.09.2022) ve gerçek hasat tarihi (23.09.2022) olmak üzere iki tarih olarak tahmin edilmiştir. 2023 yılında ise RF modelinde BSB tarihi “Çimlenme” evresi olarak sınıflandırılmış, BSS tarihi ise hasattan bir gün öncesi (17.09.2023) ve gerçek hasat tarihi (18.09.2023) olmak üzere iki tarih olarak tahmin edilmiştir.



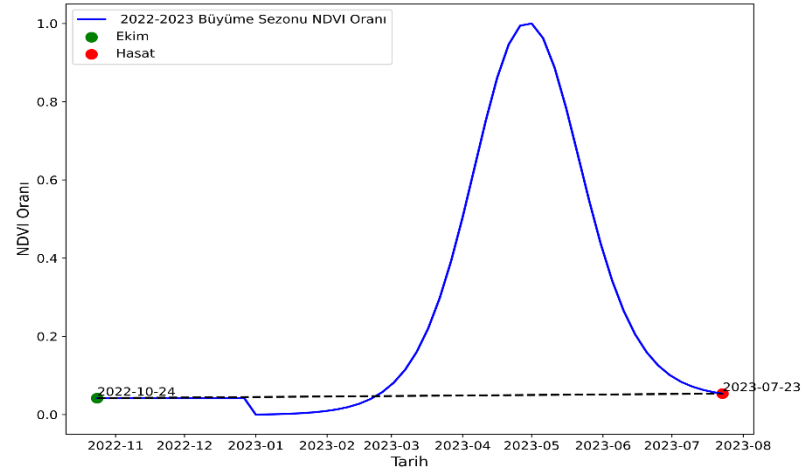
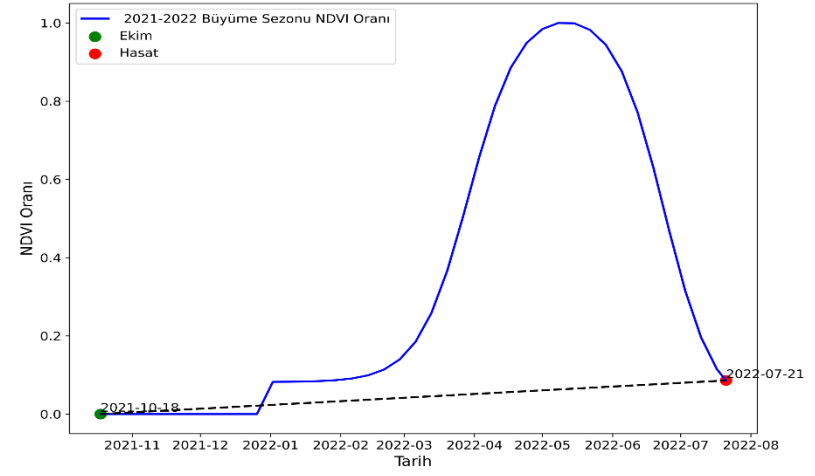
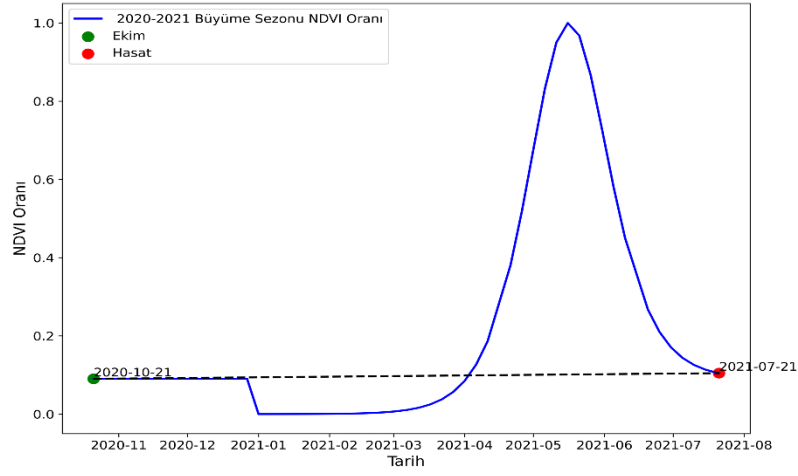
Şekil 4.15 Silajlık mısır bitkisi için 2016-2019 yılları BSB ve BSS tahminleri



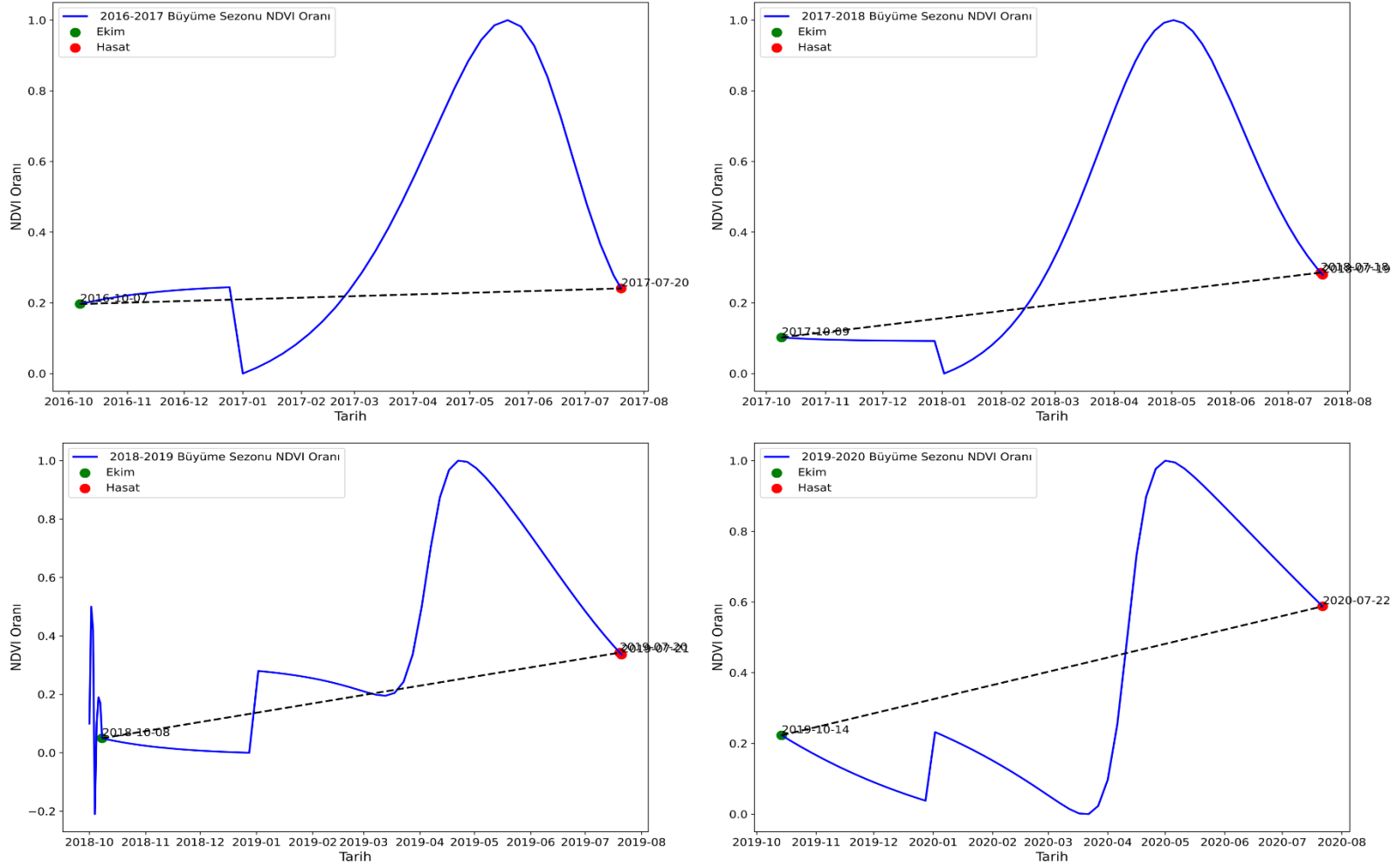
Şekil 4.16 Silajlık mısır bitkisi için 2020-2022 yılları BSB ve BSS tahminleri



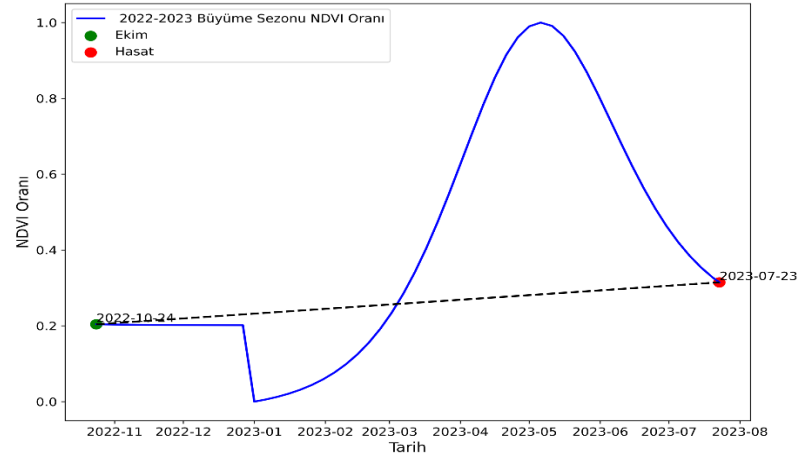
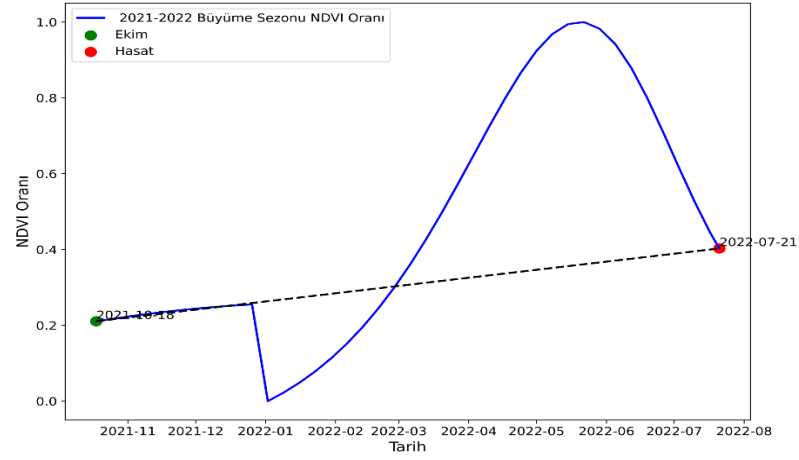
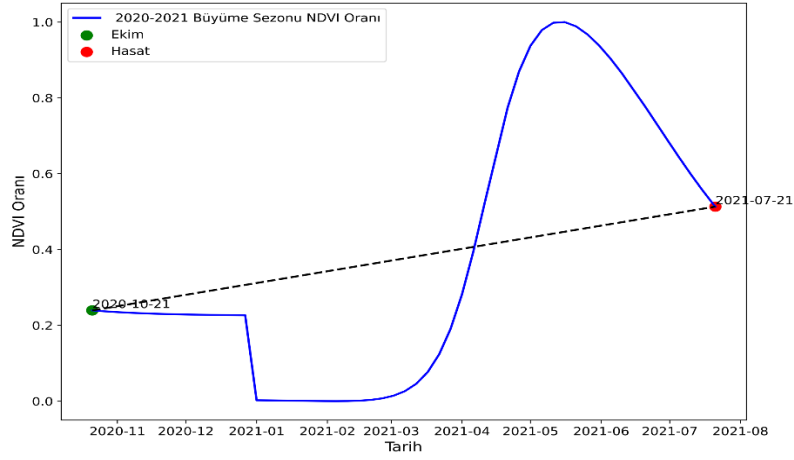
Şekil 4.17 Buğday (sulamaya dayalı tarım) bitkisinin 2016-2020 yılları büyüme sezonları boyunca BSB ve BSS tahminleri



Şekil 4.18 Buğday (sulamaya dayalı tarım) bitkisinin 2020-2023 yılları büyüme sezonları boyunca BSB ve BSS tahminleri



Şekil 4.19 Buğday (yağışa dayalı tarım) bitkisinin 2016-2020 yılları büyüme sezonları boyunca BSB ve BSS tahminleri



Şekil 4.20 Buğday (yağışa dayalı tarım) bitkisinin 2020-2023 yılları büyüme sezonları boyunca BSB ve BSS tahminleri

Şekil 4.17-18 incelendiğinde 2017-2018 büyüme sezonu hariç RF algoritmasının buğday bitkisi sulamaya dayalı yetiştiricilik sınıfında BSB ve BSS tarihlerini %100 doğrulukla tahmin ettiği görülmektedir. 2017-2018 büyüme sezonunda BSS tarihi hasattan bir gün öncesi (18.07.2018) ve gerçek hasat tarihi (19.07.2018) olmak üzere iki tarih olarak tahmin edilmiştir.

Şekil 4.19-20 incelendiğinde 2017-2018 ve 2018-2019 büyüme sezonlarında BSS tarihleri hariç RF algoritmasının buğday bitkisi yağışa dayalı yetiştiricilik sınıfında BSB ve BSS tarihlerini %100 doğrulukla tahmin ettiği görülmektedir. 2017-2018 büyüme sezonunda BSS tarihi hasattan bir gün öncesi (18.07.2018) ve gerçek hasat tarihi (19.07.2018) olmak üzere iki tarih olarak tahmin edilmiştir. 2018-2019 büyüme sezonunda ise BSS tarihi benzer şekilde hasattan bir gün öncesi (20.07.2019) ve gerçek hasat tarihi (21.07.2019) olmak üzere iki tarih olarak tahmin edilmiştir. Sonuçlar RF algoritmasının silajlık mısır ve buğday bitkileri için ekim ve hasat tarihlerini belirlemede yüksek doğruluk oranlarını elde ettiğini göstermektedir.

Sakamoto vd. (2010) yaptıkları çalışmada MODIS-WDRVI verilerinin zaman serisi analizi yoluyla mısır ve soya fasulyesi bitkilerinin temel fenolojik evreleri olan BSB ve BSS tahmini TSF yöntemini geliştirmiştir. Sonuçlar yersel gözlemler ile doğrulanmış ve mısır ve soya fasulyesinin temel fenolojik evrelerini tahmin etmede yüksek doğruluk göstermiştir. Mısır bitkisi fenolojik evre tahmini için RMSE 2.9 ila 7.0 gün arasında ve soya fasulyesi için ise 3.2 ila 6.9 gün arasında değişiklik göstermiştir. Zanker (2022) NARR veri setinden hesaplanan BDG'ler ile MODIS-NDVI değerlerini kullanarak, Kuzey Dakota'daki mısır tarlalarında parsel bazlı ekim tarihlerini tahmin etmeyi amaçlamıştır. Çalışmasında elde ettiği bulguları NASS bitki gelişim raporlarından elde edilen eyalet çapındaki ortalama ekim tarihleri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada kullanılan uydu tabanlı VI-BDG yöntemindeki iki değişken 2003-2020 yılları için haftalık olarak NASS verilerine göre değerlendirilmiş ve en yüksek 0.96 R^2 ile ilişki bulunmuştur. Çalışmada hesaplanan ekim tarihi ortalama farkı 1.3 gün ve RMSE 3.6 gündür.

Çalışma bulguları literatürdeki araştırma bulguları ile karşılaştırıldığında, RF algoritmasının da BSB ve BSS'nin tahmininde yüksek doğruluk gösterdiğini ve fenoloji çalışmalarında kullanımının avantajlı olduğunu göstermektedir.

4.7 Fenolojik devrelerin Random Forest ile tahmini

Çalışmada silajlık mısır ve buğday bitkilerinin fenolojik evrelerinin tahmininde RF algoritması kullanılmıştır. Model sonuçları RF algoritmasının performans göstergeleri olan doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F_1 skoru ile değerlendirilmiş ve sınıflandırma raporu oluşturulmuştur. Silajlık mısır ve buğday (sulamaya ve yağışa dayalı yetiştiricilik) bitkileri için 2016-2023 yılları arasında fenolojik evrelerin model tahmin sonuçları 4.10-4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.10 incelendiğinde silajlık mısır için modelin fenolojik evre tahminlerinde genellikle yüksek hassasiyet ve duyarlılık değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. 2016 yılında %88 gibi nispeten daha düşük bir doğrulukla başlayan model, 2020 yılına kadar kademeli bir iyileşme göstererek %100 doğruluğa ulaşmıştır. Bu süreç, modelin daha fazla veriyle eğitilmesi ve algoritmanın parametrelerinin optimize edilmesi ile açıklanabilir. 2021'den 2023'e kadar olan dönemde doğruluk %95 ile %97 ile oldukça yüksek bulunmuştur.

Çizelge 4.11 incelendiğinde buğday bitkisi sulamaya dayalı yetiştiricilik sınıfı için model doğruluğu analizi, modelin genel olarak oldukça istikrarlı bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. 2016'dan 2023'e kadar olan dönemde, modelin doğruluğu çoğunlukla %98 ile %99 arasında değişmiştir, bu da yüksek bir tutarlılık ve güvenilirlik düzeyinin olduğunu göstermektedir. Özellikle 2020-2021 ve 2022-2023 büyüme sezonlarında model doğruluğu %99'a ulaşarak pik yapmıştır.

Çizelge 4.12 incelendiğinde buğday bitkisi yağışa dayalı yetiştiricilik sınıfı için modelin tahminleri, genel olarak yüksek doğrulukla gerçekleşmiştir, ancak “Hamur olum” ve “Döllenme-erme” gibi bazı evrelerde performans dalgalanmaları gözlemlenmiştir.

Özellikle 2021-2022 büyüme sezonunda hamur olum evresinde %50 hassasiyet ve duyarlılık oranları gözlenmiş, bu da modelin bu evreyi diğerlerinden ayırt etmekte güçlük çektiğini göstermektedir. Diğer taraftan, sapa kalkma ve başaklanma-çiçeklenme evrelerinde model sürekli yüksek performans göstermiştir. Bu durum, evrelerin belirgin işaretlerinin model tarafından iyi yakalandığını göstermektedir.

Ghamghami vd. (2019) çalışmalarında mısır bitkisinin fenolojik evrelerini belirlemek amacıyla C5.0 veri madenciliği algoritmasını kullanmıştır. Çalışmada, veri madenciliği aşamasında karar ağaçlarını oluşturmak amacıyla KBDG değerleri ve Landsat-7 uydu görüntülerinden oluşturulmuş NDVI değerleri kullanılmıştır. Mısır bitkisinin fenolojik evrelerinin başlangıcına dair tahminlerde C5.0 veri madenciliği algoritması sonuçlarına ilişkin ortalama mutlak hata değerleri yaklaşık olarak 2.6-5.3 gün, KBDG modeli için ise 3.9-10.7 gün olarak bildirilmiştir. Mercier vd. (2020) çalışmalarında buğday ve kolzanın fenolojik evrelerini belirlemek için RF algoritmasını kullanmıştır. Çalışmada Sentinel-1 (S1) ve Sentinel-2 (S2) uydu verileri kullanılmıştır. Bu veriler, VI'ların ve LAI'nın zamansal değişimini incelemede kullanılmıştır. Çalışmada sınıflandırma modelinin performansını değerlendirmek adına -1 ile 1 arasında değer alan kappa metriği kullanılmıştır. Çalışma bulgularında S1 ve S2 verilerinin birlikte kullanımı (buğday ve kolza için sırasıyla ortalama kappa = 0,53-0,82 ve 0,74-0,92), her iki bitki için fenolojik aşamaların belirlenmesinde tek başına S1 verilerinin (buğday ve kolza için sırasıyla ortalama kappa = 0,48-0,61 ve 0,61-0,64) veya tek başına S2 verilerinin (buğday ve kolza tohumu için sırasıyla ortalama kappa = 0,54-0,75 ve 0,67-0,86) kullanılmasından daha doğru olduğu bildirilmiştir.

Çalışma bulguları ve literatürdeki araştırmalar değerlendirildiğinde bitkilerin fenolojik evrelerinin tahmini ve modellenmesinde makine öğrenmesi ve veri madenciliği gibi araçların kullanılması evrelerin sınıflandırılmasında başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca KBDG ve uydu tabanlı VI'ların entegre kullanımı sınıflandırma işlemini kolaylaştırmakta ve model doğruluğunu artırmaya yardımcı olmaktadır.

Çizelge 4.10 Silajlık mısır bitkisi için model sonuçları

Yıl	Fenolojik Evre	Hassasiyet (precision)	Duyarlılık (recall)	F1 skoru	Model doğruluğu (accuracy)
2016	Çimlenme ve çıkış	1.00	1.00	1.00	0.88
	V1-V2	0.67	1.00	0.80	
	V3-V4	0.86	0.86	0.86	
	Tepe püskülü çıkışı	1.00	0.87	0.93	
	Koçan püskülü çıkışı	0.75	0.75	0.75	
	Süt olum	0.50	1.00	0.67	
	Hamur olum	1.00	0.90	0.93	
2017	Çimlenme ve çıkış	1.00	1.00	1.00	0.95
	V1-V2	1.0	0.67	0.80	
	V3-V4	1.00	1.00	1.00	
	Tepe püskülü çıkışı	0.94	1.00	0.97	
	Koçan püskülü çıkışı	1.00	0.75	0.86	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
2018	Çimlenme ve çıkış	1.00	1.00	1.00	0.95
	V1-V2	0.75	1.00	0.86	
	V3-V4	0.83	0.83	0.83	
	Tepe püskülü çıkışı	1.00	0.92	0.96	
	Koçan püskülü çıkışı	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
2019	Çimlenme ve çıkış	1.00	1.00	1.00	0.92
	V1-V2	1.00	1.00	1.00	
	V3-V4	1.00	1.00	1.00	
	Tepe püskülü çıkışı	1.00	1.00	1.00	
	Koçan püskülü çıkışı	0.88	0.83	0.85	
	Süt olum	0.67	0.67	0.67	
	Hamur olum	1.00	0.78	0.88	
2020	Çimlenme ve çıkış	1.00	1.00	1.00	1.0
	V1-V2	1.00	1.00	1.00	
	V3-V4	1.00	1.00	1.00	
	Tepe püskülü çıkışı	1.00	1.00	1.00	
	Koçan püskülü çıkışı	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
2021	Çimlenme ve çıkış	1.00	1.00	1.00	0.97
	V1-V2	1.00	1.00	1.00	
	V3-V4	1.00	1.00	1.00	
	Tepe püskülü çıkışı	1.00	1.00	1.00	
	Koçan püskülü çıkışı	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	0.75	1.00	0.86	
	Hamur olum	1.00	0.83	0.91	

Çizelge 4.10 Silajlık mısır bitkisi için model sonuçları (devam)

Yıl	Fenolojik Evre	Hassasiyet (precision)	Duyarlılık (recall)	F1 skoru	Model doğruluğu (accuracy)
2022	Çimlenme ve çıkış	1.00	1.00	1.00	0.95
	V1-V2	1.00	1.00	1.00	
	V3-V4	1.00	0.50	0.67	
	Tepe püskülü çıkışı	0.88	1.00	0.94	
	Koçan püskülü çıkışı	1.00	0.50	0.67	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
2023	Çimlenme ve çıkış	0.50	1.00	0.67	0.94
	V1-V2	1.00	1.00	1.00	
	V3-V4	1.00	1.00	1.00	
	Tepe püskülü çıkışı	1.00	1.00	1.00	
	Koçan püskülü çıkışı	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	0.75	0.86	

Çizelge 4.11 Buğday bitkisi (sulamaya dayalı yetiştiricilik) için model sonuçları

Büyüme Sezonu	Fenolojik Evre	Hassasiyet (precision)	Duyarlılık (recall)	F1 skoru	Model doğruluğu (accuracy)
2016 - 2017	Çimlenme	1.00	0.75	0.86	0.98
	Kardeşlenme	0.97	1.00	0.99	
	Sapa kalkma	1.00	1.00	1.00	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	0.75	1.00	0.86	
	Hamur olum	1.00	0.75	0.86	
	Döllenme-erme	1.00	1.00	1.00	
	Fizyolojik olum	1.00	1.00	1.00	
2017 - 2018	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.98
	Kardeşlenme	1.00	1.00	1.00	
	Sapa kalkma	1.00	1.00	1.00	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
	Döllenme-erme	1.00	0.67	0.80	
	Fizyolojik olum	0.67	0.67	0.67	

Çizelge 4.11 Buğday bitkisi (sulamaya dayalı yetiştiricilik) için model sonuçları (devam)

Büyüme Sezonu	Fenolojik Evre	Hassasiyet (precision)	Duyarlılık (recall)	F1 skoru	Model doğruluğu (accuracy)
2018 - 2019	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.96
	Kardeşlenme	0.97	1.00	0.99	
	Sapa kalkma	1.00	0.80	0.89	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	0.60	1.00	0.75	
	Hamur olum	1.00	0.50	0.67	
	Döllenme-erme	1.00	1.00	1.00	
	Fizyolojik olum	1.00	1.00	1.00	
2019 - 2020	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.94
	Kardeşlenme	1.00	0.97	0.94	
	Sapa kalkma	0.60	1.00	0.75	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	0.94	0.97	
	Süt olum	0.83	1.00	0.91	
	Hamur olum	0.50	0.50	0.50	
	Döllenme-erme	1.00	0.75	0.86	
	Fizyolojik olum	1.00	1.00	1.00	
2020 - 2021	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.99
	Kardeşlenme	1.00	1.00	1.00	
	Sapa kalkma	1.00	1.00	1.00	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
	Döllenme-erme	0.67	1.00	0.80	
	Fizyolojik olum	1.00	0.83	0.91	
2021 - 2022	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.96
	Kardeşlenme	1.00	1.00	1.00	
	Sapa kalkma	0.80	1.00	0.89	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	0.93	0.96	
	Süt olum	1.00	0.83	0.91	
	Hamur olum	0.50	1.00	0.67	
	Döllenme-erme	0.80	1.00	0.89	
	Fizyolojik olum	1.00	0.80	0.89	
2022 - 2023	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.99
	Kardeşlenme	1.00	1.00	1.00	
	Sapa kalkma	1.00	1.00	1.00	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
	Döllenme-erme	0.75	1.00	0.86	
	Fizyolojik olum	1.00	0.75	0.86	

Çizelge 4.12 Buğday bitkisi (yağışa dayalı yetiştiricilik) için model sonuçları

Büyüme Sezonu	Fenolojik Evre	Hassasiyet (precision)	Duyarlılık (recall)	F1 skoru	Model doğruluğu (accuracy)
2016 - 2017	Çimlenme	1.00	0.75	0.86	0.94
	Kardeşlenme	0.97	0.97	0.97	
	Sapa kalkma	0.83	1.00	0.91	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	0.94	0.97	
	Süt olum	0.60	1.00	0.75	
	Hamur olum	1.00	0.75	0.86	
	Döllenme-erme	1.00	1.00	1.00	
	Fizyolojik olum	1.00	1.00	1.00	
2017 - 2018	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.97
	Kardeşlenme	1.00	1.00	1.00	
	Sapa kalkma	1.00	1.00	1.00	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
	Döllenme-erme	1.00	0.67	0.80	
	Fizyolojik olum	0.67	0.67	0.67	
2018 - 2019	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.96
	Kardeşlenme	0.97	1.00	0.99	
	Sapa kalkma	1.00	0.75	0.86	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
	Döllenme-erme	1.00	0.75	0.86	
	Fizyolojik olum	0.83	0.83	0.83	
2019 - 2020	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.96
	Kardeşlenme	1.00	0.97	0.99	
	Sapa kalkma	0.60	1.00	0.75	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	0.94	0.97	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	0.67	1.00	0.80	
	Döllenme-erme	1.00	0.75	0.86	
	Fizyolojik olum	1.00	1.00	1.00	
2020 - 2021	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.99
	Kardeşlenme	1.00	1.00	1.00	
	Sapa kalkma	1.00	1.00	1.00	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
	Döllenme-erme	0.67	1.00	0.80	
	Fizyolojik olum	1.00	0.83	0.91	

Çizelge 4.12 Buğday bitkisi (yağışa dayalı yetiştiricilik) için model sonuçları (devam)

Büyüme Sezonu	Fenolojik Evre	Hassasiyet (precision)	Duyarlılık (recall)	F1 skoru	Model doğruluğu (accuracy)
2021 - 2022	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.96
	Kardeşlenme	1.00	1.00	1.00	
	Sapa kalkma	0.80	1.00	0.89	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	0.93	0.96	
	Süt olum	1.00	0.83	0.91	
	Hamur olum	0.50	1.00	0.67	
	Döllenme-erme	0.80	1.00	0.89	
	Fizyolojik olum	1.00	0.80	0.89	
2022 - 2023	Çimlenme	1.00	1.00	1.00	0.99
	Kardeşlenme	1.00	1.00	1.00	
	Sapa kalkma	1.00	1.00	1.00	
	Başaklanma-çiçeklenme	1.00	1.00	1.00	
	Süt olum	1.00	1.00	1.00	
	Hamur olum	1.00	1.00	1.00	
	Döllenme-erme	0.75	1.00	0.86	
	Fizyolojik olum	1.00	0.75	0.86	

5. SONUÇ

Fenolojik gözlemlerin küresel önemi, iklim değişikliğinin tarım ve doğal ekosistemler üzerindeki etkisini anlamak için özellikle son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Küresel olarak, fenolojik gözlem ağları, bitkilerin çevresel değişikliklere verdiği tepkilerin izlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Avrupa ve Amerika’da uzun yıllardır devam eden fenoloji gözlem ağları bulunmaktadır. Bitki fenolojisinin doğrudan görsel gözlemleri, bir asırdan fazla bir süredir birçok bölgede gerçekleştirilmektedir ve dünyanın farklı bölgelerinde büyük gözlem ağları bulunmaktadır (örneğin, Pan Avrupa Fenoloji Ağı (Zhou vd. 2018) ve Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Fenoloji Ağı (USANPN) (Mayer, 2010)). Fenoloji modelleri kullanarak bitki büyüme döngülerinin izlenmesi ve tahmin edilmesi, su kaynaklarının güvenliğinin yanı sıra gıda güvenliği ve uzun vadeli sürdürülebilirliğin anlaşılması ve tahmin edilmesi için esastır (Zanker, 2022). Bitki fenolojisi iklim ile yakından ilişkili olduğundan optimum verimin kritik bir göstergesidir (Wu vd. 2018, Yang vd. 2021, Li vd. 2021). Maalesef ki, ülkemizde Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından yürütülmekte olan bu çalışmalar incelendiğinde düzensiz bir biçimde gerçekleştiği (zamansal ve mekânsal) ve halihazırda fenolojik gözlemlerin tamamen kaldırıldığı anlaşılmaktadır. Diğer bir ifade ile ülkemizde fenolojik gözlemler açısından yeterli yersel veri bulunmamaktadır.

Sıcaklık ve yağış gibi meteorolojik faktörler bitki gelişimi için önemli parametrelerdendir ve fizyolojik süreçler sıcaklıkla yakından ilişkilidir. Bu nedenle bitkilerin fenolojik evrelerinin belirlenmesi ve bu evrelerdeki gelişimlerin izlenmesi için BDG gibi sıcaklık indeksleri kullanılmaktadır. Yeterli verilerin olmadığı alanlarda, uydu görüntüleri ile çıkış tarihleri belirlenen bitkilerin meteorolojik verilerin yardımıyla geriye dönük hesaplamalar yapılarak ekim dikim tarihleri belirlenebilmektedir.

Uzaktan algılama verileri ile bitki fenolojik evrelerinin belirlenmesi konusunda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Ancak ülkemizde henüz bu konu ile ilgili yeterli çalışma bulunmamaktadır. Yapılan çalışmalar çeşitli uydu görüntülerinden elde edilen vejetasyon indeksleri (VI) ile bitki fenolojik evrelerinin ilişkisini incelemekte ancak BDG gibi termal birimlerin bitki fenolojisine etkisini değerlendirmemektedir.

Bu çalışma Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliğinde 2016-2023 yıllarında yetiştirilen silajlık mısır ile buğday (sulamaya ve yağışa dayalı yetiştiricilik) bitkisinin fenolojik evrelerin belirlenmesinde kümülatif sıcaklık, uydu görüntüleri ve makine öğrenmesinin bütünleşmiş kullanımını içermektedir. Mısır ve buğday, küresel gıda güvenliğindeki önemleri ve çevresel değişikliklere karşı duyarlılıkları göz önüne alındığında, bu çalışma için ideal model bitkiler olarak değerlendirilmiştir. Bu bitkilerin belirgin fenolojik özellikleri, uydu görüntüleri ve yersel gözlemler kullanılarak daha doğru tahminler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliği tarafından sağlanan sürekli ve güvenilir kayıtlar, ayrıntılı bir analize olanak sağlayarak çalışmanın güvenilirliğine katkıda bulunmuştur.

Bu araştırma, Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü Fark İndeksi (NDVI) ve Kümülatif Büyüme Derece Günler (KBDG) dahil olmak üzere çoklu veri kaynaklarının ve metodolojilerin entegrasyonunu kapsamaktadır. Çalışmada ele alınan bitkilerin büyüme sezonu başlangıcı (ekim tarihi), sonu (hasat tarihi) ve önemli fenolojik evrelerini tahmin etmek için Random Forest (RF) algoritması kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle Sentinel-2 NDVI zaman serileri elde edilmiştir. Zaman serilerindeki eğilimleri daha iyi görmek ve verileri en iyi şekilde tanımlayacak parametreleri belirlemek adına verilere öncelikle düzeltme (smoothing) algoritmaları (Savitzky-Golay, Lowess ve Spline Smoothing) sonrasında ise veri uyarlama (fitting) algoritması (Double Logistic Fonksiyon, DLF) uygulanmıştır. Veri düzeltme algoritmalarının performansları R^2 , RMSE ve SNR metrikleri ile ölçülmüştür. Savitzky-Golay yöntemi 2016-2023 yılları genelinde tüm bitkilerde yüksek performans (yüksek R^2 ve SNR, düşük RMSE) göstermiştir. Bu nedenle Savitzky-Golay yöntemi seçilmiş ve bu yöntemle düzeltilen verilere DLF algoritması uygulanmıştır. Veri ön işleme adımı tamamlandıktan sonra NDVI oranı değerleri tüm bitkiler için 2016-2023 yılları için hesaplanmıştır.

Sıcaklık verileri ile tüm bitkiler için ekimden hasada kadar KBDG değerleri hesaplanmıştır. Silajlık mısır bitkisinin ortalama 1340 KBDG, buğday bitkisinin ise ortalama 2400 KBDG biriktirdiğinde hasat edildiği belirlenmiştir. Bitkiler için her fenolojik evredeki KBDG değerlerinin 2016-2023 yılları için ortalamadan sapması

incelenmiştir. Bu veriler sezon başlangıcı ve sonu, fenolojik evrelerin tahmini ve termal sezon uzunluğunun (TSU) ve eğiliminin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Sezon başlangıcı, sonu ve fenolojik evrelerin tahmininde model olarak 100 ağaç ($n=100$) kullanan RF Classifier kullanılmıştır. Model performansı her fenolojik evre için duyarlılık, hassasiyet, F1 skoru ve modellenen her yıl için doğruluk ile değerlendirilmiş ve sonuçları çiftlik kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Büyüme sezonu başlangıcı ve sonu silajlık mısır için 2022 yılı hasat tarihi, 2023 yılı ekim ve hasat tarihi dışında %100 doğrulukla tahmin edilmiştir. Buğday sulamaya dayalı yetiştiricilik sınıfında 2017-2018 büyüme sezonu hasat tarihi ve yağışa dayalı yetiştiricilik sınıfında 2017-2018 ve 2018-2019 büyüme sezonları hasat tarihleri dışında %100 doğrulukla tahmin edilmiştir. Fenolojik evrelerin tahmininde ise silajlık mısır için 0.88-1.00 ve buğday (yağışa ve sulamaya dayalı yetiştiricilik) için 0.94-0.99 arasında değişen yüksek tahmin doğrulukları elde edilmiştir. Bu yüksek doğruluk seviyesi, seçilen metodolojinin etkinliğinin altını çizmektedir. Geriye dönük kayıtların bulunmadığı bölgelerde de bu çalışmada geliştirilen metodoloji kullanılarak fenolojik evrelerin yüksek doğruluk ile tahmin edilebileceğini ortaya konmuştur.

Bu çalışmada dikkate değer bir metodolojik ilerleme, Savitzky-Golay algoritması ve Çift Lojistik Fonksiyonun (DLF) NDVI zaman serilerine veri ön işleme adımında uygulanmasıdır. Bu ön işleme adımları, gürültüyü etkili bir şekilde azaltmakta ve veri kalitesini artırarak daha doğru tahminler elde edilmesini sağlamaktadır. RF algoritmasının uygulanması, fenoloji çalışmalarında makine öğreniminin potansiyelini bir kez daha ortaya koymuş ve bitki fenolojik evrelerini tahmin etmek için verimli bir metot sağlamıştır.

Çalışma bulgularında termal sezon uzunluğunun değişiminin ortaya konulamamasının sebebi araştırma alanına en yakın meteoroloji istasyonuna ait en eski tarihli verilerin 2005 yılından başlamasıdır. Literatürdeki çalışmalar geniş aralıklı veri setleriyle çalışıldığı takdirde termal sezon uzunluğunun eğilimlerinin belirlenmesine olanak sağlandığını göstermiştir.

Çalışma bulgularına dayanarak, diğer araştırmacılar bu yöntemin coğrafi kapsamını farklı bölgelere genişletebilir ve yöntemin çeşitli agro-ekolojik bölgelerde doğrulanmasına ve iyileştirilmesine olanak tanıyabilir. Böylece, bitki gelişimindeki bölgesel farklılıkların daha iyi anlaşılması sağlanabilir. Ayrıca, araştırmacılar bu metodolojiyi kendi bölgeleri ve bitki türlerine uygularken, modelin tahmin gücünü geliştirmek ve bitki fenolojisi hakkında daha kapsamlı bilgiler edinebilmek için ek uzaktan algılama indekslerini ve çevresel faktörleri, özellikle bağıl nem, toprak nemi ve solar radyasyonu, modele entegre edebilirler.

Çalışma, Türkiye kalkınma hedeflerine katkı açısından değerlendirildiğinde, 11. Kalkınma Planı çerçevesinde hedeflenen “403.2. Dijitalleşme, yapay zekâ ve veriye dayalı iş modelleri ile tarımsal bilgi sistemleri geliştirilecek ve tüm kesimlerin kullanımına açılacaktır.” maddesine katkı sunmaktadır. Ayrıca yine 11. Kalkınma planı çerçevesinde öncelikli hususlar olarak belirtilen ve “2.1. *Küresel Gelişmelerin Türkiye Etkileşimi*” başlığı altında sunulan “85. Türkiye yenilikçi teknolojilerin çoğu açısından teknoloji geliştirme ve bu teknolojilerin üretken kullanımı konusunda gelişmiş ülkelere göre kısıtlı yeteneklere sahiptir.” maddesine karşılık gelen mevcut teknolojinin üretken kullanımını açısından da katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- Ahrens, C. D. 2014. Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere (8th Edition). United States: Cengage Learning.
- Akima, H. 1970. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. Journal of the ACM (JACM), 17(4), 589-602.
- Allen, R. G., Robison, C. W., Huntington, J., Wright, J. L. ve Kilic, A. 2020. Applying the FAO-56 dual KC method for irrigation water requirements over large areas of the western US. Transactions of the ASABE, 63(6), 2059-2081.
- Anonim, 2011. Google Earth Engine. Web Sitesi: <https://earthengine.google.com/platform/>. Erişim Tarihi: 10.02.2024
- Anonim, 2015. Sentinel Online. Web Sitesi: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Erişim Tarihi: 15.02.2024.
- Anonim, 2023. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Web Sitesi: <https://www.mgm.gov.tr/> . Erişim Tarihi: 15.02.2024.
- Atkinson, P. M., Jeganathan, C., Dash, J. ve Atzberger, C. 2012. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. Remote Sensing of Environment, 123, 400-417.
- Aydoğan, S. ve Soylu, S. 2017. Ekmeklik buğday çeşitlerinin verim ve verim öğeleri ile bazı kalite özelliklerinin belirlenmesi. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 26(1), 24-30.
- Bian, J. H., Li, A., Song, M., Ma, L. ve Jiang, J. 2010. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter. Journal of Remote Sensing, 14(4), 725-741.
- Boschetti, M., Stroppiana, D., Brivio, P. A. ve Bocchi, S. 2009. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. International journal of remote sensing, 30(18), 4643-4662.
- Breiman, L. 2001. Random forests. Machine learning, 45, 5-32.
- Cai, Z., Jönsson, P., Jin, H. ve Eklundh, L. 2017. Performance of smoothing methods for reconstructing NDVI time-series and estimating vegetation phenology from MODIS data. Remote Sensing, 9(12), 1271.
- Cao, R., Chen, Y., Shen, M., Chen, J., Zhou, J., Wang, C. Ve Yang, W. 2018. A simple method to improve the quality of NDVI time-series data by integrating spatiotemporal information with the Savitzky-Golay filter. Remote Sensing of Environment, 217, 244-257.
- Chen, J., Wang, S., Shi, H., Chen, B., Wang, J., Zheng, C. ve Zhu, K. 2023. Radiation and temperature dominate the spatiotemporal variability in resilience of subtropical evergreen forests in China. Frontiers in Forests and Global Change, 6, 1166481.

- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A. ve Schwartz, M. D. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in ecology & evolution*, 22(7), 357-365.
- Cleveland, W. S. ve Devlin, S. J. 1988. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American statistical association*, 83(403), 596-610.
- Cole, T. J. 1988. Fitting smoothed centile curves to reference data. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, 151(3), 385-406.
- Cong, N., Huang, K. ve Zhang, Y. 2021. Unsynchronized Driving Mechanisms of Spring and Autumn Phenology Over Northern Hemisphere Grasslands. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.610162>
- Çiçek, G. ve Kurucu, Y. 2018. Orta Anadolu Koşullarında Yetiştirilen Patates ve Pancar Bitkilerinin Fenolojik Evrelerine Ait Çok Bantlı Spektral İmzalarının Belirlenmesi. VII. Uzaktan Algılama Sempozyumu (UZAL-CBS 2018), 18-21 Eylül, Eskişehir.
- Çiçek, G. 2019. Orta Anadolu'daki bazı tarımsal ürünlerin fenolojik evrelerine göre spektral yansıtma karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Dar, E. A., Brar, A. S. ve Yousuf, A. 2018. Growing degree days and heat use efficiency of wheat as influenced by thermal and moisture regimes. *Journal of Agrometeorology*, 20(2), 168-170.
- Dash, J., Lankester, T., Hubbard, S. ve Curran, P. J. 2008. Signal-to-noise ratio for MTCI and NDVI time series data. 2nd MERIS/(A)ATSR User Workshop, 22 - 26 September 2008, Rome.
- Demirbaş, M. ve Aydın, R. 2020. 21. Yüzyılın en büyük tehdidi: küresel iklim değişikliği. *Ecological Life Sciences*, 15(4), 163-179.
- Diao, C. 2020. Remote sensing phenological monitoring framework to characterize corn and soybean physiological growing stages. *Remote Sensing of Environment*, 248, 111960.
- Diao, C. ve Li, G. 2022. Near-surface and high-resolution satellite time series for detecting crop phenology. *Remote Sensing*, 14(9), 1957.
- Dong, M., Jiang, Y., Zheng, C. ve Zhang, D. 2012. Trends in the thermal growing season throughout the Tibetan Plateau during 1960–2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166, 201-206.
- Douglas, E. M., Vogel, R. M. Ve Kroll, C. N. 2000. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of hydrology*, 240(1-2), 90-105.
- Du, L., Yang, H., Song, X., Wei, N., Yu, C., Wang, W., ve Zhao, Y. 2022. Estimating leaf area index of maize using UAV-based digital imagery and machine learning methods. *Scientific reports*, 12(1), 15937.
- Evans, F. H. ve Shen, J. 2021. Long-term hindcasts of wheat yield in fields using remotely sensed phenology, climate data and machine learning. *Remote Sensing*, 13, 2435.

- Gitelson, A. ve Merzlyak, M. N. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of plant physiology*, 143(3), 286-292.
- Ghamghami, M., Ghahreman, N., Irannejad, P. ve Ghorbani, K. 2019. Comparison of Data Mining and GDD-Based Models in Discrimination of Maize Phenology. *International Journal of Plant Production*, 13,11–22. <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0030-2>.
- Güney, E., Tan, M., Gül, Z. D. ve Gül, İ. 2010. Erzurum şartlarında bazı silajlık mısır çeşitlerinin verim ve silaj kalitelerinin belirlenmesi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 41(2), 105-111.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H. ve Friedman, J. H. 2009. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction (Vol. 2, pp. 1-758). New York: springer.
- Hill, T., Lewicki, P. ve Lewicki, P. 2006. Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining. StatSoft, Inc.
- Howell, T. A., Steiner, J. L., Schneider, A. D., Evett, S. R. ve Tolck, J. A. 1997. Seasonal and maximum daily evapotranspiration of irrigated winter wheat, sorghum, and corn—Southern High Plains. *Transactions of the ASAE*, 40(3), 623-634.
- Huang, X., Liu, J., Zhu, W., Atzberger, C. ve Liu, Q. 2019. The optimal threshold and vegetation index time series for retrieving crop phenology based on a modified dynamic threshold method. *Remote Sensing*, 11(23), 2725.
- Ibarra, E. S., Bustamante, W. O., Capurata, R. E. O. ve Cohen, I. S. 2020. Improving the monitoring of corn phenology in large agricultural areas using remote sensing data series. *Spanish journal of agricultural research*, 18(3), 23.
- Kacar, B. ve İnal, A. 2010. Bitki Analizleri. Nobel Yayın Dağıtım.
- Kalvāns, A., Bitāne, M. ve Kalvāne, G. 2015. Forecasting plant phenology: evaluating the phenological models for *Betula pendula* and *Padus racemosa* spring phases, Latvia. *International journal of biometeorology*, 59, 165-179.
- Karkaускаite, P., Tagesson, T. ve Fensholt, R. 2017. Evaluation of the plant phenology index (PPI), NDVI and EVI for start-of-season trend analysis of the Northern Hemisphere boreal zone. *Remote Sensing*, 9(5), 485.
- Kaya, Y. ve Polat, N. 2019. Bitki İndeksi Kullanarak Buğday Bitkisinin Fenolojik Evrelerinin İncelenmesi. *Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği VII. Teknik Sempozyumu (TUFUAB'2019)*, 25, 27.
- Keenan, T. F. ve Richardson, A. D. 2015. The timing of autumn senescence is affected by the timing of spring phenology: implications for predictive models. *Global change biology*, 21(7), 2634-2641.
- Kelsey, K. C., Pedersen, S. H., Leffler, A. J., Sexton, J. O., Feng, M. ve Welker, J. M. 2021. Winter snow and spring temperature have differential effects on vegetation phenology and productivity across Arctic plant communities. *Global Change Biology*, 27(8), 1572-1586.

- Kendall, M.G. 1948. Rank correlation methods. Griffin, London.
- Koca, Y. O. ve Turgut, İ. 2012. Mısırdaki (Zea Mays L.) Farklı Ekim Zamanlarının Tane Verimine, Kuru Madde Birikimine, Yaprak Alanı İndeksine ve Bazı Büyüme Parametrelerine Etkisi. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 9(1), 1-10.
- Kukul, M. S. ve Irmak, S. 2018. US agro-climate in 20th century: Growing degree days, first and last frost, growing season length, and impacts on crop yields. Scientific reports, 8(1), 6977.
- Li, Q. Y., Yin, L., Liu, W. D., Zhou, S. M., Li, L., Niu, J. S., Niu, H. B. ve Ying, M. A. 2012. Determination of optimum growing degree-days (GDD) range before winter for wheat cultivars with different growth characteristics in North China Plain. Journal of Integrative Agriculture, 11(3), 405-415.
- Li, K., Wang, C., Sun, Q., Rong, G., Tong, Z., Liu, X. ve Zhang, J. 2021. Spring Phenological Sensitivity to Climate Change in the Northern Hemisphere: Comprehensive Evaluation and Driving Force Analysis. Remote Sensing, 13, 1972.
- Liang, L. ve Schwartz, M. D. 2009. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics. Landscape Ecology, 24, 465-472.
- Liaw, A. ve Wiener, M. 2002. Classification and regression by randomForest. R news, 2(3), 18-22.
- Liu, J. ve Zhan, P. 2016. The impacts of smoothing methods for time-series remote sensing data on crop phenology extraction. In 2016 IEEE International GEOScience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 2296-2299). IEEE.
- Liu, Y., Wu, C., Peng, D., Xu, S., Gonsamo, A., Jassal, R. S., Arain, M.A., Lu, L., Fang, B. ve Chen, J. M. 2016. Improved modeling of land surface phenology using MODIS land surface reflectance and temperature at evergreen needleleaf forests of central North America. Remote Sensing of Environment, 176, 152-162.
- Liu, Y., Qin, Y., Wang, H., Lv, S. ve Ge, Q. 2020. Trends in maize (Zea mays L.) phenology and sensitivity to climate factors in China from 1981 to 2010. International journal of biometeorology, 64, 461-470.
- Liu, L., Cao, R., Chen, J., Shen, M., Wang, S., Zhou, J. ve He, B. 2022. Detecting crop phenology from vegetation index time-series data by improved shape model fitting in each phenological stage. Remote Sensing of Environment, 277, 113060.
- Liu, X., Chen, Y., Li, Z. ve Li, Y. 2023. Evaluating the Consistency of Vegetation Phenological Parameters in the Northern Hemisphere from 1982 to 2015. Remote Sensing, 15(10), 2559.
- Löw, J., Ullmann, T. ve Conrad, C. 2021. The Impact of Phenological Developments on Interferometric and Polarimetric Crop Signatures Derived from Sentinel-1: Examples from the DEMMIN Study Site (Germany). Remote Sensing, 13(15), 2951.
- Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the econometric society, 245-259.

- Mayer, A. 2010. Phenology and Citizen Science: Volunteers Have Documented Seasonal Events for More than a Century, and Scientific Studies Are Benefiting from the Data, *BioScience*, 60, 172–175.
- McMaster, G. S. ve Wilhelm, W. W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and forest meteorology*, 87(4), 291-300.
- Mercier, A., Betbeder, J., Baudry, J., Le Roux, V., Spicher, F., Lacoux, J., Roger, D. ve Hubert-Moy, L. 2020. Evaluation of Sentinel-1 & 2 time series for predicting wheat and rapeseed phenological stages. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163, 231-256.
- Mfuka, C. L. 2019. Characterizing Spatiotemporal Patterns of White Mold in Soybean across South Dakota Using Remote Sensing. South Dakota State University.
- Miller, P., Lanier, W. ve Brandt, S. 2001. Using growing degree days to predict plant stages. *Ag/Extension Communications Coordinator, Communications Services, Montana State University-Bozeman, Bozeman, MO, 59717(406), 994-2721.*
- Miller-Rushing, A. J., Høye, T. T., Inouye, D. W. ve Post, E. 2010. The effects of phenological mismatches on demography. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1555), 3177-3186.
- Murguia-Cozar, A., Macedo-Cruz, A., Fernandez-Reynoso, D. S. ve Salgado Transito, J. A. 2021. Recognition of Maize Phenology in Sentinel Images with Machine Learning. *Sensors*, 22(1), 94.
- Nagelkerke, N. J. 1991. A note on a general definition of the coefficient of determination. *biometrika*, 78(3), 691-692.
- Narin, Ö. G. 2019. Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak ayçiçeği bitkisi fenolojik evresinin izlenmesi ve verim tahmin çalışması (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Nur, A. 2019. Çukurova koşullarında lizimetre yöntemiyle mısır bitki su tüketiminin ve bitki katsayılarının belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- O'Keeffe, K. 2009. Maize growth & development. NSW Department of Primary Industries.
- Özen, S. ve Akman, Z. 2014. Yozgat ekolojik koşullarında bazı ekmeklik buğday çeşitlerinin verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 10(1), 35-43.
- Qian, Y., Yang, Z., Di, L., Rahman, M. S., Tan, Z., Xue, L., Gao, F., Yu, E.G. ve Zhang, X. 2019. Crop growth condition assessment at county scale based on heat-aligned growth stages. *Remote Sensing*, 11(20), 2439.
- Pakdemirli, B., Birişik, N., Aslan, İ., Sönmez, B. ve Gezici, M. 2021. Türk Tarımında Dijital Teknolojilerin Kullanımı ve Tarım-Gıda Zincirinde Tarım 4.0. *Toprak Su Dergisi*, 10(1), 78-87.
- Pearson, K. 1895. Contributions to the Mathematical Theory of Evolution. III. Regression, Heredity, and Panmixia. *Proceedings of the Royal Society of London*, 59, 69-71.

- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I. A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M. ve Zhu, X. 2019. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global change biology*, 25(6), 1922-1940.
- Proakis, J. G. 2007. Digital signal processing: principles, algorithms, and applications, 4/E. Pearson Education India.
- Radford, P. J. 1967. Growth analysis formulae-their use and abuse 1. *Crop science*, 7(3), 171-175.
- Ren, J., Campbell, J. B. ve Shao, Y. 2017. Estimation of SOS and EOS for midwestern us corn and soybean crops. *Remote Sensing*, 9(7), 722.
- Richardson, A. D., Keenan, T. F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., & Toomey, M. 2013. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 156-173.
- Richardson, A. D., Hufkens, K., Milliman, T., Aubrecht, D. M., Chen, M., Gray, J. M., Johnston, M.R., Keenan, T.F., Klosterman, S.T., Kosmala, M., Melaas, E.K., Friedl, M.A. ve Froking, S. 2018. Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. *Scientific data*, 5(1), 1-24.
- Robeson, S. M. 2002. Increasing growing-season length in Illinois during the 20th century. *Climatic Change*, 52(1), 219-238.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. ve Deering, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publications*, 351(1), 309.
- Ruiz Castillo, N. ve Gaitán Ospina, C. F. 2016. Projecting future change in growing degree days for winter wheat. *Agriculture*, 6(3), 47.
- Sajedi- Hosseini, F., Choubin, B., Solaimani, K. ve Cerdà, A. 2018. Spatial prediction of soil erosion susceptibility using a fuzzy analytical network process: Application of the fuzzy decision making trial and evaluation laboratory approach. *Land Degradation and Development*, 29(9), 3092-3103.
- Sammis, T.W., Mapel, C.L., Lugg, D.G., Lansford, R.R. ve McGuckin, J.T. 1985. Evapotranspiration Crop Coefficients Predicted Using Growing-Degree-Days. *TRANSACTIONS of the ASAE*, 28(3), 773-780.
- Sakamoto, T., Wardlow, B. D., Gitelson, A. A., Verma, S. B., Suyker, A. E. ve Arkebauer, T. J. 2010. A two-step filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), 2146-2159.
- Savitzky, A. ve Golay, M. J. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, 36(8), 1627-1639.
- Schwartz, M. D. (Ed.). 2003. Phenology: an integrative environmental science (Vol. 132). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, London.
- Schwartz. M.D., Ahas, R. ve Aasa, A. 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology* 12(2), 343 – 351. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.01097.x

- Shen, M., Jiang, N., Pen, D., Rao, Y., Huang, Y., Fu, Y.H., Yang, W., Zhu, X., Cao, R., Chen, X., Chen, J., Miao, C., Wu, C., Wang, T., Liang, E. ve Tang, Y. 2020. Can changes in autumn phenology facilitate earlier green-up date of northern vegetation?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108077.
- Seydoşoğlu, S. ve Saruhan, V. 2017. Farklı ekim zamanlarının bazı silajlık mısır çeşitlerinde verim ve verim unsurlarına etkisinin belirlenmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 54(4), 377-383.
- Şenel, T., Kanmaz, O., Bektas Balcik, F., Avcı, M. ve Dalfes, H. N. 2023. Assessing Phenological Shifts of Deciduous Forests in Turkey under Climate Change: An Assessment for *Fagus orientalis* with Daily MODIS Data for 19 Years. *Forests*, 14(2), 413.
- Testa, S., Soudani, K., Boschetti, L. ve Borgogno Mondino, E. 2018. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.006>
- Tsouros, D.C., Bibi, S. ve Sarigiannidis, P.G. 2019. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*, 10(11), 349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Tunca, E., Köksal, E. S., Çetin, S., Ekiz, N. M., Çoban, U. ve Balde, H. 2018. Ayçiçeği Spektral Özelliklerinin Yetiştirme Dönemi Boyunca Değişiminin Değerlendirilmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 102-108.
- Vrieling, A., De Leeuw, J. ve Said, M.Y. 2013. Length of Growing Period over Africa: Variability and Trends from 30 Years of NDVI Time Series. *Remote Sensing*, 5(2), 982-1000. <https://doi.org/10.3390/rs5020982>
- White, M.A., De Beurs, K.M., Didan, K., Inouye, D.W., Richardson, A.D., Jensen, O.P., O'keefe, J., Zhang, G., Nemani, R.R., Van Leeuwen, W.J.D., Brown, J.F., De Wit, A., Schaepman, M., Lin, X., Dettinger, M., Bailey, A.S., Kimball, J., Schwartz, M.D., Baldocchi, D.D., Lee, J.T ve Lauenroth, W.K. 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Global Change Biology*, 15, 2335-2359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x>
- Wu, D., Wang, P., Jiang, C., Yang, J., Huo, Z. ve Yu, Q. 2018. Measured Phenology Response of Unchanged Crop Varieties to Long-Term Historical Climate Change. *International Journal of Plant Production*, 13, 47–58.
- Yang, Y., Luo, J., Huang, Q., Wu, W. ve Sun, Y. 2019. Weighted double-logistic function fitting method for reconstructing the high-quality sentinel-2 NDVI time series data set. *Remote Sensing*, 11(20), 2342.
- Yang, Y., Tao, B., Liang, L., Huang, Y., Matocha, C., Lee, C.D., Sama, M., El Masri, B. ve Ren, W. 2021. Detecting Recent Crop Phenology Dynamics in Corn and Soybean Cropping Systems of Kentucky. *Remote Sensing*, 13(9), 1615.

- Yıldız, H., İlker, E. ve Yıldırım, A. 2017. Bazı silajlık mısır (*Zea mays*) çeşit ve çeşit adaylarının verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 12(2), 81-89.
- Yin, Y., Deng, H. ve Wu, S. 2019. Spatial-temporal variations in the thermal growing degree-days and season under climate warming in China during 1960–2011. *International Journal of Biometeorology*, 63, 649-658.
- You, X., Meng, J., Zhang, M. ve Dong, T. 2013. Remote sensing based detection of crop phenology for agricultural zones in China using a new threshold method. *Remote Sensing*, 5(7), 3190-3211.
- Yücel, A., Atilgan, A. ve Aktaş, H. 2019. Modeling of growth degree-day values of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant: the case of Çukurova region. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 7(sp2), 23-28.
- Zadoks, J. C., Chang, T. T. ve Konzak, C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415-421.
- Zanker, J.E. 2022. An Innovative Method For Estimating Planting Dates Using Remotely Sensed Data. *Theses and Dissertations*. 4302.
- Zhang, X., Friedl, M. A. ve Schaaf, C. B. 2009. Sensitivity of vegetation phenology detection to the temporal resolution of satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(8), 2061-2074.
- Zhang, Y. ve Li, M. 2021. A new method for monitoring start of season (SOS) of forest based on multisource remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, 102556.
- Zhang, R., Zhou, Y., Hu, T., Sun, W., Zhang, S., Wu, J. Ve Wang, H. 2023. Detecting the Spatiotemporal Variation of Vegetation Phenology in Northeastern China Based on MODIS NDVI and Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Dataset. *Sustainability*, 15(7), 6012.
- Zheng, Z. ve Zhu, W. 2017. Uncertainty of remote sensing data in monitoring vegetation phenology: A comparison of MODIS C5 and C6 vegetation index products on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 9(12), 1288.
- Zhong, L., Gong, P. ve Biging, G.S. 2014. Efficient corn and soybean mapping with temporal extendability: a multi-year experiment using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.023>
- Zhou, G. ve Wang, Q. 2018. A new nonlinear method for calculating growing degree days. *Scientific Reports*, 8(1), 10149.
- Zhou, K., Cheng, T., Zhu, Y., Cao, W., Ustin, S.L., Zheng, H., Yao, X. ve Tian, Y. 2018. Assessing the Impact of Spatial Resolution on the Estimation of Leaf Nitrogen Concentration Over the Full Season of Paddy Rice Using Near-Surface Imaging Spectroscopy Data, *Frontiers in Plant Science*, 9, 964.

EKLER

EK 1 NDVI Haritaları

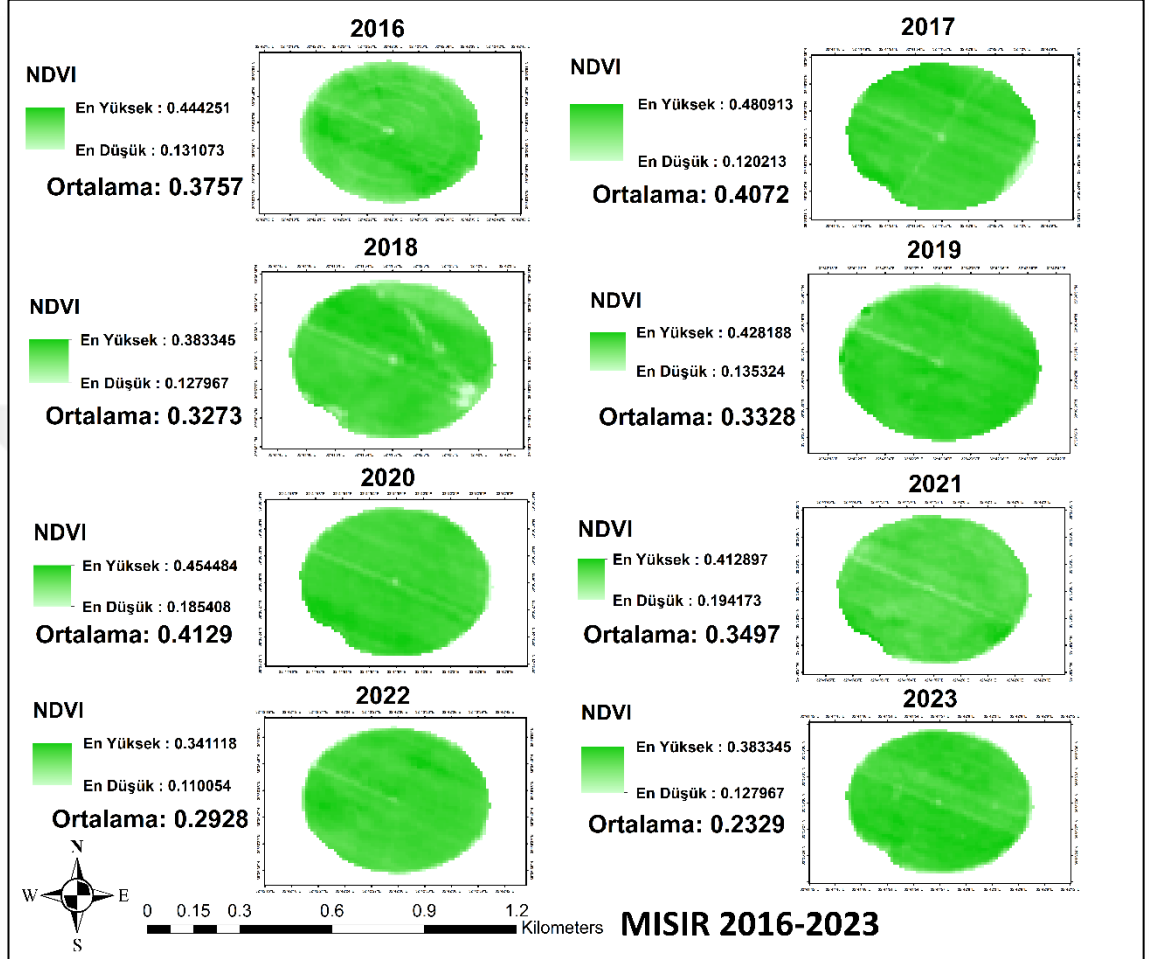
**EK 2 Silajlık Mısır Bitkisinin Yıllara göre Fenolojik Evrelerinin Uzunluğu,
NDVI Oranı ve KBDG Değerleri**

**EK 3 Buğday Bitkisinin Yıllara göre Fenolojik Evrelerinin Uzunluğu, NDVI Oranı
ve KBDG Değerleri**

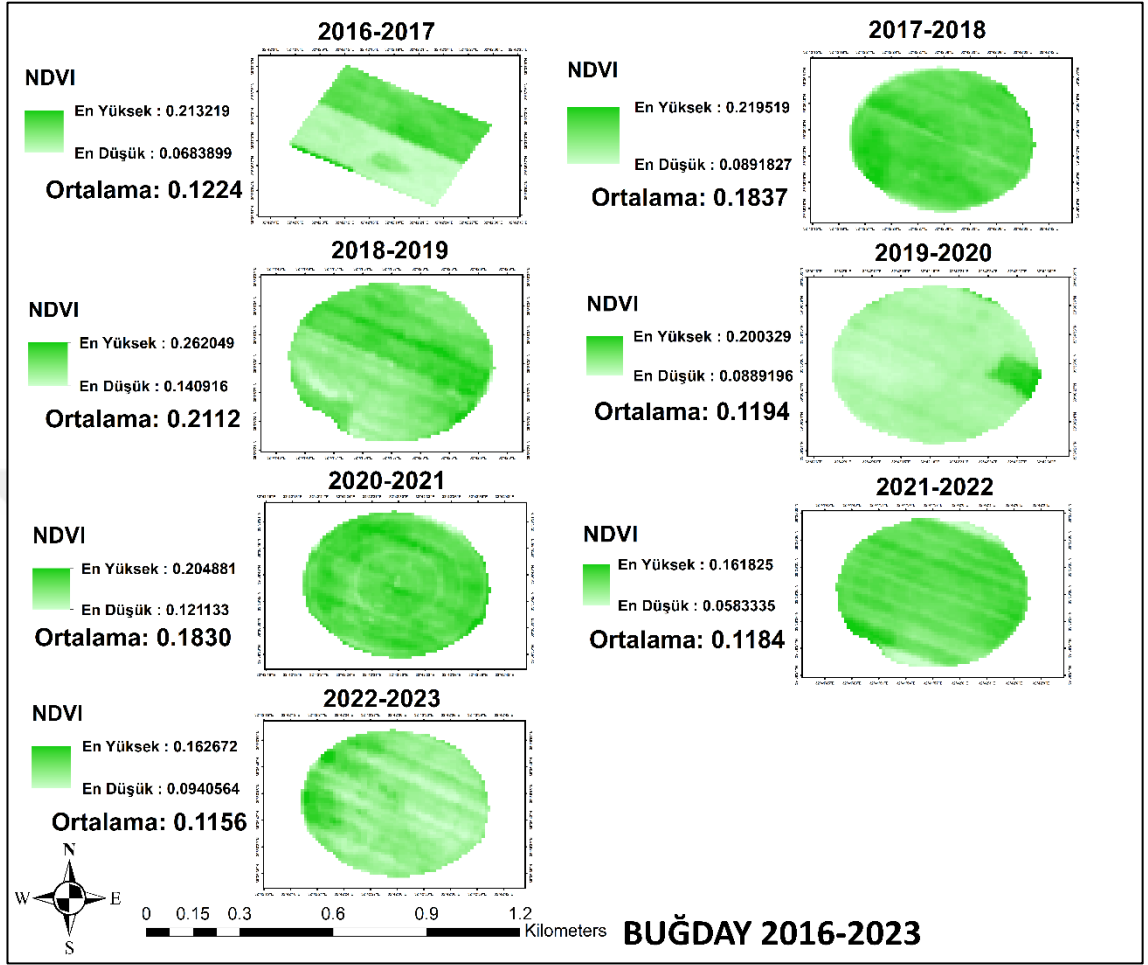
EK 4 2016-2023 Yılları Veri Önışleme Sonucu Oluşturulan NDVI

EK 1 NDVI Haritaları

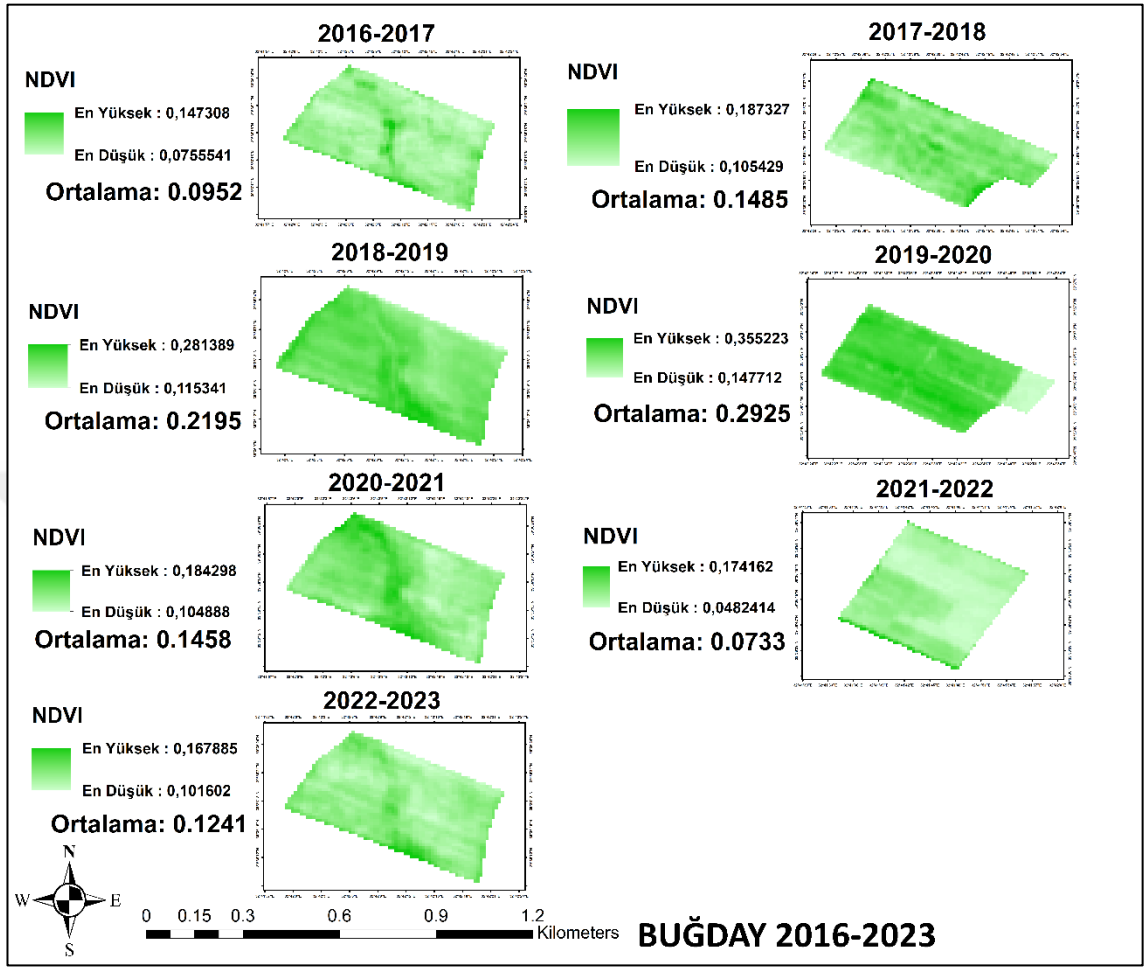
Silajlık Mısır



Buğday Bitkisi Sulamaya Dayalı Tarım

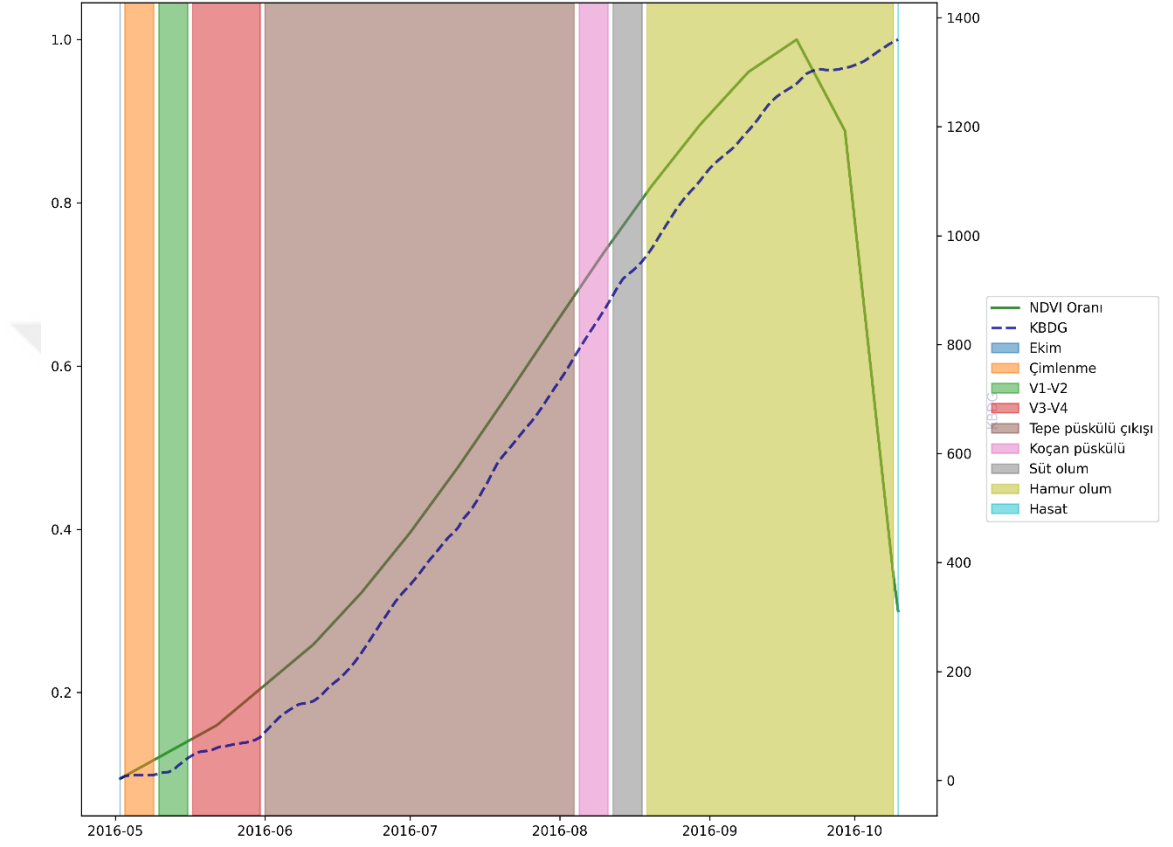


Buğday Bitkisi Yağışa Dayalı Tarım

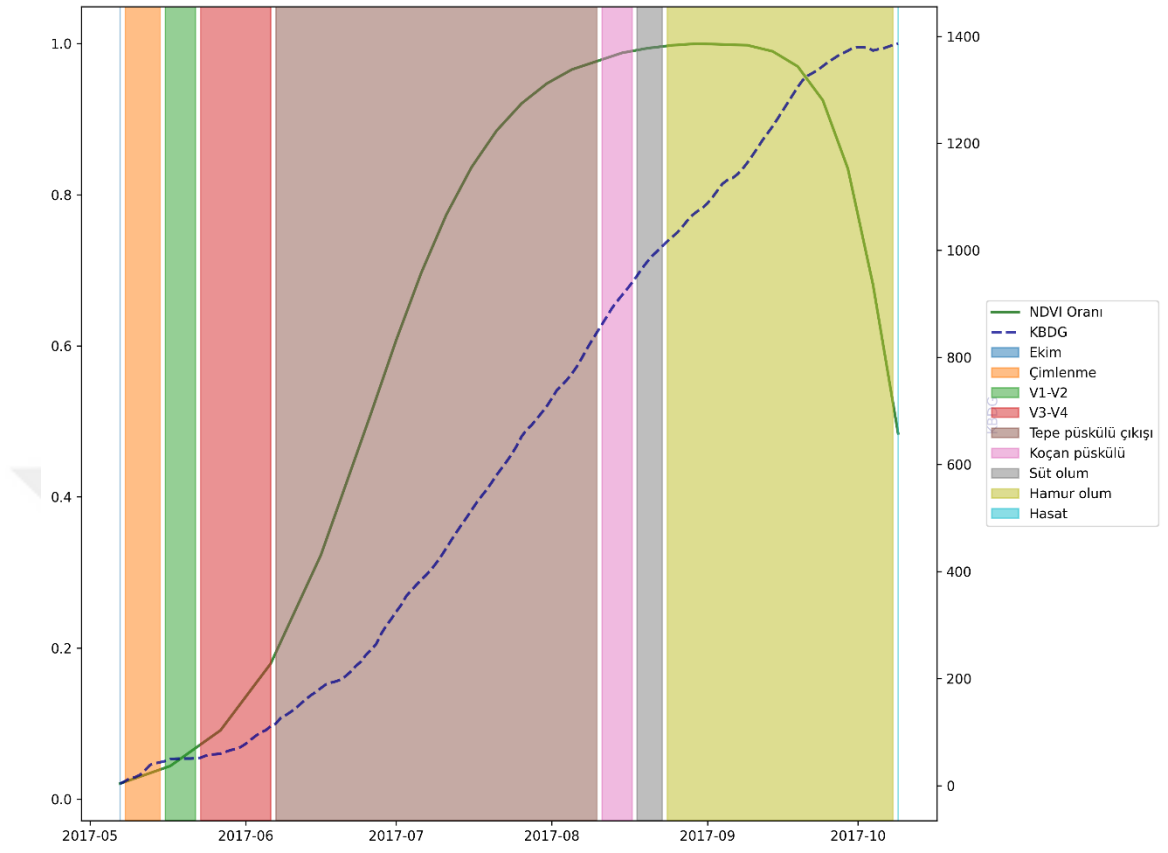


EK 2 Silajlık Mısır Bitkisinin Yıllara göre Fenolojik Evrelerinin Uzunluğu, NDVI Oranı ve KBDG Değerleri

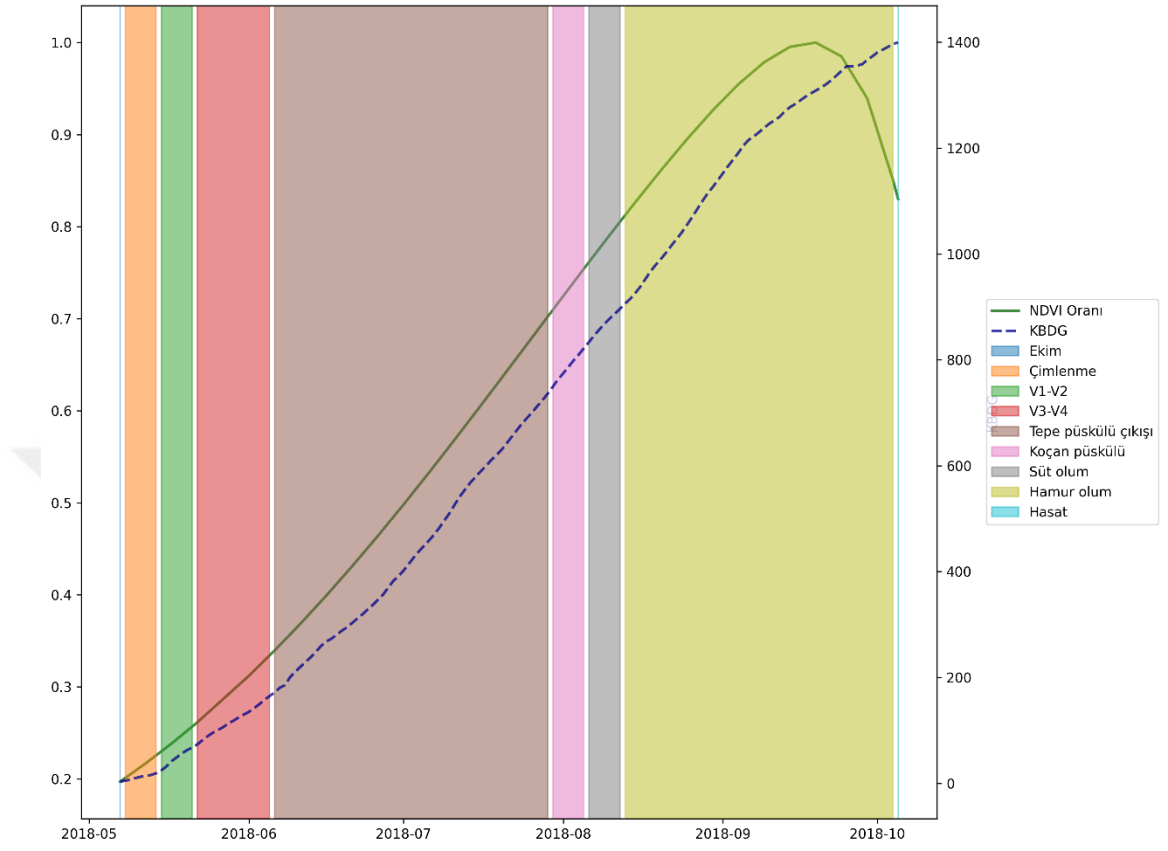
2016



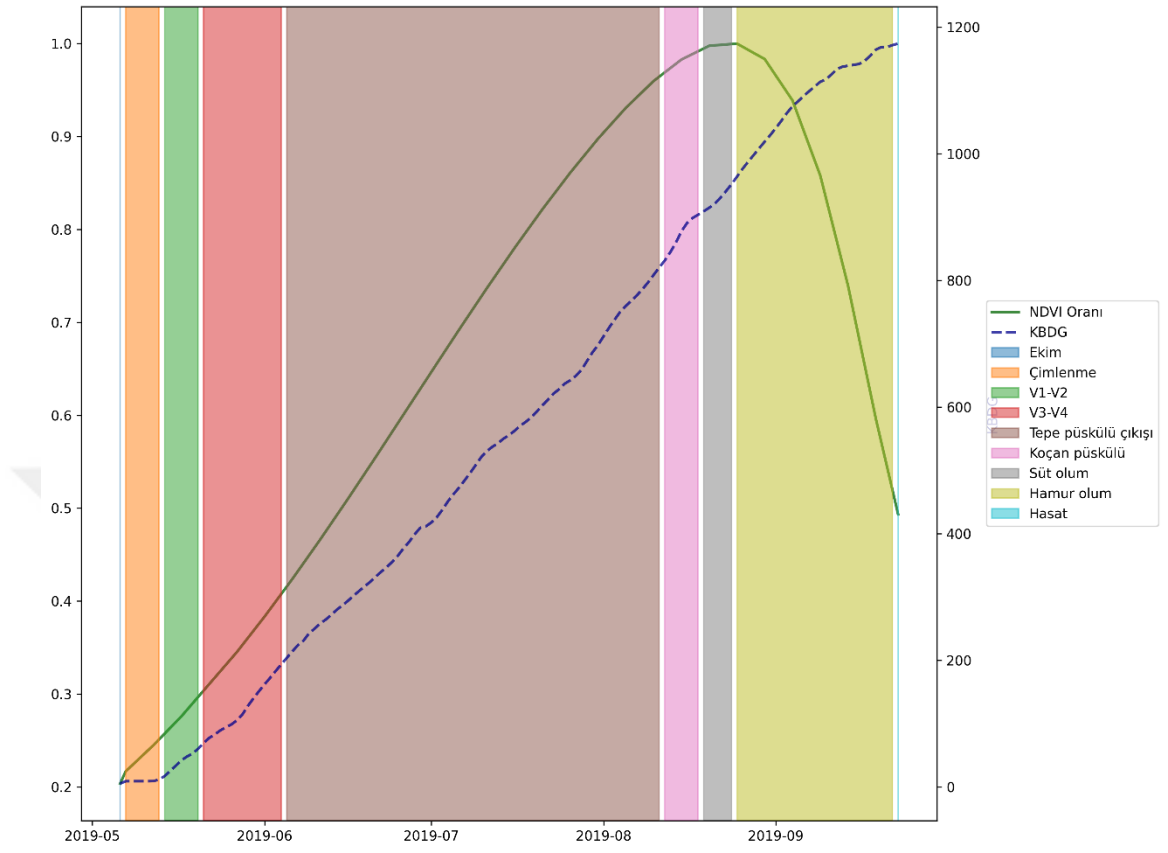
2017



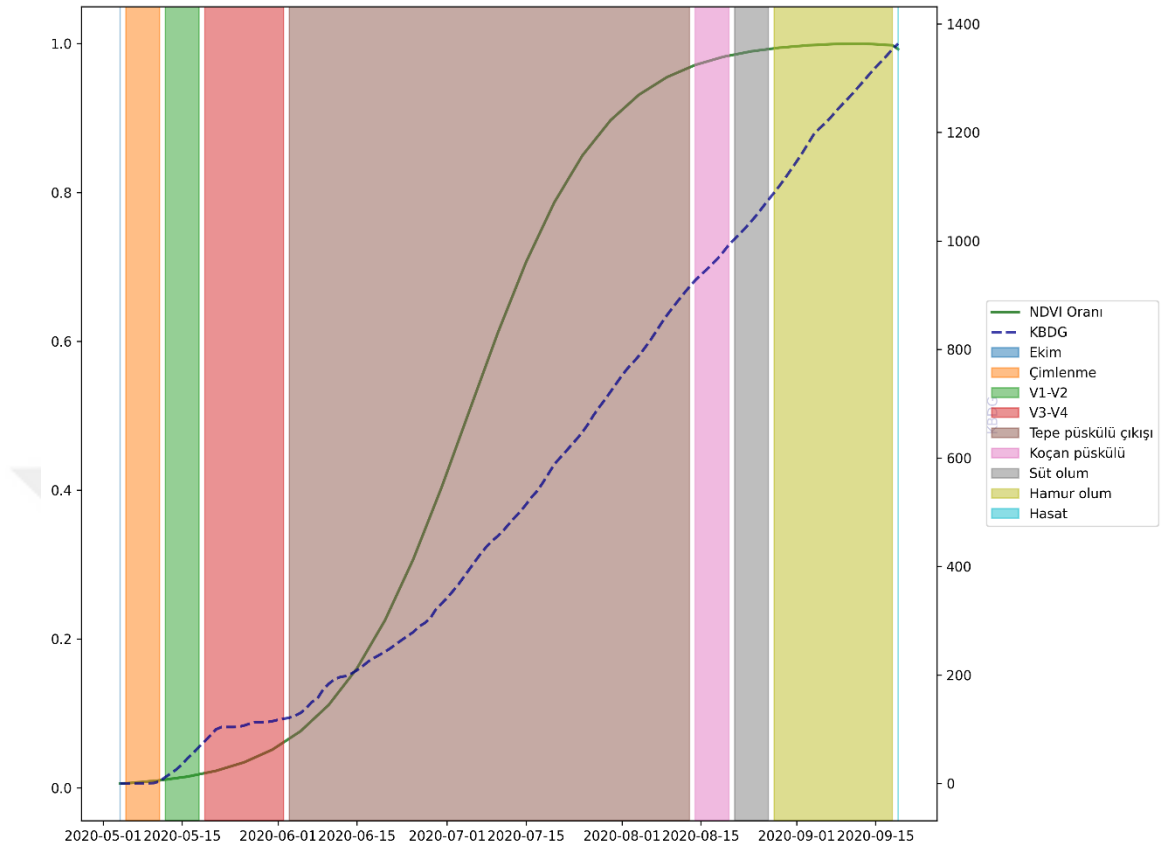
2018



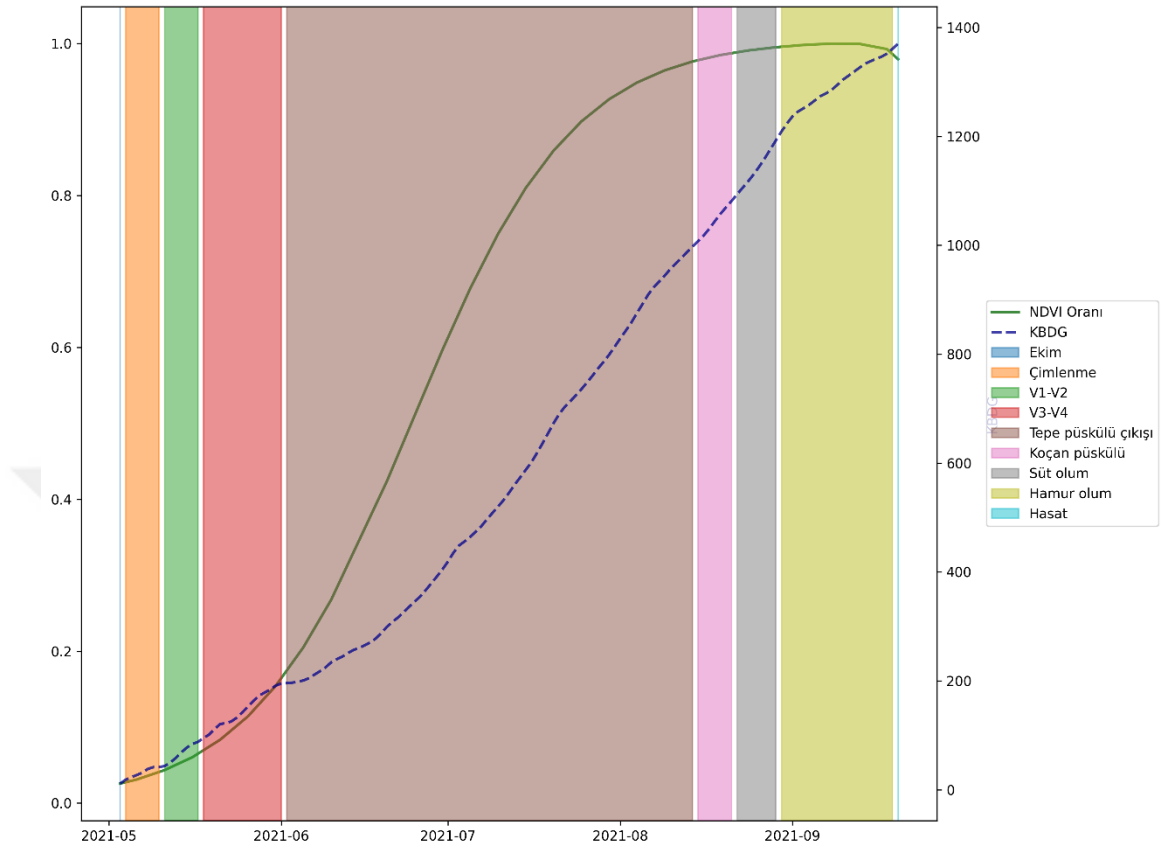
2019



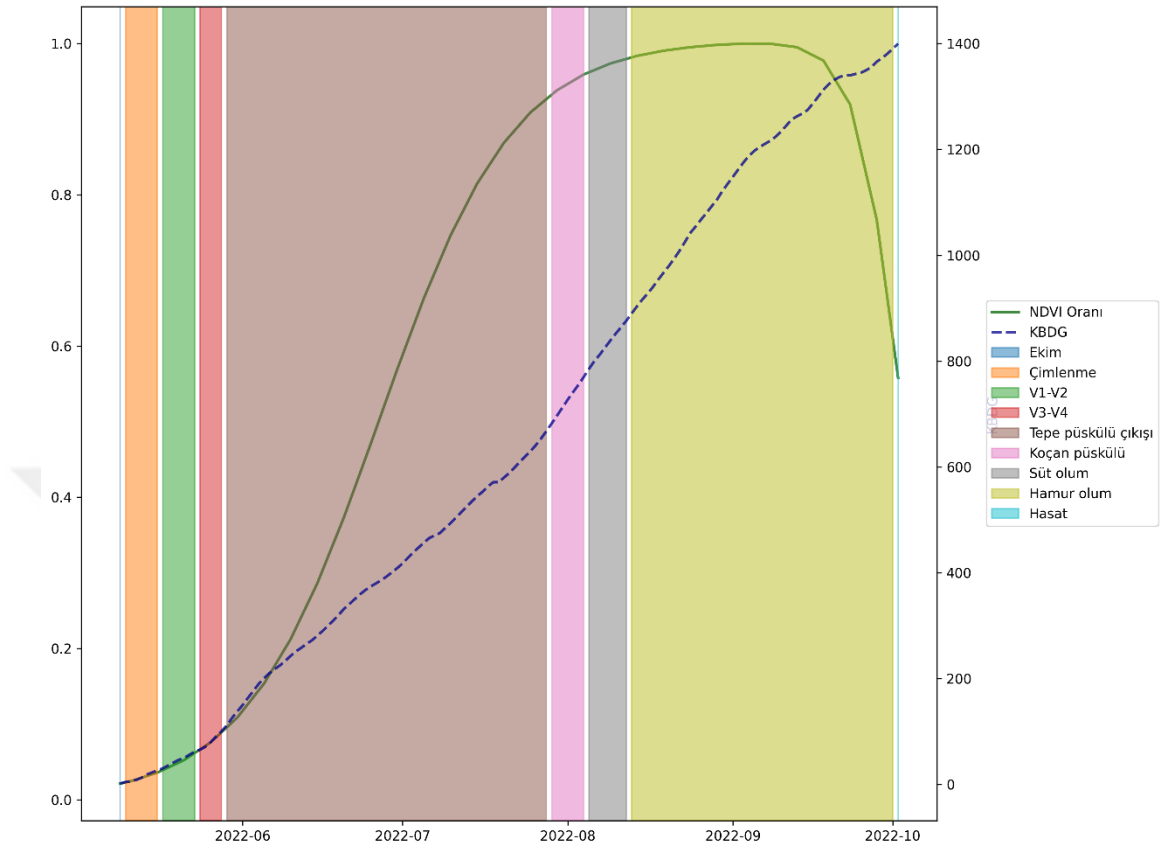
2020



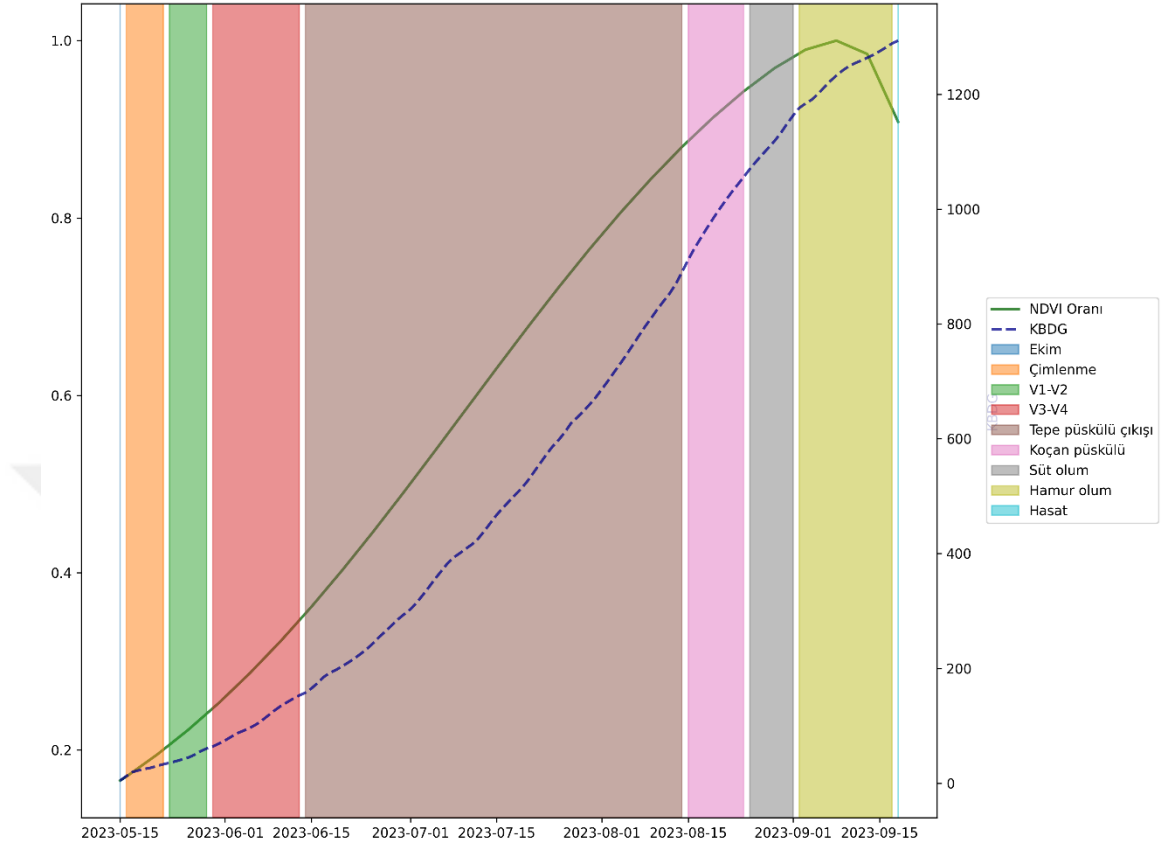
2021



2022



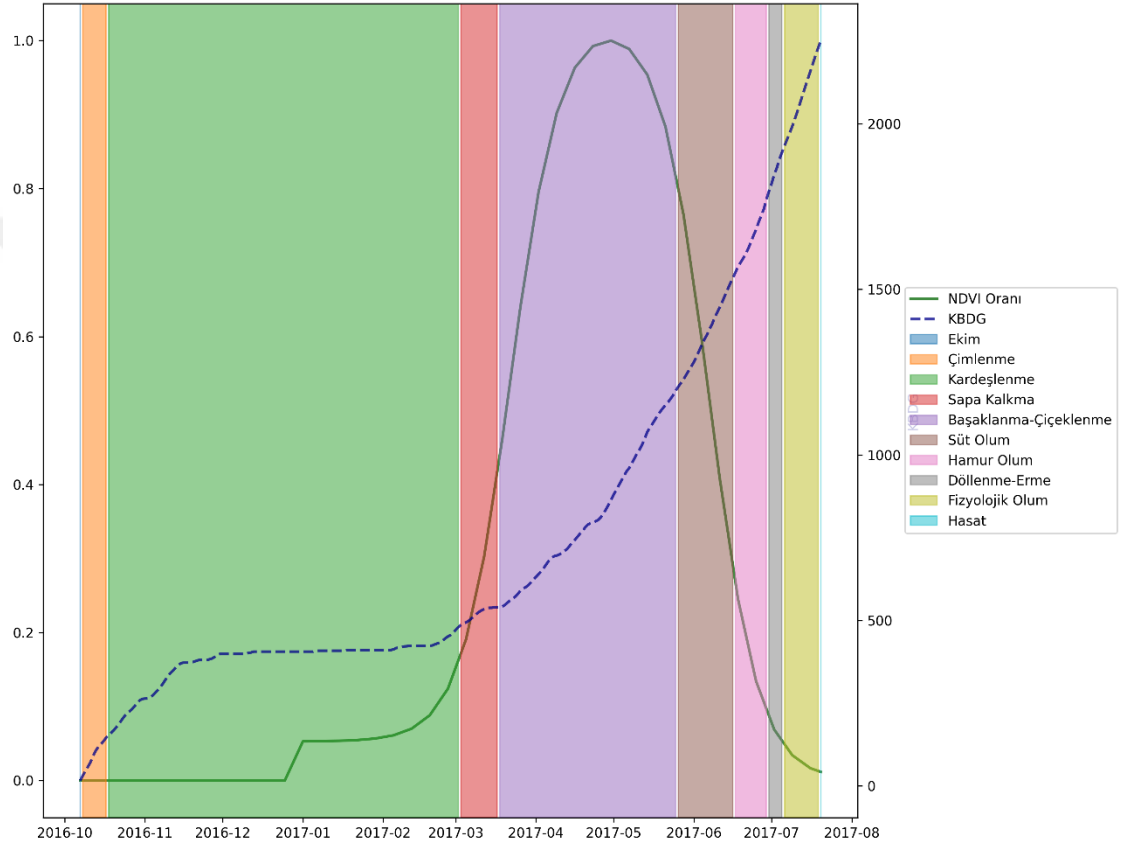
2023



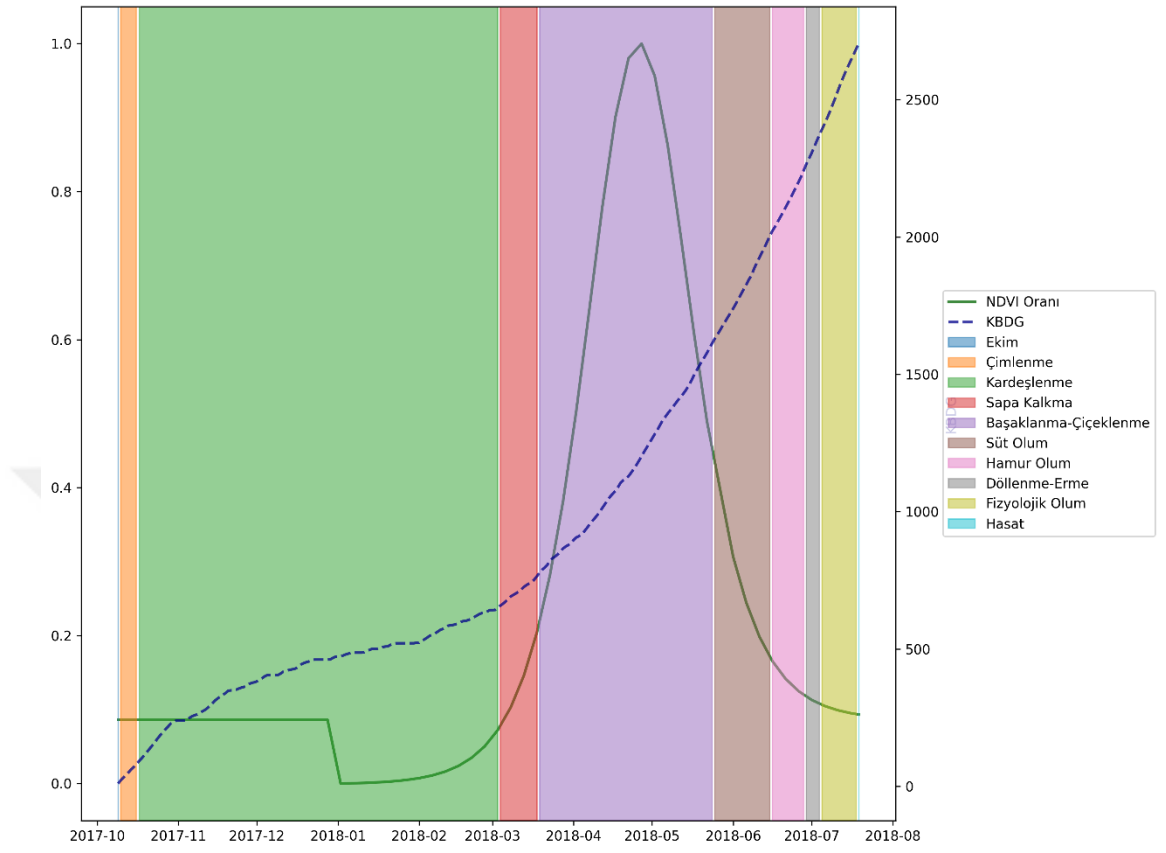
EK 3 Buğday Bitkisinin Yıllara göre Fenolojik Evrelerinin Uzunluğu, NDVI Oranı ve KBDG Değerleri

Buğday bitkisi sulamaya dayalı yetiştiricilik sınıfı

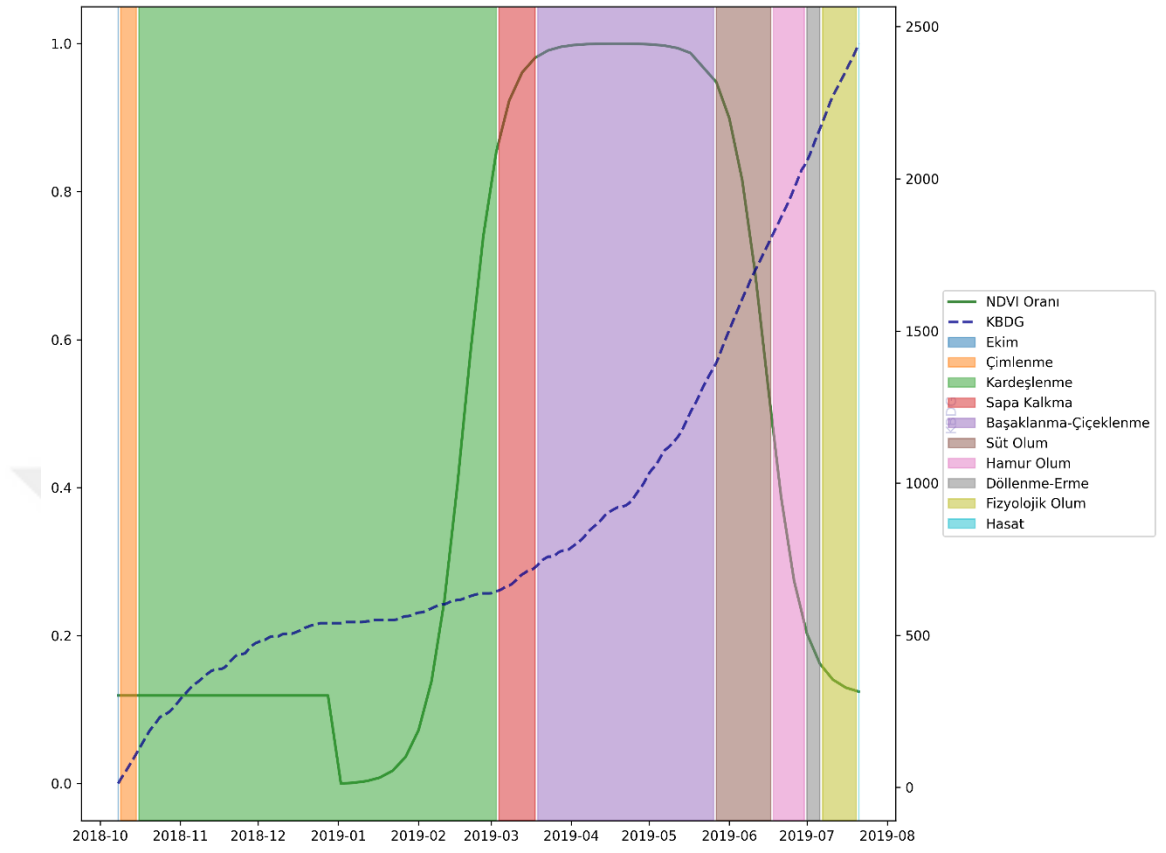
2016-2017



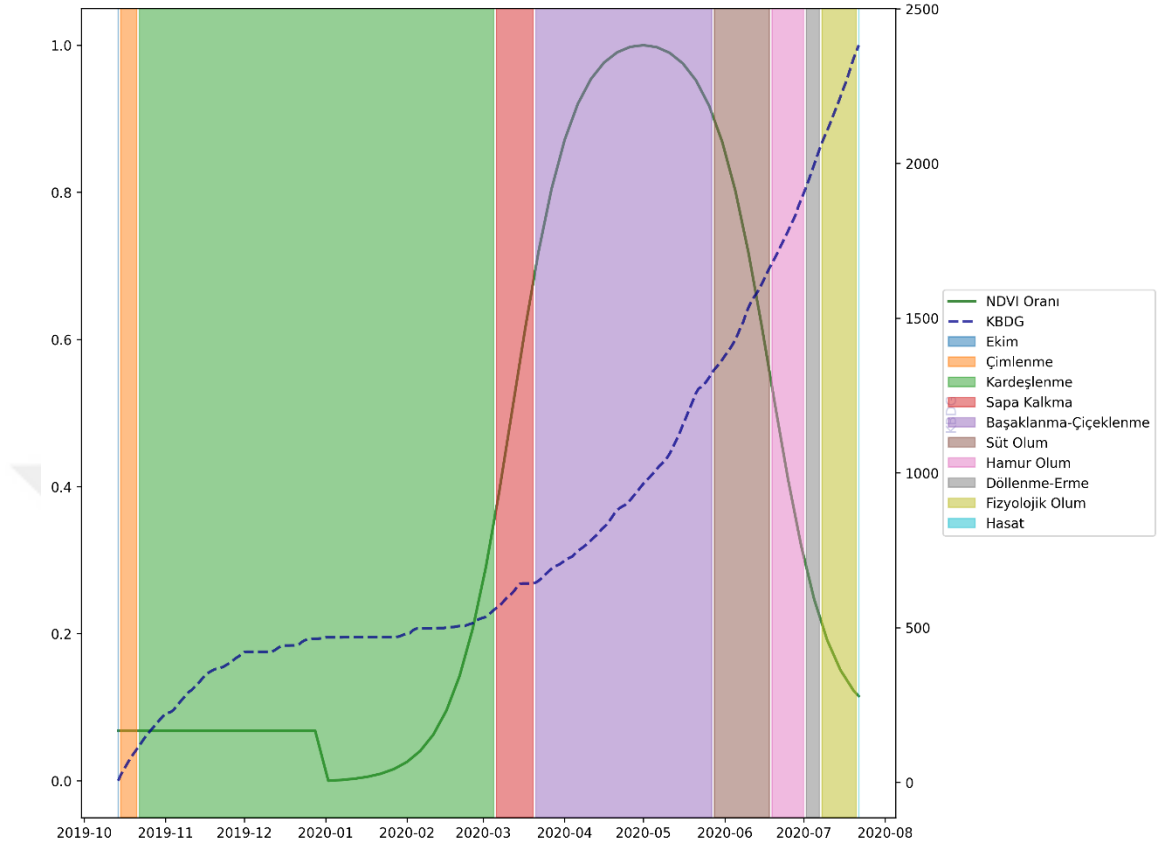
2017-2018



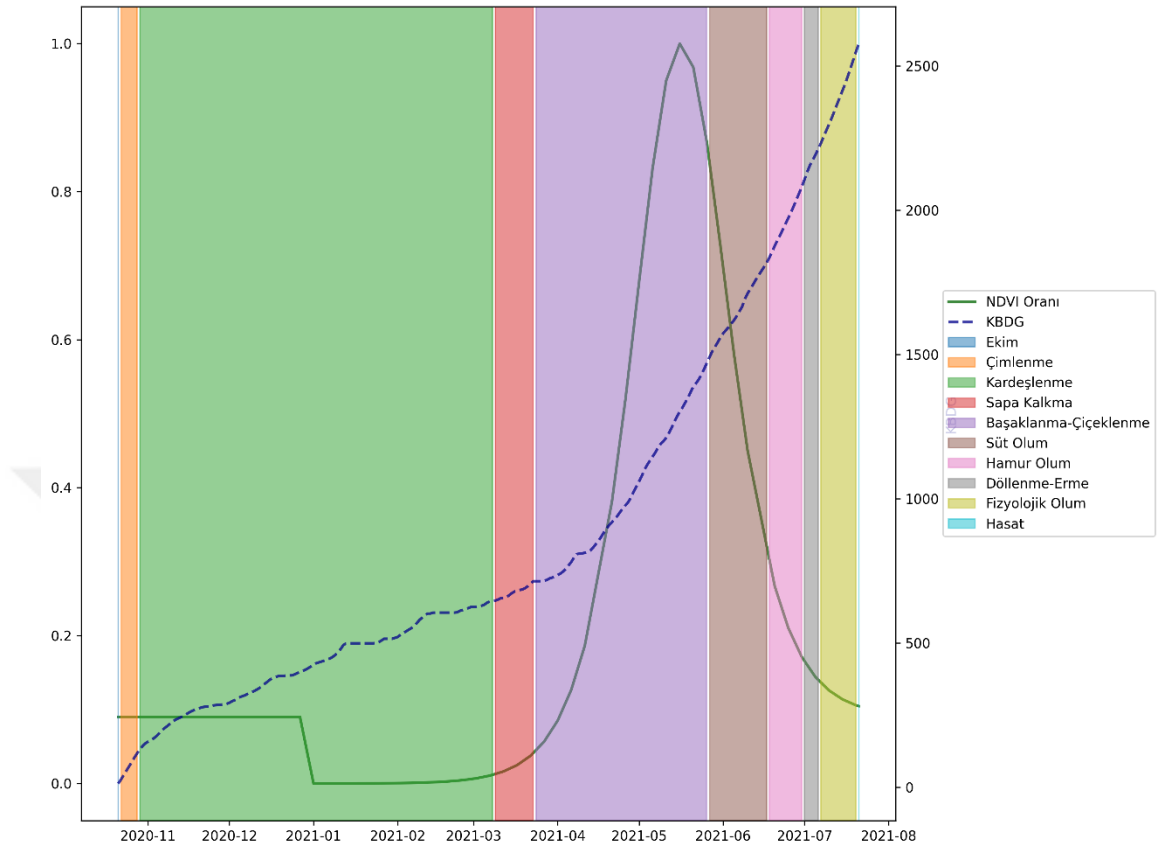
2018-2019



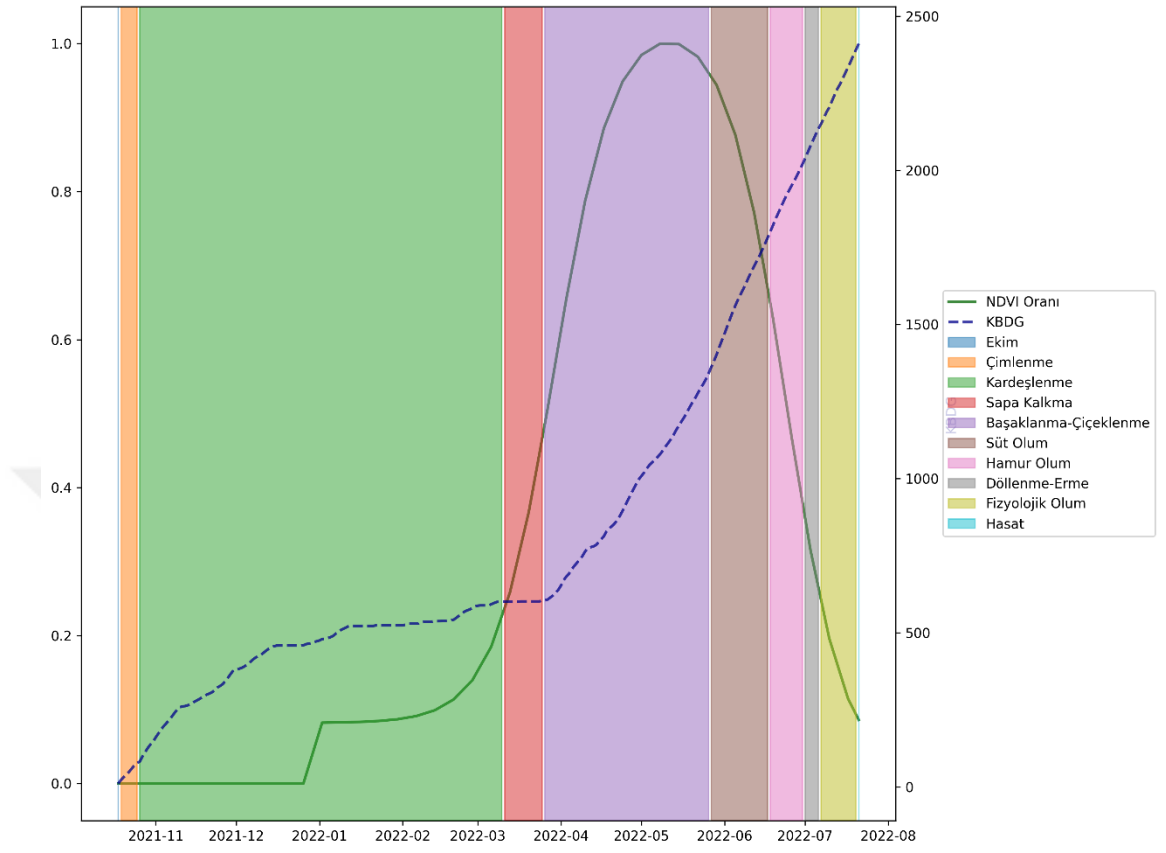
2019-2020



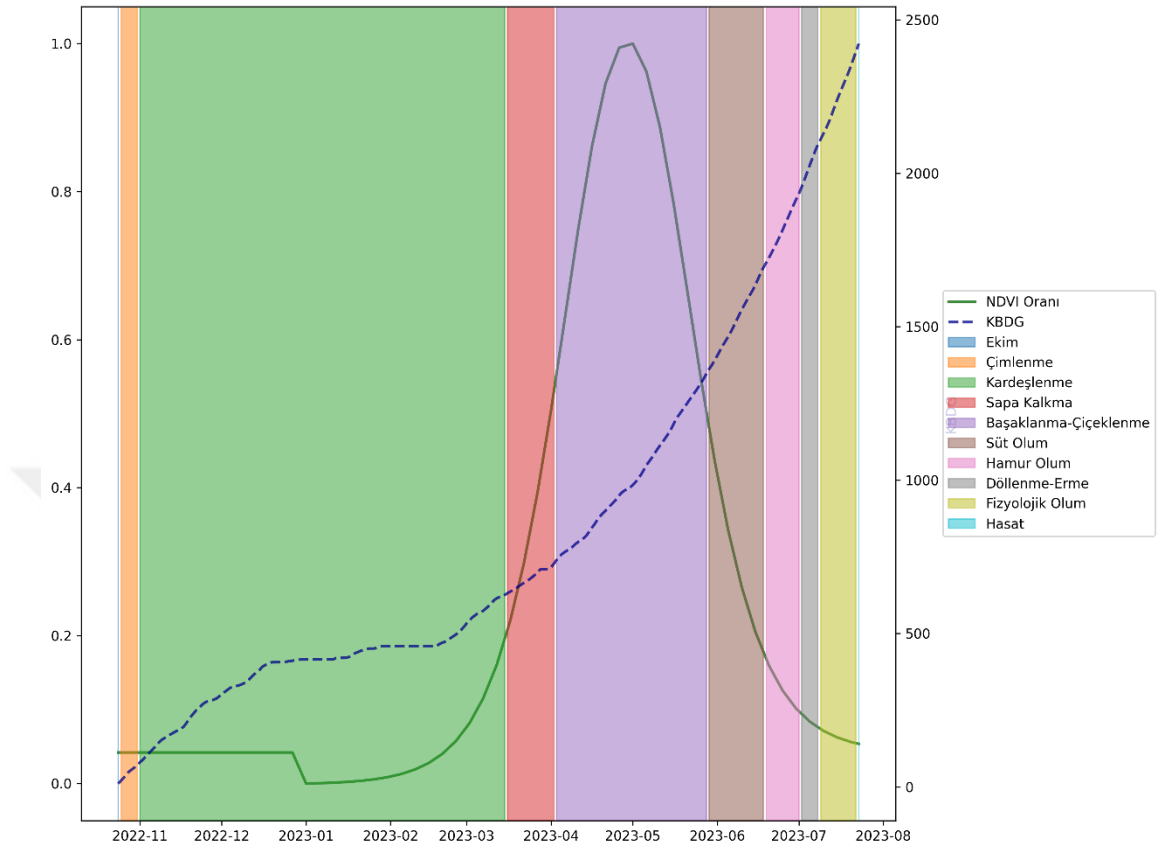
2020-2021



2021-2022

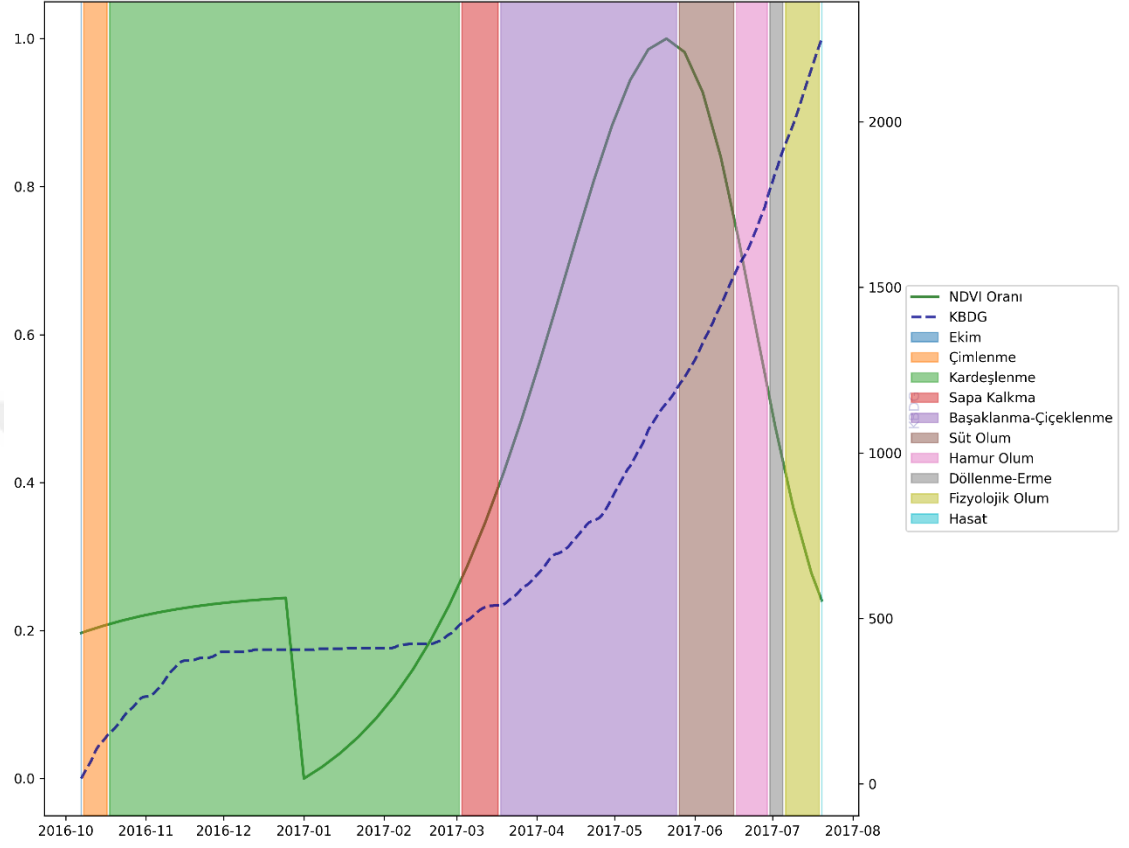


2022-2023

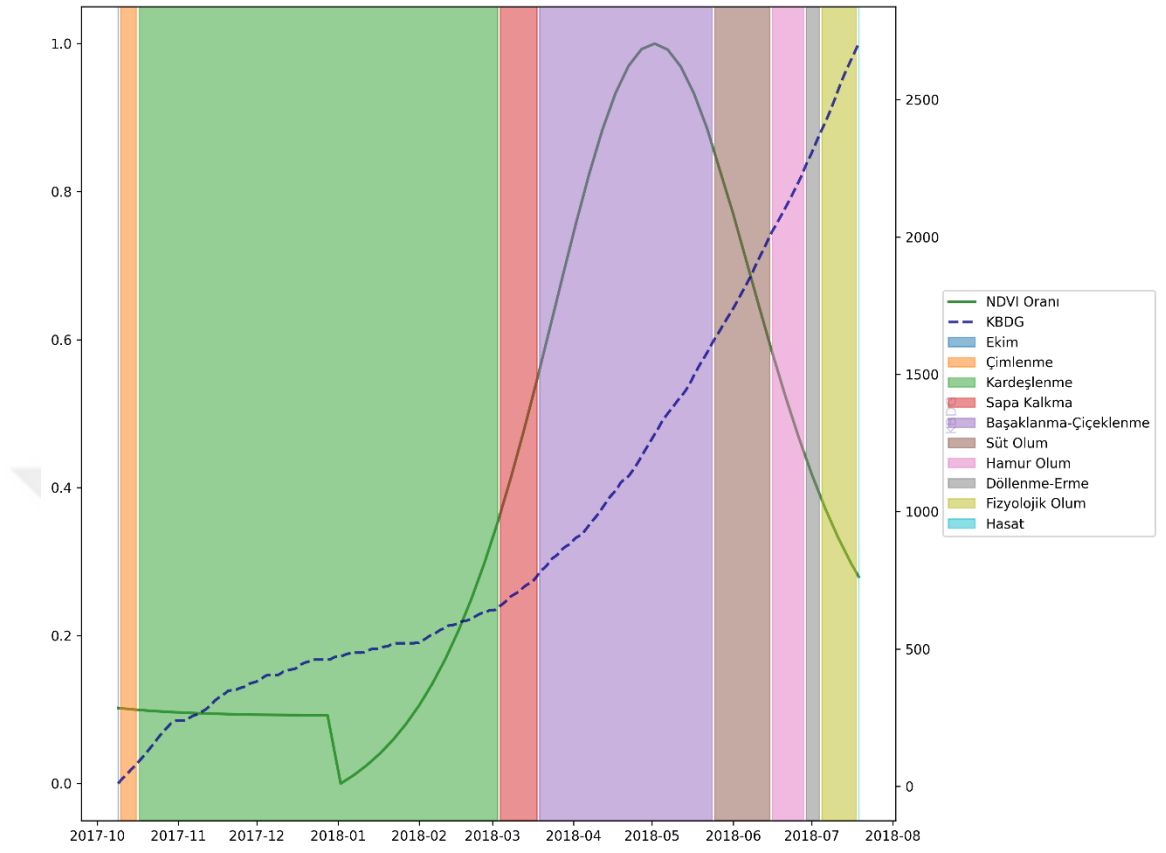


Buğday bitkisi yağışa dayalı yetiştiricilik sınıfı

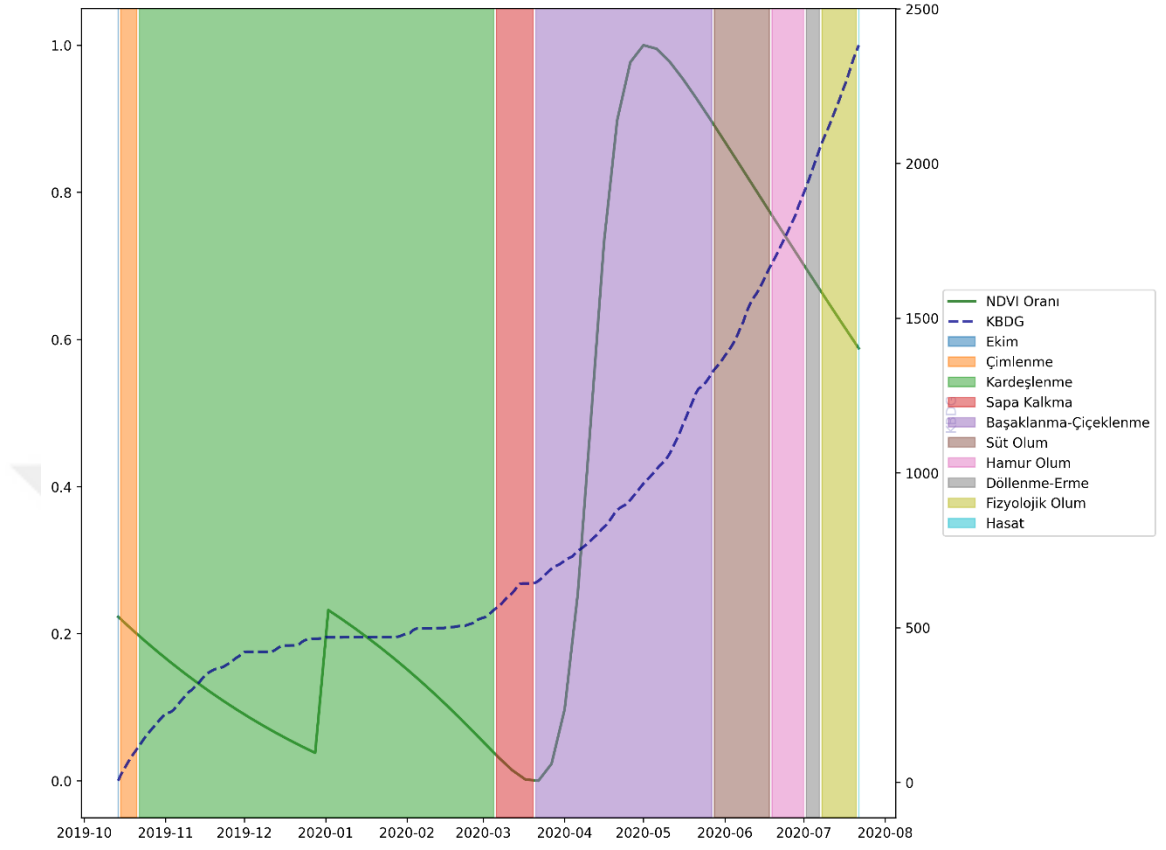
2016-2017



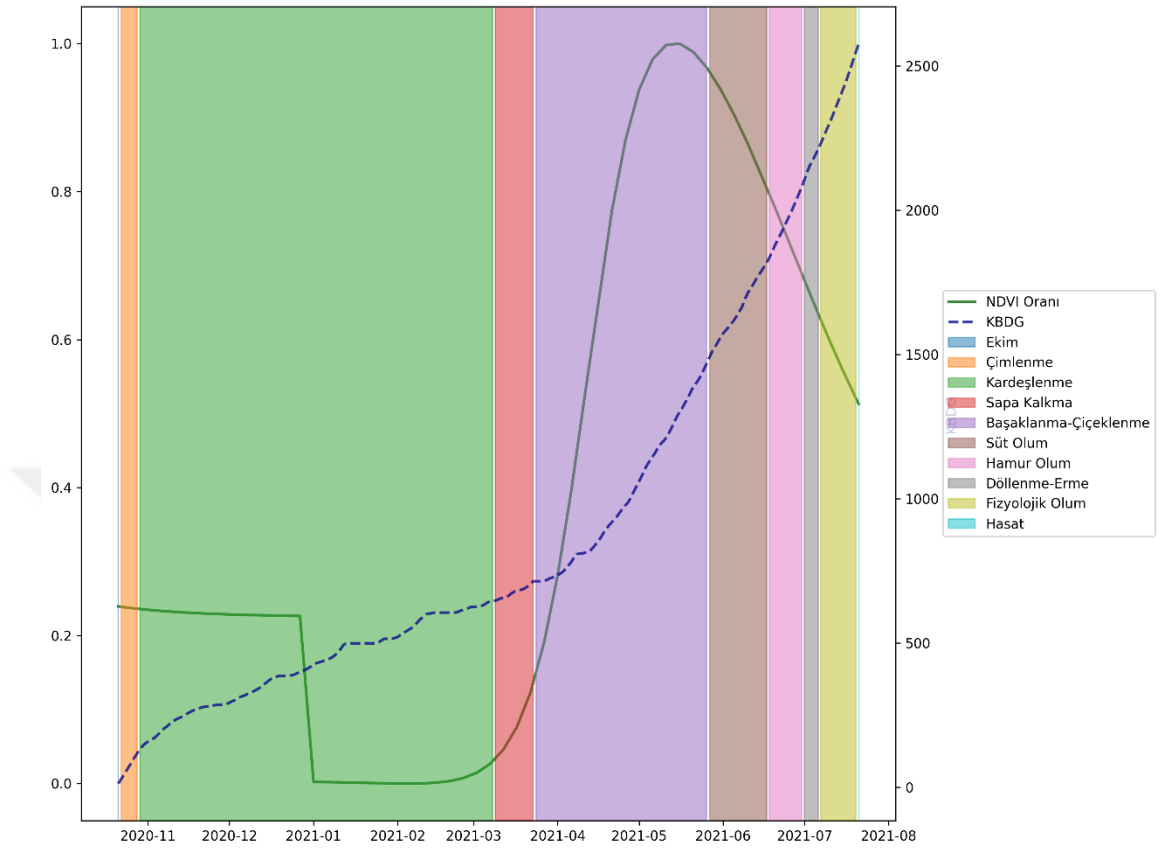
2017-2018



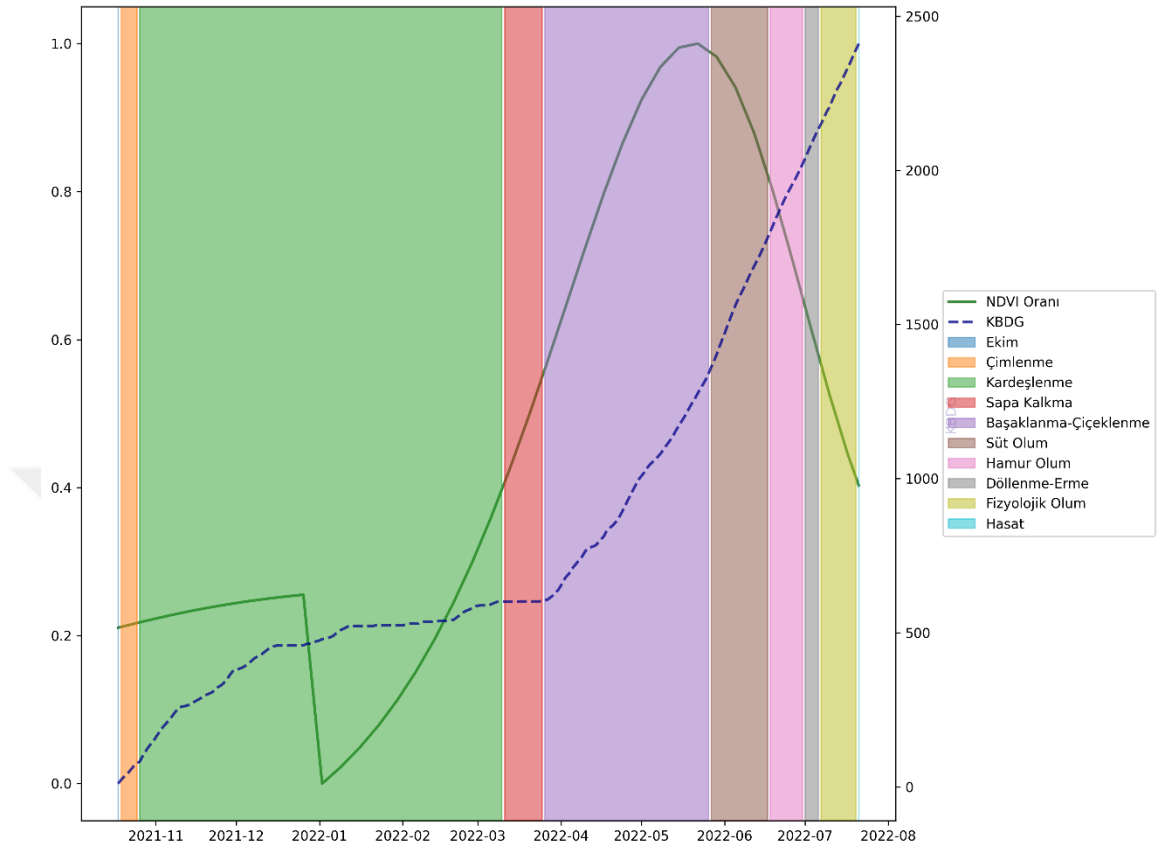
2019-2020



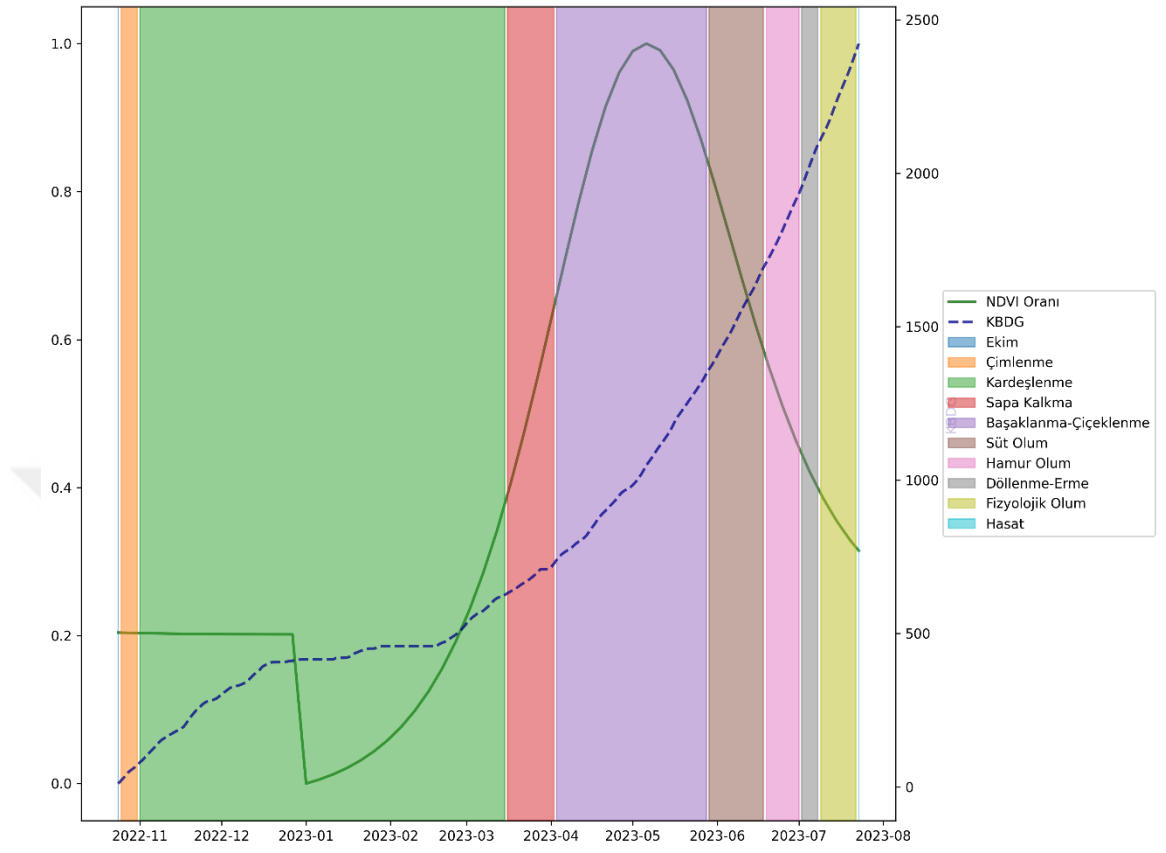
2020-2021



2021-2022



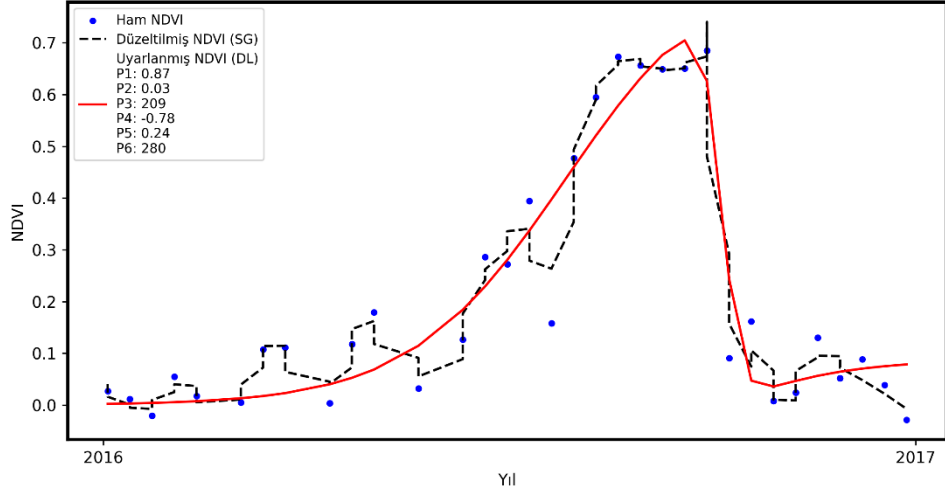
2022-2023



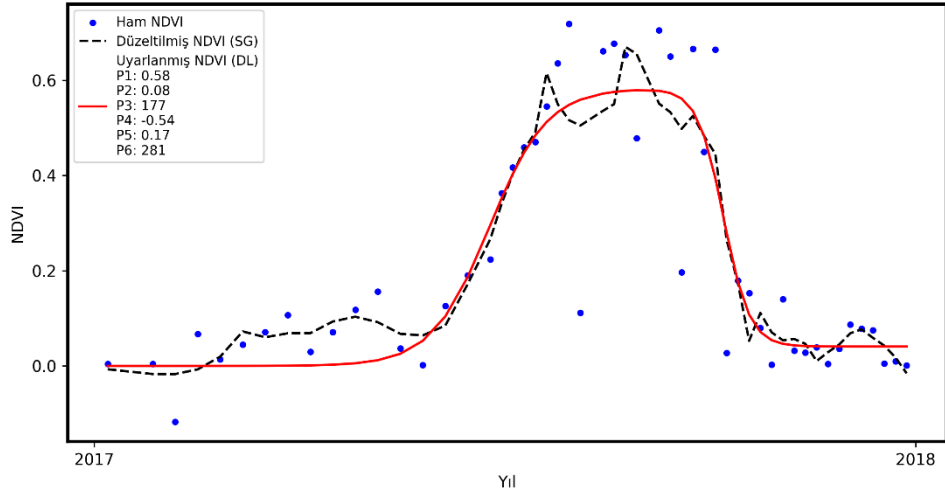
EK 4 2016-2023 Yılları Veri Önışleme Sonucu Oluşturulan NDVI eğrileri

Silajlık mısır bitkisi

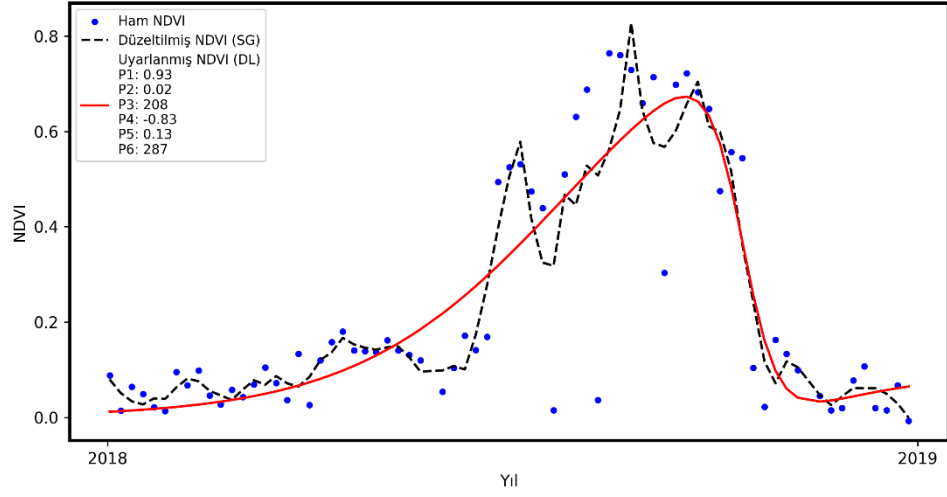
2016



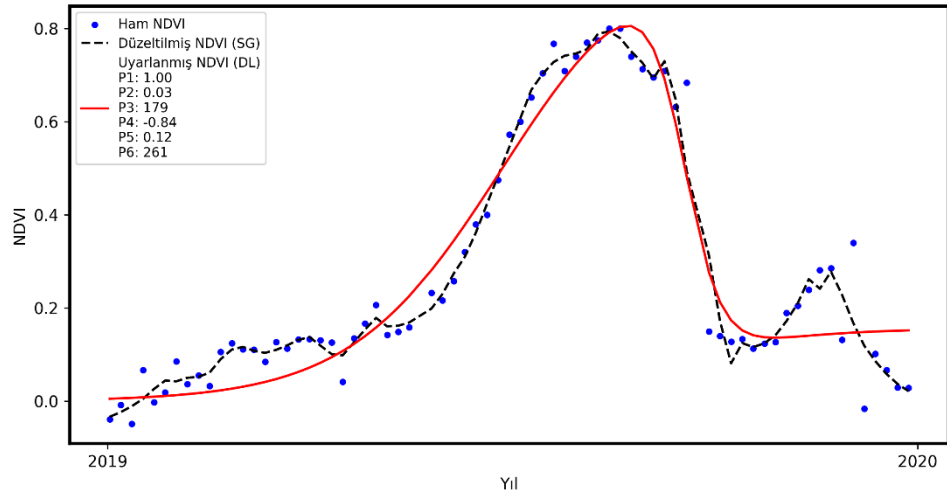
2017



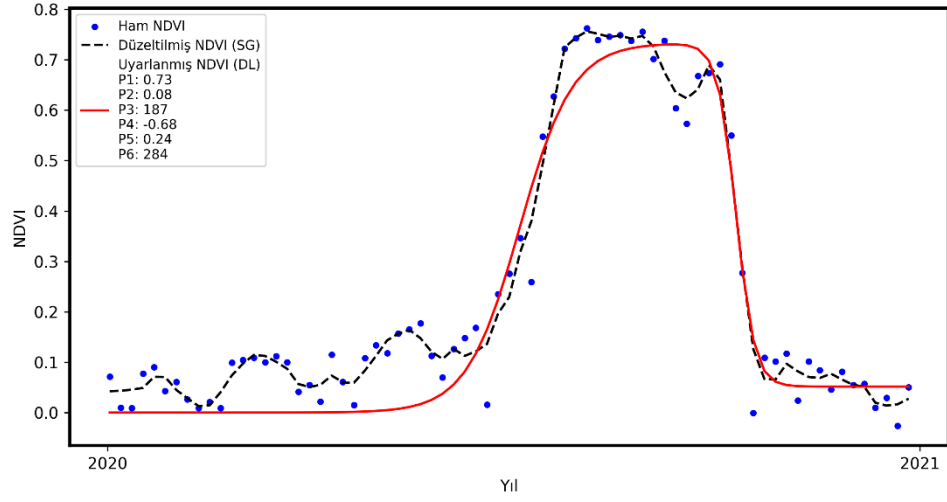
2018



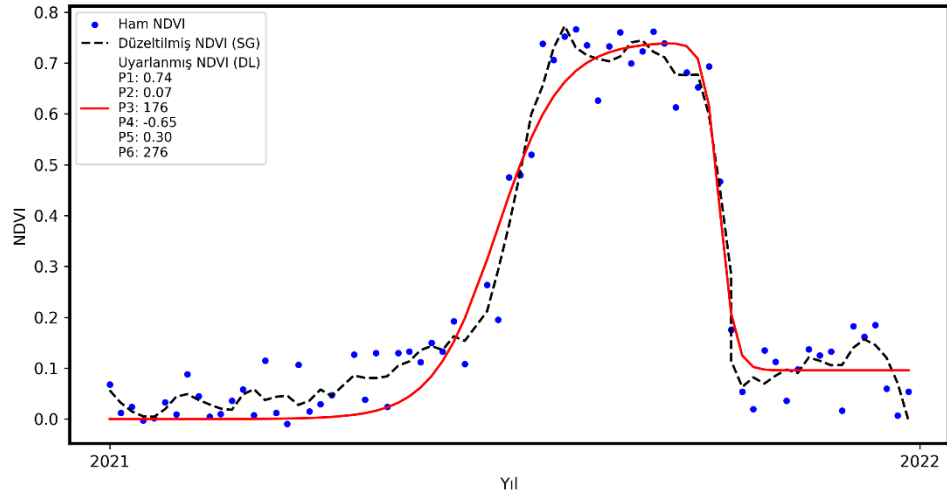
2019



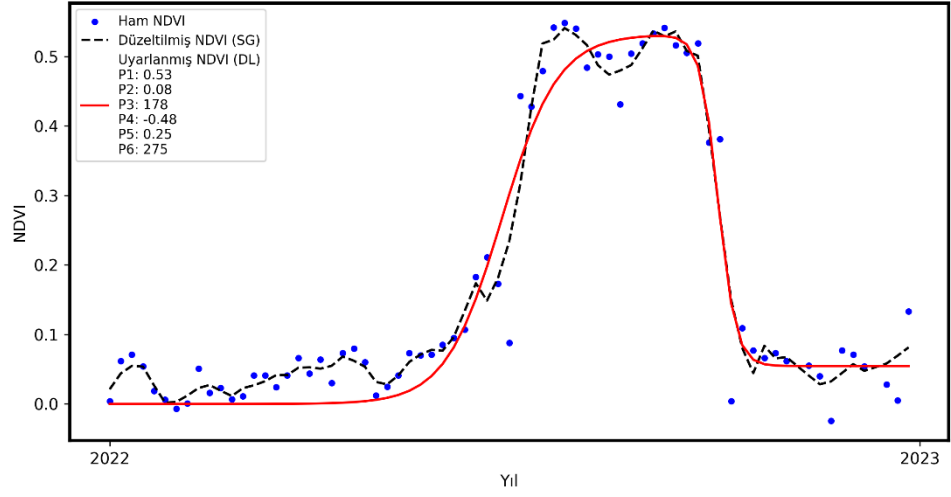
2020



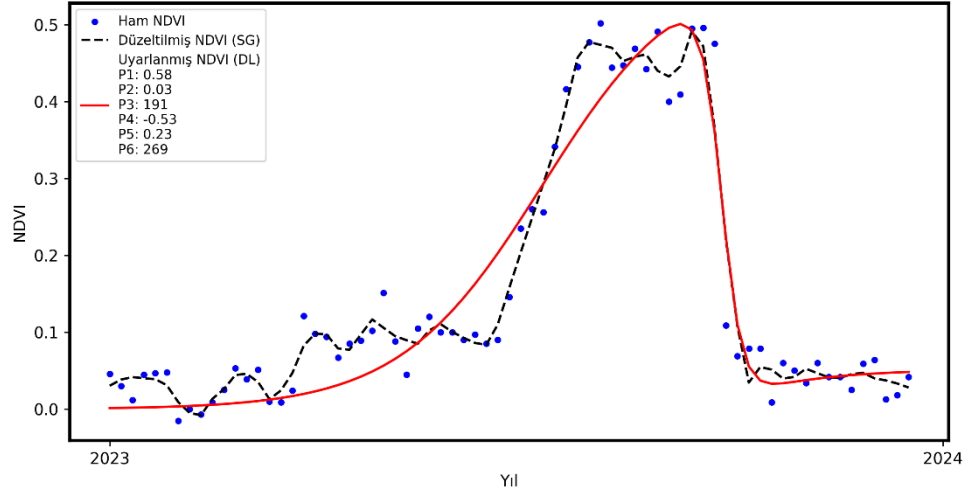
2021



2022

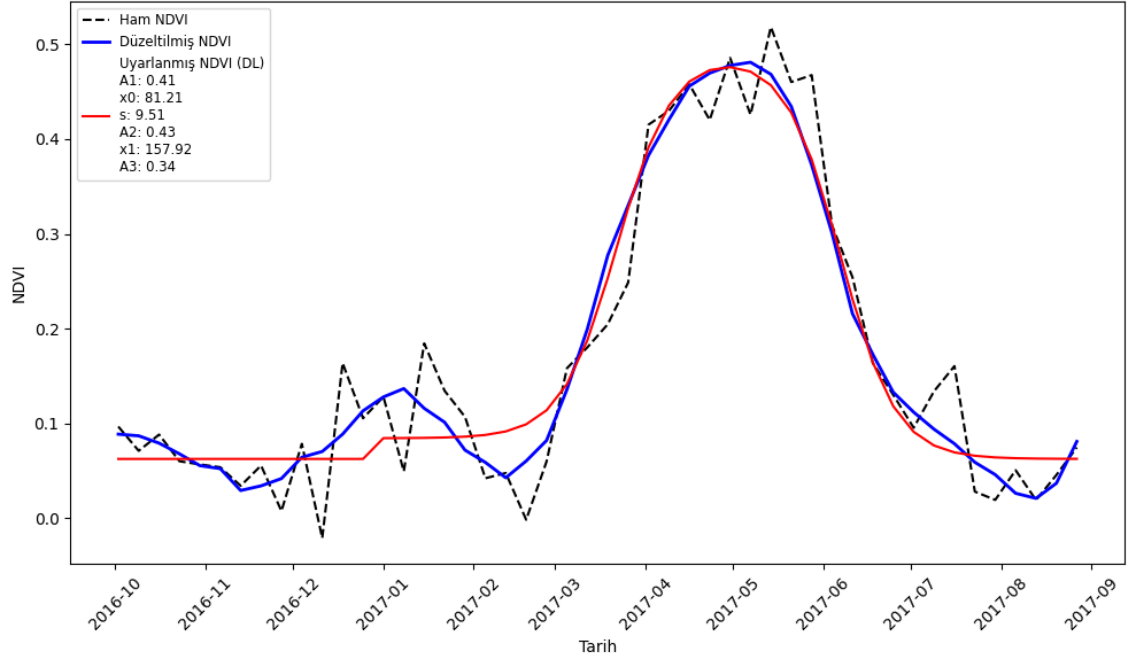


2023

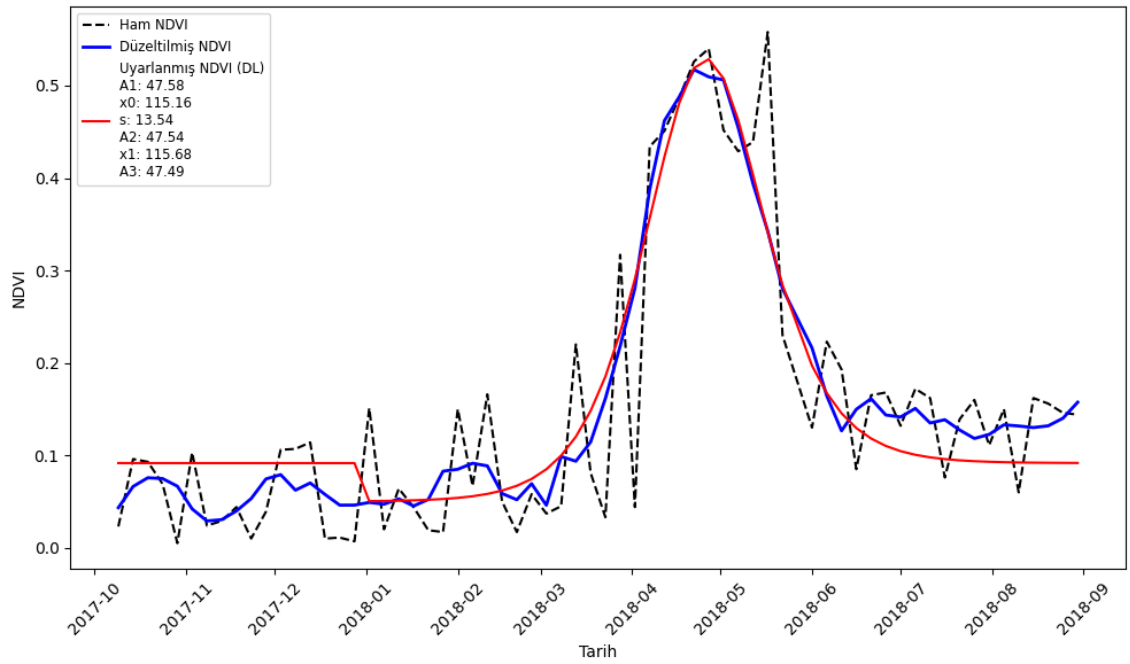


Buğday bitkisi sulamaya dayalı yetiştiricilik sınıfı

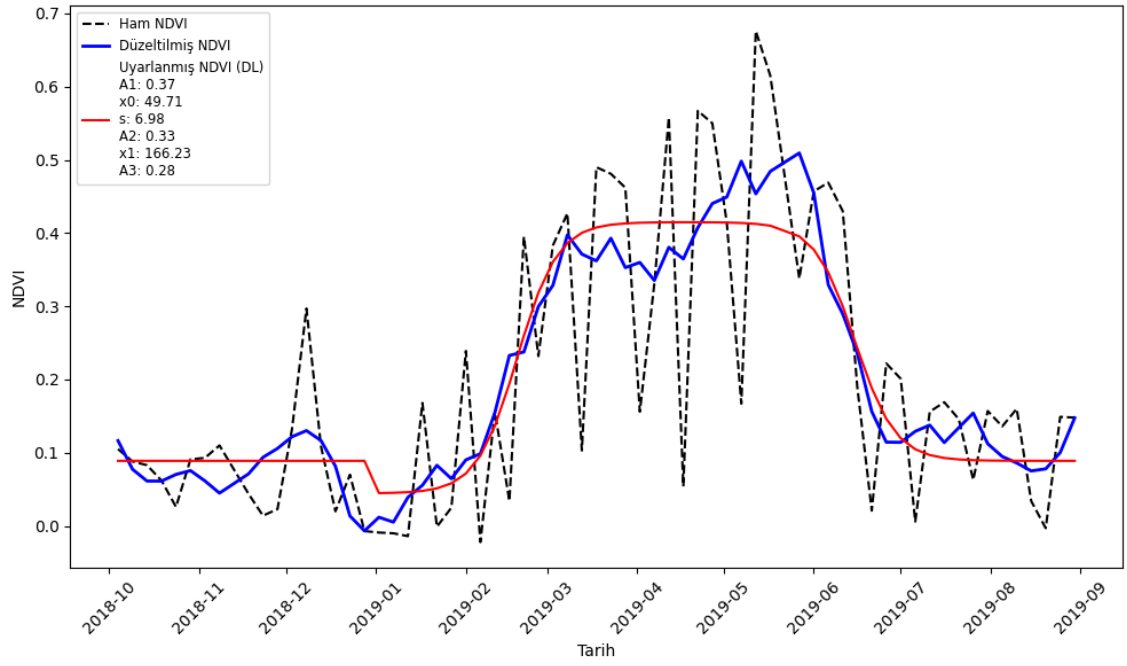
2016-2017



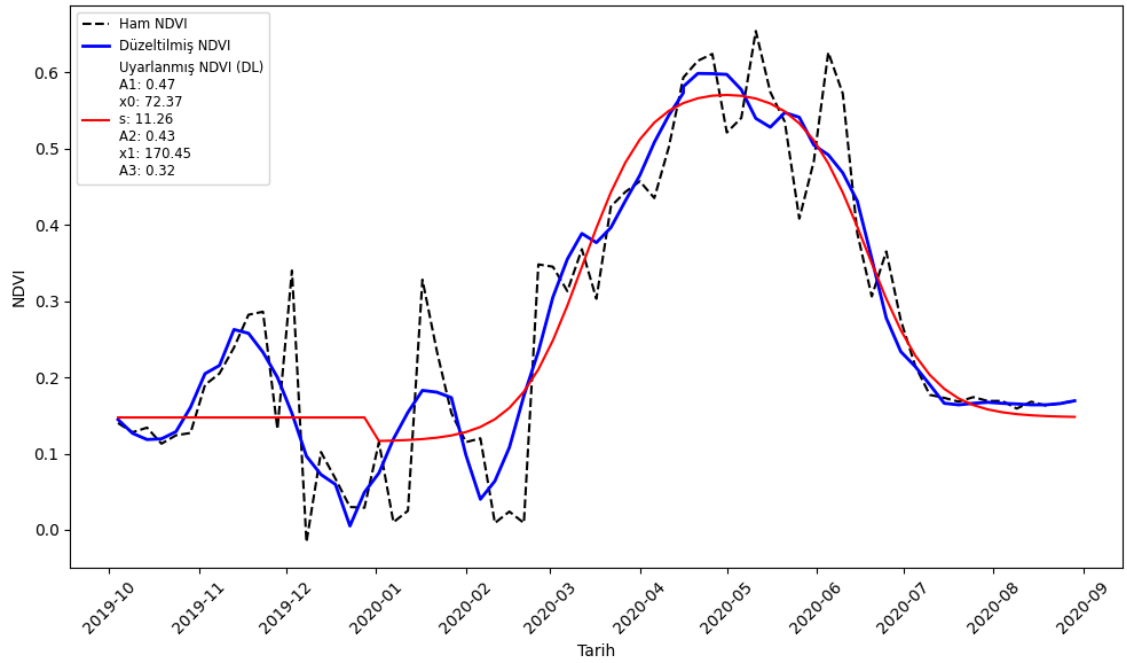
2017-2018



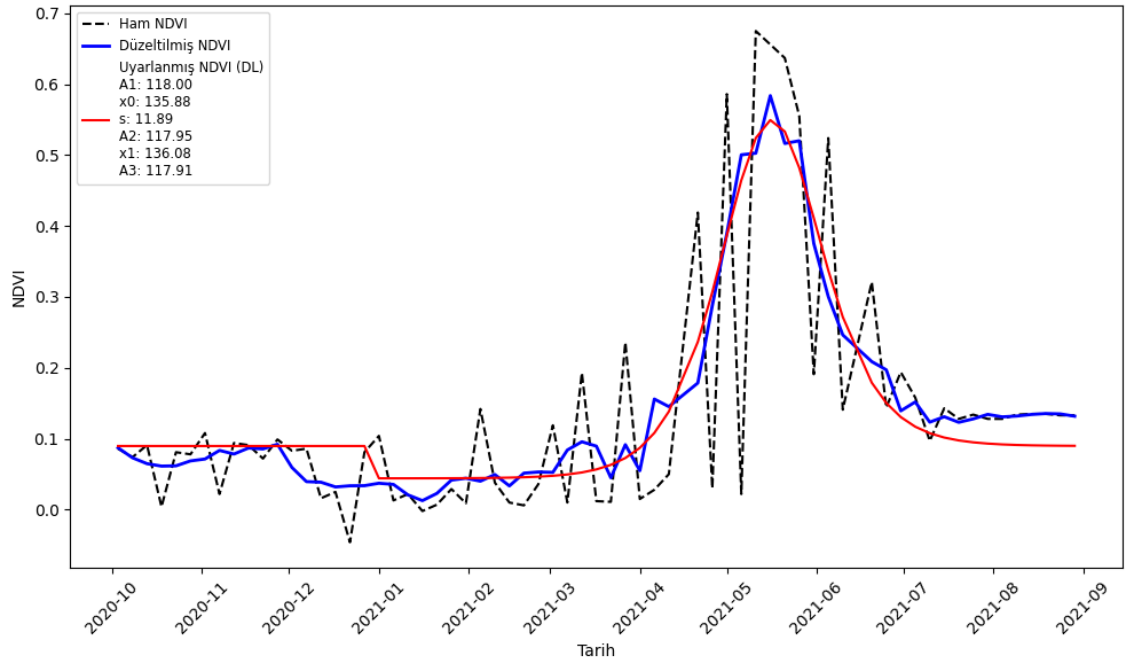
2018-2019



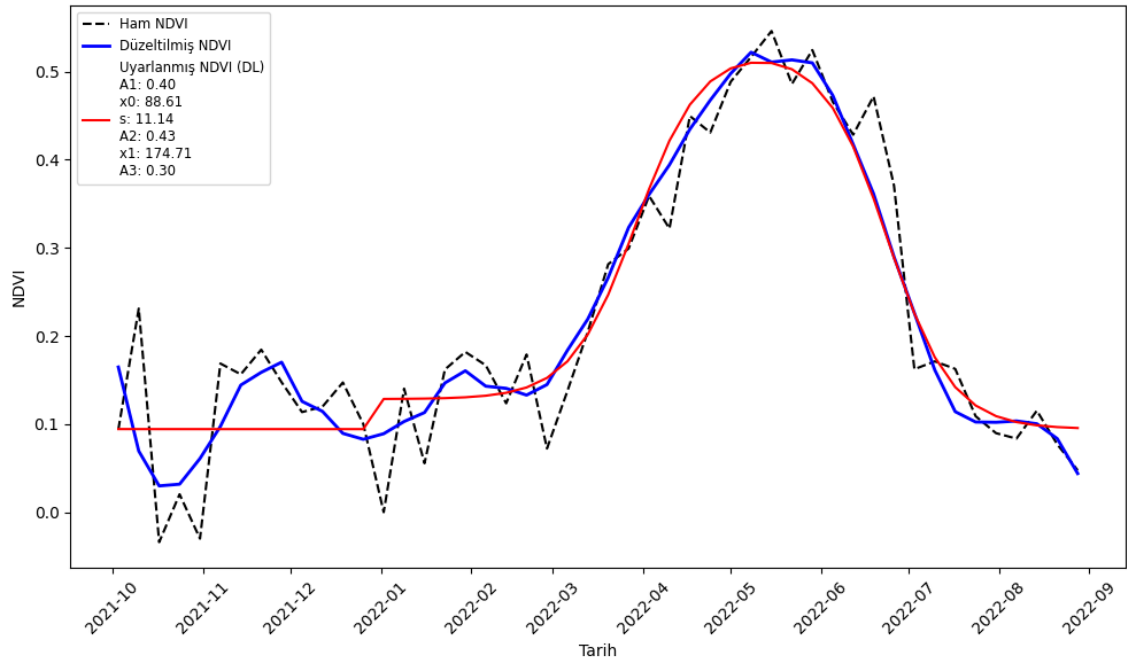
2019-2020



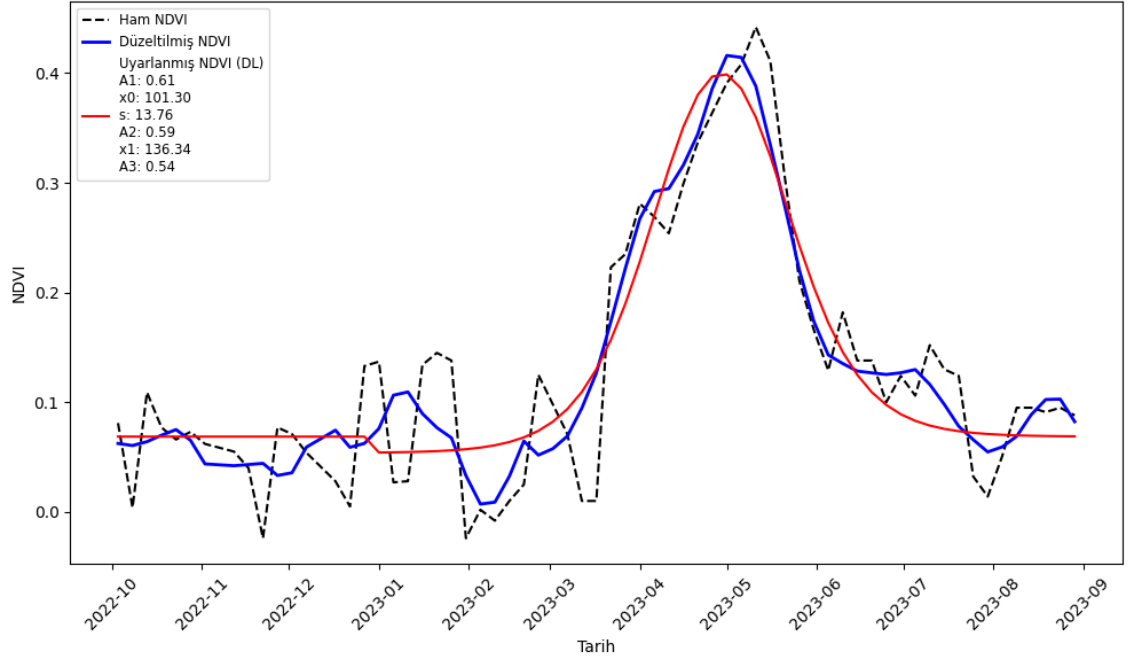
2020-2021



2021-2022

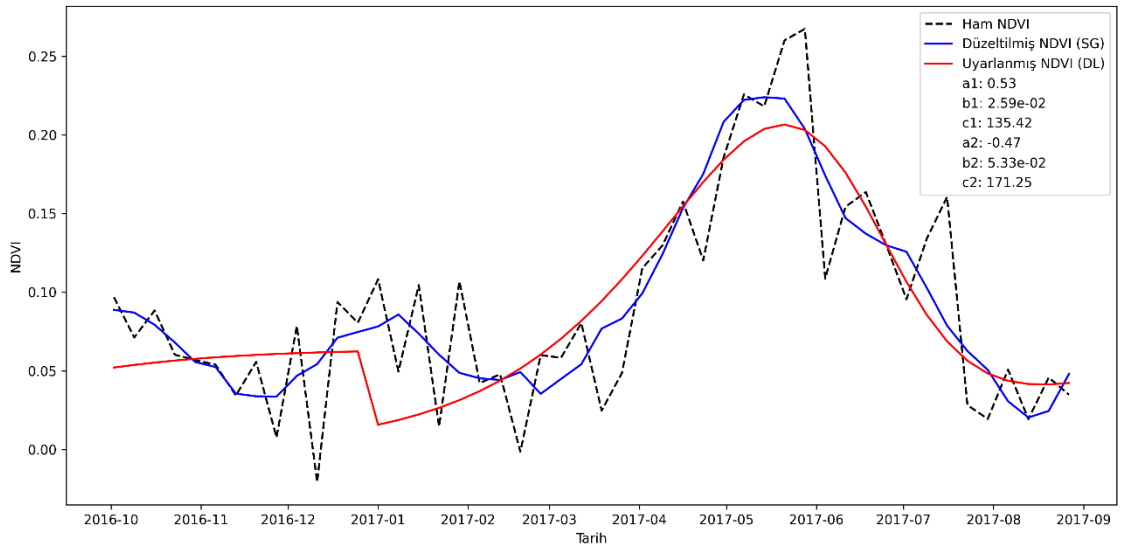


2022-2023

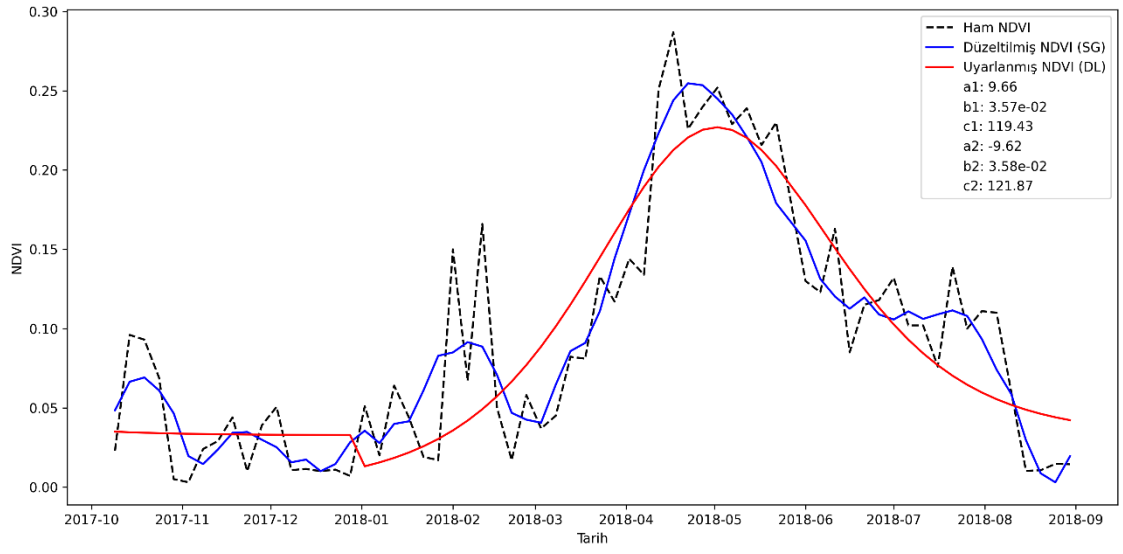


Buğday bitkisi yağışa dayalı yetiştiricilik sınıfı

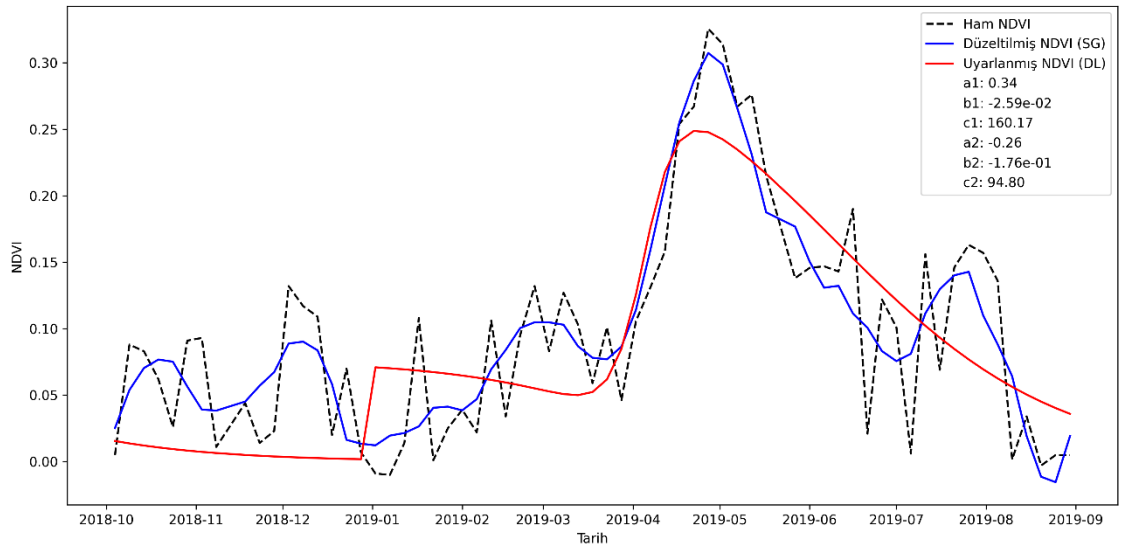
2016-2017



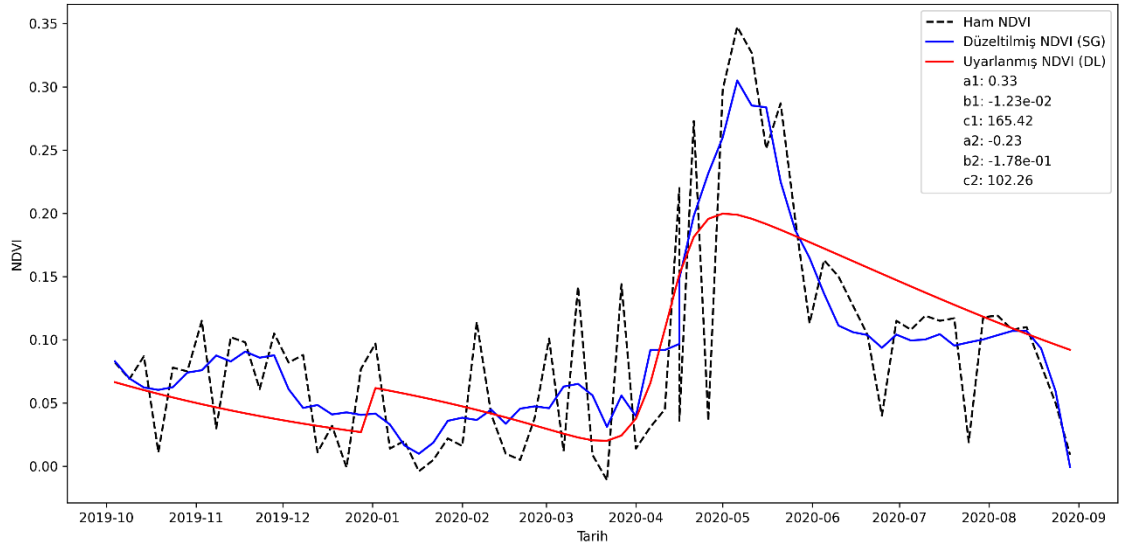
2017-2018



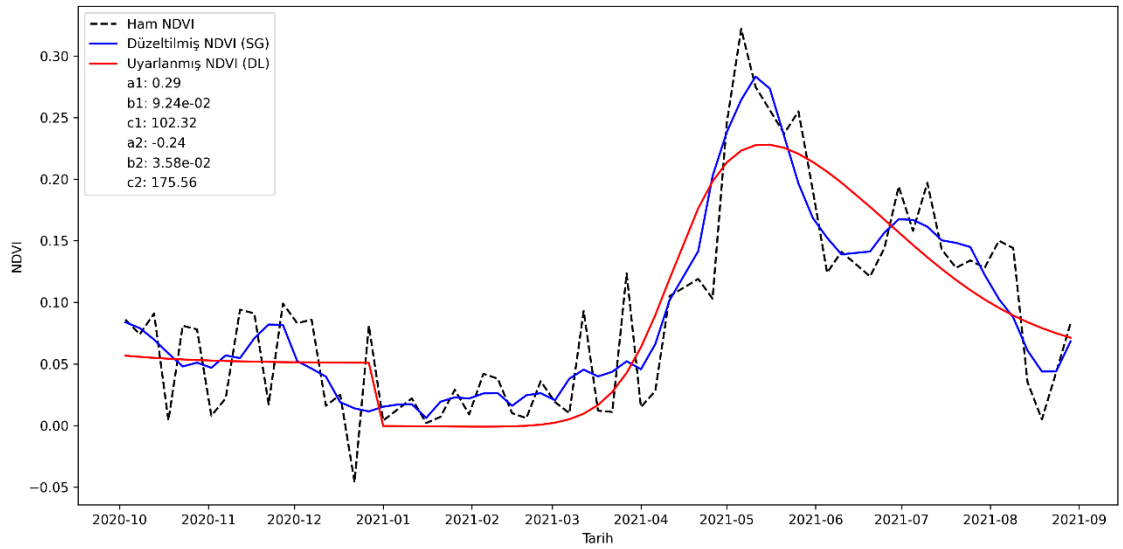
2018-2019



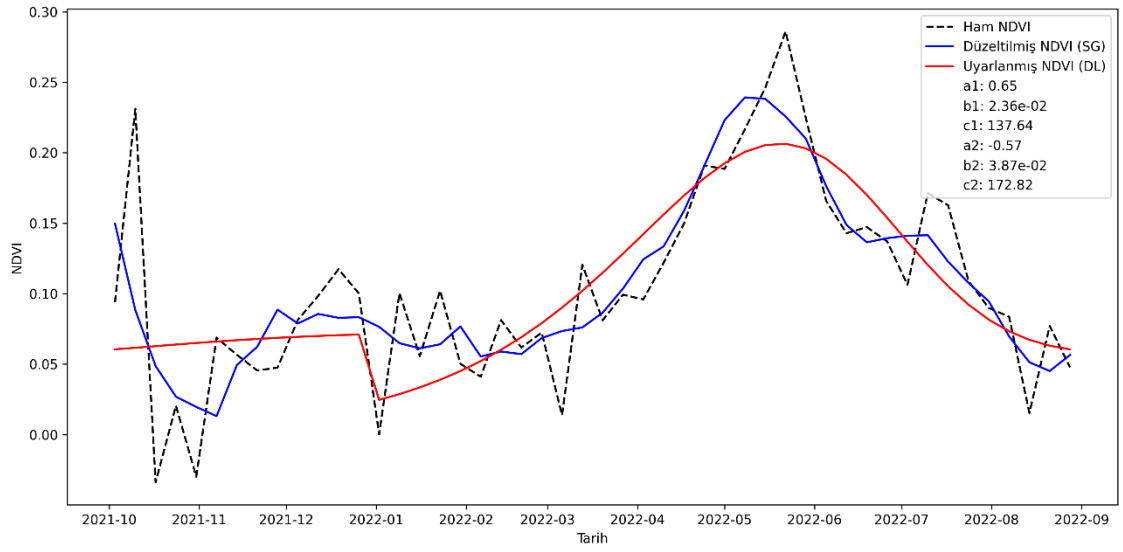
2019-2020



2020-2021



2021-2022



2022-2023

