

Sentinel-2 Görüntüleriyle Çeltiğin Fenolojik Yapısının Belirlenmesi: İpsala Örneği

Determination of Rice's Phenological Structure with Sentinel-2 Images: Case Study of Ipsala

Aleyna Şimşek^{1*}, Esra Tunç Görmüş¹

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**

Aleyna Şimşek
simsekaleyna244@gmail.com

doi: 10.48123/rsgis.1603128

Yayın süreci

Geliş tarihi: 17.12.2024
Kabul tarihi: 03.12.2025
Basım tarihi: 26.03.2026

Özet

Bu çalışma, Edirne ili İpsala ilçesi sınırları içindeki çeltik tarlasının fenolojik evrelerinin (ekim ve hasat tarihleri) tahminine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma, Google Earth Engine (GEE) platformu ve MATLAB eklentisi bir yazılım aracı olan Zaman Serilerinin Ayrıştırılması ve Analizi (DATimeS) kullanılarak, 2020, 2021 ve 2022 yıllarına ait toplam 36 adet Sentinel-2 uydu görüntüsünün analiz edilmesiyle yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Geliştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (EVI) ve Yaprak Alanı İndeksi (LAI) hesaplanmış ve bu veriler üzerinde enterpolasyon ile fenolojik değerlendirme yöntemleri uygulanmıştır. Enterpolasyon aşamasında Gauss Süreç Regresyonu (GPR) yöntemi kullanılarak fenolojik evreler tahmin edilmiştir. Fenolojik analiz sonuçlarına göre ekim ve hasat tarihleri, Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü kontrol verileriyle uyumlu bulunmuş; LAI indeksi, ekim ve hasat tarihlerini sırasıyla ortalama 15 ± 3 gün erken ve 10 ± 5 gün geç tahmin ederek en yüksek doğruluğu vermiştir. Sonuç olarak, Sentinel-2 verilerinden türetilen LAI indeksinin çeltik fenolojisinin izlenmesinde diğer indekslerle kıyasla daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, çeltik tarımına yönelik fenolojik evre analizlerinde etkili bir metodolojik yaklaşım sunarak, GPR ve DATimeS entegrasyonunun uzaktan algılama tabanlı analizlerde yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Pirinç, Çeltik, Fenolojik özellikler, Zamansal seri analizi, Sentinel-2

Abstract

This study was conducted to predict the phenological stages (planting and harvest dates) of rice fields within the boundaries of the Ipsala district in Edirne province. The research was carried out by analyzing a total of 36 Sentinel-2 satellite images from the years 2020, 2021, and 2022 using the Google Earth Engine (GEE) platform and the Time Series Decomposition and Analysis (DATimeS) software, which is a MATLAB-based add-on. Within the scope of the study, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), and Leaf Area Index (LAI) were calculated, and interpolation and phenological evaluation methods were applied to the data. The Gauss Process Regression (GPR) method was used in the interpolation phase to predict phenological stages. According to the phenological analysis results, the sowing and harvest dates were found to be consistent with the control data provided by the Trakya Agricultural Research Institute. The LAI index estimated the sowing and harvest dates on average 15 ± 3 days earlier and 10 ± 5 days later, respectively, yielding the highest accuracy. Consequently, the LAI index derived from Sentinel-2 data was determined to be more reliable than other indices for monitoring rice phenology. This study presents an effective methodological approach for phenological stage analysis in rice cultivation, demonstrating that the integration of GPR and DATimeS ensures high accuracy in remote sensing-based analyses.

Keywords: Rice, Phenological features, Temporal series analysis, Sentinel 2

1. Giriş

Tarımsal üretimin sürdürülebilirliği ve verimliliği, modern teknolojiler ve uzaktan algılama yöntemlerinin etkin kullanımını gerektirmektedir. Özellikle, uydu görüntülerinden elde edilen fenolojik analizler, tarım arazilerinin yönetimi, ürün gelişiminin izlenmesi ve iklimsel risklerin yönetilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Fenoloji gözlemleri, erken olgunlaşan bitki türlerinin belirlenmesi ve tarımsal mücadele zamanlarının tespiti gibi birçok avantaj sağlamaktadır (Şimşek vd., 2014). Çeşitli çalışmalarda, uzaktan algılama teknikleriyle çeltik ve diğer ürünlerin fenolojik aşamaları başarıyla analiz edilmiştir. Hindistan, Vietnam ve Güney Kore'deki çalışmalar, MODIS, Sentinel-2 ve RapidEye gibi uydu verileri kullanarak ürün fenolojisini değerlendirmiş ve NDVI gibi indekslerin bu süreçte etkili olduğunu göstermiştir (Dineshkumar vd., 2019; Nguyen vd., 2015; Kim vd., 2012). Son yıllarda, Sentinel-2 verileri ve Google Earth Engine (GEE) gibi platformlar, fenoloji analizlerinde yüksek doğruluk sağlayan yenilikçi araçlar olarak öne çıkmıştır (Narin & Abdikan, 2020; Estévez vd., 2022).

Narin ve Abdikan (2020)'ın çalışmasında, Sentinel-2 uydusundan elde edilen verilerden yararlanarak ayçiçeği bitkilerinin gelişim evrelerini takip etmek ve verimlerine ilişkin öngörülerde bulunulmuştur. On ayrı ürün endeksinin incelenmesi sonucunda ayçiçeği veriminin tahmin edilmesinde en doğru ve etkili sonuçların NDVI endeksi tarafından verildiği belirlenmiştir. Ayrıca tarlalardan hasat edilen tohum miktarı, verim tahmininde güvenilir bir kriter olarak kullanılmıştır. Sentinel Uygulama Platformu (SNAP) yardımıyla gerçekleştirilen verilerin analizi, vektör dosyaları kullanılarak alan sınırlarının seçilmesini ve piksel örneklerinin tanımlanmasını içermiştir. Dela Torre vd. (2021), GEE platformunun Sentinel-2 verileriyle birlikte kullanılmasıyla, Filipinler'deki bir eyaletteki çeltik ve çeltik dışı bölgeler arasında ayırım yapmak için bir zaman serisi metodolojisi uygulanmıştır. Bu araştırmanın bulguları, Sentinel-2'nin spektral indeksler ve zamansal kompozitler kullanarak SAR tabanlı araştırmalarla karşılaştırılabilir sonuçlar üretebildiğini göstermiştir. Özellikle bu çalışma, üst atmosfer yansıma ürününün incelenmesi için GEE Veri Kataloğundan alınan Sentinel-2 verilerinin kullanımına özellikle vurgu yapmıştır. Bir diğer çalışmada, Yang vd. (2021) çeltik bitkisinin yerel iklimi desen ve varyans özelliklerinden (LBP ve VAR) gelen doku bilgisini VI (vegetation index)'dan gelen spektral bilgiyle birleştirerek LAI (leaf area index) tahmin doğruluğunu geliştirmek için yeni bir yöntem önermiştir. Hainan ve Hubei'deki iki çalışma alanının çok zamanlı görüntüleri, spektrum ve dokudaki değişiklikleri analiz etmek için kullanılmıştır. Salkım görünümüne daha az duyarlı olan ve doygunluk sorununu biraz zayıflatan çeltik LAI'sini tahmin etmek için yeni endeksler oluşturuldu. Spektral ve doku özelliklerinin kombinasyonu, çeltik LAI'sini tahmin etmede VI'dan daha iyi tahmin yeteneği olduğunu göstermiştir. Salinero-Delgado vd. (2022) çalışmasında ise, GEE bulut platformunda mahsul özelliklerini ve arazi yüzeyi fenolojisi ölçümlerini almaya yönelik bir iş akışı sunmuştur. Hibrit GPR alma modellerinin oluşturulmasını, bu modellerin GEE'ye taşınmasını, uzay-zamansal olarak sürekli haritalar ve zaman serileri oluşturulmasını ve Arazi Yüzey Olasılığı (LSP) ölçümlerinin hesaplanmasını içeren uçtan uca bir işlem zinciri önerilmiştir. İş akışı İspanya'nın Kastilya ve Leon kentinde başarıyla uygulanmış ve mahsul takvimi verileri ve NDVI referans ürünleriyle karşılaştırılmıştır. Gelecekteki araştırmalar, çoklu referans veri kümelerini kullanarak hiperparametrenin ön hesaplama sağlamlığını ve genel geçerliliğini değerlendirmiştir. Çalışmada, küresel ölekte niceliksel ve mekansal-zamansal olarak sürekli ürün fenolojisi bilgilerinin otomatik olarak türetilmesine yönelik bir yol haritası sunulmuştur. Son olarak Orusa vd. (2023) çalışmalarında, Sezon Başlangıcı, Sezon Sonu ve Sezon Uzunluğu gibi fenolojik ölçümleri haritalamak ve dünya çapındaki dağlık bölgelerde Sezonun Zirvesini tespit etmek için Landsat ve Sentinel-2'den gelen yüksek çözünürlüklü uydu verilerini kullanmıştır. Doğrulama, greenbrown ve MODIS kullanılarak yapılmış ve MAE ve RMSE hesaplanmıştır. Bu çalışmalar, dünya çapındaki dağlık bölgelerdeki yüksek çözünürlüklü ücretsiz EO verilerinden fenolojik ölçümlerin hesaplanmasına olanak tanımıştır.

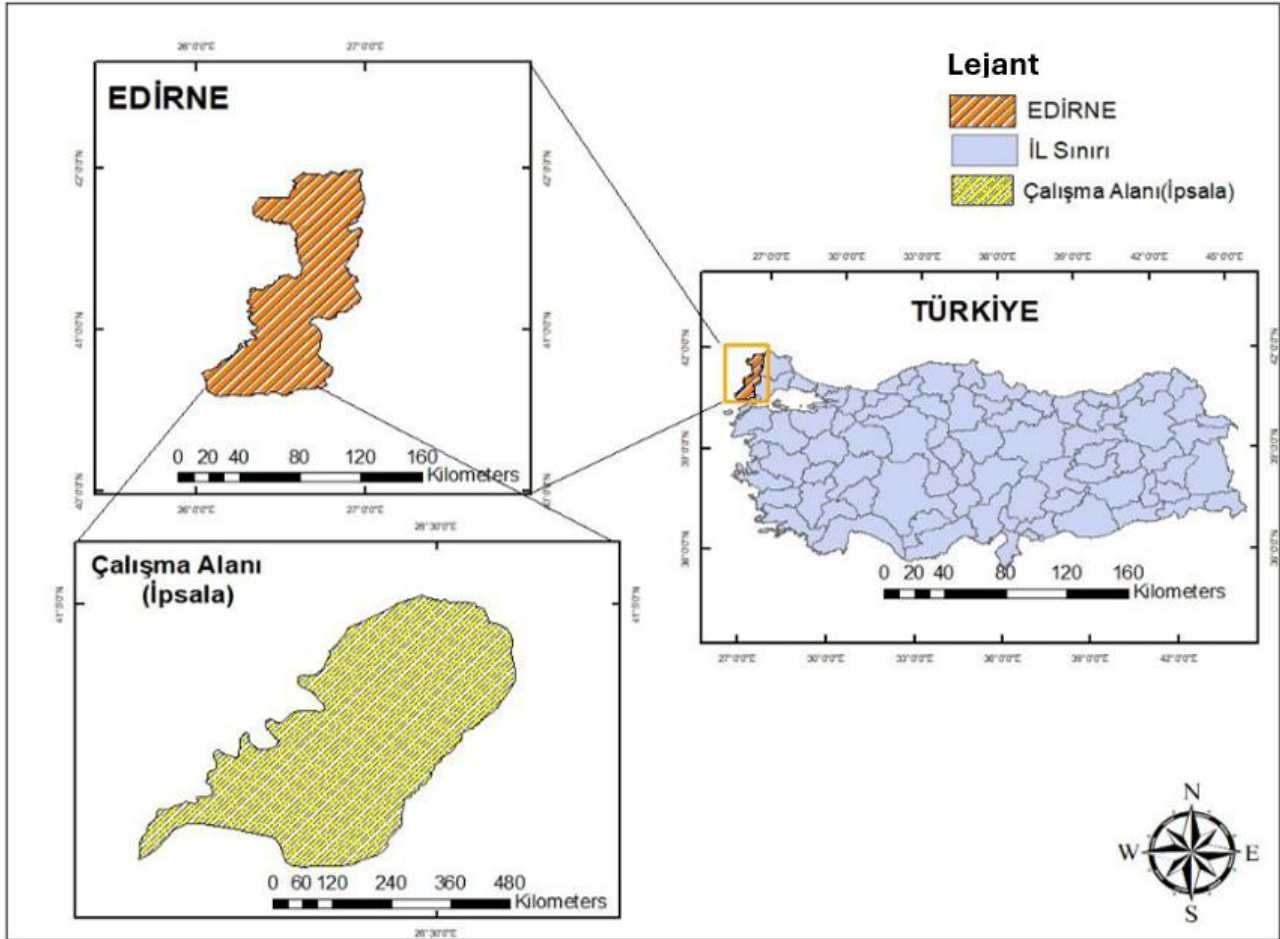
Bu çalışmada ise, Sentinel-2 uydu verilerini kullanarak 2020-2021-2022 tarihlerinde Edirne'nin İpsala ilçesi sınırları içindeki çeltik bitkilerinin fenolojik aşamalarının izlenmesi ve yüksek doğrulukta tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için GEE ve DTimeS programlarından faydalanılmıştır. Çalışmamızda ilk olarak çeltik alanlarına ait NDVI (Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi), EVI (Geliştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi) ve LAI (Yaprak Alanı İndeksi) indeksleri oluşturulmuş ve fenolojik parametrelerin hangi indislerden en hassas şekilde tahmin edildiği analiz edilerek tarımsal yönetim süreçlerine bilimsel katkılar sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı

Edirne'nin İpsala ilçesi, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nde yer almaktadır. Edirne, İpsala 40.8591° N, 26.4356° E coğrafi koordinatlarında yer almaktadır. İpsala, Edirne'nin en kuzeydeki ilçesidir. Bu bölge Meriç Nehri'nin kıyısında yer almaktadır. İpsala'nın ekonomisi tarım ve hayvancılığa dayanmaktadır. Bölgenin başlıca ürünleri çeltik, buğday, arpa, ayçiçeği ve baklagillerdir. İpsala'da büyük bir hayvancılık sektörü de bulunmaktadır.

Çalışmada, İpsala bölgesine ait alan 54,136.58 dekar olarak tespit edilmiştir. 2020 yılı itibarıyla İpsala bölgesindeki ekim alanı 204.697 dekar olarak kaydedilmiştir. 2021 yılında İpsala'daki ekim alanı 210.694 dekara çıkmıştır. 2022 yılı itibarıyla ise İpsala'daki ekim alanı 206.280 dekara düşmüştür (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023). 2020 yılı itibarıyla İpsala bölgesindeki üretim miktarı 167.225 ton olarak kaydedilmiştir. 2021 yılında İpsala'daki üretim miktarı ise 164.136 tona çıkmıştır. 2022 yılı itibarıyla İpsala'daki üretim ise 176.858 tona ulaşmıştır (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023). Çalışma alanına ait görüntü Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı

2.2 Veri Seti

2.2.1. Uzaktan Algılama Verisi

Sentinel-2, Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) Copernicus programının bir parçası olarak, Dünya'nın yüksek çözünürlüklü, çok bantlı görüntülerini sağlayan bir uydu misyonudur. İki uydudan oluşan bu sistem, tarım ormancılık, afet yönetimi ve çevre izleme gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Ekvator üzerindeki alanları her beş günde bir görüntüleyerek sık gözlem yapma imkanı sunmaktadır (European Space Agency, 2025).

Google Earth Engine üzerinden indirilen Sentinel-2 MSI Level-2A ürünü atmosferik düzeltmeleri yapılmış ve analiz için uygun hale getirilmiş, 10 m ile 60 m çözünürlükte, 13 spektral bant içeren veriler sunmaktadır. Bu veriler tarım, çevre izleme ve afet yönetimi gibi birçok alanda oldukça değerli bir kaynaktır ve Google Earth Engine platformunda kolayca işlenebilmektedir (Google Earth Engine, 2024).

Sentinel-2'den elde edilen veriler ücretsiz olarak erişilebilir durumdadır ve hem bilimsel araştırmalar hem de pratik uygulamalar için kullanılmaktadır. Tablo 1'de, Sentinel-2'nin farklı bantlarını ve her bir bantın spektral aralıklarını içermektedir.

Tablo 1. Sentinel-2 uydu verisi bantları ve spektral aralıkları (European Space Agency, 2025)

Sentinel-2 Bant No	Bant Adı	Spektral Aralık (mikrometre)	Mekânsal Çözünürlük (m)
Bant 1	Kıyı Aerosol	0.433 - 0.453	60
Bant 2	Mavi	0.458 - 0.523	10
Bant 3	Yeşil	0.543 - 0.578	10
Bant 4	Kırmızı	0.650 - 0.680	10
Bant 5	Kırmızı Kenarı-1	0.698 - 0.713	20
Bant 6	Kırmızı Kenarı-2	0.733 - 0.748	20
Bant 7	Kırmızı Kenarı-3	0.773 - 0.793	20
Bant 8	Yakın Kızılötesi (NIR)	0.785 - 0.900	10
Bant 8A	Dar Yakın Kızılötesi	0.855 - 0.875	20
Bant 9	Su Buharı	0.935 - 0.955	60
Bant 10	Kısa Dalga Kızılötesi - 1	1.375 - 1.385	60
Bant 11	Kısa Dalga Kızılötesi - 2	1.565 - 1.655	20
Bant 12	Cirrus (Sirküs)	2.100 - 2.280	20

Yapılan çalışmada Sentinel-2 uydu görüntüsüne ait 36 görüntü kullanılmıştır. Bu görüntülerin tarihleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Sentinel-2 uydu görüntülerine ait tarihler

Görüntü No	Günler	Görüntü No	Günler	Görüntü No	Günler
1	01-01-2020	13	17-01-2021	25	20-01-2022
2	05-02-2020	14	23-02-2021	26	12-02-2022
3	03-03-2020	15	01-03-2021	27	15-03-2022
4	12-04-2020	16	11-04-2021	28	04-04-2022
5	15-05-2020	17	03-05-2021	29	04-05-2022
6	22-06-2020	18	03-06-2021	30	12-06-2022
7	10-07-2020	19	12-07-2021	31	18-07-2022
8	06-08-2020	20	15-08-2021	32	16-08-2022
9	09-09-2020	21	08-09-2021	33	23-09-2022
10	19-10-2020	22	11-10-2021	34	16-10-2022
11	28-11-2020	23	19-11-2021	35	15-11-2022
12	20-12-2020	24	20-12-2021	36	22-12-2022

2.2.2. Google Earth Engine (GEE)

GEE, kullanıcıların uydu görüntüleri ve mekânsal verilerden oluşan büyük veri kümeleriyle çalışmasına olanak tanıyan bulut tabanlı bir platformdur. Coğrafi verileri işlemek, analiz etmek ve görselleştirmek için NASA, USGS ve ESA gibi kurumlardan gelen kapsamlı bir veri koleksiyonuyla birleştirmektedir (Gorelick vd., 2017). GEE, petabaytlarca uydu görüntüsü ve diğer mekânsal veri kümelerine erişim sağlayarak araştırmacılara geniş analiz olanakları sunmaktadır. Landsat, 1970'lere kadar uzanan multispektral uydu görüntüleri sağlarken (USGS), Sentinel-1 ve Sentinel-2 radar ve optik görüntüler sunmaktadır (European Space Agency, 2025). Ayrıca, MODIS orta çözünürlüklü uydu verileri sunarken, sayısal yükseklik modelleri (DEM'ler) ve çeşitli iklim verileri de analiz için kullanılmaktadır (Google Earth Engine, 2024).

GEE, kullanıcıların JavaScript veya Python ile veri analizi ve görselleştirme yapmasına olanak tanır ve görüntü işleme, sınıflandırma ve değişiklik algılama gibi işlemleri desteklemektedir (Google Earth Engine, 2024). Platformun bulut bilişim altyapısı, büyük veri kümelerinin hızlı bir şekilde işlenmesini mümkün kılar (Gorelick vd., 2017), makine öğrenimi algoritmaları da sınıflandırma ve kümeleme tekniklerinin mekânsal verilere uygulanmasını sağlamaktadır (Google Earth

Engine, 2024). Etkileşimli harita arayüzü sayesinde analiz sonuçları görselleştirilebilir, zaman serisi animasyonları oluşturulabilir ve veri katmanları üst üste bindirilerek dışa aktarılabilir (Gorelick vd., 2017).

GEE'nin kullanım alanları oldukça geniştir. Arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişimi analizi kapsamında ormansızlaşma, kentleşme ve tarımsal genişleme gibi değişimler takip edilebilmektedir (Google Earth Engine, 2024). Afet yönetimi açısından sel, yangın ve kuraklık analizleri yapılabilmektedir (NASA, 2025). Ayrıca, çevresel izleme çalışmaları kapsamında iklim değişikliği ve kirlilik takibi gerçekleştirilebilmektedir (European Space Agency, 2025). Fenolojik çalışmalar için de NDVI gibi bitki örtüsü indeksleri kullanılarak bitki büyüme döngüleri analiz edilebilmektedir (Gorelick vd., 2017).

GEE, kullanıcı dostu bir kod düzenleyici sunarak veri analiz süreçlerini kolaylaştırmaktadır (Google Earth Engine, 2024). Veri kataloğunda geniş bir veri kütüphanesi bulunmakta olup, kullanıcılar bu verilere erişebilir ve API desteği sayesinde JavaScript veya Python kullanarak özelleştirilmiş analizler gerçekleştirebilmektedir (Gorelick vd., 2017). Analiz sonuçları Google Cloud Storage veya Google Drive entegrasyonu ile dışa aktarılabilir (Google Earth Engine, 2024). Ticari olmayan kullanım için ücretsiz olarak sunulan GEE, araştırmacılar, öğrenciler, sivil toplum kuruluşları ve devlet kurumları tarafından yaygın olarak tercih edilmektedir (Google Earth Engine, 2024). Kullanıcılar, Earth Engine API tarafından sağlanan operatör kütüphanesi aracılığıyla genel veri kataloglarına ve kendi özel verilerine erişerek analiz yapabilmektedirler (Gorelick vd., 2017). Google Earth Engine, web tabanlı bir geliştirme ortamı (IDE) sunarak, kullanıcıların sonuçları hızlı bir şekilde prototiplemesini ve görselleştirmesini sağlamaktadır (Google Earth Engine, 2024). Platform üzerinde geliştirilen algoritmalar, sistematik veri ürünleri oluşturulmasına veya etkileşimli uygulamalar geliştirilmesine olanak tanır ve bu sayede araştırmacılar ve politika yapıcılar için geniş çapta paylaşım imkânı sunmaktadır (Gorelick vd., 2017).

2.2.3. DATimeS (Decomposition and Analysis of Time Series Software)

Bu çalışmada, çeltik bitkisinin fenolojik süreçlerini analiz etmek için MATLAB tabanlı bir zaman serisi analiz yazılımı olan DATimeS kullanılmıştır (ARTMO, 2021). DATimeS, bitki örtüsünün zamansal ve mekânsal değişimlerini detaylı bir şekilde incelemek için eksik ve süreksiz uydur verilerini işleyen güçlü bir araçtır.

Fenolojik göstergelerin belirlenmesi sürecinde DATimeS, NDVI, EVI ve LAI zaman serilerini analiz ederek çeltik bitkilerinin büyüme evrelerini (örneğin, ekim ve hasat) ortaya koymuştur. Ayrıca, yazılım, eksik verileri tamamlamak ve mekânsal sürekliliği sağlamak amacıyla GPR gibi gelişmiş makine öğrenimi algoritmalarından yararlanmıştır. Bu süreç, uydur verilerindeki boşlukların doldurulmasına olanak tanıyarak analizlerin doğruluğunu artırmıştır.

Ayrıca, DATimeS yazılımı çalışma prensibi, verileri kullanarak ekim ve hasat dönemlerini belirlemede kendine özgü bir eşik değeri oluşturur ve çeltik tarlalarının fenolojik evrelerini hassas bir şekilde modeller.

Çalışmada 36 görüntünün kullanılmasının temel amacı, çeltik tarlalarının ekim ve hasat dönemleri ile yıl boyunca farklı zamanlardaki spektral yansıma değerlerini analiz ederek daha güvenilir bir sınıflandırma yapmaktır. Ocak-Aralık aylarını kapsayan bu analiz, sadece büyüme dönemlerini değil, aynı zamanda ekili olmayan zamanlardaki spektral özellikleri de değerlendirmektedir.

Ekim ve hasat tarihleri genellikle Mayıs-Ekim ayları arasında olsada, yılın geri kalanında arazi örtüsündeki değişimlerin izlenmesi, yazılımın ekili ve ekili olmayan dönemleri daha doğru ayırt etmesini sağlamıştır. Ocak-Nisan ve Kasım-Aralık aylarında tarlaların boş veya su altında olması, spektral yansıma analizlerine önemli katkılar sunmuştur.

DATimeS'in ana işlevleri iki ana kategoriye ayrılır:

1. Mekânsal Sürekliliği Sağlayan Haritalar Üretme: DATimeS, optik uzaktan algılama verilerindeki süreksizliği gidermek için gelişmiş Makine Öğrenimi Regresyon Algoritmaları (MLRA) kullanır. Bu algoritmalar arasında Gauss Süreci Regresyonu (GPR) gibi teknikler yer alır ve birden fazla sensörün sinerjisi ile eksik verileri tamamlayarak mekânsal olarak sürekli haritalar oluşturur.

2. Fenolojik Göstergelerin mekânsal Modellerini Çıkarma: DATimeS, birden fazla mevsim boyunca fenolojik göstergelerin mekânsal değişimlerini analiz ederek, bitkilerin belirli büyüme aşamalarının (örneğin, çiçeklenme veya olgunlaşma dönemleri) heterojen dağılımını tespit eder. Bu analizler, geniş alanlarda farklı mahsul türlerinde fenolojik olayların zamanlamasını anlamak için kullanılır.

Bu iki temel yetenek sayesinde, DATimeS, tarımsal verimliliği artırmak ve tarımsal kararları desteklemek için önemli bir araç sunar. Uygulama, zamansal eksikliği bulunan verileri doğru bir şekilde tamamlayarak, bitki gelişimi ile ilgili kararların daha bilimsel temellere dayandırılmasına katkı sağlar.

2.3 Kullanılacak Bitki Tespiti

Çeltik bitkisinin gelişim süreçleri, BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie) fenolojik skalasına göre belirli aşamalara ayrılmaktadır. Bu sistem, bitkilerin büyüme evrelerini standart bir ölçek ile sınıflandırarak tarımsal araştırmalarda ortak bir dil oluşturmayı amaçlamaktadır (Meier, 2001). Fenolojik evrelerin

süreleri, çeltik çeşidine, ekim zamanına, çevresel koşullara ve tarımsal uygulamalara göre değişiklik gösterebilmektedir. Genel olarak, erken olgunlaşan çeşitler 90-110 gün, orta olgunlaşan çeşitler 120-140 gün, geç olgunlaşan çeşitler ise 140-160 gün arasında hasat olgunluğuna ulaşmaktadır. Bu durumu etkileyen etkenlere bakıldığında, sıcaklık ve su rejimi çimlenme süresini doğrudan etkileyerek gelişimin hızlanmasına veya yavaşlamasına neden olabilmektedir (Meier, 2001). Benzer şekilde, başaklanma ve çiçeklenme süreci gün uzunluğuna ve sıcaklığa duyarlıdır; bu nedenle ılıman iklimlerde başaklanma süresi daha uzun olabilmektedir.

Çeltik bitkisi, tropikal ve subtropikal iklimlerde yetişen bir su bitkisidir. Çeltik bitkisinin özellikleri ve yetiştirilme şartlarına dair bazı önemli hususlar aşağıda detaylandırılmıştır:

İklim Gereksinimleri: Çeltik, sıcak ve nemli iklimlerde optimal gelişim göstermektedir. İdeal olarak, ortalama sıcaklık değerleri 20 - 30 C° arasında olmalıdır. Ayrıca, su sıcaklığı çimlenme süreci için en az 12 C°'yi bulmalıdır (Taşlıgil & Şahin, 2011).

Toprak Yapısı: Çeltik, çeşitli toprak türlerinde yetişebilmesine karşın, optimum ürün verimi su geçirimsiz, besin maddelerince zengin, yumuşak ve killi topraklarda elde edilmektedir. Milli alüvyal topraklar, çeltik tarımı için en uygun türler arasında yer almaktadır. Su Gereksinimi: Çeltik tarımı yoğun su ihtiyacı ile karakterizedir. Yetiştirme döneminde minimum yağış gereksinimi 1000-1200 mm civarındadır. Yeterli doğal yağışın bulunmadığı koşullarda sulama işlemlerinin gerçekleştirilmesi zorunludur. Su kaynağının sürekli ve güvenilir olması, bitkinin sağlıklı gelişimi açısından kritiktir (Taşlıgil & Şahin, 2011).

Nem Gereksinimi: Yüksek nem oranları çeltik için faydalı iken, fazlalığı mantar hastalıklarını tetikleyebilmektedir. Bu nedenle, nem düzeylerinin dikkatlice izlenmesi gerekmektedir (Taşlıgil & Şahin, 2011).

Topografik Özellikler: Çeltik tarımı için düz veya düzleştirilmiş araziler tercih edilmektedir ki bu, özellikle sulama etkinliklerinin kolaylaştırılması açısından önem taşır (Taşlıgil & Şahin, 2011).

Yetiştirme Koşulları: Ekim Dönemi ekim işlemi genellikle sıcak mevsimlerde gerçekleştirilir. Optimal ekim zamanı, bölgesel iklim şartlarına göre farklılık gösterebilir. (Taşlıgil & Şahin, 2011).

Sulama Stratejileri: Çeltik tarımındaki kritik faktörlerden biri yeterli su teminidir. Sulama gereksinimi, göletler veya kanallar gibi sistemlerle karşılanmalıdır (Taşlıgil & Şahin, 2011).

Rüzgâr ve Diğer İklimsel Etmenler: Rüzgâr, bitkilerin olgunlaşma sürecinde zarar verici olabilir ve verim düşüşlerine neden olabilir. Dolayısıyla, rüzgârlı bölgelerde çeltik tarımının dikkatli bir biçimde planlanması gerekir. Bu koşullara riayet edildiğinde, çeltik bitkisi sağlıklı bir şekilde yetişip yüksek verim sağlayabilir. Türkiye’de özellikle Marmara Bölgesi’nde yoğunlaşan çeltik tarımı, ülke üretiminin yarısından fazlasını karşılayarak büyük önem taşımaktadır (Taşlıgil & Şahin, 2011). Çeltiğin fenolojik evreleri ve tahmini oluşum süreleri Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3. Çeltiğin fenolojik evreleri ve tahmini oluşum süreleri (Meier, 2001)

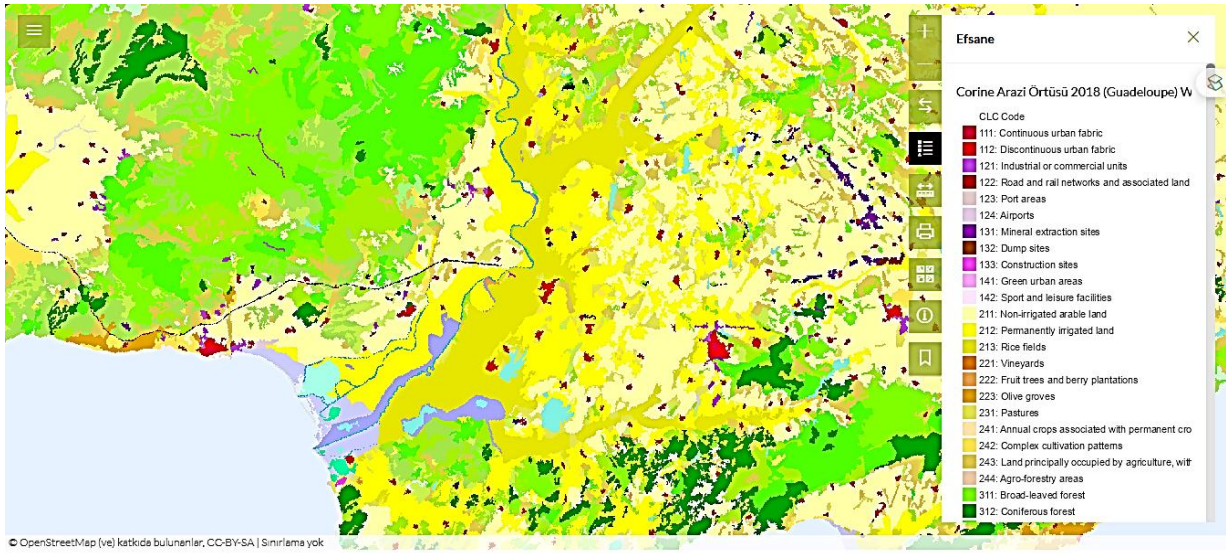
Fenolojik evre	Açıklama	Süre (Tahmini)
1. Çimlenme	Tohumun su alıp şişmesi ve köklerin çıkması	5-7 gün
2.Yaprak Gelişimi	Birinci yaprağın oluşumu	7-10 gün
3. Türemeler	Yan sürgünlerin ve yan yaprakların oluşumu	15-30 gün
4.Gövde Uzaması	Gövde uzunluğunun artması	20-40 gün
5. Birinci Düğüm	Birinci düğümün (başak düğümü) görünmesi	30-40 gün
6. İkinci Düğüm	İkinci düğümün görünmesi	35-45 gün
7. Başak Hazırlığı	Başak oluşumu, başak içinde tanelerin belirginleşmesi	40-55 gün
8. Çiçeklenme	Çiçeklerin açılması, başakların polenleşmeye başlaması	50-60 gün
9.Gençlik Dönemi	Tane içindeki sıvı süt kıvamında olup, olgunlaşma süreci başlamıştır. Renk yeşildir	60-75 gün
10. Nişasta Dönemi	Tane sertleşmeye başlar, nişasta oranı artar. Tane daha sert ve hamur kıvamındadır	75-90 gün
11. Olgunlaşma	Tane tamamen olgunlaşır, su oranı düşer	49-110 gün
12. Olgunluk	Hasat zamanı, tanenin kuru halde olduğu aşama	110-120 gün

Çalışmada kullanılmak üzere seçilen Edirne İpsala ilçesine ait çeltik tarlası Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışma alanı olarak seçilen tarlanın uydu görüntüsü

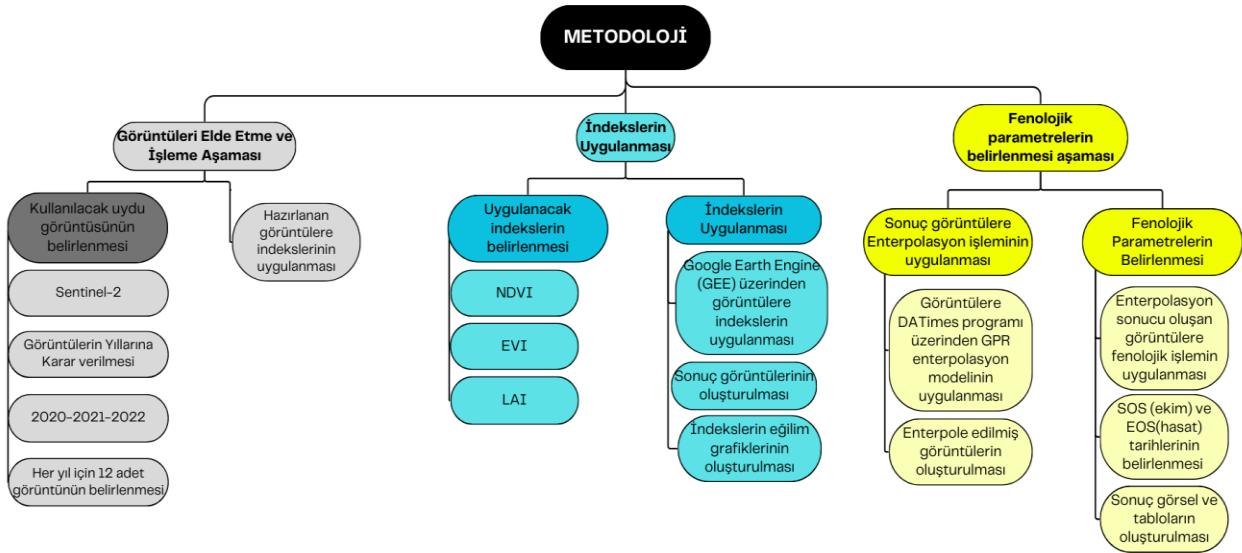
CORINE LAND COVER, bilgilerin tutarlılığının ve verilerin uyumluluğunun sağlanması, Avrupa Çevre Ajansı kriterlerine göre arazi örtüsü haritalarının oluşturulmasını amaçlayan ve yapan bir servistir. CORINE LAND COVER arazi örtüsü haritalanmasında 44 sınıf kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılacak alan olarak Edirne İpsala alanı belirlenerek, bu alandaki sınıflandırılmalar incelenmiştir. Bu sınıflar Şekil 3'teki görselde gösterilmiştir.



Şekil 3. Corine Land Cover (CLC) üzerindeki arazi örtüsü sınıfları (European Environment Agency, 2018).

2.4 Metodoloji

Bu çalışmada çeltik bitkisinin fenolojik parametre özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. İlk olarak çalışma alanı belirlenmiştir. Çalışma alanı olarak Edirne, İpsala ilçesi seçilmiştir. Çalışma alanı belirlendikten sonra kullanılacak uydu görüntü belirlenmiştir. Tarım alanlarının izlenmesi konusunda sıklıkla kullanılan Sentinel-2 uydu görüntüsü tercih edilmiştir. 2020-2021-2022 yıllarına ait toplam 36 görüntü seçilmiştir. Bu görüntüler Google Earth Engine ile seçilen görüntülere indeksler uygulanmıştır. Seçilen indeksler NDVI, LAI ve EVI olarak belirlenmiştir ve görüntülere uygulanmıştır. İndeks uygulanan görüntüler GEE yazılımı üzerinden indirildi ve fenolojik parametrelerin hesaplanması için DTimeS programına aktarılmıştır. DTimeS programında ilk olarak görüntülere enterpolasyon işlemi uygulanmıştır. Enterpolasyon yöntemi olarak GPR yöntemi kullanılmıştır. Enterpolasyon işlemi uygulanan görüntülere fenolojik işlem uygulanmıştır. Bu aşamada çeltik bitkilerinin fenolojik takvimi oluşturulmuştur. Metodoloji diyagramı Şekil 4'de gösterilmiştir.

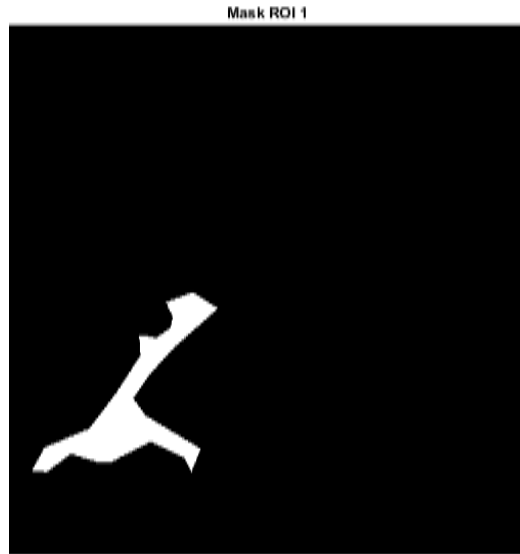


Şekil 4. Çalışmanın metodolojisi

2.5. DATimes’da Zaman Serisi Grafikleri ve Fenoloji Modellerinin Oluşturulması

DATimes yazılımının analiz aşamasında, görüntüler programa yüklenmektedir. Bu görüntüler, .hdr ya da .tif formatında olabilmektedir. Bu çalışmada, yazılıma .tif formatındaki görüntüler yüklenmiştir. Görüntüler yüklendikten sonra, oluşturulan seçilen alan (ROI) maskesi yüklenmiştir.

Analiz yapılacak alanın doğru belirlenmesi için ROI maskesinin doğrudan çeltik tarlalarını kapsayan bölgeden seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek adına analiz, daha küçük ve spesifik bir alan üzerinde yoğunlaştırılmalıdır. Seçilen alan Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. DATimes ile belirlenen ROI maskesi

Ardından, Cloud Filter seçeneği kullanılarak analizin dışında tutulması gereken bulut örtüleri için filtre değerleri belirlenmiştir. Sonrasında bulut örtüsü ve aykırı yansımaların düzeltilmesini hedefleyen enterpolasyon aşamasına geçilmiştir.

DATimes yazılımında yaklaşık olarak 30 farklı enterpolasyon algoritması bulunmaktadır (Belda vd., 2020). Yapılan bir araştırmada, referans bir görüntü ile bu metotlar kullanılarak oluşturulan rekonstrüksiyon görüntüleri karşılaştırılmış ve metotların hata değerleri tespit edilmiştir (Belda vd., 2020). Yöntemler değerlendirildiğinde, en yüksek doğruluk GPR yöntemiyle %5,9 bağıl hata ve 0,913 R^2 değeri ile elde edilmiştir. İkinci en başarılı yöntem ise spline enterpolasyonu olarak belirlenmiştir. En iyi performans gösteren diğer yöntemler KRR ve ardından sigmoid yöntemidir.

Geri kalan yöntemler ise önemli ölçüde daha düşük performans sergilemiştir (Belda vd., 2020). Bu çalışmaya başlanmadan önce GPR, KRR ve Spline enterpolasyon yöntemleri yapılan çalışma alanı için kullanılmıştır ve sonuçları değerlendirilmiştir. Sonuçların analizi sonucunda daha doğru sonucu GPR enterpolasyonu vermiştir ve çalışma da kullanılmıştır. Enterpolasyon sürecine ek olarak, düzgünleştirme teknikleri de dikkate alınmıştır.

Düzgünleştirme, boşluk doldurma ve fenolojik metriklerin hesaplanmasını kolaylaştırmanın yanı sıra, veri setinden gürültüyü azaltmak için kullanılan bir tekniktir. Bu bağlamda, DATimeS yazılımı altı farklı smoothing tekniği sunmaktadır.

Smoothing işlemi için Savitzky-Golay tekniği tercih edilmiş ve elimizdeki NDVI, EVI, LAI indeksler üzerinde aynı enterpolasyon yöntemleri uygulanmıştır.

2.5.1. Savitzky-Golay (S-G) Smoothing Yöntemi

Huang vd. (2021)'e göre, LAI verileri doğru bitki örtüsü bilgisi sağlayabilir. Bu kullanımlarını iyileştirmek için önemlidir ve bölgesel bitki örtüsü parametrelerinin zaman serileri için en etkili gürültü azaltma tekniklerinden biridir. S-G Düzeltme yönteminin formülü aşağıdaki gibidir:

$$Y_j = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+1}}{N} \quad (1)$$

Burada Y_j uydurma değeri, Y_{j+1} yumuşatılacak orijinal değer, C_i i filtresinin katsayısı ve m yumuşatma penceresinin genişliğinin yarım filtresidir. N filtrenin uzunluğu olup, $2m+1$ eşittir. Filtreyi zaman serisi yumuşatmasına uygularken; m ve yumuşatma polinom parametrelerinin (d) mertebesi belirlenmelidir. Genellikle, m 'nin daha büyük bir değeri daha pürüzsüz sonuçlar üretecektir, ancak önyargı oluşturabilir. d 'nin daha yüksek bir değeri filtrenin önyargısını azaltacaktır ancak verileri aşırı uydurabilir ve daha fazla gürültü oluşturabilir. Normal aralığı 2 ~ 4 olarak ayarlanmıştır. Bu çalışmada m ve d sırasıyla 7 ve 2 olarak seçilmiştir.

2.5.2. Gaussian Process Regression (GPR)

GPR, makine öğrenimi alanında geniş ilgi yaratan, parametrik olmayan (yani işlevsel bir formla sınırlı olmayan) bir Bayes yaklaşımıdır (Rasmussen & Williams, 2006; Verrelst vd., 2011). Popüler olmasının bir nedeni, belirli bir işlevin parametrelerinin olasılık dağılımını hesaplamak yerine, verilere uyan tüm kabul edilebilir işlevler üzerindeki olasılık dağılımını hesaplamasıdır. GPR'nin küçük veri kümelerinde iyi çalışması ve tahminler üzerinde belirsizlik ölçümünü sağlama yeteneği gibi çeşitli avantajları da bulunmaktadır. GPR modeli, girdi olarak B bantları spektrumları $x \in R^B$ ile çıktı değişkeni olarak kanopi parametresi $y \in R$ arasında aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi bir ilişki kurmaktadır, (Verrelst vd., 2013);

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i K(x_i, x) \quad (2)$$

Eğitim aşamasında kullanılan spektrumlar $\{x_i\}_{i=1}^N$, her biri için belirlenen ağırlıklar $\alpha_i \in R$, K DATimes'de denklemdeki gibi Kare Üstel Gauss çekirdek fonksiyonu olarak seçilebilir (Rasmussen & Williams, 2006).

$$K(x_i, x_j) = \nu \exp \left(- \sum_{b=1}^B \frac{(x_i^b - x_j^b)^2}{2\sigma_b^2} \right) + \delta_{ij} \sigma_n^2 \quad (3)$$

ν ölçekleme faktörü, B bant sayısı, σ_b her spektral bant için ilişkinin yayılmasını kontrol eden parametre, σ_n gürültü standart sapması ve δ_{ij} Kronocker sembolüdür. GPR hakkında daha ayrıntılı bilgi Wang (2023)'ün çalışmasında bulunmaktadır.

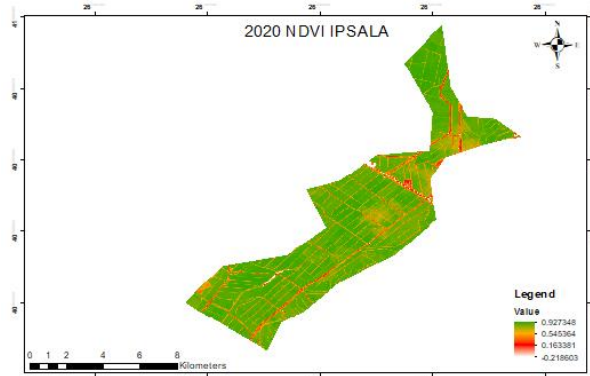
3. Bulgular ve Tartışma

Bitkisel indeksler, farklı dalga boylarında ölçülen yansıma değerlerine matematiksel işlemler uygulanarak, bitki örtüsünün yoğunluğunu ve sağlık durumunu gösteren tek bir değeri hesaplamaya yarayan metriklerdir. Bu indeksler, bitkileri yeryüzündeki diğer doğal elementlerden ayırarak daha doğru bir analiz imkânı sunmaktadır. Bitkilerin yansıma değerleri sağlık durumlarına göre değişiklik göstermektedir. Özellikle sağlıklı bitkiler, yüksek miktarda klorofil içerdiğinden, yeşil yapraklarıyla daha yüksek yansıma değerleri üretmektedirler. Ancak, bitkilerin sağlık durumları bozuldukça, yansıma değerleri düşüş göstermektedir.

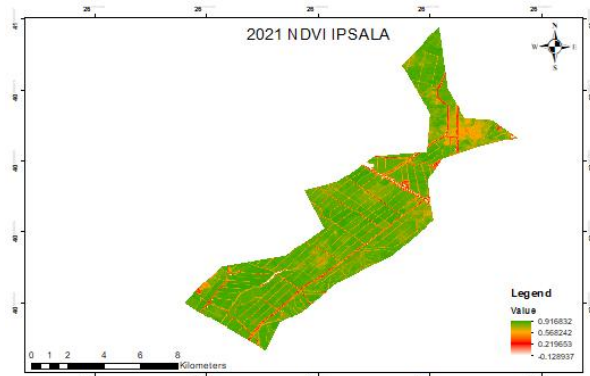
Bu çalışmada, literatür incelemeleri ve yapılan araştırmalardan elde edilen belirli bitki endeksleri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında Google Earth Engine (GEE) yazılımı kullanılarak, uydu görüntüleri üzerinden bu endeksler hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Endeksler:

Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), yakın kızılötesi (NIR) ve kırmızı bantlar (Red) arasındaki zıtlığı artırır ve iki banttaki bilgileri tek bantta toplayarak, bitki varlığının ve sağlığının incelemesinde kullanılmaktadır. NDVI, (-1) ile (+1) arasında değişen aralıkta değer vermektedir. Bitki varlığı yoğun olduğu bölgelerde NDVI + 1'e yaklaşır, bitki örtüsünün azalmasıyla sıfıra yaklaşmaktadır. Bulut, su ve kar gibi nesnelerin olduğu alanlarda NDVI indeks değerleri ise -1'e yakındır (Hatfield vd., 1985)

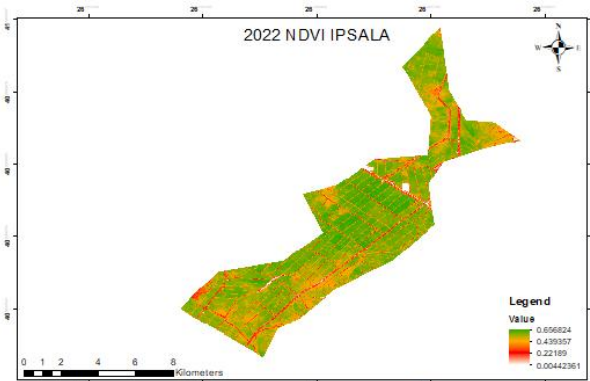
$$NDVI = \frac{Yakın\ Kızıl\ Ötesi - Kırmızı}{Yakın\ Kızıl\ Ötesi + Kırmızı} \quad (6)$$



(a)



(b)



(c)

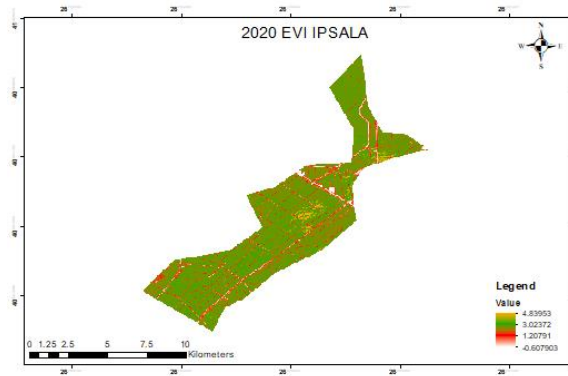
Şekil 6. Edirne, İpsala: a) 2020, b) 2021 ve c) 2022 yıllarına ait NDVI görüntüleri

İpsala bölgesine ait 2020, 2021 ve 2022 yıllarındaki NDVI haritaları, Şekil 6'da gösterilen şekilde, 2020 yılına ait haritada yeşil tonların baskın olması, bölgedeki bitki örtüsünün genel olarak yoğun olduğunu göstermektedir. Ancak 2021 yılında sarı tonların 2020 'ye oranla biraz daha arttığı, bitki örtüsünde azalma olduğunu göstermektedir. 2022 yılına gelindiğinde ise sarı alanların yaygın hale geldiği görülmektedir. Bu durum, tarımsal faaliyetlerdeki azalma, iklim değişikliği, toprak yapısındaki bozulmalar, doğal afetler veya sürdürülebilir olmayan arazi yönetimi gibi faktörlerden kaynaklanabilmektedir.

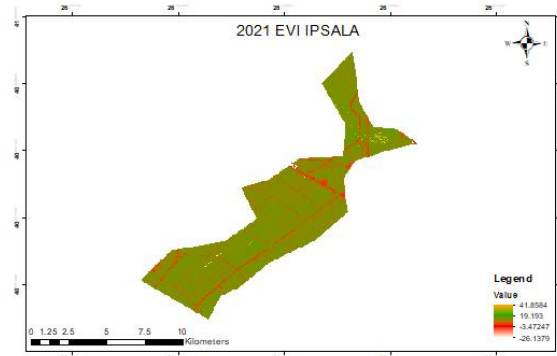
Türkiye İstatistik Kurumu (2023)'ndan alınan ekim alanı verilerine bakıldığında da 2020 yılında ve 2021 yılında artış sonrasında ekim alanlarında azalma olduğu görülmüştür. Bu veriler bize NDVI endeksinin İpsala alanı için doğru sonuç verdiğini göstermiştir.

Gelişmiş bitki örtüsü indeksi (EVI), bitki örtüsü ve sağlığı hakkında bilgi verir. Değer aralığı (-1) ile (+1) olan indekste eksi yöne doğru bitki varlığının ve sağlığının azaldığını, 1'e doğru gittikçe arttığını temsil eder (Huete vd., 2002).

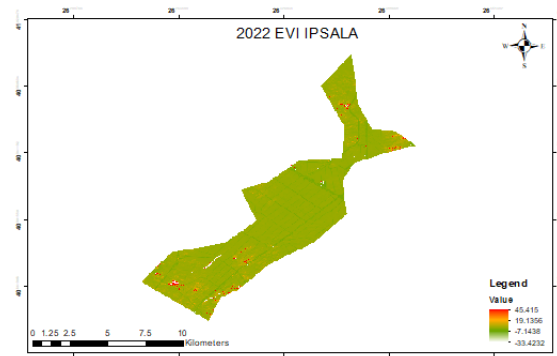
$$EVI = 2.5 \times \frac{Yakın\ Kızıl\ Ötesi - Kırmızı}{Yakın\ Kızıl\ Ötesi + 6 \times Kırmızı - 7.5 \times Mavi + 1} \quad (7)$$



(a)



(b)



(c)

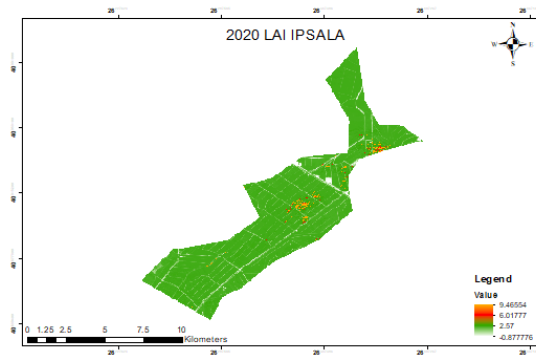
Şekil 7. Edirne, İpsala: a) 2020, b) 2021 ve c) 2022 yıllarına ait EVI görüntüleri

İpsala bölgesine ait 2020, 2021 ve 2022 yıllarındaki NDVI haritaları, Şekil 7’de gösterildiği gibi, 2020 yılına ait haritada yeşil tonların baskın olması, bölgedeki bitki örtüsünün genel olarak yoğun olduğunu göstermektedir. Ancak 2021 yılında yeşil tonların belirgin bir şekilde azaldığı, bitki örtüsünde sağlık bakımından azalma olduğunu göstermektedir. 2022 yılına gelindiğinde ise bu tonların daha da azaldığı yaygın hale geldiği görülmektedir. Bu durum, tarımsal faaliyetlerdeki azalma, iklim değişikliği, toprak yapısındaki bozulmalar, doğal afetler veya sürdürülebilir olmayan arazi yönetimi gibi faktörlerden kaynaklanabilmektedir. İpsala bölgesinde 2020, 2021 ve 2022 yılına ait haritalarda yeşil tonların baskın olması, bölgedeki bitki örtüsünün genel olarak yoğun olduğunu göstermektedir.

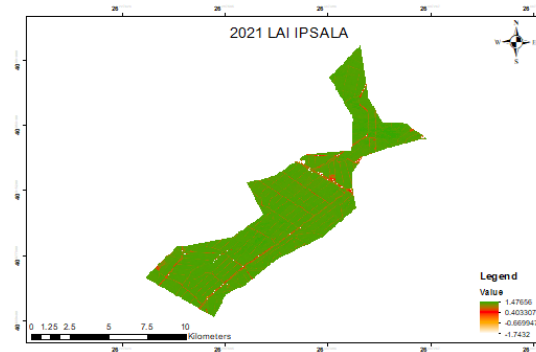
Türkiye İstatistik Kurumu (2023)’ndan alınan ekim alanı verilerine bakıldığında da 2020 yılında ve 2021 yılında artış sonrasında ekim alanlarında azalma olduğu görülmüştür. Bu sonuç görselinde 2022 yılında yeşil renginin daha arttığı görülmüştür. Bu veriler bize EVI endeksinin İpsala alanı için tam olarak doğru sonuç vermediğini göstermiştir.

LAI yaprak alanlarının belirlenmesini ölçmek için kullanılan en uygun endekstir. Bitki örtüsü, büyümesini ve verimi hakkında bilgi vermektedir. Yüksek LAI değerleri genellikle (0) ile (3.5) arasında olmaktadır (Boegh vd., 2002). Gelişmiş bitki örtüsü indeksi kullanılarak denklem 6’da formülle sonuç elde edilir.

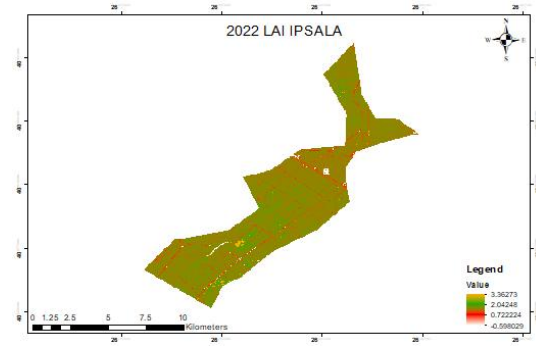
$$LAI = (3.618 \times EVI - 0.118) \quad (8)$$



(a)



(b)



(c)

Şekil 8. Edirne, İpsala: a) 2020, b) 2021 ve c) 2022 yıllarına ait LAI görüntüleri

İpsala bölgesine ait 2020, 2021 ve 2022 yıllarındaki NDVI haritaları, Şekil 8'de gösterilen şekilde, bitki örtüsündeki değişimleri net bir şekilde ortaya koymaktadır. 2020 yılına ait haritada yeşil tonların baskın olması, bölgedeki bitki örtüsünün genel olarak yoğun olduğunu göstermektedir. Ancak 2021 yılında yeşil tonların daha az belirgin olduğu, bitki örtüsünde sağlık açısından olarak azalma olduğunu çıkarımı yapılabilmektedir. 2022 yılına gelindiğinde ise 2021 yılındaki gibi tekrar yeşil tonların daha az belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum, tarımsal faaliyetlerdeki azalma, iklim değişikliği, toprak yapısındaki bozulmalar, doğal afetler veya sürdürülebilir olmayan arazi yönetimi gibi faktörlerden kaynaklanabilmektedir.

Türkiye İstatistik Kurumu (2023)'ndan alınan ekilen alan verilerine bakıldığında 2020 yılından İpsala da ekilen çeltik tarlalarında azalma olduğu görülmüştür. Bu sonuç görselinde 2021 ve 2022 yılında yeşil tonların belirgin bir şekilde değişmediği görülmüştür. Bu veriler bize LAI indeksinin İpsala alanı için tam olarak doğru sonuç vermediğini göstermiştir.

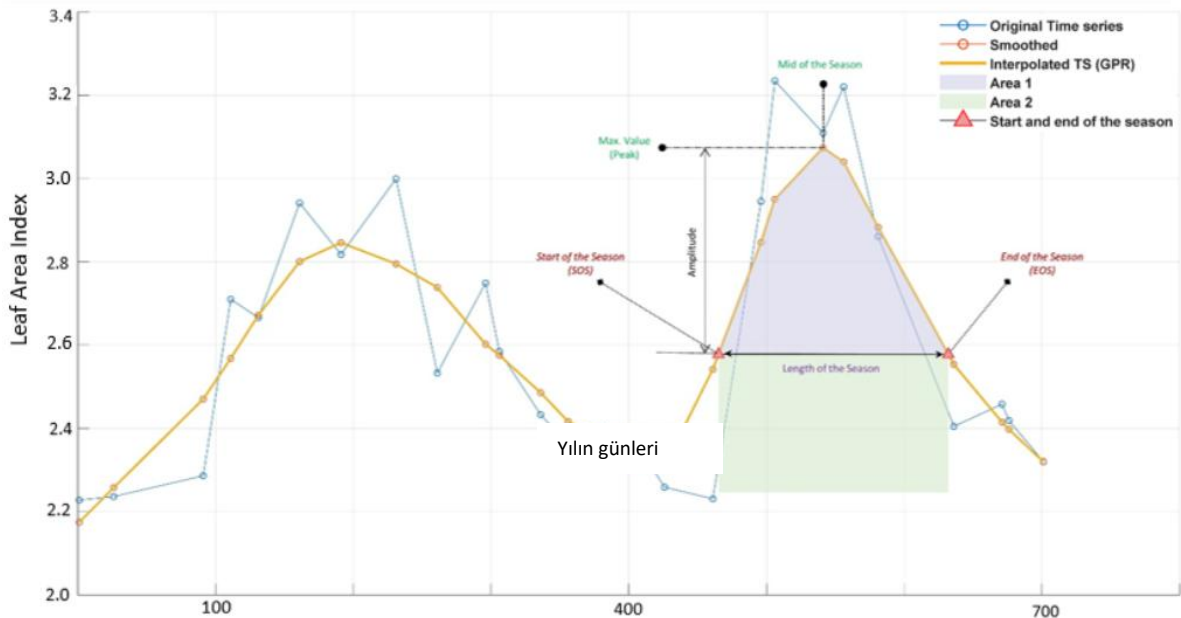
Çalışmada kullanılacak olan EVI, NDVI ve LAI endeksleriyle Google Earth Engine üzerinden çalışmalar yapılmıştır. Görüntüler incelendiğinde İpsala bölgesi için NDVI endeksi çeltik alanlarının bulunmasında oldukça doğru sonuçlar vermiştir.

Endeksler analiz edildikten sonra görüntülere DATimeS yazılımı üzerinden enterpolasyon ve fenolojik evre tahmini aşaması uygulanmıştır. Enterpolasyon aşamasında seçilen GPR enterpolasyonu görüntülere uygulanmıştır. GPR enterpolasyonunun farklı indekslerde verdiği Ortalama Kare Kök Hatası (RMSE), Göreceli Ortalama Kare Kök Hatası (RRMSE) ve süreleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Görüntülere uygulanan GPR enterpolasyonunun sonuçları

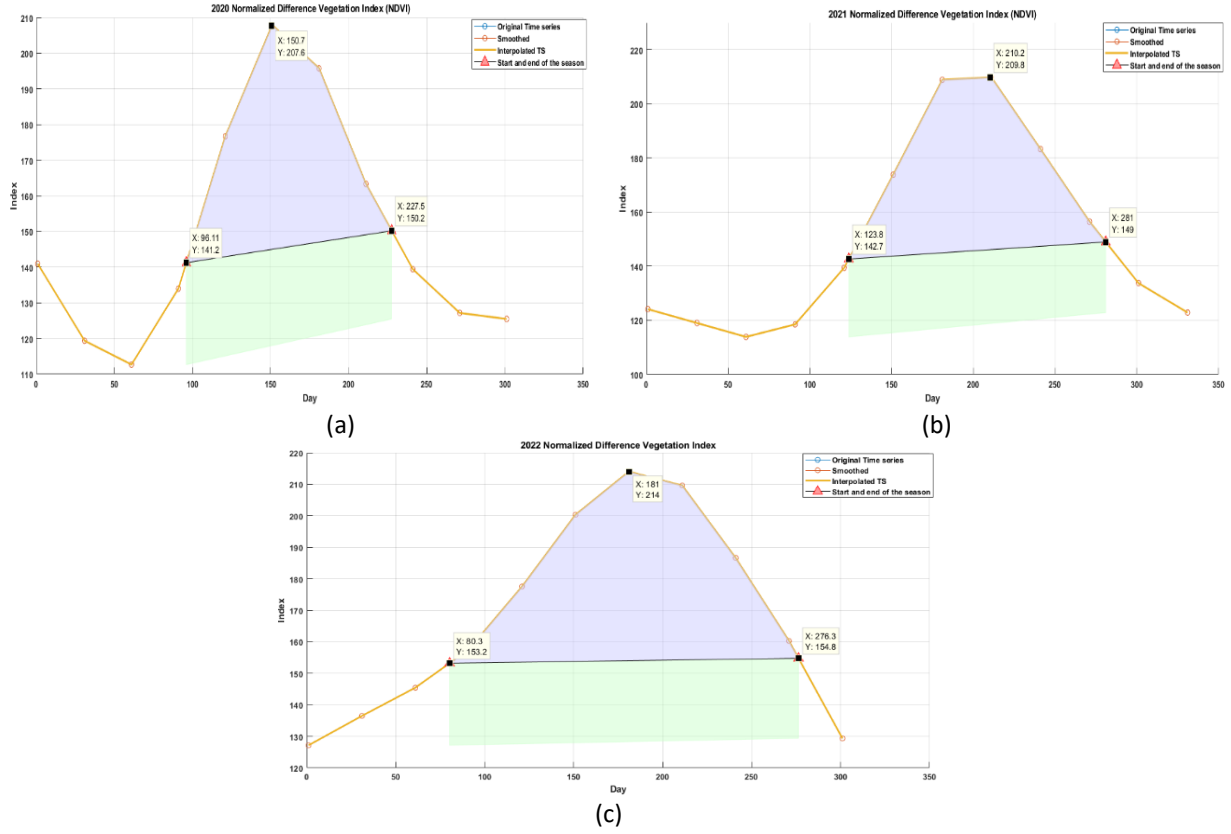
Methods	Indices	RMSE	RRMSE (%)	Total Time (average)
GPR	NDVI	0.048	5.150	12.5 min
	EVI	0.065	7.850	
	LAI	0.270	8.300	

Enterpolasyon ve zamansal seri grafikleri oluşturulduktan sonra fenolojik modellerin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Fenolojik modeller, sadece GPR ile enterpolasyon edilmiş veriler kullanılarak oluşturulmuştur. Fenolojik metrikler, sezonun başlangıcı (SOS), sezonun sonu (EOS), sezonun uzunluğu (LOS), maksimum (Maks) değer günü olarak adlandırılmıştır. Değerler DATimeS'de üretilen fenoloji modellerinden elde edilmiştir. İki sezon için %40 relative amplitude kullanılarak çizimde fenolojik metriklerin şekil 9'da neyi ifade ettiği gösterilmiştir.

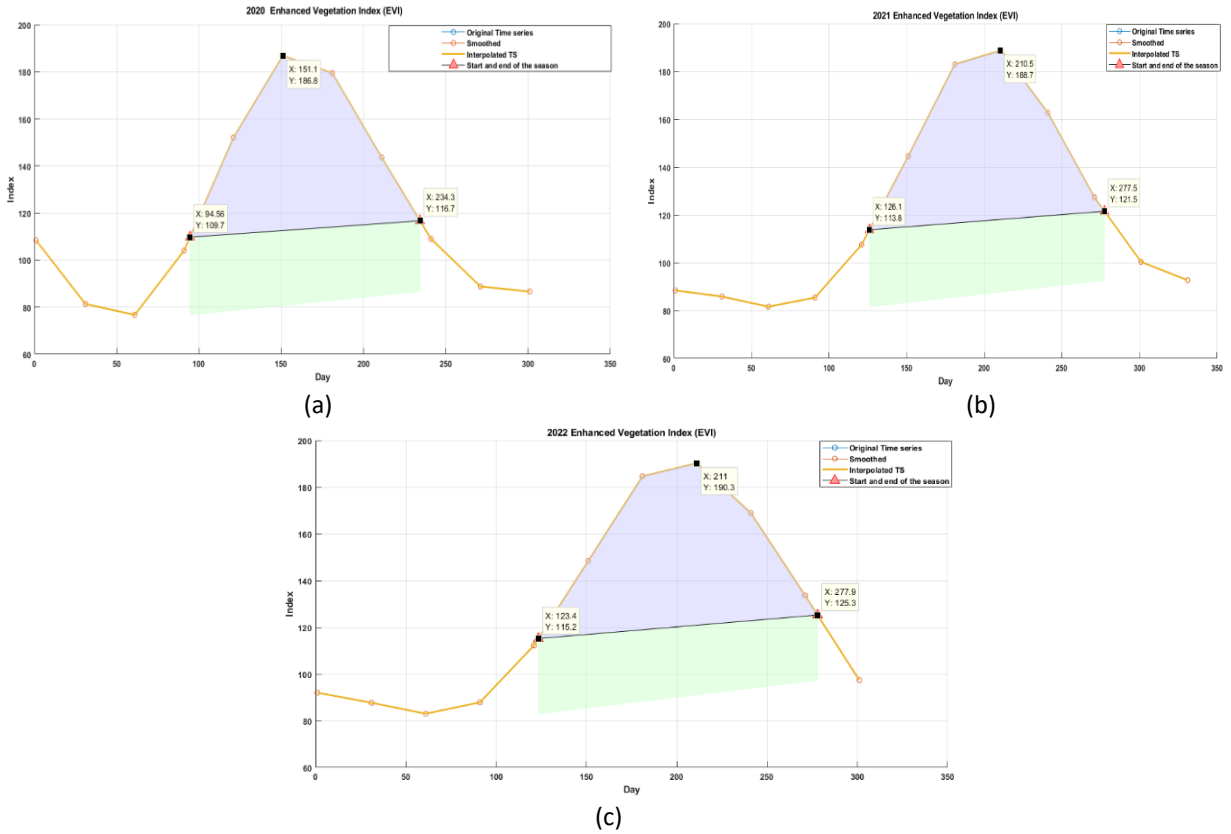


Şekil 9. İki mevsim için %40 bağıl genlik kullanılarak gösterilen fenolojik metrikleri

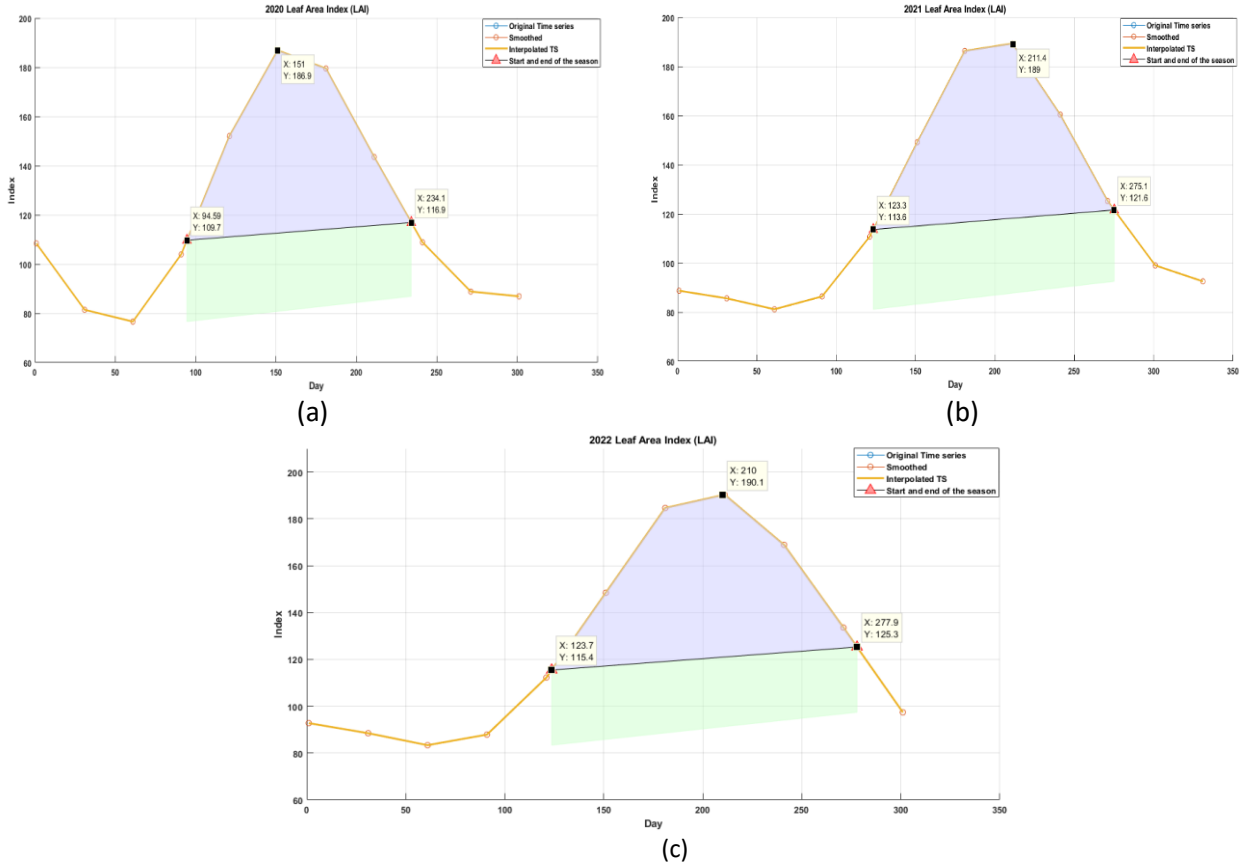
Seçilen alana (ROI) uygulanan enterpolasyon işlemi aşamasıyla görüntülerin fenolojik parametreleri hesaplanmıştır ve fenolojik grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 10, 11 ve 12'de bu sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 10. NDVI: a) 2020, b) 2021, c) 2022 fenolojik göstergeler grafikleri



Şekil 11. EVI: a) 2020, b) 2021, c) 2022 fenolojik göstergeler grafikleri



Şekil 12. LAI: a) 2020, b) 2021, c) 2022 fenolojik göstergeler grafikleri

Çalışma sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 5. DATimeS yazılımından elde edilen çeltik fenoloji takvimi

Yıllara Göre İndeksler	SOS	SOS Referans 15 Nisan + geç - erken	EOS	EOS Referans 15 Ekim + geç -erken	Sezon Uzunluğu (Gün)
2020-NDVI	(18-05-2020)	+33	(29-10-2020)	+14	164
2020-EVI	(13-05-2020)	+28	(09-10-2020)	-6	149
2020-LAI	(12-04-2020)	-3	(30-09-2020)	-15	171
2021-NDVI	(10-05-2021)	+25	(27-10-2021)	+12	169
2021-EVI	(28-05-2021)	+43	(30-10-2021)	+15	154
2021-LAI	(30-04-2021)	+15	(15-10-2021)	0	163
2022-NDVI	(11-05-2022)	+26	(24-10-2022)	+9	165
2022-EVI	(19-05-2022)	+34	(19-10-2022)	+4	152
2022-LAI	(01-05-2022)	+16	(01-10-2022)	-14	153

Trakya Araştırma Enstitüsü’nden (<https://arastirma.tarimorman.gov.tr/ttae>) alınan kontrol verilerine göre çeltik ekim ve hasat tarih aralığının Nisan sonu Mayıs başı ve Eylül sonu Ekim ortası olduğu bilgisi elde edilmiştir. Ayrıca Türkiye’deki çeltiğin ekim ve hasat tarihi sırasıyla Nisan–Mayıs ve Eylül–Ekim olarak görünmektedir. Ekim ve hasat tarihinin SOS ve EOS arasındaki ilişkiyi kısaca şöyle açıklayabiliriz. Bitkinin yeşermeye başladığı, büyümenin başladığı tarih olarak tanımlanır. Bu, çoğu zaman ekim veya filizlenme zamanı ile tam olarak örtüşmez; çünkü SOS, bitkinin gözle görülür şekilde büyümeye başladığı anı ifade eder. Çeltikte genellikle filizlenme sonrası birkaç gün–hafta içinde yeşillik oluştuğunda SOS olarak kaydedilir. EOS ise bitkinin olgunlaştığı, hasada hazır hale geldiği veya yaprakların sararmaya başladığı zaman olarak tanımlanır.

Bu tarih hasat zamanı ile doğrudan ilişkili olabilir, ancak EOS çoğu indeks için yaprak yoğunluğu veya yeşillik azaldığında belirlenir. Hasat genellikle EOS'tan birkaç gün veya hafta sonra gerçekleşebilir. Bu kaynağa göre 15 Nisan SOS ve 15 Ekim EOS olarak kabul edilmiş ve Tablo 5'te tahmin edilen zamanlar ile karşılaştırılmıştır. Ama unutulmamalıdır ki bu tarihler, Türkiye'deki farklı bölgelerde çeltik büyüme dönemleri; topografya, iklim ve yıllık değişkenliklere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Dolayısıyla bu referans tarihleri, bu çalışmada genel bir karşılaştırma ve kontrol amacıyla kullanılmıştır. Yapılan çalışmamızda DATimes ile üretilen fenoloji modeline göre;

1. NDVI bitki indeksine göre 2020 yılında sezon 18 Mayıs'ta başlamış ve 29 Ekim tarihinde sonlanmıştır. Sezon uzunluğu dönemi 164 gün sürmüştür. 2021 yılında sezon 10 Mayıs'ta başlamış ve 27 Ekim'de sonlanmıştır. Sezon uzunluğu 169 gün sürmüştür. 2022 yılında ise sezon 11 Mayıs'ta başlamış ve 24 Ekim'de sonlanmıştır. Sezon uzunluğu dönemi 165 gün sürmüştür.
2. EVI bitki indeksine göre 2020 yılında sezon 13 Mayıs'ta başlamış ve 9 Ekim tarihinde sonlanmıştır. Sezon uzunluğu dönemi 149 gün sürmüştür. 2021 yılında sezon 28 Mayıs'ta başlamış ve 30 Ekim'de sonlanmıştır. Sezon uzunluğu dönemi 154 gün sürmüştür. 2022 yılında ise sezon 19 Mayıs'ta başlamış ve 19 Ekim'de sonlanmıştır. Sezon uzunluğu dönemi 152 gün sürmüştür.
3. LAI bitki indeksine göre 2020 yılında sezon 12 Nisan'da başlamış ve 30 Eylül tarihinde sonlanmıştır. Sezon uzunluğu dönemi 171 gün sürmüştür. 2021 yılında sezon 30 Nisan'da başlamış ve 15 Ekim'de sonlanmıştır. Sezon uzunluğu dönemi 163 gün sürmüştür. 2022 yılında ise sezon 1 Mayıs'ta başlamış ve 1 Ekim'de sonlanmıştır. Sezon uzunluğu dönemi 153 gün sürmüştür.

Tablo 6. Yıllara göre en iyi sonuç veren indeksler

Yıllara Göre İndeksler	(SOS)	SOS Referans 15 Nisan + geç - erken	(EOS)	EOS Referans 15 Ekim + geç -erken	Sezon Uzunluğu (Gün)
2020 LAI	(12-04-2020)	-3	(30-09-2020)	-15	171
2021 LAI	(30-04-2021)	+15	(15-10-2021)	0	163
2022 LAI	(01-05-2022)	+16	(01-10-2022)	-14	153

Trakya Araştırma Enstitüsü'nden alınan kontrol verilerinde çeltik ekim ve hasat tarih aralığının nisan sonu ve mayıs başı olduğu belirlenmiştir. Bu bilgi doğrultusunda sonuçlar değerlendirildiğinde en iyi sonuç veren indeksin üç yıl içinde LAI indeksi olduğu belirlenmiştir. Luo vd. (2020)'un çalışmasında olduğu gibi LAI indeksindeki yüksek doğruluk, literatürde birlikte kullanıldığı benzer çalışmalarda da doğrulanmıştır.

DaTimeS ile yukarıdaki tablodaki değerlere ulaşılmıştır. Bu değerlerin doğruluğunu analiz etmek için Trakya Araştırma Enstitüsünden alınan ortalama ekim ve hasat tarihleri ile karşılaştırılmıştır. Alınan bilgilere göre sezon başlama tarihi nisan ve mayıs ve sezon bitiş tarihi ise eylül ve ekim arası olarak belirlenmiştir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde yapılan analizler sonucunda elde edilen fenolojik takvimin alınan kontrol verileriyle uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, uzaktan algılanmış uydu görüntüler kullanılarak çeltik bitkisinin zaman içinde değişimi, gelişimi incelenmiş ve çeltik bitkisinin fenolojik evrelerine dair çıkarımlarda bulunulmuştur. Fenolojik hesaplamalar öncesi farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerden fenolojik parametrelerin bulunması için çalışılacak yöntem olarak GPR yöntemi kullanılmıştır.

Fenolojik takvime göre NDVI, EVI ve LAI indeksleri kalite açısından değerlendirildiğinde, LAI en yüksek kaliteye sahiptir, çünkü SOS ve EOS değerleri her yıl nisan sonu ve mayıs başı ve eylül sonu ve ekim sınırları içinde kalmıştır. EVI ve NDVI' da SOS ve EOS değerleri ile bu sınırları tamamen karşılamış, fenolojik döngüyü doğru şekilde temsil etmiştir. Sonuç olarak, LAI birincil indeks olarak kullanılabilirken, EVI ve NDVI destekleyici bir indeks olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, yapılan bu çalışmada uzaktan algılama teknolojisi ve zaman serileri analizi yöntemi bir arada kullanılarak, çeltik bitkisinin değişimi, fenolojik evrelerinin tespiti yapılmış ve sonuçlar ilgili alanlardan alınan bilgiler ile doğrulanmıştır. Bu çalışma, fenolojik evrelerin çıkarımlarında, fenoloji takvimlerinin oluşturulmasında doğru sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

Bu çalışma, tarımsal analizlerin daha kapsamlı ve güvenilir hale gelmesine katkıda bulunabilir. İlk olarak, bitki indeksleri yüzeyde gözlemlenen biyokütle ve klorofil yoğunluğunu ölçerken, toprak altı koşullarının (toprak nemi, besin maddeleri, sıcaklık gibi) bitki gelişimi üzerinde büyük etkisi olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, toprak sensörleri veya yer tabanlı ölçüm teknikleriyle toprak özelliklerinin periyodik olarak ölçülmesi, indekslerle birlikte daha bütüncül bir analiz sağlayabilir. İndeks çeşitliliğini artırmak da faydalı olabilir; EVI, NDVI ve LAI gibi yaygın indekslerin yanı sıra bitki stresini, su durumunu veya klorofil içeriğini değerlendiren GNDVI veya SAVI gibi farklı indeksler de denenebilir.

Analiz yöntemlerinde, GPR ve Savitzky-Golay filtreleme yöntemlerine ek olarak, makine öğrenmesi tekniklerinin kullanılması zaman serisi verilerinin öngörüsünü güçlendirebilir ve fenolojik değişimler ile stres faktörlerinin daha hassas bir şekilde belirlenmesine yardımcı olabilir. Aynı şekilde, uydu verilerinin doğruluğunu sağlamak ve indeks sonuçlarını desteklemek için arazi çalışmaları ile uydu verilerinin karşılaştırılması da önemlidir; bu karşılaştırmalar, indekslerin bitki sağlığını ve gelişimini ne kadar doğru yansıttığını görmek açısından faydalı olabilir. Üç yıllık veriler yerine, daha uzun bir zaman dilimi boyunca veri toplanması da uzun vadeli trend analizlerini güçlendirebilir. Bu öneriler, çalışmanın derinliğini artırırken, sonuçların güvenilirliğini de yükseltebilir.

Kaynaklar

- ARTMO. (2021). *DATimeS*. ARTMO Toolbox. <https://artmtoolbox.com/plugins-standalone/91-plugins-standalone/34-datimes.html>
- Belda, S., Pipia, L., Morcillo-Pallarés, P., Rivera-Caicedo, J. P., Amin, E., Grave, C., & Verrelst, J. (2020). DATimeS: A machine learning time series GUI toolbox for gap-filling and vegetation phenology trends detection. *Environmental Modelling & Software*, 127, Article 104666. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104666>
- Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C., Jensen, N., Schelde, K., & Thomsen, A. (2002). Airborne multi-spectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 179–193.
- Dela Torre, D. M. G., Gao, J., Macinnis-Ng, C., & Shi, Y. (2021). Phenology-based delineation of irrigated and rainfed paddy fields with Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine. *Geo-spatial Information Science*, 24(4), 695–710. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1984183>
- Dineshkumar, C., Nitheshnirmal, S., Bhardwaj, A., & Priyadarshini, K. N. (2019). Phenological monitoring of paddy crop using time series MODIS data. *Proceedings*, 24(1), Article 19. <https://doi.org/10.3390/IECG2019-06205>
- Estévez, J., Salinero-Delgado, M., Berger, K., Pipia, L., Rivera-Caicedo, J. P., Wocher, M., Reyes-Muñoz, P., Tagliabue, G., Boschetti, M., & Verrelst, J. (2022). Gaussian processes retrieval of crop traits in Google Earth Engine based on Sentinel-2 top-of-atmosphere data. *Remote Sensing of Environment*, 273, Article 112958. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112958>
- European Environment Agency. (2018). *CORINE Land Cover 2018 (CLC2018)*. Copernicus Land Monitoring Service. <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018>
- European Space Agency. (2025, August 15). *Copernicus Sentinel-2 mission*. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- Google Earth Engine (2024, May 5). *Google Earth Engine data catalog*. Google Developers. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hatfield, J. L., Kanemasu, E. T., Asrar, G., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Idso, S. B. (1985). Leaf area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 167–175.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Jensen, J. R. (2009). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson Education.
- Kim, H. O., & Yeom, J. M. (2012). Multi-temporal spectral analysis of rice fields in South Korea using MODIS and RapidEye satellite imagery. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 29(4), 407–418. <https://doi.org/10.5140/JASS.2012.29.4.407>

- Luo, Y., Zhang, Z., Chen, Y., Li, Z., & Tao, F. (2020). ChinaCropPhen1km: A high-resolution crop phenological dataset for three staple crops in China during 2000–2015 based on leaf area index (LAI) products. *Earth System Science Data*, 12, 197–214. <https://doi.org/10.5194/essd-12-197-2020>
- Meier, U. (2001). *Growth Stages of Mono and Dicotyledonous Plants*. BBCH Monograph, Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, Bonn.
- Narin, O. G., & Abdikan, S. (2020). Monitoring of phenological stage and yield estimation of sunflower plant using Sentinel-2 satellite images. *Geocarto International*, 37(5), 1378–1392. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1765886>
- NASA. (2025, May 9). *MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*. NASA Earth Science. <https://modis.gsfc.nasa.gov>
- Nguyen, D., Wagner, W., Naeimi, V. & Cao, S. (2015). Rice-planted area extraction by time series analysis of ENVISAT ASAR WS data using a phenology-based classification approach: A case study for Red River Delta, Vietnam. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3, 77-83.
- Orusa, T., Viani, A., Cammareri, D., & Borgogno Mondino, E. (2022). A Google Earth Engine algorithm to map phenological metrics in mountain areas worldwide with Landsat collection and Sentinel-2. *Geomatics*, 3(1), 12–32. <https://doi.org/10.3390/geomatics3010012>
- Rasmussen, C. E., & Williams, C. K. I. (2006). *Gaussian processes for machine learning*. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/3206.001.0001>
- Salinero-Delgado, M., Estévez, J., Pipia, L., Belda, S., Berger, K., Paredes Gómez, V., & Verrelst, J. (2022). Monitoring cropland phenology on Google Earth Engine using Gaussian process regression. *Remote Sensing*, 14, Article 146. <https://doi.org/10.3390/rs14010146>
- Şimşek, O., Nadoğlu, Y., Yücel, G., Dokuyucu, Ö., & Gökdağ, Ş. A. (2014). *Türkiye fenoloji atlası*. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ziraat Meteoroloji Şube Müdürlüğü.
- Taşlıgil, N., & Şahin, G. (2011). Türkiye’de çeltik (*Oryza sativa* L.) yetiştiriciliği ve coğrafi dağılımı. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 4(6), 182–203. <https://doi.org/10.14520/adyusbd105>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023, 5 Mayıs). Türkiye’deki pirinç ekim alanları ve üretim miktarı. TÜİK. <https://www.tuik.gov.tr>
- Verrelst, J., Alonso, L., Camps-Valls, G., Delegido, J., & Moreno, J. (2011). Retrieval of vegetation biophysical parameters using Gaussian process techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5), 1832–1843.
- Verrelst, J., Rivera, J. P., Moreno, J., & Camps-Valls, G. (2013). Gaussian processes uncertainty estimates in experimental Sentinel-2 LAI and leaf chlorophyll content retrieval. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 86, 157–167.
- Wang, J. (2023). An intuitive tutorial to Gaussian process regression. *Computing in Science & Engineering*, 25(4), 4–11. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2023.3342149>
- Yang, K., Gong, Y., Fang, S., Duan, B., Yuan, N., Peng, Y., Wu, X., & Zhu, R. (2021). Combining spectral and texture features of UAV images for the remote estimation of rice LAI throughout the entire growing season. *Remote Sensing*, 13(15), Article 3001. <https://doi.org/10.3390/rs13153001>