

**GIDA ANALİZİNDE SPEKTROSKOPİK  
YÖNTEMLERİN TEORİK İNCELENMESİ:  
GIDA GÜVENLİĞİ VE KALİTE  
KONTROLÜNE ETKİLERİ**

Yüksek Lisans Tezi

Akbar İBRAHİMOV

Eskişehir 2025

**BAŐLIK SAYFASI**

**GIDA ANALİZİNDE SPEKTROSKOPİK YÖNTEMLERİN TEORİK  
İNCELENMESİ: GIDA GÜVENLİĞİ VE KALİTE KONTROLÜNE ETKİLERİ**

**Akbar İBRAHİMOV**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Analitik Kimya Ana Bilim Dalı**

**..... Programı**

**Danışman: Prof. Dr. Göksel ARLI**

**Anadolu Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Haziran 2025**

**Eskişehir**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Akbar İBRAHİMOV'un "Gıda Analizinde Spektroskopik Yöntemlerin Teorik İncelenmesi: Gıda Güvenliği ve Kalite Kontrolüne Etkileri" başlıklı tezi .../.../2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Analitik Kimya Ana Bilim dalında ..... Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Ünvanı Adı Soyadı	İmza
Üye (Danışman)	: Prof. Dr. Göksel ARLI	.....
Üye	: .....	.....
Üye	: .....	.....
Üye	: .....	.....
Üye	: .....	.....

.....

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü**

## ÖZET

### GIDA ANALİZİNDE SPEKTROSKOPİK YÖNTEMLERİN TEORİK İNCELENMESİ: GIDA GÜVENLİĞİ VE KALİTE KONTROLÜNE ETKİLERİ

Akbar İBRAHİMOV

Analitik Kimya Ana Bilim Dalı

..... Programı

Anadolu Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2025

Danışman: Prof. Dr. Göksel ARLI

Gıdalar, hammaddenin tedarik edilmesinden son ürünün eldesine kadar geçen süreçte, raf ömrünün uzatılması, tekstür, tat veya aroma iyileştirilmesi ya da maliyetin düşürülmesi gibi çeşitli istemlerle veya istem dışı; fiziksel ya da kimyasal müdahalelere maruz kalmaktadır. Bu müdahalelerin tüketicinin sağlığı ve refahı açısından İslami boyutlardakibi ve denetimi, helal gıda konsepti kapsamına girmektedir. Günümüzde gelişen teknolojiye paralel olarak üreticilerin haksız kazanç elde etme istekleri gibi sebeplerden ötürü gıda üretiminde taklit ve tağşiş oranları giderek artmaktadır. Bu derlemede, helal gıda üretimi ve takibinde önem arz eden ve doğrulama ve tağşiş belirlenmesi amacıyla kullanılan vibrasyonel spektroskopik yöntemlerden yakın kızılötesi spektroskopisi (NIR), Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektroskopisi (FTIR), Raman spektroskopisi (RS) ve üstün uzaysal görüntüleme (HSI) metodları çalışma prensipleri ve gıda grupları bazında ele alınmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Gıda güvenliği, Spektroskopik yöntemler, Kalite kontrolü, Vibrasyonel Teknikler, Raman Spektroskopisi

## ABSTRACT

### THEORETICAL INVESTIGATION OF SPECTROSCOPIC METHODS IN FOOD ANALYSIS: IMPACT ON FOOD SAFETY AND QUALITY CONTROL

Akbar IBRAHIMOV

Department of Analytical Chemistry

Programme in .....

Graduate School of Anadolu University, June 2025

Supervisor: Prof. Dr. Goksel ARLI

Foods are exposed to physical or chemical processes from the period of supplying raw materials until manufacturing the final product for a variety of purposes such as extending shelf life, improving texture, taste and aroma or lowering the production cost. Regarding the Islamic faith, pursuance and control of these treatments/processes in terms of human health and well-being are a part of halal food production concept. Recently, in parallel with developing technology, imitation and fraud in food production have been extensively increased due to wishes of producers to acquire unfair earnings. In this study, near infrared spectroscopy (NIR), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Raman spectroscopy (RS) and hyperspectral imaging (HSI), which are sub-categories of vibrational spectroscopic methods, are reviewed in terms of their working principles and food groups.

**Keywords:** Food safety, Spectroscopic methods, Quality control, Vibrational Techniques, Raman Spectroscopy

..../..../20....

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait özgün bir çalışma olduğunu, çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından “ bilimsel intihal tespit proqramıyla tarandığını ve hiç bir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Her hñagi bir zamanda çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiyimi bildiririm.

.....

Akbar İBRAHİMOV

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen herkese teşekkür etmek isterim. Öncelikle, bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle tez süreci boyunca bana yol gösteren değerli danıŐmanım Göksel Arlı'ya sonsuz teŐekkürlerimi sunuyorum.

Manevi destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili aileme ve arkadaşlarıma da ayrıca teşekkür ederim. Sabırları, anlayıŐları ve motivasyonları sayesinde bu süreci başarıyla tamamladım.

Son olarak, bu süreçte katkısı bulunan herkese içtenlikle teşekkür ederim.

.../.../20....

## ETİK KURUL BELGESİ BEYANNAMESİ

**DİKKAT:** Eğer tez çalışması insan veya hayvan katılımcıları içermiyorsa ğrenci bu sayfayı; “*Bu tez çalışmasının hazırlanmasında, yürütülmesinde, verilerin analizinde Etik Kurul İzni’ne gerek yoktur*” ifadesi ile imzalayarak teze eklemelidir.

## ÜRETKEN YAPAY ZEKA KULLANIM BEYANI

Bu tezi hazırlarken üretken yapay zeka programlarından destek almadığımı beyan ederim. Her hangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Akbar İbrahimov

**DİKKAT:** Eğer tez çalışmasının herhangi bir evresinde üretken yapay zekâ programlarından yararlanılmamışsa öğrenci bu sayfayı; *“Bu tez çalışmasının hazırlanması, yürütülmesi, verilerin analizi vb. aşamalarının herhangi birinde üretken yapay zekâ programlarından yararlanmadığımı beyan ederim”* ifadesi ile imzalayarak teze eklemelidir.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	iv
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
ETİK KURUL BELGESİ BEYANNAMESİ .....	vii
ÜRETKEN YAPAY ZEKA KULLANIM BEYANI .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
TABLolar DİZİNİ .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
1 GİRİŞ .....	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı .....	1
1.2 Gıda Güvenliği ve Kalite Kontrolünün Önemi .....	2
1.3 Spektroskopik Yöntemlerin Gıda Analizindeki Rolü.....	2
2 GIDA GÜVENLİĞİ VE KALİTE KONTROLÜ.....	4
2.1 Gıda Güvenliği Kavramı ve Önemi .....	4
2.2 Gıda Kalite Kontrolünün Temel İlkeleri .....	5
2.3 Geleneksel ve Modern Analiz Yöntemleri.....	10
3 SPEKTROSKOPİK YÖNTEMLERİN TEORİK TEMELLERİ .....	13
3.1 Spektroskopinin Temel İlkeleri.....	13
3.1.1. Elektromanyetik ışınma-madde etkileşmeleri .....	14
3.2 Gıda Analizinde Kullanılan Spektroskopik Tekniklerin Sınıflandırılması .....	18
3.2.1 Vibrasyonel teknikler .....	19
3.2.2 Yakın kızılötesi (NIR) spektroskopisi .....	20
3.2.3 FT-IR (Fourier Transform Infrared) spektroskopisi.....	22
3.2.4 Raman spektroskopisi .....	24
3.2.5 Üstün uzaysal görüntüleme .....	27
3.2.6 UV-Vis spektroskopisi .....	31
3.2.7. Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) Spektroskopisi .....	34
3.2.8 Atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS).....	39
3.2.9 Kütle spektrometrisi (MS) .....	41

3.3 Spektrometrik Analizlerin Gıda Güvenliği Açısından Önemi.....	44
3.3.1 Biyosensörler .....	45
4 SPEKTROSKOPİK YÖNTEMLERİN AVANTAJLARI VE KISITLAMALARI .....	48
4.1 Spektroskopik Tekniklerin Sağladığı Avantajlar .....	48
4.2 Geleneksel Yöntemlerle Karşılaştırılması.....	49
4.3 Spektroskopik Yöntemlerin Kısıtlamaları ve Zorluklar .....	52
5 GÜNCEL UYGULAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ.....	54
5.1 Et ve Et Ürünlerinde Kızılötesi (IR) Spektroskopi Uygulamaları.....	54
6 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	58
6.1 Sonuç .....	58
6.2 Öneriler .....	58
KAYNAKÇA .....	60
ÖZ GEÇMİŞ .....	

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 1.1</b> Geleneksel ve Modern Analizlerin Kırşılartırma Tablosu.....	12
<b>Tablo 4.1</b> Karşılaştırma Kriterleri .....	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1 Elektromanyetik Işıma, İnfrared Işımları .....	13
Şekil 3.2 Kırılma İndisleri .....	15
Şekil 3.3 Işıma Polarizasyonu .....	16
Şekil 3.4 Absorbe Edilen Fotonların Sayısı.....	17
Şekil 3.5 Etil benzoatın <sup>1</sup> H ve <sup>13</sup> C NMR spektrumları (CDCl <sub>3</sub> ).....	34
Şekil 3.6 Konformasyon .....	35
Şekil 3.7 Konstitüsyon.....	35
Şekil 3.8 Konfigurasyon .....	36
Şekil 3.9 Manyetik Alan Uygulamadaki Farklılık.....	36
Şekil 3.10 Kuantlaşmış Enerjinin Absorbsiyonu ve Rezonans Olayı.....	37
Şekil 3.11 Kimyasal Kayma .....	38
Şekil 3.12 Elektron Sirkülasyonu .....	38
Şekil 3.13 Atomik Absorbsiyon Spektroskopisinin Temel Prosesleri .....	40
Şekil 3.14 Bir Kütle Spektrometrenin Şematik Diyagramı .....	42
Şekil 3.15 Kütle Spektrometresi Blok Diyagramı .....	43

# 1 GİRİŞ

Gıda sektörü, insan sağlığını ve refahını doğrudan etkileyen kritik bir endüstridir. Gıda güvenliği ve kalite kontrolü, tüketicilerin sağlıklı ve güvenli gıdalara erişimini sağlamak adına büyük önem taşımaktadır. Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, geleneksel analiz yöntemlerine ek olarak, daha hızlı, hassas ve etkin yöntemler geliştirilmektedir. Bu bağlamda spektroskopik yöntemler, gıda analizinde giderek daha fazla kullanılmakta ve gıda kalite kontrolünde devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır.

Spektroskopik yöntemler, bir maddenin elektromanyetik radyasyonla etkileşiminden elde edilen verilerle kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesini sağlayan analitik tekniklerdir. Gıda analizinde kullanılan temel spektroskopik teknikler arasında ultraviyole-görünür bölge (UV-Vis) spektroskopisi, infrared (IR) spektroskopisi, Raman spektroskopisi, küçük ölçekli nükleer manyetik rezonans (NMR) spektroskopisi ve küçük ölçekli küçük küme spektroskopisi bulunmaktadır. Bu yöntemler, gıdaların kimyasal bileşimlerini belirleme, tağşiyecilik ve sahtecilik analizleri yapma, besin değerlerini saptama ve bozulma gibi kalite parametrelerini izleme gibi çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır.

Bu çalışma, gıda analizinde spektroskopik yöntemlerin teorik temellerini inceleyerek bu yöntemlerin gıda güvenliği ve kalite kontrolüne etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Spektroskopik tekniklerin avantajları, sınırlamaları ve farklı gıda ürünleri üzerindeki uygulamaları detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Bu sayede, gıda analizinde modern teknolojilerin rolü daha iyi anlaşılacak ve gelecekteki potansiyel gelişmelere ilişkin öngörüler sunulacaktır.

## 1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez, gıda analizinde spektroskopik yöntemlerin teorik temelini inceleyerek, bu tekniklerin gıda güvenliği ve kalite kontrolüne etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Gıda üretiminde kimyasal, fiziksel ve biyolojik parametrelerin hassas bir şekilde analiz edilmesi, tüketici sağlığını koruma ve mevzuata uygunluğu sağlama açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmanın sonuçları, gıda endüstrisinde kalite kontrol süreçlerinin iyileştirilmesine katkı sağlamayı ve spektroskopik yöntemlerin daha yaygın kullanımını teşvik etmeyi hedeflemektedir.

## **1.2 Gıda Güvenliği ve Kalite Kontrolünün Önemi**

Gıda güvenliği ve kalite kontrolü, insan sağlığının korunması, tüketici haklarının gözetilmesi ve gıda endüstrisinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Gıda kaynaklı hastalıklar, kontaminasyonlar ve sahtecilik gibi riskler, etkili güvenlik ve kalite yönetim sistemleriyle en aza indirgenebilir.

Gıdalarda bulunan biyolojik (bakteri, virüs, küf), kimyasal (pestisit kalıntıları, ağır metaller) ve fiziksel (plastik, cam parçaları) tehlikeler, ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Etkili kalite kontrol sistemleri, bu riskleri tespit ederek güvenli gıda arzını sağlamaya yardımcı olur. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) ve Codex Alimentarius gibi kuruluşlar, gıda güvenliği için çeşitli standartlar belirlemiştir. Üreticiler, bu standartlara uyum sağlayarak yasal yaptırımlardan kaçınabilir ve uluslararası pazarda rekabet edebilir. Gıda sektöründe güvenlik ihlalleri, geri çağırma süreçlerine, hukuki yaptırımlara ve marka itibarının zedelenmesine neden olabilir. Kalite kontrol önlemleri, ekonomik kayıpları azaltarak firmaların uzun vadeli başarısını destekler. Spektroskopik analiz gibi modern kalite kontrol yöntemleri, gıda bileşenlerinin hızlı ve doğru bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Bu sayede üretim süreçleri daha verimli hale gelir, israf azalır ve kaynak kullanımını optimize edilir.

Sonuç olarak, gıda güvenliği ve kalite kontrolü, hem bireysel sağlık hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahiptir. Etkili denetim ve analiz yöntemleri, güvenli ve kaliteli gıda üretimini teşvik ederek toplum refahına katkıda bulunur.

## **1.3 Spektroskopik Yöntemlerin Gıda Analizindeki Rolü**

Spektroskopik yöntemler, gıda analizinde yaygın olarak tercih edilen etkili analitik tekniklerdir. Bu teknikler, gıdaların kimyasal bileşenlerini, yapısını ve saflığını belirlemek için elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerindeki ışığın maddeyle etkileşimini araştırır. Hızlı, hassas ve tahribatsız analiz sağlama özellikleri sayesinde, gıda endüstrisinde kalite kontrolü, güvenlik denetimleri ve saflık analizlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Gıda güvenliği ve kalite kontrolü, günümüz gıda endüstrisinin temel taşlarından. Geleneksel kimyasal analizlerin yanı sıra, spektroskopik teknikler, gıda bileşenlerinin hızlı ve hassas bir şekilde, aynı zamanda tahribat yaratmadan incelenmesine olanak tanır. Spektroskopi, ışığın maddelerle etkileşimini inceleyen bir bilim dalıdır ve ışığın çeşitli

dalga boylarında maddeler tarafından emilmesi, yansması ya da yayılması gibi prensiplere dayanır. Gıda analizlerinde yaygın olarak kullanılan başlıca spektroskopik yöntemler UV-Vis, kızılötesi (IR), yakın kızılötesi (NIR), Raman ve nükleer manyetik rezonans (NMR) spektroskopisidir.

UV-Vis spektroskopisi, gıda bileşenlerinin ışığı nasıl emdiğini incelemek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle fenolik bileşiklerin, pigmentlerin ve bazı vitaminlerin analizinde sıkça tercih edilmektedir. Ayrıca, UV-Vis spektroskopisi, gıdalardaki renk değişikliklerini ve antioksidan özelliklerini değerlendirmek için de kullanılır.

Kızılötesi (IR) ve Yakın Kızılötesi (NIR) spektroskopisi, organik bileşiklerin analizinde sıklıkla başvurulan yöntemlerdir. IR spektroskopisi, gıdalarda bulunan yağ, protein ve karbonhidrat miktarlarını belirlemek için kullanılırken, NIR spektroskopisi, tahribatsız analiz yapabilmesi nedeniyle, özellikle tahıl, süt ve et ürünlerinin kalite kontrol süreçlerinde önemli bir yere sahiptir.

Raman spektroskopisi, moleküllerin titreşimsel özelliklerini analiz etmek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, gıda sahteciliğinin tespiti, katkı maddelerinin incelenmesi ve yağ asidi bileşimlerinin belirlenmesi konusunda oldukça yararlıdır. Ayrıca, Raman spektroskopisi, gıdaların moleküler yapısına dair derinlemesine bilgi sağlamada da etkilidir.

Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) spektroskopisi, organik bileşiklerin yapısını incelemek için kullanılan etkili bir tekniktir. Gıda analizlerinde, özellikle lipid profili, protein yapıları ve metabolitlerin tespiti için yaygın olarak kullanılır. NMR yöntemi, ayrıca gıdalardaki safsızlıkların tespit edilmesi ve coğrafi köken analizlerinin yapılabilmesi açısından da büyük bir öneme sahiptir.

Spektroskopik teknikler, gıda analizinde önemli avantajlar sunarak kalite kontrol süreçlerini hem hızlandırmakta hem de güvenilirliğini artırmaktadır. UV-Vis, IR, NIR, Raman ve NMR gibi yöntemler; gıda bileşenlerinin tanımlanması, saflık değerlendirmesi, sahteciliğin ortaya çıkarılması ve besin içeriğinin analiz edilmesi gibi birçok alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tekniklerin gelişmesi, gıda analizlerinin daha hızlı, doğru ve verimli biçimde yapılmasına olanak sağlamaktadır.

## 2 GIDA GÜVENLİĞİ VE KALİTE KONTROLÜ

### 2.1 Gıda Güvenliği Kavramı ve Önemi

Gıda güvenliği, sağlıklı beslenme ve genel yaşam kalitesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Son yıllarda dünya genelinde görülen yeni hastalıklar, bu konunun ne denli kritik olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur. Gıdalardan bulaşan hastalıklar, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde halk sağlığını tehdit etmektedir. Özellikle çocuklar, yaşlı bireyler ve hamile kadınlar bu hastalıklardan daha fazla etkilenme riski taşımaktadır. Bu tür sağlık sorunları, yaşam kalitesini olumsuz yönde etkileyerek ciddi sağlık tehditlerine yol açabilmektedir (Şeminur T, 1996).

Gıda güvenliğinin esas hedefi, gıdaların üretimden tüketime kadar geçen süreçte biyolojik, kimyasal veya fiziksel herhangi bir tehlike barındırmamasını sağlamaktır. Bu bağlamda, restoranlar, oteller ve pastaneler gibi gıda üretimi gerçekleştiren işletmelerin yalnızca kaliteli ürün sunmaları yeterli değildir; aynı zamanda bu ürünlerin güvenli koşullarda üretilmiş olması da son derece önemlidir. Bu doğrultuda, Gıda Güvenliği Yönetim Sistemleri, hem işletmelerin sorumluluklarını yerine getirmesi hem de toplum sağlığının korunması açısından kaçınılmaz bir ihtiyaç haline gelmiştir (İrfan E, 2007).

Gıda güvenliğinin esas hedefi, gıdaların üretimden tüketime kadar geçen süreçte biyolojik, kimyasal veya fiziksel herhangi bir tehlike barındırmamasını sağlamaktır. Bu bağlamda, restoranlar, oteller ve pastaneler gibi gıda üretimi gerçekleştiren işletmelerin yalnızca kaliteli ürün sunmaları yeterli değildir; aynı zamanda bu ürünlerin güvenli koşullarda üretilmiş olması da son derece önemlidir. Bu doğrultuda, Gıda Güvenliği Yönetim Sistemleri, hem işletmelerin sorumluluklarını yerine getirmesi hem de toplum sağlığının korunması açısından kaçınılmaz bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Gıda güvenliği, tüketiciye ulaşan gıdanın herhangi bir risk unsuru taşımamasıyla doğrudan bağlantılıdır. Bu tür riskler, gıda üretim zincirinin herhangi bir noktasında meydana gelebilir. Bu nedenle, zincirin her aşamasında etkili kontrol önlemlerinin uygulanması oldukça önemlidir. Özetle, gıda güvenliği; tarladan sofraya kadar uzanan süreçte tüm paydaşların sorumluluk üstlenmesiyle sağlanabilecek kapsamlı bir yaklaşımı gerektirir (Teslime M, 2010).

Gıda güvenliği, gıdalarda yer alabilecek fiziksel, kimyasal, biyolojik ve diğer zararlı etkenlerin giderilmesine yönelik tüm tedbirleri kapsar. Dar anlamıyla güvenli gıda; amacı

doğrultusunda üretilmiş, mikrobiyolojik, kimyasal ve fiziksel açıdan tüketim için uygun olan ve besin değerini koruyan ürünler olarak tanımlanabilir (Mehmet D, 2010).

Gıda güvenliği, yalnızca gıdaların tüketime uygun olmasını değil, aynı zamanda bireylerin gıdalardan kaynaklanabilecek sağlık tehlikelerine karşı korunmasını da içerir. Bu güvenliği tehdit eden faktörler; biyolojik, kimyasal ve fiziksel kirlenmelerin yanı sıra, üretim sürecindeki yanlış uygulamalardan da ortaya çıkabilir. Bu sebeple, güvenli gıdaya erişim, sadece belli bir grubun değil, gıda zincirindeki tüm paydaşların sorumluluklarını yerine getirmesiyle sağlanabilir (Teslime M, 2010).

Gıda güvenliği ve kalitesinin temin edilmesi, gıda sektöründe etkili biçimde uygulanan güvenlik ve kalite yönetim programları sayesinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür programlar, ürünlerin güvenliğini sağlarken aynı zamanda tüketicilerin sağlığını korumaya da önemli ölçüde katkı sunmaktadır.

## **2.2 Gıda Kalite Kontrolünün Temel İlkeleri**

Günümüzde kalite kavramıyla oldukça sık karşılaşılmaktadır ve bu kavram çeşitli yayınlarda sanayide ve uygulamada farklı şekilde kullanılmaktadır (Yıldız, M., & Kaya, H.,2024).

Tüketiciler, bir ürünün kalitesini değerlendirirken genellikle çeşitli kriterlere önem vermektedir. Bunlar arasında ürünün hem uygun fiyatlı hem de kaliteli olması, yapısının sade ve kullanışlı olması, tüm ihtiyaçları karşılayabilmesi, uzun süre arızalanmadan kullanılabilmesi, diğer markalara göre daha hassas çalışması (örneğin gramın binde birini ölçebilmesi), biraz daha pahalı olsa da düşük bakım ve onarım maliyeti gibi unsurlar öne çıkmaktadır.

Kalite seviyesini belirlemek kadar, bu kaliteyi ölçebilmek de büyük önem taşır; ancak bu süreç sanıldığı kadar basit değildir. Zorluklar yalnızca nicel verilerden değil, aynı zamanda nitel unsurlardan da kaynaklanmaktadır. Müşteriler, genellikle bir ürün ya da hizmeti altı farklı açıdan değerlendirerek kaliteye karar verirler.

Mal ve hizmet kalitesi, işletmeler için yalnızca operasyonel değil, aynı zamanda stratejik bir öneme sahiptir. Bir ürün ya da hizmetin kalitesi; belirlenen fiyat, piyasa koşulları ve arz-talep dengesi gibi çeşitli etkenlerle şekillenir.

Kalite, önemli bir kavram olarak, köken olarak cisimlerin doğasından kaynaklanmaktadır. Doğada bulunan tüm varlıklar, doğa koşullarının etkisiyle farklılık gösterir ve her biri farklı özelliklere sahiptir. Bu doğal farklılıklar, üretim sürecinde kullanılan girdilerle başlayarak, üretim aşamasında devam eder ve özellikle nihai ürünlerde belirginleşir. Bu bağlamda kalite, bir anlamda, kabul edilebilir maliyetle, değişkenliği kontrol altına alarak elde edilen mükemmelliğin derecesidir. Belirli özelliklerin tatmin edici düzeyde olması, standartlara uygunluk gerektirdiğinden, kaliteyi sağlamak, kontrolü de beraberinde getirir. Bu sebeple, kaliteyi belirli bir seviyede tutmak isteyen işletmeler, "Kalite Kontrol" yöntemlerinden yararlanırlar. Kalite kontrol, sadece üretim ve dağıtım süreçlerinde değil, aynı zamanda üretim öncesi tasarım aşamasında da uygulanır. Üretim yöneticisinin temel sorumluluklarından biri, kaliteli ürün ya da hizmeti doğru zamanda, doğru yer ve fiyatla sunmaktır. Üretim yöneticisi, kullanıcı talepleri doğrultusunda belirlenen standartlarla ve özelliklere uygun bir kalite kontrol sistemini üretim aşamasında oluşturur. Genellikle kalite iyileştirmeleri, maliyetlerin düşürülmesiyle ilişkilendirilir ve bu, mal ve hizmetlerin kalitesi üzerinden tanımlanır. Örneğin; yüksek kaliteli bir halı, birim alanda en fazla düğüme sahip olan halıdır. Ancak bir firma yalnızca bu tanımlamaya dayanarak üretim yapmaz. Beklenen kalite seviyesini sağlamak için, belirli girdilerin kalitesi ya da üretim sürecinin test edilmesi gerekir.

Kalite kontrol ekibi ya da sorumlu kişiler, denetim yapılacak ürünlerin büyüklükleri ve sıklıkları konusunda ekonomik açıdan en uygun yaklaşımı belirlerler. Denetimlerin ne zaman ve nerede yapılacağı ise, sürecin türüne ve her aşamada eklenen değere göre şekillenir. Kalitenin korunması için yapılan tüm işlemler, kalite kontrolü olarak tanımlanır.

Bu üç aşamalı süreçlerin sonunda, tatmin edici olmayan ya da hatalı girdilerin üretim sürecine katılımı minimize edilir ve hatalı ürünlerin yer aldığı partilerin satışa sunulma oranı oldukça düşürülür. Belirli kalite özelliklerine sahip ve bu özellikleri taşıdığı onaylanan girdiler, üretim sürecinde istenen gereksinimlere ve pazar taleplerine uygun çıktılar elde edilmesini sağlar. Girdi materyallerinin kontrolü, iki şekilde uygulanır (Gümüsoğlu, Ş, 2000).

Kalite ile ilgili ilk düzenlemeler, tarihsel olarak çok eski zamanlara dayanmaktadır. M.Ö. 2150 yılında Hammurabi Yasaları'nda, ürünlerin ve hizmetlerin belirli bir standarda uygun olmasını sağlamak için bazı kurallar ve cezalar getirilmiştir. Eski Mısır'da ise,

M.Ö. 1450 civarında, taş blokların düzgünlüğünü kontrol etmek amacıyla muayene elemanları, bu blokların yüzeylerini bir tel yardımıyla doğrularlardı. Bu tür denetim yöntemleri, Orta Amerika'da Aztekler tarafından da kullanılmıştır; taş yapılarının inşasında kaliteyi sağlamak için benzer teknikler uygulamışlardır.

13. yüzyılda ise, çıraklık ve esnaf loncaları önemli bir gelişim göstermiştir. Ustalar, yalnızca üretim sürecini değil, aynı zamanda eğitim ve denetim işlevlerini de yerine getiriyorlardı. Bu dönemde kalite, ustaların kişisel beceri ve deneyimleriyle doğrudan ilişkilendirilmişti. Esnaf loncaları, ürünlerin belirli kalite standartlarına uygun olmasını sağlamak için ortak kurallar koymuş ve kaliteyi denetlemek amacıyla ustalar bu kuralların uygulanmasını sağlamakla yükümlüydüler.

Ayrıca, yönetim tarafından oluşturulan bazı standartlar, örneğin ağırlık ve ölçü birimleri, kalite kontrolü için bir temel oluşturmuştu. Bu dönemde, bir tek kişi genellikle tüm üretim süreçlerini denetleyebilir ve tek bir kalite standardı belirleyebilirdi. Böylece, hem ürünlerin homojenliği sağlanmış hem de toplumda kalite güvence altına alınmış oluyordu. Bu sistem, ilerleyen zamanlarda endüstriyel üretim süreçlerinde kalite kontrolünün temellerinin atılmasına zemin hazırlamıştır.

19. yüzyılda, modern endüstriyel sistemin doğuşuyla birlikte, ABD'de Frederick Taylor iş gücünün yönetimi konusunda devrim niteliğinde bir değişim başlatmıştır. Taylor, iş planlaması ve iş süreçlerinin kontrolünü işçilere ve denetçilere bırakmak yerine, bu sorumluluğu Endüstri Mühendisliği'ne devrederek bilimsel yönetimin temellerini atmıştır. Bu yaklaşım, iş gücünü daha verimli ve sistematik bir şekilde organize etmeyi hedeflemiştir. Bu dönemin bir başka önemli figürü olan Henry Ford, Ford Motor Şirketi'nde montaj hattını kullanmaya başlamış ve bu yöntemle üretim süreçlerini büyük ölçüde dönüştürmüştür. Hareketli montaj hattı ile karmaşık üretim süreçleri daha küçük, daha yönetilebilir parçalara ayrılmış ve böylece daha düşük maliyetle, daha hızlı ve yüksek miktarda ürün üretimi yapılmaya başlanmıştır. Bu süreç, aynı zamanda ürünlerin daha standart hale gelmesini ve daha geniş kitlelere ulaşmasını sağlamıştır. Ancak, bu üretim modeliyle birlikte kalite kontrolü önemli bir sorun haline gelmiştir. Üretim hızının ve miktarının ön planda tutulması, ürünlerin kalitesinin geride kalmasına yol açmıştır. Bu dönemde üretim yöneticilerinin en büyük önceliği, yüksek hacimli üretim yapabilmektir. Ürün kalitesi ise, genellikle ikincil bir öneme sahipti. Yönetici ve işçi için, üretim hedeflerine ulaşamamak işten çıkarmalara neden olabilirken, düşük kaliteli ürünlerin

üretilmesi genellikle sadece kınanmakla sonuçlanıyordu. Bu durum, kalitenin üretim sürecinde göz ardı edilmesine neden olmuş, ancak bir noktada üst yönetim, bu sistemin kaliteye zarar verdiğini fark etti. Bunun sonucunda, kalite kontrolünü sağlamak amacıyla "muayene elemanı şefliği" gibi bir pozisyon oluşturuldu. Bu yeni rol, üretim sürecinde kaliteyi denetlemek ve kötü ürünlerin ayrılmasını sağlamak için kurulmuş bir sistemin parçasıydı. Ford'un montaj hattı üretim sistemi, verimlilik açısından büyük bir başarı sağlasa da, kalite kontrolü konusunda yeni bir yaklaşım gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu dönemde kalite, genellikle üretim sürecinin sonunda muayene edilerek sağlanmaya çalışılmıştır. Ancak bu, üretim sürecinin erken aşamalarında kaliteyi güvence altına almak için yeterli değildi. Sonuç olarak, üretim ve kalite yönetiminin daha entegre bir şekilde çalışması gerektiği fikri giderek güçlenmiş ve kalite kontrolü, endüstriyel üretimin temel taşlarından biri haline gelmiştir.

1920 ile 1940 yılları arasında endüstriyel teknolojide önemli bir değişim yaşanmış ve bu dönemde kalite yönetimiyle ilgili yeni yaklaşımlar benimsenmiştir. Bell System ve Western Electric, özellikle bölümler arası koordinasyon eksiklikleri ve ürünlerdeki kusurlar nedeniyle karşılaştıkları sorunları çözmek amacıyla kalite kontrolünü sistematik bir şekilde ele almaya başlamışlardır. Bu süreç, Muayene Mühendisliği Bölümü'nün kurulmasıyla resmîyet kazanmıştır. Bu alandaki öncülüğü ise Bell çalışanlarından George Edwards ve Walter Shewhart üstlenmiştir. Edwards, kalite güvence terimini ilk kez kullanmış ve kalite yönetiminin sorumluluğunun üstlenilmesi gerektiğini savunmuştur. Ona göre, kaliteli ürünler yalnızca şansa bağlı olarak veya iyi niyetle elde edilemez; kalite, dikkatlice planlanmış ve sistematik bir yaklaşım gerektirir.

Edwards'a göre, kalite sadece bir bölüm ya da departman sorumluluğunda olmamalı, tüm organizasyonel yapının birleşik çabalarıyla sağlanmalıdır. Kalite, tasarım, mühendislik, teknik ve kalite planlama, üretim yerleşimi, standartlar, personel gibi tüm organizasyonel bölümlerin uyumlu ve koordineli bir şekilde çalışmasının sonucu olarak ortaya çıkar. Bu anlayış, kalite kontrolünün sadece üretim ya da denetim aşamalarında değil, kuruluşun her bir departmanında ön planda tutulması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, organizasyon şemasında kalite kontrol programından sorumlu olacak bir yönetici pozisyonu eklenmesi gerektiği önerilmiştir. Bu yaklaşım, kaliteyi bir organizasyonel sorumluluk olarak görüp, tüm birimin aktif bir şekilde katılımını sağlamayı hedeflemiştir (Akkurt. M, 2002).

Kalitenin iki ana yönü bulunmaktadır: birincisi kalitenin yaratılması, ikincisi ise kalitenin ölçülmesidir. Ölçme süreci, üretimin yapıldığı ortamda gerçekleştirilenlerin belirlenmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Ancak, yalnızca otomatik ya da içsel ölçümlerle kontrol sağlamak yeterli değildir. Gerçekleştirilen süreçlerin detaylı bir şekilde analiz edilmesi, hedeflenen ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve değerlendirilmesi gereklidir. Bunun için kalite kontrolün getirdiği bazı çalışmalar vardır. Bunlar şöyle sıralanabilir.

Kontrol, belirli bir faaliyet veya süreç için önceden belirlenmiş kurallar doğrultusunda hedeflerin gerçekleştirilmesini sağlama işlevi olarak tanımlanabilir. Feigenbaum'a göre, kontrol, yönetsel bir faaliyet kapsamında yetki ve sorumlulukların devredilmesi süreciyle açıklanır. Bu delege etme, yöneticilerin gereksiz ayrıntılarla zaman kaybetmeden yalnızca sonuçları gözden geçirmelerini ve gerektiğinde hızlı ve etkili düzeltici kararlar almalarını kolaylaştırır. İşletme yönetiminin her alanında kontrol fonksiyonu bulunur. Maliyet, finans, insan kaynakları, stok yönetimi, satış ve üretim gibi konularda olduğu gibi, kalite yönetimi de bu kontrol işlevinden faydalanan bir alandır (Bozkurt. R, 1998).

Kalite kontrolün temel hedefi, tüketici beklentilerini en ekonomik şekilde karşılayan ürünlerin üretilmesidir. Bu hedefe ulaşmak için yalnızca kalite kontrol biriminin değil, tüm işletme departmanlarının belirli oranlarda sorumluluk taşıması gerekir. Ancak, bu amacın gerçekleştirilmesi için harcanan çabaların koordinasyonu ve etkinliğinin artırılması sorumluluğu, kalite kontrol departmanına ait olmalıdır (Montgomery, D.C, 2000).

Kalite kontrolün ana amacına hizmet eden birkaç alt hedef de belirlenebilir. İş bölümünde görev ve sorumlulukların net bir şekilde dağıtılmasını sağlamak ve böylece ana hedefin gerçekleştirilmesini kolaylaştırmak amacıyla aşağıdaki alt hedefler belirlenebilir:

Bu alt hedeflerden bazıları, üretim, satış veya personel gibi diğer departmanlar için ana hedef olabilmektedir. Ancak, işletme organizasyonunda farklı departmanların amaçları arasında hem olumlu yönde işbirlikleri hem de zaman zaman çelişkiler olması bir dereceye kadar normaldir.

Günümüzde etkili bir kalite kontrol sistemi kurmaya başlayan bir işletmede, yukarıda belirtilen alt hedeflerden bazılarında öncelik verilmesi gereklidir. Kuruluşun başlangıç aşaması ve uyum sağlama süreci göz önünde bulundurulduğunda, ilk etapta yalnızca birkaç alt hedefin gerçekleştirilmesine odaklanmak daha uygun bir yaklaşım olacaktır. İlk

yıllarda elde edilen olumlu sonuçlarla birlikte, bu hedeflerin kapsamı daha geniş bir şekilde genişletilebilir. Aslında, amaçlar arasında bir bağılılık bulunmaktadır, bu nedenle bir hedefte elde edilecek başarı, diğer hedeflere de olumlu bir etkide bulunma potansiyeline sahiptir (Ünver. Ö, 1977).

### **2.3 Geleneksel ve Modern Analiz Yöntemleri**

Gıda güvenliği, tüketicilerin sağlığını korumak amacıyla gıdaların üretiminden tüketime kadar olan tüm aşamalarda mikrobiyolojik, kimyasal ve fiziksel risklerin yönetilmesini içerir. Bu süreçte, kullanılan analiz yöntemleri genellikle geleneksel (klasik) ve modern (ileri teknolojiye dayalı) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir.

#### **Geleneksel Gıda Analiz Yöntemleri**

##### **1. Mikrobiyolojik Yöntemler:**

- Plaka Sayım Yöntemi (Koloni sayımı): Bakteri, küf ve maya gibi mikroorganizmaların belirlenmesi.
- Gram Boyama: Mikroorganizmaların sınıflandırılması.
- Most Probable Number (MPN): Özellikle düşük mikrobiyal yükte tahmini mikrobiyal yoğunluk belirleme (Downey G. 1998).

##### **2. Kimyasal Yöntemler:**

- Titrasyon: Asitlik, bazlık, serbest yağ asidi vb. ölçümü.
- Distilasyon: Uçucu bileşiklerin ayrıştırılması (örn. alkol analizi).
- Gravimetrik Analiz: Katı madde, kül, nem oranı gibi analizler.

##### **3. Duyusal Analiz:**

- Renk, tat, koku ve dokunun insan duyuları aracılığıyla değerlendirilmesi.

##### **4. Fiziksel Analizler:**

- Nem ölçümü (kurutarak tartım):
- Yoğunluk, viskozite, pH ölçümleri: (John Dennis M, 1998.)

## Modern Gıda Analiz Yöntemleri

### 1. Moleküler Biyolojik Yöntemler:

- PCR (Polimeraz Zincir Reaksiyonu): Mikroorganizmaların DNA'sını çoğaltarak hızlı ve hassas tespit.
- RT-PCR: Canlı patojenlerin tespiti.
- DNA Çipleri (Microarray): Birden çok mikroorganizmanın aynı anda tespiti.

### 2. Spektroskopik Yöntemler:

- FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy): Gıdanın kimyasal yapısını analiz eder.
- NIR (Yakın Kızılötesi Spektroskopi): Yağ, protein, nem içeriği gibi bileşenlerin hızlı analizi.
- UV-Vis Spektrofotometri: Renkli bileşiklerin analizi.

### 3. Kromatografik Yöntemler:

- GC (Gaz Kromatografisi): Uçucu bileşenlerin ayrımı.
- HPLC (Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi): Pestisit, katkı maddesi, vitamin gibi maddelerin tayini.
- LC-MS/MS (Sıvı Kromatografi-Kütle Spektrometresi): Çok düşük seviyedeki kirleticilerin tespiti.

### 4. Biyosensörler:

- Canlı hücre, enzim veya antikor içeren sensörlerle toksin, patojen veya kontaminant tespiti.

### 5. İmmünolojik Yöntemler:

- ELISA (Enzim Bağlantılı İmmünosorbent Analizi): Belirli protein veya toksinlerin hızlı tespiti (Ali, M. E., ve diğ. 2018).

**Tablo 1.1***Geleneksel ve Modern Analizlerin Ksrşılaştırma Tablosu*

<b>Özellik</b>	<b>Geleneksel Yöntemler</b>	<b>Modern Yöntemler</b>
Hız	Düşük	Yüksek
Duyarlılık	Orta	Çok yüksek
Maliyet	Düşük-orta	yüksek
Ekipman ihtiyacı	Az/temel	Gelişmiş teknolojik cihazlar
Eğitim gereksinimi	Temel düzey	Uzmanlık gerektirir

### 3 SPEKTROSKOPİK YÖNTEMLERİN TEORİK TEMELLERİ

#### 3.1 Spektroskopinin Temel İlkeleri

Spektroskopi, ışığın maddeyle etkileşimini inceleyen bir bilim dalıdır.

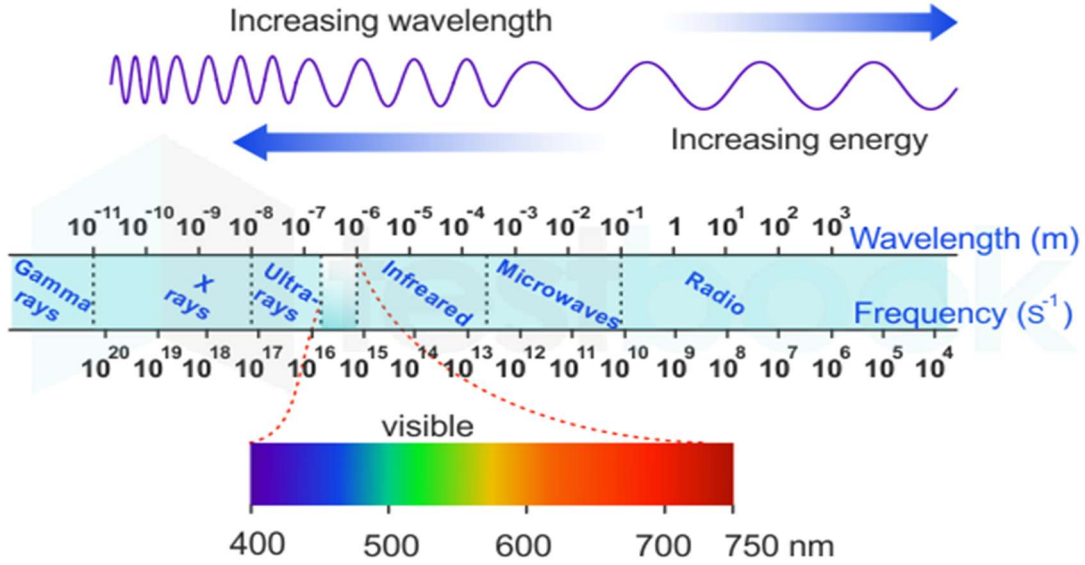
Spektroskopi, bir örnekteki atom, molekül veya iyonların enerji seviyeleri arasında geçiş yaparken emdikleri veya yaydıkları elektromanyetik ışımının ölçülmesi ve analiz edilmesi olarak da tanımlanabilir.

Spektroskopi, en genel anlamıyla, yüklü veya yüksüz parçacıkların maddeyle etkileşerek ortaya çıkan olayların incelenmesi olarak tanımlanabilir.

Elektromanyetik ışımaya, uzayda yüksek hızda hareket eden bir enerji formudur. Bu ışımının en yaygın türleri, gözle görebildiğimiz görünür ışık ve ısı olarak hissettiğimiz infrared ışınlarıdır (Bagheri, R. ve diğ. 2018).

Şekil 3.1

*Elektromanyetik Işıma, İnfrared Işınları*



<https://testbook.com/objective-questions/mcq-on-electromagnetic-spectrum--5eea6a1339140f30f369efeb>

Elektromanyetik ışımaya, hem dalga hem de tanecik (foton) özelliği gösteren bir enerji formudur. Dalga özelliği, interferans (girişim) ve difraksiyon (kırınım) gibi davranışlarla açıklanabilir. Bu fenomenler, ışımının bir dalga olarak yayılmasını ve engellerle karşılaştığında farklı şekillerde etkileşmesini ortaya koyar. Öte yandan, elektromanyetik ışımının tanecik özelliği, özellikle fotoelektrik etki gibi olaylarda gözlemlenir. Fotoelektrik olayda, bir metal yüzeyine düşen ışığın enerjisi, yüzeydeki elektronları

serbest bırakır. Bu olay, ışığın enerji paketleri (fotonlar) aracılığıyla maddeye etki ettiğini gösterir. Ayrıca, ışımanın madde tarafından emilmesi (soğurulması) veya yayılması (emisyonu) da bu tanecik özelliğiyle açıklanabilir. Işımanın madde ile etkileşimi, fotonların enerjilerinin maddeye aktarılması veya maddenin ışığa yoluyla enerji yayması şeklinde gerçekleşir. Bu iki özellik, elektromanyetik ışımanın hem dalga hem de parçacık şeklinde davranabilme yeteneğini ortaya koyar ve modern fizik anlayışının temel taşlarından biri haline gelir.

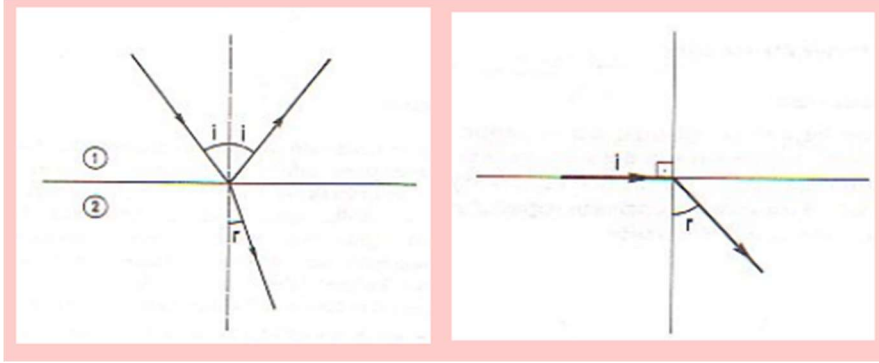
### **3.1.1. Elektromanyetik ışımaya-madde etkileşimleri**

#### **Işımanın kırılması ve yansımaları:**

Işıma, bir ortamdan başka bir ortama geçtiğinde, ışığın bir kısmı yansıtılarak geri dönerken, bir kısmı da yeni ortama geçer. Bu geçiş sırasında, ışığın frekansı değişmeden kalır, ancak hızında ve ilerleme yönünde değişiklikler meydana gelir. Işımanın bir ortamdan diğerine geçerken yön değiştirmesi olayı, kırılma (refraksiyon) olarak adlandırılır. Kırılma, ışığın hızının farklı ortamların optik yoğunluklarına göre değişmesi nedeniyle gerçekleşir. Bir ortamdan başka bir ortama geçerken, ışığın hızındaki bu değişim, ışık demetinin yönünü etkiler ve ışık çizgisi eğilir. Bu olay, örneğin hava ile su arasında ışığın geçişinde sıkça gözlemlenir. Havanın optik yoğunluğu suya göre daha düşüktür, bu yüzden ışık suya girdiğinde hızını kaybeder ve doğrusal hareketini değiştirerek kırılır. Kırılma açısı, ışığın geldiği ortamın yoğunluğu ile ışığın geçeceği ortamın yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Bu durum, Snell Yasası ile matematiksel olarak ifade edilebilir ve ışığın geçiş yaptığı her iki ortamın kırılma indislerinin oranına göre ışığın kırılma açısını belirler. Kırılma olayı, birçok uygulama ve optik cihazda önemli bir rol oynar; örneğin, lenslerin ve gözlüklerin tasarımında veya mikroskop ve teleskop gibi optik aletlerde.

### Şekil 3.2

#### Kırılma İndisleri



Altınışık, M. (2004).

Her maddenin farklı bir kırılma indisi ( $n$ ) değerine sahip olduğu, kritik açı ölçümleri ile belirlenmiştir. Kırılma indisi, bir maddede ışığın hızının vakumdaki hızına oranı olarak tanımlanır ve maddelerin optik özelliklerinin belirgin bir göstergesi haline gelir. Bu değer, her maddenin ışıkla etkileşimini farklı şekilde belirler ve bu yüzden önemli bir fiziksel parametre olarak kabul edilir. Kırılma indisinin ölçülmesi, çeşitli analizlerde yaygın olarak kullanılır; özellikle refraktometri yöntemiyle, bir maddenin saf olup olmadığını ve saflık seviyesini belirlemek için kullanılabilir. Ayrıca, karışımların nicel analizlerinde, bileşenlerin oranlarını ölçmede de refraktometre kullanılır (Abe K., ve diğ. 2007).

Refraktometri, ışığın bir maddeye girmesiyle kırılma açısını ölçen bir tekniktir. Kırılma açısı, ışığın maddeye girerken nasıl bir sapma gösterdiğini anlamamıza yardımcı olur. Bu yöntem, özellikle sıvıların ve şeffaf maddelerin analizinde oldukça kullanışlıdır. Refraktometre, bu ölçümü gerçekleştiren cihazdır ve genellikle optik bir prizmadan geçen ışık ışınının kırılma açısını ölçer. Refraktometre, madde içindeki bileşenlerin yoğunluğu ve konsantrasyonu hakkında bilgi verir. Bu cihaz, gıda endüstrisi, kimya ve biyoloji alanlarında yaygın olarak kullanılır, aynı zamanda tıbbi testlerde de önemli bir rol oynar.

Örneğin, idrarın dansitesini ölçerken refraktometre kullanmak, vücutta su dengesi, böbrek fonksiyonları veya hastalıkların teşhisinde yardımcı olabilir. İdrar örneği üzerinde yapılan refraktometri ölçümleri, idrarın yoğunluğuna dair bilgi verir ve bu da sıvı kaybı, hidrasyon seviyesi ya da bazı sağlık durumlarının belirlenmesine katkı sağlar. Bu yöntem, klinik testlerde, laboratuvar analizlerinde ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda, maddenin içeriği ve saflığını analiz etmek için sıklıkla kullanılır.

### **Işımanın saçılması:**

Saçılma, bir fotonun bir numunedeki parçacıklarla çarpıştıktan sonra yön değiştirmesiyle meydana gelir.

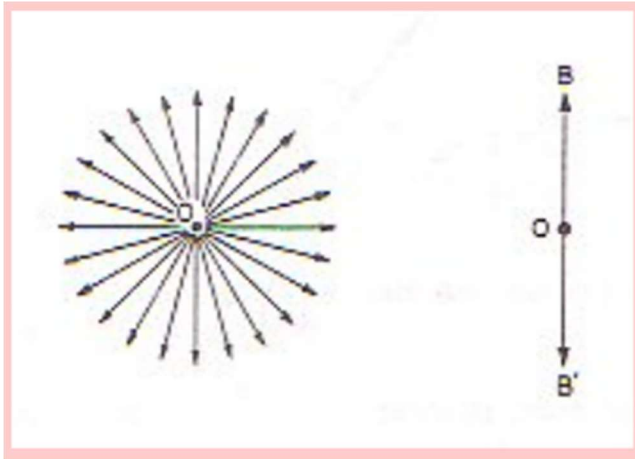
- Görünür ışık kullanıldığında koloidal ve bulanık sıvılarda görülen saçılma Tyndall'dır.
- Rayleigh saçılması, çözülmüş moleküllerden veya çok atomlu iyonlardan gelen parçacıkların çarpışmasıyla meydana gelir.
- Raman saçılması, ışığı saçan moleküllerin titreşimsel enerji seviyelerine bağlı olarak parçacıklarla etkileşen dalga boyunun değiştiği bir saçılma biçimidir.

### **Işımanın polarizasyonu:**

Işık dalgaları genellikle farklı düzlemlerde ilerleyen dalgaların birleşiminden oluşur. Ancak, sadece bir düzlemde ilerleyen ışık dalgası, düzlemsel polarize ışık olarak adlandırılır. Düzlemsel polarize ışık, özel bir özelliğe sahip olup, ışık dalgasının vibrasyonlarının yalnızca tek bir düzlemde gerçekleşmesini sağlar. Bu tür ışık, asimetrik yapıya sahip ve ışığı absorplamayan maddelerle etkileşime girdiğinde, polarize ışığın doğrultusu değişir. Bu değişim, ışığın düzleminin sağa (+) veya sola (-) doğru kayması şeklinde gerçekleşir.

#### **Şekil 3.3**

*Işıma Polarizasyonu*



### **Işımanın absorpsiyonu ve emisyonu:**

Kuantum mekaniğine göre, atomlar yalnızca belirli enerji seviyelerinde var olabilirler ve bu seviyeler, atomun elektron düzenlemeleri ve dış elektronlarının belirli enerji düzeyleri

arasındaki geçişlere bağlıdır. Elektronların bir enerji seviyesinden diğerine geçişleri, atomik spektrumların oluşumunu sağlar.

$h$ →Plank sabiti ( $6,63 \times 10^{-34}$ )

$\nu$ →frekans

Atomlar, elektromanyetik ışımının enerjisini emerek, en düşük enerji seviyesinden (temel durum) daha yüksek enerji seviyelerine (uyarılmış durum) geçerler. Bu enerji geçişleriyle ilgili olarak, her bir atomun karakteristik absorpsiyon spektrumları da ortaya çıkmaktadır.

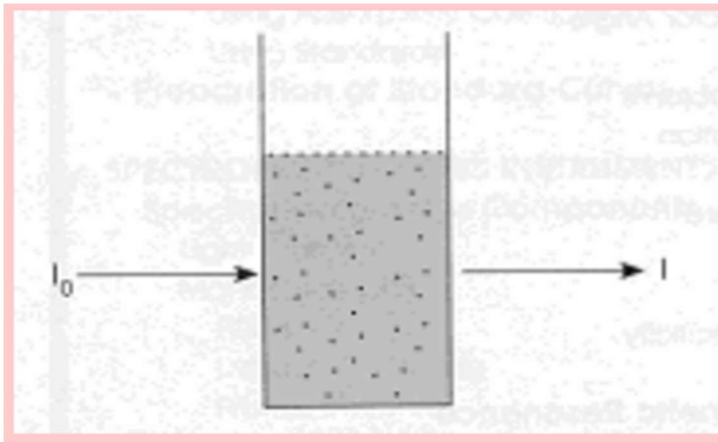
Elektromanyetik ışımayı absorbe ederek temel enerji seviyesinden (temel durum) uyarılmış enerji seviyelerine yükselen atomlar, ardından bu yüksek seviyeden temel düzeye geri dönerken ultraviyole veya görünür ışık bölgesinde ışımaya yaparak enerji salarlar (emisyon). Bu süreç her atom için özgül bir emisyon spektrumu oluşturur.

Moleküller de atomlar gibi belirli bir enerjiye sahip fotonlarla etkileşime girdiklerinde bu fotonları absorbe ederek uyarılmış bir duruma geçerler. Uyarılmış moleküller, kararsız hallerinden kurtulmak için fazla enerjilerini yayarak bu durumu dengeye getirirler (moleküler emisyon). Moleküllerin emisyon spektrumları, atomların spektrumlarından daha karmaşık yapılar sergileyerek belirlenir.

Absorbe edilen fotonların sayısı, ortamda bulunan ışımayı absorbe eden türlerin sayısı ile doğru orantılıdır. Monokromatik ışık, başlangıçtaki  $I_0$  şiddetinde ortama girdiğinde, ortamdaki daha düşük bir  $I$  şiddetiyle çıkar (Büyükyıldız. M, 2016).

#### Şekil 3.4

*Absorbe Edilen Fotonların Sayısı*



Altınışık, M. (2004).

### 3.2 Gıda Analizinde Kullanılan Spektroskopik Tekniklerin Sınıflandırılması

Tüketicilerin gıda tercihlerinde yaşam tarzı, kültürel değerler, dini inançlar, diyet tercihleri ve sağlık endişeleri önemli faktörler arasında yer alır. Özellikle Müslüman nüfusun yoğun olduğu toplumlarda, gıda seçiminde en belirleyici unsurlardan biri, gıdanın helal olma şartıdır.

Gıdalar, bazen istem dışı veya daha fazla kazanç sağlama amacıyla kasıtlı olarak kimyasal maddeler veya fiziksel işlemlerle işlenebilir. Ancak, bu tür uygulamaların önlenmesi veya en aza indirilmesi için yasal düzenlemeler yapılmaktadır. Dünyanın dört bir yanında olduğu gibi, ülkemizde de gıda taşıması sorunları yaşanmakta ve bu tür durumların engellenmesi, hem tüketiciler hem de üreticiler için kritik bir öneme sahiptir. Gıda güvenliği ve helallik doğrulama, gıda endüstrisinde önemli bir yer tutmakta ve bu süreçte kullanılan analitik yöntemler büyük rol oynamaktadır (D A Skoog, J J Leary, 1992).

Helal gıda doğrulaması için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bazıları, polimeraz zincir reaksiyonu (PCR), enzim bağlı immünosorbent deneyleri (ELISA), kütle spektrometrisi (MS), kromatografik teknikler, elektronik burun ve çeşitli spektroskopik tekniklerdir. Bu yöntemlerin her biri, gıda örneklerinin kimyasal bileşenlerinin doğru ve güvenilir bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlar. Spektroskopik teknikler, özellikle gıda bileşenlerinin analizinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Geliştirilen yeni spektroskopik metotlar, gıda örneklerinin kimyasal kompozisyonunun belirlenmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır.

Spektroskopik yöntemler, farklı enerji düzeylerine sahip ışınların maddeyle etkileşmesini inceleyerek örneklerin kimyasal bileşenlerini ortaya koyar. Çeşitli spektroskopi teknikleri, farklı frekans aralıklarında çalışmakta ve analiz edilen süreç ile enerji değişim büyüklüğüne göre farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin, Fourier Dönüşümü NMR (Nükleer Manyetik Rezonans) ve FTIR (Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopi) gibi teknikler, gıda bileşenlerini yüksek hassasiyetle analiz etmede kullanılmaktadır. Ayrıca, bu spektroskopik yöntemlerin hızlı ve non-destrüktif (örneklere zarar vermeyen) olmaları, gıda endüstrisinde sıkça tercih edilmelerini sağlamaktadır.

Fourier dönüşümü, NIR (Yakın Kızılötesi), MIR (Orta Kızılötesi), Raman spektroskopisi ve üstün uzaysal görüntüleme spektroskopisi gibi spektroskopik teknikler, endüstriyel gıda ürünlerinin kalite kontrolü ve doğrulama işlemlerinde oldukça hassas ve hızlı sonuçlar sunan analitik yöntemler olarak tanınmaktadır. Bu metotlar, gıdalara minimum

zarar verirken aynı zamanda nispeten düşük maliyetle sonuç elde edebilen modern teknolojilerdir. Geleneksel kimyasal analiz yöntemlerine göre bu teknikler, daha hızlı ve daha verimli sonuçlar sunduğu için son yıllarda gıda sektöründe önemli bir yer edinmiştir.

Bu spektroskopik yaklaşımlar, standart kimyasal prosedürler yerine tarımsal ve gıda ürünlerinin nitel ve nicel olarak analiz edilmesinde kullanılır. Özellikle, zaman alıcı ve karmaşık kimyasal işlemler gerektiren analizlere karşı, bu modern teknikler gıda güvenliği ve kalitesinin daha etkin bir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, gıda ürünlerinin içeriğinin belirlenmesi, saflık düzeylerinin tespiti ve kalite kontrolü gibi önemli süreçlerde de kullanılır.

Gıda endüstrisinde, özellikle gıda tağşişi ve hileleriyle ilgili birçok örnek bulunmaktadır. Örneğin, Çin'de 2007 yılında buğday gluteni örneklerine protein oranını artırmak amacıyla melamin eklenmiş, bu durum sağlık açısından ciddi endişelere yol açmıştır. Aynı şekilde, 2008 yılında yine Çin'de süte melamin ilavesi yapılmış ve bu olay, gıda güvenliği açısından büyük bir skandala dönüşmüştür. Hindistan'da ise 2012 yılında sütlere deterjan, yağ ve üre karıştırılması gibi hileler yapılmıştır. Bu tür tağşişler, gıda ürünlerinin kalitesini ve güvenliğini tehdit eden ciddi sorunlardır.

Son yıllarda, özellikle Çin'de, su ürünlerinin ağırlığını artırmak amacıyla jelatin benzeri kimyasalların gıdalara eklenmesi gibi yeni hileli uygulamalar da ortaya çıkmıştır. Bu tür uygulamalar, gıda sektöründe güvenlik risklerini artırmakta ve tüketici sağlığını tehdit etmektedir.

Modern spektroskopik yöntemler, bu tür tağşişlerin hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesini sağlamak için etkili araçlar sunmaktadır. Bu yöntemler, gıda üreticilerinin ve düzenleyici otoritelerin, güvenli ve kaliteli gıda sağlama çabalarını destekleyerek, tüketici sağlığını korumada önemli bir rol oynamaktadır. Böylece, gıda endüstrisinde kalite kontrol ve doğrulama süreçlerinde bu analiz tekniklerinin kullanımı giderek daha yaygın hale gelmektedir (Cserhádi, T., ve diğ. 2005).

### **3.2.1 Vibrasyonel teknikler**

Spektroskopik tekniklerin kullanımı yalnızca gıda sektörüyle sınırlı değildir; aynı zamanda farmasötik ve petrokimya gibi diğer endüstrilerde de başarıyla uygulanmaktadır. Kimya, ilaç, yaşam bilimleri ve çevre analizleri gibi farklı alanlarda, yeni spektroskopik yöntemler giderek daha fazla kullanılmaktadır. Özellikle farmasötik sektörde,

spektroskopik tekniklerin kullanımı, bileşenlerin tanımlanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Bir örnek olarak, NIR (Yakın Kızılötesi) spektrum kütüphanesi ile örneklerin spektrumlarının karşılaştırılması, bir bileşiği pozitif veya negatif olarak tanımlamak için yaygın bir yöntemdir. Bu teknik, farmasötik endüstrisinde kimyasal kaliteyi doğrulamak için kullanılmaktadır. Örneğin, 7-aminosefalosporanik asidinin kimyasal kalitesini doğrulamak amacıyla bu tür spektroskopik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, ilaçların saflığının ve kalitesinin güvenli ve verimli bir şekilde doğrulanmasını sağlar.

Bunun dışında, farmasötik üretimde kullanılan hammaddelerin kalitesinin belirlenmesinden, ilaç formülasyonlarının doğruluğunun kontrol edilmesine kadar birçok farklı uygulama alanına sahiptir. Spektroskopik tekniklerin bu sektördeki kullanımı, özellikle kalite kontrol ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Andre. M, 2003).

### **3.2.2 Yakın kızılötesi (NIR) spektroskopisi**

NIR sinyalleri, moleküler titreşimlerle ilişkilidir ve özellikle "overtone bantları" olarak adlandırılan frekanslarda, orta IR bölgesindeki temel titreşimlerin iki-üç katı kadar yüksek frekanslar arasında yer alır. Bu overtone bantları, temel titreşim frekanslarıyla ve bağların kombinasyon bantlarıyla ilişkilidir. C-H, O-H ve N-H gibi bağlar, orta IR bölgesinde belirgin temel titreşim frekanslarına sahiptir ve bu bağlar, NIR bölgesinde, özellikle 780-2500 nm aralığında, yüksek frekanslı overtone ve kombinasyon bantları şeklinde tespit edilebilir.

NIR spektroskopisi, tarım ve gıda ürünlerinde hem kalitatif hem de kantitatif analizler yapmak için düzenli olarak kullanılır. Bu yöntem, özellikle büyük hacimli materyallerin analizini mümkün kılar. Ayrıca, içecek sektöründe, hem alkollü hem de alkolsüz içeceklerin içeriklerinin belirlenmesinde de etkili bir şekilde kullanılır. NIR spektroskopisi, ölçüm yapılan ürünlerde genellikle herhangi bir hasar yaratmamasıyla dikkat çeker. Ancak bazı durumlarda, özellikle tarım ve gıda ürünlerinin analizlerinde, spektral ölçümlerden önce örneğin buğdayın öğütülmesi gibi ön işleme yapılabilir.

NIR spektroskopisinin, ürünlerin kalite kontrol süreçlerinde kullanılmasının oldukça umut verici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu tekniğin başarıyla uygulanması, yazılım ve donanım alanlarındaki hızlı gelişim sayesinde mümkün olmuştur. NIR

spektrofotometreleri, üç ana kategoride sınıflandırılabilen enstrümantal cihazlarla çalışmaktadır:

[i] Sıralı cihazlarda absorbanslar sıralı olarak ölçülür ve cihaza monokromatörler veya filtreler takılır.

[ii] NIR spektrofotometreleri, aynı anda çok sayıda frekansta çalışmak için Fourier dönüşümü veya multipleks cihazlarıyla birlikte kullanılabilir.

[iii] Çok kanallı cihazlar, farklı dedektörler kullanılarak birden fazla dalga boyundaki absorbansın ölçülmesine olanak sağlar (Newgard E.C, 2004).

Enstrümantasyonun evrimiyle birlikte, analitik teknikler ve yazılım çözümleri, matematiksel ve kemometrik yöntemler kullanarak veri depolama ve analiz yapmayı çok daha hızlı ve verimli hale getirmiştir. Bu gelişmeler, NIR spektroskopisinin güvenilirliğini ve etkinliğini artırmış, gıda, ilaç, petrokimya ve kimya sektörlerinde kalite kontrol için yaygın olarak kullanılacak bir standart yöntem olarak kabul edilmesini sağlamıştır. Hem enstrümanların hem de analitik yazılımların sürekli geliştirilmesi, bu yöntemin çok daha kapsamlı ve etkin bir şekilde uygulanabilmesine olanak tanımaktadır (D A Skoog, J J Leary, 1992).

NIR spektroskopisinde, farklı spektral modlar kullanılarak, örneklerin hem iç hem de dış özellikleri hakkında tahminler yapılabilir. Bu modlar arasında yansıma, iletim, interaktans ve transflektans yer almaktadır. Yansıma ve interaktans genellikle katı maddelerin spektrumlarının analizi için, iletim sıvıların spektrumları için ve transflektans ise ince ya da şeffaf örneklerin spektrumlarının ölçülmesinde kullanılır. Hangi modun kullanılacağı, örneğin tipi, fiziksel özellikleri ve karakteristiklerine bağlıdır. Yansıma modunda, numune yüzeyinden yansıyan ya da saçılan ışık ölçülür. Pürüzsüz bir yüzeye gelen ışık aynı açıyla yansırken, pürüzlü yüzeye gelen ışık dağılır. Pürüzlü yüzeydeki dağılmış yansıma, numunenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi için daha faydalıdır. Bu mod, özellikle gıda endüstrisinde, gıda maddelerinin fiziksel özellikleri ve karakteristikleri ile uyumlu olduğu için büyük bir ilgi görmüştür. Son yıllarda, dağınmış yansıma NIR tekniği kullanılarak çeşitli gıdalarda yağış tespiti üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Bu araştırmalar, örneğin sığır hamburgerinde hayvan eti kaslarının yağış tespiti, yengeç etinde tür doğrulaması ve yağış tespiti gibi konuları kapsamaktadır. Farklı et türlerini ayırt etmek amacıyla yapılan araştırmalar, yüksek doğruluk oranları ile başarılı sonuçlar vermiştir. Bu teknik, ayrıca süt tozu ve soya fasulyesinde melamin tespiti,

yoğurtta ise protein taşımasının belirlenmesinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. NIR yansıma spektrumları, portakal suyunda 1100-2498 nm dalga boyu aralığında %90 doğrulukla, %10 oranında portakal pulp yıkama ve sentetik şeker-asit karışımını tespit etmek için basit ve pratik bir yaklaşım sunmaktadır. Elma, çilek ve ahududu püresi gibi gıda ürünlerindeki taşışlar de yansımali NIR spektroskopisi kullanılarak tespit edilebilmektedir. Ayrıca, NIR spektroskopisinin iletim modu, numunelerin hem iç hem de dış kalitesinin belirlenmesinde oldukça faydalıdır; bu modda ışık, numune boyunca ilerler ve böylece numunenin iç yapısı hakkında bilgi sağlar. Katı, sıvı ve gaz örnekleri üzerinde uygulanabilen bu teknik, yağlar ve meyve sularında doğrulama ve taşış tespiti yapmak için kullanılmış, ayrıca beyaz şarap örnekleri üzerinde tür tanımlaması yapılmış ve sığır ile tavuk yağ asidi kompozisyonu belirlenmiştir (A Kurt, ve diğ.1999).

NIR spektroskopisinin interaktans modu, yansıtma ve iletim modlarının birleştirilmiş bir uygulamasıdır. İletim modunun yetersiz olduğu durumlarda, interaktans modu numunenin iç özelliklerinin belirlenmesi için uygun bir yöntem olarak kullanılabilir.

Transfleksans, iletim ve yansıtma modlarının bir birleşimi olup, özellikle ince ya da temiz örneklerin spektrum ölçümleri için uygundur. Bu mod, yansıma ve iletimden daha az yaygın olsa da, optik demet probu kullanılarak sıvı akıntı analizlerinde başarıyla uygulanabilmektedir. Birçok çalışmada, NIR transfleksans spektroskopisi kullanılarak balın kalite kontrolü ve doğrulama analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, NIR spektroskopisi, yağ, süt ve et gibi çeşitli gıda ürünlerinin kalite ve doğrulama analizlerinde yaygın olarak kullanıldığı gibi, şarapların coğrafi sınıflandırılmasında da etkili bir şekilde uygulanmaktadır (Andre. M, 2003).

### **3.2.3 FT-IR (Fourier Transform Infrared) spektroskopisi**

FT-IR spektroskopisi, gıda ve tarım endüstrisindeki analitik laboratuvarlarda kalite kontrolü amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem, genellikle orta infrared (MIR) bölgesinde, yani 400 ile 4000  $\text{cm}^{-1}$  arasında çalışır. Elektromanyetik spektrumda, moleküllerin temel titreşim ve gerilme-dönme modları, onların kimyasal yapıları hakkında önemli bilgiler sunar. MIR bölgelerinde genellikle iki ana bölüm bulunur: 4000 ile 1500  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki bölge, fonksiyonel grupların belirlenmesinde kullanılırken, 1500 ile 500  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki bölge ise moleküllerin parmak izi kısmını temsil eder (Downey, G. 1998).

Orta infrared (MIR) bölgesinde, her molekülün işlevsel grubu kendine özgü bir absorpsiyon profili üretir. Moleküllerin işlevsel gruplarını analiz etmek, parmak izi bölgesine kıyasla daha verimli olabilir. Ancak, parmak izi bölgesi karmaşık pikseller ve bant çakışmaları içerse de, domates, hazır kahve ve diğer gıda ürünlerinde taşıyıcı analizlerinde oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bir çalışmada, MIR spektroskopisinin sütteki taşıyıcıların tespit edilmesinde alternatif bir yöntem olarak kullanılabilirliği kanıtlanmıştır (D Himmelblau, 1989).

Gıda kalitesi ve orijinallik analizlerinde kullanılan ölçüm yöntemleri arasında ATR (Attenuated Total Reflection) tekniği de yer almaktadır. Bu teknik için farklı modüller ve uygulama seçenekleri mevcuttur.

Bunlar;

- a. SB-ATR (Single Bounce-ATR),
- b.  $\mu$ ATR (micro-ATR)
- c. HATR (Horizontal ATR).

Bir örnek olarak, HTT (High Throughput Testing) ölçüm tekniği kullanılarak yapılan bir araştırmada, gıda bozulmalarına yol açan mantarların tespitine yönelik parmak izi bölgesinde yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

FT-IR spektroskopisi, Türkiye'deki gıda kontrol laboratuvarlarında ATR ölçüm tekniği ile plastik malzemelerin yapısal analizinde kullanılmaktadır. Bazı fabrikalarda ise, ham madde kabul aşamasında malzemelerin yapısının doğrulanması için bu teknik tercih edilmektedir. Helal gıda analizlerinde ise, özütlerden elde edilen örneklerin moleküler yapısını inceleyerek, moleküler bağlar (C-H, C=C, C-O, C=O vb.) ve işlevsel grupların (NH<sub>2</sub>, COOH vb.) karakterizasyonunda önemli bilgiler sağlanmaktadır (Norris, K. H., 1996). Gıdalara eklenen jelatin katkı maddesinin türü ve hangi hayvandan elde edildiğini belirlemek, helal gıda açısından büyük önem taşımaktadır. FTIR spektroskopisi, gıdalardaki et ve jelatinin kaynağını tespit etmek için etkili bir yöntem olarak kullanılabilir. Jelatin kaynaklarını sınıflandırma ve ayırma üzerine yapılan bir çalışmada, ATR-FTIR tekniği ile hiyerarşik kümelendirme ve temel bileşenler analizi uygulanarak domuz ve sığır jelatini karışımlarından saf sığır jelatini başarıyla ayrılmıştır. Ayrıca, başka bir çalışmada kemometri ile entegre edilmiş FTIR spektroskopisi kullanılarak kurutulmuş etlerde domuz eti taşıyıcı tespit edilmiştir. FTIR spektroskopisi, farklı tekniklerin

kombinasyonu veya yeni yöntemlerin geliştirilmesiyle birçok gıda ürünü üzerinde tağşışlerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin, FTIR ve kemometri yöntemleri, kısmi en küçük kareler (PLS) ve diskriminant analiz (DA) kullanılarak ticari ton balığı konservelerinin ve diğer ton balığı türlerinin paketleme yağlarının doğrulanması, zeytinyağına kabak çekirdeği yağı karıştırılması, hindistan cevizi yağına mısır ve ayçiçeği yağı ilavesi gibi ucuz bitkisel yağlarla yapılan tağşışlerin tespitinde başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca, FT-NIR ile ucuz nişasta eklenerek yapılan konjak glukomannan tağşışi tespiti, ATR-FTIR kullanılarak sentetik kimyasallar ile yapılan süt tağşışi tespiti, MID-FTIR ile bal örneklerinde oksitetrasiklin ve sülfatiazol antibiyotiklerinin kontaminasyonunun belirlenmesi gibi farklı tağşış çalışmaları da yapılmıştır. Bu çalışmalar, gıda güvenliğini sağlamak ve tağşışleri tespit etmek için kullanılan çeşitli analitik yöntemlerin etkinliğini göstermektedir (Sun, D.W, 2009).

### **3.2.4 Raman spektroskopisi**

Raman spektroskopisi, tarımsal gıda ürünlerinin kalite ve özgünlüğünü analiz etmek için etkili bir analitik yöntemdir. Bu teknik, lipitler, karbonhidratlar ve proteinler gibi önemli bileşiklerin yanı sıra, özel matrislere dayalı model bileşiklerle ilgili değerli bilgiler sağlar. Ancak, bu yöntem, gıdaların bozulmasına ve kirlenmesine neden olan mikroorganizmaların tanımlanmasında daha düşük hassasiyete sahip olabilir. Hem kızılötesi (IR) hem de Raman spektroskopisi titreşimsel analiz yöntemleri olmasına rağmen, aralarındaki fark, kızılötesi spektroskopisinin ışığın emilimine dayalı iken, Raman spektroskopisinin molekül ve foton arasındaki enerji etkileşimine dayanmasıdır. Raman etkisi meydana geldiğinde, bir foton molekülle etkileşerek molekülün enerji seviyesini sanal bir düzeye yükseltir. Bu enerji artışı, foton enerjisi ile eşdeğerdir. Uyarılmış molekül, temel enerji seviyesine dönerken, uyarıcı ışığın dalga boyundan farklı bir dalga boyunda emisyon yapar. Bu emisyon, uyarıcı ışın dalga boyundan hem daha kısa hem de daha uzun olabilir (Takao, Y., 2002). Enstrümantasyon alanındaki ilerlemeler, Raman spektroskopisini gıda endüstrisinde giderek daha fazla uygulama için tercih edilen bir yöntem haline getirmektedir. Yapılan çeşitli araştırmalar, farklı Raman spektroskopisi tekniklerinin tarım ve gıda sektörü gibi belirli alanlardaki etkinliğini vurgulayarak, bu yöntemin giderek daha yaygın bir şekilde kullanıldığını göstermektedir.

Raman ve kızılötesi spektroskopisi, gıda ve gıda analizi için tamamlayıcı yöntemlerdir. Raman spektroskopisinin NIR ve MIR spektroskopilerine göre birincil faydaları aşağıda listelenmiştir.

- Suyun hiç veya minimum derecede kısıtlama etkisinin olması,
- Sulu çözeltilerin analiz edilebilmesi,
- İnorganik materyallerin daha kolay analiz edilebilmesi ve
- Numunelerin, cam veya polimer ambalajı ile analiz edilebilmesi şeklinde sıralanabilir.

Bu avantajların yanı sıra Raman spektroskopisinin bazı dezavantajları da vardır:

- Yüksek enerjili lazer ışınları numuneyi ısıtabilir, bu da numunenin bozulmasına ve Raman spektrumlarının belirsizleşmesine neden olabilir.
- Yüksek enerjili lazer ışınları numuneyi ısıtabilir, bu da numunenin bozulmasına ve Raman spektrumlarının belirsizleşmesine neden olabilir.

Bu dezavantajlar göz önüne alındığında, NIR lazerlerinin kullanımı ve fluoresan numunelerin analizi konusunda dikkatli olunması önerilmektedir. Raman spektroskopisinin, Fourier dönüşüm tekniğiyle birleştiğinde, yüksek hassasiyet ve spektral çözünürlük sağlama açısından önemli bir avantaj sunduğu belirtilmektedir. FT-Raman spektroskopisi, özellikle gıdalara katılan yağ asitlerinin doymamışlık seviyelerini belirlemede etkili bir yöntem olarak tanımlanmıştır. Bu özellik, FT-Raman spektroskopisini, yağ asidi doymamışlık düzeylerinin belirlenmesi ve gıda ürünlerindeki yağ asidi tabanlı kirlenmelerin tespit edilmesi için güçlü ve uygun bir araç yapmaktadır. Gıda taşıyıcılarında sıkça karşılaşılan durumlardan biri, zeytinyağının düşük kaliteli yenilebilir yağlarla karıştırılmasıdır. Raman spektroskopisi, numunedeki doymamış yağ asitlerinin dağılımındaki değişiklikleri tespit etmek ve zeytinyağının tanımlanmasını doğrulamak için etkili bir şekilde kullanılmış ve olumlu bulgular elde edilmiştir. Bu yaklaşım, diğer bitkisel yağların ucuz yağlarla karıştırılmasını tespit etmek için de faydalıdır. Örneğin, bir araştırmada, Raman spektroskopisi, macadamia fıstığı ve ceviz yağlarını ayçiçeği ve mısır yağı gibi daha ucuz yağlardan ayırt etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, Raman spektroskopisi kashı gıdalarda proteinler, su ve lipidlerin yapısal özellikleri hakkında bilgi sağlayarak, etin orijinalliğinin tespitinde de kullanılabilir. Raman spektroskopisi, farklı et türlerinin duyuşal özelliklerini analiz etmenin yanı sıra, sığır eti

örneklerinde yağ dokusunun kompozisyonunu ve yağ asidi bileşenlerini tespit etmede de başarıyla kullanılmıştır. Ayrıca, kas lif dokusunun görüntülenmesi, dondurucuda saklama sırasında kaslardaki protein değişimleri, balık kaslarındaki yağ miktarının belirlenmesi ve kaslı gıdalardaki protein yapılarını izleme gibi birçok farklı çalışma da literatüre eklenmiştir. Bunun dışında, Raman spektroskopisi, etin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra mikrobiyolojik bozulmalarının tespitinde de etkili bir yöntem olarak kullanılmıştır. Boyacı ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada, Raman spektroskopisi ile karışık et örneklerinde at eti ile sığır etinin ayrımı başarıyla yapılmıştır (Boyacı ve diğ., 2014).

Yüzeyi geliştirilmiş Raman spektroskopisi (SERS), geleneksel Raman spektroskopisinin hassasiyetini ve kapasitesini artırmak amacıyla metalik nanosüstratlar kullanarak Raman spektroskopisi ve nanoteknolojiyi birleştiren bir tekniktir. Bu özellik, SERS'i gıda doğrulama süreçlerinde oldukça faydalı hale getirir. Örneğin, Wijaya ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada, SERS tekniği, elma suyu ve elma yüzeylerinde neonikotinoid böcek ilacı olan asetamipridin tespiti için başarıyla kullanılmıştır. Benzer şekilde, başka bir araştırmada, baharatlardaki Sudan I boyasının taşıdığı incelenmiş ve Normal Raman, FT-Raman ve SERS olmak üzere üç farklı Raman spektroskopisi tekniği karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, SERS tekniği, en yüksek doğruluk ve hassasiyetle taşıdığı tespiti sağlamıştır. Son yıllarda, taşınabilir SERS cihazları, gıda kaynaklı patojenler olan *Escherichia coli* ve *Salmonella* gibi bakterilerin yüksek hassasiyetle tespit edilmesinde kullanılmak üzere geliştirilmektedir. Bu cihazlar, gıda güvenliği ve hijyenin sağlanması adına büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, stimüle Raman saçılımı (SRS) ve rezonans Raman spektroskopisi (RRS) gibi diğer Raman spektroskopik yöntemler, şu an için gıda endüstrisinde yaygın bir uygulamaya sahip değildir. Bu teknikler, laboratuvar ortamında başarılı sonuçlar vermekle birlikte, endüstriyel kullanıma geçmeden önce daha fazla geliştirme ve değerlendirme gerektirmektedir. Raman spektroskopisinin SERS ile birleşimi, gıda güvenliğinde daha hassas ve hızlı analizler yapabilme imkanı sunarak, gıda ürünlerinin kalite kontrolünü ve doğrulamasını önemli ölçüde geliştirebilir. Ayrıca, bu tekniklerin taşınabilir versiyonlarının geliştirilmesi, gıda tedarik zincirinde, özellikle üretim ve dağıtım aşamalarında hızlı taramalar yapılarak, tüketiciye daha güvenli ürünler sunulmasına olanak sağlayacaktır (Adapa, P. K., ve diğ. 2009).

### 3.2.5 Üstün uzaysal görüntüleme

Üstün uzaysal görüntüleme (HSI), gıda kalite kontrolü ve doğrulama alanında kullanılan oldukça güçlü bir analitik tekniktir. Bu yöntem, bir materyalin hem spektral (kimyasal) hem de uzaysal (morfolojik) verilerini toplama imkanı sunarak, örneklerin detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlar. HSI'nin en önemli avantajlarından biri, bu teknikle elde edilen spektral verilerin uzaysal dağılımla birleştirilmesidir. Bu sayede, heterojen (karışık ve farklı bileşenlerden oluşan) örneklerin karmaşık yapıları daha iyi anlaşılabilir. Örneğin, gıda ürünlerinde bileşenlerin homojen olup olmadığını, örneklerin yüzeyinde ya da altındaki farklılıkları tespit etmek mümkün olur.

HSI'nin spektral özellikleri, çoklu yüzeylerin ve yüzey altı yapıların analiz edilmesini olanaklı kılar. Bu özellik, özellikle gıda endüstrisinde, ürünlerin kalitesini değerlendirirken, hem yüzeydeki hem de iç yapısındaki bozulmaları, taşıyıcıları veya kalite kayıplarını tespit etmede büyük fayda sağlar. Örneğin, meyve ve sebzelerin içindeki çürümeleri, kahve veya baharatların kalitesini etkileyen dışsal faktörleri, veya et ve süt ürünlerinde çeşitli kimyasal bileşenlerin dağılımlarını incelemek için kullanılabilir (Alamprese, C., 2016).

Daha önce detaylı olarak açıklanan NIR (Yakın Kızılötesi), MIR (Orta Kızılötesi) ve Raman spektroskopisi gibi analitik metotlar, HSI ile benzer şekilde, örneklerin yapısına zarar vermeden, hızlı ve etkili ölçümler yapabilen tekniklerdir. Bu metodlar, non-invaziv (zarar vermeyen) olmaları sayesinde, örneğin gıda ürünlerinin tazelik, besin içeriği ve orijinalliğini belirlemek için ideal araçlardır. Ayrıca, HSI ve diğer spektroskopik metotlar, gıda güvenliği ve kalitesini sürekli izlemek için gerçek zamanlı analiz imkanı sağlayarak, özellikle tedarik zinciri ve üretim aşamalarında kalite kontrol süreçlerini iyileştirir.

HSI'nin özellikle avantajlı olduğu bir diğer nokta da, bir örneği çok sayıda küçük bölgeye ayırarak her bir bölgede farklı analizler yapabilmesidir. Bu özellik, gıda ürünlerinin heterojen yapılarındaki farkları belirlemek ve böylece daha güvenilir ve doğru sonuçlar elde etmek için oldukça kullanışlıdır. Gelişen bu teknolojiler, gıda endüstrisinin daha verimli, güvenli ve sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağlayacak önemli bir rol oynamaktadır (Atkins, P. ve Paula, J. de. 2013).

Ancak, bu spektroskopik teknikler genellikle nokta bazlı tarama yöntemleridir ve sadece numunenin belirli bir küçük bölümünü analiz eder. Bu nedenle, gıda analizinde gereken

geniş kapsamlı uzaysal bilgiyi sağlama açısından bu teknikler tek başlarına yeterli olmayabilir. Bu noktada, üstün uzaysal görüntüleme (HSI) teknikleri, daha hızlı ve verimli analizler sunar çünkü aynı anda birden fazla numunenin analizine olanak tanır. HSI, farklı boyutlardaki ve şekillerdeki örneklerden hiperspektral veri toplayabilme kapasitesine sahiptir ve bu özellik, tekniklerini daha esnek kılar. Ayrıca, HSI'nin sağladığı büyük avantajlardan biri, topladığı spektral verilerin, uzaysal çözünürlük ve görüntüleme alanının (GA) uygulamaya göre kolayca ayarlanabilmesidir. Bu özellik, farklı analiz ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilen bir yaklaşım sunar. Bu esneklik sayesinde üstün uzaysal görüntüleme yalnızca gıda ve tarım sektörlerinde değil, aynı zamanda eczacılık, tıp, veterinerlik, adli tıp ve çevre analizleri gibi birçok alanda da etkili bir şekilde kullanılmaktadır.

Kalibre edilmiş hiperspektral görüntü, analiz için parçalara ayrılır ve çözünür. Ardından, spektral veri dizisi üzerinde kısmi en küçük kareler (PLS) regresyonu uygulanır ve en uygun dalga boyları belirlenerek ağırlıklar seçilir. Bu aşamada, her bir görüntü, seçilen dalga boylarıyla ve regresyon katsayılarıyla çarpılarak 2 boyutlu matrislere dönüştürülür. Son olarak, elde edilen matrisler, görüntünün oluşturulabilmesi için yeniden katlanır. Ancak, hiperspektral görüntü işleme süreci farklı analitik teknikler kullanılarak da gerçekleştirilebilir.

Süper uzamsal görüntüleme, elektromanyetik spektrumun ultraviyole, görünür ve yakın kızılötesi (300-2600 nm) alanlarındaki bir nesne hakkında uzamsal ve spektral bilgi edinme tekniğidir. UV (200-400 nm), görünür (380-800 nm) ve NIR (970-2500 nm) dahil olmak üzere farklı elektromanyetik alanlardaki malzemeleri optik olarak tanımlamak için çeşitli süper uzamsal görüntüleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Her bir teknik, belirli uygulamalarda kendine has avantajlar sunmakla birlikte, son üç yöntem gıda ve tarım alanlarında en uygun olanlardır. Bu prosedürler et ürünlerinde dilimlenmiş hindi jambonunun pişirme derecesini tanımlamak, taze sığır etinde su tutma kapasitesini, rengi, pH'ı ve gevrekliği değerlendirmek, kurutulmuş karidesteki nem içeriğini ölçmek ve pişmiş tavuk göğsündeki nem dağılımını tahmin etmek için kullanılır. Ayrıca, tahıllarda mısır çekirdeklerinin sertlik derecesinin sınıflandırılmasında ve buğday çekirdeklerinde zararlı hasarların tespit edilmesinde; toz gıda ürünlerinde ise karabiber hilesi ve süt tozunda melamin tespiti gibi analizlerde etkili bir şekilde kullanılmaktadır.

Sebze ve et gibi gıda ürünlerinde gıda güvenliği açısından en büyük endişelerden biri, tazelik ve mikrobiyal bozulmadır. Diğer spektroskopik yöntemlerin çoğu, nokta-temelli analizler yapmalarından ötürü sınırlı bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, üstün uzaysal görüntüleme tekniği, mikrobiyal kontaminasyonun, örneğin paketlenmiş taze ıspanakta E. coli'nin tespitinin yanı sıra, mantarların mikrobiyal bozulmasını, somon ve domuz etindeki kontaminasyonu tanımlamak için etkili bir şekilde kullanılmaktadır.

Tüm bu çalışmalar, çeşitli kemometrik analitik yöntemlerle yapılmış olup, anlamlı tahminler ve sınıflandırma sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, pek çok mikrobiyal araştırma, üstün uzaysal görüntülemenin, gıda ürünlerindeki mikrobiyal kolonilerin büyümesinin izlenmesinde etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Üstün uzaysal görüntüleme tekniklerinin mikroskop ile birleştirilmesi, gıda ürünlerinde patojen mikroorganizmaların kesin bir şekilde tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar, üstün uzaysal görüntüleme yönteminin gıda kalite ve doğrulama alanındaki etkinliğinin, gıdanın kalite durumu ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Ancak, bu çalışmaların hiçbiri son dönemlerde gıda ve tarım ürünlerinin analizi için kullanılan floresans üstün uzaysal görüntüleme üzerine değildir. Kim, Chen ve Mehl tarafından yapılan araştırma, bu alandaki ilk çalışma olarak öne çıkmaktadır (Kim, M. S., Chen, Y. R., & Mehl, P. M., 2001). Bu öncü çalışmada, normal elma örnekleri ile mantar enfeksiyonu ve yaralanma geçiren elmaların görüntüleri sunulmuştur. Ayrıca, çeşitli elma türlerinin fekal kontaminasyonunu belirlemek için belirli frekans aralıkları kullanılmıştır. Floresans üstün uzaysal görüntüleme (fHSI) tekniği, mısır çekirdeklerinde aflatoksin kontaminasyonunun tespit edilmesinde de uygulanmıştır.

Cho ve meslektaşları (Cho ve diğ., 2013) üstün uzaysal görüntüleme tekniklerini kullanarak çeri domateslerinde kütikül hasarlarının tespitini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, çeri domateslerinin klorofil floresans özelliklerinden yararlanılmıştır. Klorofil, bitkilerin fotosentez yapabilmesi için gerekli olan ışık enerjisini emen önemli bir bileşen olup, özellikle bitki dokularındaki değişikliklerin ve hasarın belirlenmesinde etkili bir biyomarker olarak kullanılabilir. Çeri domateslerinin epikarp ve perikarp dokularındaki floroforların farklı konsantrasyonları, hasar tespiti için büyük bir avantaj sağlamıştır. Bu farklılıklar, özellikle hasar görmüş bölgelerde klorofilin floresans özelliklerinin değişmesiyle daha belirgin hale gelmiştir. Sonuç olarak, bu araştırma, üstün uzaysal görüntüleme tekniklerinin gıda ürünlerinde, özellikle de meyve ve sebzelerde,

hasar tespiti ve kalite kontrolü açısından etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, bu yöntem sayesinde, erken aşamalarda zarar gören ürünler hızlı bir şekilde tespit edilerek, kalite kayıpları minimize edilebilir ve gıda güvenliği sağlanabilir.

Reflektans, transmasyon ve floresans gibi tekniklerle uygulanan üstün uzaysal görüntüleme, uzun yıllardır gıda kalite ve güvenliği analizlerinde etkin bir şekilde araştırılmaktadır. Son yıllarda, Raman spektroskopisinin üstün uzaysal görüntüleme teknikleriyle birleştirilmesi, hedef örneğin kimyasal bileşimi ve morfolojisinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. Bu kombinasyon, gıda analizi için yenilikçi bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Özellikle, Timlin ve meslektaşları (Timlin ve diğ., 1999) memeli kemiklerinde fosfat türlerinin dağılımını görüntülemek için Raman üstün uzaysal görüntüleme tekniğini başarıyla uygulamışlardır. Bu çalışma, bu tekniklerin biyolojik örneklerin kimyasal haritalanmasında ne kadar güçlü olduğunu göstermiştir.

Bir diğer önemli çalışma, Fu ve arkadaşlarının (Fu ve diğ.,2013) memeli hücrelerinde farklı türlerin kimyasal haritasını çıkarmak için Raman üstün uzaysal görüntüleme yöntemini kullanarak elde ettiği sonuçlar olmuştur. Bu tür çalışmalar, hücresel düzeydeki kimyasal bileşenlerin daha doğru bir şekilde haritalanması ve incelenmesi için Raman üstün uzaysal görüntülemenin büyük potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

Daha yakın tarihli bir araştırmada ise, Raman üstün uzaysal görüntüleme, süt tozlarında melamin tağışının tespitinde kullanılmıştır. Melamin, düşük konsantrasyonlarda bile ciddi sağlık sorunlarına yol açabilen bir kimyasaldır ve Raman üstün uzaysal görüntüleme bu tür kimyasalların tespiti için yüksek hassasiyetle çalışmaktadır. Bu teknik, melaminin %0,2 gibi düşük seviyelerde bile süt tozlarında doğru bir şekilde tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, disiyandiamid bileşiği de süt tozlarında bu yöntemle başarıyla tespit edilmiştir, bu da Raman üstün uzaysal görüntülemenin gıda güvenliği alanında ne kadar etkili olabileceğini göstermektedir.

Raman üstün uzaysal görüntüleme ayrıca, Quin ve meslektaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada da kullanılmıştır. Bu çalışmada, domateslerin olgunlaşma sürecinde likopen içeriklerindeki değişim, RHSI (Raman Hiperspektral Görüntüleme) tekniği ile gözlemlenmiştir. Bu tür çalışmalar, gıda ürünlerinin olgunlaşma süreçlerinin ve kalite değişimlerinin izlenmesi konusunda Raman üstün uzaysal görüntülemenin potansiyelini ortaya koymaktadır.

Her ne kadar RHSI şu anda gıda-tarım sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmasa da, bu teknik, gıda kalitesini belirlemek isteyen araştırmacılar için oldukça değerli bir araçtır. Gıda üretimi ve işlenmesi sırasında kalite kontrolünü sağlamak için Raman üstün uzaysal görüntüleme, gelecekte daha fazla uygulama alanı bulacak ve bu alanda yapılan çalışmaların sayısı artacaktır.

### 3.2.6 UV-Vis pektroskopisi

- ✓ UV radyasyonu, dalga boyları 10 ila 400 nm arasında değişen fotonlardan oluşur.
- ✓ Uzak UV alanı, 10-200 nm aralığındaki ışık dalga boylarının bulunabileceği bölge olarak tanımlanır. 10-200 nm bölgesinde N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gazlarının absorpsiyonu olduğundan bu bölgede yapılacak çalışmaların vakum altında yapılması gerekir. Bu nedenle vakum UV bölgesi olarak da adlandırılır.
- ✓ Yakın UV veya UV bölgesi 200 ile 400 nm arasında değişen dalga boylarına sahiptir.
- ✓ Görünür bölge 400 ila 800 nm arasındadır.
- ✓ UV-VIS cihazları genellikle 200 ile 800 nm arasında çalışır.

UV-Vis spektroskopisi, ultraviyole (UV) ve görünür (Vis) ışığın farklı dalga boylarında bir numune tarafından emilen veya iletilen ışığın miktarını ölçen bir analiz yöntemidir. Bu teknik, bir UV-Vis ışık demetinin numuneden geçirilmesini ve numunenin içinden geçen ışık miktarının belirlenmesini içerir. Araştırmacılar, ışığın emilme ve iletim özelliklerini inceleyerek, numunenin bileşenlerini tanımlayabilir ve bunların miktarlarını belirleyebilirler. Bir madde, belirli bir dalga boyunda maksimum ışığı emdiğinde, o madde ile UV-Vis spektrumu arasında özel bir ilişki ortaya çıkar. Bu ilişki, aşağıdaki amaçlarla kullanılabilir:

- Kalitatif analiz, yani belirli maddelerin varlığının belirlenmesi.
- Kantitatif analiz, yani belirli maddelerin miktarlarının belirlenmesi.

UV-Vis spektrofotometrisi, kimya, biyoloji ve fizik gibi çeşitli bilim dallarında, materyallerin özelliklerini ve ışıkla etkileşimlerini araştırmak amacıyla sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Ayrıca, ilaç, gıda ve kozmetik sektörlerinde de malzeme kalitesinin kontrol edilmesi ve analiz edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

UV-Vis spektroskopisi, bir örneğin ultraviyole (UV) ve görünür (Vis) ışık aralıklarındaki farklı dalga boylarında elektromanyetik ışınlarla aydınlatıldığı bir tür absorpsiyon

spektroskopisidir. Numune, maddeye bağlı olarak bu ışınları kısmi olarak emer. Geriye kalan ışık, yani iletilen ışık, uygun bir dedektör aracılığıyla dalga boyuna göre kaydedilir. Bu işlem sonunda, dedektör numunenin özgün UV-Vis spektrumunu, yani absorpsiyon spektrumunu üretir.

Bir spektrofotometre, özellikle klinik, farmasötik ve endüstriyel kalite kontrol uygulamalarında, belirli UV-Vis ölçümleri için gereksinimlere uygun şekilde performans göstermelidir. Bu nedenle, cihazın performansı düzenli olarak doğrulanmalı ve kalibrasyon sonuçları kaydedilip saklanmalıdır. Mikro hacimli spektrofotometreler, yalnızca 1 µl gibi küçük örnek hacimlerini bile ölçebilecek kapasiteye sahiptir. Nükleik asitlerin konsantrasyonu genellikle numune başına nano veya mikrogram düzeyindedir. Bu tür mikro hacimleri seyreltmek ve doğru sonuçlar almak zordur. Bu nedenle, nükleik asitlerin aşağı akış analizi için seyreltme olmaksızın mikroanaliz önem kazanmaktadır.

Nükleik asit analizlerinde, mikro hacimli numune, kaide yüzeyinde bulunan ince bir bölmeye pipetlenir. Lamba kaynağından gelen ışık, fiber optik kablolar aracılığıyla mikro hacimli platforma iletilir. Yol uzunluğu bir milimetreye indirildiğinden, yüksek analit konsantrasyonları, birden fazla seyreltme işlemi yapılmadan hassas bir şekilde ölçülebilir.

Mikro hacimli sistemler, numuneyi kaide platformunda tutarken ve düşük hacimli numunelerin gerçek zamanlı absorbansını ölçerken, numunenin doğal özelliklerinden (örneğin yüzey gerilimi) yararlanarak fiber optik teknolojisini kullanır. Bu avantajlar, mikro hacim analizini biyomoleküler analizler için mükemmel bir tercih haline getirir.

UV Vis spektroskopisi, çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesine sahip çok yönlü bir analitik tekniktir. UV Vis spektroskopisinin farklı endüstrilerdeki önemli uygulamalarından bazıları şunlardır (Ballin, N. Z. ve Lametsch, R. 2008).

#### ✓ Yiyecek & İçecek

UV Vis spektroskopisi, gıda ve içeceklerin kalitesini ve bileşimini analiz etmek için kullanılır. Bu yöntem, gıda ürünlerinin rengini (örneğin şarap), tat ve aroma özelliklerini incelemenin yanı sıra, kirleticilerin veya tağşiş edici maddelerin tespiti için de etkili bir araçtır.

### ✓ **Farmasötik**

UV Vis spektroskopisi, ilaçların ve diğer farmasötik ürünlerin saflık, konsantrasyon ve kimlik analizini yapmak için kullanılır. Ayrıca, farmasötiklerin zamanla geçirdiği değişiklikleri ve stabilitelerini izlemek amacıyla da etkili bir yöntemdir.

### ✓ **Kozmetik ürünleri**

Formülasyonlar için ajanların ışığa karşı dayanıklılığının test edilmesi, UV koruyucu ajanların partikül özelliklerinin incelenmesi, renk endekslerinin analiz edilmesi, taşıyıcıların tespiti (örneğin parfüm sektöründe), optik özelliklerin gözlemlenmesi ve boyaların, antioksidanların gibi bileşenlerin miktarlarının belirlenmesi gibi çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadır.

### ✓ **Petrokimya**

Ham petrolün özelliklerinin belirlenmesi, asfalten fraksiyonlarının hesaplanması, aromatik içerik için indekslerin geliştirilmesi, ham petrolün yoğunluk kalitesinin değerlendirilmesi, kükürt içeriğinin analiz edilmesi ve Hildebrand çözünürlük faktörünün hesaplanması (bu süreç, bitüm, ağır ve şeyl yağları, sıvı katalitik kriting, koklaştırma veya kömür sıvılaştırmasından elde edilen yağlar için de uygulanmaktadır).

### ✓ **Kimyasal**

✓ Kimyasal bileşenlerin analiz edilmesi, nihai ürünün kalite değerlendirmesi, polimer karışımlarının analiz edilmesi, atık suyun özelliklerinin incelenmesi, saflık ve boyama verimliliğinin tespiti, polimerlerin ya da boyaların fotokatalitik bozunma süreçlerinin incelenmesi, ayrıca toprak veya sudaki pestisit kalıntılarının belirlenmesi gibi çeşitli analizler yapılmaktadır.

### ✓ **Biyoteknoloji**

Nükleik asitlerin konsantrasyonu ve saflığı, protein analizleri (A280, BCA, Biuret, Bradford Lowry, OD 600), mikrobiyal hücre kültürlerinin ölçülmesi, protein denatürasyonu, enzimatik aktivitelerin kinetik incelemeleri, biyolojik örnekler (kan, plazma, serum vb.) gibi çeşitli biyokimyasal analizler yapılmaktadır.

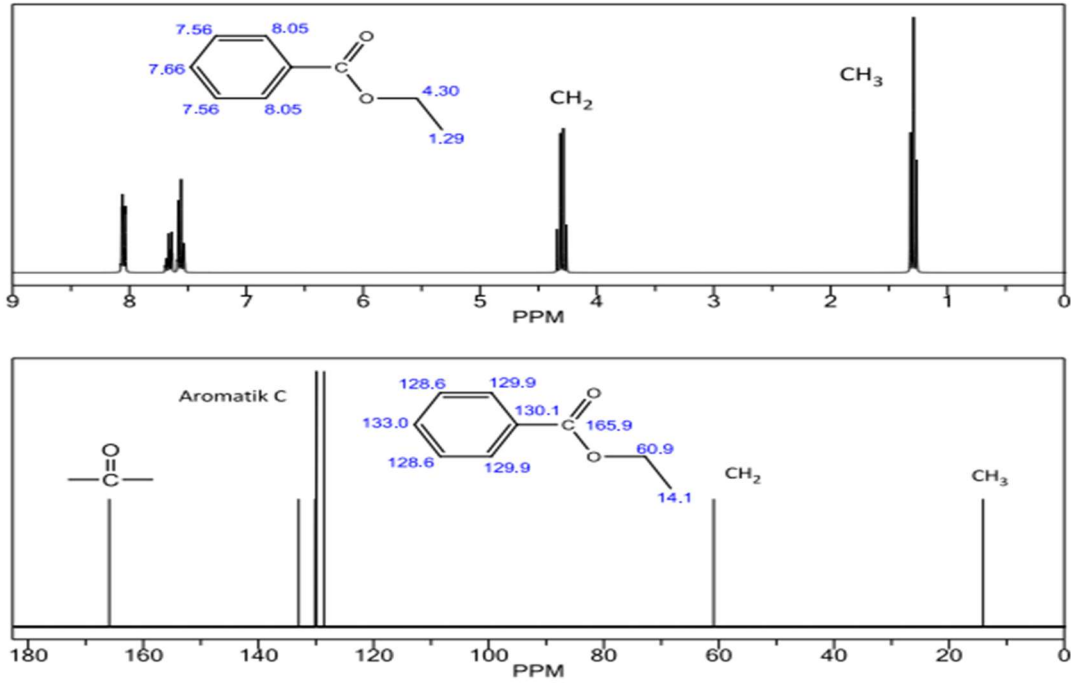
### 3.2.7. Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) Spektroskopisi

NMR spektroskopisi, organik moleküllerdeki belirli çekirdeklerin radyo dalgaları ile uyarılması prensibine dayanarak, güçlü bir manyetik alan altında gerçekleştirilen bir analiz yöntemidir. NMR-spektroskopisinin esasları;

- ✓ Çekirdek uyarılıyor,
- ✓ Güçlü bir manyetik alan içerisinde gerçekleşiyor,
- ✓ Olayı gerçekleştiren ışınlar radyo dalgaları, şeklinde tanımlanabilir.

#### Şekil 3.5

Etil benzoatın  $^1H$  ve  $^{13}C$  NMR spektrumları ( $CDCl_3$ )



[https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6\\_fig2\\_359114366](https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6_fig2_359114366)

Aynı molekülün proton ve karbon NMR spektrumları incelendiğinde elde edilen bilgiler daha detaylı ve kesindir.

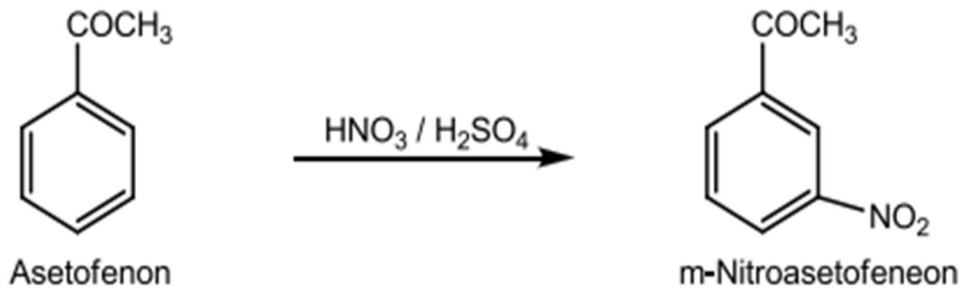
- ✓ Molekülde mono süstitüe bir benzen halkasının varlığı (halkaya beş protonun bağlı olduğu),
- ✓ Metil grubunun varlığı ve metil grubunun  $-CH_2-$  grubuna doğrudan bağlı olduğu,

- ✓ Metilen gurubunun varlığı ve bu guruba ait olan sinyalin analizinden bu gurubun –CH<sub>3</sub>- gurubuna komşu olduğu ve de –CH<sub>2</sub>- gurubunun elektronegatif bir atoma bağlı olduğu,
- ✓ <sup>13</sup>C NMR aracılığı ile karbonil gurubunun varlığı ve aronmatik halkada dört farklı karbon atomunun bulunduğu (mono süstitüe benzen halkası),
- ✓ Moleküldeki mevcut protonların sayısı.

NMR spektroskopisi, bir bileşiğin şeklini ve konformasyonunu, ayrıca bileşimini (atomların birbirine bağlanması) belirleyebilir.

**Şekil 3.6**

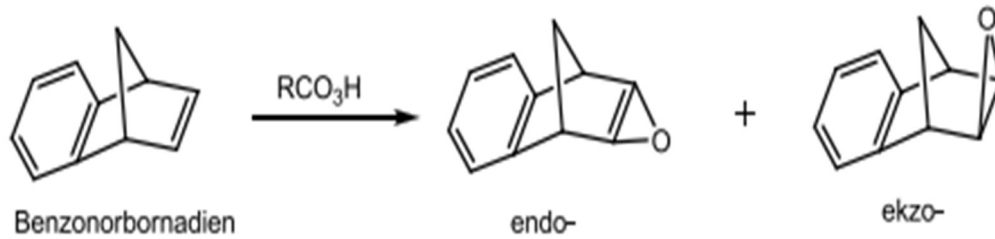
*Konformasyon*



[https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6\\_fig2\\_359114366](https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6_fig2_359114366)

**Şekil 3.7**

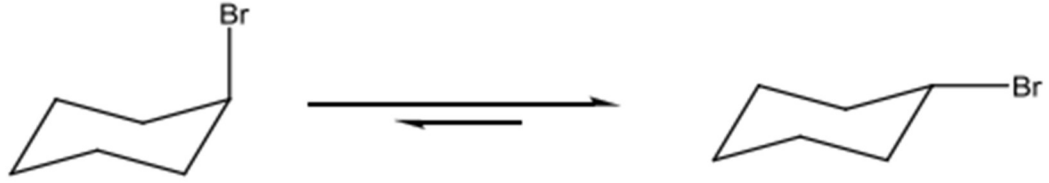
*Konstitüsyon*



[https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6\\_fig2\\_359114366](https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6_fig2_359114366)

### Şekil 3.8

Konfigurasyon

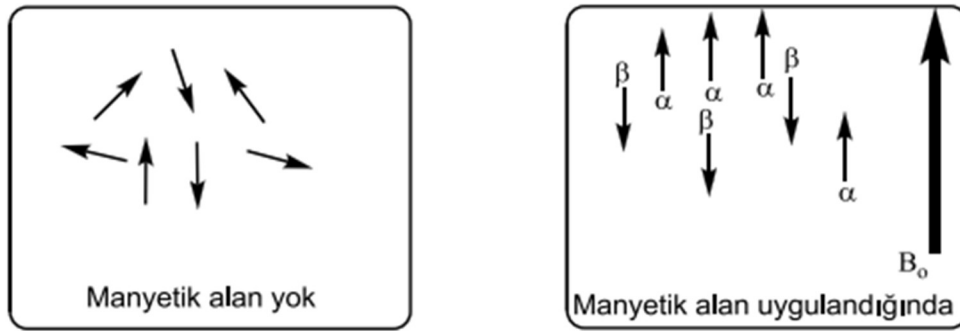


[https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6\\_fig2\\_359114366](https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6_fig2_359114366)

Atom çekirdeği ve elektronlar, atomun temel bileşenleridir. Elektronlar gibi, bazı izotopların çekirdekleri de eksenleri etrafında dönerler, bu da onların spin kuantum sayıları (I) olduğu anlamına gelir. Çekirdeğin spin kuantum sayısı proton ve nötron sayısına göre değişir. Özetle, rezonans dönen çekirdeğin enerjisi emdiği ve daha düşük bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine geçtiği süreçtir.

### Şekil 3.9

Manyetik Alan Uygulamadaki Farklılık



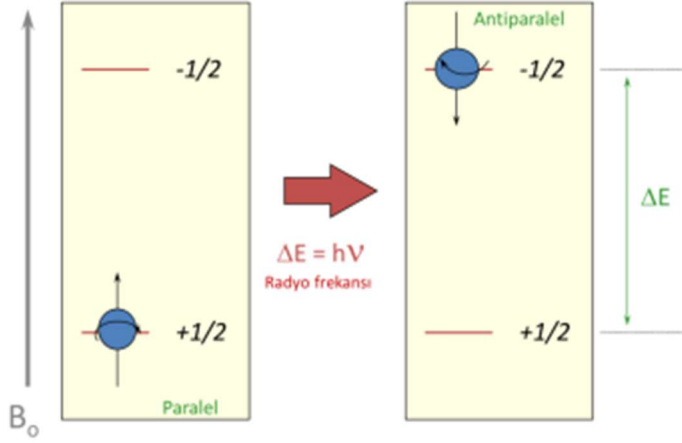
<https://www.scribd.com/document/722653763/Enstru-mental-Analiz>

NMR spektroskopisinde, sabit bir manyetik alan veya elektromıknatıs kullanılarak dış bir manyetik alan oluşturulur. Bu dış manyetik alanın kuvveti,  $B_0$  ile gösterilir ve yönü bir okla işaretlenir. Dış manyetik alan uygulanmadan önce, protonların manyetik momentleri düzensiz bir şekilde dağılır. Dış bir manyetik alan uygulandığında, protonlar iki şekilde hizalanabilir: bazıları alanla paralel ( $\alpha$ -spin durumu) yönde, diğerleri ise zıt yönde ( $\beta$ -spin durumu) hizalanır. Manyetik alanla paralel olan protonların enerjisi, zıt yönde hizalanan

protonların enerjisinden daha düşüktür. Başka bir deyişle, protonun paralel durumu, anti paralel duruma göre daha karardır.

### Şekil 3.10

*Kuantlaşmış Enerjinin Absorbsiyonu ve Rezonans Olayı*



<https://www.scribd.com/document/722653763/Enstru-mental-Analiz>

- ✓ Rezonansın gerçekleşmesi için dışarıdan verilen enerji miktarının iki seviye arasındaki enerjiye eşit olması gerekir.
- ✓ Rezonans için gerekli olan enerjinin miktarı manyetik alanın ( $B_0$ ) şiddetine göre değişmektedir.
- ✓  $B_0$  yükseltildiğinde paralel ve antiparalel durumlar arasındaki enerji farkı büyür.
- ✓ Büyük  $B_0$ 'ların dönmeye karşı daha dirençli bir çekirdeği vardır ve yüksek enerjili, yüksek frekanslı radyasyona ihtiyaç duyarlar.

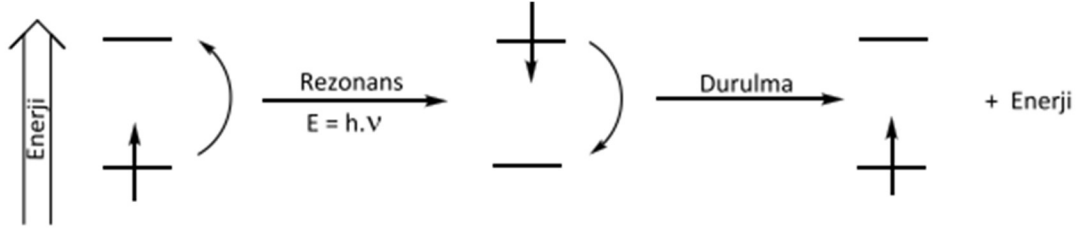
Durulma ( Relaksasyon )

Gevşeme, zıt spinli uyarılmış bir çekirdeğin enerjisi serbest bırakıp daha düşük bir enerji seviyesine geri döndüğü süreci ifade eder. Gevşemenin aldığı zamana gevşeme süresi denir. Gevşeme iki temel şekilde gerçekleşir.

- Işımalı Şekilde            a) Spin-örgü durulması  $T_1$   
Işımasız Şekilde;        b) Spin-spin durulması  $T_2$

### Şekil 3.11

#### Kimyasal Kayma



<https://www.scribd.com/document/722653763/Enstru-mental-Analiz>

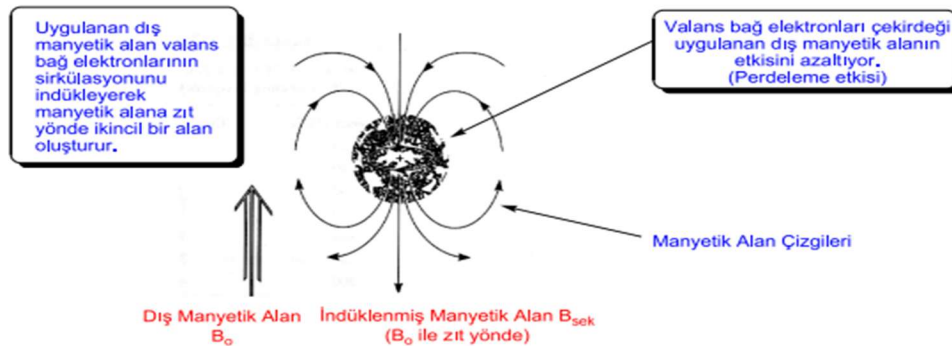
Belirli bir molekülde bir proton tarafından gerçekte gözlenen manyetik alan iki alanın bileşimidir;

- 1) Uygulanan dış manyetik alan ( $B_0$ ) ve
- 2) İndüklenen moleküler manyetik alanlar (harici bir manyetik alan tarafından çekirdek etrafında elektron indüksiyonuyla oluşan ikincil manyetik alanlar).

Elektronlar, oluşturdukları sekonder manyetik alanlarla dış manyetik alanın etkisini ya zayıflatır ya da güçlendirir. Örneğin, metil asetat molekülünde iki metil grubu bulunur. Bunlardan biri karbon atomuna bağlıyken, diğeri daha elektronegatif olan oksijen atomuna bağlanmış olup, bu gruplar farklı rezonans frekanslarında tepki verirler (Ballin, N. Z. ve Lametsch, R. 2008).

### Şekil 3.12

#### Elektron Sirkülasyonu



<https://www.scribd.com/document/722653763/Enstru-mental-Analiz>

Elektronların hareketiyle oluşan manyetik alanın yönü, dış manyetik alanla ters olduğu için, dış manyetik alanın şiddeti  $B_0$ , çekirdek çevresinde zayıflar. Bu, çekirdek üzerindeki dış manyetik alanın etkisinin azaltılması anlamına gelen "kalkanlama" olarak bilinir. Ancak, protonun konumuna bağlı olarak, elektronların etrafında oluşan ikincil manyetik alan, dış manyetik alanla aynı yönde olabilir. Bu durumda, çekirdek dış manyetik alandan daha büyük bir manyetik alandan etkilenir. Bu nedenle, rezonans koşulunu yaratmak için manyetik alanın gücü düşürülmelidir; bu fenomene "anti-kalkanlama" denir. Rezonans olayı sırasında protonun çevresindeki yerel manyetik alan büyük önem taşır. Protonların farklı çevrelerde rezonansa girip pikler oluşturmalarına "kimyasal kayma" denir. Başka bir deyişle, protonun rezonans frekansı ile standart bir referans (TMS) arasındaki fark, kimyasal kayma olarak tanımlanır. NMR ölçümlerinde bu amaçla genellikle tetrametilsilan (TMS) referans olarak kullanılır.

### **3.2.8 Atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS)**

Atomik spektroskopi, atomların elektromanyetik ışınmayı emme, yayma veya floresans yoluyla ışık saçma gibi özelliklerine dayanan analiz tekniklerini kapsar. Bu yöntemlerde, örnekte bulunan elementler "atomlaştırma" denilen bir işlemle gaz halindeki atomlara dönüştürülerek incelenir.

Bu yöntem, gaz halindeki atomlar tarafından ışığın emilmesinin ölçülmesine dayanır. Bu prensibe göre, madde yoğunluğunu belirlemek için kullanılan cihazlar, atomik absorpsiyon spektrofotometreleridir.

Işığı emen atomlar temel durumdan kararsız uyarılmış enerji seviyelerine kayarlar ve emilim miktarı temel durumdaki atom sayısı ile orantılıdır. Atomik absorpsiyon spektroskopisinde, analiz edilecek element önce atomik hale getirilir ve ardından buharlaştırılır. Sonrasında, ışık kaynağından gelen ışın demetiyle etkileşime girer ve element bu ışınları absorblar. Numune, bir alevde oksitleyici gaz karışımıyla püskürtülür. Bu teknikte yaklaşık 70 farklı element (metal ve yarı metal) analiz edilebilir. Ancak ametallerin absorpsiyon hatları vakum UV bölgesine düştüğü için bu elementler bu yöntemle analiz edilemez. Bu yöntem son derece hassas olup, eser miktarda maddelerin analizini yapmaya imkân tanır.

AAS' de Beer Yasası geçerlidir. Absorpsiyon miktarı veya absorbans  $A$ , derişim ve atomlaştırıcıda aldığı yol ile orantılıdır.

Atomik absorpsiyon spektroskopisi, özellikle eser miktarlardaki elementlerin nicel analizleri için çok yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

AAS eser miktardaki metallerin ppm,ppb düzeyde analizleri yapılır.

Doğada bulunan 75 kadar elementin metal, alaşım, toprak, toz, mineral, tuz, sulu çözelti örneklerinin tayininde kullanılan bir analitik tekniktir.

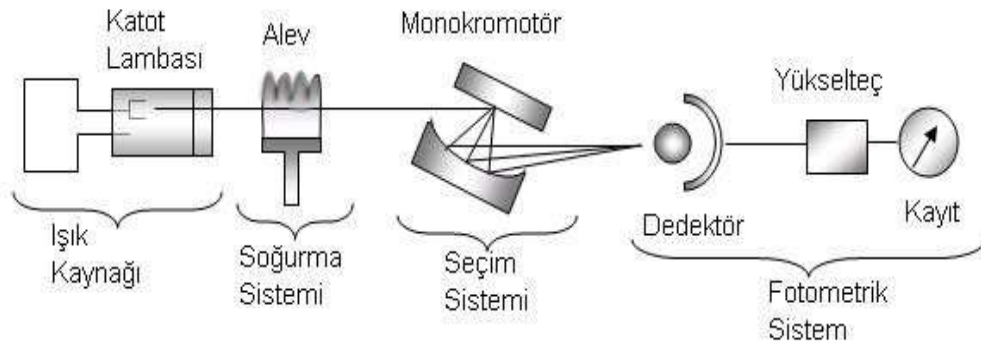
Atomik absorpsiyon spektrometrelerinin temel bileşenleri arasında, analiz edilen elementin ışığını absorbe edeceği ışık kaynağı, örnek çözeltisinin atomik buhar haline dönüştürüldüğü atomlaştırıcı, kullanılan dalga boyunu diğer dalga boylarından ayıran monokromatör ve ışık şiddetini ölçen dedektör yer almaktadır.

Işık kaynakları: İçi boş katot lambaları, neon veya argon gibi düşük basınçlı inert bir gazla doldurulmuş silindirik lambalardır.

Elektrotsuz deşarj lambaları, kısa dalga boylarında emilim ve yayılma yapabilen As, Se ve Sb gibi uçucu elementler için tasarlanmıştır.

### Şekil 3.13

*Atomik Absorpsiyon Spektroskopisinin Temel Prosesleri*



<https://slideplayer.biz.tr/slide/15253029/>

Alevli atomlaştırıcıların dezavantajlarını gidermek amacıyla yapılmış, atomlaşma için gerekli ısının elektrik enerjisiyle sağlanması için bir çok emisyon ışık kaynağı, atomizerler (arklar, kıvılcımlar ve lazerler gibi) AAS'de kullanılır ve elektrotermal atomizasyon olarak adlandırılır. Atomizasyonun elektrik akımına karşı dirençle üretilen ısıtma ile gerçekleştiğini keşfettiler ve bunun sonucunda elektrotermal atomizerler ortaya çıktı. En sık görülen tipler grafit fırın atomizerleridir (Collell, C., ve diğ. 2010).

Grafit -AAS'nin Avantajları

1. Alevde hassasiyet artar. Alevde  $\mu\text{l/ml}$  seviyesinde, grafitte ise  $\mu\text{l/l}$  seviyesinde tayin yapılır. Örnek hacmi küçülür. Alev için 0,5 ml numune gerekirken, grafit de 5-10  $\mu\text{l}'$ ye düşer.

2. Örneğin, ön işlem azaltılır. Çoğu işlem ön işlem sıcaklığıyla gerçekleştirilebilir.

3. Katı numune analizleri için idealdir.

✓ Grafit-AAS'nin Dezavantajları

1. Belirleme süresi uzundur. Grafitte 2 dakikada belirleme yapılabilirken, alevde 15 saniye yeterlidir.

2. Gerçekten kesin değil. Alevde yaklaşık %1-2 ve grafitte daha büyüktür.

3. Özellikle zemin zorlukları nedeniyle müdahaleler yaygındır.

4. Pahalı bir tekniktir.

5. Çalışma, yetkinlik gerektiren karmaşık bir süreçtir.

6. Küçük örneklem büyüklüklerinde örnekleme ve heterojenlik sorunları yaşanmaktadır.

Özetle, AAS yöntemi eser miktardaki metallerin (ppm ve ppb seviyelerinde) kantitatif analizinde kullanılmaktadır. Analiz öncesinde, örneğin uygun bir çözeltisi hazırlanır. Analizi yapılacak metal için, cihaz üzerine o metale özgü oyuk katot lambası monte edilir. Daha sonra çeşitli standart çözeltiler hazırlanarak, ilgili metalin absorptans gösterdiği dalga boyunda ölçüm alınır ve bu veriler kullanılarak bir standart eğri oluşturulur (Crocombe, R. A. 2018).

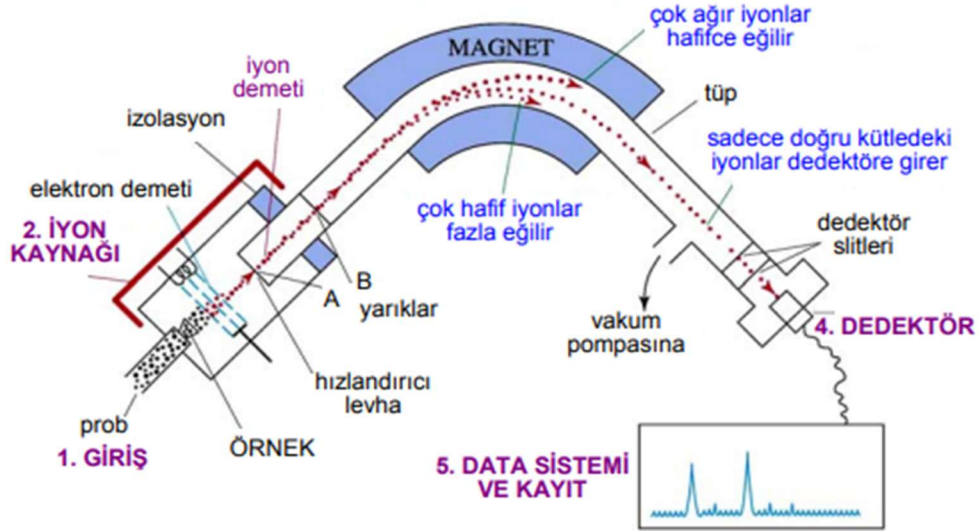
### 3.2.9 Kütle spektrometrisi (MS)

Kütle spektrometrisi, örnekteki bileşiklerin kolayca hareket edebilen iyonlara (genellikle pozitif iyonlar) dönüştürülmesi ve bu iyonların kütle/yük oranlarına göre ayrılmasıyla elde edilir. İyonizasyon aşamasında, çoğunlukla ana maddeye özgü belirli bir kütle dağılımı gösteren pozitif yüklü tanecikler oluşur. Kütle spektrometrisi de bu prensip temel alınarak geliştirilmiştir. Kütle spektrometrisi, bir maddenin kimyasal yapısına dair önemli bilgiler sunar. Spektrel veriler, bazı yönlerden infrared ve NMR spektrumlarından daha kolay yorumlanabilir; çünkü burada bilgiler, örneğin yapısal bileşimiyle bağlantılı olarak moleküler kütle üzerinden değerlendirilir. Ayrıca bu yöntemle analitin moleküler ağırlığı da hassas bir şekilde belirlenebilir. Kütle spektrometrisi, kompleks karışımların

kantitatif analizinde de kullanılır; bu durumda farklı kütlelerdeki iyon akımları ile konsantrasyon arasındaki ilişki esas alınır (Ertugay, M. ve Başlar, M. 2011).

### Şekil 3.14

*Bir Kütle Spektrometrenin Şematik Diyagramı*

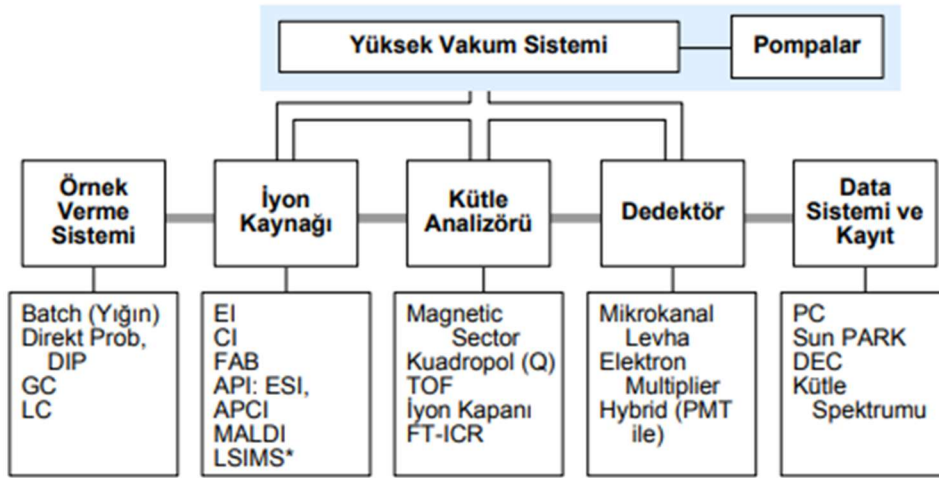


[http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page\\_701.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_701.html)

Şekilde, bir kütle spektrometresinin temel bileşenleri gösterilmektedir. Kütle analizörü, optik spektrometrelerde elektromanyetik ışını ayıran prizma veya ızgara (grating) gibi bir işlev görerek, örnekteki taneciklerin ayrılmasını sağlar. Buradaki ayırma işlemi, ışığın ayrılmasından ziyade taneciklerin kütle/yük oranlarına göre ayrılması esasına dayanır. Kütle spektrometresinin optik tekniklerden farklı önemli bir özelliği ise, dedektöre kadar uzanan tüm sistemin çok düşük bir basınçta çalışmasıdır. Bu nedenle, hassas vakum sistemleri kütle spektrometrelerinin en kritik bileşenlerinden biridir (Gangidi, R. R., 2003).

Şekil 3.15

Kütle Spektrometresi Blok Diyagramı



[http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page\\_701.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_701.html)

Çalışmada aşağıdaki sıra izlenir.

**Örnek Verme Sistemi:** Mikromol seviyesinde (veya daha az miktarda) bir örnek gaz fazına geçirilerek, 10 torr basınca sahip iyonizasyon odasına yavaşça aktarılır.

**İyon Kaynağı:** Örnek içerisindeki moleküller, ısıtılmış bir flamanın ürettiği ve anoda doğru hareket eden elektron akımı aracılığıyla doğrudan ya da dolaylı olarak iyonlaştırılır (iyonizasyon sonucu hem pozitif hem de negatif iyonlar oluşur; ancak pozitif iyonlar daha baskındır ve analitik yöntemler genellikle bu pozitif taneciklere odaklanır). A slitinde uygulanan hafif negatif potansiyel sayesinde pozitif iyonlar negatiflerden ayrılır ve A ile B arasında oluşturulan birkaç yüz ile birkaç bin volt arasındaki potansiyel farkıyla hızlandırılır. Paralel hale getirilen pozitif iyonlar demeti ise B slitinden geçerek ayırma bölgesine yönlendirilir.

**Kütle Analizörü:** Yaklaşık  $10^{-7}$  torr basınç altında tutulan analizör tüpünde, yüksek hızda hareket eden iyonlar güçlü bir manyetik alan içerisine girer ve bu alanın etkisiyle eğimli bir yol izlerler. Bu eğriliğin çapı, manyetik alanın şiddetine, iyonların hızına ve külesine bağlı olarak değişir. Farklı kütlelerdeki taneciklerin çıkış slitine odaklanabilmesi için, hızlandırıcı potansiyel ya da manyetik alanın gücü ayarlanır.

**Dedektör:** Çıkış slitinden geçen iyonlar, toplayıcı elektrota ulaşarak bir iyon akımı oluşturur. Bu iyon akımı daha sonra yükseltilebilir hale getirilir.

**Data Sistemi ve Kayıt:** Yükseltilmiş iyon akımı, manyetik alan kuvvetine veya hızlandırma potansiyeline bağlı olarak kaydedilir.

### **3.3 Spektrometrik Analizlerin Gıda Güvenliği Açısından Önemi**

Gıda güvenliği, gıda ürünlerinin üretiminden tüketimine kadar geçen tüm aşamalarda kalite ve güvenilirliğin korunmasını ifade eder. İnsan sağlığı ve yaşam kalitesi açısından büyük önem taşıdığından, hem üreticilerin hem de tüketicilerin bu konuda hassas davranması ve tüketilen gıdaların güvenli olduğundan emin olması gereklidir. Aksi halde, güvenliği sağlanmamış gıdaların tüketimi ciddi sağlık problemlerine yol açabilir ve toplum sağlığı ile ekonomi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Örneğin, geniş çaplı bir gıda zehirlenmesi vakası halk sağlığını tehdit edebilir ve çok sayıda insanın hastalanmasına neden olabilir. Böyle bir durum, tüketicilerin güvenini kaybettirerek gıda üreticilerinin itibarını zedeleyebilir ve sektöre büyük ekonomik zararlar verebilir (Hart, J. R., 1962).

Gıda güvenliğini tehlikeye atabilecek bakterilerin tespiti için bir dizi farklı teknik mevcuttur. Bu teknikler, gıdaların ışıkla etkileşimlerini inceleyerek bakteri varlığını belirler. Gıda endüstrisinde genellikle yaygın olarak kullanılmaları da, bu yöntemler hızlı ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Spektroskopik teknikler, geniş bir yelpazede kullanılan analitik araçlardır ve bakteri tespiti gibi pek çok farklı alanda uygulama bulur. Bu yaklaşımlar, malzemelerdeki kimyasal veya biyolojik bileşenleri değerlendirmek için ışık emilimi, yansıma ve saçılma gibi fiziksel süreçleri kullanır. Bakterileri tespit etmek için en yaygın kullanılan spektroskopik teknikler aşağıda listelenmiştir:

UV-Vis (Ultraviyole – Görünür Işık) spektroskopisi, örneklerdeki bileşenlerin ultraviyole veya görünür ışık aralığında emilimlerini ölçerek analiz yapar. Bakterilerdeki belli bileşenlerin ışık emilim özellikleri, bakteri türlerinin tanımlanmasında kullanılabilir.

FT-IR (Fourier Dönüşümü - Kızılötesi) spektroskopisi, numunelerdeki kimyasal maddelerin moleküler titreşimlerini ölçer. Bakteri hücrelerindeki kimyasal bileşiklerin titreşim özellikleri, bakteriye özgü bileşenler hakkında bilgi ortaya çıkarabilir.

Raman spektroskopisi: Bu yaklaşım, yüksek enerjili lazer ışığına maruz kaldığında numunedeki moleküller tarafından yayılan radyasyonu tespit ederek çalışır. Bakteri hücrelerinde Raman ışığına tepki veren kimyasallar bulunursa, bu yaklaşım bakterileri

tanımlamak için kullanılabilir. Spektroskopik analiz yöntemleri klasik bakteri kültürü tekniklerinden daha hızlı ve daha hassastır. Ancak, bu prosedürlerin önemli sınırlamaları vardır. Örneğin, bileşenleri düzgün bir şekilde ayırmak için numunelerin önceden hazırlanması gerekebilir ve bazı işlemler özel ekipman kullanımını gerektirebilir. Her stratejinin çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. Bu yaklaşımlara alternatif olarak, daha hızlı ve daha hassas bulgular üreten biyosensörler oluşturmak için araştırmalar yapılmaktadır. Ancak, tespit edilmesi gereken belirli bakterilere veya bileşenlere özgü biyosensörler geliştirmek zaman alıcı ve zor bir prosedür olabilir.

### 3.3.1 Biyosensörler

Biyosensörler, biyolojik moleküllerle etkileşime giren hassas sensörler ve sinyal dönüştürücülerden oluşan analitik cihazlardır. Bu cihazların gıda güvenliği, sağlık, çevre, tarım ve biyoteknoloji dahil olmak üzere çeşitli disiplinlerde sayısız kullanımı vardır.

Biyosensörler gıda güvenliği alanında da sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle, gıda kaynaklı mikroorganizmaların hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesi amacıyla biyosensörlerin geliştirilmesi büyük bir önem taşır. Ancak, biyosensör tasarım süreci oldukça karmaşık ve çok aşamalıdır. Biyosensör geliştirme sürecinin aşamaları aşağıda özetlenmiştir: (Kodogiannis, V. S., ve diğ. 2014).

*Algılayıcı elemanın seçimi:* Bir biyosensörde kullanılan algılama elemanının türü, hedef analitlerin doğası ve nitelikleri tarafından belirlenir. En sık kullanılan algılama elemanları antikorlar, enzimler ve DNA'dır.

*Biyoreseptör immobilizasyonu:* Algılayıcı bileşen, duyarlılık ve seçicilik özelliklerini muhafaza edecek şekilde bir taşıyıcıya sabitlenir.

*Transdüser seçimi:* Transdüser, biyoreseptör tarafından tespit edilen sinyalleri, ölçülebilir bir sinyale dönüştürür. Bu aşamada, uygun algılama yöntemi belirlenir.

*Optimizasyon:* Biyosensörün verimliliğini artırmak için, en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi gereklidir. Bu aşamada, duyarlılık, seçicilik, ölçüm hızı ve örnek hazırlama yöntemleri gibi unsurlar değerlendirilir.

*Kalibrasyon ve validasyon:* Biyosensörün doğruluk ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla kalibrasyon ve validasyon işlemleri yapılır. Mikroorganizmaların tespitinde farklı tekniklere dayanan çeşitli biyosensör türleri mevcuttur.

**Elektrokimyasal biyosensörler:** Analit ile biyoreseptör arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan elektrokimyasal özellikler temel alınarak çalışır. Biyoreseptör, hedef analitle bağlandığında veya reaksiyona girdiğinde bir elektriksel sinyal oluşur. Bu sinyal, transdüser tarafından algılanarak ölçülebilir hale getirilir. Elde edilen sinyal, hedef analitin varlığı veya konsantrasyonu hakkında bilgi sunar. Elektrokimyasal biyosensörler, özellikle gıda analizlerinde sıkça tercih edilen sensörler arasındadır.

**Optik biyosensörler:** Optik biyosensörler, ışık kaynakları, optik fiberler ve yüzey plazmon rezonansı (SPR) gibi optik bileşenlerden yararlanarak çalışır. Bu sensörler, genellikle hedef analiti tanıyan veya ölçen bir biyolojik bileşen (biyoreseptör: antikolarlar, enzimler, DNA ya da hücreler), biyolojik bileşenin sabitlendiği bir yüzey ve optik sinyal işleme biriminden oluşur. Biyoreseptör ile analit arasındaki etkileşim sonucunda, plazmonik dalga boyunda kayma ya da floresans ışıması gibi optik değişimler meydana gelir ve bu değişiklikler optik dedektörler aracılığıyla ölçülür.

**Akustik biyosensörler:** Ses dalgalarının özelliklerinden yararlanarak biyolojik etkileşimleri tespit eden biyosensörlerdir. Yüzey akustik dalgaları (SAW) veya kalınlık titreşim modları (TSM) gibi akustik yöntemler kullanılarak biyomoleküllerin varlığı belirlenir. Önceki yöntemlere benzer şekilde geliştirilirler ancak biyoreseptör-analit etkileşimi sonucu ortaya çıkan akustik sinyaller ölçülür. Manyetik biyosensörler: Manyetik biyosensörler, bir biyolojik bileşen, manyetik parçacık ve algılayıcıdan oluşur ve manyetik alan kullanılarak biyomoleküllerin tespitini sağlar. Biyolojik bileşen, hedef analiti tanıyan veya ölçen bir biyoreseptör görevindedir. Manyetik parçacık ise biyolojik bileşenin immobilize edildiği veya kaplandığı manyetik özellikte bir taşıyıcıdır. Algılayıcı, manyetik parçacıkların hareketlerini izleyerek bu verileri analiz eder. Manyetik biyosensörler, özellikle DNA veya protein gibi biyomoleküllerin tespitinde yaygın olarak kullanılmakta olup, bir DNA veya proteine bağlanan manyetik parçacıkları yüksek hassasiyet ve özgüllükle saptayabilmektedir.

**Nanobiyosensörler:** Nanobiyosensörler, son yıllarda geliştirilen yeni nesil biyosensörlerdir ve nano ölçekli malzemeler kullanarak biyomoleküllerin tespitini sağlarlar. Bu sensörler de biyoreseptör-analit etkileşimi sonucu oluşan sinyallerin ölçümüne dayanır, ancak çok daha yüksek hassasiyet ve özgüllük sunarlar. Örneğin, altın nanoparçacıklarına immobilize edilen DNA oligonükleotidleri, tamamlayıcı DNA dizilerini tanıyarak hedef analitlerin tespitinde kullanılabilirken, karbon nanotüpler

protein veya hücre tespiti için işlev görür. Ayrıca, nano boyuttaki grafen yapılar da biyomolekül algılamada yüksek duyarlılık sağlamaktadır.

**Biyoluminesans sensörleri:** Mikroorganizmaların tespitinde biyoluminesans reaksiyonları kullanılan biyosensörler, biyolojik tepkimeler sonucu ortaya çıkan ışık sinyalini algılayarak, yayılan veya absorplanan ışığın şiddetini nicel ya da nitel olarak ölçerler. Bu sistemlerde ışık kaynağı, ya doğrudan biyolojik materyalin kendisi ya da onunla etkileşen bir kimyasal olabilir. Örneğin, ATP'nin (adenozin trifosfat) tespiti için ATP'ye özgü bir enzim kullanılarak ATP'nin hidrolizi sağlanır ve bu süreçte ışık yayılır; ışığın yoğunluğu ölçülerek ATP konsantrasyonu belirlenir. Bu tür biyosensörler, gıda güvenliği, su kalitesinin izlenmesi, tıp ve biyoteknoloji gibi çeşitli alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır.

**İmmünosensörler:** Bir bakterinin varlığı, bakterinin antijenini tanıyan antikorlar kullanılarak tespit edilir. Bu antikorlar, biyosensör yüzeyine sabitlenir ve hedef mikroorganizmanın antijenleriyle etkileşime girer. Antijen-antikor etkileşimi sonucunda bir sinyal üretilir ve bu sinyalin ölçülmesiyle tespit işlemi gerçekleştirilir.

**DNA sensörleri:** DNA tespiti için geliştirilen biyosensörler, hedef DNA dizilerini belirlemek amacıyla özel olarak tasarlanmış prob setleri kullanır. Bu sensörler, mikroorganizmalara özgü DNA bölgelerini tanıyarak ilgili mikroorganizmanın varlığını ortaya koyar. DNA sensörleri, çoğunlukla elektronik, optik ya da manyetik algılama sistemleriyle birlikte çalışır. Genetik hastalıkların teşhisi, patojenlerin belirlenmesi ve biyolojik ajanların tespiti gibi pek çok alanda önemli uygulamalara sahiptirler.

## 4 SPEKTROSKOPİK YÖNTEMLERİN AVANTAJLARI VE KISITLAMALARI

### 4.1 Spektroskopik Tekniklerin Sağladığı Avantajlar

#### 1. Yüksek Hassasiyet ve Duyarlılık

Spektroskopik teknikler, özellikle düşük konsantrasyondaki maddelerin tespitinde oldukça yüksek hassasiyet ve duyarlılık sağlar. UV-Vis, FTIR, NMR, AAS gibi teknikler, çok küçük miktarlardaki bileşenlerin bile tanımlanmasına olanak tanır. Bu durum, ilaç analizinden çevresel kontaminantların tespitine kadar birçok alanda avantaj sağlamaktadır.

#### 2. Tahribatsız (Non-Destructive) Analiz

Birçok spektroskopik yöntem, numunenin yapısını bozmadan analiz yapılmasına imkan tanır. Örneğin, Raman ve NMR spektroskopisi, maddenin fiziksel yapısını değiştirmeden bilgi sunar. Bu özellik, özellikle değerli veya tekrar kullanılabilir numuneler üzerinde çalışılırken büyük bir avantajdır.

#### 3. Hızlı ve Zaman Tasarruflu Sonuçlar

Spektroskopik analizler genellikle kısa sürede tamamlanabilir. Özellikle rutin analizlerde kullanılan UV-Vis spektrofotometresi, dakikalar içinde sonuç verebilir. Hızlı sonuç elde etmek, üretim ve kalite kontrol süreçlerinde zaman tasarrufu sağlayarak verimliliği artırır.

#### 4.Çoklu Bileşen Analizi Yeteneği

Bazı spektroskopik teknikler, aynı anda birden fazla bileşiği analiz edebilme kapasitesine sahiptir. Özellikle NMR ve FTIR gibi yöntemler, karmaşık karışımların analizinde büyük kolaylık sağlar. Bu çok bileşenli analiz yeteneği, biyolojik örnekler, gıda maddeleri ve farmasötik ürünlerde oldukça değerlidir.

#### 5.Moleküler ve Yapısal Bilgi Sağlama

Spektroskopi teknikleri, yalnızca kantitatif analiz değil, aynı zamanda moleküler yapı hakkında da detaylı bilgi sunar. Örneğin:

- ✓ NMR Spektroskopisi, atomlar arası bağ yapısını, proton ve karbon çevresindeki kimyasal ortamı gösterir.
- ✓ IR Spektroskopisi, fonksiyonel grupların varlığını tespit eder.
- ✓ Mass Spektrometresi, molekülün kütle yapısını belirler.

Bu özellik, yeni bileşiklerin sentezi ve karakterizasyonu açısından oldukça önemlidir.

## **6.Geniş Uygulama Alanı**

Spektroskopik teknikler; kimya, biyoloji, fizik, çevre bilimleri, malzeme bilimi, tıp, eczacılık, gıda teknolojisi gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çok yönlülük, spektroskopinin araştırma ve endüstri uygulamalarındaki önemini artırmaktadır.

## **7.Otomasyon ve Veri Analizine Uygunluk**

Modern spektroskopik cihazlar, bilgisayar destekli sistemlerle otomatik analiz yapabilme özelliğine sahiptir. Bu durum, insan hatasını en aza indirerek güvenilirlik sağlar. Ayrıca, büyük verilerin işlenmesi, spektrumların karşılaştırılması ve kalibrasyon modellerinin oluşturulması gibi işlemler yazılımlar sayesinde kolaylaşır.

## **8.Kalitatif ve Kantitatif Bilgi Sunma**

Spektroskopik analizler hem **nitel (kalitatif)** hem de **nicel (kantitatif)** bilgi sağlar. Bu yönüyle sadece "var mı?" sorusuna değil, aynı zamanda "ne kadar var?" sorusuna da yanıt verebilir. Bu özellik, özellikle kalite kontrol ve farmasötik analizlerde önem taşır.

Spektroskopik teknikler, kimyasal analiz alanında devrim yaratmış teknolojilerdendir. Sağladığı hız, hassasiyet, tahribatsız analiz imkanı ve geniş uygulama alanı sayesinde modern bilimin vazgeçilmez araçları arasında yer almaktadır. Araştırmalarda doğru, güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlara ulaşmak isteyen bilim insanları için spektroskopik yöntemler büyük avantajlar sunar.

### **4.2 Geleneksel Yöntemlerle Karşılaştırılması**

Kimyasal analizler, bilimsel araştırmalardan endüstriyel üretime kadar geniş bir yelpazede kritik öneme sahiptir. Analitik kimyada kullanılan yöntemler, teknolojinin gelişimiyle birlikte büyük bir dönüşüm geçirmiştir. Geleneksel analiz yöntemleri, uzun yıllar boyunca doğruluğu kanıtlanmış ve güvenilir sonuçlar sunan temel teknikler olarak kullanılmıştır. Titrasyon, gravimetrik analiz ve alev testleri gibi yöntemler; basit donanım gereksinimleri ve temel ilkelere dayalı olmaları nedeniyle özellikle eğitim ve rutin laboratuvar çalışmalarında sıkça tercih edilmiştir. Bununla birlikte, modern bilimsel ihtiyaçlar doğrultusunda daha hızlı, hassas ve çok yönlü analiz yapabilen tekniklerin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu noktada spektroskopik teknikler, analitik kimyada önemli

bir yer edinmiş; özellikle kalitatif ve kantitatif analizlerde sağladığı yüksek hassasiyet, kısa analiz süresi ve az örnek gereksinimi gibi avantajlarla dikkat çekmiştir. Bu çalışmada, spektroskopik teknikler ile geleneksel yöntemler karşılaştırmalı olarak ele alınacak; her iki yaklaşımın güçlü ve sınırlı yönleri incelenerek kullanım alanlarına göre uygunlukları değerlendirilecektir.

- Spektroskopik teknikler, madde ile elektromanyetik radyasyon arasındaki etkileşimleri inceleyerek bilgi sağlar.
- Geleneksel yöntemler (ör. titrasyon, gravimetrik analiz), kimyasal maddelerin fiziksel veya kimyasal özelliklerini doğrudan ölçmeye dayanır.
- Bu çalışmada, spektroskopik yöntemlerin avantajları, sınırlamaları ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırılması ele alınacaktır.

Spektroskopik Teknikler:

- **UV-Vis Spektroskopisi:** Moleküllerin UV ve görünür ışığı absorpsiyonunu ölçer.
- **FTIR (Fourier Transform Infrared) Spektroskopisi:** Moleküllerin titreşim geçişlerini analiz eder.
- **NMR (Nükleer Manyetik Rezonans):** Atom çekirdeği spin durumlarının manyetik alanda nasıl davrandığını inceler.
- **AAS (Atomik Absorpsiyon Spektroskopisi):** Metal iyonlarının varlığını ve miktarını belirlemede kullanılır.

Geleneksel Yöntemler:

- **Titrasyon:** Analit konsantrasyonunu belirlemek için bilinen konsantrasyondaki bir çözeltiliyle reaksiyon yaptırılır.
- **Gravimetrik Analiz:** Bileşiğin bir kısmı ayrılarak tartılır ve buradan madde miktarı hesaplanır.
- **Alev Testi:** Bazı elementlerin alevde oluşturduğu renklerle tanınması.

**Tablo 4.1***Karşılaştırma Kriterleri*

Özellik	Spektroskopik Teknikler	Geleneksel Yöntemler
Hız	Genellikle çok hızlı	Daha yavaş
Doğruluk / Hassasiyet	Yüksek	Orta
Miktar Gereksinimi	Çok az örnek yeterlidir	Daha fazla örnek gerekebilir
Cihaz Gereksinimi	İleri teknoloji cihazlar gerekir	Basit laboratuvar ekipmanları yeterlidir
Çoklu analiz yapabilme	Evet (özellikle FTIR, NMR)	Genellikle tek analiz
Maliyet	Yüksek ilk yatırım, düşük işlem maliyeti	Düşük yatırım, işlem maliyeti değişken

## Uygulama Alanlarına Göre Değerlendirme:

- **Çevresel analizlerde:** Spektroskopik yöntemler, ağır metal tayini gibi işlemlerde daha uygundur.
- **Gıda analizlerinde:** Hem geleneksel (titrasyon) hem de spektroskopik (NIR) yöntemler kullanılır.
- **İlaç sektöründe:** NMR ve UV-Vis, bileşiklerin yapı analizinde kullanılırken; geleneksel yöntemler kalite kontrolde yer alabilir.

Spektroskopik ve geleneksel analiz yöntemleri, kimyasal analiz süreçlerinde farklı avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır. Geleneksel yöntemler; uygulama kolaylığı, düşük maliyet ve temel ekipmanlarla gerçekleştirilebilme özellikleri sayesinde özellikle eğitim amaçlı laboratuvarlarda ve bazı rutin analizlerde tercih edilmektedir. Buna karşılık, spektroskopik teknikler; daha yüksek doğruluk, daha kısa analiz süresi, daha az örnek gereksinimi ve çoklu analiz imkânı gibi önemli avantajlara sahiptir. Gelişen teknolojiyle birlikte spektroskopik yöntemlerin erişilebilirliği artmakta ve bu teknikler daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, her analiz yöntemi belirli koşullar ve ihtiyaçlar doğrultusunda değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, analiz edilecek örneğin türü, istenen hassasiyet düzeyi, laboratuvar olanakları ve zaman kısıtları gibi faktörler, hangi yöntemin daha uygun olduğunu belirlemede kritik rol oynamaktadır. Sonuç olarak, geleneksel ve spektroskopik yöntemler birbirinin alternatifi değil, tamamlayıcısı olarak görülmeli ve analiz sürecine bütüncül bir yaklaşım ile entegre edilmelidir.

### 4.3 Spektroskopik Yöntemlerin Kısıtlamaları ve Zorluklar

Spektroskopik yöntemlerin en temel kısıtlamalarından biri, yüksek donanım ve teknoloji gereksinimidir. NMR spektroskopisi gibi bazı ileri düzey teknikler, sadece çok gelişmiş laboratuvarlarda bulunan, maliyeti oldukça yüksek cihazlarla gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür cihazların temini ve bakımı büyük yatırımlar gerektirmekte, bu da özellikle küçük ölçekli araştırma laboratuvarları veya gelişmekte olan ülkelerdeki kurumlar için önemli bir sınırlayıcı unsur oluşturmaktadır.

Bunun yanında, operatör uzmanlığı da önemli bir zorluktur. Spektroskopik verilerin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi, yalnızca cihaz kullanım becerisi değil; aynı zamanda kimyasal yapılar, sinyal ayrışımı, parazit etkileri ve kalibrasyon teknikleri hakkında derin bilgi gerektirir. Yanlış yapılan analizler, hatalı sonuçlara ve dolayısıyla karar süreçlerinde ciddi sorunlara yol açabilir.

Spektroskopik tekniklerin bir diğer zorluğu, örnek hazırlık süreçlerinde ortaya çıkmaktadır. Örneğin, IR spektroskopisinde numunelerin uygun formda (katı, sıvı ya da gaz) hazırlanması ve homojen bir şekilde yerleştirilmesi gerekir. Ayrıca, bazı tekniklerde analiz öncesi ekstraksiyon, kurutma veya çözme işlemleri gerekebilir ve bu durum analiz süresini uzatarak hata payını artırabilir.

Matris etkisi de spektroskopik analizlerin doğruluğunu etkileyebilen önemli bir faktördür. Özellikle karmaşık karışımlarda bulunan yabancı maddeler, sinyal girişimlerine neden olarak istenen maddenin doğru şekilde tespit edilmesini zorlaştırabilir. Bu durum özellikle çevresel örnekler, gıda maddeleri veya biyolojik sıvılarda yapılan analizlerde daha belirgin hale gelir.

Son olarak, bazı spektroskopik yöntemler, belirli bileşik türleriyle sınırlı çalışabilmektedir. Örneğin, UV-Vis spektroskopisi sadece kromofor içeren bileşikleri analiz edebilirken; NMR, yalnızca manyetik çekirdeğe sahip atomları gözlemleyebilir. Bu durum, analiz kapsamını daraltmakta ve bazen tamamlayıcı tekniklerin kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Spektroskopik yöntemler, modern analitik kimyanın vazgeçilmez araçları arasında yer almakta ve pek çok alanda hızlı, hassas ve güvenilir analiz imkânı sunmaktadır. Ancak bu tekniklerin sunduğu olanaklara rağmen, çeşitli sınırlamalar ve zorluklar da beraberinde gelmektedir. Yüksek maliyetli cihazlar, uzman operatör gereksinimi, karmaşık örnek

hazırlama süreçleri ve matris etkileri, spektroskopik analizlerin etkinliğini ve yaygınlığını sınırlandıran temel faktörler arasında yer almaktadır. Ayrıca, bazı tekniklerin sadece belirli bileşik türleri üzerinde çalışabilmesi, bu yöntemlerin evrensel kullanımını kısıtlamaktadır. Bu bağlamda, spektroskopik tekniklerin sunduğu avantajlardan en verimli şekilde faydalanabilmek için; kullanıcıların yöntemlerin sınırlamalarını iyi tanınması, uygun numune hazırlığı ve veri yorumlama konusunda yeterli donanıma sahip olması büyük önem taşımaktadır. Gelecekte, cihazların daha erişilebilir ve kullanıcı dostu hale gelmesiyle birlikte, bu yöntemlerin daha geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından etkin bir şekilde kullanılacağı öngörülmektedir.

## 5 GÜNCEL UYGULAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

### 5.1 Et ve Et Ürünlerinde Kızılötesi (IR) Spektroskopi Uygulamaları

Et ve et ürünlerinin yapılarındaki özellikle protein, lipit ve diğer makro ve mikro besin öğelerinin içeriklerinin biyolojik, kimyasal ve fiziksel niteliklerinin kalite parametreleri açısından heterojenliği ve karmaşıklığı. Günümüz üretim anlayışında vazgeçilmez bir unsur olan gıda güvenliği gibi unsurların da bulunması gerekiyor.

Kompleks yapıya sahip gıdaların çeşitli nedenlerle analiz edilmesi gerekmektedir. Resmî kurumlar, gıdaların ilgili kodeks ve yönetmeliklere uygunluğunu denetlemek amacıyla bu analizleri gerçekleştirir. Bu kontrollerin temel amacı, tüketicilere zarar verebilecek durumların önüne geçmek ve haksız ekonomik kazancı önlemektir. Ayrıca gıda üreticileri de, tedarik ettikleri ham maddelerin ve ürettikleri ürünlerin depolama, üretim ve dağıtım süreçlerinde belirlenen kalite standartlarını koruduğundan emin olmak için düzenli analizler yapmaktadır. Akademik alanda yürütülen çalışmalar ise; daha pratik ve yenilikçi analiz yöntemlerinin geliştirilmesi, gıdalardaki bileşiklerin ayrıntılı şekilde belirlenmesi, olası risklerin önlenmesi ve ekonomik değeri artırılmış yeni gıda ürünlerinin oluşturulmasına odaklanmaktadır. Son yıllarda, tüketicilerin de gıdaların kalitesinin analitik yöntemlerle doğrulanması konusundaki talepleri artmıştır. Bu talep artışında, gıda kaynaklı skandalların medya aracılığıyla geniş kitlelere duyurulmasının etkisi büyüktür. Bu gelişmelerle birlikte, gıdaların hızlı bir şekilde analiz edilmesine yönelik çalışmalar daha da önem kazanmıştır. Günümüzde, gıdaların hızlı analizi için başlıca iki temel yaklaşım öne çıkmaktadır.

Bu yaklaşımlardan birincisi, gıdaların fiziksel özelliklerini bilgi kaynağı olarak kullanmak, ikincisi ise kimyasal analizlerin otomatikleştirilmesidir. Gıdaların fiziksel özelliklerine dayanan hızlı analiz yöntemlerinin çoğu, spektroskopik tekniklere dayanır. Bu tekniklerden biri de kızılötesi spektroskopidir.

Kızılötesi spektroskopisinin gıdalarda ilk uygulaması, ABD Tarım Bakanlığı'nın 1949 yılında bir çalışma gerçekleştirmesiyle başlamıştır. Projede, o dönemde yumurtaların kalite ölçütlerinin belirlendiği geleneksel bir ışık kaynağı kullanılarak, yumurtaların bir uzman tarafından incelenme sürecinin otomatikleştirilmesi hedeflenmiştir. Kızılötesi spektroskopiyle yapılan ilk kantitatif çalışma ise 1962 yılında yayımlanmıştır. Bu çalışmada, tohumların metanoldeki ekstratları kullanılarak nem ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Pico, Y. 2012).

Bir araştırmada, 400 – 2500 nm dalga boyu aralığındaki kızılötesi radyasyon kullanılarak sığır etlerinin yağ asidi bileşimi incelenmiştir. 2 nm çözünlüğe sahip kızılötesi spektroskopi verileri, kromatografik analiz ile doğrulanmıştır. Çalışmada, 12 ila 22 karbon atomlu farklı doymuş ve doymamış yağ asitlerinin istatistiksel olarak doğru bir şekilde tahmin edilmesi sağlanmıştır (R2CV= 0.01 – 0.94). Toplam yağ oranı oldukça yüksek bir doğrulukla (R2CV= 0.95) belirlenmişken, tekli doymamış yağ asitlerinin doğruluk oranı R2CV= 0.93, çoklu doymamış yağ asitlerinin ise R2CV= 0.59 olarak tespit edilmiştir.

Bir çalışmada, 350 – 2500 nm dalga boyu aralığında ve 1 nm dalga boyu hassasiyetiyle domuz karkaslarındaki yağ bileşenleri incelenmiştir. Bu çalışmada, yağların iyot değeri (R2= 0.95), doymuş yağ oranı (%) (R2= 0.88), tekli doymamış yağ oranı (%) (R2= 0.85), çoklu doymamış yağ oranı (%) (R2= 0.94), omega-3 değeri (%) (R2= 0.93) ve omega-6 değeri (%) (R2= 0.89) yüksek doğruluk oranları ile tespit edilmiştir. Bu bulgular, hayvanlardan elde edilen yağların kesimhaneden çıkmadan önce belirli kalite standartlarına göre sınıflandırılabilceğini göstermektedir.

FT-NIR yöntemi kullanılarak, sosislerde 12.000 ve 4.000 cm<sup>-1</sup> dalga sayılarındaki kızılötesi ışınım (833 – 2550 nm) ile yapılan bir çalışmada, nem oranı (%) (R2= 0.997), su aktivitesi (aw) (R2= 0.988) ve NaCl oranı (%) (R2= 0.974) yüksek doğrulukla belirlenmiştir.

Dinlendirilmiş etlerin tespiti üzerine yapılan bir araştırmada, iki gün dinlendirilmiş etler %94 doğrulukla ve on dört gün dinlendirilmiş etler ise %97 doğrulukla 350 – 2500 nm dalga boyu aralığındaki kızılötesi ışınımla belirlenebilmiştir. Aynı çalışmada, iki günlük dinlendirilmiş etlere nem ilavesi yapılmış (standart tuz %0.5 ve disodyum fosfat solüsyonu %0.49, et enjeksiyon makinesi ile ete enjekte edilmiştir) olan örnekler %97 doğrulukla, nem ilavesi yapılmamış örnekler ise %99 doğrulukla tespit edilmiştir. On dört günlük dinlendirilmiş etlerde ise nem ilavesi yapılanlar %94 doğrulukla, yapılmayanlar ise %95 doğrulukla belirlenebilmiştir.

Bir araştırmada, 1800 – 1000 cm<sup>-1</sup> dalga sayısındaki kızılötesi ışınım FTIR tekniği kullanılarak etlerin mikrobiyal bozulma seviyeleri analiz edilmiştir. Etlerin bozulma durumu, toplam canlı bakteri sayısı ve organoleptik değerlendirmelerle belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, taze etler %92, yarı taze etler %93.33 ve bozulmuş etler ise %100 doğrulukla tespit edilmiştir.

Kanatlı hayvanlarla yapılan bir çalışmada, 2 nm çözünürlükle 400 – 2498 nm dalga boyundaki kızılötesi ışınlar kullanılarak, tavuk etlerinin kurutulup toz haline getirilmesiyle elde edilen karışımdan ham protein  $R^2= 0.86$ , yağ  $R^2= 0.93$  ve kül oranı  $R^2= 0.71$  doğruluk oranlarıyla tespit edilmiştir. Ayrıca, aynı çalışma kapsamında, tavukların kızılötesi spektroskopi yardımıyla genotiplendirilmesi yapılmış ve Ross 308, Euribrid HISEX ve Ross 1972 genotiplerine ait oldukları belirlenmiştir.

Güncel bir çalışmada, dondurulmuş etlerin kızılötesi radyasyon ile tespiti amacıyla tavuk eti kullanılmıştır. Çalışmada, tavuk etlerinin eksudatları 500 – 4000  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında ve 6  $\text{cm}^{-1}$  çözünürlükle kızılötesi ışınlarla incelenmiştir. FTIR yöntemi kullanılarak yapılan analizde, tavuk etlerinin  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 gün boyunca saklanmasına rağmen (85 güne kadar dondurulmuş etler de çalışmaya dahil edilmiştir) taze etlerden ayırt edilebildiği belirlenmiştir.

Dondurulmuş gıdalar üzerine yapılan başka bir çalışmada, sığır etine sahtecilik amacıyla hindi eti eklenmesi incelendi. Denemede, hindi eti sığır etine %5, %10, %15, %20, %30, %40 ve %50 seviyelerinde eklendi. Etler, 8  $\text{cm}^{-1}$  çözünürlükte 800 - 2667 nm kızılötesi radyasyon kullanılarak değerlendirildi. Tağşişli etlerin tespitinde, %20'lik bir limit belirlenmiştir. Taze, çözündürülmüş donmuş ve pişmiş etlerde, tağşişin tespiti %0.884'ün üzerinde doğruluk oranlarıyla başarılı bir şekilde yapılabilmektedir.

Kıyım halindeki etlere, ekonomik olarak daha düşük değerli protein ve yağ kaynaklarının hileli olarak eklenmesi mümkündür. Bu tür kaynaklar arasında sığır etine karıştırılan domuz eti, trim artıkları (yağ ve kolajen dokular) ve sakatat (böbrek, karaciğer, akciğer ve kalp) yer almaktadır. Yapılan bir çalışmada, hem taze hem de  $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 60 gün boyunca dondurulmuş örnekler kullanılmıştır. Örnekler, 400 – 2500 nm dalga boyuna sahip kızılötesi radyasyon ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, domuz eti, trim artıkları ve sakatatın sırasıyla  $R^2= 0,96$ ;  $0,94$  ve  $0,95$  doğruluk oranlarıyla saptandığını göstermektedir. Ayrıca, tespit edilebilen limitlerin kütleli standart sapmaları sırasıyla %5,39; %5,12 ve %2,08 olarak belirlenmiştir.

Son dönemde medyada yer alan gıda kaynaklı haberler ve bilgiler, tüketicilerin gıdaların doğruluğunun kontrol edilmesini daha fazla talep etmelerine neden olmuştur. Ayrıca, gıda üreticileri, hem sektördeki yoğun rekabetten hem de resmi düzenlemelere uyma zorunluluğundan dolayı, ürünlerinde belirli kalite standartlarını sağlamak zorundadır. Gıda üreticileri için ürettikleri ürünlerin, örneğin yağ oranı gibi, kalite kriterlerine

uygunluğunun doğrulanması son derece önemli bir konu haline gelmiştir. Geleneksel yağ tayini, en az iki ya da üç saat süren bir ekstraksiyon işlemi gerektirirken, bu süreçte analiz edilen ürünlerin uygun olmadığı durumda, tüm üretim tekrar gözden geçirilmek zorunda kalmaktadır. Bu da hem depolama hem de iş gücü maliyetlerini artırmaktadır. Kızılötesi spektroskopi ile yapılan yağ tayini ise sadece birkaç saniye içinde gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, gıda üretiminde maliyetleri düşürmek açısından kızılötesi spektroskopik analiz yöntemi önemli bir avantaj sunmaktadır.

Kızılötesi spektroskopi, geleneksel yöntemlere kıyasla belirgin avantajlar sunmaktadır. Bunlar: Kızılötesi spektroskopi yönteminin avantajları arasında, örneğin ambalajı açılmamış (şeffaf plastik ambalajda) numunelerin analiz edilebilmesi, numune hazırlama sürecinin oldukça hızlı ve basit olması, yüksek düzeyde uzmanlık gerektirmemesi ve analiz sırasında kimyasal maddelerin kullanılmaması nedeniyle çevre dostu olması sayılabilir. Öte yandan, bu yöntemin dezavantajları da bulunmaktadır: Profesyonel düzeyde bir spektroskopi cihazının ilk kurulum maliyeti oldukça yüksektir, kalibrasyon modellerinin geliştirilmesi için uzun süre ve önemli bir yatırım yapılması gerekebilir, ayrıca cihazların optik özellikleri nedeniyle bir cihazda oluşturulan kalibrasyon modelleri başka cihazlarla uyumsuz olabilir. Ayrıca, bazı kimyasallar, örneğin melamin gibi, sıkı denetimlere tabi ülkelerde analiz edilirken yeterli hassasiyet sağlanamayabilir.

## 6 SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuç

Bu çalışmada, spektroskopik yöntemlerin gıda analizindeki yeri teorik açıdan incelenmiş ve bu yöntemlerin gıda güvenliği ile kalite kontrolüne olan katkıları değerlendirilmiştir. Gelişen teknolojiyle birlikte, özellikle spektroskopiye dayalı analiz tekniklerinin gıda endüstrisinde giderek daha fazla tercih edildiği görülmektedir. UV-Vis, IR (özellikle FT-IR), NMR, Raman ve NIR gibi yöntemler, hızlı, güvenilir ve çoğunlukla numuneye zarar vermeyen analiz imkanları sunmaktadır.

Spektroskopik yöntemlerin; fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerin belirlenmesinde yüksek hassasiyetle çalışabildiği; katkı maddesi, pestisit kalıntısı, ağır metal ve mikrobiyal bulaşma gibi gıda güvenliğini tehdit eden unsurların tespitinde önemli bir rol oynadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca kalite kontrol süreçlerinde, ürün standardizasyonu ve raf ömrünün belirlenmesi gibi konularda da bu yöntemler etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Teorik incelemeler göstermiştir ki, spektroskopik yöntemler geleneksel analiz yöntemlerine göre daha hızlı sonuç vermekte, iş gücü ihtiyacını azaltmakta ve sürdürülebilir üretim anlayışına katkı sağlamaktadır. Ancak her yöntemin kendine özgü avantaj ve sınırlılıkları bulunduğundan, kullanım amacı ve gıda türüne göre doğru tekniklerin seçilmesi büyük önem taşımaktadır.

### 6.2 Öneriler

**Entegre Teknoloji Kullanımı:** Gıda analiz laboratuvarlarında spektroskopik yöntemlerin diğer analiz teknikleriyle (kromatografi vb.) entegre edilmesi, daha kapsamlı ve doğruluk oranı yüksek sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

**Personel Eğitimi:** Spektroskopik cihazların etkin ve doğru bir şekilde kullanılabilmesi için, bu alanda çalışan teknik personelin düzenli olarak eğitilmesi büyük önem taşımaktadır.

**Yaygınlaştırma ve Erişilebilirlik:** Küçük ve orta ölçekli işletmelerin de bu teknolojilere erişimini kolaylaştırmak adına devlet destekli projeler ve teşvikler geliştirilmelidir.

**Yerli Cihaz Geliştirme:** Spektroskopik cihazların yüksek maliyetleri göz önüne alındığında, yerli üretim teşvik edilerek hem maliyetler azaltılmalı hem de bağımsızlık sağlanmalıdır.

**Araştırma ve Geliştirme:** Spektroskopik yöntemlerin daha verimli ve özgün hale gelmesi için üniversiteler ve özel sektör iş birliğiyle Ar-Ge çalışmaları desteklenmelidir.

**Yasal Düzenlemeler:** Spektroskopik analiz sonuçlarının gıda güvenliği denetimlerinde resmi geçerlilik kazanması için yasal altyapı güçlendirilmelidir.

Sonuç olarak, spektroskopik yöntemler gıda güvenliği ve kalite kontrolü açısından büyük potansiyele sahip olup, bu potansiyelin etkin kullanımı hem tüketici sağlığını koruyacak hem de gıda endüstrisinin rekabet gücünü artıracaktır.

## KAYNAKÇA

- A. Kurt, S Cakmakcı, A Çağlar (1999). Sut ve Mamulleri Muayene ve Analiz Metodları Rehberi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları. Erzurum.
- Abe K., Kushibiki T., Matsue H., Furukawa K.I., Motomura S., 2007. Generation of Antitumor Active Neutral Medium-Sized  $\alpha$ -Glycan in Apple Vinegar Fermentation. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 71 (9): 2124–2129.
- Adapa, P. K., Karunakaran, C., Tabil, L. G. ve Schoenau, G. J. (2009). Potential.
- Akkurt, M., “Kalite Kontrol Excel Destekli” Birsen Yayınevi Ltd.Şti., No: 0029, 2002.
- Alamprese, C., Amigo, J. M., Casiraghi, E. ve Engelsen, S. B. (2016). Identification and quantification of turkey meat adulteration in fresh, frozen-thawed and cooked minced beef by FT-NIR spectroscopy and chemometrics. *Meat Science*, 121, 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.018>.
- Ali, M. E., Ahamad, M. N. U., Hossain, M. M., & Sultana, S. (2018). Multiplex polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism assay discriminates of rabbit, rat and squirrel meat in frankfurter products. *Food Control*, 84, 148-158.
- Andre, M. (2003). Multivariate analysis and classification of the chemical quality of 7-Aminocephalosporanic acid using near-infrared reflectance spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 75, 3460-3467.
- Andre, M. (2003). Multivariate analysis and classification of the chemical quality of 7-Aminocephalosporanic acid using near-infrared reflectance spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 75, 3460-3467. applications of infrared and Raman spectromicroscopy for agricultural biomass. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Atkins, P. ve Paula, J. de. (2013). Elements of Physical Chemistry. OUP Oxford.
- Bagheri, R. ve diğ. 2018, Determination of gamma-ray shielding properties for silicate glasses containing Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, and BaO, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 479, 62-71.
- Ballin, N. Z. ve Lametsch, R. (2008). Analytical methods for authentication of fresh vs. Thawed meat – A review. *Meat Science*, 80(2), 151– 158. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.12.024>.
- Bozkurt, R., “Kalite İyileştirme Araç ve Yöntemleri”, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları, No. 630, Ankara, 1998.
- Büyükyıldız, M. 2016, Calculation of effective atomic numbers and electron densities of differenttypes of material for total photon interaction in the continuous energy region via different methods, *Sakarya University of Science*, 2147-835X.
- Collell, C., Gou, P., Picouet, P., Arnau, J. ve Comaposada, J. (2010). Feasibility of near-infrared spectroscopy to predict aw and moisture and NaCl contents of fermented pork sausages. *Meat Science*, 6.
- Crocombe, R. A. (2018). Portable Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 72(12), 1701–1751. <https://doi.org/10.1177/0003702818809719>.
- Cserhádi, T., Forgács, E., Deyl, Z., Miksik, I. (2005). Chromatography in authenticity and traceability tests of vegetable oils and dairy products: a review. *Biomedical Chromatography*, 19(3), 183-190.
- D. A. Skoog, J J Leary (1992). Principles of Instrumental Analysis. Saunder College Publishing. Florida, USA.
- D. Himmelblau (1989). Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering. Prentice-Hall International Editions. USA.
- Dekant, W., Völkel, W. (2008). Human exposure to bisphenol A by biomonitoring: Methods, results and assessment of environmental exposures. *Toxicological Applied Pharmacy*, 228,114–134.
- Downey G. 1998. Food and food ingredient authentication by mid-infrared spectroscopy and chemometrics. *Trends Anal Chem*, 17(7), 418-424.

- Downey, G. (1998). Food and food ingredient authentication by mid-infrared spectroscopy and chemometrics. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 17(7), 418-424.  
Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64808-5>.
- Ertugay, M. ve Başlar, M. (2011). Gıdaların kalite özelliklerinin belirlenmesinde yakın kızılötesi (NIR) spektroskopisi. *Gıda*, 36 (1), 49-54.
- Gangidi, R. R., Proctor, A. ve Pohlman, F. W. (2003). Rapid Determination of Spinal Cord Content in Ground Beef by Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Journal of Food Science*, 68(1), 124–127. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb14126.x>
- Gıda Endüstrisinde Güvenli Gıda Üretmek. Teslime Mahmutoğlu. 2010. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık.
- Gıda Endüstrisinde Güvenli Gıda Üretmek. Teslime Mahmutoğlu. 2010. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık.
- Gıda Güvenliği ve Kalite Yönetim Sistemleri. Şeminur Topal, 1996. Tübitak.
- Gıda Hijyeni ve Mikrobiyolojisi. İrfan Erol, 2007. Pozitif Matbaacılık. Ankara.
- Gümüšoğlu. Ş., “İstatistiksel Kalite Kontrolü ve Toplam Kalite Yönetimi Araçları”, Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş., İstanbul, 2000.
- Hart, J. R., Norris, K. H. ve Golumbic, C. (1962). Determination of the Moisture Content of Seeds by Near-Infrared Spectrophotometry of Their Methanol Extracts. *Cereal Chemistry*, 39, 94–99.
- John Dennis M. 1998. Recent developments in food authentication. *Analyst*, 123(9), 151-156.
- Kodogiannis, V. S., Kontogianni, E. ve Lygouras, J. N. (2014). Neural network based identification of meat spoilage using Fouriertransform infrared spectra. *Journal of Food Engineering*, 142, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.018>
- Montgomery, D.C., “Introduction to Statistical Quality Control”, fourth ed. Wiley, New York, 2000.
- Newgard E.C. (2004). Near-Infrared Spectroscopy for Analysis of Agricultural Material. Final Reports for Physics Optical Spectroscopy 1-11.
- Norris, K. H. (1996). History of NIR. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 4(1), 31–37. <https://doi.org/10.1255/jnirs.941>
- Pico, Y. (2012). *Chemical Analysis of Food: Techniques and Applications*.
- Sun, D.W. (2009). *Infrared spectroscopy for food quality analysis and control* (1st ed., pp. 146-173). Elsevier Inc.
- Takao, Y., Lee, H.C., Kohra, S. ve Arizono, K. (2002). Release of Bisphenol A from Food Can Lining upon Heating. *Journal of Health Science*, 48(4), 331-334.
- Yıldız, M., & Kaya, H. (2024). *Günümüzde kalite anlayışının dönüşümü: Sürdürülebilirlik ve dijitalleşme bağlamında bir değerlendirme*. *Uluslararası Yönetim ve Organizasyon Dergisi*, 31(1), 45-60.
- Tıbbi Beslenme ve Egzersiz Metabolizması. Mehmet Demirci, 2010. Namık kemal Üniv. Gıda Müh. Bölümü. ISBN no: 975-97146-4-2.
- Ünver, Ö., “İstatistiksel Kalite Kontrolüne Giriş” Ankara İktisadi ve Ticari İlimler Akademisi Yayınları, No. 98, Kalite Matbaası, Ankara, 1977.
- Aichhorn, M., & Draxl, C. (2024). *Report for Theoretical Spectroscopy Lectures 2024*. Psi-k Network.
- Kumar, A., & Li, H. (2025). Artificial intelligence in spectroscopy: Advancing chemistry through SpectraML. *Ar Xiv Preprint*.
- DeStefano, J. (2025). *2025 review of spectroscopic instrumentation*. Spectroscopy Online.
- Wang, X., Zhang, Y., & Chen, L. (2024). Surface-enhanced Raman spectroscopy: A half-century historical retrospective. *Chemical Society Reviews*, 54(1), 123–157.
- Kim, M. S., Chen, Y. R., & Mehl, P. M. (2001). Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety. *Transactions of the ASAE*, 44(3), 721–729.

- Cho, B.-K., Kim, M. S., Baek, I.-S., Kim, D.-Y., Lee, W.-H., Kim, J., Bae, H., & Kim, Y.-S. (2013). Detection of cuticle defects on cherry tomatoes using hyperspectral fluorescence imagery. *Postharvest Biology and Technology*, 76, 40–49.
- Timlin, J. A., Carden, A., Morris, M. D., Bonadio, J. F., Hoffler, C. E., Kozloff, K. M., & Goldstein, S. A. (1999). *Spatial distribution of phosphate species in mature and newly generated mammalian bone by hyperspectral Raman imaging*. *Journal of Biomedical Optics*, 4(1), 28.
- Fu, D., Holtom, G., Freudiger, C., Zhang, X., & Xie, X. S. (2013). *Fast hyperspectral imaging with stimulated Raman scattering by chirped femtosecond lasers: chemical mapping of mammalian cells*. *The Journal of Physical Chemistry B*, 117(16), 4634–4640.
- Boyacı, İ. H., Temiz, H. T., Uysal, R. S., Velioglu, H. M., Yadegari, R. J., & Rishkan, M. M. (2014). A novel method for discrimination of beef and horsemeat using Raman spectroscopy. *Food Chemistry*, 148, 37–41.
- Altınışık, M.** (2004). *Spektroskopik İK analiz yöntemleri*. ADÜTF Biyokimya Anabilim Dalı.  
[https://testbook.com/objective-questions/mcq-on-electromagnetic-spectrum\\_5eea6a1339140f30f369efeb](https://testbook.com/objective-questions/mcq-on-electromagnetic-spectrum_5eea6a1339140f30f369efeb)  
[https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6\\_fig2\\_359114366](https://www.researchgate.net/figure/H-NMR-spectra-of-intermediates-in-dimethyl-sulfoxide-d6-DMSO-d6_fig2_359114366)  
<https://www.scribd.com/document/722653763/Enstru-mental-Analiz>  
<https://slideplayer.biz.tr/slide/15253029/>  
[http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page\\_701.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_701.html)