



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Derleme Makale

Bitki Hastalıklarının Erken Teşhisinde Vis-NIR Spektroskopisi Yöntemi

Ayşin BİLGİLİ¹, **Ali Volkan BİLGİLİ²**

¹GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Bitki Sağlığı Bölümü, 63040, Şanlıurfa, Türkiye

²Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, 63300, Şanlıurfa, Türkiye

*Sorumlu yazar e-posta: aysin.bilgili@tarimorman.gov.tr

Öz: Son yıllarda uzaktan algılama tekniklerinin geliştirilmesi, bitki koruma uzmanlarına ürünlerin bitki sağlığı durumunu değerlendirmek için yeni mekanizmalar sunmuştur. Görülebilir ve yakın kızılötesi yansıma spektroskopisi (Vis-NIR) gibi hiperspektral sensörlerden elde edilen anlamca zengin veriler, bitki koruma önlemlerinin zamanında ve rasyonel bir şekilde uygulanmasına olanak tanır. Bu spektral veriler, kimyasal parametreler hakkında spektral absorpsiyon ve karakteristikleri aracılığıyla bilgi sağlayarak, hastalık enfeksiyonu veya strese bağlı anormal durumların erken tespitine yardımcı olur. Özellikle belirtiler ortaya çıkmadan önce bitki hastalıklarının tespiti, etkili stratejilerin uygulanması ve tarımda büyük kayıpların önlenmesi açısından büyük önem taşır. Bu derleme çalışması, görünür ve yakın kızılötesi (Vis-NIR) spektroskopisi yönteminin erken bitki hastalığı tespitindeki potansiyelini değerlendirmektedir. Vis-NIR spektroskopisi, tarımsal ürünlerin geniş bir yelpazesindeki çeşitli parametrelerin invazif olmayan analizi ve tanımlanması için kanıtlanmış bir ölçüm teknolojisidir. Bu yöntemin, bitkilerde sağlıklı ve hastalıklı olma durumlarını ayırt edebilme yeteneği kanıtlanmıştır. Bu nedenle bilim insanları, belirtiler gözle görülmeden önce hastalıkların veya stresin erken tespiti için bu yaklaşımı uygulamaya çalışmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bitki hastalıkları, Erken tanı, Hassas tarım, Spektroskopisi, Vis-NIR, Yeni teşhis methodu

Vis-NIR Spectroscopy Method for Early Diagnosis of Plant Diseases

Abstract: In recent years, the development of remote sensing techniques has provided plant protection specialists with new mechanisms to assess the plant health status of crops. Meaning-rich data obtained from hyperspectral sensors, such as visible and near-infrared reflectance spectroscopy (Vis-NIR), allows for the timely and rational implementation of plant protection measures. These spectral data provide information about chemical parameters through absorption patterns and properties, aiding in the early detection of abnormal conditions caused by disease infection or stress. Particularly, the detection of plant diseases before symptoms appear is crucial for implementing effective strategies and preventing significant losses in agriculture. This review study evaluates the potential of the visible and near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy technique in early plant disease detection. Vis-NIR spectroscopy is a proven measurement technology for the non-invasive analysis and identification of various parameters across a wide range of agricultural products. This method has been shown to distinguish between healthy and unhealthy states in plants. Therefore, scientists are working to apply this approach for the early detection of diseases or stress before symptoms become visible.

Keywords: Early diagnosis, New detection method, Plant diseases, Precision agriculture, Spectroscopy, Vis-NIR

Gönderilme Tarihi: 24.01.2025

Kabul Tarihi: 24.04.2025

Nasıl atıf yapılır: Bilgili, A., & Bilgili, A. V. (2025). Bitki hastalıklarının erken teşhisinde Vis-NIR spektroskopisi yöntemi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(2), 848-859. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1626624>

1. Giriş

Dünya nüfusunun 2050 yılında 9.7 milyara ve 2100 yılında 11.2 milyara ulaşması öngörülmektedir; bu durum, gıda üretimini %70–100 oranında artırma gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Mevcut tarım alanlarının genişletilmesi zorlu ve çevresel açıdan zararlı bir strateji olduğundan, daha etkili bir yaklaşım olarak birim alandan elde edilen ürün miktarını artırmak ve tarım ürünlerinin verimliliğini yükseltmek önem kazanmaktadır. Bu hedef bitki ıslahı ile birlikte bitkilerin biyotik ve abiyotik streslerinin zamanında teşhis edilmesini gerektirmektedir (Farber ve ark., 2019). Dünya genelinde, biyotik stres faktörleri çeşitli patojenler ve zararlılar nedeniyle tarımsal verimliliğin %20–40 oranında kaybına yol açmakta ve bitki hastalıkları da %10'a kadar verim kaybına neden olmaktadır (Zhang ve ark., 2012; Khaled ve ark., 2017; Farber ve ark., 2019). Bu büyük kayıpları en aza indirmek için hastalıkların erken tespiti kritik öneme sahiptir. Hastalığın erken teşhisi ve mekansal dağılımının doğru bir şekilde belirlenmesi aynı zamanda gereksiz kimyasal kullanımının önlenmesi büyük önem taşımaktadır (Zhang ve ark., 2012; Bilgili ve ark., 2018). Ancak mevcut analiz yöntemleri, zaman ve güvenilirlik açısından yetersiz kalmaktadır. Bu durum, tarlada bitki patojenlerinin hızlı bir şekilde tespit edilmesi için alternatif yöntemlere olan ilgiyi artırmaktadır.

Bitki hastalıklarını önlemek ve kontrol altına almak için pestisitler, genetiği değiştirilmiş bitkiler ve hasta bitkilerin zamanında tarladan uzaklaştırılması gibi yöntemler ile başarılar elde edilmiştir. Bunun yanında kimyasal mücadele metodu olarak pestisitler, bitki hastalıklarının gelişimini önlemek ve bunlarla beslenen zararlıları azaltmak için kullanılabilir (Farber ve ark., 2019). Belirli koşullar altında, pestisit uygulamaları verimi yaklaşık %50 oranında artırabilir. Pestisitlerin kullanımı, bitki verimlerini artırma potansiyeline sahip olmasına rağmen, çevreye ve canlılara zarar verme riski nedeniyle kısıtlanmaktadır; ayrıca bunlar iklim değişikliği gibi küresel sorunlarla da ilişkilidir. Genetiği değiştirilmiş organizmalar (GDO), verimi %22 oranında artırma ve kazancı %68 yükseltme kapasitesine sahipken, ekosisteme entegre edilmesinin potansiyel riskleri henüz tam olarak aydınlatılmamıştır. Enfekte bitkilerin zamanında yok edilmesi maliyetli olabilir ve hastalıkların erken tespiti sağlanamadığında bu önlemi genellikle uygulanamaz hale getirebilir. Bu nedenlerle, mevcut hastalıkların önlenmesi ve mücadele yöntemlerinin kısıtlamaları, bitki hastalıklarının erken dönemlerde tespiti için güvenilir, hızlı ve maliyeti etkin alternatiflere olan talebi artırmaktadır (Farber ve ark., 2019).

Modern tarımda, yaygın bitki hastalıkları ve zararlılar önemli bir sorun oluşturmaktadır (Terentev ve ark., 2022). Bitki hastalıklarının erken tespiti için konvansiyonel ve ileri tekniklerden oluşan birkaç yöntem kullanılmaktadır; bunlar arasında görsel teşhis, laboratuvar testleri ve invaziv olmayan teknikler bulunmaktadır. Görsel teşhis, etkilenen bitkileri görünür belirtilerine dayanarak tanımlar, ancak bu yöntem iş gücü gerektirir, zaman alıcıdır ve özellikle enfeksiyonun erken aşamalarında verimsizdir. Laboratuvar yöntemleri, fizyolojik, biyolojik, serolojik ve moleküler testleri kapsar; serolojik testler (örneğin, ELISA) ve moleküler testler (örneğin, PCR) yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemler, belirtiler ortaya çıkmadan önce hastalık tespitini sağlar, ancak karmaşık, maliyetli ve etkili hastalık yönetimi için gerekli hıza sahip değildir (Khaled ve ark., 2017).

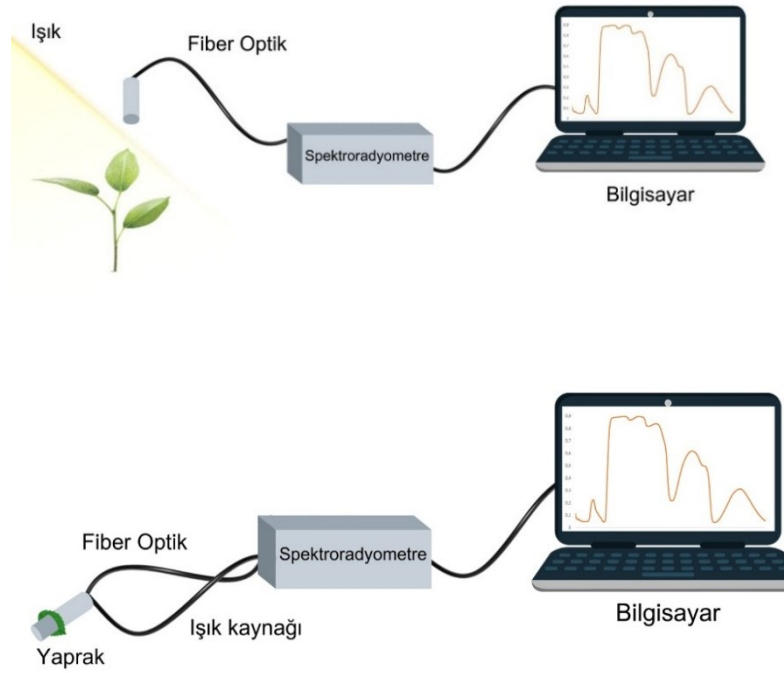
Bu sorunların üstesinden gelebilmek için hastalıkların zamanında izlenmesi gerekmektedir. Uzaktan algılama yöntemleri, bu bağlamda umut verici çözümler sunarak ürünün durumunu ve hastalıkları belirlemekle birlikte tarımsal yönetim uygulamaları için faydalı bilgiler sağlamaktadır. Bu yöntemler arasında, Görünür ve Yakın Kızılötesi Yansıma Spektroskopisi (Vis-NIR) ön plana çıkarak hastalıkların erken teşhisi ve izlenmesine katkıda bulunur. Mevcut birçok hastalık tespit tekniği arasında, hızlı ve invaziv olmayan bir yöntem olan Vis-NIR spektroskopisi tercih edilmektedir (Khaled ve ark., 2017).

Geleneksel teşhis yöntemlerinin aksine, spektrodymetrik teknikler hastalıkların erken tespitini mümkün kılarak zamanında uygulama sağlamakta ve ekonomik kayıpları azaltmaya yardımcı olabilmektedir (Herrmann ve ark., 2018; Giraldo-Betancourt ve ark., 2020). Ayrıca, spektrodymetrik yöntemler bitkilere zarar vermeden veri toplar ve invaziv bir yaklaşım sergilemez (Khaled ve ark., 2017; Giraldo-Betancourt ve ark., 2020). Vis-NIR gibi görüntü dışı spektrodymetrik teknikler, hassas tarımda hastalıkların teşhisi, belirlenmesi ve izlenmesi açısından önemli katkılar sunmaktadır (Mahlein ve ark., 2013). Vis-NIR, her materyal için özel bir yansıma spektrumu (parmak izi olarak adlandırılan spektral kütüphane) elde etmek amacıyla materyalin yüzeyinden yayılan radyasyonun dalga boylarını ölçme prensibine dayanır. Spektrodymetre ile bitkilerden toplanan spektral veriler, bitkilerin besin

ihtiyaçlarını, su ihtiyacı, sağlıklı olması ve biyotik ve abiyotik stres koşulları hakkında bilgi sağlar (Giraldo-Betancourt ve ark., 2020).

2. Görünür ve Yakın Kızılötesi Yansıma Spektroskopisi (Vis-NIR)

Vis-NIR sistemi, dört ana bileşenden oluşmaktadır: ışık kaynağı (arazide güneş, laboratuvar ortamında ise yapay ışık), ışık izole edici mekanizmalar, dedektör ve örnekleme cihazları (Şekil 1). Veri toplama, üç farklı modda gerçekleştirilir: yansıma (Reflection), emilim (Absorption) ve iletim (Transmission). Yansıma modunda, dedektör ışık kaynağı ile aynı tarafta yer alırken, etkileşim modunda dedektör ve ışık kaynağı paralel konumlandırılmıştır. İletim modunda ise dedektör, aydınlatmanın tam karşısında bulunur.



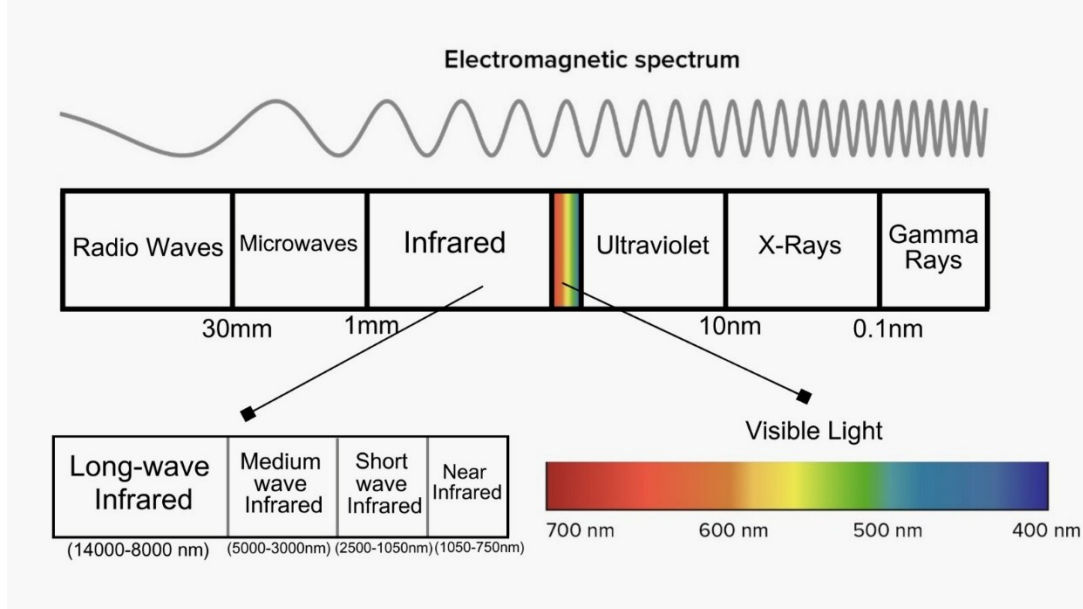
Şekil 1. Vis-NIR örnekleme düzeneği: Arazide güneş enerjisi ve laboratuvarında yapay ışık kaynağı ile yapraktan spektral veri toplama.

Görünür ve Yakın Kızılötesi Yansıma Spektroskopisi (Vis-NIR), bitki hastalıklarının tespiti için yaygın olarak kullanılan spektral analiz yöntemlerinden biridir. Bu teknik, bitkilerin yüzeyinden yayılan elektromanyetik radyasyonun dalga boylarına bağlı olarak ölçülmesi ilkesine dayanır.

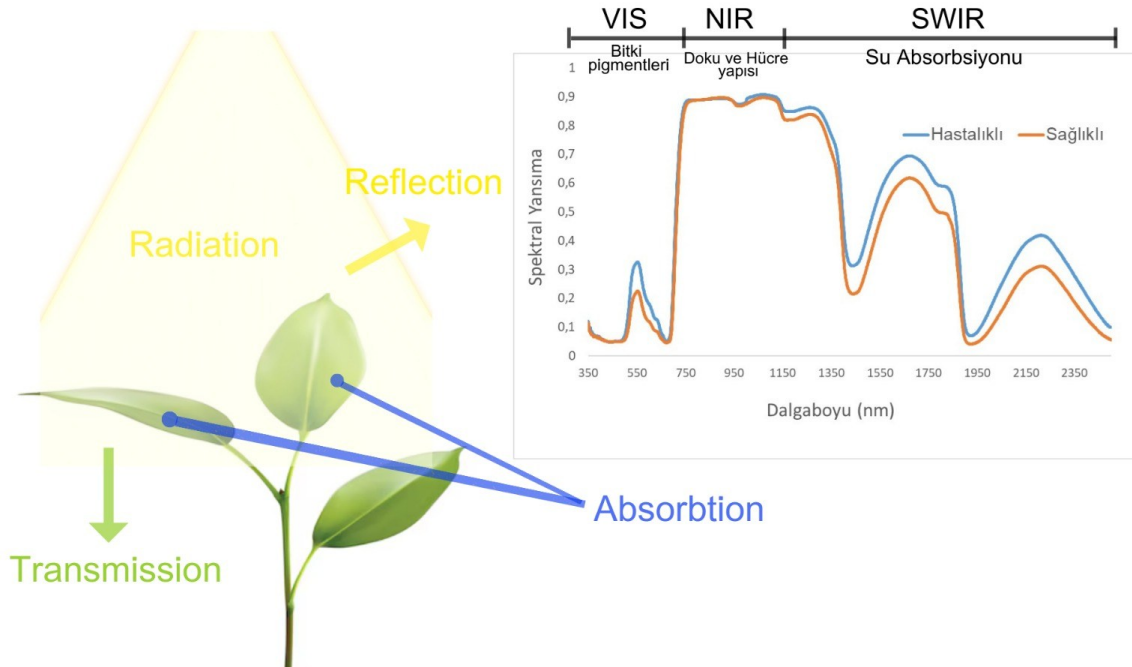
Spektroskopi yöntemi ultraviyole, görünür ve kızılötesi spektrumlar dahil olmak üzere elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşimini inceleyen bir bilim dalıdır. Spektroskopi verileri genellikle bir emisyon veya absorpsiyon spektrumu ile tanımlanır ve sonuç, dalga boyu veya frekans fonksiyonu olarak görselleştirilebilir. Vis-NIR tekniği, elektromanyetik spektrumun görünür ışık (Visible; 400–700 nm) ve yakın kızılötesi (NIR; 750–2500 nm) aralığını kullanır (Şekil 2).

Yaprak yüzeyine ulaşan ışık, bitki yapraklarıyla üç şekilde etkileşimde bulunur: Birincisi, ışık yaprakların içinden iletilir (Transmission); ikincisi, ışık, yapraklardaki kimyasal maddeler (pigmentler, su, şekerler, lignin ve aminoasitler gibi) tarafından emilebilir (Absorption); üçüncüsü ise ışık, yaprakların yüzeyinden veya iç yapısından (örneğin, mumlu kutikula, hücre duvarı vb.) yansır (Reflection) (Şekil 3). Görünür ve Yakın Kızılötesi Yansıma Spektroskopisi (Vis-NIR) teknolojisi, yansıyan ve iletilen ışığı izlemek için kullanılabilir. Farklı maddeler (toprak, bitki vb.), belirli dalga boylarında farklı yansıma ve emilim değerleri göstererek kendilerine özgü spektral özellikler sergilemektedir. Örneğin, yeşil bitkilerin spektral özellik eğrileri benzerlik göstermekte olup, bazı bantlarda tipik yansıtıcı spektral özellikler sergilemektedir (Şekil 3).

Vis-NIR her malzeme için özel bir yansıma spektrumu oluşturarak "parmak izi" adı verilen spektral kütüphaneler elde eder. Bu yöntem, numunelere zarar vermemesi, hızlı ve hassas sonuçlar vermesi ile belirli bitki hastalık türlerine özgü olma avantajları da sunar. Ayrıca, objektif verilerin kaydedilmesi, numunenin tamamen analiz edilmesi ve zaman alan işlerde insan gücünün kullanımını azaltma imkanı sağlar. Vis-NIR; bitki sağlığı, su durumu ve besin gereksinimleri hakkında bilgi sağlarken, bitki hastalıklarının erken teşhisini ve izlenmesini mümkün kılar. Bu sayede, hassas tarım uygulamalarında etkili bir araç haline gelirken, makul maliyet etkinliği de oluşturur.



Şekil 2. Elektromanyetik spektrum, görünür ve yakın kızılötesi ışık aralığı.



Şekil 3. Bitki ışık etkileşiminin sağlıklı ve hastalıklı (*Fusarium* enfekte olmuş inokülasyondan 30 gün sonra) domates yapraklarının spektral imzaları, VIS görünür (400–700 nm), NIR yakın kızılötesi (700-1050), SWIR kısa dalga kızılötesi (1400-2500) (Spektral grafik üretimindeki veri Bilgili ve ark. (2023)' den temin edilmiştir).

Bitkilerin görünür ve yakın kızılötesi bölgelerdeki spektral yansıma özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. 550 nm civarında küçük bir yansıma zirvesi klorofilin güçlü yansıma bölgesine karşılık gelmektedir. 700 nm civarında yansımadaki keskin artış klorofilin düşük kırmızı yansıması ve yüksek iç yaprak saçılımı nedeniyle yüksek yakın kızılötesi yansımanın oluşmasından kaynaklanmaktadır. Eğrinin eğimi, bitkilerde klorofil içeriği ile yakından ilişkilidir ve bu olgu kırmızı kenar (red edge) fenomeni olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, 700 ile 1200 nm arasındaki bantta meydana gelen güçlü yansıma yaprakların neredeyse ışık enerjisini emmemesi ve yüksek sıcaklık zararlarını önlemesiyle bağlantılıdır. 1470 nm ve 1940 nm civarında iki su absorpsiyon bandı bulunmaktadır. Son olarak, 1300 ile 2500 nm spektrum aralığında, spektral yansıma özellikleri esasen bitki nem içeriği ve CO₂ emisyonları ile ilişkilidir (Başayığı ve Dedeoğlu, 2012; Dedeoğlu ve Başayığı, 2013; Wan ve ark., 2022).

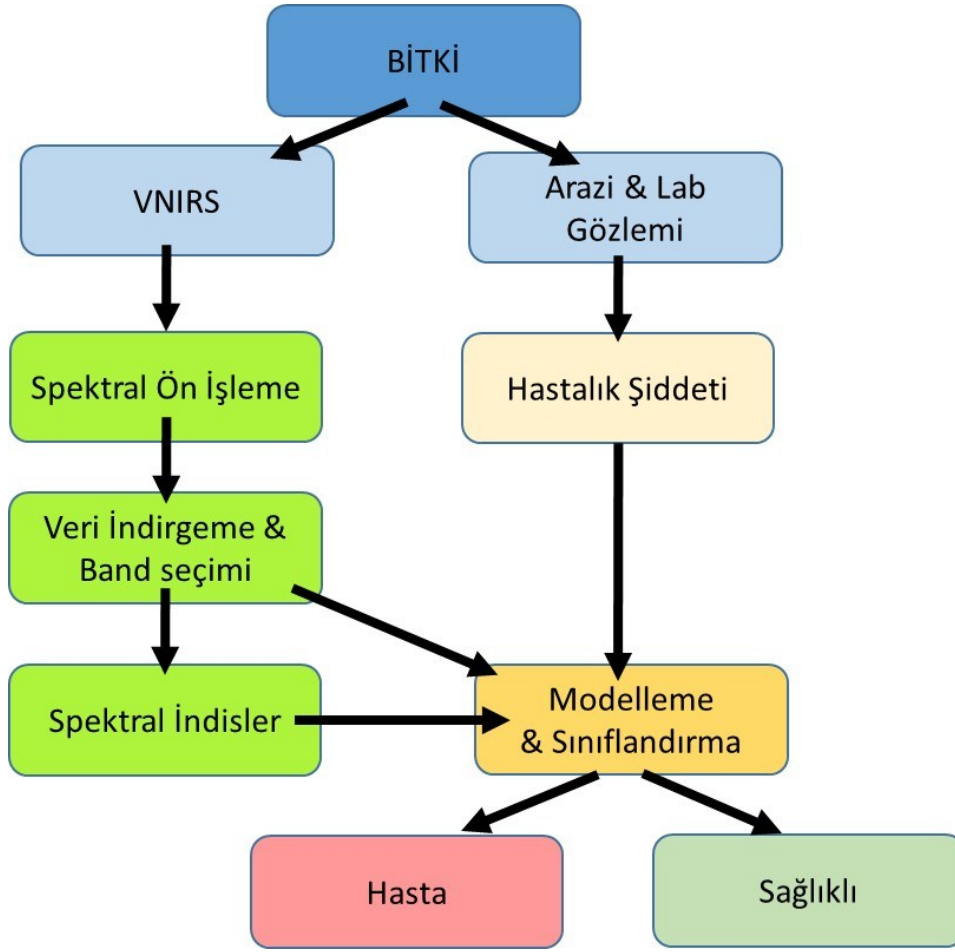
Genel olarak, bireysel yaprakların yansıtma özellikleri, pigment içeriği, yaprak yapıları ve su içeriğinin elektromanyetik radyasyon (EMR) ile etkileşimine bağlıdır. Görünür (VIS) spektrumunda, yaprağın yansıtma oranı düşüktür; bu durum, esas olarak ışığın fotosentetik pigmentler olan klorofiller ve karotenoidler tarafından gerçekleşen emilimi ile ilişkilidir. Kısa dalga yakın kızılötesi bölgesinde de belirgin bir emilim gözlemlenmemekte; dolayısıyla yansıma büyüklüğü, yaprağın hücre yapısı ve diğer yapısal özellikleri ile şekillenmektedir. Uzun dalga yakın kızılötesi bölgesi ise, su ve diğer bileşiklerin emilim özellikleri ile bağlantılı olarak değişken yansıma değerleri sunmaktadır (Khaled ve ark., 2017).

3. Vis-NIR Spektroskopisi Tekniği ile Bitki Hastalıklarının Erken Teşhisi ve İzlenmesi

Spektral yansıma analizleri, bitki stresinin tespiti için, elektromanyetik spektrumun VIS ve IR aralığındaki ışığın emilimindeki değişiklikler sayesinde son derece faydalı olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca, bir ürünün patolojik durumu, elektromanyetik spektrumun VIS veya IR bölgelerinde görülebilen veya tespit edilebilen spektral özellikler üzerinde etkiler oluşturabilir (Şekil 3). Bu bağlamda, Vis-NIR tekniği, bitki hastalıklarının tespiti ve izlenmesinde oldukça kullanışlıdır. Görünür ışık aralığı (400–700 nm), yapraklardaki renk değişimlerini tespit ederek klorofil seviyeleri ve stres göstergeleri hakkında bilgi verirken, yakın kızılötesi aralık (750–2500 nm) ise bitkilerdeki su içeriği, hücre yapısı ve hastalıklar sonucu oluşan kimyasal değişimleri analiz etmeye olanak tanır. Böylece, Vis-NIR, bitki hastalıklarının erken teşhisi ve yönetiminde güçlü bir araç olarak öne çıkar. Bitki hastalıkları ve patojenler nedeniyle meydana gelen Vis-NIR yansıma spektrumlarındaki değişiklikler, etkilenen dokulardaki kimyasal bileşenlerin bozulması ve çeşitlenmesi ile ilişkilidir.

Birçok çalışma, bitki hastalıklarını erken aşamada tespit etmek ve izlemek için Vis-NIR spektroskopisi tekniğinden faydalanmıştır. Bu hastalıklar arasında buğdayda külleme hastalığı (*Erysiphe graminis*) (Zhang ve ark., 2012), şeker pancarında *Cercospora* yaprak lekesi hastalığı (*Cercospora beticola*), şeker pancarı pası (*Uromyces betae*) ve külleme hastalığı (*Erysiphe betae*) (Mahlein ve ark., 2013), avokadoda *Phytophthora* kök çürüklüğü (*Phytophthora cinnamomi*) (Abdulridha ve ark., 2016), yaban mersininde pas hastalığı (*Austropuccinia psidii*) (Heim ve ark., 2018), soya fasülyesinde ani ölüm sendromu hastalığı (*Fusarium virguliforme*) (Herrmann ve ark., 2018), altın çilek (*Physalis peruviana* L.) bitkisinde *Fusarium* solgunluğu (*Fusarium oxysporum* f.sp. *physali*) (Giraldo-Betancourt ve ark., 2020), kauçuk ağacında (*Hevea brasiliensis*) Güney Amerikan Yaprak Yanıklığı (SALB) (*Pseudocercospora ulei*) (Sterling & Melgarejo, 2020), domateslerde *Fusarium* kök ve kök boğazı çürüklüğü hastalığı (*Fusarium oxysporum*) (Marin-Ortiz ve ark., 2020), bağda külleme (*Erysiphe necator*), kara bacak ve peti hastalıkları (Pithan ve ark., 2021), *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis lycopersici* (FORL) ve *Fusarium solani* (F.S.) kaynaklı domates bitkilerinde *Fusarium* kök çürüklüğü ve vasküler solgunluk hastalıkları (Bilgili ve ark., 2023), ve biberde *Fusarium* kök ve kök boğazı çürüklük hastalığı (*Fusarium* sp.) (Karadağ ve ark., 2020) yer almaktadır. Bu çalışmalar, tarla, sera ve laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilmiş olup, yaprak, kök ve gövde gibi bitki kısımlarında spektral indeksler ve dalga boyları analiz edilerek önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 4'de Vis-NIR tekniği kullanılarak bitki hastalıklarının teşhisinde veri işleme sürecinin aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4. Vis-NIR tekniği ile bitki hastalıklarının teşhisinde veri işleme süreci.

3.1. Spektral ön işleme

Vis-NIR (Görünür Yakın Kızılötesi Yansıma Spektroskopisi), yüksek çözünürlüklü geniş bant aralıklarına sahip yüksek kapasiteli hiperspektral veri setleri oluşturur. Ancak, hiperspektral verilerde, atmosferik koşullar, sensör kalitesi ve veri toplama sürecindeki hatalar gibi çeşitli etkenlerden kaynaklı "noise" (gürültü) olarak adlandırılan istenmeyen sinyaller de oluşabilir. Bu gürültü, verinin analitik sonuçlarını olumsuz etkileyebilir ve sınıflandırma veya erken teşhis süreçlerinde yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle, ham spektral verinin işlemeye (sınıflandırma veya teşhis gibi) geçmeden önce gürültüden arındırılması kritik bir adımdır bu yüzden ham spektral veriler elde edildikten sonra, bazı spektral ön işleme tabi tutulur.

En yaygın spektral ön işleme yöntemleri arasında birinci türevler (Heim ve ark., 2018), belirli dalga boyu aralıklarında spektral ortalama alma (Abdulridha ve ark., 2016) ve dalgacık dönüşümü (Karadağ ve ark., 2020) yer almaktadır. Birinci türev (first derivative) ve ikinci türev (second derivative) gibi yöntemler, spektral veri setindeki değişimlerin daha net bir şekilde ortaya konmasını sağlar (Tablo 1). Bu yöntemler, spektrumda bulunan zayıf veya gizli özelliklerin vurgulanmasına da yardımcı olabilir. Dalgacık (wavelet) dönüşümü ise çok ölçekli analiz yaparak, veri setindeki farklı frekans bileşenlerini ayrıştırabilir ve böylece verideki gürültüyü etkili bir şekilde temizleyebilir. Ayrıca spektral bantlar arasındaki güçlü korelasyonlar, spektrumların ön işlenmesiyle minimize edilebilir (Heim ve ark., 2018). Bu işlemler, aynı zamanda süreci hızlandırır ve bazı durumlarda sınıflandırma doğruluğunu artırabilir. Ham spektrumlar, tüm spektrum boyunca dalga boyları yerine, genellikle 10 ile 40 nm aralıkları üzerinden ortalama alınarak işlenir (Abdulridha ve ark., 2016). Bu yöntemle, dalga bantlarındaki korelasyon ve gürültülerin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.

3.2. Veri indirgeme ve bant seçimi

Vis-NIR verilerinin boyutunu azaltma (dimension reduction) işlemleri de büyük önem taşımaktadır. Çok sayıda bant aralığına sahip hiperspektral veriler, yüksek boyutluluğa sahip bir veri seti oluşturur. Bu durum, iş yükünü artırırken model performansını da olumsuz etkileyebilir. Boyut azaltma yöntemleri, veri setinin daha yönetilebilir bir hale gelmesini sağlarken, aynı zamanda önemli bilgi kayıplarını da minimize etmeye çalışır. Ana bileşen analizi (PCA) gibi teknikler, veri setindeki enformasyonun büyük bir kısmını koruyarak yalnızca en kritik özelliklerin kullanılmasını sağlar (Terentev ve ark., 2022). Bu iki aşamalı yaklaşım gürültü temizleme ve boyut azaltma Vis-NIR verilerinin analitik süreçlerde daha etkili ve güvenilir bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. PCA dışında, hiperspektral veri çıkarımında tercih edilen diğer teknikler arasında türev analizi, dalgacık yöntemleri ve korelasyon grafikleri de bulunmaktadır. Korelasyon grafikleri ise değişkenler arasındaki ilişkileri görsel olarak incelemek için kullanılır.

Her hastalığa özgü farklı dalga boylarında belirli spektral bantlar bulunmaktadır. Spektrometrimin etkin kullanımında, hastalıkların teşhisinde faydalı olabilecek önemli bantların tespiti büyük önem taşır (Mahlein ve ark., 2013). Bu süreç, işlemin hızını artırmakla birlikte, bitki hastalıklarının tespit etmek amacıyla daha ekonomik sensörlerin geliştirilmesine de katkı sağlar. Tüm spektral bantların kullanılması, hastalık teşhisinde istatistiksel yöntemlerin işlem süresini uzatır (Zhang ve ark., 2012). Bitki hastalıklarının teşhisinde önemli bantların seçilmesinde çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Bunlar arasında Temel Bileşen Analizi (PCA), relief algoritması (Mahlein ve ark., 2013), ve yansıma duyarlılığı analizi (hastalıklı ve sağlıklı bitkilerin ortalama yansımaları arasındaki spektrum oranı) yer almaktadır (Sterling & Melgarejo, 2020; Pithan ve ark., 2021). Ayrıca Sterling & Melgarejo (2020), hastalıklı bitkilerin yapraklarından ortalama yansımayı sağlıklı bitkilerin yapraklarından ortalama yansıma bölerek her dalga boyu için yansıma duyarlılığını hesaplamış ve hastalığın şiddetine göre daha fazla değişim gösteren önemli dalga bantlarını tespit etmiştir. Benzer bir yaklaşım Pithan ve ark. (2021) tarafından da kullanılmıştır. Bilgili ve ark. (2023)' de Relief algoritmasını kullanarak *Fusarium* kaynaklı kök ve kök boğazı çürüklük hastalıklarının erken teşhisi için önemli spektral bantları belirlemiştir.

3.3. Spektral indisler

Spektral ön işleme sürecine ek olarak, bitki ve hastalık indisleri, farklı dalga boylarındaki spektral veriler kullanılarak çıkarılır ve bu indislerle sağlıklı ve hasta bitkilerin fizyolojik özellikleri ilişkilendirilir veya sınıflandırma için giriş verisi olarak kullanılır (Giraldo-Betancourt ve ark., 2020). Oluşturulan indislerin bazıları genel amaçlı bitki indisleri iken, bazıları ise doğrudan hastalık indisleridir. Bu indisler, farklı dalga boylarındaki bantların oranlanmasıyla elde edilir ve hastalıkların tanısında doğrudan kullanılır.

Giraldo-Betancourt ve ark. (2020), sera ortamında enfekte ettikleri Bektaş üzümü (gooseberry) bitkisinden farklı dönemlerde toplanan spektral verilerle beş farklı spektral indeks (Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Klorofil Kırmızı Kenar (ChRE), Değiştirilmiş Klorofil Emilim Oranı İndeksi (MCARI), Mavi/Yeşil İndeksi (BGI), Basit Rasyon (SR) ve Zarco ve Miller (ZM)) geliştirmişlerdir. Hastalığa özgü spektral hastalık indislerinin kullanımı, spektral verilerle şeker pancarındaki üç farklı hastalığın ayırt edilmesinde kullanılmıştır (Mahlein ve ark., 2013). Araştırmacılar, spektral hastalık indislerinin, genel spektral bitki örtüsü indislerine kıyasla hastalıklı ve sağlıklı bitkileri ayırt etmede daha başarılı sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

3.4. Modelleme ve sınıflandırma

Çeşitli istatistiksel yöntemler ve yapay zeka algoritmaları kullanılarak, spektral veriler ile hastalık şiddeti arasındaki ilişkiler modellenilebilir ve sağlıklı ile hasta bitkiler arasında ayırım yapılabilir (Abdulridha ve ark., 2020). Pearson korelasyon analizi, sağlıklı ve hasta bitkilerden ölçülen fizyolojik parametreler ile bu bitkilerin spektral verilerinden hesaplanan çeşitli indisler arasındaki ilişkileri incelemek için kullanılmıştır ve sonuçlar, özellikle NDVI ($r = 0.982$), ChRE ($r = 0.945$), MCARI ($r = 0.942$), SR ($r = 0.951$) ve ZM ($r = 0.949$) gibi bitki indislerinin yaş ağırlık ile pozitif yönde; aynı zamanda yapraklardaki hastalık ilerleme eğrisi alanı (AUDPCL) ile negatif yönde güçlü korelasyonlar (örneğin,

ChRE: $r = -0.883$, SR: $r = -0.886$) gösterdiğini ortaya koymuştur (Giraldo-Betancourt ve ark., 2020). Benzer şekilde, hastalık şiddeti ile spektral bitki örtüsü indisleri veya hastalığa duyarlı dalga boylarından türetilen farklı spektral indisler arasındaki ilişkiler de Pearson korelasyon analizi ile araştırılmıştır (Zhang ve ark., 2012; Giraldo-Betancourt ve ark., 2020; Sterling & Melgarejo, 2020). Sterling ve Melgarejo (2020) tarafından yapılan çalışmada, kauçuk yapraklarında *Pseudocercospora ulei* enfeksiyonuna karşı farklı klonlarda kullanılan spektral indislerin hastalık şiddeti ile yüksek düzeyde ilişkili olduğu gösterilmiştir; örneğin, R674/R550 ve R678/R550 indisleri hastalık şiddeti ile oldukça yüksek pozitif korelasyon ($r = 0.97-0.99$) gösterirken, NDVI ve SIPI gibi bazı indisler ise hastalık şiddeti ile yüksek düzeyde negatif korelasyon (NDVI: $r = -0.99$, SIPI: $r = -0.99$) sergilemiştir. Bu bulgular, spektral bitki örtüsü indislerinin bitki hastalıklarının tespiti ve izlenmesinde etkili bir araç olabileceğini ortaya koymaktadır.

Patojen büyümesi ile bitki kökündeki spektral yansıma arasındaki ilişkiler, korelasyon analizi kullanılarak belirlenmiştir (Marin-Ortiz ve ark., 2020). Çalışmada, *F. oxysporum* konidilerinin kökteki artışına yüksek düzeyde korelasyon gösteren beş özel bant aralığı (448–523 nm, 624–696 nm, 740–960 nm, 973–976 nm ve 992–995 nm) tespit edilmiştir. Bu dalga boyları, hastalığın asemptomatik döneminde, *F. oxysporum* ile inokule edilmiş bitkileri hem sulama stresi altındaki hem de kontrol grubu bitkilerden %100 doğrulukla ayırt etmiştir. Ayrıca, fotosentetik parametreler ile spektral yanıtlar arasındaki ilişkilere dayanarak mavi (480 ve 510 nm), yeşil (560 nm), kırmızı (650, 680, 700 ve 718 nm) ve yakın kızılötesi (750, 800 ve 950 nm) bantları kullanılarak yapılan Doğrusal Ayırma Analizi (LDA), farklı stres koşullarına maruz kalan bitkileri asemptomatik dönemde %100 başarı ile sınıflandırmıştır. Bu bulgular, *S. lycopersicum*–*F. oxysporum* patosisteminde erken hastalık tespiti konusunda önemli katkılar sağlamaktadır.

Hastalığın şiddetini spektral verilerle modelleyen birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Zhang ve ark. (2012), buğdaydaki külleme hastalığının şiddetini MLR ve PLSR teknikleri ile modellemişlerdir. Laboratuvar ortamında toplanan hiperspektral yansıma verilerinden elde edilen 32 spektral özellik (SF), hastalık şiddetiyle ilişkilendirilerek değerlendirilmiş ve PLSR modeli, yedi bileşen kullanıldığında, $R^2 = 0.80$ ve bağıl RMSE = 0.23 ile MLR modeline kıyasla daha yüksek doğrulukla sonuç vermiştir. Ayrıca, Fisher Doğrusal Ayırma Analiz (FLDA) yöntemi ile normal, hafif ve şiddetli enfekte yapraklar arasında %90'ın üzerinde sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Bu bulgular, külleme hastalığının spektral verilerle erken dönemde tespiti ve şiddet seviyelerinin ayırt edilmesinde çok bantlı uzaktan algılamanın etkili ve maliyet açısından uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Hermann ve ark. (2018), spektral veriler kullanarak kök çürüklük patojeninin varlığını tahmin etmek için doğrusal bir model (PLSR) geliştirmişlerdir. 400–2500 nm aralığında yaprak düzeyinde elde edilen yansıma verileri, PLSDA (kısmi en küçük kareler ayırım analizi) yöntemiyle analiz edilerek *F. virguliforme* inokulasyonu yapılan bitkiler ile kontrol grubu bitkileri görsel belirtiler ortaya çıkmadan önce ayırt etmede %91 doğrulukla sınıflandırma başarısı sağlamıştır. Yaprak ve tepe örtüsü düzeyinde yapılan sınıflandırma analizlerinde kalibrasyon, çapraz doğrulama ve doğrulama aşamalarında sırasıyla %88–91, %79–87 ve %82–92 oranlarında doğruluk elde edilmiştir. Ayrıca, geç dönemde toplanan tepe örtüsü düzeyindeki verilerle yapılan PLSR analizinde soya tohumu verimi tahmini için modelin kalibrasyon, çapraz doğrulama ve bağımsız veri setiyle doğrulama R^2 değerleri sırasıyla 0.71, 0.59 ve 0.62 ($p < 0.01$) olarak rapor edilmiş, doğrulama için kök ortalama kare hata (RMSE) ise $0.31 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, spektral verilerin hem hastalık tespiti hem de verim tahmini açısından güçlü bir araç olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, hastalığa duyarlı dalga boyları kullanılarak elde edilen hastalık şiddeti ile çeşitli spektral bitki örtüsü endekslerini ilişkilendirmek için Genel Doğrusal Model (GLM) oluşturulmuştur (Sterling & Melgarejo, 2020). Modeller, hastalık şiddetini tahmin etmede oldukça yüksek başarı oranlarına ulaşmıştır. Özellikle, modeller %98–%99 doğruluk oranları ile hastalık şiddetini başarılı bir şekilde açıklamış ve düşük hata payları (RMSE) elde edilmiştir. Tüm modeller, istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar ($p < 0.0001$) sağlamış ve hastalık şiddetini doğru bir şekilde tahmin etme konusunda yüksek performans göstermiştir.

Bilgili ve ark. (2023) çalışmasında, spektrometre kullanılarak, *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis lycopersici* (FORL) ve *Fusarium solani* (F.S.) enfeksiyonları ile hastalanmış domates bitkilerinin hiperspektral yansıması incelenmiştir. Çalışmada, normal ve *Fusarium* (FORL ve F.S.)-enfekte domates bitkilerinin, büyüme odasında farklı hastalık evrelerinde (enfeksiyon sonrası 3, 10, 16, 23, 31 ve 37. günlerde) spektrometre kullanılarak hiperspektral yansıması incelenmiş ve bu yöntem,

hastalıkların erken tespiti ve sınıflandırılması için geleneksel yöntemlere alternatif olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, ham spektrumlar, RELIEF algoritmasıyla elde edilen önemli dalga boyları ve ham spektrumlardan çıkarılan çeşitli istatistiksel özellikler, sağlıklı ve enfekte bitkileri sınıflandırmak için karar ağacı, kübik destek vektör makinesi (SVM) ve k-en yakın komşu (KNN) modelleri gibi üç farklı sınıflandırma algoritması kullanılarak analiz edilmiştir. Hastalığın farklı evrelerinde, FORL ve F.S.-enfekte bitkileri sağlıklı bitkilerden ayırt etmek için en etkili spektral dalga boyları sırasıyla 508, 711, 540, 717, 536, 644 nm ve 705, 1883, 525, 518, 444, 522 nm olarak belirlenmiştir. FORL, bitkilerde genel stres oluştururken, F.S. da negatif bir fizyolojik etki göstermiştir. Çalışma, hastalıkların erken tespiti ve sınıflandırılmasında spektral verilerle başarılı sonuçlar elde etmiştir. En yüksek başarı oranı, enfeksiyon sonrası 3. günde elde edilmiştir ve sınıflandırma doğruluğu %90'ın üzerinde olmuştur. Spektral verilere ait istatistiksel parametreler kullanılarak yapılan sınıflandırmalar, diğer yöntemlere göre daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır.

Sivaganesh ve ark. (2025) domates bitkilerinde *Fusarium* solgunluğu hastalığını erken tespit etmek amacıyla hiperspektral veriler kullanılmıştır. Çalışma, Hindistan'ın Tumakuru bölgesindeki sağlıklı ve enfekte bitkilerden alınan in-situ (yerinde) yansıma spektrumlarını inceleyerek, hastalıklı ve sağlıklı bitkileri spektral olarak ayırt etmek için makine öğrenmesi, istatistiksel ve spektral eşleşme yöntemleri dahil olmak üzere toplam 9 farklı modeli kullanmıştır. Bu modellerin kullanılmasıyla hastalık şiddeti seviyelerinin doğruluğu yaklaşık %80 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, farklı hastalık şiddeti seviyelerinde sağlıklı ve hastalıklı bitkiler arasındaki spektral farkları ortaya koymuştur. Ancak, tüm hastalık seviyelerinin spektral olarak belirlenemediği ve hastalığın görünür belirtiler göstermeyen bitkilerde tespitinin daha zorlu olduğu belirtilmiştir. Çalışma, doğru yöntem kombinasyonları ve hastalık şiddeti ile hiperspektral verilerin, domateslerde *Fusarium* solgunluğu hastalığının büyük ölçekli haritalanmasının mümkün olabileceğini göstermektedir.

Papazoglou ve ark. (2025) *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* (Cmm) bakterisiyle enfekte olan domates bitkilerinin erken tespiti için hiperspektral veriler kullanılmıştır. Çalışmada, Cmm ile yapay olarak inoküle edilen domates bitkileri, sıcaklık kontrollü bir odada yetiştirilmiştir. Spektroskopi kullanılarak elde edilen spektral veriler, Relief yöntemiyle analiz edilmiştir. Görünür spektrumda (mavi ve kırmızı bölgeler) 25 dalga boyu, sağlıklı ve asemptomatik enfekte domates bitkileri arasında, foliar semptomların ilk kez görünmesinden iki gün önce en yüksek istatistiksel farkları göstermiştir. Ayrıca, inoküle edilen domates fideleri, Cmm inokülasyonunun 13 gün sonrasında, yakın kızılötesi spektrumda sağlıklı bitkilerle karşılaştırıldığında farklar göstermiştir. Spektral veriler, her bir bitkide semptomların ilk kez görünmesinden önceki belirli bir süre ve inokülasyondan sonraki belirli bir süre için, sağlıklı ve inoküle edilmiş asemptomatik bitkilerin erken tespit modellerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Bu modeller, iki farklı makine öğrenmesi algoritması (SVM ve kNN) kullanılarak oluşturulmuş ve her iki durumda da etkili sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, algoritmaların eğitilmesinden önce çok boyutluluk durumu, PCA (ana bileşenler analizi) uygulaması ve Relief yöntemi gibi üç farklı veri işleme yöntemi uygulanmıştır. Son olarak, Cmm ile asemptomatik inoküle edilmiş ve sağlıklı domates fidelerinin spektral verilerini içeren altı model oluşturulmuş ve bu modellerin hepsi %92 ile %100 arasında çok yüksek doğruluk oranları göstermiştir.

Ong ve ark. (2025) şeker kamışı hastalıklarının tanınmasını iyileştirmek amacıyla, görünür ve yakın kızılötesi (Vis-NIR) spektroskopisi ile kemometrik yöntemleri birleştirilmiştir. Çalışmada, şeker kamışı hastalıklarını tanımda karşılaşılan zorluk olan ilgili spektral özelliklerin çıkarılması sorununu aşmak amacıyla, sürekli dalgacık dönüşümü (CWT) ve konvolüsyonel sinir ağı (CNN) yöntemleri birleştirilmiştir. Bu yöntemler, Vis-NIR spektrumları (380-1400 nm) içindeki spektral özellikleri çıkararak, şeker kamışı hastalıklarının tanınmasındaki doğruluğu artırmayı hedeflemiştir. Çalışmada, 130 şeker kamışı yaprağı örneği kullanılarak, Vis-NIR spektrumlarından elde edilen bir boyutlu sürekli dalgalet dönüşümü (CWT) katsayıları iki boyutlu spektrogramlara dönüştürülmüştür. Bu spektrogramlardan özellikler çıkarılmış ve karar ağacı, k-en yakın komşu, kısmi en küçük kareler diskriminant analizi ve rastgele orman (RF) kalibrasyon modellerine entegre edilmiştir. RF modeli, spektrogramdan türetilen özellikleri birleştirerek en iyi performansı sergilemiş, ortalama doğruluk %94.87, hassasiyet %97.33, özgüllük %97.91 ve precision (kesinlik) %91.11 olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, şeker kamışı hastalıklarının tespitinde hızlı, doğru ve tahribatsız bir yöntem sunarak, çiftçilere zamanında ve eyleme dönük bilgiler sağlamakta, böylece ürün kaybını en aza indirip verimliliği optimize etmeyi mümkün kılmaktadır.

Genel olarak, sağlıklı ve hasta bitkiler arasındaki ayrımları spektral verilere dayalı olarak yapmak için çeşitli sınıflandırma yöntemleri uygulanmıştır. Çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak, sınıflandırma doğrulukları yüksek seviyelere ulaşmıştır. Sağlıklı ve hasta bitkilerin sınıflandırılmasında kullanılan modellerin doğruluğunu test etmek için çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Veri setinin sınırlı olduğu durumlarda n-out çapraz doğrulama tercih edilir (Zhang ve ark., 2012), yeterli veriye sahip çalışmalarda ise bağımsız doğrulama test setleri kullanılır. Bağımsız test veri setlerinde, tüm veri seti ikiye ayrılır: bir set kalibrasyon için, diğer set ise doğrulama için kullanılır (Herrmann ve ark., 2018). Bunun yanında Herrmann ve ark. (2018), veri setini %70 kalibrasyon ve geri kalanını doğrulama veri seti olarak kullanarak soya fasulyesinde ani ölüm sendromunun spektral verilerle teşhis edilmesinde başarılı olmuşlar, sağlıklı ve hastalıklı bitkilerin sınıflandırma doğruluğunu test etmişlerdir. Ancak, sınıflandırma başarısı, hastalık türüne, kullanılan makine öğrenmesi tekniklerine, sınıflandırma modeline dahil edilen verilere, spektral verilerin ve ölçüm türünün (yaprak veya gölgelik) elde edildiği çevresel koşullara ve hastalığın şiddeti ile süresine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Bilgili ve ark., 2023).

Heim ve ark. (2018), rastgele orman sınıflandırma yöntemi ile limon ağaçları üzerinde hastalıklı, sağlıklı ve fungusit uygulanmış bitkiler için %79'luk bir genel başarı oranı elde etmişlerdir. Aynı çalışmada, spektrumların ilk türevini alarak başarı oranını %95'e çıkarmışlardır. Soya fasulyesinde ani ölüm sendromunun erken teşhisinde yapılan bir çalışmada, tarla koşullarında yapılan yaprak ve kanopi ölçümleri arasında yaprak ölçümleri çapraz doğrulama (%79'a karşı %87) ve bağımsız doğrulamada (%82'ye karşı %92) kanopi ölçümlerinden daha başarılı sonuçlar vermiştir (Herrmann ve ark., 2018). Şeker pancarındaki hastalık şiddetinin arttığı bir çalışmada, spektral verilerle sağlıklı ve hasta bitkilerin ayırt edilmesindeki sınıflandırma hatası, hastalık şiddeti ile paralel olarak (%1-2'den %30'a) azalmıştır (%52.1'den %5.8'e) (Mahlein ve ark., 2013).

Zhang ve ark. (2012), buğdayda külleme hastalığında (sağlıklı, az hastalıklı ve çok hastalıklı) farklı hastalık seviyeleri arasında yapılan spektral analizlerde, en yüksek ayırım gücünü çok hastalıklı yapraklarda elde etmişlerdir. Pithan ve ark. (2021), asma bitkisindeki dört farklı hastalığın sınıflandırılmasında %94.3'lük bir başarı oranına ulaşmışlardır. Araştırmacılar, tüm spektrum yerine sekiz farklı spektrum kullanarak daha başarılı bir sonuç elde etmişlerdir. Bu bulguya benzer şekilde, Zhang ve ark. (2012) sınıflandırma doğruluğunun, sınıflandırmaya daha fazla spektral değişken eklenmesiyle azaldığını göstermiştir. Marin-Ortiz ve ark. (2020), *Fusarium* kök çürüklük hastalığıyla enfekte olmuş ve su stresine maruz kalmış bitkilerle yapılan bir çalışmada, doğrusal ayırıcı analiz ve bitki yansımalarını bir arada kullanarak %100 sınıflandırma doğruluğu elde etmişlerdir. Ayrıca, avokado bitkilerindeki defne solgunluğu (*Raffaelea lauricola*) ve *Phytophthora* kök boğazı çürüklük hastalıkları için üç farklı sınıflandırma tekniği (Adımsal ayırıcı; stepwise discriminant, Çok katmanlı algılayıcı; Multilayer Perceptron; Radyal baz fonksiyonu; RBF) ile yapılan çalışmada, hastalığın erken evrelerinde en yüksek doğruluk (%90'ın üzerinde) çok katmanlı algılayıcı tekniğiyle elde edilmiştir (Abdulridha ve ark., 2016).

4. Sonuç

Spektrometrik yöntemlerle toplanan spektral veriler kullanılarak bitki hastalıkları başarıyla teşhis edilebilir. Bitki ve hastalık türü, kullanılan sınıflandırma tekniği, çalışma ortamı, kullanılan spektral aralık veya spektral ön işlem ne olursa olsun, önceki çalışmalar çok yüksek başarı oranları bildirmiştir. Elde edilen başarılı sonuçlarda, kontrollü koşullar altında yüksek çözünürlüklü spektrometreler kullanılarak bitkiyle doğrudan temas yoluyla elde edilen veriler önemli rol oynar. Bu nedenle, elde edilen yüksek başarı oranları oldukça iyimser görünebilir.

Kontrollü koşullar altında elde edilen başarılı sonuçlar, saha koşullarında test edilmeli ve tekniğin geçerliliği gösterilmelidir. Belirli bitki hastalıklarının teşhisinde yararlı olduğu bildirilen spektral bantların, drone benzeri ekipmanlara entegre edilerek gerçek saha koşullarında test edilmesi çok önemlidir.

Vis-NIR tekniğinin hız, tahribatsızlık, kolay ve doğru sonuçlar gibi avantajları olabilir. Ancak tekniğin bazı dezavantajları da olabilir; örneğin, bazı bitki hastalıklarında doğru sonuçlar elde etmek için, hastalığın şiddetinin bitkiyi belirli bir oranda kaplaması gerekebilir veya kuraklık veya azot eksikliği gibi sorunlar, saha koşullarında hastalıklarla benzer spektral sonuçlar üretebilir. Bu tür sorunlar, yöntemin kullanımını sınırlayabilir.

Teşekkür

Bu çalışmanın hazırlanmasında teknik destek ve şekil tasarımına katkı sağlayan Hakan BİLGİLİ'ye teşekkür ederim.

Kaynakça

- Abdulridha, J., Ehsani, R., & De Castro, A. (2016). Detection and differentiation between laurel wilt disease, *Phytophthora* Disease, and salinity damage using a hyperspectral sensing technique. *Agriculture*, 6(4), 56. <https://doi.org/10.3390/agriculture6040056>
- Abdulridha, J., Ampatzidis, Y., Roberts, P., & Kakarla, S.C. (2020). Detecting powdery mildew disease in squash at different stages using UAV-based hyperspectral imaging and artificial intelligence, *Biosystems Engineering*, 197, 135-148. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.07.001>
- Başayığit, L., & Dedeoğlu, M. (2012). Elma ağaçlarında çinko noksanlığının görünür yakın kızılötesi (VNIR) spektroskopik yöntemle belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2, 64-67.
- Bilgili, A.V., Karadağ, K., Tenekeci, M. E., & Bilgili, A. (2018). Determination of plant diseases with combined use of spectral reflectance and machine learning techniques; a case study for *Fusarium* spp. on pepper. In: Baspinar H (Eds.) *International VII. Plant Protection Congress Full Text Book*. Turkey, (pp 115-121). MOTTO Press. <https://motto.tc/siteler/www.bitkikoruma2018.com/gorseller/files/Tam-metin-bildiri-kitabi-03.12.18.pdf>
- Bilgili, A., Bilgili, A. V., Tenekeci, M. E., & Karadağ, K. (2023). Spectral characterization and classification of two different crown root rot and vascular wilt diseases (*fusarium oxysporum* f.sp. *radicis lycopersici* and *fusarium solani*) in tomato plants using different machine learning algorithms. *European Journal of Plant Pathology*, 165, 271-286. <https://doi.org/10.1007/s10658-022-02605-8>
- Dedeoğlu, M., & Başayığit, L. (2013). Kiraz ağaçlarında çinko noksanlığının spektral türev eğrileri ile belirlenebilirliği. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 6(1), 26-29.
- Farber, C., Mahnke, M., Sanchez, L., & Kourouski, D. (2019). Advanced spectroscopic techniques for plant disease diagnostics. A review, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 43-49, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.05.022>
- Giraldo-Betancourt, Velandia-Sanchez, E. A., Fischer, G., Gomez-Caro, S., & Martinez, L. J. (2020). Hyperspectral response of capre gooseberry (*Physalis peruviana* L.) plants inoculated with *Fusarium oxysporum* f.sp. *physali* for vascular wilt detection. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 14, 301-313. Doi: <https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i3.10938>
- Heim, R. H. J., Wright, I. J., Chang, H. C., Camegie, A. J., Pegg, G. S., Lancaster, E. K., Falster, D. S., & Oldeland, J. (2018). Detecting myrtle rust (*Austropuccinia psidii*) on lemon myrtle trees using spectral signatures and machine learning. *Plant Pathology*, 67, 5, 1114-1121. <https://doi.org/10.1111/ppa.12830>
- Herrmann, I., Vosberg, S. K., Radindran, P., Singh, A., Chang, H. X., Chilvers, M. I., Conley, S. P., & Townsend, P. A. (2018). Leaf and canopy level detection of *Fusarium virguliforme* (sudden death syndrome) in soybean. *Remote Sensing*, 10(3), 426. <https://doi.org/10.3390/rs10030426>
- Karadağ, K., Tenekeci, M. E., Taşaltın, R., & Bilgili, A. (2020). Detection of pepper *Fusarium* disease using machine learning algorithms based on spectral reflectance. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100299. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2019.01.001>
- Khaled, A.Y., Abd Aziz, S., Bejo, S.K., Nawi, N.M., Seman, I.A. & Onwude, D.I. (2017). Early detection of diseases in plant tissue using spectroscopy – Applications and limitations, *Applied Spectroscopy Reviews*. <https://doi.org/10.1080/05704928.2017.1352510>
- Mahlein, K. A., Rumpf, T., Welke, P., Dehne, H. W., Plümer, L., Steiner, U., & Oerke, E. C. (2013). Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*, 128, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.019>
- Marin-Ortiz, J. C., Gutierrez-Toro, N., Botero-Fernandez, V., & Hoyos-Carvajal, L. M. (2020). Linking physiological parameters with visible/near-infrared leaf reflectance in the incubation period of vascular wilt disease. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1), 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.007>

- Ong, P., Jian, J., Li, X., Zou, C., Yin, J., & Ma, G. (2025). Sugarcane disease recognition through visible and near-infrared spectroscopy using deep learning assisted continuous wavelet transform-based spectrogram. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 324, 125001. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125001>
- Papazoglou, P., Navrozidis, I., Testempasis, S., Pantazi, X. E., Lagopodi, A., & Alexandridis, T. (2025). Early detection of bacterial canker in tomato plants using spectroscopy for smart agriculture applications. *Biosystems Engineering*, 251, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.01.009>
- Pithan, A. P., Ducati, R. J., Garrido, L. R., Arruda, D. C., Thum, A. B., & Hoff, R. (2021). Spectral characterization of fungal diseases downy mildew, powdery mildew, black-foot and petri disease on *Vitis vinifera* leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 42(15), 5680-5697. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1929542>
- Sivaganesh, C. H., Nidamanuri, R. R., Sharathchandra, R. G., & Narayanan, P. (2025). Hyperspectral detection and differentiation of various levels of *Fusarium* wilt in tomato crop using machine learning and statistical approaches. *Journal of Crop Health*, 77, 42. <https://doi.org/10.1007/s10343-024-01100-w>
- Sterling, A., & Melgarejo, L. M. (2020). Leaf spectral reflectance of *Hevea brasiliensis* in response to *Pseudocercospora ulei*. *European Journal of Plant Pathology*, 156, 1063-1076. <https://doi.org/10.1007/s10343-024-01100-w>
- Terentev, A., Dolzhenko, V., Fedotov, A., & Eremenko, D. (2022). Current state of hyperspectral remote sensing for early plant disease detection: A review. *Sensors*, 22, 757. <https://doi.org/10.3390/s22030757>
- Wan, L., Li, H., Li, C., Wang, A., Yang, Y., & Wang, P. (2022). Hyperspectral sensing of plant diseases: Principle and methods. *Agronomy*, 12(6), 1451. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061451>
- Zhang, J. C., Pu, R. L., Wang, J. H., Huang, W. J., Yuan, L., & Luo, J. H. (2012). Detecting powdery mildew of winter wheat using leaf level hyperspectral measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*, 85, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.006>