

FİZİK KONULARI

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Emel ECE

yaz
yayınları

Fizik Konuları

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Emel ECE

yaz
yayınları

2025

Fizik Konuları

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Emel ECE

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5547-60-6

Mart 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Kanser Hastalığının Teşhisinde Kan ve Türevlerinin Kullanımı: Fourier Dönüşüm Infrared (FTIR) Spektroskopisi ile Karakterizasyon	1
<i>Çisem ALTUNAYAR ÜNSALAN</i>	

Türkiye’de ‘Boya Duyarlı Güneş Pili’ Konusunda Yapılmış Tezlerin Bibliyometrik Analizi.....	25
<i>Fatma Nur YILDIRIM, Emel ECE, İsmail ARSEL</i>	

Introduction to Plasmonics and Metal Nanoparticles	49
<i>İlhan CANDAN, Sezai ASUBAY</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

KANSER HASTALIĞININ TEŞHİSİNDE KAN VE TÜREVLERİNİN KULLANIMI: FOURIER DÖNÜŞÜM INFRARED (FTIR) SPEKTROSKOPİSİ İLE KARAKTERİZASYON

Çisem ALTUNAYAR ÜNSALAN¹

1. GİRİŞ

Kanser, duyarlı hücrelerde epigenetik değişikliklerin eş zamanlı varlığıyla birlikte geri döndürülemez ve aktarılamaz genetik sapmaların birikmesinden kaynaklanan çok adımlı bir süreçtir. Bunlar binlerce mutasyon içerir, mikro çevreye farklı yanıt verir, konak bağışıklık tepkilerinden kaçabilir, metastaz yapan ve/veya kemoterapiye dirençli hale gelen belirli kanser hücre fenotiplerini seçer ve genişletir.

2010 yılında dünya çapında sırasıyla yaklaşık 13,3 milyon yeni kanser vakası ve 7,9 milyon kanser ölümü meydana gelmiştir. Nüfusun yaşlanması nedeniyle, bu sayıların 2030 yılında sırasıyla 21,4 milyon yeni vaka ve 13,1 milyon ölüme yükseleceği tahmin edilmektedir. Ancak, tüm kanser vakalarının en az ~%30'u ve tüm kanser ölümlerinin yaklaşık ~%40'ı, yaygın değiştirilebilir risk faktörlerinin birincil önlenmesi ve hala başarılı bir fayda şansı varken uygun kanserlerin erken teşhisi ve tedavisinin iyileştirilmesi yoluyla potansiyel olarak önlenabilir olmaktadır (Bellisola ve Sorio, 2012).

Düşük hayatta kalma oranları, çoğu hastanın mevcut tedavilere yanıt vermeyen bir aşamada teşhis edildiği gerçeğini

¹ Arş. Gör. Dr., Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, cisemaltunayar@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6479-4223.

yansıtmaktadır. Erken kanser tespiti, klinik semptomlar ortaya çıktıktan sonra hastanın durumu geri döndürülemez olabileceğinden çok önemlidir. Aslında, hastalığın erken tespiti ve risk altındaki kişilerin belirlenmesi, uygun tedavilerle daha fazla ilerlemeyi geciktirebilir veya önleyebilir ve hastaların hayatta kalma oranını büyük ölçüde arttırmaktadır. Bununla birlikte, görüntüleme teknikleri de dahil olmak üzere mevcut tarama ve tanı yöntemleri, normalde tümör kütlesi görünür olduğunda ve mevcut tarama testleri hastalığın erken evresinde gerekli duyarlılık ve özgüllüğe sahip olmadığında kanseri geç evrede tespit etmektedir (Su ve Lee, 2020).

Kanser araştırmalarındaki en önemli hedef, hayatta kalma olasılığını artırmak için doğru, hızlı, kullanışlı ve ucuz bir kanser tespit yöntemleri geliştirmektir (Li vd., 2005). Bu bağlamda, vücut sıvısı analizine yönelik uygulamalar son zamanlarda giderek daha fazla ilgi çekmiştir. Genel klinik bağlamda, vücut sıvıları (örneğin plazma, serum, tükürük veya idrar) hastalık tanısı ve terapötik izleme için önemli bir örnek kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır çünkü bunların toplanması nispeten basit, büyük ölçüde invaziv olmayan ve maliyet açısından etkilidir (Byrne vd., 2020).

Vücut sıvıları ve dokularındaki hastalıkla ilişkili moleküler değişiklikler olarak tanımlanan biyobelirteçler, klinik müdahalelerin mümkün olan en kısa sürede başlamasını sağlamak için tarama ve tanıyı kolaylaştırmada önemlidir. Kanser teşhisi için kan örneklerinin geleneksel klinik analizi, karsinoembriyonik antijen (CEA), kanser antijeni 15-3 (CA 15-3), prostat spesifik antijen (PSA) ve doku polipeptit antijeni (TPA) gibi tümör belirteçlerini içeren bireysel parametreleri inceler. Bununla birlikte, bu belirteçlerin duyarlılığı ve/veya özgüllüğü düşüktür. Bu nedenle, kanser için oldukça özgül ve hassas biyobelirteçlerin eksikliği ve invaziv olmayan ve uygun maliyetli testlerin sınırlı sayıda olması, yeni biyobelirteçlerin ve

tanı yöntemlerinin keşfedilmesini gerektirmektedir (Su ve Lee, 2020).

Kan plazması/serumu, ilgi duyulan birincil klinik örnek olmaya devam etmektedirler ve genlerin var olduğu bilinmeden önce bile incelenmişlerdir. Hastalık teşhisi için zengin bir biyobelirteç kaynağı olmasının yanı sıra, endojen plazma/serum bileşenlerindeki dengesizlikler de klinik açıdan önemli bir yere sahiptir (Byrne vd., 2020).

Kan ve bileşenleri gibi biyolojik sıvılar, vücuttan kolayca, ucuza ve hızlı bir şekilde izole edilebildikleri için tarama testi için ideal adaylardır. Kan, %44 hücresel madde ve %56 plazmadan oluşur. Kan plazmasının bileşimi su (%91), proteinler (%7, nükleik asitler, DNA/RNA, hormonlar dahil), çözünen bileşikler (%2) ve pıhtılaşma faktörlerini içerir. Kan serumu, pıhtılaşma faktörleri olmayan plazmadır. Kanın hücresel bileşeni eritrositler (%94), trombositler (%5,87) ve lökositlerden (%0,13) oluşur. Eritrositlerin spektral katkısı, plazma/serumdaki diğer klinik olarak önemli biyomoleküllerin spektral katkısıyla potansiyel olarak etkileşime girebilir. Bu nedenle, eritrositlerden arındırılmış kan plazması ve serum, yumurtalık ve endometriyal kanserler gibi kanser teşhislerinde titreşimsel spektroskopik analiz için daha uygun biyosıvılar olarak görünmektedir (Gajjar vd., 2013).

Serum ve plazma gibi kan bileşenleri, hücre içi ve hücre dışı olaylarla ilgili bilgi taşıdıkları için klinik testlerde sıklıkla analiz edilmektedir. Kan serumu, pıhtılaşma faktörleri veya kan hücreleri içermeyen kanın sıvı kısmıdır. 20.000'den fazla farklı protein içeren en karmaşık biyosıvı olarak bulunur ve serum albümini (50 gL^{-1}) gibi daha büyük bol proteinlerden troponin (1 ngL^{-1}) gibi daha küçük protein moleküllerine kadar değişmektedir. Kan serumu, tüm insan vücudundaki organları perfüze eder, dolayısıyla çevredeki dokulardan ve hücrelerden

proteomlar kazanır. Peptidom olarak bilinen serumun düşük moleküler ağırlıklı kısmının, kansere özgü tanısal bilgiler içerdiği ve serumun spektroskopik biyoimzasını hastalık durumlarını tespit etmek için ideal hale getirdiği düşünülmektedir (Sala vd., 2020).

Kan plazması veya serumuna uygulanan Fourier dönüşüm infrared (FTIR) spektroskopisi, kanser nedeniyle oluşan biyomoleküler değişiklikleri karakterize edebilen ve bir tarama veya teşhis aracı olarak kullanılma potansiyeline sahip olan hızlı, çok yönlü ve nispeten invaziv olmayan bir tekniktir (Gajjar vd., 2013).

FTIR spektroskopisi klinik uygulaması, moleküler düzeyde biyolojik örneklerin yapısı ve kimyasal bileşimi hakkında bilgi sağlayan ve proteinlerin, lipidlerin, nükleik asitlerin ve karbohidratların karakterizasyonunda kullanılan farklılaştırılmış bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Faria vd., 2023). Bu teknik aynı zamanda basit bir biyokimyasal araç olup, kullanımı hızlıdır ve bileşiklerin soğurma spektrumu aracılığıyla parmak izleri sağlayarak moleküler yapılarını hastaya herhangi bir zarar vermeden yansıtmak için reaktiflere ihtiyaç duymaz. FTIR tekniği, hastalık durumuna göre moleküler bileşimlerdeki değişiklikleri tespit etmede hassastır ve hücrelerde malignitenin oluşumu ve ilerlemesinin morfolojik değişikliklerden önce gerçekleştiği kanser gelişimiyle ilgili titreşim modlarındaki değişiklikleri açıklar. Bu teknik, örnekleri ayırt etmek için yaygın olarak kullanılabilen etkili bir biyokimyasal analitik yöntem olarak bilinmektedir (Faria vd., 2023).

Bu çalışmanın amacı, kanser hastalarının ve sağlıklı kişilerin kan ve türevleri örneklerini FTIR spektroskopisi ile ele alınmasıdır. Böylece kanser ve sağlık kişilere ait örnekler arasında spektral farklılıkları karakterize ederek FTIR

spektroskopisinin kanser hastalığının teşhisinde bir uygulama alanına sahip olduğunu ortaya koymaktır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1.Kanser

Kanser dünyada yaygın ve sık görülen bir hastalık haline gelmiş olup, insan yaşamını ve sağlığını ciddi şekilde tehdit etmektedir. Kanserinin nedeni kimyasal/fiziksel karsinojenik faktörler, viral ve bakteriyel enfeksiyonlar, genetik faktörler, bağışıklık faktörleri vb. olabilmektedir. Çoğu kanserin patogenezi belirsiz olsa da erken teşhis ve zamanında tedavinin kanseri kontrol altına almak için çok önemli olduğu genel olarak kabul edilmektedir (Liu vd., 2017).

Kanser, aynı zamanda önemli ve büyüyen bir küresel sağlık yüküdür. Nüfusun yaşlanması ve büyümesinin bir sonucu olarak kanser insidansı ve ölüm oranı dünya çapında hızla artmaktadır. Artan oranlar ayrıca kanser yaygınlığındaki değişiklikleri ve diyet ve sigara içme gibi kanser için önemli risk faktörlerinin dağılımını da yansıtmaktadır. 21. yy'da kanserin önde gelen ölüm nedeni olarak iskemik kalp hastalığını geride bırakması ve yaşam beklentisini arttırmanın önündeki en önemli engel olacağı öngörülmektedir (Sala vd., 2020).

Kanser, metastatik büyüme ile karakterize edilen kötü huylu neoplazmaları tanımlar. Genomik instabilite ve çevresel stres gibi çeşitli etiyolojik faktörlerle ilişkili olarak hemen hemen her organ ve dokuda ortaya çıkabilir. Bununla birlikte, kanser gelişimi hala genetik değişikliklerin belirli büyüme avantajları sağladığı çok adımlı bir süreç olarak kabul edilir. Bu nedenle, normal hücrelerden kötü huylu kanser hücrelerine doğru ilerleyen dönüşümü yönlendirir. Kötü huylu büyüme, birkaç önemli değişikliklerle karakterize edilir: büyüme

sinyallerinin kendi kendine yeterliliği, büyüme karşıtı sinyallere duyarsızlık, apoptozdan kaçış, düzensiz çoğalma potansiyeli, gelişmiş anjiyogenez ve metastaz. Bu değişimlerin her biri oldukça karmaşıktır ve çeşitli sinyal süreçlerinin ortak girişimleri ile gerçekleştirilir (Singh vd., 2019).

Kanser hücreleri, köken aldıkları organizmanın hücrelerine çok benzerdir ve benzer (ancak aynı olmayan) DNA ve RNA'ya sahiptir. Bu nedenle, özellikle bağışıklık sistemi zayıflamışsa, bunların bağışıklık sistemi tarafından çok sık tespit edilememesinin nedenidir. Kanser hücreleri, DNA ve/veya RNA'nın bir modifikasyonu/mutasyonu nedeniyle normal hücrelerden oluşur. Bu modifikasyonlar/mutasyonlar kendiliğinden meydana gelebilir (Termodinamik Yasası - entropi artışı) veya diğer faktörler tarafından tetiklenebilirler: nükleer radyasyon, elektromanyetik radyasyon (mikrodalgalar, X ışınları, Gama ışınları, Ultraviyole ışınları vb.), virüsler, bakteriler ve mantarlar, parazitler (doku iltihabı/tahrişi, ısı, havadaki, sudaki ve yiyeceklerdeki kimyasallar, mekanik hücre düzeyindeki hasar, serbest radikaller, DNA ve RNA'nın evrimi ve yaşlanması vb.). Tüm bunlar kansere yol açabilecek mutasyonlara neden olabilmektedir. Kanser bu nedenle "Entropik Hastalık" olarak adlandırılabilir çünkü organizmanın entropisinin organizmanın bunu kendi başına düzeltemeyeceği noktaya kadar artmasıyla ilişkilidir. Organizmanın stabil bir entropik duruma dönmesini sağlamak için dış müdahale gerekmektedir.

Kanser, bağışıklık sistemi düzgün çalışmıyorsa ve/veya üretilen hücre miktarı bağışıklık sisteminin ortadan kaldıramayacağı kadar fazlaysa gelişir. DNA ve RNA mutasyonlarının oranı bazı koşullar altında çok yüksek olabilir: sağlıklı çevre (radyasyon, kimyasallar vb. nedeniyle), kötü beslenme (sağlıksız hücre ortamı), mutasyonlara genetik

yatkınlığı olan kişiler ve ileri yaştaki kişiler bunlar arasındadır (Sharma vd., 2010).

2.2. Fourier Dönüşüm Infrared (FTIR) Spektroskopisi

Fourier dönüşüm infrared (FTIR) spektroskopisi, son on yılda önemli gelişmeler kaydeden, daha kolay, daha hızlı ve daha nesnel tanımlar vaat eden bir tekniktir. FTIR spektroskopisi, bir spektrum biçiminde görünen madde ve elektromanyetik radyasyon arasındaki etkileşimleri inceler. Her molekülün onu benzersiz kılan ve diğer moleküllerden ayırt edilmesini sağlayan bir spektrum izi vardır. FTIR spektroskopisi ayrıca hücresel değişiklikleri izlemek için etkili ve tahribatsız bir yöntemdir. FTIR spektral analizi, çeşitli organ hastalıklarının karakterizasyonunun yanı sıra proteinler, nükleik asitler ve lipitler gibi farklı biyomoleküllerin kantifikasyonuna olanak sağlamıştır. FTIR, numuneyi oluşturan moleküler konformasyonları, bağlanma tiplerini, fonksiyonel grupları ve moleküller arası etkileşimleri kesin olarak belirlemek için bireysel bandlara veya gruplara bakarak hücrelerin ve dokuların farklılaşmasına ve karakterizasyonuna odaklanır (Fadlelmoula vd., 2022).

FTIR spektroskopisi, kimyasal ve biyolojik türler de dahil olmak üzere çok çeşitli katıların, sıvıların ve gazların spektral karakterizasyonu için yaygın olarak kullanılan bir analitik tekniktir. Geleneksel FTIR spektroskopisi, kızılötesi ışının doğrudan numuneden iletilmesini içerir; ancak daha yeni ve daha basit bir yaklaşım, Zayıflatılmış Toplam Yansıma (ATR) modunu içerir. Bu teknik, ATR kristalinin üzerine doğrudan yerleştirilen numuneyle temas kurulduğunda, içten yansıyan bir ışıdan gelen kızılötesi radyasyondaki değişiklikleri ölçer. Belirli bir önceden belirlenmiş açıda, kızılötesi radyasyon yüksek kırılma indisine sahip bir kristale

yönlendirilir. Kristalin içinde, yüzeyin ötesine ve üstüne yerleştirilen numuneye doğru çıkıntı yapan geçici bir dalga yaratan bir iç yansıma vardır. Numune, moleküler bileşimine bağlı olarak kızılötesi spektrum bölgesi içinde enerji soğurur ve bu soğurma IR ışınını algılanabilir bir şekilde zayıflatır. Zayıflatılmış enerji ışını daha sonra kristalin karşı ucundan çıkarak dedektöre geçirilir (Sala vd., 2020).

FTIR spektroskopisi, kızılötesi soğurma spektrumlarının analiziyle bilinmeyen numunelerin biyokimyasal bileşimini ve yapısını belirlemek için kullanılır. Organik bileşikler tarafından kızılötesi radyasyonun soğurması, radyasyon kaynaklı titreşimlerin ve moleküllerinin dönüşlerinin bir ürünüdür ve bir soğurma spektrumu oluşturur. Biyolojik numuneler üzerinde yapılan çalışmalar, belirli fonksiyonel grupların (örneğin metil) aynı dalga sayısında kızılötesi radyasyonu soğurduğunu, böylece bu soğurma bandlarının bu gruplar için işaretleyici görevi görebileceğini göstermiştir. Buna göre, her makromolekülün (lipitler, proteinler, karbohidratlar, nükleik asitler) hangi fonksiyonel gruplardan oluştuğuna bağlı olarak kendi karakteristik soğurma bandları vardır (Barlev vd., 2016).

FTIR spektroskopisi, biyolojik örneklerin toplam moleküler bileşimi hakkında bilgi sağlayan basit, hızlı, reaktif içermeyen bir biyokimyasal araçtır. Organik bileşikler, atomları arasındaki bağların doğasına karşılık gelen bir enerjide (dalga sayısı) kızılötesi ışığı soğurur ve benzersiz bir spektral “parmak izi” üretir. Bu nedenle, biyolojik bir örneğin spektroskopisi, o örnekteki bileşiklerin moleküler yapılarını yansıtan bir soğurma spektrumu oluşturur. FTIR spektroskopisi güçlü bir analitik biyokimyasal ve görüntüleme yöntemidir ancak kan bileşenleri gibi karmaşık örneklerde, örtüşen bandlar ve biyolojik örnekleri oluşturan çok sayıda geniş molekül nedeniyle belirli bir moleküldeki bir değişikliği tespit etmek karmaşıktır. Yine de FTIR, iki farklı örnek arasında ayırım yapmak ve bandları ve

spektral farklılıklara katkıda bulunabilecek olası molekülleri tespit etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Zelig vd., 2015).

3. SONUÇ

3.1.Akciğer Kanseri

Wang ve ark. (2014), akciğer kanseri hastalarının ve sağlıklı kişilerin serumlarını karşılaştırmak için FTIR spektroskopisini kullanmıştır. $2997\text{--}2887\text{ cm}^{-1}$ bölgesi asimetrik C–H gerilme bölgesine (lipitler) ve $1593\text{--}1480\text{ cm}^{-1}$ bölgesi amid II (proteinler)’e karşılık geldiğinden, A_{2959}/A_{1545} oranı (spektrumda ilgili bandların/piklerin altında kalan alanların (A) oranları), lipitler/proteinlere ait oranı göstermektedir. Bu oran (A_{2959}/A_{1545}), akciğer kanseri hastalarında 0,2737 iken sağlıklı kişilerde 0,2451 olarak bulunmuş ve bu durumun akciğer kanseri hastalarının serumunda lipit içeriğinin protein içeriğine göre arttığını düşündürmüştür. 1650 cm^{-1} civarındaki band, amid I (proteinler)’e karşılık gelmektedir ve A_{1650}/A_{1545} oranı proteinlerin yapı ve bileşenlerindeki değişiklikleri yansıtmaktadır. Akciğer kanseri hastalarında bu oran (A_{1650}/A_{1545}) 1,9486 iken sağlıklı kişilerde 2,0115’dir. Bu durum, akciğer kanseri hastalarının serumundaki proteinlerde N–H bükülmesi ve C–N gerilmesinin karbonil gerilmesinin içeriğine göre arttığını göstermektedir. 1080 cm^{-1} civarındaki band, nükleik asitlerin PO_2^- simetrik gerilmesine karşılık gelmektedir ve A_{1080}/A_{1545} oranı, DNA seviyelerini değerlendirmektedir. A_{1080}/A_{1545} oranı akciğer kanseri hastaları için 0,1875, sağlıklı kişiler için 0,154’dür. Bu da akciğer kanseri hastalarının serumunda DNA içeriğinin arttığını ifade etmektedir. DNA içeriğinin artması, akciğer kanseri hücrelerinin nekrozu ve apoptozu ve/veya akciğer kanseri hücreleri tarafından salınan DNA ile ilişkili olabilmektedir. 1170 cm^{-1}

civarındaki band, proteinlerdeki treonin, tirozin ve serin kalıntılarının C–O (H) gruplarından katkı almakta ve A_{1080}/A_{1170} oranı, nükleik asitlerin göreceli içeriğini tanımlamaktadır. A_{1080}/A_{1170} oranı, akciğer kanseri hastaları için 11,5921 ve sağlıklı kişiler için 9,9561'dir. Bu da akciğer kanseri hastalarının serumunda nükleik asit içeriğinin arttığını göstermektedir. Amid I bandı proteinlerin karbonil gerilmesinden büyük katkı almaktadır ve sıklıkla protein ikincil yapısının analizi için kullanılmaktadır. İkincil türev IR spektrumları, $1725\text{--}1593\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde eğrileri elde etmek üzere eğri uydurma için hesaplanmıştır ve iki pik 1686 cm^{-1} 'de (antiparalel β -tabaka) ve 1655 cm^{-1} 'de (α -heliks) gözlemlenmiştir. Akciğer kanseri hastaları için A_{1655}/A_{1686} oranı, 19,771 iken sağlıklı kişiler için 43,905 olarak bulunmuş olup, bunun protein ikincil yapısının akciğer kanseri hastalarının serumu ile sağlıklı kişilerin serumu arasında farklı olduğunu, ayrıca akciğer kanseri hastalarının serumunda α -heliks içeriğinin azaldığını göstermektedir (Wang vd., 2014).

3.2.Göğüs Kanseri

Sitnikova ve ark. (2020), klinik olarak meme kanseri teşhisi konmuş 66 hastadan ve 80 sağlıklı gönüllüden kan örneklerini alarak ATR-FTIR spektroskopisi ile incelemiştir. Yapılan analizler sonucunda, kötü huylu meme tümörü olan ve olmayan kadınlar arasında spektral farklılıklar karakterize edilmiştir. Sağlıklı grubun ve meme kanseri hastalarının IR spektrumları bazı ortak değişiklik aralıklarına sahip olup en büyük farklılıklar $1450\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$ ve $3100\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenmektedir. $1800\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ bölgesi (amid I ve amid II) esas olarak protein içeriği ve ikincil yapısı hakkında bilgi vermektedir. $1300\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ bölgesi, proteinlerde, lipidlerde, nükleik asitlerde ve karbohidratlarda bulunan PO_2^- , C–O ve C–C gibi fonksiyonel grupların dalgalanmalarına karşılık gelmektedir. İkinci türevin spektrumları analiz

edildiğinde, malign neoplazmı olan hastalar ile sağlıklı donörler arasında bazı farklılıklar ortaya çıkmıştır. Özellikle sağlıklı donörlerde, malign neoplazmı olan hastaların aksine, C–OH oligosakkaritinin gerilme bandına karşılık gelen $\sim 1140\text{ cm}^{-1}$ 'de soğurmada bir azalma gözlenmiştir. $\sim 1637\text{ cm}^{-1}$ ve $\sim 1510\text{ cm}^{-1}$ 'de amid I ve II bölgesinde ve $\sim 1310\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$ 'de RNA ve DNA'nın fosfat gruplarının salınım bölgesinde morfolojik bir değişiklik ortaya konulmaktadır (Sitnikova vd., 2020).

Elmi ve ark. (2017), çalışmalarında 43 meme kanseri ve 43 sağlıklı hastaya ait serum örneklerinin her biri için FTIR analizi gerçekleştirmiştir. Sonuçlar iki grubun spektrumları arasında farklılıklar olduğunu göstermiştir. Ayırıcı dalga sayıları $950\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ (şeker), $1190\text{--}1350\text{ cm}^{-1}$ (kolajen), $1475\text{--}1710\text{ cm}^{-1}$ (protein), $1710\text{--}1760\text{ cm}^{-1}$ (ester), $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ ($-\text{CH}_2$ ve $-\text{CH}_3$ 'ün gerilme hareketleri) ve $3090\text{--}3700\text{ cm}^{-1}$ (NH gerilme) bölgelerindeki çeşitli spektral farklılıklarla ilişkilendirilmiştir. $3090\text{--}3700\text{ cm}^{-1}$ aralığının meme kanseri serum örneklerinin sağlıklı olanlardan ayrılması protein modifikasyonlarına karşılık gelmekte ve dolayısıyla serum örneklerindeki proteinlerin konformasyonunun karsinogenez sırasında önemli değişikliklere uğrayabileceği sonucuna varılmaktadır. Lipit içeriğindeki önemli farklılıklar doymamış lipitler ($3000\text{--}3060\text{ cm}^{-1}$) ve fosfolipitlerin ester C=O gerilmesi ($1710\text{--}1760\text{ cm}^{-1}$) aralıklarında gözlemlenmiştir ki bu durum apoptozis sırasında artan lipit bileşenleriyle ilişkilendirilebilmektedir. Proteinin, kollajenin meme kanseri hastalarını sağlıklı kontrollerden ayırt edebilen potansiyel bir biyobelirteç görevi görebileceği hem kontrol hem de kanserli serum örneği alanları için en ayırt edici faktör olduğu da ortaya konulmuştur (Elmi vd., 2017).

3.3.Mide Kanseri

Liu ve ark. (2017), mide kanseri hastalarının kırmızı kan hücreleri (RBC) ile sağlıklı kişilerin kırmızı kan hücrelerini karşılaştırmak için FTIR spektroskopisi kullanmıştır. Mide kanseri hastalarının ve sağlıklı kişilerin kırmızı kan hücrelerinin ortalama IR spektrumları incelendiğinde, bandların esas olarak proteinlerle (3296, 3065, 1653, 1543, 1300 ve 1245 cm^{-1} civarındaki bandlar), lipitlerle (2958, 2936, 2872, 1745, 1451 ve 1395 cm^{-1} civarındaki bandlar), şekerlerle (1166 ve 1052 cm^{-1} civarındaki bandlar) ilişkili olduğu bulunmuştur. Öte yandan, mide kanseri hastalarının kırmızı kan hücreleri ile sağlıklı kişilerin kırmızı kan hücreleri arasında belirgin bir pik kayması saptanmamıştır. Pik alan (A) oranları, mide kanseri hastalarının ve sağlıklı kişilerin kırmızı kan hücreleri arasındaki farkları karşılaştırmak için kullanılmıştır. Beş pik alanı (A_{2958} , A_{1653} , A_{1543} , A_{1166} ve A_{1106}) ölçülmüş ve daha sonra A_{1653}/A_{1543} , A_{1543}/A_{2958} , A_{1106}/A_{1166} ve A_{1543}/A_{1106} oranları hesaplanmıştır. Buna göre;

A_{1653}/A_{1543} oranı: 1700–1600 cm^{-1} bölgesi amid I bandına, 1585–1488 cm^{-1} bölgesi ise amid II bandına karşılık gelmektedir. A_{1653}/A_{1543} oranı protein sekonder yapılarıyla ilişkilendirilmektedir. Hastalık grubu için A_{1653}/A_{1543} değeri 1,9933 iken kontrol grubu için 1,8887 olmaktadır. Bu durum hastalık grubunun A_{1653}/A_{1543} değerlerinin kontrol grubundakilerden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir.

A_{1543}/A_{2958} oranı: 2990–2900 cm^{-1} bölgesi esas olarak lipitlerin asimetrik CH_3 ve CH_2 gerilmesine karşılık gelmektedir. Amid II bandı proteinleri temsil ettiğinden, A_{1543}/A_{2958} proteinlerin ve lipitlerin içeriğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Hastalık grubu için ortalama A_{1543}/A_{2958} değeri 6,2488 iken, kontrol grubu için 4,6799'dir. Bu da gastrik kanser hastalarının

kırmızı kan hücrelerinde protein seviyesinin lipit seviyesine göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

A_{1106}/A_{1166} oranı: $1134\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ bölgesi esas olarak karbohidratlardan katkı sağlarken, $1182\text{--}1148\text{ cm}^{-1}$ bölgesi esas olarak polisakkaritlerin C–O gerilmesine karşılık gelmektedir. A_{1106}/A_{1166} , polisakkaritlerin içerik ve yapı değişikliklerini yansıtmak için kullanılmaktadır. Hastalık grubu için A_{1106}/A_{1166} değeri 5,2178 iken, kontrol grubu için 4,5626'dır. Bu da mide kanseri hastalarının kırmızı kan hücrelerinde polisakkaritlerin içeriklerinin ve yapılarının sağlıklı kişilerin kırmızı kan hücrelerinden önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir.

A_{1543}/A_{1106} oranı: Protein ve şekerlerin içeriğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Hastalık grubu için A_{1543}/A_{1106} değeri 9,6854 iken kontrol grubu için 7,7575 olmaktadır. Bu durum hastalık grubunun A_{1543}/A_{1106} değerlerinin kontrol grubundan belirgin şekilde daha yüksek olduğunu göstermektedir.

$1323\text{--}1218\text{ cm}^{-1}$ ve $1140\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ bölgelerine eğri uydurma, uygulanmış ve kullanılan eğriler ikincil türev IR spektrumlarından elde edilmiştir.

Kırmızı kan hücreleri için, $1323\text{--}1218\text{ cm}^{-1}$ bölgesi amid III bandıdır. 1302 cm^{-1} (α -heliks) ve 1237 cm^{-1} (β -tabaka) civarındaki iki pik ikincil türev IR spektrumlarından gözlemlenmiştir. Hastalık grubu için A_{1302}/A_{1237} değeri 1,1145 iken kontrol grubu için 1,0645'dir. Bu da kırmızı kan hücrelerinin protein sekonder yapılarının mide kanseri nedeniyle değiştiğini göstermektedir. Kırmızı kan hücreleri için, $1140\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ bölgesi esas olarak şekerlerden katkı sağlamaktadır. Sekonder türev IR spektrumlarından yaklaşık 1125, 1105, 1084, 1050 ve 1017 cm^{-1} 'de beş pik gözlenmiştir. Hastalık grubunda A_{1125}/A_{1050} değeri 0,1979 iken kontrol grubunda 0,3356'dır. Bu da A_{1125}/A_{1050} değerlerinin hastalık grubunda kontrol grubundakilerden belirgin şekilde daha düşük olduğunu

göstermektedir. Hastalık grubunda A_{1125}/A_{1017} değeri 0,5667 iken kontrol grubunda 2,5018'dir. Bu da A_{1125}/A_{1017} değerlerinin hastalık grubunda kontrol grubundakilerden belirgin şekilde daha düşük olduğunu göstermektedir. Eğri uydurma sonuçları, şekerlerin yapılarının mide kanseri hastalarının kırmızı kan hücreleri ile sağlıklı kişilerin kırmızı kan hücreleri arasında farklı olduğunu ortaya koymaktadır (Liu vd., 2017).

Sheng ve ark. (2013), mide kanseri hastalarının serumunu ile sağlıklı kişilerin serumunu karşılaştırmak için FTIR spektroskopisi kullanmıştır. Mide kanseri hastalarından ve sağlıklı kişilerden alınan serumları tanımlamak için H_{2959} , H_{2931} , H_{1646} , H_{1550} , H_{1453} , H_{1400} , H_{1314} , H_{1243} , H_{1080} ölçülmüştür. H_{2959}/H_{2931} , H_{1646}/H_{1550} , H_{1453}/H_{1400} , H_{1314}/H_{1243} ve H_{1080}/H_{1550} beş pik yükseklik (H) oranı hesaplanmıştır. 2959 cm^{-1} ve 2931 cm^{-1} 'deki bandlar sırasıyla asimetrik CH_3 ve CH_2 gerilme titreşimlerinden kaynaklandığından, CH_3/CH_2 'yi temsil etmek için H_{2959}/H_{2931} kullanılmaktadır. Mide kanseri hastaları için H_{2959}/H_{2931} 'in değeri 0,976 iken sağlıklı kişiler için 1,18'dir. Bu, sağlıklı kişilerin serumundaki lipidlerin mide kanseri hastalarının serumundaki lipidlerden daha kısa zincirli ve/veya daha fazla dallanmış zincirli olduğunu ortaya koymaktadır. 1646 cm^{-1} 'deki band amid I ($\text{C}=\text{O}$ gerilme titreşimleri) ve 1550 cm^{-1} 'deki band amid II ($\text{C}-\text{N}$ gerilme ve $\text{N}-\text{H}$ bükülme titreşimleri)'dir. Hem amid I hem de amid II proteinleri temsil ettiğinden, amid I/amid II proteinlerin ikincil yapılarını yansıtmak için kullanılmaktadır. Mide kanseri hastaları için H_{1646}/H_{1550} 'nin değeri 1,58 iken sağlıklı kişiler için 1,37 olarak bulunmuştur. 1314 cm^{-1} 'deki band amid III ve 1243 cm^{-1} 'deki band asimetrik $\text{P}=\text{O}$ gerilme titreşimleri (nükleik asitler)'dir ve H_{1314}/H_{1243} proteinlerin ve nükleik asitlerin değişimlerini yansıtmaktadır. Mide kanseri hastaları için H_{1314}/H_{1243} 'ün değeri 0,665 iken sağlıklı kişiler için 0,813'dür. 1453 cm^{-1} 'deki band makaslama CH_2 bükülmesinden (lipitler) ve 1400 cm^{-1} 'deki band simetrik ve

asimetrik CH_3 gerilme titreşimlerinden (lipitler) kaynaklanmaktadır ve $\text{H}_{1453}/\text{H}_{1400}$ lipitlerin değişimlerini yansıtmaktadır. Mide kanseri hastaları için $\text{H}_{1453}/\text{H}_{1400}$ 'ün değeri 0,577 iken sağlıklı kişiler için 0,60'dır. 1080 cm^{-1} 'deki band simetrik gerilme titreşimlerinden (nükleik asitler) kaynaklanmaktadır ve $\text{H}_{1080}/\text{H}_{1550}$ DNA seviyelerini değerlendirmek için kullanılmaktadır. $\text{H}_{1080}/\text{H}_{1550}$ kanser dokularını ve normal dokuları tanımlamak için bir parametredir. Mide kanseri hastaları için $\text{H}_{1080}/\text{H}_{1550}$ 'nin değeri 0,2 iken sağlıklı kişiler için 0,26'dır (Sheng vd., 2013).

3.4.Karaciğer Kanseri

Yang ve ark. (2021), karaciğer kanseri olan hastalardan ve sağlıklı kişilerden alınan serum örneklerini FTIR spektroskopisi kullanarak incelemiştir. Serumun ana bileşenlerinin lipitler, proteinler ve nükleik asitler olduğu belirlenmiştir. Karaciğer kanseri hastalarının serum spektrumları sağlıklı insanlarınkine çok benzer, ancak $2900\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ ve $1700\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ aralığında soğurma piklerinin şiddetinde bazı küçük farklılıklar bulunduğu ortaya konulmuştur. Karaciğer kanserli hastaların serumlarında 2870 cm^{-1} ve 2851 cm^{-1} 'deki band şiddetlerinin anlamlı şekilde azalmıştır. Bu iki band sırasıyla lipitteki CH_3 ve CH_2 'nin C-H simetrik gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. Sağlıklı kişilerin serumlarında $1690, 1678, 1672, 1658, 1646, 1640, 1628$ ve 1621 cm^{-1} 'deki band şiddetleri artmıştır. Bu bandlar proteinin amid I'ine karşılık gelmektedir. Elde edilen sonuçlar karaciğer kanserli hastaların serumu ile sağlıklı kişilerin serumu arasında lipit ve protein bakımından farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, karaciğer kanseri hastalarının serumunda ve sağlıklı kişilerin serumunda proteinin yapısal farklılığını belirlemek amacıyla $1700\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki spektrumlarda eğri uydurma işlemi uygulanmıştır. Buna göre A_{1646}/A_{1658} , A_{1646}/A_{1621} , A_{1640}/A_{1658} ve A_{1640}/A_{1621} olmak üzere dört grubun alt pik alanlarının oranları

hesaplanmıştır. 1658 cm^{-1} 'deki band β -dönüşüne ve 1621 cm^{-1} 'deki band β -tabakasına karşılık gelmekte iken 1646 ve 1640 cm^{-1} 'deki bandlar α -heliks yapısına karşılık gelmektedir. A_{1646}/A_{1658} , A_{1646}/A_{1621} , A_{1640}/A_{1658} ve A_{1640}/A_{1621} , proteinin amid I'indeki α -heliks ile β yapısının oranını temsil etmektedir. Karaciğer kanserli hastaların serumundaki dört oran, sağlıklı kişilerin serumundaki oranlardan daha düşük olarak bulunmuştur. Bu durum α -heliks yapısının göreceli içeriğinin karaciğer kanserli hastaların serumunda azaldığını göstermektedir. Eğri uydurma sonuçları, karaciğer kanserli hastalar ile sağlıklı kişiler arasında serumun protein sekonder yapısında farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır (Yang vd., 2021).

3.5.Bağırsak Kanseri

Tatarkovič ve ark. (2015), kolon kanseri olan hastalardan 28 örnek dahil olmak üzere elli beş kan plazması örneğini FTIR spektroskopisi ile incelemiştir. 1649 ve 1547 cm^{-1} 'deki iki baskın band sırasıyla amid I ve amid II'nin titreşimlerine karşılık gelmektedir. FTIR spektrumlarındaki en önemli değişimler amid I ve amid II bandları arasındaki şiddet ve oranda gözlenmiştir. 1448 cm^{-1} 'deki band, fosfolipitlerle bir arada olan proteinlerin yan zincirlerindeki CH_3 ve CH_2 gruplarının bükülme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. 1260 – 1390 cm^{-1} spektral bölgesi, protein karboksil gruplarının simetrik gerilme titreşimiyle uyumludur. Ancak parmak izi bölgesinde birçok band üst üste geldiğinden daha kapsamlı olarak Raman spektroskopisi, elektronik dairesel dikroizm (ECD) and Raman optik aktivite (ROA) analizleri de yapılmıştır (Tatarkovič vd., 2015).

Barlev ve ark. (2016), kolorektal (kalın bağırsak) kanseri (CRC)'nin erken teşhisi için plazmanın tüm biyomoleküler profilinin FTIR spektroskopisi kullanılarak analiz etmiştir.

Çalışma popülasyonu, kolonoskopide anormallik veya displazi olmayan 18 sağlıklı bireyden, iyi huylu, düşük dereceli displastik adenomatöz polip bulguları olan on hastadan (iyi huylu grup) ve kolorektal neoplazmı olan 34 hastadan (CRC grubu) oluşturulmuştur. Sağlıklı, iyi huylu ve CRC gruplarından türetilen plazmanın $1800\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki infrared absorbands spektrumları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Plazmanın absorbands spektrumlarının analizinde önemli değişiklikler bulunmuştur. Değişiklikler, simetrik fosfat titreşimleriyle ilişkili olan yaklaşık 1080 cm^{-1} bandında ve aminoasitler aspartat ve glutamatın COO^- simetrik gerilmesiyle ve proteinlerin metil gruplarının simetrik CH_3 bükülme modlarıyla ilişkili olan yaklaşık 1400 cm^{-1} bandında meydana gelmiştir (Barlev vd., 2016).

3.6.Yumurtalık Kanseri

Lima ve ark. (2015), yumurtalık kanserinin farklı evrelerinin, histolojik tiplerinin ve yaşa bağlı segregasyonlarının doğru tanısı için kan plazması veya serum örneklerindeki spektral biyobelirteçleri belirlemek amacıyla ATR-FTIR spektroskopisini kullanmıştır. Evre I ve Evre II–IV olmak üzere iki kategoriden alınan plazma örneklerinin IR spektrumları incelendiğinde; esas piklerin 1650 cm^{-1} (amid I) ve 1550 cm^{-1} 'de (amid II) meydana geldiği görülmüştür. Lipitlerin ve proteinlerin metil grupları 1400 ve 1260 cm^{-1} 'de (amid III) bulunurken, 1225 cm^{-1} (asimetrik fosfat gerilme titreşimleri, $\nu_{\text{as}}\text{PO}_2^-$) ve 1080 cm^{-1} (simetrik fosfat gerilme titreşimleri, $\nu_{\text{s}}\text{PO}_2^-$) bulunmaktadır. Ayrıca, 1155 cm^{-1} 'de (serin, treonin ve tirozinin C–OH grupları ve karbohidratların C–O grupları), 1030 cm^{-1} 'de (glikojen) ve 970 cm^{-1} 'de (protein fosforilasyonu) de pikler gözlenmiştir. FTIR analizlerine ek olarak belirteçleri tanımlamak için kemometrik tekniklerden de yararlanarak sistematik olarak sınıflandırma yapılmıştır (Lima vd., 2015).

Owens ve ark. (2014), yumurtalık kanseri hastalarından elde edilen insan kan plazması/serumunun biyomoleküler imzalarındaki değişiklikleri kanser olmayan kontrollerle karşılaştırarak karakterize edip edemeyeceğini belirlemek için ATR-FTIR spektroskopisini kullanmıştır. 30 yumurtalık kanseri hastalarından ve 30 sağlıklı kontrollerden izole edilen kan örnekleri analiz edilmiştir. IR spektrumlarının hem serum hem de plazması için 1150 ile 1.000 cm^{-1} (DNA/RNA bölgesi), 1500 ile 1350 cm^{-1} (Amid II protein bölgesi) ve 1600 ile 1530 cm^{-1} (Amid I protein bölgesi) bölgelerinde dikkate değer farklılıklar gözlemlenmiştir (Owens vd., 2014).

3.7.Prostat Kanseri

Mitura ve ark. (2025), 53 prostat kanseri hastasından ve 40 sağlıklı bireylerden oluşan kontrol grubundan elde edilen serum örnekleri FTIR ile incelenmiştir. Kontrol ve prostat kanseri hastalarından toplanan serumun FTIR spektrumlarında aynı pikler belirlenmiştir. Fosfolipit titreşimleri, 1085 ve 1250 cm^{-1} civarında yer alan PO_2^- asimetric ve simetric titreşimler olarak kendini göstermektedir. Protein titreşimleri, özellikle amid III, amid II, amid I ve amid A, sırasıyla 1320, 1540, 1640 ve 3285 cm^{-1} civarında görülmektedir. Protein ve lipit fonksiyonel gruplarından gelen tipik CH_2 ve CH_3 bükülme titreşimleri sırasıyla 1400 ve 1455 cm^{-1} 'de meydana gelmektedir. CH_2 , CH_3 olarak görülen lipit titreşimleri simetric ve asimetric titreşimler 2860, 2880, 2935 ve 2960 cm^{-1} civarında belirlemektedir. Lipitlerin peroksidasyonu olarak yorumlanabilen esterlerden gelen C-O titreşimleri 1750 cm^{-1} civarında görülmektedir. FTIR spektrumunda ayırt edilebilen fonksiyonel grupların absorbanslarında kontrol ve prostat kanseri olan hastalar arasında fark edilebilir karşıtlıklar gözlemlenmiştir. Ancak, bu farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı olmayıp temel bileşen analizi (PCA) ve makine öğrenimi (ML) teknikleri de serum örneklerinden prostat

kanserinin teşhisinde FTIR spektroskopisinin potansiyelini göstermek ve analiz edilen kanserin spektroskopik belirteçlerini tanımlamak için kullanılmıştır (Mitura vd., 2025).

Medipally ve ark. (2019), radyoterapik yanıtı izlemek için, 53 prostat kanseri hastasından tedaviden önce, hormon tedavisinden sonra, radyoterapinin sonunda, radyoterapiden iki ay sonra ve radyoterapiden sekiz ay sonra olmak üzere beş farklı zamanda kan plazması olarak FTIR spektroskopisi ile analiz etmiştir. Her bir grup arasındaki farkları ortaya koymak için, farklı tedavi zaman noktalarındaki hastalardan alınan plazmanın ortalama spektrumları, başlangıçtaki ortalama spektrumlarından çıkarılarak fark spektrumları hesaplanmıştır. Benzer şekilde, hastaların hormon tedavisi sonrası ve radyoterapi sonrası plazmaları arasındaki farkları gösterebilmek için, farklı radyoterapi zaman noktalarındaki hastalardan alınan plazmanın ortalama spektrumları, hormon tedavisi sonrası ortalama spektrumlarından çıkarılarak yine fark spektrumları hesaplanmıştır. Ortalama spektrumlarda şiddet ile ilişkili varyasyonların biçiminde, başlangıç düzeyindeki hastalar ile tedavi aşamalarındaki hastalar arasında farklılıklar gözlemlenmiştir: 1024 ve 1050 cm^{-1} civarındaki bölgelerde (glikojenin C–O gerilme ve bükülme titreşimleri), 1070–1090 cm^{-1} (PO_2^- , nükleik asitler, fosfolipitler ve sakkaritlerin simetrik gerilmesi), 1120–1170 cm^{-1} (karbohidratların (C–O) ve $\nu(\text{C–O–C})$ gerilme titreşimleri), 1230–1330 cm^{-1} (amid III), 1400 cm^{-1} (COO^- , amino asitlerin gerilme titreşimleri), 1450 cm^{-1} (CH_2 makaslama, proteinler), 1545 cm^{-1} (amid II), 1656 cm^{-1} (amid I), 1740–1760 cm^{-1} (yağ asitlerinin, trigliseritlerin ve kolesterol esterlerinin (C=O) gerilme titreşimleri), 2800–2960 cm^{-1} (lipitlerin, yağ asitlerinin, trigliseritlerin ve proteinlerin (CH_2/CH_3) gerilme titreşimleri), 3300 cm^{-1} (amid A) ve 3400–3600 cm^{-1} (karboksilik asitlerin hidroksil (OH) gerilmesi) (Medipally vd., 2019).

3.8.Deri Kanseri

Khanmohammadi ve ark. (2007)'nın sağlıklı kişilerden ve bazal hücreli karsinomlu (deri kanserinin bir çeşidi) kişilerden alınan kan örneklerini ayırt etmek için ATR-FTIR spektroskopisi kullandığı çalışmalarında, 32 kanser ve 40 normal vaka olmak üzere toplam 72 kan örneğini $1800\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ spektral bölgede analiz etmiştir. 1550 ve $1620\text{--}1680\text{ cm}^{-1}$ 'de bulunan bandlar en şiddetli olan bandlardır ve hem normal hem de kanser durumundaki kan örneklerinde yer almaktadır. $1630\text{--}1680\text{ cm}^{-1}$ 'deki band, bir amid grubunun karbonil gerilmesinden kaynaklanmaktadır. R-CONHR grubunun $1620\text{--}1640\text{ cm}^{-1}$ 'de bulunan bir bükülme bandı varken, C=O gerilme bandı $1630\text{--}1680\text{ cm}^{-1}$ 'de meydana gelmektedir. Birçok durumda, bu iki bölge üst üste geldiğinden bunların tanımlanması mümkün olmamaktadır. Bu bölgede, R-CONR₂'nin -C-N'nin gerilmesi ve -N-H grubunun bükülmesi nedeniyle 1550 cm^{-1} 'de de bir band bulunmaktadır. FTIR spektrumlarında $950\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$ arasındaki bölgede fosfat grubundan gelen simetrik ve asimetrik gerilme titreşimleri görülmektedir. Fosfolipitler, enerji metabolitleri ve fosforile proteinlerin yanı sıra hücrelerdeki bu bandların başlıca katkıda bulunanları nükleik asitlerdir. 1404 ve 1585 cm^{-1} 'deki IR bandları plazmada bol miktarda bulunan üre/trigliseritlerden kaynaklanmaktadır. 1740 cm^{-1} 'deki küçük bir IR bandının hücre ölümünün bir göstergesi olduğu öne sürülmektedir. Normal ve kanser vakaları arasındaki farkı gösteren en önemli sinyallerden biri, kanser vakalarında daha şiddetli olan ve özellikle sınıflandırma özelliklerini daha sonra etkileyecek olan proteinin C=O grubu nedeniyle 1650 cm^{-1} 'deki absorbanstır. Tüm kanser vaka örnekleri benzer spektral yapıyı gösterirken, tüm normal vaka örnekleri spektral formatta benzer durumdadır ancak bu iki vaka karşılaştırıldığında birbirlerinden farklı olmaktadır (Khanmohammadi vd., 2007).

KAYNAKÇA

- Barlev, E., Zelig, U., Bar, O., Segev, C., Mordechai, S., Kapelushnik, J., Nathan, I., Kashtan, F.F.H., Dickman, R., Madhala-Givon, O., Wasserberg, N. (2016), A novel method for screening colorectal cancer by infrared spectroscopy of peripheral blood mononuclear cells and plasma, *J Gastroenterol*, 51, 214–221.
- Bellisola, G., Sorio, C. (2012), Infrared spectroscopy and microscopy in cancer research and diagnosis, *Am J Cancer Res.*, 2(1), 1–21.
- Byrne, H.J., Bonnier, F., McIntyre, J., Parachalil, D.R. (2020), Quantitative analysis of human blood serum using vibrational spectroscopy, *Clinical Spectroscopy*, 2, 100004.
- Elmi, F., Movaghar, A.F., Elmi, M.M., Alinezhad, H., Nikbakhsh, N. (2017), Application of FT-IR spectroscopy on breast cancer serum analysis, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 187, 87–91.
- Fadlelmoula, A., Pinho, D., Carvalho, V.H., Catarino, S.O., Minas, G. (2022), Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy to analyse human blood over the last 20 years: a review towards lab-on-a-chip devices, *Micromachines*, 13, 187.
- Faria, R.A., Leal, L.B., Thebit, M.M., Pereira, S.W.A., Serafim, N.R., Barauna, V.G., da Chagas e Silva Carvalho, L.F., Sartório, C.L., Gouvea, S.A. (2023), Potential role of Fourier transform infrared spectroscopy as a screening approach for breast cancer, *Applied Spectroscopy*, 77(4), 405–417

- Gajjar, K., Trevisan, J., Owens, G., Keating, P.J., Wood, N.J., Stringfellow, H.F., Martin-Hirsch, P.L., Martin, F.L. (2013), Fourier-transform infrared spectroscopy coupled with a classification machine for the analysis of blood plasma or serum: a novel diagnostic approach for ovarian cancer, *Analyst*, 138, 3917.
- Khanmohammadi, M., Nasiri, R., Ghasemi, K., Samani, S., Garmarudi, A.B. (2007), Diagnosis of basal cell carcinoma by infrared spectroscopy of whole blood samples applying soft independent modeling class analogy, *J Cancer Res Clin Oncol*, 133, 1001–1010.
- Li, Q.B., Xu, Z., Zhang, N.W., Zhang, L., Wang, F., Yang, L.M., Wang, J.S., Zhou, S., Zhang, Y.F., Zhou, X.S., Shi, J.S., Wu, J.G. (2005), In vivo and in situ detection of colorectal cancer using Fourier transform infrared spectroscopy, *World J Gastroenterol*, 11(3), 327–330.
- Lima, K.M.G., Gajjar, K.B., Martin-Hirsch, P.L., Martin, F.L. (2015), Segregation of ovarian cancer stage exploiting spectral biomarkers derived from blood plasma or serum analysis: ATR-FTIR spectroscopy coupled with variable selection methods, *Biotechnol. Prog.*, 31:3, 832–839.
- Liu, H., Su, Q., Sheng, D., Zheng, W., Wang, X. (2017), Comparison of red blood cells from gastric cancer patients and healthy persons using FTIR spectroscopy, *Journal of Molecular Structure*, 1130, 33–37
- Medipally, D.K.R., Nguyen, T.N.Q., Bryant, J., Untereiner, V., Sockalingum, G.D., Cullen, D., Noone, E., Bradshaw, S., Finn, M., Dunne, M., Shannon, A.M., Armstrong, J., Lyng, F.M., Meade, A.D. (2019), Monitoring radiotherapeutic response in prostate cancer patients using high throughput FTIR spectroscopy of liquid biopsies, *Cancers*, 11, 925.

- Mitura, P., Paja, W., Klebowski, B., Płaza, P., Kuliniec, I., Bar, K., Depciuch, J. (2025), Fourier transform infrared spectra analyzed by multivariate and machine learning methods in determination spectroscopy marker of prostate cancer in dried serum, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 327, 125305.
- Owens, G.L., Gajjar, K., Trevisan, J., Fogarty, S.W., Taylor, S.E., Da Gama-Rose, B., Martin-Hirsch, P.L., Martin, F.L. 2014, Vibrational biospectroscopy coupled with multivariate analysis extracts potentially diagnostic features in blood plasma/serum of ovarian cancer patients, *J. Biophotonics*, 7(3–4), 200–209.
- Sala, A., Anderson, D.J., Brennan, P.M., Butler, H.J., Cameron, J.M., Jenkinson, M.D., Rinaldi, C., Theakstone, A.G., Baker, M.J. (2020), Biofluid diagnostics by FTIR spectroscopy: A platform technology for cancer detection, *Cancer Letters*, 477, 122–130.
- Sharma, G.N., Dave, R., Sanadya, J., Sharma, P., Sharma, K.K. (2010), Various types and management of breast cancer: an overview, *J. Adv. Pharm. Tech. Res.*, 1(2), 109–126.
- Sheng, D., Wu, Y., Wang, X., Huang, D., Chen, X., Liu, X. (2013), Comparison of serum from gastric cancer patients and from healthy persons using FTIR spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 116, 365–369.
- Singh, N., Baby, D., Rajguru, J.P., Pati, P.B., Thakkannavar, S.S., Pujari, V.B. (2019), Inflammation and cancer, *Ann Afr Med*, 18, 121–126.
- Sitnikova, V.E., Kotkova, M.A., Nosenko, T.N., Kotkova, T.N., Martynova, D.M., Uspenskaya, M.V. (2020), Breast

- cancer detection by ATR-FTIR spectroscopy of blood serum and multivariate data-analysis, *Talanta*, 214, 120857
- Su, K.Y., Lee, W.L. (2020), Fourier transform infrared spectroscopy as a cancer screening and diagnostic tool: a review and prospects, *Cancers*, 12, 115.
- Tatarkovič, M., Miškovičová, M., Šťovícková, L., Synytsya, A., Petruželka, L., Setnička, V. (2015), The potential of chiroptical and vibrational spectroscopy of blood plasma for the discrimination between colon cancer patients and the control group, *Analyst*, 140, 2287.
- Wang, X., Shen, X., Sheng, D., Chen, X., Liu, X. (2014), FTIR spectroscopic comparison of serum from lung cancer patients and healthy persons, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 122, 193–197.
- Yang, X., Ou, Q., Yang, W., Shi, Y., Liu, G. (2021), Diagnosis of liver cancer by FTIR spectra of serum, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 263, 120181.
- Zelig, U., Barlev, E., Bar, O., Gross, I., Flomen, F., Mordechai, S., Kapelushnik, J., Nathan, I., Kashtan, H., Wasserberg, N., Madhala-Givon, O. (2015), Early detection of breast cancer using total biochemical analysis of peripheral blood components: a preliminary study, *BMC Cancer*, 15, 408.

TÜRKİYE’DE ‘BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİ’ KONUSUNDA YAPILMIŞ TEZLERİN BİBLİYOMETRİK ANALİZİ¹

Fatma Nur YILDIRIM²

Emel ECE³

İsmail ARSEL⁴

1. GİRİŞ

Güneş enerjisinden elektrik elde edilmesi fotovoltatik prensibine dayanmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi, güneş ışığının etkisiyle oluşan potansiyel farkının elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Bu tür sistemlerde kullanılan malzemelerin katkılı yarı iletken özelliklere sahip olması gerekmektedir. Sistemde kullanılan yarı iletken malzemelerin oldukça geniş bir yelpazedeki güneş enerjisini absorbe etmesi gerekmektedir. Absorblanan enerji, farklı katkılı yüzeyler arasında bir voltaj farkı yaratarak mevcut elektrik enerjisinin kullanılmasına olanak tanır. Güneş pilinin oluşturulmasında yarı

¹ Bu çalışma yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

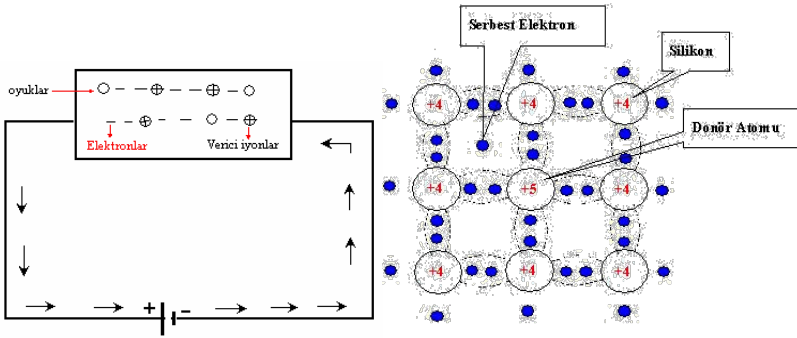
² Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, erz_ant_2507@outlook.com, ORCID: 0000-0002-9976-9535.

³ Dr. Öğr. Üyesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kamil Özdağ Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, ecetinkaya@kmu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5954-3689.

⁴ Dr. Öğr. Üyesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kamil Özdağ Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, ismailarsel@kmu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8570-8443.

iletken özellikli maddeler kullanılmaktadır. Kristal Si, amorf Si, germanyum (Ge), galyum arsenik (GaAs), kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır indiyum diselenür (CuInSe₂) güneş pillerinin yapımında tercih edilen yarı iletken özellikli maddelerden bir kısmıdır. Yarı iletken matris temelli oluşturulan tüm güneş pillerinde iletkenliği arttırmak üzere P-tipi ya da N-tipi iletken katkılaması yapılır. Katkılamanın özellikleri pilin verimliliğini doğrudan belirleyen ana etkindir (Tuna, 2014).

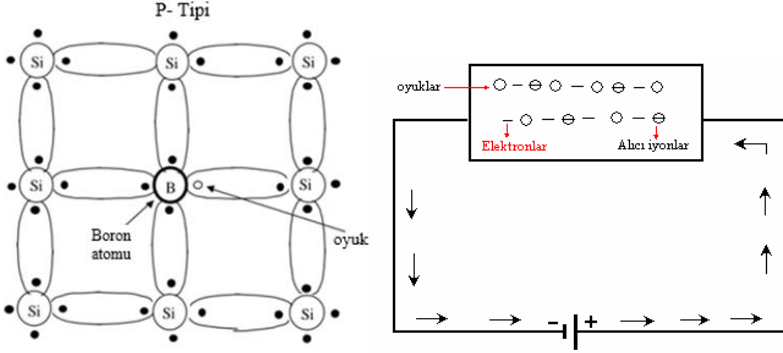
- ✓ **N-tipi yarı iletken**; 4 valans e^- 'a sahip olan saf Si veya Ge atomlarının 5 e^- 'lu fosfor (P) atomu ile birleşmesi sonucu oluşan yeni kristal yapıda bir e^- açıkta kalır. e^- yönünden zengin olan bu karışıma N-tipi yarı iletken denir. Bu durumdan kaynaklı N-tipi yarı iletken malzemeye verici donör de denir. Şekil 1.1'de N-tipi yarı iletken şeması ve e^- hareketi gösterimi gösterilmiştir.



Şekil 1.1. N-tipi yarı iletken şeması ve elektron hareketi gösterimi

- ✓ **P-tipi yarı iletken**; 4 valans e^- 'a sahip olan saf Si ve Ge atomlarının içerisinde 3 valans e^- 'a sahip Alüminyum (Al), Bor (B) veya Galyum (Ga) atomlarının birleşmesi sonucu oluşan yeni kristal yapıda e^- eksikliği olur ve yeni kristal yapıda delik (boşluk) oluşur. Bu duruma P-tipi yarı iletken

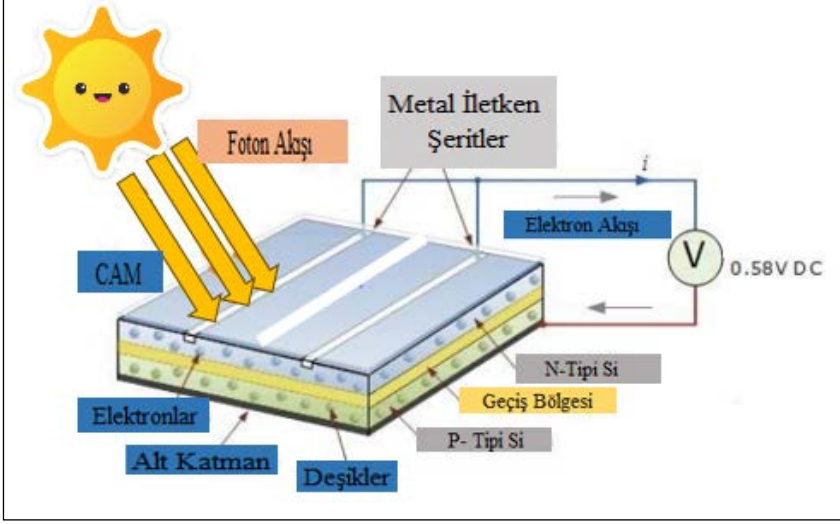
denir. Şekil 1.2'de P-tipi yarı iletken şeması ve oyuk hareketi gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.2. P-tipi yarı iletken şeması ve oyuk hareketi gösterimi

En yaygın kullanılan Si güneş pillerinin çalışma prensibine bakıldığında: Enerji aralığı (E_g) ile ayrılmış iki enerji bandı yarı iletken bir malzeme oluşturur, bu bantlar "değerlik bandı" ve "iletkenlik bandı" olarak adlandırılır. Bu E_g 'na denk ya da daha büyük bir enerjiye sahip bir foton bir yarı iletken tarafından absorplandığında, bu enerji değerlik bandındaki bir elektrona verilir ve e^- 'un iletim bandına geçmesine neden olur. Böylelikle elektron-deşik çiftleri meydana gelir. Bu durum bir P-N eklemli güneş pilinin arayüzünde meydana geldiğinde, oradaki elektrik alanı elektron-deşik çiftlerini birbirinden ayırır. Bu şekilde güneş pili bir pompa gibi davranarak e^- 'ları N bölgesine, deşikleri de P bölgesine iter. Ayrılan elektron-deşik çiftleri, güneş pilinin sonunda kullanılabilir bir güç çıkışı üretir. Pil yüzeyine tekrardan başka bir foton çarptığında süreç aynı şekilde devam eder. Üretim sırasında pilin ön tarafında çok sayıda statik alan oluşturulur ve bu alan bu e^- 'ları serbest bırakır. Normalde farklı elementler silikon kristaline katkılanır ve Si kristalde bu elementlerin varlığı kristalin elektriksel dengesini bozar. Işığa maruz kalan malzemelerde bu atomlar dengesizleşerek serbest e^- 'ların pilin yüzeyine ve diğer pillere doğru hareket etmesine veya

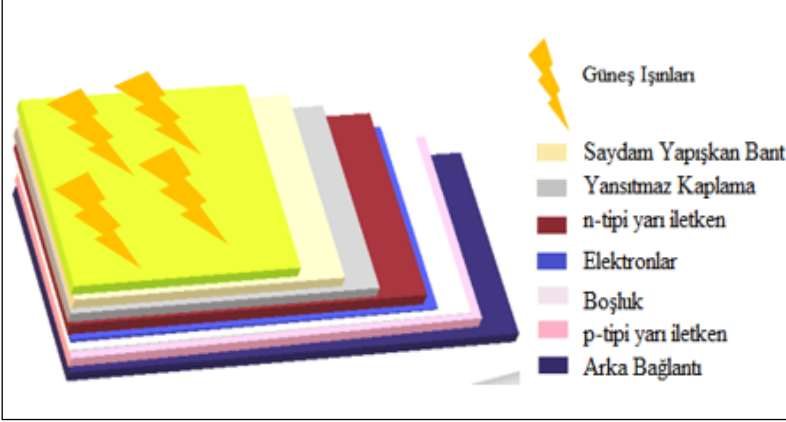
şarj olmasına neden olur. Milyonlarca foton pilin içine akarken, enerji kazanarak bir sonraki seviyeye geçen elektronlar da pilin içerisindeki elektrostatik bölgeye akar ve sonra pilden çıkar (Green, 1995; Knobloch ve Voss, 1998; Nelson, 2003; Altaş, 1999; Tekerek, 2009). Şekil 1.3'te güneş pili şemasının görünümü görülmektedir.



Şekil 1.3. Güneş pili şeması

1839 yılında Fransız Fizikçi Alexandre Edmond Becquerel fotovoltajik etkiyi ilk keşfeden bilim insanı olmuştur. William G. Adams ve Richard E. Day tarafından 1876 yılında silikon olarak da tabir edilen Silisyum (Si) kristalleri bulunmuş, ardından 1905'te fotovoltajik etkiyi daha anlaşılır bir biçimde ifade etmiştir. Bu son ilerleme Albert Einstein'a 1921 yılında Nobel Fizik Ödülünü kazandırmıştır. 1950 yılında Daryl Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson Bell Telefon Laboratuvar'larında Si hücrelerinin verimi %6 olarak belirlenmiştir. Zaman içerisinde Si kristallerine ilgi giderek artmıştır ve ilk teknik uygulama imkanını 1954 yılında 'Vanguard 1' uydusu ile uydu teknolojisinde bulmuştur. Bu gelişmeyi takiben 1960-1970

yıllarında havacılık sektörü fotovoltaik hücrelerin gelişiminde öncü olmuştur ve Şekil 1.4’de fotovoltaik panel şeması gösterilmiştir (Kazmerski, 2006; Nelson, 2003).

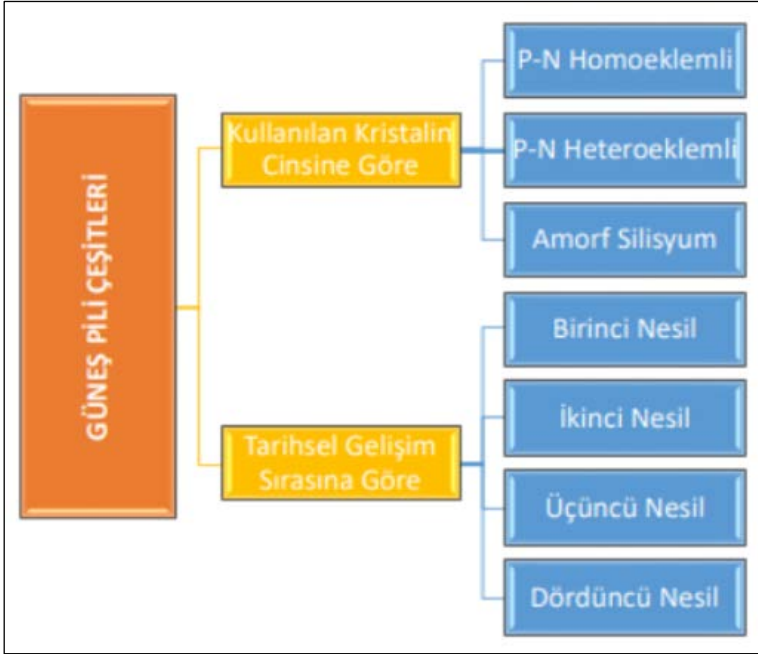


Şekil 1.4. Fotovoltaik panel şeması

Michael Gratzel ve Brian O'Regan 1991 yılında Ecole Polytechnique Federale de Lausanne araştırma merkezinde ilk defa boyar maddeli güneş pilleri bulunmuştur (Gratzel, 2003). Si matrisli güneş pillerinin tersine bu yeni tip güneş pilleri çok fazla safsızlık istememeleri sebebiyle, Si matrisli güneş pillerinde kullanılan temiz oda teknolojisinin maliyetinden muaf olmuş ve böylece bu tarz hücreler ucuz güneş hücreleri olarak anılmaya başlanmıştır. Ayrıca bu tarz sistemlerin çok fazla saf malzemelerden üretilmemesi sonucu sistemin kararlılığının uzatıldığı belirlenmiş ve bu durum 'ucuz üretim, uzun kullanım' olarak adlandırılmıştır (Gratzel, 2003; Sastrawan, 2006). Genel olarak, boyar maddeli güneş pillerinin zayıf ışık altında da düzgün bir performans göstermeleri onları kapalı havalarda veya iç mekanlarda da kullanılabilir hale getirmektedir (Gratzel, 2003). Yine de verimlerinin halen maksimum %7-%11 civarında olması, bu sistemlerin büyük ölçekli üretimlerinin önündeki en önemli dezavantajdır (Green ve diğerleri, 2009).

1.1. Güneş Pili Çeşitleri

Güneş pilleri teknolojiye üç farklı şekilde üretilirler. Bunlar tek kristalli (monokristal), çok kristalli (polikristal) ve ince filmler olarak adlandırılır. Üretimdeki bu farklılıklar güneş pillerin gruplanmasına neden olmuştur. Aşağıdaki Şekil 1.5 güneş pili çeşitleri şeması verilmiştir.



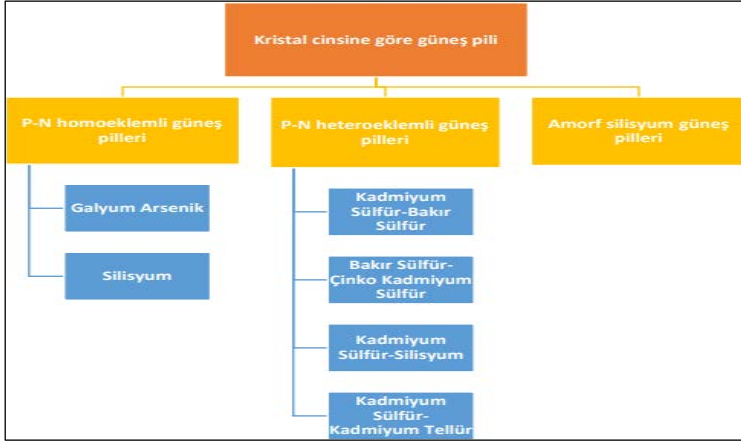
Şekil 1.5. Güneş pili çeşitleri şeması

Tek kristal; monokristal olarak da adlandırılırlar ve yapısında tek bir kristal atomu bulundurmaktadır. Si ve Ge elementleri bu kristallerdendir ve en yaygın kullanılanı Si elementidir. Ayrıca, tek kristal güneş pillerinin maliyeti diğer güneş pillerinin maliyetine göre oldukça yüksektir.

Çok kristal; polikristal olarak da adlandırılırlar ve yapısında birden fazla kristal atomu bulunmaktadır.

İnce film; güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için tasarlanan ikinci nesil güneş pili. Mikron kalınlığında ve esnek yapıdadır.

Güneş pilleri Şekil 1.6'da gösterildiği gibi kullanılan kristalin cinsine göre 3 ana gruba ayrılır.



Şekil 1.6. Kristalin cinsine göre güneş pili şeması.

1.1.1 P-N homoeklemlili güneş pili

P-N ekleminin uçları aynı yarı iletken maddeden yapılan güneş pili türüne homoeklemlili güneş pili denmektedir. En yaygın güneş pili tasarımı, monokristalin p-n bağlantısıdır; p-n homoeklemlili, heteroeklem tasarımlarına göre önemli bir avantaja sahiptir; bağlantı noktasında hiçbir malzeme arayüzü yoktur ve bu nedenle arayüz durumlarından kaynaklanan kayıplar önlenabilir (Nelson, 2003).

Homoeklemlili güneş pilleri katkılama yöntemine göre 4 farklı türe ayrılır, bunlar: sığ homoeklemlili güneş pilleri, yüksek alçak yayınlıyıcı güneş pilleri, ön yüzey alanlı güneş pilleri ve düşük homoeklemlili güneş pilleri olarak adlandırılırlar.

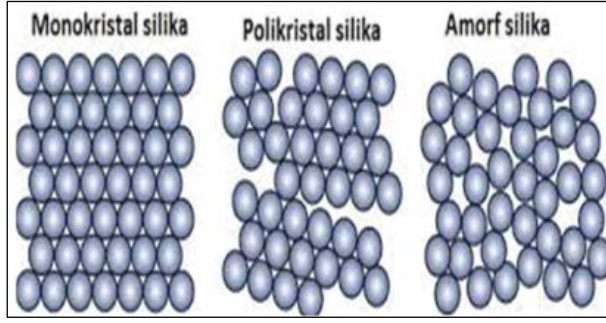
1.1.2 P-N heteroeklemlı güneş pilleri

P-N ekleminin iki tarafında iki farklı yarı iletken kullanılarak elde edilen heteroeklemlı güneş pillerinde, P-N homoekemlı güneş pillerine oranla kolay ve ekonomik maliyeti sebebiyle son yıllarda tercih edilmektedir. Ayrıca, bu tip güneş pilleri homoekemlı olanlara oranla ısığa ve radyasyona daha dayanıklıdır (Köse, 1986; Engin, 1996). Ancak P-N eklemin iletim bandı kenarındaki süreksizliklerden kaynaklı olumsuzluklardan kaçınmak için heteroeklemlı güneş pillerinde, eklemin iki tarafında örgü sabitleri birbirine çok yakın yarı iletkenlerin seçilmesine, zıt yarıiletken tipte soğurucu ve pencere materyali seçilmesine dikkat edilmelidir (Oral, 1979; Engin, 1996).

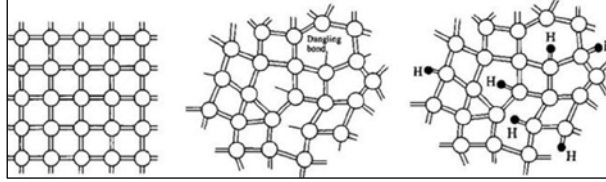
1.1.3 Amorf silisyum güneş pilleri

Amorf-Si (a-Si) malzemesi; içindeki Si atomlarının rastgele yerleşmiş olmasıyla kristal Si'dan ayrılır. Dolayısıyla, a-Si'da atomların düzensiz sıralanışı; yasak bant aralığına fazladan izinli enerji durumlarını arttırarak birleşme merkezleri oluşmasına neden olur. Malzeme içerisindeki yapı taşlarının bu rastgele dizilişi, a-Si'un elektriksel iletim kalitesini düşürse de, yarı iletken içerisine %5-%10 oranlarında H katılarak, elektriksel özellikleri fotovoltaiik çevrime uygun düzeyde tutulabilir. H; doymamış Si bağlarının bazılarını doyurarak, Eg'nda bulunan izinli durumların sayısını azaltır (Oktik, 2001).

1977 yılında, Wronski ve Carlos, ilk defa a-Si:H güneş pili yapmış ve verimi %5,5 olarak bulunmuştur (Köse, 1986). Fotoiletkenlik, a-Si filmlerde yok denecek kadar az olsa da, a-Si:H filmlerde oldukça büyüktür. Şekil 1.7'da a-Si güneş pili çeşitleri ve Şekil 1.8'de a-Si güneş pillerinin kristal yapı görünümü verilmiştir.

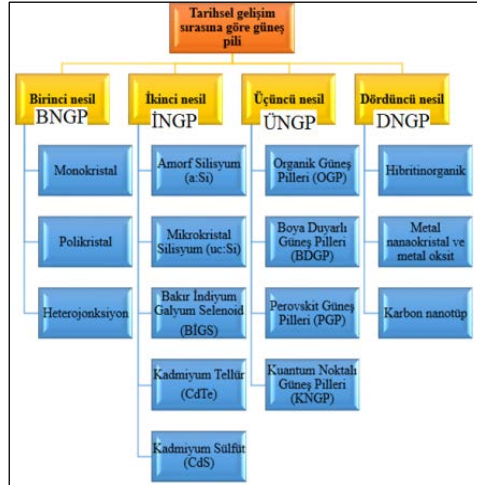


Şekil 1.7. a-Si güneş pili çeşitleri



Şekil 1.8. a-Si güneş pillerinin kristal yapı görünümü.

1.2. Tarihsel Gelişim Sırasına Göre Güneş Pili



Şekil 1.9. Tarihsel gelişim sırasına göre güneş pili şeması.

1.2.1.BNGP

Güneş pillerinin tarihsel sürecinde enerji elde edebilmek için ilk üretilen fotovoltaik pilleri BNGP olarak adlandırılmaktadır. İlk olarak üretilmiş olmaları nedeniyle güneş pili pazarına hâkim Si tabanlı fotovoltaik pillerdir. Bu pillerin üretim maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen üretim teknolojisi beklentiye göre oldukça düşüktür. Bu dezavantaja sahip birinci nesil güneş pilinin yetersizliği ikinci nesil güneş pillerinin vârolmasına katkı sağlamıştır. Monokristal ve polikristal birinci nesil güneş pilleri içinde yer almaktadırlar (Pastuszak ve diğerleri, 2022).

1.2.2.İNGP

Verimlilikleri %10 dolayında olan İNGP'ler günlük yaşamda fazla kullanım alanı bulamamış olsa da uzay ve uydu teknolojilerinde kullanımı oldukça fazla tercih edilmiştir. CuInSe₂, a-Si, CdTe ve GaAs aktif katman malzemeleridir. Bu tip malzemelerinin absorpsiyon katsayıları büyük olduğu için, sadece birkaç mikron kalınlığında aktif tabaka gelen ışığı absorplamak için yeterli olmaktadır. BNGP'ye kıyasla minimum malzeme kullanımı, ince film güneş pillerinde artı durum teşkil etse de elde edilen yetersiz verim sonuçları muadilleriyle karşılaştırılmaz durumdadır. Bunun yanında ince film güneş pillerinin diğer dezavantajı, bu pillerin yapımında kullanılan malzemelerin doğal dengeye ve insan sağlığına olumsuz etkisi mevcuttur (Doğan, 2014; Çiftpınar, 2014; Şimşek, 2015).

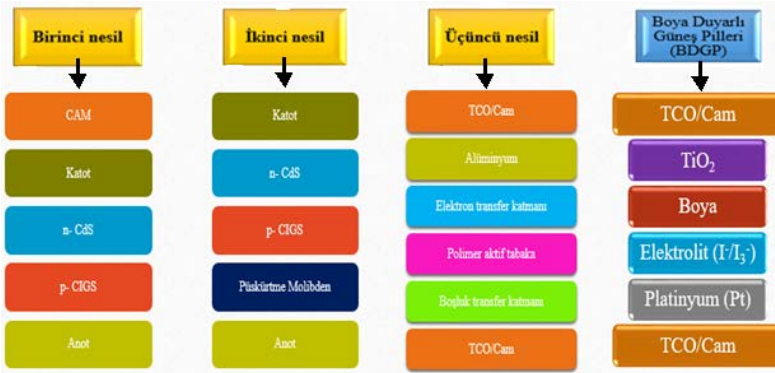
1.2.3.ÜNGP

ÜNGP az maliyetli ve düşük verimli sistemlerden (boya duyarlı, OGP) çok maliyetli ve yüksek verimli sistemlere kadar geniş bir yaklaşım yelpazesini temsil eder. ÜNGP, bir kısmı 25 yıldan fazla bir zamandır incelenmiş olsa da, yetersiz pazar

dağılımı sebebinden kaynaklı bazen "gelişmekte olan" olarak nitelendirilir (Goetzberger vd., 1998; Dunlap vd, 2019).

Silikon fotovoltaik hücre geliştirmedeki en son eğilimler, yarı iletkenin bant yapısında ek enerji seviyelerinin üretilmesini içeren yöntemlerdir. Üretim teknolojisi ve verimlilik iyileştirmelerine yönelik en gelişmiş çalışmalar artık ÜNGP üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Bu nesil, daha yeni kimyasal bileşikler içeren fotovoltaik teknolojilere dayanmaktadır. Ayrıca nanokristal filmler, kuantum dots, boyaya duyarlı, organik polimer bazlı ve perovskit güneş pilleri gibi pekçok teknoloji de bu kuşağa aittir. Bunlardan en yaygın olanları OGP, BDGP ve perovskit hücrelerdir. Aşağıdaki Şekil 1.10'da BNGP, İNGP, ÜNGP ve BDGP yapıları gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Güneş pili nesillerinin şematik gösterimi.

1.3.4. DNGP

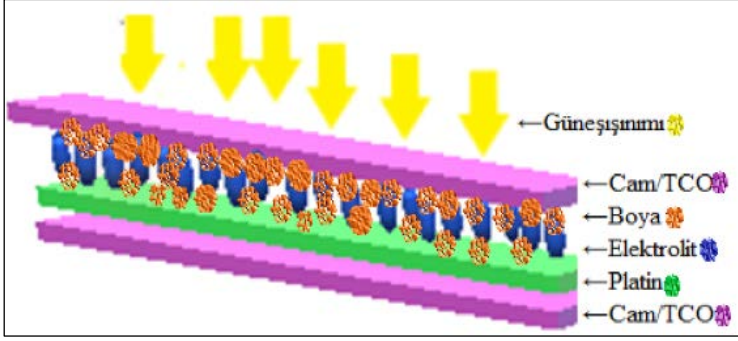
Diğer nesillerdeki sorunlara çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu nesilde hibritinorganik güneş hücreleri bulunmaktadır. Organik ve inorganik malzemelerin nanoyapılarının karışımıdır. Böylece iki malzemenin özellikleri de

birleşmiştir. İşlenebilirliği, düşük maliyeti ve ince film cihazlarının çok yönlü üretimi açısından ön plana gelmesi beklenmektedir (Güneş ve Sarıçiftçi, 2008).

1.4. BDGP ve Bileşenleri

BDGP'nin üretiminde ışığa duyarlı organik yapı ve yarı iletken tabaka kullanılmaktadır. Ayrıca genel bir BDGP cam veya FTO gibi iki adet şeffaf iletken oksit (transparent conductive oxide) TCO ile oluşturulur (Hagfeldt ve Gratzel, 1995; Hao vd., 2006). BDGP'nin ucuz ve kolay üretilebilmesi ayrıca iyi verimli olmaları gibi durumlar bilim insanlarının çalışmalarını bu malzeme üzerinde yapmasına yol açmıştır (Gratzel 1991; Krebs ve diğerleri, 2010). BDGP iki elektrot arasında tutulan redoks elektrolitinden oluşur. Gratzel ve O'Regan bitkilerdeki fotosentez işlemini referans alarak 1991'de boya duyarlı titanyum nanokristal güneş pili geliştirmişlerdir. Bitkilerde klorofil tarafından ışığın absorblanması ve daha sonra yük alışverişinin gerçekleşmesine benzer bir biçimde gelen ışığın boya tarafından absorblanır ve böylece aldığı enerji ile uyarılan elektronlar bir üst enerji seviyesine çıkar. Metal oksit iletkenlik bandına aktarılır ve yine metal oksit sayesinde FTO cam yüzeyine ulaşmış olurlar (Koleman ve diğerleri, 2011). Gelen elektron redox çifti üzerinden boyar malzemenin en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) seviyesine iletilerek rejenerasyon gerçekleşmiş olur. Boya uyarılmaya devam ettiği sürece döngü devam eder.

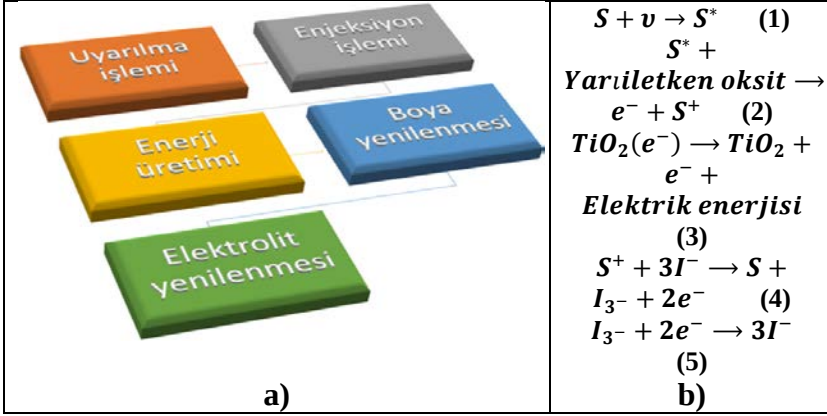
BDGP'lerin yapıları temel olarak sandviç şekline benzer bir sistemden oluşur ve Şekil 1.11'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. BDGP yapısının gösterimi.

1.5. BDGP Çalışma Prensibi

BDGP'lerin çalışma prensibi Şekil 1.12'a ve b'de gösterildiği gibi beş basamakla ifade edilebilir.



Şekil 1.12.a. BDGP çalışma prensibi. b. BDGP'nin çalışma şablonu.

(1) Foto-anotun üzerine gelen fotonların boya molekülleri tarafından soğurulması sonucu uyarılan boya molekülünde enerjisi artan e^- 'ların HOMO seviyesinden LUMO seviyesine çıkması,

(2) Uyarılan e^- yarı iletken TiO_2 'nin iletim bandına transfer edilir ve bunun sonucunda boya molekülü yükseltgenerek kararsız duruma geçer,

(3) TiO_2 'ye transfer edilen e^- bir bağlantı yardımıyla dış devreye aktarılır ve elektrik enerjisine dönüşüm gerçekleşir,

(4) Yükseltgenmiş boya molekülü elektrolit içerisindeki I^- iyonundan e^- alarak kendisi indirgenerek kararlı duruma geçmiş olur ancak iyodür(I^-) ise tri-iyodüre (I_3^-) yükseltgenir,

(5) I_3^- ise dış devreden karşıt elektrot üzerine gelen e^- 'u alarak $3I^-$ iyonuna dönüşür ve böylece BDGP'de elektrik enerjisi meydana getirilmiş olur (Gratzel, 2005).

1.6. Boya

OGP yapımında kullanılmak için birbirinden farklı boyalar sentezlenmektedir. Şu ana kadar OGP'lerde tercih edilen boyar maddeler arasında polipridiller (O'Regan ve Gratzel, 1991; Islam, 2003), porfirinler (Kay ve diğerleri, 1993; Cherian ve Wamser, 2000), ftalosiyanınlar (Komori ve Amao, 2003), kumarinler (Hara ve diğerleri, 2003; Hara ve diğerleri, 2001), indolinler, konjuge polimerler ve perilenler (Ferrera ve Gregg, 2002) yer almaktadır. Bahsedilen boyalar içerisinde günümüze kadar en fazla verimin gözlendiği rutenyum polipiridil kompleks boyaları olmuştur. 1991 yılında TiO_2 yapılı OGP'lerin bulunması sonucu $Ru(dcbpy)_2(NCS)_2$ boyaları ve bu boya türevleri önemli hale gelerek bilim insanlarınca araştırmalarda en çok tercih edilen boyalar arasında yer almıştır (O'Regan ve Gratzel, 1991).

1.6.1. Boyanın Özellikleri

Organik boyalar ve inorganik boyalar olmak üzere iki farklı yapıda boya türü bulunmaktadır. İyi bir boya aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

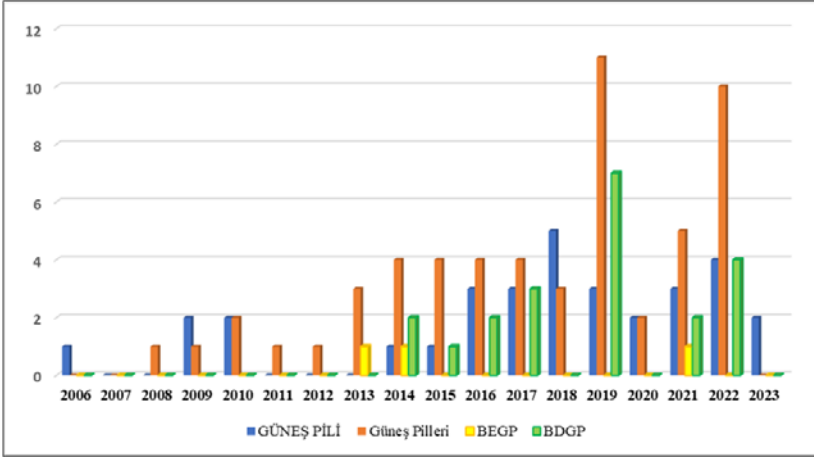
- Boyar maddenin 920 nm dalga boyu altındaki ışığı soğurabilmelidir.
- Boyar madde konulduğu yarı iletken özellikli yüzeye topaklanmadan kuvvetli bir biçimde tutunması gerekmektedir.
- Boyanın uyarılmış enerjisi, TiO_2 'nin iletkenlik bandının çok az üzerinde olmalı ve enerji bandı elektron transferine izin vermelidir.
- Boyar madde, yarı iletken-elektrolit ara yüzeyinde uzun süre kararlı olabilmelidir.
- Boyar maddenin çözünürlüğü iyi olmalı ve yarı iletken yüzeyine tutunabilecek bağlayıcı fonksiyonel bir grup içermelidir.
- Elektrolitin redoks seviyesi boyanın oksitlenme seviyesinden düşük olmalıdır.
- Foto duyarlaştırıcılar elektrokimyasal özellikli foto kararlı yapılardır.
- Çok ince yapıda olan baya tabakasının içinde bulunan elektron ve deşikler küçük mobilite özelliği ile membranlara kolayca ulaşabilmelidir.
- Boyalar inorganik (kimyasal) ve organik boya olarak sınıflandırılırlar.

Yapısında metal kompleks barındıran doğal boyaların yüksek maliyetli olması ve inorganik boyaların ise doğaya negatif etkisinin olması gibi dezavantajlar sonucu bilim insanları çalışmalarını bitkilerden üretilen boyalara yönlendirmişlerdir (Su'ait ve diğerleri, 2015; Hagfeldt ve diğerleri, 2010).

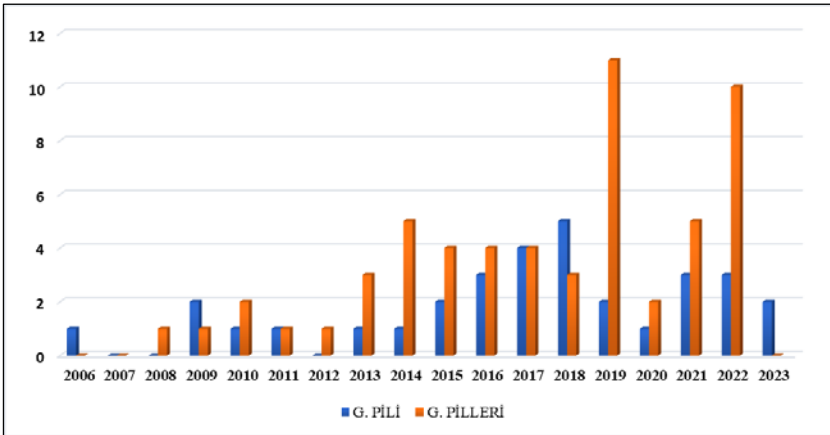
2. BULGULAR

Bu çalışmada Türkiye’de BDGP konusunda yapılan araştırma ve çalışmaların durumunu ve son trendleri belirlemek hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, Ulusal Tez Merkezinde verilen bilgiler taranmıştır. Ulusal Tez Merkezi ana sayfasında tarama terimi olarak “güneş pili” ve “güneş pilleri” terimleri yazılarak arama yapıldığında 1986-2023 yılları arasında güneş pili konusunda toplam 361 tez veri girişi olduğu görülmüştür. Bu tezler; tez adı, tez konusu, tez amacı, yöntem, materyal ve sonuçlar kısımları incelenerek BDGP konusunda 90 tez olduğu belirlenmiştir. 90 tezin 21 tanesinde BDGP kelimeleri, 3 tanesinde ise BEGP kelimeleri tez adında yer almaktadır. Buradan görüldüğü üzere BDGP konulu tez çalışmaları ilk kez 2006 yılında başlamıştır. 2006-2023 yılları arasında yapılan tez çalışmalarının ‘BDGP’, ‘BEGP’, ‘Güneş Pilleri’ ve ‘Güneş Pili’ tarama terimlerine göre yıl bazında dağılımı Şekil 2.1’de verilmiştir. Burada görüldüğü üzere, 2006-2013 yılları arasında yapılan ortalama tez sayısı bir elin parmağını geçmeyecek kadar azdır. Nitekim 2008 yılında BDGP konulu hiçbir tez çalışmasının olmadığı görülmektedir. Bu konuda yapılan tez çalışmaları daha çok 2016 yılından sonra ivme kazanmıştır. 2019 yılında çalışmaların pik yaptığı görülmektedir. 2021 ve 2022 yıllarında görece bir azalma mevcuttur ki bu durumun tüm dünyada etkin olan pandemik süreçten ülkemizdeki çalışma koşullarının ve

araştırmacıların da negatif etkilenmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.



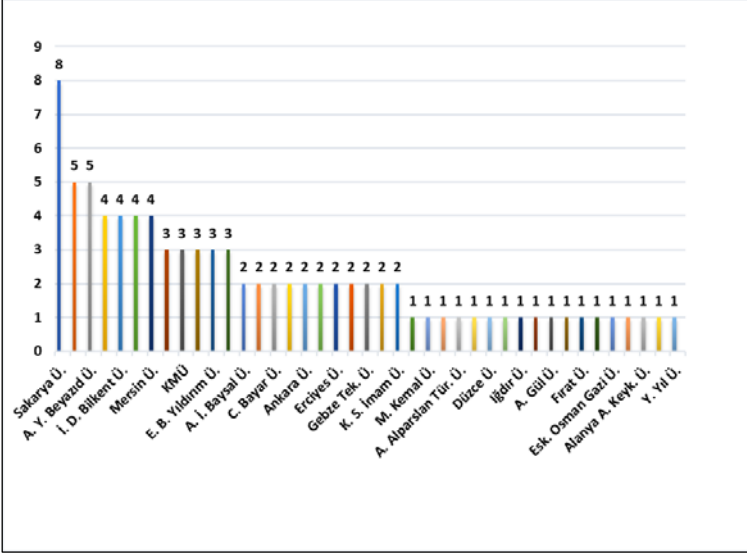
Şekil 2.1. Ulusal Tez Merkezinde BDGP için yapılmış tüm tezler.



Şekil 2.2. Boya ile yapılmış Güneş Pili ve Güneş Pilleri Tez sayıları.

BDGP konulu tezlerin yıllara göre dağılımı Şekil 2.2’de ve üniversiteler bazında dağılımı Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Toplam çalışma sayısında Sakarya Üniversitesinin 8 tez

çalışmasıyla zirvede olduğu, ardından 5 çalışmayla Yıldız Teknik Üniversitesinin geldiği görülmüştür. Araştırma laboratuvarları ve altyapısı olan, Tübitak vb. projelerle destek alan üniversitelerde çalışmaların daha fazla yapılabilmesi beklenen bir sonuçtur.



Şekil 2.3. Üniversitelerde yapılan tez sayılarının dağılımı.

3. SONUÇ

Ülkemizdeki BDGP konulu çalışmaların kendi içinde ve dünya trendleriyle karşılaştırıldığı bu çalışmada Ulusal Tez Merkezi verileri kapsamlı bir şekilde taranarak BDGP konusuyla ilgili yapılan tez çalışmaları incelenmiştir. BDGP konusunda günümüze kadar yapılan tüm tezler; amaçları/sonuçları, yıl ve üniversite bazında gruplandırılarak istatistiksel veriler ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür:

- Ülkemizde güneş pili konulu ilk çalışma 1986 yılındadır (Köse, 1986), BDGP konusunda ilk tez ise 2006 yılında yapılmıştır (Zafer, 2006) ve BDGP konusunda tez çalışmalarının 2014 yılı itibariyle ivme kazandığı görülmüştür.
- Tezlerde çalışma hedeflerinin ağırlıklı olarak boyar madde üretim/geliştirilmesi ve verim geliştirme olduğu tespit edilmiştir.
- Ülkemizde yapılan tez çalışmalarının dünyada yapılan çalışmalarla paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Bunun yanında uluslararası indeksler tarandığında tez çalışmalarının makaleye dönüşüm hızlarının aynı olmadığı görülmüştür.
- BDGP konulu tezler bölge ve üniversite bazında incelendiğinde İç Anadolu ve Marmara bölgesindeki Üniversitelerin başı çektiği görülmüştür. Bu durumun; altyapı/laboratuvar ortamları ile proje olanaklarının bir sonucu olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

- Altaş, İ.H. (1999). Fotovoltaj güneş pilleri: uygulama örnekleri. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik Dergisi*, 60, 26-29.
- Cherian, S. ve Wamser, C.C. (2000). Adsorption and photoactivity of tetra (4-Carboxyphenyl) porphyrin (TCPP) on nanoparticulate TiO₂. *The Journal Of Physical Chemistry*, B 104(15), 3624-3629.
- Çiftçınar, E.H. (2014). *Selective emitter formation via single step doping through laser patterned mask oxide layer for monocrystalline silicon solar cells*. Middle East Technical University, Ankara.
- Doğan, H. (2014). *Fotovoltajik güneş pilleri*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Engin, D. (1996). *Yaprak büyüklüğünü belirleyen bir ölçme sisteminin geliştirilmesi*. Ege Üniversitesi, İzmir.
- Ferrere, S. ve Gregg, B.A. (2002). Now perylenes for dye sensitization of TiO₂. *New Journal Of Chemistry*. 26(9), 1155-1160.
- Grätzel, M. ve O'Regan B. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353, 737-740.
- Grätzel, M. (2003). Dye-sensitized solar cell. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4, 145-153.
- Grätzel, M. (2005). Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells. *Inorganic Chemistry*, 6841-6851.

- Green, M.A. (1995). Silicon solar cells: advanced principles and practice. *Bridge Printery*.
- Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y. ve Warta, W. (2009). Solar cell efficiency tables. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 17, 85–94.
- Goetzberger, A., Knobloch, J., ve Voss, B. (1998). *Crystalline silicon solar cells* (Vol. 1, pp. 114-118). Chichester: Wiley.
- Günes, S. ve Sariciftci, N. S. (2008). Hybrid solar cells. *Inorganica Chimica Acta*, 361 (3), 581-588.
- Knobloch, J. ve Voss, B. (1998). Crystalline silicon solar cells, *Wiley*.
- Kölemen, S. (2010). *Boyar madde uyarımlı güneş pilleri için yeni duyarlaştırıcıların sentezi ve karakterizasyonu*. İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi, Ankara.
- Hagfeldt, A. ve Graetzel, M. (1995). Light-induced redox reactions in nanocrystalline systems. *Chemical reviews*, 95(1), 49-68.
- Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L. ve Pettersson, H. (2010). Dye-sensitized solar cells. *Chemical reviews*, 110(11), 6595-6663.
- Hao, S., Wu, J., Huang, Y., & Lin, J. (2006). Natural dyes as photosensitizers for dye-sensitized solar cell. *Solar energy*, 80(2), 209-214.
- Hara, K., Sayama, K., Ohga, Y., Shinpo, A., Suga, S. ve Arakawa, H. (2001). A coumarin-derivative dye sensitized nanocrystalline TiO₂ solar cell having a high solar-energy

conversion efficiency up to 5.6%. *Chemical Communications*, (6), 569-570.

Hara, K., Kurashige, M., Dan-Oh, Y., Kasada, C., Shinpo, A., Suga, S., Sayama, K. ve Arakawa, H. (2003). Design of new coumarin dyes having thiophene moieties for highly efficient organic-dye-sensitized solar cells. *New Journal Of Chemistry*, 27(5), 783-785.

Islam, (2003). Molecular design of ruthenium (II) polypyridal photosensitisers for efficient nanocrystalline TiO₂ solar cells. *J. Photchem. Photobiol.* 158, 131-138.

Kay, A. (1993). Artificial photosynthesis. 1. photosensitization of titania solar cells with chlorophyll derivatives and related natural porphyrins. *The Journal Of Physical Chemistry*, 97(23), 6272-6277.

Kazmerski, L.L. (2006). Solar photovoltaics R. ve D. at the tipping point: A 2005 technology overview. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 150, 105-135.

Krebs, F.C., Fyenbo, J. ve Jørgensen, M. (2010). Product integration of compact roll-to-roll processed polymer solar cell modules: methods and manufacture using flexographic printing, slot-die coating and rotary screen printing. *Journal of Materials Chemistry*, 20 (41), 8994-9001.

Kolemen, S., Bozdemir, O.A., Cakmak, Y., Barin, G., Erten-Ela, S., Marszalek, M., Yum, J.-H., Zakeeruddin, S.M., Nazeeruddin, M.K. ve Grätzel, M. (2011). Optimization of distyryl-Bodipy chromophores for efficient

panchromatic sensitization in dye sensitized solar cells.
Chemical Science, 2 (5), 949-954.

Komori, T. ve Amao, Y. (2003). Dye-sensitized solar cell with the near-infrared sensitization of aluminum phthalocyanine.
Journal of Porphyrins and Phthalocyanines, 7(2),131-136.

Köse, S. (1986). *Yarıiletken güneş pilleri ve verimlilikleri*.
Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Nelson J. (2003). *The physics of solar cells*. London: World Scientific Publishing Company.

Oktik, S. (2001). *Güneş elektrik dönüşümleri fotovoltaiik güneş gözeleri ve güç sistemleri*. Ankara Temiz Enerji Vakfı Yayınları.

O'Regan, B. and Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films.
Nature International Journal of Science, 353, 737–740.

Oral, M. (1979). *Güneş pilleri*. İzmir: İlker Matbaası.

Pastuszak, J. ve Węgierek, P. (2022). Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, 15(16), 5542.

Sastrawan, R. (2006). *Photovoltaic modules of dye solar cells* (Doctoral dissertation, Verlag nicht ermittelbar).

Su'ait, M. S., Rahman, M.Y. A. ve Ahmad, A. (2015). Review on polymer electrolyte in dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Solar Energy*, 115, 452–470.

- Şimşek, R. (2015). *Production of dye sensitized solar cell and optimization of production parameters.* Istanbul Technical University, İstanbul.
- Tekerek, S. (2009). *TiO₂ tabanlı boyar maddeli güneş pili yapımı.* Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- Tuna, Ö. (2014). *Fotovoltaik etki kullanılarak farklı açık alanlardaki dinlenme yerlerinin serinletilmesinin çevresel ve ekonomik faydalarının araştırılması.* Fırat Üniversitesi, Elâzığ.
- Zhang, B., Thampy, S., Dunlap-Shohl, W. A., Xu, W., Zheng, Y., Cao, F. Y., ... ve Hsu, J. W. (2019). Mg doped CuCrO₂ as efficient hole transport layers for organic and perovskite solar cells. *Nanomaterials*, 9(9), 1311.
- Zafer, C., (2006). *Organik boya esaslı nanokristal yapılı ince film güneş pili üretimi.* Ege Üniversitesi, İzmir.

INTRODUCTION TO PLASMONICS AND METAL NANOPARTICLES

İlhan CANDAN¹

Sezai ASUBAY²

1. INTRODUCTION

1.1. What is plasmonics?

Plasmonics is a field of science that studies the interaction between electromagnetic waves and free electrons in metals (Atwater, 2007; Maier & Atwater, 2005). This interaction gives rise to a phenomenon known as surface plasmon resonance (SPR), which enables the confinement and enhancement of light at subwavelength scales, as shown in figure 1 (Piliarik & Homola, 2009). Plasmonics has revolutionized nanophotonics, biosensing, and energy applications by harnessing the unique optical properties of metallic nanostructures (Butt, 2025; Kumari, Yadav, Singh, & Sharan, 2024; Ravindran et al., 2023).

At the core of plasmonics is the collective oscillation of free electrons in a metal when excited by an external electromagnetic field. These oscillations can be classified into two main types:

Surface Plasmon Polaritons (SPPs): These are coherent electron oscillations that propagate along a metal-dielectric interface (Zhang, Zhang, & Xu, 2012).

¹ Asist. Prof. Dr., Dicle University, Science Faculty, Physics Department, e-mail: ilhan.candan@dicle.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9489-5324.

² Prof. Dr., Dicle University, Science Faculty, Physics Department, e-mail: sezai.asubay@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2171-8479.

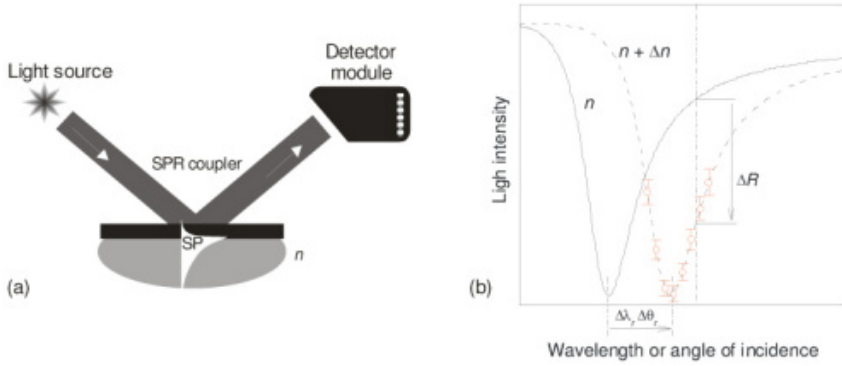


Figure 1. a) SPR sensor's optical system scheme, b) surface plasmon's typical wavelength or angular spectra (Piliarik & Homola, 2009).

Localized Surface Plasmons (LSPs): These occur when conduction electrons in metal nanoparticles resonate with an incident light wave, leading to strong electromagnetic field enhancement around the particle, as shown in figure 2 (Andr n, 2018).

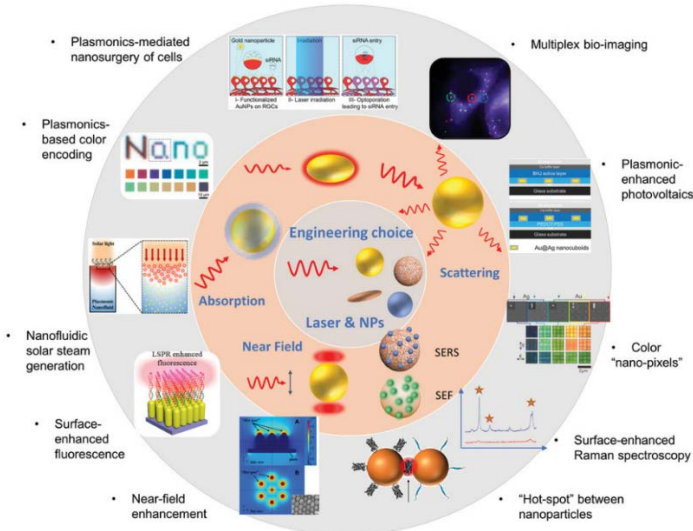


Figure 2. Plasmonic nanostructure design schematic representation (Wang, Hasanzadeh Kafshgari, & Meunier, 2020; Wilson et al., 2018).

1.2. Why metals? optical properties of noble metals

Not all metals exhibit strong plasmonic behavior. Noble metals such as gold (Au) and silver (Ag) are the most commonly used materials in plasmonics due to their unique optical properties (Kvítek, Siegel, Hnatowicz, & Švorčík, 2013; Naik, Shalaev, & Boltasseva, 2013). These metals support strong plasmonic resonances in the visible and near-infrared regions, making them ideal for applications in sensing, imaging, and optoelectronics.

The key reason noble metals are plasmonic is the presence of free conduction electrons, which interact with light to generate plasmons (Hartland, 2011; Zada et al., 2020). The dielectric function, given by the Drude model, describes how these metals respond to electromagnetic waves. For strong plasmonic effects, the real part of the dielectric function should be negative, and the imaginary part (which corresponds to losses) should be as low as possible (Alabastri et al., 2013; Kheirandish, Sepehri Javan, & Mohammadzadeh, 2020).

Silver has the lowest optical losses and the strongest plasmonic response, but it is prone to oxidation. Gold, though slightly more lossy, is chemically stable, making it the preferred material for many applications (Cortie, Arnold, & Keast, 2020; Naik et al., 2013).

Table 1. Variour palsmonic materials' properties (Wang et al., 2020).

Materials	Mechanism	Examples	LSPR range	Advantages	Comments
Metallic nanostructures	Free electrons	Au, Ag, Cu and their alloys	UV-visible	Mature theory of optical properties, various structures, controllable synthesis methods, strong plasmonic effects	Costly, limited permittivity
Semiconductor nanocrystals	Free holes	Cu_{2-x}S , ^[9] Cu_{2-x}Se , ^[10] ITO, ^[11] TiN ^[12]	Visible-NIR	smaller size (<10 nm), broader NIR absorbance	Difficult to dope
2D materials	Electrons and holes	Graphene, ^[13] MoS_2 ^[14]	NIR	strong plasmonic effect	Tedious synthesis processing, high-demanding synthesis instrument
Conductive polymers	Polaronic charge carriers	poly(3,4-ethylenedioxythiophene:sulfate) ^[15]	NIR	Switchable state, low cost, flexibility, biocompatibility	Limited to fundamental study, low electrical conductivity, high defect density

1.3. The role of metal nanoparticles in plasmonics

Metal nanoparticles (MNPs) play a crucial role in plasmonics due to their ability to confine light into extremely small volumes, enhancing the local electromagnetic field as given in the table 1 (Jana, Ganguly, & Pal, 2016; Philip & Kumar, 2022). The most widely studied plasmonic nanoparticles include gold and silver nanoparticles, whose size, shape, and surrounding environment dictate their optical properties.

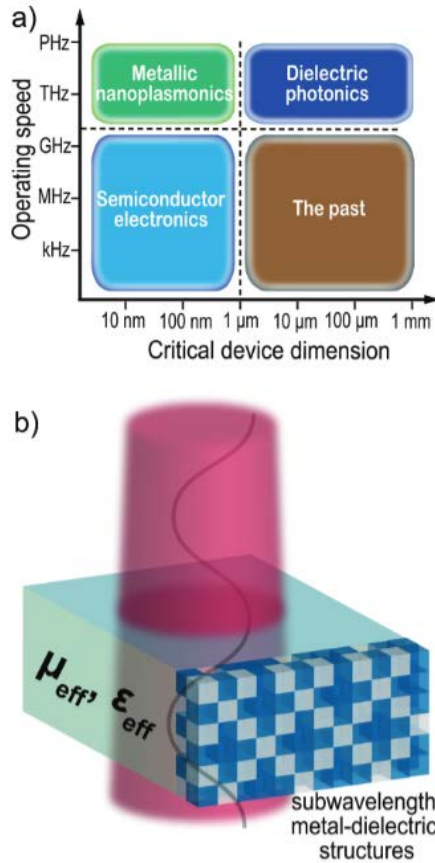


Figure 3. a) graph demonstrating critical device dimensions vs operating speeds, b) subwavelength metal-dielectric structures for a metamaterial (Cortie et al., 2020)

2. LOCALIZED SURFACE PLASMON RESONANCE (LSPR)

When metal nanoparticles are exposed to light, the conduction electrons collectively oscillate at a frequency that depends on the nanoparticle's size, shape, and dielectric environment as demonstrated in figure 3. This phenomenon is called localized surface plasmon resonance (LSPR) (Khurana & Jaggi, 2021; Mayer & Hafner, 2011). LSPR results in strong absorption and scattering of light, making plasmonic nanoparticles valuable in applications like biosensing, imaging, and photothermal therapy.

2.1. Influence of size and shape

The plasmon resonance of metal nanoparticles is highly tunable. Factors influencing LSPR include:

Size: Smaller nanoparticles (~10–50 nm) typically exhibit resonance in the visible spectrum, while larger particles shift towards the infrared (Ghosh & Pal, 2007).

Shape: Spherical nanoparticles have a single resonance peak, while anisotropic structures like nanorods, nanostars, and nanocubes exhibit multiple plasmon modes (Hang, Wang, & Wu, 2024).

Composition: Alloying noble metals (e.g., Au-Ag, Au-Cu) modifies LSPR behavior (Coviello, Forrer, & Amendola, 2022).

Environment: The surrounding medium's refractive index strongly affects the resonance wavelength (Tiburski, 2022).

2.2. Historical background and development of plasmonics

Plasmonics has its roots in classical electromagnetism, dating back to the 1900s. Early observations of plasmonic effects

include (Goncalves, 2014; Maradudin, Sambles, & Barnes, 2014):

Michael Faraday (1857): Discovered colloidal gold nanoparticles and their unique optical properties.

Gustav Mie (1908): Developed Mie theory to explain light scattering by small spheres.

Surface Plasmon Research (1950s-1970s): Scientists such as Ritchie and Otto explored surface plasmons in thin metal films.

Modern Plasmonics (2000s-Present): Advances in nanofabrication and optical characterization have enabled practical applications in sensing, imaging, and computing.

3. APPLICATIONS OF PLASMONIC METAL NANOPARTICLES

Plasmonic nanoparticles have widespread applications across multiple disciplines (Chow et al., 2019; Kant et al., 2024; Tokel, Inci, & Demirci, 2014):

3.1. Biosensing and medical diagnostics

LSPR-based sensors are highly sensitive to changes in the surrounding environment, making them useful for detecting biomolecules at extremely low concentrations. Applications include:

Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS): Enhances Raman signals for molecular fingerprinting.

LSPR Biosensors: Used for label-free detection of DNA, proteins, and viruses.

Colorimetric Sensors: Nanoparticle aggregation changes color, enabling rapid diagnostics.

3.2. Photothermal Therapy and Drug Delivery

Plasmonic nanoparticles absorb light efficiently, converting it into heat. This property is exploited in (de Aberasturi, Serrano-Montes, & Liz-Marzán, 2015):

Cancer treatment: Gold nanorods and nanoshells are used for targeted photothermal therapy.

Controlled drug release: Heat-responsive nanocarriers enable site-specific drug delivery.

3.3. Energy Harvesting and Photocatalysis

Plasmonic nanoparticles enhance light absorption in solar cells and catalysis applications (de Aberasturi et al., 2015):

Plasmonic Solar Cells: Improve light trapping and charge carrier generation.

Photocatalysis: Hot electrons generated by plasmon decay drive chemical reactions.

3.4. Plasmon-Enhanced Optoelectronics

Plasmonics is transforming optical computing and communication technologies by enabling (Thraskias et al., 2018):

Plasmonic waveguides: Overcoming the diffraction limit of conventional optics.

Plasmonic LEDs and lasers: More efficient light-emitting devices.

Metamaterials and Superlenses: Enabling imaging beyond diffraction limits.

4. CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES IN PLASMONICS

Despite its immense potential, plasmonics faces several challenges:

Optical losses: Metal absorption limits efficiency.

Material stability: Silver oxidation and gold's high cost restrict practical applications.

Scalability: Mass production of uniform nanostructures remains difficult.

Integration with existing technologies: Requires compatibility with semiconductor and photonic devices.

Future Directions; To overcome these challenges, researchers are exploring:

Alternative plasmonic materials: Doped oxides, graphene, and transition metal nitrides.

Hybrid plasmonic-photonic devices: Combining plasmonics with silicon photonics.

Quantum plasmonics: Harnessing single-photon interactions for quantum computing.

5. CONCLUSION

Plasmonics and metal nanoparticles have revolutionized nanotechnology by enabling unprecedented control over light-matter interactions at the nanoscale. Their unique optical properties have fueled advancements in sensing, imaging, energy, and biomedicine. While challenges remain, ongoing research in alternative plasmonic materials, hybrid nanostructures, and integration with emerging technologies continues to push the boundaries of what is possible. As plasmonics evolves, it is

poised to play a pivotal role in future scientific and technological innovations, bridging the gap between nanophotonics and practical applications.

REFERENCES

- Alabastri, A., Tuccio, S., Giugni, A., Toma, A., Liberale, C., Das, G., . . . Zaccaria, R. P. (2013). Molding of plasmonic resonances in metallic nanostructures: Dependence of the non-linear electric permittivity on system size and temperature. *Materials*, 6(11), 4879-4910.
- Andr  n, D. (2018). *Optical manipulation and heating of gold nanoparticles near interfaces*. Universidade Tecnica de Lisboa (Portugal),
- Atwater, H. A. (2007). The promise of plasmonics. *Scientific American*, 296(4), 56-63.
- Butt, M. A. (2025). Surface Plasmon Resonance-Based Biodetection Systems: Principles, Progress and Applications—A Comprehensive Review. *Biosensors*, 15(1), 35.
- Chow, T. H., Li, N., Bai, X., Zhuo, X., Shao, L., & Wang, J. (2019). Gold nanobipyramids: an emerging and versatile type of plasmonic nanoparticles. *Accounts of chemical research*, 52(8), 2136-2146.
- Cortie, M. B., Arnold, M. D., & Keast, V. J. (2020). The quest for zero loss: unconventional materials for plasmonics. *Advanced Materials*, 32(18), 1904532.
- Coviello, V., Forrer, D., & Amendola, V. (2022). Recent developments in plasmonic alloy nanoparticles: synthesis, modelling, properties and applications. *ChemPhysChem*, 23(21), e202200136.
- de Aberasturi, D. J., Serrano-Montes, A. B., & Liz-Marz  n, L. M. (2015). Modern applications of plasmonic nanoparticles: from energy to health. *Advanced Optical Materials*, 3(5), 602-617.

- Ghosh, S. K., & Pal, T. (2007). Interparticle coupling effect on the surface plasmon resonance of gold nanoparticles: from theory to applications. *Chemical reviews*, 107(11), 4797-4862.
- Goncalves, M. R. (2014). Plasmonic nanoparticles: fabrication, simulation and experiments. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(21), 213001.
- Hang, Y., Wang, A., & Wu, N. (2024). Plasmonic silver and gold nanoparticles: shape-and structure-modulated plasmonic functionality for point-of-caring sensing, bio-imaging and medical therapy. *Chemical Society Reviews*, 53(6), 2932-2971.
- Hartland, G. V. (2011). Optical studies of dynamics in noble metal nanostructures. *Chemical reviews*, 111(6), 3858-3887.
- Jana, J., Ganguly, M., & Pal, T. (2016). Enlightening surface plasmon resonance effect of metal nanoparticles for practical spectroscopic application. *RSC advances*, 6(89), 86174-86211.
- Kant, K., Beeram, R., Cabaleiro, L. G., Cao, Y., Quesada-González, D., Guo, H., . . . García-Lojo, D. (2024). Roadmap for Plasmonic Nanoparticle sensors: current progress, challenges and Future prospects. *Nanoscale horizons*.
- Kheirandish, A., Sepehri Javan, N., & Mohammadzadeh, H. (2020). Modified Drude model for small gold nanoparticles surface plasmon resonance based on the role of classical confinement. *Scientific reports*, 10(1), 6517.
- Khurana, K., & Jaggi, N. (2021). Localized surface plasmonic properties of Au and Ag nanoparticles for sensors: A review. *Plasmonics*, 16(4), 981-999.

- Kumari, A., Yadav, A., Singh, O., & Sharan, P. (2024). A review of surface plasmon resonance (SPR) technology in biosensing: innovations, applications and future trends. *Journal of Optics*, 1-9.
- Kvítek, O., Siegel, J., Hnatowicz, V., & Švorčík, V. (2013). Noble metal nanostructures influence of structure and environment on their optical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2013(1), 743684.
- Maier, S. A., & Atwater, H. A. (2005). Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures. *Journal of applied physics*, 98(1).
- Maradudin, A. A., Sambles, J. R., & Barnes, W. L. (2014). *Modern plasmonics* (Vol. 4): Elsevier.
- Mayer, K. M., & Hafner, J. H. (2011). Localized surface plasmon resonance sensors. *Chemical reviews*, 111(6), 3828-3857.
- Naik, G. V., Shalaev, V. M., & Boltasseva, A. (2013). Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver. *Advanced materials*, 25(24), 3264-3294.
- Philip, A., & Kumar, A. R. (2022). The performance enhancement of surface plasmon resonance optical sensors using nanomaterials: A review. *Coordination Chemistry Reviews*, 458, 214424.
- Piliarik, M., & Homola, J. (2009). Surface plasmon resonance (SPR) sensors: approaching their limits? *Optics express*, 17(19), 16505-16517.
- Ravindran, N., Kumar, S., S, R., CA, M., Thirunavookarasu S, N., & CK, S. (2023). Recent advances in Surface Plasmon Resonance (SPR) biosensors for food analysis: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(8), 1055-1077.

- Thraskias, C. A., Lallas, E. N., Neumann, N., Schares, L., Offrein, B. J., Henker, R., . . . Tomkos, I. (2018). Survey of photonic and plasmonic interconnect technologies for intra-datacenter and high-performance computing communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 2758-2783.
- Tiburski, C. (2022). *Alloy Plasmonics-Fundamentals and Applications*: Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).
- Tokel, O., Inci, F., & Demirci, U. (2014). Advances in plasmonic technologies for point of care applications. *Chemical reviews*, 114(11), 5728-5752.
- Wang, L., Hasanzadeh Kafshgari, M., & Meunier, M. (2020). Optical properties and applications of plasmonic-metal nanoparticles. *Advanced Functional Materials*, 30(51), 2005400.
- Wilson, A. M., Mazzaferri, J., Bergeron, E., Patskovsky, S., Marcoux-Valiquette, P., Costantino, S., . . . Meunier, M. (2018). In vivo laser-mediated retinal ganglion cell optoporation using KV1. 1 conjugated gold nanoparticles. *Nano letters*, 18(11), 6981-6988.
- Zada, A., Muhammad, P., Ahmad, W., Hussain, Z., Ali, S., Khan, M., . . . Maqbool, M. (2020). Surface plasmonic-assisted photocatalysis and optoelectronic devices with noble metal nanocrystals: design, synthesis, and applications. *Advanced Functional Materials*, 30(7), 1906744.
- Zhang, J., Zhang, L., & Xu, W. (2012). Surface plasmon polaritons: physics and applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(11), 113001.

FİZİK KONULARI

yaz
yayınları

YAZ Yayınları

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar / AFYONKARAHİSAR

Tel : (0 531) 880 92 99

yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com