



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.11.2023
Kabul Tarihi : 05.01.2024

Received Date : 30.11.2023
Accepted Date : 05.01.2024

MULTİSPEKTRAL VE HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİNİN MEYVE - SEBZE İŞLEME TESİSLERİNDE KULLANIM OLANAKLARI

POTENTIALS OF MULTISPECTRAL AND HYPERSPECTRAL IMAGING TECHNIQUES IN FRUIT AND VEGETABLE PROCESSING PLANTS

Özgür Neşe ÖZEN¹ (ORCID: 0009-0008-3192-5272)

Fatih AKKOYUN² (ORCID: 0000-0002-1432-8926)

Ahmet GÖRGÜÇ³ (ORCID: 0000-0003-3018-4595)

Fatih Mehmet YILMAZ^{3*} (ORCID: 0000-0002-1370-1231)

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Aydın, Türkiye

² İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

³ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Aydın, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Fatih Mehmet YILMAZ, fatih.yilmaz@adu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada ileri görüntüleme tekniklerinden olan multispektral görüntüleme ve hiperspektral görüntülemenin meyve ve sebze endüstrisinde kullanım olanakları derlenmiştir. Multispektral görüntüleme ve hiperspektral görüntüleme teknikleri; meyve sebzeleri sınıflandırma, olgunluğa göre sıralama, kusurlu ürün ayırma, kuraklık ölçümü yapma, hasat zamanını belirleme gibi birçok uygulamada teşhis ve müdahale amacıyla kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda multispektral görüntülemenin görünür ve yakın dalga boylarında gıdaların sınıflandırılması amacıyla kullanıldığında yüksek oranda başarılı olduğu görülmüştür. Hiperspektral görüntülemeye ise meyve ve sebzelerde renk, sıklık, asitlik, şeker, antioksidan madde miktarı, toplam çözünür kuru madde miktarını belirlemek gibi spesifik durumların yanında olgunluk, fizyolojik bozukluk, mekanik hasar, duysal kalite, biyolojik kusur gibi kalite parametrelerinin belirlenmesi amacıyla da kullanıldığı görülmüş ve yüksek oranlarda başarılar elde edilmiştir. Bu görüntüleme teknikleri diğer sınıflandırma yöntemlerine kıyasla hızlı sonuç veren, çevreye duyarlı, meyve ve sebzelerde tahribat yaratmayan yöntemlerdir.

Anahtar Kelimeler: İleri görüntüleme teknikleri, meyve kalitesi, meyve sınıflandırma, tayflı kameralar, tahribatsız ölçüm

ABSTRACT

In this study, the potentials of advanced imaging techniques, *i.e.*, multispectral imaging and hyperspectral imaging, in the fruit and vegetable industry were reviewed. Multispectral imaging and hyperspectral imaging techniques are used for diagnosis and intervention in many applications, such as classifying fruits and vegetables, sorting them according to maturity, separating defective products, measuring drought, and determining harvest time. In experimental studies, multispectral imaging has been shown to be successful when used for classification at visible and near wavelengths. In hyperspectral imaging, it has been seen that it is used to determine specific conditions such as color, firmness, acidity, sugar, antioxidant compound amount, total soluble solids in fruits and vegetables, as well as quality parameters such as ripeness, physiological disorder, mechanical damage, sensory quality, biological defect, and has high levels success rates have been achieved. These imaging techniques provide faster results compared to other classification methods and are environmentally friendly and nondestructive to fruits and vegetables.

Keywords: Advanced imaging techniques, fruit quality, fruit sorting, spectrum cameras, non-destructive measurement

ToCite: ÖZEN, Ö. N., AKKOYUN, F., GÖRGÜÇ, A. & YILMAZ, F. M., (2024). MULTİSPEKTRAL VE HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİNİN MEYVE - SEBZE İŞLEME TESİSLERİNDE KULLANIM OLANAKLARI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 643-656.

GİRİŞ

Multi/hiperspektral görüntüleme teknolojisi geleneksel görüntüleme ve tayf ölçümünün bir arada yapılmasıyla, alansal ve tayfsal bilginin nesnelere elde edilmesidir (Li vd., 2013). Bu teknolojinin sağlık, savunma, gıda ve tarım alanları gibi birçok uygulamada kullanımı bulunmaktadır. Multi/hiperspektral görüntüleme uygulamalarında nesnelere farklı açılardan görüntülenerek iki ve üç boyutlu olarak incelenebilmektedir. Bu görüntüler birçok alanda durum tespiti, gelişim takibi, tanı ve tedaviyle ilgili değerli bilgileri barındırmaktadır (Ebner vd., 2023). Bunun yanında görünür ötesinde dalga boylarının da incelenmesiyle görünür ışıkta teşhis edilemeyen sıra dışı durumların da izlenmesi mümkün olmaktadır (Oberti vd., 2016). Spektral görüntüleme çalışmalarında standart siyah beyaz/renkli (BW/RGB) kameralar, çok tayflı (multispektral) kameralar ve hiper tayflı (hyperspektral) kameralar kullanılmaktadır. Ticari kapsamda bulunan görüntüleme çözümleri, çoğunlukla görünür ışık bandında ölçüm yapan cihazlardan oluşmaktadır. Bu cihazlarla sadece üç spektral bant (RGB) ölçümü mümkün olmakta dolayısıyla özellikle mor ötesi ve kızıl ötesi bantlarında reflektansı olan nesnelere incelenmesi kısıtlı kalmaktadır (Li vd., 2018a). Elektromanyetik dalga boylarının nesnelere üzerinde yansımaları farklı tayflarda, farklı ışık yoğunluğunda meydana gelmektedir. Nesnelere yansıyan farklı ışık tayfları görüntülenerek, görünür ötesinde inceleme yapılmasını; örneğin, insan derisinin altında bulunan yapıların takibini mümkün kılmaktadır. Bu yansımalarından daha fazla dalga boyu kullanılarak kıyaslamalar yapıldığında, nesnelere daha isabetli bir biçimde incelenmesi mümkün hale gelmektedir. Bu işleme sahip tayfsal ölçüm cihazları, sağlık, tarım ve savunma alanlarındaki araştırmalar için oldukça önemli olup, farklı dalga boylarında ölçümler üzerinden birçok yeni sonuç elde edilebilmektedir (Montembeault vd., 2010; Ortega vd., 2020).

Taze meyve ve sebzelerde kusura sebep olabilecek pek çok faktör vardır. Meyve ve sebzelerde oluşan kusurlar özellikle hasat sırasında, meyve ve sebzelerin işlenmesi sırasında, taşıma, depolama ve pazarlama sırasında oluşmaktadır (Tang, Zhang ve Mujumdar, 2022; Du vd., 2020; Wang vd., 2016). Meyve sebzelere uygulanan ön işlemler; soyma, kesme veya dilimleme, yıkama, tartım ve paketlemedir. Bu ön işlemler sırasında meyve sebzelerde mekanik yaralanmalar oluşabilmekte ve kesme yüzeyinde renk değişikliği, doku kaybı, yumuşama, su kaybı, mikroorganizmaların hızlı büyümesi, aroma kaybı ve istenmeyen uçucuların oluşmasına sebep olmaktadır. Su, hava, toprak, ekipman ve işçilerin uygunsuz çalışması, taze kesilmiş ürünlerin güvenliğini etkileyebilmektedir (Tang, Zhang ve Mujumdar, 2022). Oluşan bu kusurlar meyve ve sebzelerin şeker içeriği ve asit içeriğini etkilediği için duyu kalitesini bozar. Sonunda ürünün ticari olarak değerinin azalmasına sebep olur, bu da etkilenen ürünlerin fermentasyona, çürümeye veya küflenmeye karşı savunmasız olması ve depolama sırasında diğer sağlıklı ürünleri enfekte etmesi nedeniyle potansiyel gıda güvenliği sorunlarına neden olur (Du vd., 2020).

Tüketiciler her zaman yüksek güvenliğe ve kaliteye sahip ürünler talep etmektedir. Doğru, hızlı ve objektif kalite kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, gıda endüstrisinde tüm gıda prosesi sırasında önem arz etmektedir (Wu ve Sun, 2013). Kalite kontrol sınıflandırmalarında el ile ayıklama ve insan görsel muayenesi hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak birim zamanda ayrılacak ürün miktarı çok fazla olması ve bu durum yapan kişinin yorgunluğuna, psikolojik durumuna göre değişiklik gösterdiği gibi, zaman alıcı, zahmetli, sıkıcı ve tutarsızdır (Wu ve Sun, 2013; Cömert, Hekim ve Kemal, 2019; Munera vd., 2021). Meyve ayıklama işlemlerinde personel hatası veya kriterlerin belirsizliği ayıklama oranını düşürebilir. Meyve ve sebzeleri ayıklamada bu olumsuz faktörler otomatik denetim sistemleri kullanılarak ortadan kaldırılabilmektedir (Munera vd., 2021). Geleneksel tekniklerden olan duyu değerlendirme, enstrümantal ve fizikokimyasal analizlerin sistemi iyi kurulmuş olsa da bu yöntemler numuneye zarar vermekte, uğraştırıcı ve sonuç alma işlemi uzun sürmektedir. Ayrıca geleneksel teknikler meyve ve sebzelerde kalite hakkında bilgi verirken çürüklerin yerini ve dağılımını belirleyemez (Wu ve Sun, 2013).

Birçok sınıflandırma çalışmasında insan hatasını en aza indiren, temassız, tahribatsız ölçüm imkânı tanıması nedeniyle ihtiyaç duyulan spektral görüntüleme teknikleri günümüzde gıdaların sınıflandırılmasında daha da ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada meyve ve sebzeleri sınıflandırmak ve hızlı bir şekilde analiz yapmak için kullanılan spektral yöntemlerden multispektral görüntüleme ve hiperspektral görüntüleme teknikleri incelenmiş ve son dönemde bunlarla ilgili yapılan çalışmalar derlenmiş, sonuçları ve başarı oranları sunulmuştur.

GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİ

Spektral Görüntüleme

Spektral görüntüleme 1980'lerde geliştirilen ve düzlemsel görüntüleme teknolojisi ile tayf teknolojisini organik olarak birleştiren yeni bir teknolojidir. Hiperspektral görüntüleme teknolojisi, birbirine yakın çok sayıda tayf bandı sayesinde yüksek tayf çözünürlüğüne ve alansal çözünürlük özelliklerine sahiptir. Bu bağlamda 1983 yılında, Jet Tahrik Laboratuvarı tarafından ilk hava görüntüleme spektrometresi geliştirilmiş ve görüntü elde etme ve analizi konusunda büyük potansiyel ortaya çıkmıştır. Tam anlamıyla "optik spektrum" olarak adlandırılan spektrum, ışığın optik sistemler aracılığıyla bölünmesinden sonra oluşan sıralı monokromatik ışıktan oluşmaktadır. Bu yapı tayf görüntüleme tekniğinin temelini teşkil etmektedir (Chen, Lin ve Zhao., 2021).

Geleneksel olan optik görüntüleme yöntemleriyle monokrom (BW) ya da renkli (RGB) görüntüler elde edilmektedir. Bu görüntülerde genellikle hedeflenen boyut, şekil, yüzey örüntüsü gibi alansal özelliklerin incelenmesidir. BW ve RGB görüntüleme yöntemlerinin nesnelerin iç yapılarının gözlemlenmesindeki kısıtları bilinmektedir, Yüzeysel görüntülerden elde edilen sonuçlar, nesnelerin iç yapılarını tanımlama, gözleme ve analiz etmede yetersiz kalmaktadır (Gracia-Romero vd., 2018; Yaqoob, Sharma ve Aggarwal, 2021). Tayf ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan diğer bir optik yöntem ise spektroskopidir. Görünür ve ötesi dalga boylarında verilerin elde edilmesinde kullanılan bu yöntem tüm spektrumun noktasal ölçümle elde edilmesini sağlamaktadır (Gao ve Smith, 2015). Noktasal ölçüm olarak da bilinen spektroskopi nesnelerin alansal bilgilerini sunmamaktadır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak multi/hiperspektral görüntüleme yöntemleri, gözlemlenen her bir piksel için tüm spektrumda istenilen spektral aralıktaki dalga boyunu yakalayabilmektedir. Bu özellik nesnelerin sadece fiziksel yapılarının incelenmesinden ziyade yansıma ya da geçirgenliğe bağlı olarak kimyasal ve biyolojik durumlarının da incelenmesini mümkün kılmaktadır (Ebner vd., 2023).

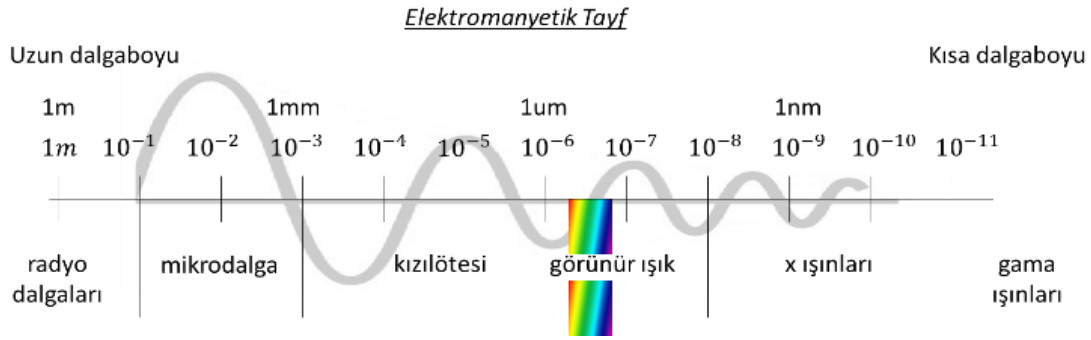
Tablo 1. Monokrom, RGB, Spektroskopi, Multispektral ve Hiperspektral Ölçümlerin Kıyaslanması

Özellik	Monokrom	RGB	Spektroskopi	Multispektral	Hiperspektral
Uzamsal bilgi	Var	Var	Yok	Var	Var
Bant sayısı	1	3	30 – 100	3 – 10	30 – 100
Tayf bilgisi	Yok	Yok	Var	Sınırlı	Var

Görünür ötesi dalga boyları görünür ışık yansımalarından daha farklı, daha geniş bir bilgi kaynakları barındırmakta ve bu sayede uygulamalarda tanı, teşhis, takip ve analiz fırsatlarını sunmaktadır. Tablo 1'de spektral görüntüleme (multi/hiper) yöntemlerinin geleneksel monokrom, RGB ve spektroskopi yöntemlerine kıyasla avantajları sunulmuştur. Multi/hiperspektral görüntülerin geleneksel yöntemlerden daha fazla bilgiyi sunduğu görülmektedir. Bu görüntüler alansal verinin tayf verileriyle birlikte kullanılarak değerlendirme ve sınıflandırma aşamalarında daha iyi sonuçlar oluşturmaktadır. Bu nedenlerle spektral görüntüleme yönteminin birçok alanda kullanımı mümkün hale gelmektedir (Li vd., 2020).

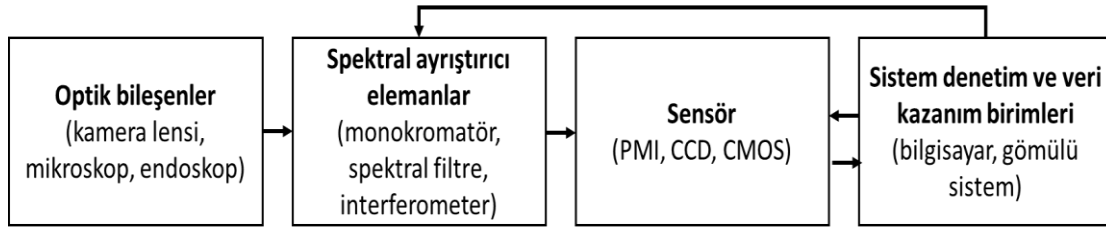
Sınıflandırma süreçlerinde insanın hata yapma olasılığının yüksek olması sebebiyle bu hataların önüne geçilebilmesi için kullanılacak en önemli unsurlardan biri makine görüşüdür (Lorente vd., 2012). Spektral görüntüleme, görüntü elde etme, görüntüleme, işleme ve analiz yorumlama için çeşitli bantlardaki hedef nesnelerin ışığı soğurma oranlarının spektral kanallarını kullanan bir teknolojidir. Bir pikselin karakterize edilmesiyle elde edilen spektrumlar görüntü analizini spektral analiz ile birleştirir. Elde edilen görüntü ile meyve ve sebzelerin iç yapısının özellikleri, kompozisyon içeriği ve diğer bilgileri yansıtmak için boyutunu, şeklini ve rengini görünüm özelliklerini kullanarak spektral bilgileri ile açıklar. Bu nedenle, spektral görüntüleme teknolojisi, gıda ve tarım ürünlerinin iç ve dış kalite özelliklerini görselleştirebilir. Ayrıca gıda ve tarım ürünlerinin kalite ve güvenlik tespitinde benzersiz avantajlara sahiptir (Chen, Lin ve Zhao, 2021; Lorente vd., 2012).

Spektrum genel olarak ultraviyole (UV), görünür ve kızılötesi bantlara ayrılabilir. Hiperspektral görüntüleme ve multispektral görüntüleme ile ilgili çalışmalar Şekil 1'de görülen elektromanyetik spektrum bölgelerinden UV, görünür ışık ve kızılötesi ışınlar bölgesinde gerçekleştirilmektedir. Bunlar arasında 400nm'nin altı UV, 400 - 780 nm görünür ışık, 780 - 2500 nm yakın kızılötesi (NIR), 2500 - 5600 nm orta kızılötesi, 5600 - 15000 nm uzak kızılötesi ışık ve 15000 - 100000 nm çok uzak kızılötesi ışık vardır (Chen, Lin ve Zhao, 2021; Güzel ve Özlüoymak, 2015).



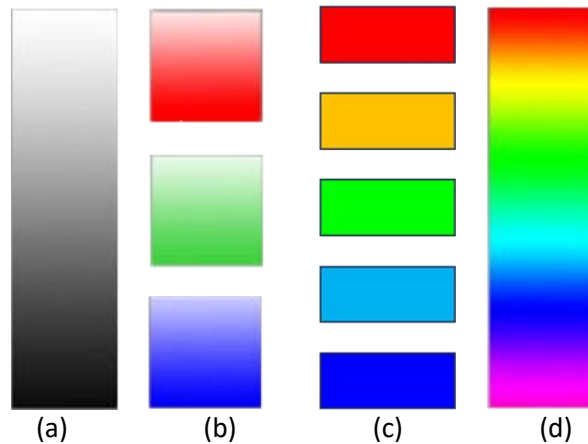
Şekil 1. Elektromanyetik Spektrum Bölgeleri

Son yıllarda, görüntüleme teknolojisi, özellikle bütün meyve ve sebzelerin kalite tespiti için yüksek verimlilik, hızlı ve tahribatsız avantajları nedeniyle araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. Sınıflandırma, tanıma, renk, kalite değerlendirme, derin öğrenme ve tahribatsız ölçüm ile yakından ilişkili olan makine/bilgisayar görüşü, hiperspektral/multispektral görüntüleme de oldukça sık kullanılan bir tekniktir. Spektral çözünürlük, bant sayısı, bantların genişliği ve sürekliliğindeki farklılığa göre, spektral görüntüleme multispektral, hiperspektral ve ultraspektral görüntüleme olarak ayrılabilir (Tang, Zhang ve Mujumdar, 2022). Multi/Hiperspektral görüntüleme sistemi Şekil 2’de görüldüğü gibi optik bileşenler, ışık ayrıştırıcıları, sensör ve verileri elde etmeyi ve depolamayı sağlayan bir denetim biriminden oluşur (Hashim, Onwude ve Osman, 2018).



Şekil 2. Multi/Hiperspektral Görüntüleme Sistemlerinin Şematik Diyagramı

Şekil 3’te siyah beyaz görüntü yakalayabilen monokrom banttan yüze yakın spektral çözünürlüğü olan hiperspektral bant kapsamları sunulmuştur. Bant sayısı arttıkça daha ayrıntılı spektrum verilerinin elde edildiği ve spektral çözünürlük bakımından daha iyi görüntülerin ortaya çıkarılabildiği Şekil 3’ten anlaşılmaktadır. Bu nedenle hiperspektral görüntüleme daha ayrıntılı veri ortaya çıkarma bakımından diğer görüntüleme yöntemlerine kıyasla ön plana çıkmaktadır.



Şekil 3. Spektral Görüntüleme Yöntemlerinde Yaygın Kullanılan Bantlar, a) Siyah Beyaz, b) Kırmızı, Yeşil ve Mavi, c) Görünür ve Yakın Kızılötesi Bantlar, d) Görünür, Morötesi ve Kızılötesi Bantlar

Multispektral Görüntüleme

Multispektral görüntüleme, çok kanallı görüntüleme teknolojisinin kısaltmasıdır. Kanalların her pikseli, kanaldaki karşılık gelen nesne noktasının spektral yansıma değeri ile orantılıysa, görüntüye multispektral görüntü adı verilir (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Spesifik olarak, multispektral görüntüleme sistemi genellikle 3 ila 20 bant veya görüntü planlarına sahip bir görüntü verebilir. Gruplar arasında süreklilik yoktur (Su ve Sun, 2018). Belirli bir ışık frekansı aralığında görüntü yakalayan geleneksel dijital kameranın aksine, multispektral görüntüleme, elektromanyetik spektrum boyunca iki veya daha fazla farklı spektral görüntüleme dalga bandında görüntü elde edilmesini sağlar (Hashim, Onwude ve Osman, 2018). Birden çok, farklı dalga boyuna sahip görüntülerden oluşan üç boyutlu veri bloğu, numunenin bileşimin, dağılımını ve yüzey dokusunu gözlemlemek ve analiz etmek için kullanılabilir. Bu durum ise teknolojiyi çevrimiçi proses izleme ve kalite kontrolü için; doğrudan veri ve düşük maliyet avantajlarıyla multispektral görüntülemeyi ideal hale getirir (Liu vd., 2015). Multispektral görüntüleme teknolojisi, jeolojik keşif, çevresel izleme, yaşam durumu gözlemi ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olan bir teknolojidir (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Li vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada iki renkli şeftalilerde multispektral yöntemle dokuz farklı kusur tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada iki renkli şeftalilerde birden fazla kusur tespit edildiğinde tek dalga boyu yeterli olmamıştır. Deney verileri incelendiğinde farklı her kusurun tespiti için farklı bir dalga boyu gerektiği görülmüştür. Çalışma kapsamında iki renkli şeftali için farklı kusurları bulunan şeftalilerin 550 nm’de hiperspektral tek bantlı görüntüleri üzerinden cilt yaralanması, yara izi, böcek hasarı, delinme yaralanması, çürüme, hastalık lekeleri, ayrık oluşumu, antraknoz kusurları hiperspektral verilerden tespit edilebilmiştir. Multispektral görüntüleme ise, iki renkli şeftalide bulunan kusurların multispektral yöntemde 425 nm-1000 nm arasındaki spektral bölge kullanılarak elde edilen görüntü verileri yardımıyla cilt yaralanması, yara izi, böcek hasarı, delinme yaralanması, çürüme, hastalık lekeleri, ayrık oluşumu, antraknoz oluşumları ENVI yazılım paketi kullanılarak incelenmiştir.

Hafifliği, donanım basitliği ve edinme hızı nedeniyle, multispektral görüntüleme için en zorlu süreç, ilgilenilen meyve sebzeleri karakterize eden belirli özellikleri temsil etmek için uygun dalga boylarını seçmektir. Bu nedenle, gıda endüstrisi için multispektral görüntülemenin temel özelliği, gıda kalitesini modellemek ve değerlendirmek için gereksiz hiperspektral görüntüler yerine süresiz multispektral görüntü verilerini kullanmaktır (Su ve Sun, 2018). Multispektral görüntüleme teknolojisi, jeolojik keşif, çevresel izleme, yaşam durumu gözlemi ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Hiperspektral görüntüleme yüzlerce bitişik spektral görüntü içerirken, multispektral görüntüleme birkaç farklı dalga boyunda görüntüler elde eder. Multispektral görüntüleme gıda ve tarım ürünlerinin yüksek hızlı çevrimiçi güvenliğini ve kalite denetimini iletme için geliştirilmiştir. Multispektral görüntüleme ile karşılaştırıldığında, hiperspektral görüntüleme daha uzun görüntü alma süresi gerektirir ve bazı durumlarda gerçek zamanlı veri toplama ve işleme için uygun olmayabilecek büyük hacimli verileri (iki uzamsal boyut ve bir spektral boyuttan oluşan üç boyutlu veriler) içerir (Siripatrawan ve Makino, 2018).

Sonuç olarak multispektral görüntülemenin avantajlarını hızlı sonuç edinme, tahribatsız analiz imkânı, çevre dostu olarak sıralayabiliriz. Bunun yanında tek dalga boyu ölçüm sistemleriyle kıyaslandığında multispektral görüntüleme sistemi sayesinde daha kapsamlı numune bilgisi alınabilir. Ayrıca hiperspektral görüntüleme sistemlerine kıyasla sistemin maliyetinin nispeten düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenlerle multispektral görüntüleme çoğu uygulama için spesifik verilerin (kusur belirleme, sınıflandırma vs.) işlenmesinde daha uygun konumda bulunmaktadır (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Şekil 4’te bir bitkinin farklı dalga boylarında reflektansları ve tam spektrum reflektansı sunulmuştur. Burada görüldüğü gibi yeşil ve sağlıklı bir bitki kırmızı ve mavi bantlarda ışığı soğurmakta ve bir miktar, yaklaşık %10 reflektansla, yeşil rengini yansıtmaktadır. Bitkilerin görünür ve yakın bantlarda ışığı soğurarak fotosentez yapması bitkinin sağlıklı olduğunun göstergelerindedir. Bu durum multispektral bir kamera üzerinden şekildeki gibi ortaya çıkarılabilmektedir (Akkoyun, 2022).



Şekil 4. Yeşil Bir Bitkinin Mavi (a), Yeşil (b) Kırmızı (c) Görünür Bantlarda, Kızılötesi Bantlarda (d-f), Tam Spektrum Reflektansı (g) ve Asıl Görüntüsü (h)

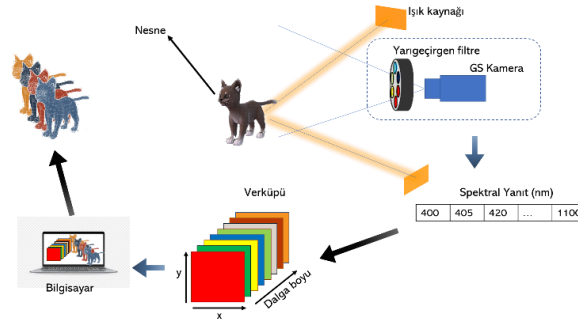
Hiperspektral Görüntüleme

Hiperspektral görüntüleme, geleneksel görüntüleme ve spektroskopi yöntemlerinin birleşimiyle hem spektral hem de alansal çözünürlüğe sahip bir görüntüleme tekniğine dayanmaktadır. Uygulamalarda, ihtiyaca en yakın dalga boylarını bulmak için çok sayıda spektral verinin içinden bazı bilgilerin ayrıştırılması gerekir. Bu işlem makine öğrenimi yoluyla da gerçekleştirilebilir. Bulunan temsili dalga boyları, meyve sebzelerde olgunluk, yaralanama, çürük gibi belirli bir nesnel özellikleri tespit etmek için kullanılabilir (Du vd., 2020). Hiperspektral görüntüleme, bir test örneğinin görüntüsündeki tüm pikseller için UV ve VIS-IR spektrumları elde etme açısından multispektral görüntülemeye çok benzerdir (Su ve Sun, 2018). Temel fark olarak Hiperspektral görüntüleme verilerini 400 nm ile 1000 nm aralığında veya daha geniş dalga boyu aralığında yüze yakın spektral bantla sağlayabilirken multispektral görüntüleme yalnızca birkaç spektral bantta veriler elde edebilir (Du vd., 2020). Hiperspektral görüntüleme tekniği, görüntüleme ve spektral teknikleri tek bir sistemde bütünleştiren yeni bir tespit yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Bir hiperspektral görüntüleme sistemi genellikle bir spektrograf, yük bağlaşımlı cihaz (CCD) kamera veya Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (CMOS), halojen ışık kaynakları, bir meyve tutma platformu ve görüntü yakalama, hareket mekanizması denetimi için bir bilgisayardan oluşur (Wang vd., 2016).

Şekil 5'te bir hiperspektral görüntüleme sisteminin temel yapısı sunulmaktadır. Bu sistemlerde multispektral görüntülemeden farklı olarak, birbirine yakın onlarca spektral bant verisi birleştirilerek bir hiperspektral veri küpü (hiperküp) ortaya çıkarılmaktadır. Şekilde belirtildiği gibi, ışık kaynağından gelen ışık nesneden yansdıktan sonra sırasıyla, yarı geçirgen filtrelerden, görüntü sensöründen geçerek bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayar ortamında hiperküp olarak birleştirilen bu görüntüler istenildiğinde tümleşik istenildiğinde her bir bant için bağımsız olarak analiz edilmesi mümkün olmaktadır.

Hiperspektral görüntü verileri büyük miktarda bilgiye sahiptir ve bir tespit hedefi için yüzlerce hatta binlerce görüntü toplanabilir. Hiperspektral görüntüleme teknolojisi özellik tanımda önemli avantajlara sahiptir, ancak aynı zamanda büyük zorlukları beraberinde getirir. Büyük veri işleme algılama hızını büyük ölçüde azaltır ve modern gıda işlemenin hızlı çevrimiçi algılama gereksinimlerini karşılaştırmak zordur (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Görüntüleme tekniklerinin gıda analizlerinde uygulanması son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Uygulamaların en önemli özelliklerinden biri de meyve ve sebzeleri, UV, NIR ve IR bölgeleri gibi insan gözünün göremeyeceği elektromanyetik bölgelerinde inceleme olasılığını ortaya çıkarmış olmasıdır (Rajkumar vd., 2012).



Şekil 5. Hiperspektral Görüntüleme Sisteminin Çalışma Yöntemi ve Hiperküplerin Oluşturulması

Geleneksel görüntüleme yöntemlerinde kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) dalga boylarına odaklanan üç filtre kullanılarak görüntüler video kameralarla kayıt altına alınır ve görünür ışık bantlarında çalışılır. Bu nedenle meyve ve sebzelerin iç yapısı hakkında fazla bilgi edinemezler ve görünür ışık ötesinde bulunan kusurları tespit edemezler. Hiperspektral görüntülemeye geleneksel görüntülemeye farklı olarak, spektral ve uzamsal bilgi (ne ve nerede) sağlarken, spektrometri, meyve ve sebzeler üzerindeki belirli bir noktada yakalanan spektral bilgiler hakkında bilgi sağlar (Lorente vd., 2012). Hiperspektral görüntüleme X-ışını görüntülemeye göre daha güvenli, FT-IR görüntüleme ve manyetik rezonans görüntülemeye göre daha hızlı ve uygun fiyatlı ve termal görüntülemeye göre daha iyi bir görüntü kalitesine sahiptir (Lan vd., 2021). Hiperspektral görüntüleme, gıda endüstrisinin verimliliğini artırır, maliyeti düşürür ve süreci tüketicilere daha iyi kalitede daha güvenli hale getirir. Elde edilen görüntü, bitki olgunluğunu, hastalık veya stres durumlarını tahmin etmede kullanılır. Ayrıca, bu tekniğin; nesnelere çeşitlilik, olgunluk, kalite, kompozisyon ve kontaminasyonlara göre sınıflandırması amacıyla kullanılması olasıdır (Rajkumar vd., 2012). Hiperspektral görüntüleme meyve ve sebzeler için hem tanımlanmış değişkenler (örneğin, renk, sıklık, asitlik, şeker) hem de karmaşık özellikler (örneğin, olgunluk, olgunluk, biyolojik kusurların tespiti, fizyolojik bozukluklar, mekanik hasarlar, duyu kalite) üzerindeki kalite parametrelerinin değerlendirilmesinde etkili bir araç olarak kullanılabilirliğini göstermektedir (Wieme vd., 2022).

Meyve ve sebze kusurlarını anlık olarak tespit etmek için hiperspektral görüntüleme teknolojisini doğrudan kullanmak çok zordur, çünkü hiperspektral görüntülerin elde edilmesi ve analizi çok zaman alıcıdır. Bunun yerine, kusurların hızlı tespiti için hızlı multispektral görüntüleme sistemleri geliştirmek üzere karakteristik dalga boyu görüntülerinden birkaçı seçilebilir (Zhang vd., 2020).

Hiperspektral görüntülemeye bulunan bazı dezavantajlar şunlardır;

- Standart kameralarla karşılaştırıldığında daha pahalı ve karmaşık sistemlerdir.
 - Görüntülerin mevcut elde edilme süreleri, belirli önemli dalga boylarını seçerek, yukarıda belirtildiği gibi, bunları geliştirmek için değerli araçlar olmalarına rağmen, sıralı veya gerçek zamanlı denetim sistemleri için kullanılmalarına izin vermemektedir.
 - Kötü aydınlatma, lens hataları, sensör hataları, lambaların spektral dağılımının eşit olmaması sonucu etkiler.
- Bu nedenle sistemin kalibrasyonunun iyi yapılmış olması gerekir.

Meyve ve sebze gibi değişken biyolojik ürünlerde meydana gelebilecek uzun süre ve farklı durumlar için kullanılabilir olacak sağlam kalibrasyon modellerinin oluşturulması gerekir. Geliştirilen istatistiksel modeller genellikle zaman, boyut ve veri kümesi ile ilgilidir ve bu nedenle sonuçlar deneysel koşullara bağlıdır (Lorente vd., 2012). Yapılan çalışmaların çoğu, bir mevsim boyunca belirli bir meyve bahçesinde hasat edilen meyveleri kullanır. Bu nedenle bir sonraki mevsimde aynı veriler geçerli olmayabilir. Karydas vd. (2020) kirazların antioksidan kapasiteleri üzerine yaptığı çalışmada önceki yılın verileriyle kıyaslandığında başarı oranının düştüğünü rapor etmişlerdir.

Munera vd. (2021) hiperspektral görüntüleme sistemi kullanılarak yaptıkları çalışmada malta eriğinde sağlam ve kusurlu meyve ayrıştırmasını %97,5 oranında sağlayabildiklerini. Kusurların mor leke, morarma, yara izleri ve et kahverengileşmesi gibi tanımlandığı durumda ise, %95,9'luk doğru sınıflandırma oranı ile ayırım sağlanmıştı.

Li vd. (2018) hiperspektral görüntüleme yöntemi kullanılarak yaptıkları çalışmada kiraz meyvesinin çözünür kuru madde içeriği (SSC) ve pH değerleri göz önüne alınarak olgunluk seviyesine göre sınıflandırmada %96,4'lük doğru bir ayırım elde edilmiştir. Wang vd. (2016) *Cerasus humilis* (Kuzey Çin'de yetişen çalı kiraz) üzerinde hiperspektral

çalışmalar yapmış olup 3 farklı kusuru tespit etmeye çalışmıştır. Başarı oranı %88,57 olarak bulunmuştur. Daha önce yapılan çalışmalara göre bu oran düşüktür. Araştırma nesnesinin küçük hacmi ve kusur alanının küçük bir oranda olması sebebiyle düşük bir tanıma oranına neden olmuş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, küresel bir meyve olarak, *Cerasus humilis* meyvesi üzerindeki eşit olmayan aydınlatma dağılımı da kusur tespitinin düşük doğruluğuna neden olan ana sorunlardan biri olduğu düşünülmektedir. Karydas vd. (2020) yaptığı çalışmada multispektral görüntüleme yöntemini kullanmıştır. Ağaçta bulunan kirazların antioksidan kapasitelerini tahmin edebilmek için uzaktan algılama, toprak analizi, iklimsel, topografik ve hidrografik verileri kullanarak bir sonraki sene oluşacak kirazların antioksidan kapasitesini belirlemeye çalışmışlardır.

Siedliska vd. (2018) hiperspektral görüntüleme yöntemiyle çilekte *Botrytis cinerea* ve *Colletotrichum acutatum* kaynaklı bozulmaları tanımlayarak %97 oranında ayırım sağladıkları görülmüştür. Liu vd. (2014) çileklerle ilgili multispektral yöntem kullanılan çalışmada olgunlaşmış ve olgunlaşmamış çileklerin karşılaştırılmasında 2 farklı model kullanmış ve bu modellerden BPNN modelinin sınıflandırma doğruluğu %93,33 olarak bulunurken SVM modelinin sınıflandırma doğruluğu %100 olarak bulunmuştur.

Zhang vd. (2017) hiperspektral görüntüleme ile 'Fuji' elma çeşidi üzerine yaptığı çalışma ile sağlam elmalar ile çürük elmaların birbirinden ayrılmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmada %92,5 oranında doğru ayırım yapıldığı görülmüştür. Lan vd. (2021) 4 farklı çeşit elma ile yaptığı hiperspektral çalışmada kuru madde içeriği, toplam şekerler, asitler ve polifenollerin ölçümlerini yapmış fakat elma meyvesindeki kuru madde ve toplam şekerler gibi baskın çözünür içerikleri tahmin etmek için uygun olduğu görülmüş ancak bireysel bileşiklerin (fruktoz, glikoz, sakkaroz ve malik asit) veya mikro bileşenler (polifenollerin toplamı) için uygun olmadığı belirlenmiştir. Huang, Lu ve Chen (2020) elmalarla yaptığı çalışmada kusurları belirlerken ışık kaynağının konumunun önemini araştırmış ve 3 farklı noktadan ışık kaynağı verilerek görüntü alınmıştır. En yüksek başarının %93 oranında ayırım ile gövdeye dik verilen ışıklardan olduğu saptanmıştır. Hiperspektral görüntüleme ve multispektral görüntüleme ile ilgili yapılan güncel çalışmalarla ilgili ayrıntılı bilgiler Tablo 2'de gösterilmiştir.

MULTİSPEKTRAL VE HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME İLE YAPILAN GÜNCEL ÇALIŞMALAR

Tablo 2. Multispektral ve Hiperspektral Görüntüleme ile Yapılan Güncel Çalışmalar

KULLANILAN TEKNİK + MAKİNE ÖĞRENMESİ	AMAÇ	MEYVE ya da SEBZE	ÖNEMLİ BULGU	FAYDASI	ÇALIŞILAN DALGA BOYU	REFERANS
Multispektral görüntüleme	Toprak analizi, iklimsel, topografik ve hidrografik verileri kullanarak kiraz meyvelerinin antioksidan kapasitesini tahmin etmek	Kiraz (<i>Prunus avium</i>)	Bu çalışma, kiraz meyvelerinin antioksidan kapasitesinin tahmini için uzaktan algılama, toprak analizi, iklimsel, topografik ve hidrografik verileri kullanmaya yönelik ilk girişimdir.	DPPH ve FCR arasındaki regresyon katsayısı 2018 yılı için ($R^2 = 0,21$) 2019 yılı için ($R^2 = 0,81$)	550 nm, 660 nm, 735 nm 790 nm	Karydas vd. (2020)
Multispektral görüntüleme	Zeytinleri sertliklerine göre sınıflandırmak	Zeytin (<i>Picual</i>)	İç dokusu daha yumuşak olan zeytinlerden üretilen yağlarda kalitede düşüş olduğu görülmüştür.	%95 oranında doğru sınıflandırma	675 nm 588 nm	Martinez Gila vd. (2022)
Multispektral görüntüleme	Ananasın duyuşal ve mikrobiyal kalitesini tahmin etmek için farklı analitik cihazlardan elde edilen verilere dayanan matematik modelleri geliştirme	Ananas (<i>Ananas comosus</i>)	Renk ve doku için geliştirilen tüm modeller düşük tahmin performansı gösterdi	Koku için %85'in üzerinde hassasiyet Renk ve doku için geliştirilen tüm modeller düşük tahmin performansı gösterdi	405, 435, 450, 470, 505, 525, 570, 590, 630, 645, 660, 700, 850, 870, 890, 910, 940 ve 970 nm	Manthou vd. (2020)
Multispektral görüntüleme	Kemometrik yöntemlerle birleştirilmiş multispektral görüntüleme kullanılarak bozulmamış domateslerde likopen ve fenolik bileşiklerin içeriğini eşzamanlı ve tahribatsız bir şekilde ölçmek	Domates (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Çıkarılan spektrumlar ile referans değerler (kimyasal olarak belirlenen) arasındaki kalibrasyon modellerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Kemometri ile multispektral görüntülemenin, bozulmamış domates meyvesindeki biyoaktif bileşiklerin içeriğinin tahmini için herhangi bir ön numune hazırlığı yapılmadan başarıyla uygulanabileceği bulunmuştur.	Likopen için $R^2 = 0,938$ Fenolik madde için $R^2 = 0,965$	405-970 nm arasında 405, 435, 450, 470, 505, 525, 570, 590, 630, 645, 660, 700, 780, 850, 870, 890, 910, 940 ve 970 nm	Liu vd. (2015)
Multispektral görüntüleme	Çilek meyvesinde başlıca kalite özelliklerini ve olgunluk aşamasını tahmin etmek için multispektral görüntüleme uygulamasını değerlendirmek ve PLS, SVM ve BPNN kullanılarak elde edilen tahmin modellerinin performansını karşılaştırmaktır	Olgunlaşmış çilek x olgunlaşmamış çilek (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.)	Uygun analiz modeli ile, çilek meyvesinde kalite özelliklerinin hızlı bir şekilde tahmin edilmesi ve olgunluk aşamasının sınıflandırılması için multispektral yöntemin uygun olduğu görülmüştür.	BPNN modelinin sınıflandırma doğruluğu %93,33 SVM modelinin sınıflandırma doğruluğu %100	405-970 nm (405, 435, 450, 470, 505, 525, 570, 590, 630, 645, 660, 700, 780, 850, 870, 890, 910, 940 ve 970 nm)	Liu vd. (2014)

Tablo 2. Multispektral ve Hiperspektral Görüntüleme ile Yapılan Güncel Çalışmalar (devamı)

KULLANILAN TEKNİK + MAKİNE ÖĞRENMESİ	AMAÇ	MEYVE ya da SEBZE	ÖNEMLİ BULGU	FAYDASI	ÇALIŞILAN DALGA BOYU	REFERANS
Multispektral görüntüleme	Soğuk hava deposunun mango üzerindeki etkisini tahribatsız bir şekilde tanımlamak	Mango (<i>Mangifera indica L.</i>)	Meyvelerin soğutma sıcaklıklarında depolanması, mikro alanların akışkanlığındaki azalma nedeniyle membran proteininin zarar görmesinden kaynaklanan membran sertliğinde bir artışa neden olabilir. Bununla birlikte, BS, kontrol ve CI örnekleri arasında TSS'de anlamlı bir değişiklik gözlenmemiş, pH önemli ölçüde azalmıştır	%83,3 oranında soğuk yaralanmaları tanımlanmıştır.	630 nm, 545 nm 450 nm 750 nm 915 nm	Hashim, Onwude ve Osman (2018)
Multispektral görüntüleme	Nar meyvesinde online kalite testleri (toplam suda çözünür katı miktarı TSS, pH ve titrasyon asitliği TA) yapabilmek	Nar (<i>Punicagratum L.</i>)	Briks, titrasyon asitliği ve pH hakkında iyi bir öngörü yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.	TSS'yi $r = 0.95$ pH için $r = 0.85$ TA için $r = 0.93$ (Yapılan analizler ve multispektral yöntemle bulunan sonuçların arasındaki regresyon katsayısıdır.)	700, 800, 900 ve 1000 nm	Khodabakhshian vd. (2017)
Hiperspektral görüntüleme (VIS-NIR-HSI)	Kusurlu ürünleri ayırt etmek (Mor benek, berelenme, paslanma, etli esmerleşme)	Yeni dünya (<i>Eriobotrya japonica L.</i>)	Amaca ulaşmak için 3 farklı yaklaşım incelenmiştir. En uygun olanın III yaklaşım olduğu görülmüştür. Bu yaklaşıma göre meyve; mor nokta, yara izi, morarma veya et kahverengileşmesi kusuru olarak sınıflandırılmıştır.	I. yaklaşımda %97,5 oranında kusur ayırımı II. yaklaşımda %96,7 oranında kusur ayırımı III. yaklaşımda %95,9 oranında kusurun tanımlanarak ayırımı	450-1040nm	Munera vd. (2021)
Hiperspektral görüntüleme (NIR-HSI)	NIR hiperspektral görüntüleme teknolojisi ile çözünür katı madde içeriği(SSC) ve pH için regresyon modelleri oluşturmak, birden fazla kirazı görsel olarak aynı anda tespit etmek ve olgunluk aşamalarını sınıflandırmaktır.	Taze kiraz ('Hongdeng')	Sonuçlar kirazların konsantrasyon dağılım haritalarına, SSC'sine ve pH'na dayanarak umut vadecidir ve üç olgunluk aşamasının sınıflandırılmasının yüksek doğrulukla uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.	%96.4 oranında olgunluklarına göre doğru sınıflandırma	874-1734nm	Li vd. (2018b)
VIS-NIR Hiperspektral görüntüleme/Multispektral görüntüleme	İki renkli şeftalilerde yüzeyde tespit edilen 9 farklı kusuru bulmak	Taze şeftali ('Pinggu')	Sıralı uygulamalar için çok sayıda spektral kanala sahip bir hiperspektral sistem kurmak pratik değildir. Bunun yerine, sadece iki seçilmiş optimal dalga boyunu kullanan multispektral görüntülemenin daha hızlı çözüme götüreceği görülmüştür.	%96.6 oranında doğru kusur tespiti	325-1100 nm	Li vd. (2016)
Hiperspektral görüntüleme	Meyve olgunluğunu tespit etmek	'Hass' avokado (<i>Persea americana Mill</i>)	Avokadoların olgunlukları ve ağırlıkları arasında bir ilişki bulunamamıştır. Avokadoların olgunluklarının kuru madde miktarıyla orantılı olduğu görülmüştür.	$R^2=0,9$ oranında olgunluk tespiti	400-1000 nm.	Vega Diaz, Sandoval Aldana ve Reina Zuluaga (2021)
Hiperspektral görüntüleme (VNIR/SWIR-HSI)	Hasat sonrası çilek meyvesinde sıklıkla bulunan <i>B. cinerea</i> ve <i>C. acutatum</i> gibi iki tipik bozulma mikroorganizmasının VNIR/SWIR hiperspektral görüntüleme tekniklerinin etkinliğini belirlemek	Çilek (senga sengan) Çilek (honeoye)	Mantar kontaminasyonunun görünmez olduğu aşılardan itibaren 24 saatte başlayan çilek meyvesinde <i>Botrytis cinerea</i> ve <i>Colletotrichum acutatum</i> enfeksiyonlarının erken tespiti için VNIR ve SWIR bölgelerinde hiperspektral görüntülemenin iyi uygulanabilirliğini ortaya koymuştur	%97 oranında doğru ayırım	450-2500nm	Siedliska vd. (2018)
Hiperspektral görüntüleme	Kusurlu olan özellikleri (pas lekesi, çatlak, böcek hasarı) tespit edilemek	<i>Cerasus humilis</i> (Kuzey Çin'de yetişen çalı kiraz)	Araştırma sonuçlarından, görüntü işleme tekniklerinin tüm kusur örneklerini tanımlamadığı görülmektedir.	%88,57 oranında doğru kusur tespiti	895-1700nm	Wang vd. (2023)
Hiperspektral görüntüleme (NIR-HSI)	Plastik ambalajların içindeki taze meyveleri tespit etmek için NIR-HSI görüntülemenin potansiyelini araştırmak	Elma-Muz-Armut ve ambalajları	Çalışmada üç farklı meyve (elma, muz ve armut) ve üç farklı oranda polietilen filmi içeren plastik ambalaj filmi kullanılmıştır. Yüksek polietilenli film dışında diğer iki çalışma için ambalajın etkisi ortadan kaldırılmıştır.	>%97 oranında doğru sınıflandırma	900-1700 nm	Mishra, Chauhan ve Pettersson (2023)
VIS-NIR hiperspektral görüntüleme	Şarap için hasat edilecek üzümde bulunan toplam çözünür kuru madde (TSS) ve antosiyanin miktarını ölçmek	Taze üzüm	Üzüm bağlarının haritalanması bağıcılığın ortak bir bileşenidir. Bu çalışmada geliştirilen teknoloji, TSS, antosiyanin konsantrasyonu ve üzüm olgunlaşmasının mekansal olarak hızlı ve tahribatsız bir şekilde haritalanmasını sağlamaktadır	Antosiyanin miktarı için $R^2=0,72$ Toplam çözünür kuru madde için $R^2=0,91$	400-1000 nm	Gutiérrez vd. (2019)

Tablo 2. Multispektral ve Hiperspektral Görüntüleme ile Yapılan Güncel Çalışmalar (devamı)

KULLANILAN TEKNİK + MAKİNE ÖĞRENMESİ	AMAÇ	MEYVE ya da SEBZE	ÖNEMLİ BULGU	FAYDASI	ÇALIŞILAN DALGA BOYU	REFERANS
Hiperspektral görüntüleme	Domateslerde görülen kuraklık stresini önlemek, sulamayı optimize etmek ve meyve kalitesini arttırmak	Domates (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	Klorofil içeriğinin protein içeriğinin kuraklık stresi altında azaldığı ve stres derecesi ne kadar derin olursa, içeriğin o kadar düşük olduğu gösterilmiştir. Bitki sisteminin fizyolojik durumunu tahmin etmek için iki farklı yaprak türü yetersiz olabilir. Kontrol edilemeyen aydınlatma, karmaşık arka plan için ise çalışma yetersiz kalmıştır.	RIS modeli için %95,90 oranında doğru tespit SVM modeli için %95,78 oranında doğru tespit	400-1000nm	Weng vd. (2023)
(NIR-HSI) Hiperspektral görüntüleme	Elmanın yapısal değişkenliğini ve heterojenliğini değerlendirmek için; kuru madde içeriği, toplam şekerler, asitler ve polifenollerin ölçümlerini azaltmak, basit ve verimli bir yöntem sağlamak	4 çeşit elma (<i>Golden Delicious, Granny Smith, Braeburn, Royal Gala</i>)	HSI spektrumlarına ve referans değerlerine dayanan tahmin modelleri, elma meyvesindeki kuru madde ve toplam şekerler gibi baskın çözümler içerikleri tahmin etmek için uygun olduğu görülmüştür, ancak bireysel bileşiklerin (fruktoz, glikoz, sakkaroz ve malik asit) veya mikrobileşenler (polifenollerin toplamı) için uygun olmadığı belirlenmiştir.	Kuru madde (mg/g) $R^2=0,83$ Toplam şeker içeriği (g/kg) $R^2=0,81$ Fruktoz (g/kg) $R^2=0,38$ Sakkaroz (g/kg) $R^2=0,67$ Glikoz (g/kg) $R^2=0,29$ Malik asit (g/kg) $R^2=0,31$ Polifenollerin toplamı (g/kg) $R^2=0,14$	990 nm-2450 nm	Lan vd. (2021)
Hiperspektral görüntüleme	Taze kesilmiş patates dilimlerinin renk ve su içeriğini hızlı bir şekilde belirlemek	Taze patates (Holland fifteen)	Renk ve kuru madde tayini numunede geri dönülmez hasara neden olur ve uzun sürer. Bu çalışmada hem numunenin bütünlüğü korunmuş hem de hasarı önlenmiş olup kısa sürede sonuca ulaşıldığı görülmüştür. Çalışma renk tahmini için başarılı fakat su içeriğini belirlemede daha fazla çalışma gerektirdiğini göstermiştir. PLS ve LSSVM modeli kullanılmıştır.	LSSVM modeli için renk tahmini $R^2=0,90$ Su içeriği tahmini $R^2=0,80$ PLS modeli için renk tahmini $R^2=0,84$ Su içeriği tahmini $R^2=0,77$	400-1000 nm	Xiao, Bai ve He (2020)
Hiperspektral görüntüleme	Salatalıkların soğuk depolamadan kaynaklı oluşan yaralanmalarının erken tespiti	Salatalık (Excursion)	Bu çalışmada geliştirilen yöntemler, salatalıkların çevrimiçi olarak sıralanması ve derecelendirilmesi için multispektral modda çalışacak çevrimiçi bir hiperspektral görüntüleme sisteminde uygulanabilir.	İkili sınıflandırma (normal-soğuk yaralanma) %100 oranında ayırım üçlü sınıflandırma(normal-hafif yaralanma-ciddi yaralanma) %91.6 oranında ayırım	(500-675 nm) ve geçirgenlik (675-1000 nm)	Cen vd. (2016)
Çok kanallı VIS/NIR spektroskopik sistem	Elmalardaki iç kusuru tespit etmek için farklı açılardan ölçüm yapmak (A-ışık kaynağına bakan uç B-ışık kaynağına bakan kaliks uç C- gövdeye dik gelen ışık)	Elma 'Honeycrisp'	Sınıflandırma sonuçlarının algılama lifi ve meyve oryantasyonuna göre değiştiğini göstermiştir. Hafif kusurlu elmalar için ortalama spektrumlar kullanıldığında, her bir algılama lifinin spektrumunu kullanmaktan önemli ölçüde daha iyi sınıflandırma sonuçları elde edilmiştir.	A oryantasyonu için %91,5 oranında ayırım B oryantasyonu için %89,2 oranında ayırım C oryantasyonu için %93,1 oranında ayırım	550-1650 nm	Huang, Lu ve Chen (2020)
VIS-NIR hiperspektral görüntüleme	Mandalinalarda görülen dört tip kusurun (örneğin, antraknoz, yara izi, çürüme ve thrips skarlaşması) tespiti incelenmiştir.	Mandalina (<i>Citrus reticulata</i> Blanco)	Çalışma, önerilen multispektral görüntü algılama yöntemi mandalinalarda belirlenen kusurları tanımlama yeteneğini göstermiştir. 680 nm ve 715 nm'deki dalga boyu görüntülerinin, mandalinalardaki her türlü kusurun tespiti için en uygun seçim olduğunu gösteremedi, çünkü her tip kusur için sınırlı numune sayısı ve sadece dört tip kusur tipi kullanıldı.	%96,63 oranında doğru kusur tespiti	680 nm ve 715 nm	Zhang vd. (2020)
Hiperspektral görüntüleme	Elmaları çürüklük seviyelerine göre sınıflandırma	Elma (Fuji)	Çürük elmaları çürük olanlardan ayırt etmek gerekirse, model hem doğru hem de etkilidir. Elmaların erken çürüklerinin derecesini tespit etmek ve sınıflandırmak için iyi bir yöntemdir.	% 92,5 oranında doğru sınıflandırma	400-1050 nm	Zhang vd. (2017)

SONUÇLAR

Araştırma laboratuvarlarında ve saha çalışmalarında kullanımı giderek artmakta olan Multi/Hiperspektral görüntüleme teknolojilerinin uygulamalarda sunduğu imkanların yanında maliyet, kalibrasyon ve uzman gereksinimini kısıtlayıcı yanları da bulunmaktadır. Bu görüntüleme teknikleri görünür ve görünür ötesinde spektral bant verileri sunmaktadır. Hiperspektral görüntüleme bant sayısı bakımından diğer yöntemlere kıyasla çok daha ayrıntılı tayf bilgisi sunabilmekte bunun yanında maliyet, tarama hızı, kalibrasyon zorluğu gibi noktalarda kısıtları bulunmaktadır.

Genel olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde multispektral görüntülemenin basit ve hızlı çözümlere ihtiyaç duyan uygulamalarda kullanıldığı görülmüştür. Multispektral görüntüleme, Hiperspektral görüntülemeye göre daha hızlı

görüntü elde etmeyi ve daha az sayıda spektral battan görüntü işlemeyi içerir. Bu nedenle kusur ayrımlarında, olgunluk sınıflandırmalarında multispektral görüntülemeyi kullanmak daha mantıklıdır. Ayrıca görünür ve yakın kızılötesini kapsayan belirli dalga boylarında çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Multispektral görüntüleme ile çalışma yapılması sırasında en önemli basamak doğru dalga boyunu seçmektir. Dalga boyu sayısı daha kısıtlı olması sebebiyle daha az veri ile daha hızlı sonuç alınması sağlanabilmektedir.

Hiperspektral görüntüleme ise daha fazla tayf taranarak çok daha ayrıntılı spektrum verisi elde etme amacıyla kullanılmaktadır. Hiperspektral görüntüleme meyve ve sebzelerde renk, sıklık, asitlik, şeker, antioksidan miktarı, toplam çözünür kuru madde miktarını belirlemek gibi spesifik durumların yanında, olgunluk, fizyolojik bozukluk, mekanik hasar, duyu kalite, biyolojik kusur gibi kalite parametrelerinin belirlenmesi amacıyla da kullanılır. Hiperspektral görüntüleme geniş bir spektrumda çalışma olanağı sağlar. Böylece ayrıntılı bilgi verilerine ulaşmamızı sağlar. Fakat verileri ayıklamak zaman alıcı ve zahmetlidir. Bu nedenle yapılacak işlem sınıflandırma gibi basit bir işlem ise multispektral görüntülemeyi kullanmak zamandan tasarruf sağlayacaktır.

Meyve ve sebzelerde oluşabilecek kusurların, hasarların tespit edilmesinde hiperspektral görüntüleme ve multispektral görüntüleme oldukça yenilikçi bir teknolojidir, hızlı, tahribatsız ve doğru sonuç vermesinin yanında çevre dostu bir uygulamadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde gelecekte kullanımı oldukça umut vaat edicidir.

KAYNAKLAR

- Akkoyun, F. (2022). Inexpensive multispectral imaging device. *Instrumentation Science & Technology*, 50(5), 543-559. <https://doi.org/10.1080/10739149.2022.2047061>
- Cen, H., Lu, R., Zhu, Q., & Mendoza, F. (2016). Nondestructive detection of chilling injury in cucumber fruit using hyperspectral imaging with feature selection and supervised classification. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 352-361. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.09.027>
- Chen, Q., Lin, H., & Zhao, J. (2021). Spectral imaging technology in food. *Advanced nondestructive detection technologies in food*, 127-160. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-3360-7>
- Cömert, O., Hekim, M., & Kemal, A. D. E. M. (2019). Faster R-CNN kullanarak elmalarda çürük tespiti. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 335-341. DOI: [10.29137/umagd.469929](https://doi.org/10.29137/umagd.469929)
- Du, Z., Zeng, X., Li, X., Ding, X., Cao, J., & Jiang, W. (2020). Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.024>
- Ebner, A., Gattinger, P., Zorin, I., Krainer, L., Rankl, C., & Brandstetter, M. (2023). Diffraction-limited hyperspectral mid-infrared single-pixel microscopy. *Scientific Reports*, 13(1), 281. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26718-6>.
- Gao, L., & Smith, R. T. (2015). Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy—a review of data acquisition. *Journal of biophotonics*, 8(6), 441-456. <https://doi.org/10.1002/jbio.201400051>
- Gracia-Romero, A., Vergara-Díaz, O., Thierfelder, C., Cairns, J. E., Kefauver, S. C., & Araus, J. L. (2018). Phenotyping conservation agriculture management effects on ground and aerial remote sensing assessments of maize hybrids performance in Zimbabwe. *Remote Sensing*, 10(2), 349. <https://doi.org/10.3390/rs10020349>
- Gutiérrez, S., Tardáguila, J., Fernández-Novales, J., & Diago, M. P. (2019). On-the-go hyperspectral imaging for the in-field estimation of grape berry soluble solids and anthocyanin concentration. *Australian journal of grape and wine research*, 25(1), 127-133. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12376>
- Güzel, E., & Özlüoymak, Ö. B. (2015). Elektromanyetik Spektrumun Tarım Makinaları Araştırmalarında Kullanımı. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 11(4), 315-320.
- Hashim, N., Onwude, D. I., & Osman, M. S. (2018). Evaluation of chilling injury in mangoes using multispectral imaging. *Journal of food science*, 83(5), 1271-1279. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14127>
- Huang, Y., Lu, R., & Chen, K. (2020). Detection of internal defect of apples by a multichannel Vis/NIR spectroscopic system. *Postharvest Biology and Technology*, 161, 111065. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111065>

- Karydas, C., Iatrou, M., Kouretas, D., Patouna, A., Iatrou, G., Lazos, N., ... & Mourelatos, S. (2020). Prediction of antioxidant activity of cherry fruits from UAS multispectral imagery using machine learning. *Antioxidants*, 9(2), 156. <https://doi.org/10.3390/antiox9020156>
- Khodabakhshian, R., Emadi, B., Khojastehpour, M., Golzarian, M. R., & Sazgarnia, A. (2017). Development of a multispectral imaging system for online quality assessment of pomegranate fruit. *International Journal of Food Properties*, 20(1), 107-118. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1144200>
- Lan, W., Jaillais, B., Renard, C. M., Leca, A., Chen, S., Le Bourvellec, C., & Bureau, S. (2021). A method using near infrared hyperspectral imaging to highlight the internal quality of apple fruit slices. *Postharvest Biology and Technology*, 175, 111497. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111497>
- Li, C., Chen, G., Zhang, Y., Tang, F., & Wang, Q. (2020). Advanced fluorescence imaging technology in the near-infrared-II window for biomedical applications. *Journal of the American Chemical Society*, 142(35), 14789-14804. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c07022>
- Li, J., Chen, L., Huang, W., Wang, Q., Zhang, B., Tian, X., ... & Li, B. (2016). Multispectral detection of skin defects of bi-colored peaches based on vis-NIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 112, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.10.007>
- Li, Q., He, X., Wang, Y., Liu, H., Xu, D., & Guo, F. (2013). Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: achievements and challenges. *Journal of biomedical optics*, 18(10), 100901-100901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.10.100901>
- Li, X., Li, R., Wang, M., Liu, Y., Zhang, B., & Zhou, J. (2018a). Hyperspectral imaging and their applications in the nondestructive quality assessment of fruits and vegetables. *Hyperspectral imaging in agriculture, food and environment*, 27-63. DOI:10.5772/intechopen.72250.
- Li, X., Wei, Y., Xu, J., Feng, X., Wu, F., Zhou, R., ... & He, Y. (2018b). SSC and pH for sweet assessment and maturity classification of harvested cherry fruit based on NIR hyperspectral imaging technology. *Postharvest Biology and Technology*, 143, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.05.003>
- Liu, C., Liu, W., Chen, W., Yang, J., & Zheng, L. (2015). Feasibility in multispectral imaging for predicting the content of bioactive compounds in intact tomato fruit. *Food Chemistry*, 173, 482-488. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.052>
- Liu, C., Liu, W., Lu, X., Ma, F., Chen, W., Yang, J., & Zheng, L. (2014). Application of multispectral imaging to determine quality attributes and ripeness stage in strawberry fruit. *PLoS one*, 9(2), e87818. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087818>
- Lorente, D., Aleixos, N., Gómez-Sanchis, J. U. A. N., Cubero, S., García-Navarrete, O. L., & Blasco, J. (2012). Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1121-1142. DOI:10.1007/s11947-011-0725-1
- Manthou, E., Lago, S. L., Dagres, E., Lianou, A., Tsakanikas, P., Panagou, E. Z., & Nychas, G. J. E. (2020). Application of spectroscopic and multispectral imaging technologies on the assessment of ready-to-eat pineapple quality: A performance evaluation study of machine learning models generated from two commercial data analytics tools. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105529. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105529>
- Martínez Gila, D. M., Navarro Soto, J. P., Satorres Martínez, S., Gómez Ortega, J., & Gámez García, J. (2022). The advantage of multispectral images in fruit quality control for extra virgin olive oil production. *Food Analytical Methods*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12161-021-02099-w>
- Mishra, P., Chauhan, A., & Pettersson, T. (2023). Seeing through plastics: A novel combination of NIR hyperspectral imaging and spectral orthogonalization for detecting fresh fruit inside plastic packaging to support automated barcode less checkouts in supermarkets. *Food Control*, 150, 109762. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109762>
- Montembeault, Y., Lagueux, P., Farley, V., Villemaire, A., & Gross, K. C. (2010, June). Hyper-Cam: Hyperspectral IR imaging applications in defence innovative research. In *2010 2nd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/WHISPERS.2010.5594890

- Munera, S., Gómez-Sanchís, J., Aleixos, N., Vila-Francés, J., Colelli, G., Cubero, S., ... & Blasco, J. (2021). Discrimination of common defects in loquat fruit cv. 'Algerie' using hyperspectral imaging and machine learning techniques. *Postharvest Biology and Technology*, *171*, 111356. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111356>
- Oberti, R., Marchi, M., Tirelli, P., Calcante, A., Iriti, M., Tona, E., ... & Ulbrich, H. (2016). Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot. *Biosystems engineering*, *146*, 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.004>
- Ortega, S., Halicek, M., Fabelo, H., Callico, G. M., & Fei, B. (2020). Hyperspectral and multispectral imaging in digital and computational pathology: a systematic review. *Biomedical Optics Express*, *11*(6), 3195-3233. <https://doi.org/10.1364/BOE.386338>
- Rajkumar, P., Wang, N., Elmasry, G., Raghavan, G. S. V., & Garipey, Y. (2012). Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. *Journal of food engineering*, *108*(1), 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.002>
- Siedliska, A., Baranowski, P., Zubik, M., Mazurek, W., & Sosnowska, B. (2018). Detection of fungal infections in strawberry fruit by VNIR/SWIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*, *139*, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.01.018>
- Siripatrawan, U., & Makino, Y. (2018). Simultaneous assessment of various quality attributes and shelf life of packaged bratwurst using hyperspectral imaging. *Meat science*, *146*, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.024>
- Su, W. H., & Sun, D. W. (2018). Multispectral imaging for plant food quality analysis and visualization. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, *17*(1), 220-239. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12317>
- Tang, T., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2022). Intelligent detection for fresh-cut fruit and vegetable processing: Imaging technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *21*(6), 5171-5198. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13039>
- Vega Diaz, J. J., Sandoval Aldana, A. P., & Reina Zuluaga, D. V. (2021). Prediction of dry matter content of recently harvested 'Hass' avocado fruits using hyperspectral imaging. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(3), 897-906. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10697>
- Wang, B., Yang, H., Zhang, S., & Li, L. (2023). Detection of Defective Features in *Cerasus Humilis* Fruit Based on Hyperspectral Imaging Technology. *Applied Sciences*, *13*(5), 3279. <https://doi.org/10.3390/app13053279>
- Wang, N. N., Sun, D. W., Yang, Y. C., Pu, H., & Zhu, Z. (2016). Recent advances in the application of hyperspectral imaging for evaluating fruit quality. *Food analytical methods*, *9*, 178-191. DOI 10.1007/S12161-015-0153-3
- Weng, S., Ma, J., Tao, W., Tan, Y., Pan, M., Zhang, Z., ... & Zhao, J. (2023). Drought stress identification of tomato plant using multi-features of hyperspectral imaging and subsample fusion. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1073530. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1073530>
- Wieme, J., Mollazade, K., Malounas, I., Zude-Sasse, M., Zhao, M., Gowen, A., ... & Van Beek, J. (2022). Application of hyperspectral imaging systems and artificial intelligence for quality assessment of fruit, vegetables and mushrooms: A review. *biosystems engineering*, *222*, 156-176. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.07.013>
- Wu, D., & Sun, D. W. (2013). Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review—Part I: Fundamentals. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *19*, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.04.014>
- Xiao, Q., Bai, X., & He, Y. (2020). Rapid screen of the color and water content of fresh-cut potato tuber slices using hyperspectral imaging coupled with multivariate analysis. *Foods*, *9*(1), 94. <https://doi.org/10.3390/foods9010094>
- Yaqoob, M., Sharma, S., & Aggarwal, P. (2021). Imaging techniques in agro-industry and their applications, a review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *15*, 2329-2343. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00809-w>

Zhang, H., Zhang, S., Dong, W., Luo, W., Huang, Y., Zhan, B., & Liu, X. (2020). Detection of common defects on mandarins by using visible and near infrared hyperspectral imaging. *Infrared Physics & Technology*, 108, 103341. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103341>

Zhang, S., Wu, X., Zhang, S., Cheng, Q., & Tan, Z. (2017). An effective method to inspect and classify the bruising degree of apples based on the optical properties. *Postharvest Biology and Technology*, 127, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.12.008>