

Fizik Uygulamalarında Güncel Konular

Editör
Özgül KARATAŞ

BİDGE Yayınları

Fizik Uygulamalarında Güncel Konular

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Özgül KARATAŞ

ISBN: 978-625-372-204-3

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.06.2024

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Fizik; doğa olayları ve evrenin yapısını açıklamada deneylere, ölçümlere, matematiksel hesaplamalara dayanan ve diğer birçok disiplinle içi içe olan çok yönlü bir bilim dalıdır.

Bu kitapta, fizik bilimin farklı alt dallarını içeren bilimsel nitelikli uygulamalar günümüz teknolojisiyle ilişkilendirilip araştırma yöntemleri ve sonuçları ile birlikte anlatılmaktadır. Kitabı oluşturan bölümlerde yer alan bilimsel konular literatür taraması ile desteklenmiş, çalışma ile ilgili temel kavramlar ise son derece basit, kolay ve anlaşılır bir şekilde ele alınmıştır. Böylece, alanında araştırmaya yeni başlayan birinin bilgiye doğru, kolay ve anlaşılır bir şekilde ulaşması hedeflenmiştir.

Kitabın okuyucularına yararlı olması dileğiyle...

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Özgül KARATAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	3
İÇİNDEKİLER	4
Isı Transferi Analizi: Abaqus ve Comsol Multiphysics ile İnceleme	5
Gülcan AYDIN.....	5
Gaz Sensörleri.....	38
Tuba ÇAYIR TAŞDEMİRCİ	38
Medikal Ve Biyosensör Uygulamaları Açısından MoS ₂ 'nin Yeri..	63
Hamit ÖZTÜRK.....	63
MoS ₂ Tabanlı İnce Film Yarıiletken Zehirli Gaz Sensörleri	80
Hamit ÖZTÜRK.....	80
Manyetik Rezonans Spektroskopisi	96
Ayşe MARAŞLI.....	96
Özgül KARATAŞ	96

BÖLÜM I

Isı Transferi Analizi: Abaqus ve Comsol Multiphysics ile İnceleme

Gülcan AYDIN¹

1. Giriş

Isı transferi, birçok mühendislik disiplininde kritik bir rol oynayan temel bir kavramdır. Enerjinin aktarılması, depolanması ve dönüştürülmesi üzerine çalışan mühendisler ve bilim insanları, çeşitli uygulamalarda bu önemli fiziksel olgu ile karşılaşır. Isı transferinin anlaşılması, günlük yaşamda kullanılan cihazların tasarımından endüstriyel süreçlerin analizine kadar geniş bir mühendislik yelpazesinde hayati önem taşır.

Isı, sıcaklık farklarından kaynaklanan bir enerji türüdür (Yeşilata, 2007) ve bir sistemden diğerine aktarılabilmesi için bir sıcaklık gradyanı gerektirir. Bu gradyanlar, ısı transferinin temel itici gücünü oluşturur.

¹Kocaeli Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Kocaeli/Türkiye, Orcid: No:0000-0003-4627-961X, gulcan.aydin@kocaeli.edu.tr

Isı transferi, elektrikli ısıtıcılar ve soğutucular gibi ev cihazlarında, enerji üretim ve taşıma sistemlerinde ve kimyasal süreçlerin analizinde önemli bir rol oynar. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında, güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri gibi teknolojilerin verimliliğini artırmak için ısı transferi prensipleri uygulanır. Ayrıca, meteorolojik uygulamalarda da sıcaklık değişimlerini anlamak ve tahmin etmek için ısı transferi kavramları kullanılır (Yeşilata, 2007).

Bilgisayarlar ve elektronik cihazlar, yüksek işlem gücü nedeniyle yoğun ısı üretirler. Bu cihazların soğutulması ve aşırı ısınmalarının önlenmesi için ısı transferi prensipleri büyük önem taşır. Soğutma çözümleri, elektronik cihazların dayanıklılığını ve performansını artırır (Yeşilata, 2007).

Isı transferi, enerji her zaman yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru aktığı için, bu temel prensip etrafında çalışır ve iletim, taşınım ve ışıyım olmak üzere üç ana mekanizma ile gerçekleşir (Yeşilata, 2007; Yakut & ark., 2022).

İletim (Conduction): Sıcaklık farkından kaynaklanan ısı, sabit malzemeler arasında moleküllerin hareketiyle aktarılır. Katılarda moleküllerin titreşimi ve serbest elektronlar aracılığıyla, sıvı ve gazlarda ise moleküllerin rastgele hareketleri ile gerçekleşir. İletim, Fourier Yasası ile tanımlanır.

İletimle ısı transferi için bir maddeye veya ortama ihtiyaç vardır ve ortamın durağan olması gerekir (Yeşilata, 2007; Cengel, 2008; Yakut & ark., 2022). Bir ortamdaki ısı iletim hızı, ortam boyunca sıcaklık farkına, ortamın geometrisine, kalınlığına ve malzemesine bağlıdır.

Taşınım (Convection): Taşınım, enerjinin katı bir yüzeyden hareketli bir sıvıya veya gaz ortamına transfer edilmesini ifade eder. Zorlanmış taşınım ve doğal taşınım olmak üzere iki türü vardır.

Zorlanmış taşınım, bir akışkanın hareketini sağlamak için ekstra enerji harcanarak gerçekleşen bir süreçtir. Bu süreçte, fanlar, rüzgâr türbinleri, pompalar ve diğer mekanik cihazlar kullanılır (Yeşilata,2007; Cengel, 2008). Örneğin, bir hava soğutma sistemi, içerideki sıcak hava tüneline fanlar aracılığıyla zorlanmış taşınımı kullanarak ısıyı dışarıya taşır. Bu tür taşınım, ısı transferini kontrol etmek ve hızlandırmak için mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılır.

Doğal taşınım ise akışkanın içindeki yoğunluk farklarından kaynaklanan kaldırma kuvveti nedeniyle ortaya çıkan bir süreçtir (Yeşilata, 2007; Cengel, 2008). Isıtılmış bir sıvı veya gaz, yoğunluğu azalır ve yükselirken, soğuyan bir sıvı veya gaz yoğunlaşır ve aşağı doğru iner. Bu süreç, ısının doğal bir şekilde taşınmasını sağlar. Örneğin, sıcak hava balonlarının yükselmesi doğal taşınımın bir sonucudur. Aynı prensip, bir odayı ısıtmak veya soğutmak için kullanılan radyatörlerde de işler.

Taşınım, ısı transferini hızlandıran ve kontrol eden bir mekanizma olarak büyük bir öneme sahiptir. Aynı zamanda doğal olaylarda da yaygın olarak görülür. Örneğin, okyanus akıntıları ve hava kütleleri, dünya çapındaki iklim sistemlerinde taşınımın etkisi altında şekillenir. Bu nedenle, taşınımın anlaşılması ve analizi, sıcaklık dağılımı, iklim değişiklikleri ve birçok mühendislik tasarımı açısından kritik bir öneme sahiptir.

Taşınım, Newton'un Soğuma Kanunu ile elde edilir (Yeşilata, 2007) ve ısı transfer hızının yüzey ile çevre sıcaklığı arasındaki farka bağlı olduğunu ifade eder.

Taşınımın ısı transfer katsayısı viskozitesine, ısı iletim katsayısına, yoğunluğuna, ısı kapasitesine, hızına, akışkanın doğal özelliklerine ve yüzey geometrisine bağlıdır. Örneğin, viskoz bir sıvı, ısıyı daha yavaş iletebilir ve bu, ısı transfer katsayısını etkiler. Aynı şekilde, akışkanın hızı arttıkça, taşınımın hızı da artar (Cengel, 2008).

Işınım (Radiation): Isı, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla aktarılır ve bir ortama ihtiyaç duymadan boşlukta yayılabilir. Stefan-Boltzmann Yasası, bir cismin sıcaklığının dördüncü kuvveti ile doğru orantılı olarak yayılan ısı miktarını belirler.

Güneşin dünyayı ısıtması, ısıtımın en belirgin örneklerindendir. Endüstriyel uygulamalarda, fırınların yiyecekleri pişirmesi ve termal görüntüleme cihazları gibi teknolojilerde de ısıtımın önemi büyüktür (Yeşilata, 2007; Cengel, 2008).

Son yıllarda, mühendislik analizlerinde sonlu elemanlar metodu (FEM) yaygınlaşmıştır. Bu yazılımlar, karmaşık sistemlerin modellenmesi, sınır koşullarının incelenmesi, parametrik analizler ve hızlı prototipleme gibi avantajlar sunar. Bu çalışma, mühendislik öğrencileri ve profesyonellerinin ısı transferi konusundaki bilgi ve uygulama becerilerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. ABAQUS ve COMSOL Multiphysics yazılımlarını kullanarak çözülen örnek problemler, ısı transferi alanındaki bilgilerin pekiştirilmesine ve uygulamalı deneyim kazandırılmasına yardımcı olacaktır.

2. Yöntem

Bu çalışmada, temel ısı transfer mekanizma problemlerini SIMULIA Abaqus Student Edition ve COMSOL Multiphysics deneme sürümü (Lisans No:17078861) kullanılarak modellenmesi amaçlanmaktadır. Önce problemler teorik olarak çözüldü, ardından bu yazılımlar kullanılarak modelleme yapıldı. Abaqus yazılımı ile sıcaklık dağılım sonuçları incelendi. Ayrıca, COMSOL Multiphysics yazılımıyla ısı akısı hesaplandı ve sıcaklık dağılımları detaylı olarak incelendi.

2.1 Sonlu elemanlar metodu

Sonlu Elemanlar Yöntemi veya İngilizce adıyla Finite Element Method (FEM), karmaşık mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılan sayısal bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, yapıları veya malzemeleri çok sayıda sonlu küçük elemanlara bölerek, her bir elemanın davranışını matematiksel olarak modellemeye dayanır. FEM, bilgisayar destekli mühendislik ve tasarımın ayrılmaz bir parçasıdır ve birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılır.

FEM'in doğru uygulanması, karmaşık yapıların ve malzemelerin davranışını analiz etmek için önemlidir. Bu yöntem, yapıların geometrisini, malzeme özelliklerini ve sınır koşullarını dikkate alarak detaylı analizler yapma fırsatı sunar. Elemanlar genellikle bir, iki veya üç boyutlu olabilir ve seçimleri analiz edilen sistemin özelliklerine bağlıdır. Örneğin, basit sistemler için bir boyutlu elemanlar yeterli olabilirken, daha karmaşık yapılar için iki veya üç boyutlu elemanlar tercih edilebilir (Günay, 1993).

Sonlu elemanlar yönteminin temel ilkeleri ve işleyişi şu şekildedir:

Problem Tanımı: Problemin geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır koşulları belirlenir.

Bölme İşlemi: Problem alanı, küçük elemanlara bölünür. Isı transferi problemlerinde genellikle üçgen veya dörtgen elemanlar kullanılır.

Matematiksel Modelleme: Her eleman için ısı transferini tanımlayan matematiksel denklemler oluşturulur. Malzeme özellikleri (ısı iletim katasayı, ısı kapasite, vb.) elemanın davranışını tanımlar. Bu denklemler, ısı akışını ve sıcaklık dağılımını hesaplar.

Denklem Sistemi Oluşturma: Tüm elemanların denklemleri birleştirilerek sistematik bir denklem sistemi oluşturulur.

Sınır Koşulları ve Yükler: Problemin sınır koşulları ve yükleri sisteme eklenir. Yükler, sisteme uygulanan ısı kaynaklarını veya sıcaklık sınırlarını temsil eder.

Çözüm: Denklemler sayısal olarak çözülerek her elemanın sıcaklık dağılımı ve ısı transferi hesaplanır.

Sonuçlar ve Analiz: Sonuçlar, sıcaklık dağılımı, ısı akışı ve diğer önemli parametreleri içerir. Bu sonuçlar, problemin analizini ve yorumlanmasını sağlar.

Doğrulama ve İyileştirme: Sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanır. Ayrıca, modelin performansını artırmak için parametreler ve eleman sayısı gibi faktörler ayarlanabilir.

FEM, ısı transferi problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılır. İletim, taşınım ve ışıınım gibi ısı transferi mekanizmaları FEM ile modellenenebilir. Bu yöntem, mühendislerin karmaşık sıcaklık dağılımlarını, malzeme performansını ve enerji transferini incelemelerine yardımcı olur ve tasarım süreçlerini optimize etmelerine olanak tanır.

2.1.1 ABAQUS yazılımı

Abaqus, mühendislik ve bilimsel simülasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir endüstri standardı simülasyon yazılımıdır. Yapısal analiz, ısı iletimi, akışkan dinamiği, elektromanyetik simülasyonlar ve darbe dinamiği gibi birçok mühendislik disiplinde kullanılır.

Yazılım hem arayüz hem de komut satırı üzerinden problem modelleme ve çözüm imkânı sunar. Basit problemlerde, koordinatları ve sınır şartları belirli olduğunda, komutları kullanarak analiz yapılabilir. Karmaşık geometriler ve sınır koşulları için ise arayüz kullanılarak problemin modellenmesi ve analizi gerçekleştirilmelidir (Can & Kaya, 2007).

Arayüz üç bölümden oluşur: model ağacı, çizim alanı ve komut paneli. Model ağacı analiz adımlarını, çizim alanı parça geometrisini ve komut paneli analiz sürecindeki etkileşimleri gösterir (Can & Kaya, 2007). Abaqus'un birim sistemi olmadığından, birim dönüşümlerine dikkat edilmelidir.

ABAQUS ile Isı Transferi Çalışmaları:

Piekarska ve Kubiak (2010): Lazer ışını ısınması sırasında termal olayların sayısal analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma, lazer ışını ısı kaynağı güç dağılımının sıcaklık alanı üzerindeki

etkisini analiz etmek için sayısal modeller kullanmıştır. Sonuçlar, lazer ışını etkisi altındaki yüzeylerin termal davranışını açıklamıştır. (Piekarska & Kubiak, 2010).

Coskun ve ark. (2015): Cıvatalı birleşimlerde geçici iletken ısı transferi, bitişik yüzeyler arasındaki boşluk iletkenliği tanımlanarak Abaqus/CAE ile modellenmiştir. Termal temas direncini tahmin etmek için iki korelasyon kullanılmıştır ve cıvata ön yükünün ve dolayısıyla basınç dağılımının ısı transferi ve sıcaklık dağılımına etkisi araştırılmıştır (Coskun & ark., 2015).

Hashim ve ark. (2021): Tuğlaların termal davranışını incelemişlerdir. Bu çalışma, ABAQUS sonlu elemanlar yaklaşımı yazılımı kullanılarak farklı konfigürasyonlar ve koşullar altında tuğlaların simülasyonunu içermiştir. Çalışmanın sonuçları, tuğla tasarımının, diğer benzer çalışmalara kıyasla ısı iletiminin önemli derecede azaldığını açıklamaktadır. Bu, tuğlaların belirli konfigürasyonları altında ısıyı daha iyi yalıtıldığını ve istenilen termal izolasyon özelliklerini sağladığını göstermektedir. Özellikle, içi boş tuğlaların yalıtım poliüretan köpüğü (PUF) ile doldurulması ve bu sonucun havalı içi boş tuğlalarla karşılaştırılması, PUF kullanımının ısı yalıtımında belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, PUF'un, tuğlaların içindeki hava boşluğunda taşınım ve ışıınım yoluyla ısı transferini dikkate alarak, termal izolasyon performansını artırdığını göstermektedir. Bu çalışma, tuğla yapılarının termal özelliklerini anlamak ve geliştirmek için bir adım olmuştur. Bu tür araştırmalar, inşaat endüstrisi ve izolasyon uygulamaları için önemli rehberlik sağlayabilir (Hashim & ark., 2021).

Kolev ve Kadirova (2022): Bir "su-hava" konvektörünün borularının iç yüzeyi ile su akışı arasındaki ısı transferini modellemişlerdir. Sayısal modellemenin bir parçası olan CFD (Computational Fluid Dynamics) simülasyonlarını uygulamak için ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Boru içinden akan sıvıdaki sıcaklık, basınç ve hızın dağılımı incelenmiştir. Sıcaklık dağılımının incelenmesinin sonuçları, borunun belirli yerel hidrolik dirençlere sahip bölgelerinde ısı transferinin azaldığını göstermektedir (Kolev & Kadirova, 2022).

Assad ve ark. (2022): Donatılı beton duvarların yangın maruziyeti altındaki ısı transferi analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, iki donatılı beton duvarın ısı transferi özellikleri incelenmiş ve sonuçları karşılaştırmak amacıyla sonlu eleman modelleme yazılımları olan ABAQUS ve ANSYS kullanılarak üç boyutlu bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada, termal analiz simülasyon sonuçlarıyla kesitsel sıcaklık dağılımı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu inceleme, her iki duvarın farklı yangın maruziyeti altında nasıl davrandığını ve ısıyı nasıl ilettiğini anlamak için yapılmıştır. İki farklı yazılım aracılığıyla oluşturulan sonlu eleman modellerinin, tahmin edilen sıcaklık dağılımının doğrulanması için yayınlanmış deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bu tür karşılaştırmalar, yapı malzemelerinin yangın maruziyeti altındaki termal davranışlarını anlamak ve doğrulamak için önemlidir (Assad & ark., 2022).

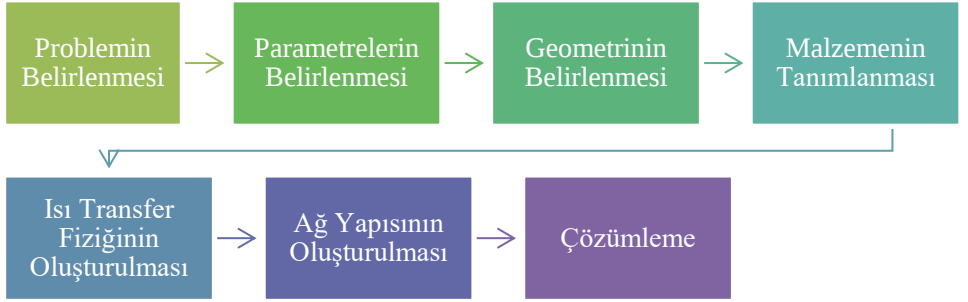
Nguyen ve Kohno (2023): Çelik bir kirişin ISO 834 standart yangın koşulları altında sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. Çalışmada, Abaqus benzetim modelinin güvenilirliğini artırmak amacıyla, yangın koruması kapağı ile çelik kiriş arasındaki boşlukta

taşınıml sũrecini simũle etmek için Fire Dinamik Simulator (FDS) kullanılmıştır. Araştırma, koruma kapağındaki hasarın çeliğe olan etkilerini değerlendirmekte ve yangın korumasının ne şekilde davrandığı konusunda bilgi sağlamaktadır. Çalışmanın bulguları, Abaqus'un, FDS gibi ısı taşınımlını hesaba katmadan yapılan sıcaklık tahminlerine gũre elik kirişin sıcaklık tahminini daha doğru bir şekilde gerçekleştirdiğini gũstermektedir. Bu tũr araştırmalar, yapısal mũhendislik ve yangın gũvenlięi açısından ũnemli olup, yapılar da kullanılan malzemelerin yangın koşullarında davranışlarını anlamak ve yapısal bũtũnlũęũ korumak için faydalı bir kaynak teşkil etmektedir (Nguyen & Kohno, 2023).

2.1.2 COMSOL Multiphysics yazılımı

COMSOL Multiphysics, çeşitli fiziksel alanlardaki problemlerin ũzũmũ için kullanılan bir simũlasyon yazılımıdır. Temel olarak sonlu elemanlar yũntemine dayanır ve elektrik, manyetizma, mekanik, akışkanlar dinamiği, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonlar gibi birçok farklı fiziksel alanın etkileşimini modellemek için kullanılır.

COMSOL Multiphysics, karmaşık problemleri ũzmek için geniş bir fizik kũtũphanesine sahiptir ve kullanıcıların kendi uezel modellerini oluşturmasına olanak tanır. Bu, mũhendislik, fizik, malzeme bilimi, biyomedikal ve diğer disiplinlerde birçok farklı alanda kullanılmasını sağlar. Bu eşitlilik, kullanıcıların problemlerini daha gerçekçi ve kapsamlı bir şekilde modellemelerine olanak tanır.



Şekil 1: COMSOL Multiphysics ile problemin belirlenmesinden çözümüne kadar tanımlanan süreçler verilmiştir

Isı Transfer Problemlerinde COMSOL Multiphysics Uygulamaları:

Gerlich ve Diğerleri (2013): Gerlich ve ekibinin çalışması, bina ısı transferi hesaplamalarını COMSOL Multiphysics kullanarak doğrulamıştır. Bu çalışma, Uluslararası Enerji Ajansı Görev 34'teki analitik modellemeye dayalı doğrulamalarla gerçek bina segmenti ölçümlerini karşılaştırarak yapılmıştır (Gerlich & ark., 2013).

Erdoğan ve Diğerleri (2018): Gövde-boru tipi bir ısı değiştiriciyi COMSOL Multiphysics programında ısı transferi ve akışkanlar mekaniği fizikleri kullanılarak modellenmiştir (Erdoğan & ark., 2018).

Vajdi ve Diğerleri (2020): İleri seramiklerdeki ısı transferinin önemini ve COMSOL Multiphysics kullanılarak yapılan sayısal araştırmaların kapsamlı bir incelemesi sunulmuştur (Vajdi & ark., 2020).

Steiner (2022): Yüksek sıcaklıkta sabit durum deneylerini ve ışınlama ısı geişı çalışmalarını incelemiştir. Farklı ışınlama ısı geişı yayma ortamlarını karşılaştırmak için COMSOL ve ANSYS Mechanical yazılımlarını kullanmıştır. Bu alışma, ısı ışınlama konusunda COMSOL ve ANSYS yazılımlarının performansını karşılaştırmak adına önemli bir katkı sağlamıştır (Steiner, 2022).

Shi ve ark. (2022): COMSOL kullanarak toprak ısı transferinin kısmi diferansiyel denklemlerini oluşturmuştur. Bu alışma, SVE teknolojisi ve toprak sıcaklık değişimleri arasındaki ilişkiyi anlamak ve ısıtma kuyularının en uygun konumunu belirlemek için değerli bir adım sunmaktadır (Shi & ark., 2022).

Bu literatür incelemesi hem ABAQUS hem de COMSOL Multiphysics yazılımlarının ısı transfer problemlerinin mndeki önemini vurgulamaktadır. Abaqus, yüzey ve hacimsel ısı kaynaklarının modellenmesi, farklı malzeme birleşimlerinin termal davranışının incelenmesi, cıvatalı birleşimlerdeki termal temasın belirlenmesi, tuğlaların ısı yalıtım özelliklerinin değerlendirilmesi ve yangın durumlarında yapısal davranışın anlaşılmasında etkili bir araçtır. Bu incelemeler, Abaqus'un endüstriyel uygulamalardan yapısal mühendisliğe, malzeme biliminden yangın güvenliğine kadar geniş bir yelpazede kullanılabildiğini göstermektedir.

COMSOL Multiphysics yazılımıyla gerçekleştirilen araştırmalar, bina ısı transferi, ısı ışınlama, toprak ısı transferi ve ısıtma kuyularının optimizasyonu gibi farklı alanlarda önemli katkılarda bulunmuştur. COMSOL, yapısal analizlerde ve endüstriyel uygulamalarda termal performansın değerlendirilmesi ve geliştirilmesi için değerli bir araçtır.

2.2 Isı transfer problem analizleri

2.2.1 Isı transfer iletim hesabı

Problem 1: 30 cm kalınlığında ve 50W/mK ısı iletim katsayısına sahip 5mx6m bir levhanın ön ve arka yüzeyleri sırasıyla 100° C ve 20° C sıcaklıklarda tutulur. Levhadan geçen ısı transfer hızını W cinsinden belirleyin.

Bu ısı transfer işlemi iletimden oluşur. Fourier ısı iletimi kanunu, iletimle ısı transferini çözmek için uygulanır.

Teorik Yöntem Çözümleri:

Veriler:

$$k = 50W/mK$$

$$T_1 = 293.15K$$

$$T_2 = 373.15K$$

$$A = 30m^2; L = 0.3m$$

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} = -kA \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = \left(\frac{50W}{m * K} \right) (30m^2) \frac{(373.15K - 293.15K)}{0.3 m} = 400kW \quad (2)$$

Elde edilen ısı transfer hızı değeri, levhanın ön ve arka yüzeyleri arasındaki ısı iletimini temsil eder. Bu değeri daha iyi anlamak için sıcaklık farkını artırarak veya azaltarak nasıl değiştiği incelenebilir.

Bu bölümde, Abaqus yazılımını kullanarak ısı iletim analizi yapmak için izlenmesi gereken adımlar detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

Parça Modülü: Analiz için gerekli geometri, "Create Part" seçilerek oluşturulur. Burada, 3 boyutlu deforme olabilen bir katı şekil seçilir ve ekstrüze tipi bir parça tanımlanır. Kullanıcı, parçanın boyutlarını ve ekstrüzyon derinliğini belirler. Şekil 2’de gösterilmiştir.

Property Modülü: "Create Material" seçilerek malzeme davranışı, ısı iletim katsayısı gibi termal özellikler tanımlanır. Ardından, parça için kesit oluşturulur ve bu kesit parçaya atanır. Şekil 3’te gösterilmiştir.

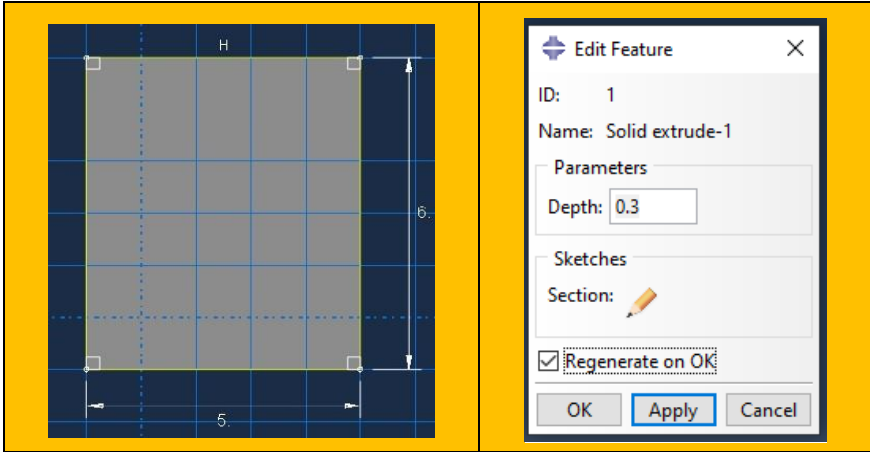
Montaj Modülü: "Create instance" seçeneğiyle parça bağımlı olarak montaj sayfasına aktarılır. Şekil 4’te gösterilmiştir.

Step Modülü: "Create step" ile ısı transferi tipi seçilir ve yanıt bölümü "Steady-State" olarak belirlenir.

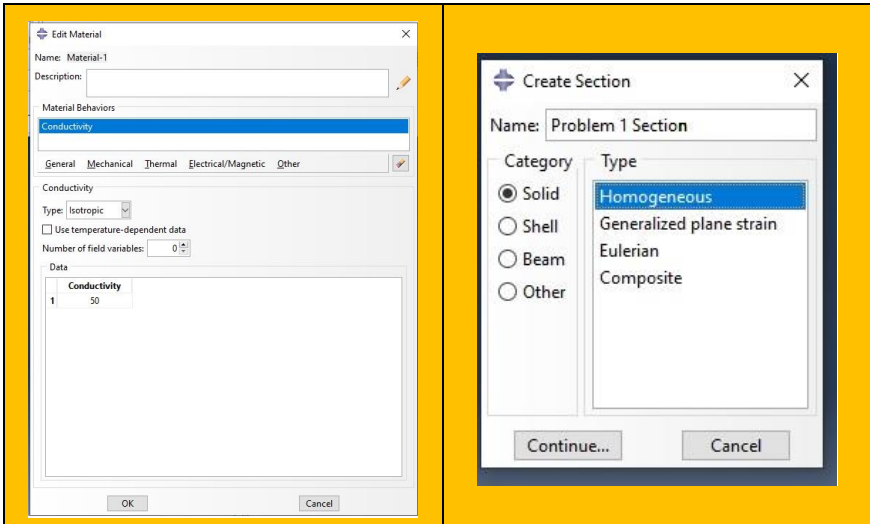
Yük (Load) Modülü: Sınır koşulları tanımlanır. Levhanın ön ve arka yüzey sıcaklıkları, iki ayrı sınır koşulu olarak belirlenir. Şekil 5’te gösterilmiştir.

Ağ Yapısı (Mesh) Modülü: Parçanın ağ yapısı ve büyüklüğü belirlenir.

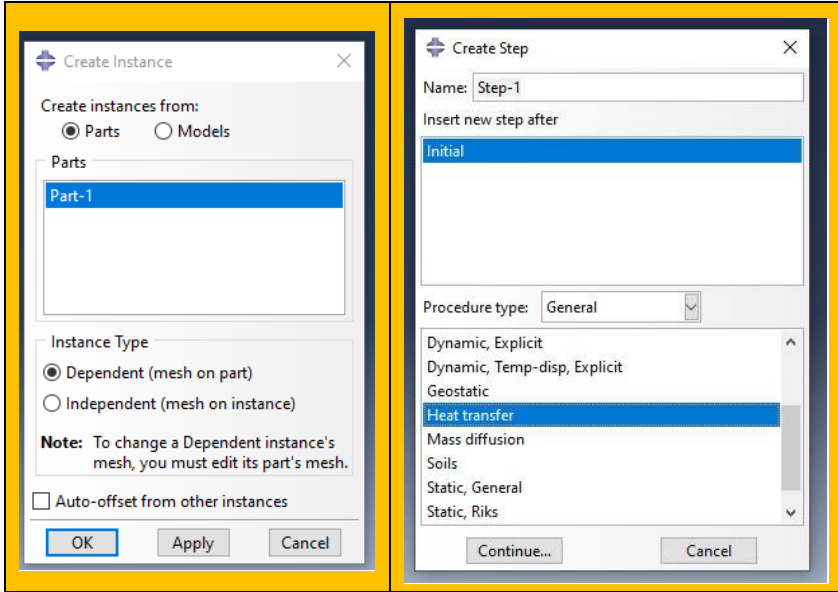
Job Modülü: Analiz işlemi başlatılır. Şekil 6’da gösterilmiştir.



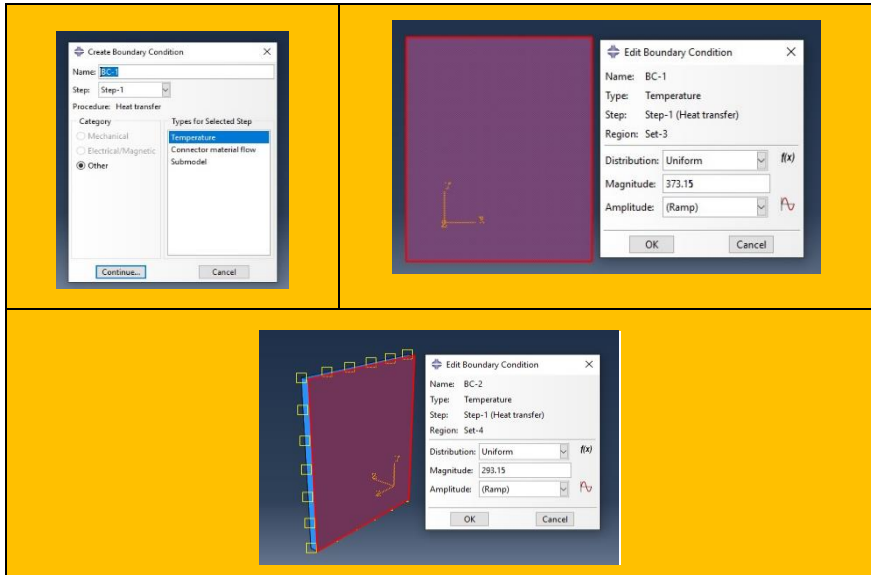
Şekil 2: Parça (Part) modülünde geometri boyutları ve derinlik bilgisi girilerek parça oluşturulmuştur



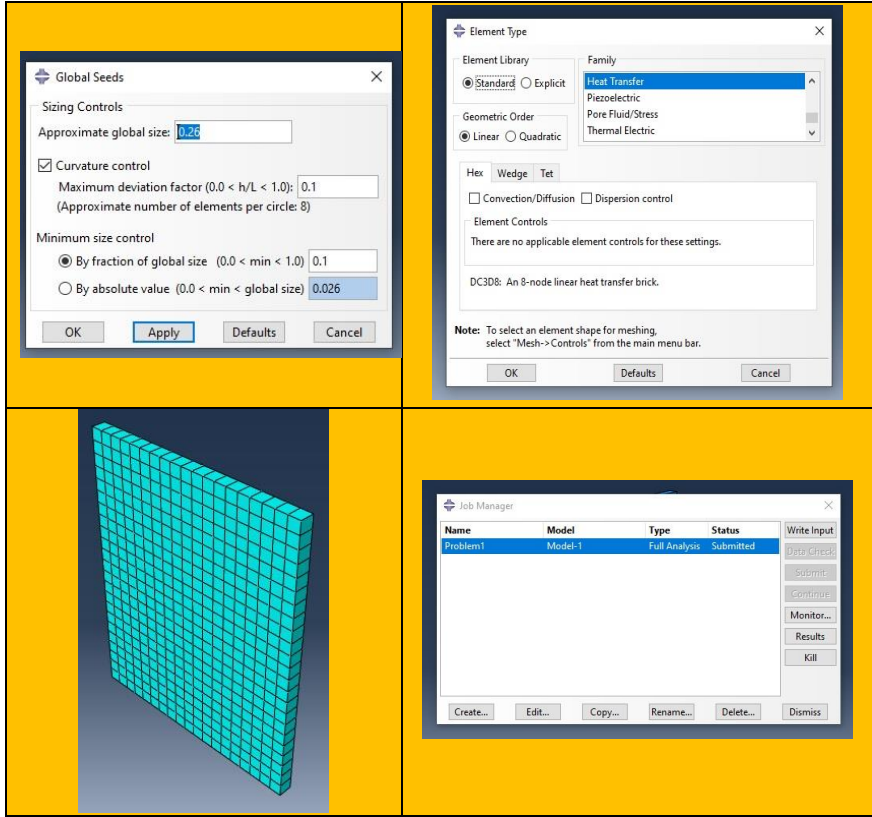
Şekil 3: Parçaya atanacak malzeme özellikleri tanımlanmış ve malzemenin kesiti oluşturulmuştur



Şekil 4: Parçanın montaj (instance) ve step modüllerindeki işlemler adımları gösterilmiştir



Şekil 5: Yük (load) modülünde sınır koşulları tanımlanmıştır



Şekil 6: Ağ yapısı tanımlanmıştır

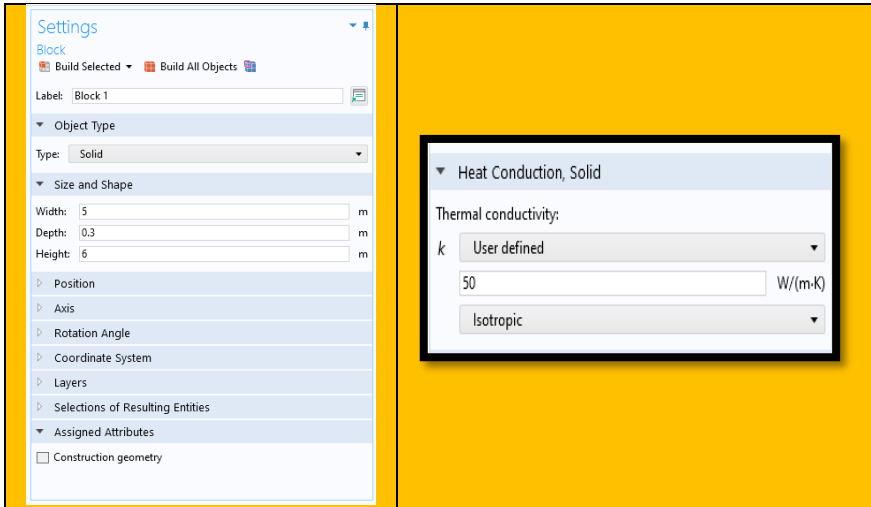
Bu bölümde, COMSOL Multiphysics yazılımını kullanarak bir ısı iletim modeli oluşturmak için izlenmesi gereken adımlar aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır:

Geometri Modülü: Şekil 7’de görüldüğü gibi bir blok eklenerek genişliği 5 metre, derinliği 0,3 metre ve yüksekliği 6 metre olarak tanımlanır.

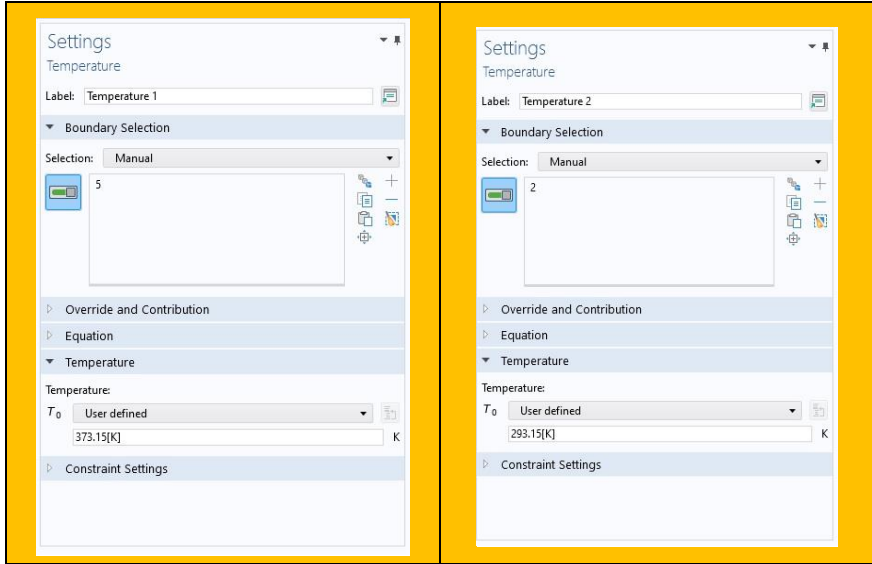
Malzeme Tanımı: Malzemenin ısı iletim katsayısını tanımlamak için kullanıcı tarafından gerekli fiziksel büyüklük girilir.

Sınır Koşulları: Levhanın ön yüzey sıcaklığı 373.15K, arka yüzey sıcaklığı ise 293.15K olacak şekilde iki sıcaklık sınır koşulları tanımlanır. Şekil 8’de gösterilmiştir.

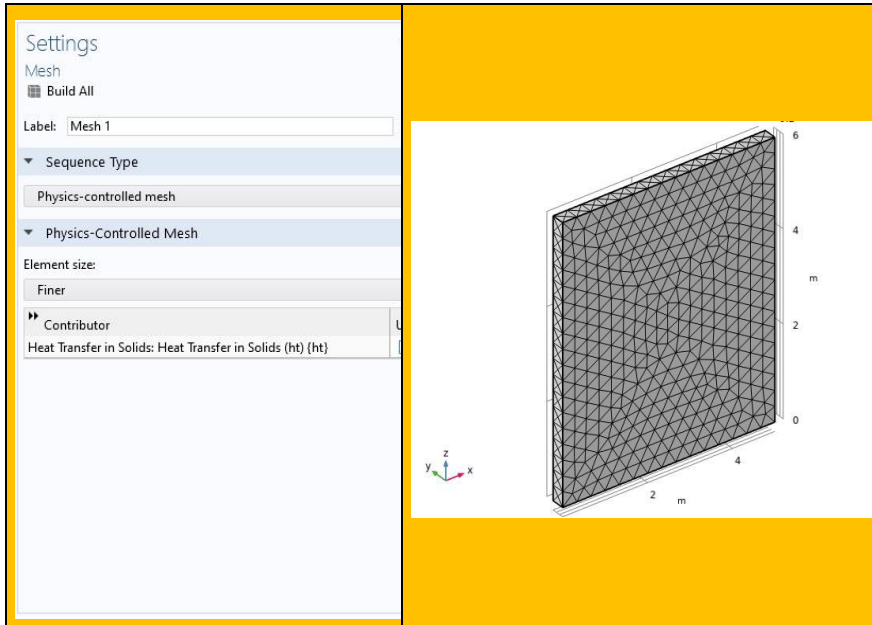
Ağ Oluşturma: Mesh modülünden ağ yapısı oluşturulur ve modelin hesaplanması başlatılır. Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 7: Geometri oluşturma ve malzeme özelliklerinin oluşturulması gösterilmiştir



Şekil 8: Sınır koşulları tanımlanmıştır



Şekil 9: Ağ yapısı parçaya atanmıştır

2.2.2 Isı ışıınım hesabı

Problem 2: 10°C sıcaklığa sahip bir odada çelikten oluşan düz bir plaka düşünelim. Bu plakanın bir sıcaklığı ve yüzey alanı sırasıyla 30°C ve 1,4 m² olsun. Bu plaka ile odanın içindeki sabit sıcaklığa sahip duvarlar arasında gerçekleşen ısı transfer oranını hesaplayın.

Teorik Yöntem Czmleri:

Veriler:

$$T_{plaka} = 303.15K$$

$$T_{oda} = 283.15K$$

$$A = 1.4m^2$$

$$\epsilon = 1$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4 \text{ (Stefan-Boltzmann sabiti)}$$

Bu tür bir problemde, iki nesne arasındaki net ısı transferini belirlemek için Stefan-Boltzmann yasası kullanılır. Bu yasa, aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{rad} &= \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) = (1) * (1.4 m^2) * \left(5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} \right) * (303.15^4 - 283.15^4) \\ &= 160,168W \end{aligned}$$

Abaqus işlem adımları aşağıda açıklanmıştır:

Part Modülü: "Create Part" seçilerek 3 boyutlu deforme olabilen bir katı şekle sahip ve ekstrüze tipinde bir parça oluşturulur. Oluşturulan parçanın boyutları ve ekstrüzyon derinliği belirlenir. şekil 10'da gösterilmiştir.

Property Modülü: "Create Material" seçilerek malzeme davranışı olarak termal bölümünden ısı iletim katsayısı 44.5 W/(m*K) ve genel bölümünden malzeme yoğunluğu 7850 kg/m³ olarak tanımlanır. Ardından, "Create section" ile parça için bir kesit

oluşturulur ve "Assign section" seçilerek oluşturulan kesit parçaya atanır. Şekil 11’de gösterilmiştir.

Montaj Modülü: "Create instance" seçeneğiyle parça montaj sayfasına aktarılır. Şekil 12’de gösterilmiştir.

Step Modülü: "Create step" seçilerek genel prosedür tipinden ısı transferi seçilir. Step adımı seçildikten sonra açılan sayfadan yanıt bölümü "Steady-State" olarak belirlenir.

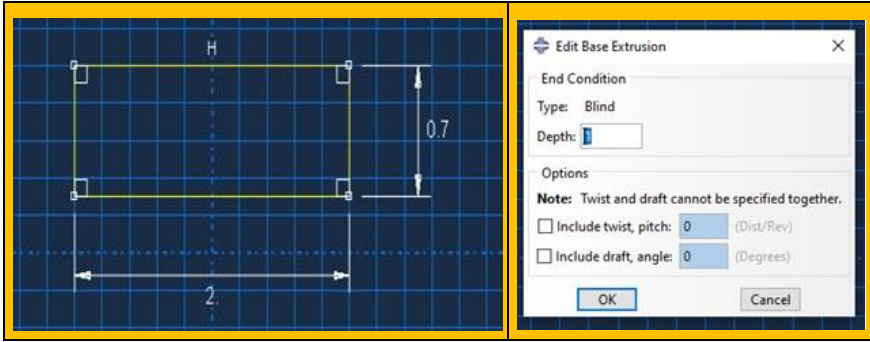
Etkileşim Modülü: "Create Instance" seçeneğiyle "Surface Radiation" seçilir. Açılan pencereden ışıyım tipi belirlendikten sonra yayma oranı ve oda sıcaklık değerleri girilir. Şekil 12’de gösterilmiştir.

Yük Modülü: Parçanın bir yüzeyine sıcaklık sınır koşulu tanımlamak için "Create boundary condition" seçeneği kullanılır. Şekil 13’te gösterilmiştir.

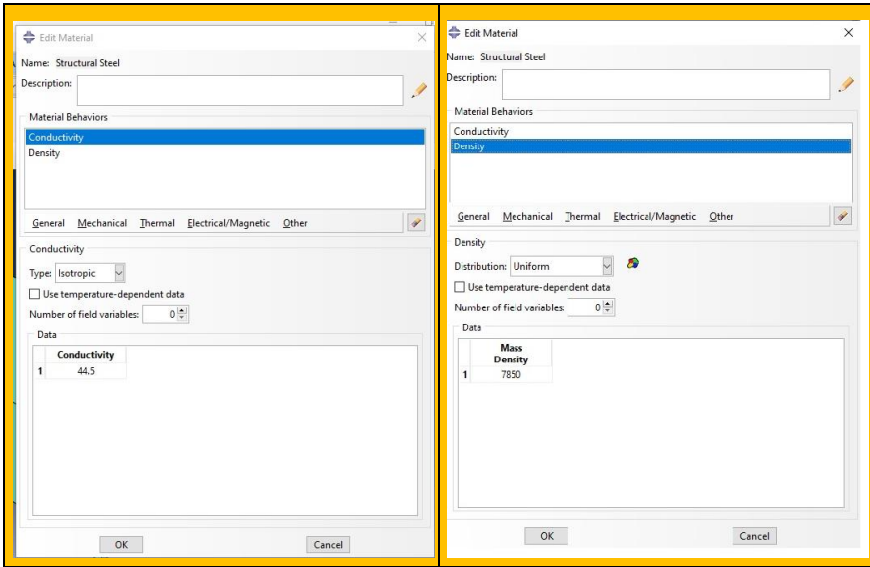
Mesh Modülü: Parça seçilerek element büyüklüğü 0,05 olarak tanımlanır ve atanacak element tipi “8 node linear heat transfer brick” olarak belirlenir. Son olarak, parçanın ağ yapısı "mesh part" seçeneği ile oluşturulur. Şekil 14’te gösterilmiştir.

Model Menüsü: “Edit Attributes” seçeneğine tıklanarak Model-1 seçilir. Açılan pencereden mutlak sıfır sıcaklığı ve Stefan-Boltzmann katsayısı tanımlanır.

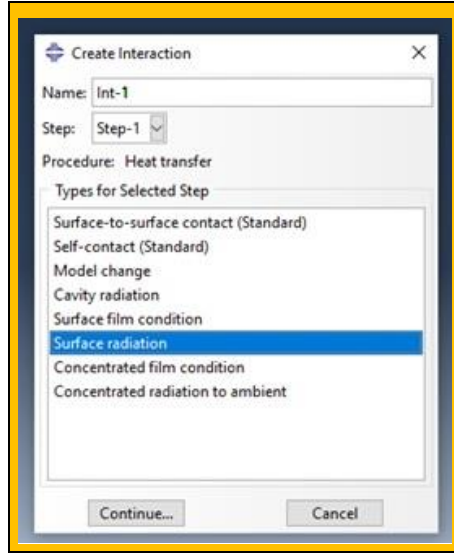
Job Modülü: “Create Job” seçeneği ile analizin çözümü başlatılır. Şekil 15’te gösterilmiştir.



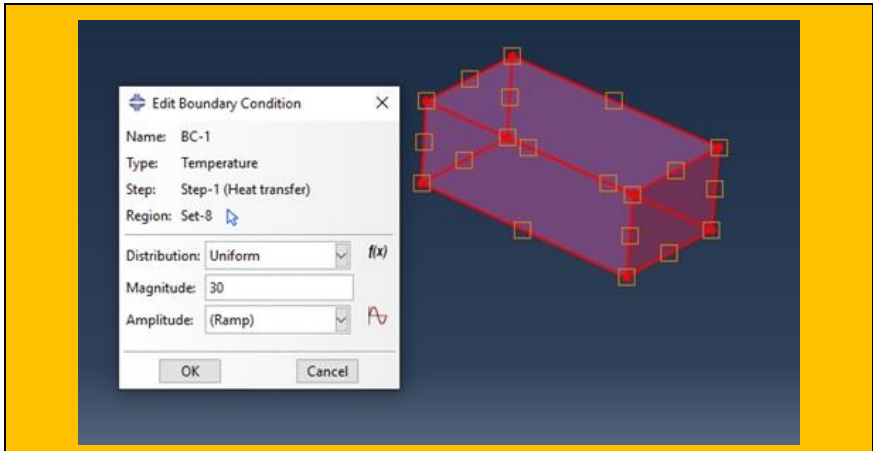
Şekil 10: Parçanın geometrisi oluşturulmuştur



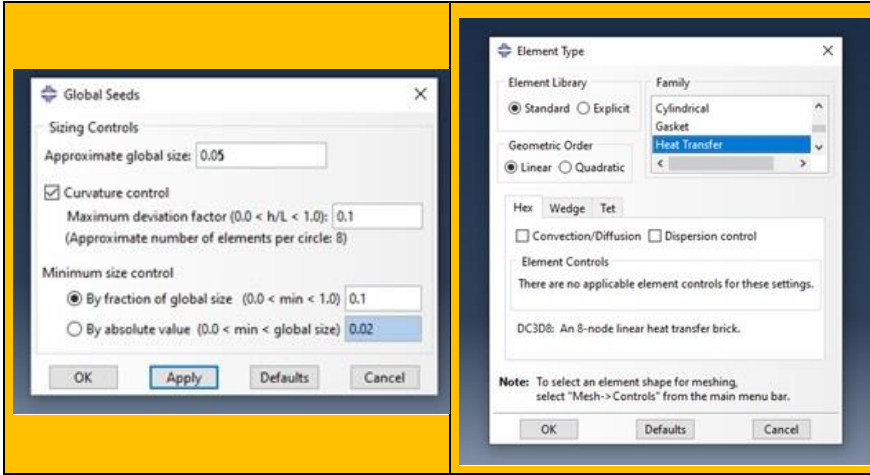
Şekil 11: Parçaya atanacak malzeme bilgileri tanımlanmıştır



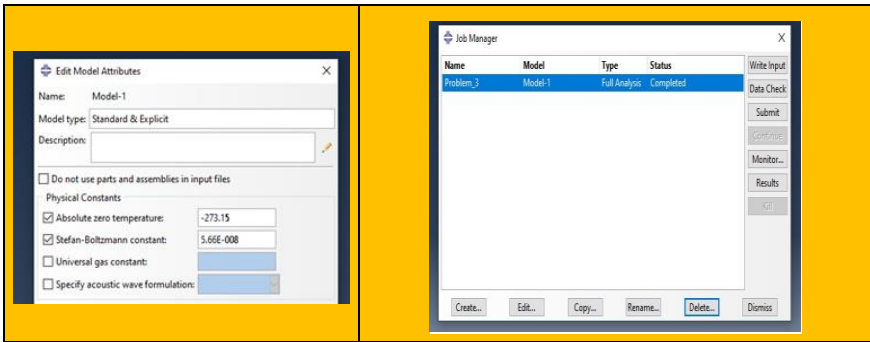
Şekil 12: Parçaya ile çevresi arasındaki etkileşim bilgileri verilmiştir



Şekil 13: Sınır koşulları belirlenmiştir



Şekil 14: Parçanın ağ yapısı bilgileri belirlenmiştir



Şekil 15: Sabitler tanımlandıktan sonra analiz işlemi başlatılmıştır

COMSOL Multiphysics Modelleme Adımları aşağıda açıklanmıştır:

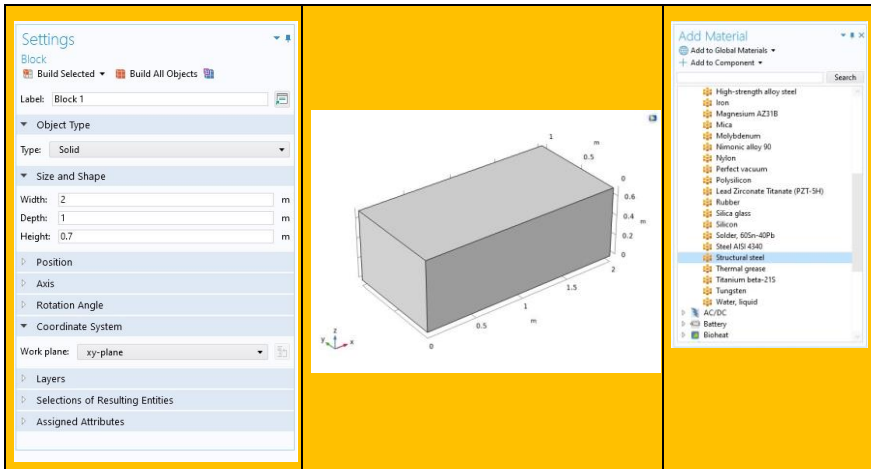
Geometri Oluşturma: Genişlik 2 metre, derinlik 1 metre ve yükseklik 0,7 metre olarak geometri oluşturulur. Şekil 16'da gösterilmiştir.

Malzeme Tanımı: Malzeme kütüphanesinden çelik malzemesi seçilir.

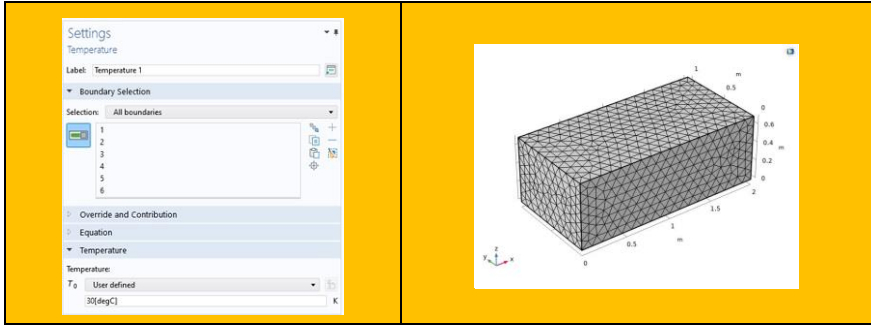
Sıcaklık Tanımı: Fizik modülünde, "Initial Values" ekranından başlangıç ve yüzey sıcaklığı olarak 30°C olarak girilir. Yüzey ile oda sıcaklığı arasındaki ilişkiyi belirlemek için sınır koşullarından "Surface to Ambient Radiation" seçilir. Açılan pencereye yayma oranı ve oda sıcaklık değerleri girilir.

Ağ Yapısı Oluşturma: Mesh modülünden "finer" seçeneği seçilerek ağ yapısı oluşturulur. Şekil 17'de gösterilmiştir.

Analiz Başlatma: Zamandan bağımsız çalışma (Stationary Study) bölümünden, modelin hesaplanması başlatılır.



Şekil 16: Parça geometrisinin oluşturulmasından sonra malzeme kütüphanesi kullanılarak malzeme seçilmiştir



Şekil 17: Sınır koşulları ve ağ yapısı tanımlanmıştır

3. Bulgular

Bu bölümde, teorik hesaplamalar ile COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak elde edilen ısı transferi sonuçları karşılaştırılmış ve değerlendirilmektedir. Analizler, iki farklı problem senaryosu üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Problem 1:

Teorik ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, Problem 1 için her iki yöntemin sonuçlarının tamamen uyumlu olduğu görülmüştür. Bu, teorik modelin ve kullanılan simülasyon yazılımının doğruluğunu ve güvenilirliğini teyit etmektedir. Çizelge 1'de sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 1. Teorik ve COMSOL Mutiphysics ısı transfer oranları sonuçları karşılaştırıldı.

	Teorik Sonuçlar	COMSOL Multiphysics Sonuçları
Problem 1	400kW	400kW

Problem 2:

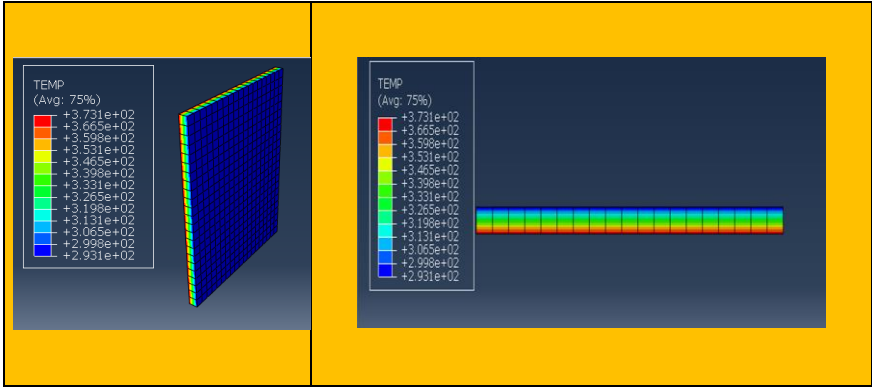
Problem 2'de teorik hesaplamalar ile simülasyon sonuçları arasında küçük bir fark gözlemlenmiştir. Bu fark, büyük olasılıkla modelleme parametrelerindeki küçük sapmalardan veya ağ yapısının eleman büyüklüğünden kaynaklanmaktadır. Özellikle, daha ince bir ağ yapısı kullanılarak bu farkın azaltılabileceği düşünülmektedir. Çizelge 2'de bu fark detaylandırılmıştır.

Çizelge 2. Teorik ve COMSOL Mutiphysics ısı transfer oranları sonuçları karşılaştırıldı.

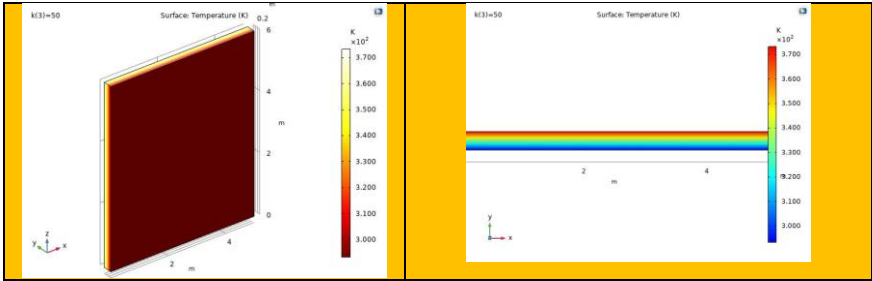
	Teorik Sonuçlar	COMSOL Mutiphysics Sonuçları
Problem 2	160.168W	160.178 W

Sıcaklık Dağılımları:

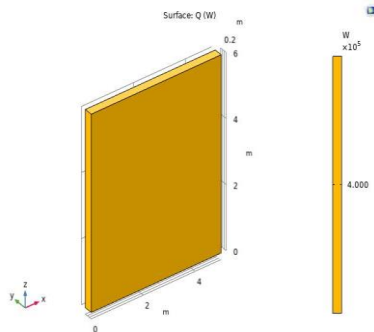
Problem 1 için elde edilen sıcaklık dağılımları, levhanın ön ve arka yüzeylerindeki sıcaklık farklarına bağlı olarak şekillenir. Ön yüzey, levhanın bir tarafındaki sıcaklık koşullarına bağlı olarak belirgin bir şekilde yüksek sıcaklıklara sahiptir. Bu sıcaklık, ön yüzeye uygulanan sıcaklık sınır koşuluna (örneğin, 100°C) yakındır. Levhanın kalınlığı boyunca, ön yüzeyden arka yüzeye doğru sıcaklık azalmıştır. Orta bölgelerde, sıcaklık belirgin bir azalma göstermiştir. Ön yüzey, levhanın diğer tarafındaki sıcaklık koşullarına bağlı olarak daha düşük sıcaklıklara sahiptir. Bu sıcaklık, arka yüzeye uygulanan sıcaklık sınır koşuluna (örneğin, 20°C) yakındır. Sıcaklık dağılımları, levhanın içindeki ısı transferini gösterir. Sıcak bölgelerden soğuk bölgelere doğru ısı akışı vardır.



Şekil 18: Abaqus programıyla elde edilen sıcaklık dağılımları verilmiştir

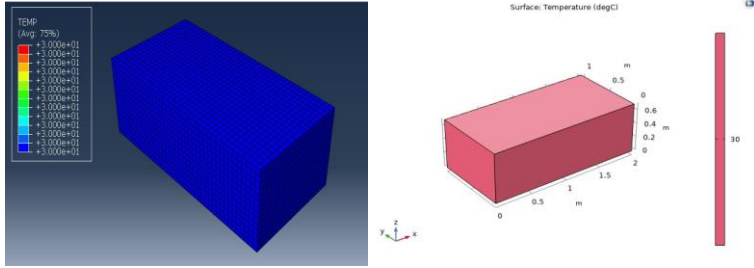


Şekil 19: COMSOL Multiphysics programıyla elde edilen sıcaklık dağılımları verilmiştir

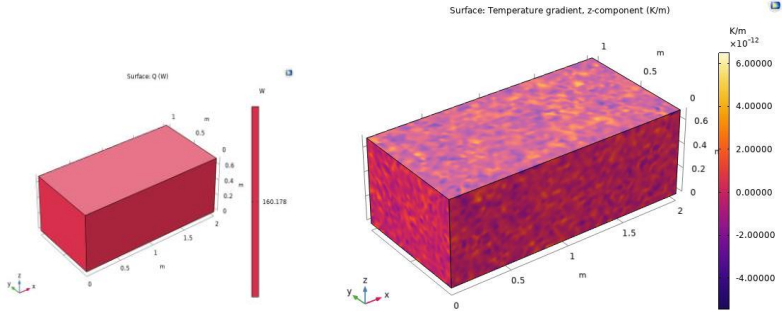


Şekil 20: COMSOL Multiphysics programıyla elde edilen ısı transfer oranı gösterilmiştir

Problem 2’de plakanın sıcaklığı odadaki duvarlardan etkilenecek ve sıcaklık farkına bağlı olarak bir sıcaklık gradyanı oluşturacaktır. Bu sıcaklık gradyanı boyunca, plakanın bir tarafında daha yüksek sıcaklık, diğer tarafında ise daha düşük sıcaklık bulunacaktır. Bu problem için sıcaklık dağılımı, ısı transfer oranı ve sıcaklık gradyanı sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 21: Abaqus (solda) ve COMSOL Multiphysics programıyla elde edilen sıcaklık dağılımları (sağda) gösterilmiştir



Şekil 22: COMSOL Multiphysics programıyla elde edilen ısı transfer oranı (solda) ve sıcaklık gradyan değişimi (sağda) gösterilmiştir

4. Sonuç

Bu çalışma, mühendislik öğrencilerinin ısı transferi kavramlarını derinlemesine anlamalarına ve bu bilgileri pratikte uygulamalarına yardımcı olmayı amaçlayan bir kaynak olarak tasarlanmıştır. Temel ısı geçişi mekanizmalarını içeren problemler, Abaqus ve COMSOL Multiphysics yazılımları kullanılarak modellenmiştir. Bu modelleme süreci, öğrencilere mühendislik problemlerini çözme konusunda önemli bir uygulama sağlamaktadır.

Bu bölümde, farklı ısı geçişi mekanizmalarını kapsayan örnek sorunların adım adım çözüm süreçleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu modellemeler, öğrencilere problem formülasyonu, sınır koşullarının tanımlanması ve çözüm süreçlerinin etkili bir şekilde yönetilmesi konularında pratik deneyim kazandırmaktadır. Ayrıca, bu bölüm, öğrencilerin ısı geçişi analizlerinin sonuçlarını doğru bir şekilde yorumlamalarını hedeflemektedir. Elde edilen sonuçlar, teorik bilgilerle karşılaştırılarak öğrencilere derinlemesine bir anlayış kazandırmaktadır.

Bu çalışma, mühendislik öğrencilerinin ısı geçişi teorisini güçlendirmelerini ve Abaqus ile COMSOL Multiphysics yazılımlarını etkili bir şekilde kullanmalarını sağlamayı amaçlamaktadır.

Kaynakça

Assad, M., Hawileh, R. A., Abdalla, J. A. & Abed, F. (2022). Heat Transfer Analysis of Reinforced Concrete Walls in ANSYS and ABAQUS: A Comparative Study. 2022 *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, Dubai, United Arab Emirates. doi: 10.1109/ASET53988.2022.9735001.

Can, Ö. ve Kaya, A.İ. (2007). *Örneklerle Abaqus'a Giriş*. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.

Cengel, Y. A. (2008). *Heat Transfer A Practical Approach*. Second Edition. UK: McGraw- Hill

Coskun, V. & Acar, B. (2015, Mayıs). *Modelling of Heat Transfer across Bolted Joints in Abaqus/CAE*. 2015 SIMULIA Community Conference, Berlin.

Erdoğan, A., Ouellette, D. & Çolpan C. Ö. (2018). Gövde Boru Tipi Isı Değiştiricisinin Comsol Multiphysics Programında Sayısal Modellenmesi. *Mühendis ve Makine*, 59, 692, s. 1-16.

Gerlich, V., Sulovská, K.& Zálešák, M. (2013). COMSOL Multiphysics validation as simulation software for heat transfer calculation in buildings: Building simulation software validation, *Measurement*, Volume 46, Issue 6, Pages 2003-2012. doi: 10.1016/j.measurement.2013.02.020

Günay, D. (Çeviren). (1993). *Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri*. Adapazarı, Türkiye: Sakarya Üniversitesi Matbaası.

Harun Demir, (2013). *Kompozit Yapıların Sonlu Elemanlarda Alt Modellenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, Türkiye.

Hashim, A., Almensoury, M., Ali, F., Hamzah, H. & Ghalambaz, M. (2021). Multiscale Approach of The Equivalent Thermal Conductivity of Modified Foam-Filled And Non-Filled Hollow Brick And A Brick Wall. *Journal of Thermal Engineering*, 7 (1), 190-203. DOI: 10.18186/thermal.847754.

Nguyen H. L. & Kohno M. (2023). Numerical model of heat transfer for protected steel beam with cavity under ISO 834 standard fire, *Fire Safety Journal*, Volume 140, 103876, doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103876.

Kolev Z.&Kadirova S. (2022). Numerical modelling of thermal conduction processes in the fins of two-stage “water to air” heat exchanger. International Scientific Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems-CIEES 2021, *AIP Conf. Proc.*, 2570 (1): 030012, Ruse. doi:10.1063/5.0100129

Piekarska, W.& Kubiak, M. (2012). Theoretical investigations into heat transfer in laser-welded steel sheets. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 110, 159–166. doi:10.1007/s10973-012-2486-0

Steiner, T. R. (2022). High temperature steady-state experiment for computational radiative heat transfer validation using COMSOL and ANSYS. *Results in Engineering*, Volume 13, 100354. doi: 10.1016/j.rineng.2022.100354

Shi, Y., Rui, S., Xu, S., Wang, N., Wang, Y. (2022). COMSOL Modeling of Heat Transfer in SVE Process. *Environments*, 9, 58. doi: 10.3390/environments9050058

Vajdi, M., Moghanlou, F. S., Sharifianjazi, F., Asl, M. S. & Shokouhimehr M. (2020). A review on the Comsol Multiphysics studies of heat transfer in advanced ceramics. *Journal of Composites and Compounds*, 2(2), 35–43. doi: 0.29252/jcc.2.1.5

Yakut A.K., Selbaş, R., Yakut, Z. (2022). Mühendislikte Isı Transferi. Isparta, Türkiye: Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Yayınları.

Yeşilata, B. (2007). Mühendislikte Temel Isı Transferi (Termo-akışkan sistemler ders kitapları serisi-2), Şanlıurfa, Türkiye.

BÖLÜM II

Gaz Sensörleri

Tuba ÇAYIR TAŞDEMİRCİ¹

1.Giriş

Yirmi birinci yüzyılda, insanların yaşam kalitesinin artırılması için sanayileşmede devrim niteliğinde bir gelişme meydana gelmiştir. İnsanların standartlarını iyileştirmeye yönelik bu gelişme, sınırsız kullanımına yol açarak hem ekolojik dengenin hem de insan sağlığının bozulmasına yol açmıştır. Azot dioksit (NO₂), hidrojen sülfür (H₂S), amonyak (NH₃) ve aseton, toluen, formaldehit, benzen ve kloroform gibi uçucu organik bileşikler (VOC'ler) gibi kirletici ve zararlı gazların emisyonu, canlıları rahatsız etmekte ve doğanın ekolojik dengesini bozmaktadır (Majhi & ark., 2023). Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) araştırmaları

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Erzincan/Türkiye, Orcid: 0000-0001-9519-8483, tcayir@erzincan.edu.tr

sonucunda hava kirliliğinin; felç, kalp hastalığı, akciğer kanseri, solunum yolu enfeksiyonları vb. gibi çeşitli hastalıklara sebep olduğu ve yılda yaklaşık yedi milyon kişinin ölümüne neden olduğunu tespit etmiştir. Bu arada hidrojen (H_2), metan (CH_4), hidrojen disülfid (H_2S) gibi yanıcı ve patlayıcı gazların kazara sızması da çok sayıda can kaybıyla sonuçlanmaktadır (Tian & ark., 2021). Örneğin; Fukushima nükleer reaktöründeki hidrojen patlaması sonucunda binlerce kişinin ölümüyle sonuçlandı. Sonuç olarak, yaşamı tehdit eden bu gazların son derece düşük konsantrasyonlarda bile doğru ve gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayacak bir sensöre acil ihtiyaç vardır. Gaz sensörleri çevresel izleme, endüstriyel hijyen kontrolü, askeri güvenlik, hastalık teşhisi ve gıda güvenliği gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Khan & ark., 2023). İnsanlığın ve ekosistemin güvenliğini sağlamak için minyatürleştirilmiş, ucuz, güvenilir ve düşük güç tüketen gaz sensörlerinin geliştirilmesi çok önemlidir. Bu bağlamda, gelişmiş gaz algılama performanslarına ulaşmak için çeşitli gaz sensörleri kategorileri araştırılmıştır. Gaz sensör cihazı çalışma prensibine göre elektrokimyasal, optik, kapasitif, kimyasal dirençli, akustik ve alan etkili transistörlü (FET) gaz sensörleri olmak üzere çeşitli tiplere ayrılabilir (Shi & ark., 2024). Elektrokimyasal gaz sensörleri, düşük güç tüketimi ve yanıtta doğrusallık gibi çeşitli avantajlar sunar, ancak düşük algılama aralığı ve daha düşük ömür gibi bazı dezavantajlara sahiptir (İslam & Channon, 2019). Benzer şekilde, optik gaz sensörleri uzun süreli kararlılık, hızlı tepki ve geniş bir kapsama alanı sergiler, ancak minyatürleştirme ve maliyet etkinliği konusunda zorluklarla karşılaşır (Hodgkinson & Tatam, 2013). Ayrıca akustik gaz sensörleri kablosuz uygulanabilirlik sağlar ve

düşük seçicilik sergilemelerine rağmen zorlu koşullara dayanabilir (Zipser & ark., 2000). FET gaz sensörleri kompakt cihazlarla uyumluluk gösterir; ancak yüksek malzeme üretimi ve üretim maliyetleri gibi eksikliklerle karşı karşıyadır (Hong & ark., 2021). Kapasitif gaz sensörleri üstün seçiciliğe, düşük tespit sınırına ve düşük sıcaklıkta çalışmaya sahiptir, ancak kısa ömür ve nemli ortamlarda azalan hassasiyet gibi sınırlamalara sahiptir (Zhai & ark., 2021). Farklı türdeki gaz sensörlerinin sahip olduğu bu kısıtlamalar nedeniyle, araştırmacılar odaklarını kimyasal dirençli gaz sensörlerinin geliştirilmesine yöneltmişlerdir. Kimyasal dirençli gaz sensörleri, kolay imalat, operasyonel basitlik, uygun maliyetli, çevre dostu doğa, elektronik cihazlara entegrasyon kolaylığı, yüksek stabilite, hızlı yanıt, minyatürleştirme potansiyeli ve çeşitli gazların tespitinde seçicilik gibi birçok önemli avantajla bu ileri teknolojik çağda yaygın olarak kullanılmaktadır. (Bhati & ark., 2021). Temel olarak kimyasal dirençli gaz sensörleri, yarı iletken bir algılama katmanı ve algılama katmanı üzerinde bir çift elektrottan oluşur (Yang & ark., 2021). Kimyasal dirençli gaz sensörlerinin temel çalışma prensibi, algılayan malzemenin hedef gazla etkileşimi sonucu direncindeki değişimi değerlendirerek ortamda mevcut hedef gazın tespit edilmesidir (Maihi & ark., 2021).

Gaz sensörlerinin çoğunda, hedef gazla reaksiyonu için gerekli aktivasyon enerjisini elde etmek ve sensörün oda sıcaklığında (RT) yavaş tepkisi ve eksik geri kazanımının üstesinden gelmek için algılama malzemesine termal enerji sağlanır (Duan & ark., 2024). Bununla birlikte, gaz sensörlerinin yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması, cihaza harici bir ısıtma kaynağının eklenmesini gerektirir, bu da yüksek güç tüketimine neden olur ve dolayısıyla

minyatürleşmesini sınırlar. Yüksek sıcaklıkta çalışma sensörün stabilitesini engeller, ömrünü kısaltır ve yanıcı gazların tespitinde uygulanabilirliğini engeller (Thathsara & ark., 2022). Bu zorlukların üstesinden gelmek için, performansından ödün vermeden gaz sensörünün çalışma sıcaklığını oda sıcaklığına düşürmek için çok büyük çaba sarf edilmiştir; bu, gaz sensörünün algılama yüzeyini etkinleştirmek için optik enerji kullanılarak elde edilebilir (Yuan & ark., 2022) Işıkla etkinleştirilen gaz sensörleri, düşük güç tüketimi ve RT işlemi ile hafif, esnek ve kompakt giyilebilir gaz sensörlerinin gerekliliğini karşılayabilir (Tang & ark., 2023). Ayrıca ışık aktivasyonu, cihazın bakımını azaltarak ve diğer elektronik cihazlarla uyumluluğu sağlayarak işlemi uygun maliyetli hale getirir. Yanıcı gazların tespitine yönelik güvenlik açısından, ışık aktivasyon stratejisi yaygın olarak kabul edilmektedir (Cheng & ark., 2022) Temel olarak, ışıkla etkinleştirilen gaz algılamada, aydınlatılmış optik enerji, yük taşıyıcı konsantrasyonunu modüle eden ve böylece cihazın algılama performansını artıran foto-indüklenen elektron deliği çiftleri üreterek algılama yüzeyini etkinleştirir (Joshi & ark., 2020). Bu nedenle, verimli bir ışıkla aktifleşen gaz sensörü, üstün fotoaktif algılama malzemesi, elektron-delik çiftlerinin etkili bir şekilde ayrılmasını ve rekombinasyonu önlemek için yük taşıyıcılarının arayüz boyunca hızlı transferini gerektirir (Setka & ark., 2021).

Işıkla etkinleştirilen gaz sensörlerinin performansı ve işlevselliği, büyük ölçüde algılama malzemelerinin yarı iletken davranışına bağlıdır, çünkü ışığa maruz kaldığında foto-oluşturulan yük taşıyıcılarının üretilmesini sağlar ve aynı zamanda hedef gazla etkileşim için temel görevi görür. Metal oksitler (MO'lar), yüksek

bollukları, diğer elektronik cihazlarla uyumlulukları, kompakt boyutları, toksik olmamaları ve düşük maliyetleri nedeniyle ışıkla aktifleşen gaz algılama için umut verici adaylar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Gaz algılama özellikleri açısından, yüksek hassasiyetleri, uzun vadeli kararlılıkları, yüksek yük taşıyıcı hareketliliği ve geniş gaz algılama aralığı, gelişmiş gaz algılama performanslarına katkıda bulunur (Yao & ark., 2021). Işık aktivasyonu açısından, geniş bant aralıklarına sahip MO'ların çoğu, elektromanyetik (EM) spektrumun ultraviyole (UV) bölgesinde uyumludur ve bu da yüksek enerjili UV ışığı altında foto aktivasyonuna yol açar. Ek olarak, grafen bazlı malzemeler, metal karbürler veya nitrürler (MXenler) ve geçiş metali dikalkogenitler (TMD'ler) gibi iki boyutlu (2-D) malzemeler, oldukça duyarlı, ışıkla aktifleşen gaz sensörlerine karşı önemli avantajlar sunar. Büyük yüzey alanı/hacim oranı, atomik düzeyde kalınlık, zengin aktif bölgelere sahip katmanlı yapı ve düzlemsel yapı nedeniyle hedef gaza yüksek maruz kalma gibi özelliklere sahip 2 boyutlu malzemeler (2-DM'ler), hızlı gaz adsorpsiyonunu ve desorpsiyonunu destekler. Ayrıca, yüksek yüzey reaktivitesi, oda sıcaklığında çalışma, ayarlanabilir elektronik özellikler, mükemmel mekanik esneklik, EM spektrumunun geniş bölgesinde daha yüksek ışık emme yeteneği ve yük transfer verimliliği, bunların bir sensör olarak pratik uygulanabilirliğini kolaylaştırır (Mondal & ark, 2023). 2-DM'lerin dar bant aralığı, fotojenlenmiş yük taşıyıcılarının hızlı bir şekilde iletilmesiyle görünür ışık ışıınımı altında aktivasyonunu mümkün kılar ve bu da ultra hızlı yanıtı yol açar.

2. Gaz Sensörü Nedir?

Gaz sensörü, etrafındaki oldukça düşük konsantrasyonlu gazları dahi algılayabilen ve elde edilen bilgiyi analitik olarak sinyale dönüştürebilen bir kimyasal sensördür. Gaz sensörü, kimyasal bir reaksiyondan meydana gelebileceği gibi, fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişiminde etkisiyle ortaya çıkabilir. Sensörler, reseptör ve transdüser adı verilen iki temel parçadan meydana gelirler. Reseptörler ve transdüserler, algılanan bilgiyi farklı şekillerde işleyerek ve dönüştürerek duyuşal algılama ve ölçüm süreçlerinde önemli roller üstlenirler. (Bochenkov & Sergeev, 2010).

2.1. Gaz sensörlerinin çalışma ilkeleri

Sensörler bu çalışma ilkesine dayanarak farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Reseptörlerin çalışma ilkesine göre sınıflandırılacak olursak;

- Fiziksel sensörler
- Kimyasal sensörler
- Biyokimyasal sensörler

Olarak üç gruba ayrılırlar.

Fiziksel sensörleri ele alırsak, reseptörde herhangi bir kimyasal reaksiyon meydana gelmemektedir. Sıcaklık, kütle, kırıcılık indisi, sinyal vb. gibi parametrelerin değişimleri sonucunda meydana gelmektedir. Kimyasal sensörlerde ise, reseptör ile kimyasal reaksiyonda varolan moleküller arasında meydana gelen tepkime sonucunda oluşmaktadır. Biyokimyasal sensörleri ise kimyasal sensörlerin bir alt sınıfı olarak tanımlayabiliriz ve bu

sensör çeşidinde meydana gelen reaksiyonlar biyokimyasaldır. Bu durumlar gözönüne alındığında bir sensörün türünü ayırtmak her zaman mümkün olmayabilir. Buna en iyi örnek gaz sensörleridir. Çünkü gaz sensörlerinde oluşan sinyas kimyasal karakter taşıyan gaz tutunumunun bir ürünü olarak ortaya çıkmaktadır (Korotcenkov, 2007). Sensörleri transduserin çalışma ilkesine göre sınıflandıracak olursak,

- Optik,
- Elektrokimyasal,
- Kütle,
- Manyetik(kalorimetrik)

Olarak ayrılabilirler. Reseptör ve transdüsere sınıflandırma haricinde, birçok parametreye göre bu sınıflandırma yapılabilmektedir. Üretim tekniğine (Sol-gel), malzemenin cinsine (Metal oksit), uygulama alanına (Sağlık) vs. gibi birçok farklı sınıflandırmalar yapılabilmektedir (Bochenkov & Sergeev, 2010).

2.2. Gaz sensörlerinin karakteristik özellikleri

Sensörlerin performansını elde etmek için birçok parametre kullanılmaktadır. Bu parametreler arasında tepki süresi, çözünürlük, ömür, sıcaklık, doğrusallık, stabilite, seçicilik ve duyarlılık gibi etmenler yer almaktadır. Sırasıyla bu parametreleri açıklayacak olursak;

Bir kimyasal sensörün ideal özellikleri, yüksek duyarlılık, seçicilik ve stabilite gibi önemli parametrelerin bir kombinasyonunu gerektirir. Ancak, gerçek dünyada, bir sensörde tüm bu özelliklerin

mükemmel olması pek mümkün değildir ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak farklı özellikler tercih edilebilir.

Herhangi bir uygulama için, sensörün karakteristiklerinin optimize edilmesi önemlidir. Örneğin, bir endüstriyel proses izleme uygulamasında, hızlı tepki süresi ve yüksek stabilite önemli olabilirken, belirli bir analiti tespit etme konusunda yüksek seçicilik gerekmebilir. Bununla birlikte, bir tıbbi teşhis cihazı için, yüksek duyarlılık ve seçicilik, stabilite ve doğrusalılık gibi özellikler daha belirleyici olabilir.

Bu nedenle, sensör teknolojisinin geliştirilmesi, belirli uygulama gereksinimlerine uygun sensörlerin tasarımını ve üretimini sağlamak için önemlidir. Çoğu zaman, mükemmel bir sensör yerine, belirli bir uygulama için en uygun sensörü seçmek ve gerekirse belirli özellikleri iyileştirmek daha mantıklı olabilir.

Son olarak, sensör karakterizasyonunda kullanılan parametrelerin dikkatlice incelenmesi ve belirli bir uygulamanın gereksinimlerine uygun olarak seçilmesi önemlidir. Bu şekilde, sensörlerin daha etkili ve verimli bir şekilde kullanılması sağlanabilir.

2.3. Gaz sensörlerinin uygulama alanları

Sensörlerin kullanımı dünya çapında gün geçtikçe artış göstermektedir. Güvenlik içinde sensör kullanımı zorunlu hale getirilen ülkeler, sektörler ve işyerleri bulunmaktadır. Örneğin, Japonya’da meydana gelen patlama riskine karşı sızıntı oluşturabilecek gazlardan korunma adına tüm ülkede evler de gaz sensörü kullanma zorunluluğu getirilmiştir. Aynı uygulama Birleşik devletlerde sadece evler de değil, gemi, karavan vs. gibi alanlar da

da kullanıma geçirilmiştir. Restorantlarda, otoparklarda ve kapalı birçok alanda gaz sensörleri dumana karşı tepki verdiklerinde kullanılması ve önlenmesi için havalandırma fanlarına takılmaktadır. Endüstri alanında ise havadaki çeşitli gazların yoğunluğunu tespit etmek için gaz sensörleri kullanılmaktadır (Mouson & Herbert, 1990).

Gaz sensörleri, yukarıda verilen güvenlik önlemi ve korunma amaçlı kullanımı dışında tarımsal ekonomiyi kalkındırma alanında da kullanılmaktadır. Örneğin; CO₂ sensörleri seralarda bitkilerde özümleme olayı için kullanılmaktadır.

CO₂ sensörü bitkilerin yaşamsal faaliyetleri için oldukça önemli hale gelmiştir. Çünkü bu sensörler bitkiler için gerekli besinlerin üretilmesi ve gelişimini devamınında kullanılmaktadır. Ortama yerleştirilen sensörler ile ortamdaki nemin ölçülmesi ve bu nem ile CO₂ miktarının yeterli seviyelerde tutulması sağlanmaktadır. Ayrıca bitkilerin özümlemesi için olması gereken sürekliliğinin sağlanması için bu gazların aralıksız ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Birçok kullanım alanı gibi seralarda da belli parametrelerin yerine getirilmesi oldukça önemlidir. Bu parametreler çalışma performans verimliliği ve ölçüm tutarlılığıdır. Sonuç olarak, gaz sensörlerinin seçiminde performansa etki eden faktörle ilgili aygıt parametrelerinin elde edilen sonuçları etkilediğini söyleyebiliriz.

2.4 Yarıiletken gaz sensörleri

Gaz sensörleri için temel karakteristikleri inceledikten sonra, üretim maliyetinin düşük olması, üretiminin kolay olması, kullanımının basit olması, gaz algılama çeşitliliğinin geniş olması

sahip olması ve uygulama alanının geniş olması, bu alanda çalışma yapan insanların oldukça ilgisini çekmekte ve metal oksit sensörlerin üzerinde durulmaktadır. Metal oksit sensörlerin en önemli özellikleri duyarlılık ve seçiciliktir. İletkenlik ölçümüne dayanan yarıiletken metal oksit sensörlerin çok geniş kullanımı alanı olduğu için en çok çalışma yapılan gaz sensörlerinden biridir. Araştırmalar sonucunda gaz algılama işleminin yüzey reaksiyonlarına oldukça bağlı olduğu görülmektedir. Metal oksit sensörlerin en önemli özelliği olan duyarlılık ve seçililik, yüzey reaksiyonlarını etkileyen, yüzey bulunan mikro ve nano yapılar, kimyasal içerik, yüzey meydana gelen değişimler, sıcaklık ve nem gibi parametrelerle doğrudan ilgilidir (Wang & Yin, 2010). Metal oksitlerin kimyasal duyarlılığı oldukça yüksek olduğu için hali hazırda kullanılan birçok sensörde faydalanılmıştır. Koku algılama uygulamalarında kullanılan sensörlerde metal oksit sensörlerdir.

1980'lerde yarıiletken üreticileri 15 element kullanırken, son yıllarda Periyodik Tablo elementlerinin yaklaşık yarısı kullanılmaya başlanmıştır. Üstelik üretimi yapılan çiplerde radyoaktif olan elementler dahi kullanılmaktadır. Son zamanlarad yapılan çalışmalar metal oksit malzemelerin önemini ortaya koymaktadır. Elektrik akımının düzenlenmesinde yer alan silisyum metal oksitlerin kullanımı ile varlığının geri plana atılmasına neden olmuştur. Bu duruma ilaveten, elektronların daha hızlı bir şekilde akmasını sağlamak için, yonga plakalarına yalıtımlı katmanların eklenmesi ve inceltirilmiş silisyumları gruplama gibi tavsiyelerde çalışmalar da yer almaktadır (Setkus ve ark., 2004).

Çeşitli metal oksit yarı iletken sensörler, metal oksit yarı iletkenlerin yüzeyinde oluşan gaz adsorbsiyonunun, gaz sensörünün

elektrik direncinde oluşturduğu değişimlerin sonucunda meydana gelmesine olanak sağlamıştır. SnO_2 , Cr_2TiO_3 ve WO_3 gibi yarı iletken sensörlere örnek olarak gösterilebilmektedir. Yarıiletken gaz sensörlerinde metal oksit yarıiletken kullanımında n-tipi ve p-tipi yarıiletken tercih edilmektedir. Yarı iletken n-tipi seçilirse; iletim bandındaki elektronlar da gaz indirgenmesi veya gaz oksidasyonu ile eksilme meydana gelmektedir. Yarıiletken gaz sensörlerinde n-tipi oksit kullanıldığında zaman, O_3 veya NO_2 gibi gazlarla etkileştiğinde yarıiletkenin direnci artarken, CH_4 veya CO gibi gazlarla etkileştiğinde yarıiletkenin direnci azalmaktadır.

Yarıiletken gaz sensörlerinde p-tipi yarıiletken tercih edilirse; valans bandında bulunan elektron boşlukları ve bu boşluklarda, oksitleyici gazlar ile etkileştiğinde dirençte artma gözlenirken, indirgeyici gazlar ile etkileştiğinde direnç azalma göstermektedir. Sonuç olarak yarıiletken tipi seçimi, işlem sonrasında elektrik direncinde artma ve azalma durumundan birinin meydana gelmesine sebep olmaktadır (Moulson & Herbert, 1990).

Gaz sensörleri arasında yarıiletken gaz sensörlerinin avantajı; elektrik direncinin direkt ölçülebilmesi ile amaçlanan gaz konsantrasyon değişiminde meydana gelen durumu tespit edilebilmesidir. Yarıiletken yüzeyinde oluşan elektrik direncindeki değişim, yarı iletken gaz sensörlerinin yapısında kullanılan oksitlerin hassaslığı ile sağlanmaktadır.

Standart bir metal oksit yarıiletken gaz sensöründe, tespit edilmesi istenilen gazların tespiti yapılamamaktadır. Eğer mevcut bir gaz karışımı varsa, bu karışımda bulunan gazlar arasındaki farkı bulmak ve bu farkı da daha şiddetli bir hale getirmek istiyorsak;

- En hassas nokta yarıiletken metal oksidin mikroyapısıdır.
- Yarıiletken oksidin mikroyapısının sağlanması için oksit içinden geçen sıcaklık akışı ve oksit kalınlığı gibi parametreler kontrol edilmelidir (Vuong & ark., 2004).
- Gaz seçiciliği için yarıiletken oksitlerin yanı sıra aktifleştirilmiş karbon filtreleri, koruyucu kaplamalar, katkı maddeleri ve katalitik kullanım gibi ek katkılar oldukça önemlidir (Huang & ark., 2004).

Gaz hassasiyetini ölçen cihazlar da en önemli noktalardan biri ppm seviyesidir. Ppm seviyesi gaz konsantrasyonlarının saptanmasını sağlayan gaz hassasiyeti ölçmeye yarar. Diğer önemli nokta ise, birçok gazın bulunduğu ortamda istenilen gazın bulunmasını olanaklı hale getiren gaz seçimi olduğunu söyleyebiliriz. Gaz seçebilirliğinin yetersiz olduğu durumlarda yarıiletken oksitlerin genellikle kalitesi düşmektedir. SnO₂ (kalay (II) oksit veya stannik oksit), CVD tekniği ile üretilen ince film kaplamalar için yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Bu kaplamalar, özellikle gaz sensörleri gibi uygulamalarda kullanılır. SnO₂ tabanlı gaz sensörlerinde, SnO₂ filminin yapısal ve kimyasal özellikleri, sensörün hassasiyeti, seçiciliği ve tepki süresi gibi önemli parametreleri etkiler. Uygulama sıcaklığı, içyapı modifikasyonu, katkı maddeleri ve katalizörler gibi faktörler, SnO₂ tabanlı gaz sensörlerinin performansını artırmak için hassas bir şekilde ayarlanabilir.

3. Gaz sensörleri büyütme teknikleri

3.1. Sol-gel yöntemi

Sol-jel işlemi şu şekilde tanımlanabilir: "Bir sıvı içindeki bir moleküler öncünün polikondensasyon reaksiyonları yoluyla bir oksit ağının oluşturulması." Sol-gel, kolloidal parçacıkların veya polimerlerin bir çözücü içindeki kararlı bir dispersiyonudur. Parçacıklar amorf veya kristal olabilir. Bir aerosol, gaz fazındaki parçacıklardır, sol ise sıvı içindeki parçacıklardır. Bir jel, bir sıvı fazı çevreleyen üç boyutlu sürekli bir ağdan oluşur. Kolloidal bir jelde ağ, kolloidal parçacıkların topaklaşmasından oluşur. Bir polimer jelde parçacıklar, alt kolloidal parçacıkların kümelenmesinden oluşan polimerik bir alt yapıya sahiptir. Genellikle sol parçacıkları van derWaals kuvvetleri veya hidrojen bağları ile etkileşime girebilir. Polimer zincirlerinin bağlanmasıyla da bir jel oluşturulabilir. Malzeme sentezi için kullanılan çoğu jel sisteminde etkileşimler kovalent niteliktedir ve jel işlemi geri döndürülemez. Başka etkileşimler söz konusu olduğunda jelleşme süreci tersine çevrilebilir.

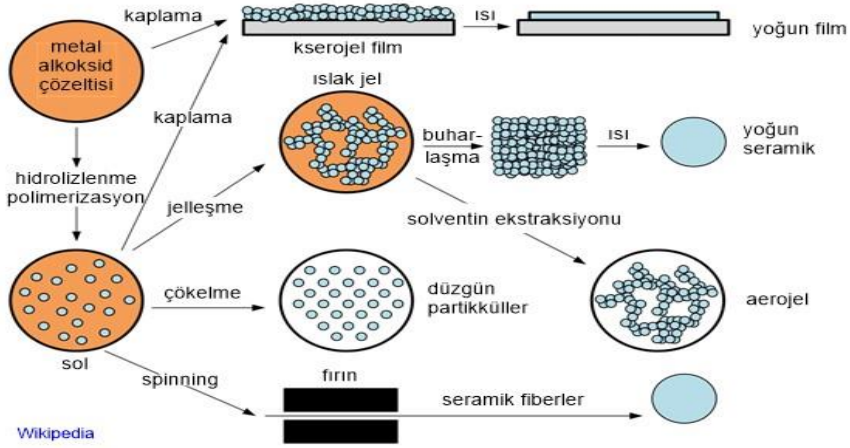
- Sol-jel sentezinin ardındaki fikir, bileşiği bir sıvı içinde “çözerek” kontrollü bir şekilde katı hale getirmektir.

- Çok bileşenli bileşikler, farklı bileşiklerin sollarının karıştırılması yoluyla kontrollü bir stokiyometri ile hazırlanabilir.

- Sol-jel yöntemi, homojen olmayan bir jelleşme reaksiyonu olan birlikte çökeltme problemlerini önler.

- Atom düzeyinde karıştırmaya olanak sağlar.

• Kolayca sinterlenebilen küçük parçacıklar elde edilir. Şekil 1’de sol-gel yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



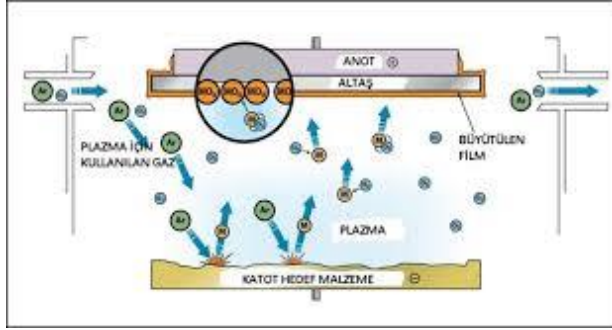
Şekil 1. Sol-gel yönteminin şematik gösterimi

3.2. Püskürtme (Sputtering)

Püskürtme prensibi, bir hedefin (katot) yüzeyindeki bir plazmanın (kısmen iyonize gaz) enerjisini kullanarak malzemenin atomlarını birer birer çekip altlık üzerine biriktirmektir.

Bunu yapmak için, saf bir gazın (genellikle Argon) potansiyel fark (darbeli DC) veya elektromanyetik uyarım (MF, RF) aracılığıyla iyonlaştırılmasıyla bir plazma oluşturulur; bu plazma, manyetik alanın varlığı nedeniyle hızlanan ve hedef etrafında hapsedilen Ar^+ iyonlarından oluşur. Her iyonize atom hedefe çarparak enerjisini aktarır ve alt tabakaya yansıtılacak yeterli enerjiye sahip bir atomu parçalar. Plazma nispeten yüksek basınçlarda (10^{-1} - 10^{-3} mbar) oluşturulur, ancak artık gazlardan kaynaklanan kirlenmeyi önlemek için Argon'un eklenmesinden önce

daha düşük bir basınçtan başlamak gerekir. Püskürtme hedef şekillerinin (dairesel, dikdörtgen, Delta, boru şeklinde...) ve kullanılan malzemelerin çeşitliliği, tek bir çalışma sırasında alaşımlar da dahil olmak üzere her türlü ince katmanın oluşturulmasına olanak tanır. Şekil 2’de püskürtme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil.2. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi

3.3. Fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapour Deposition, PVD)

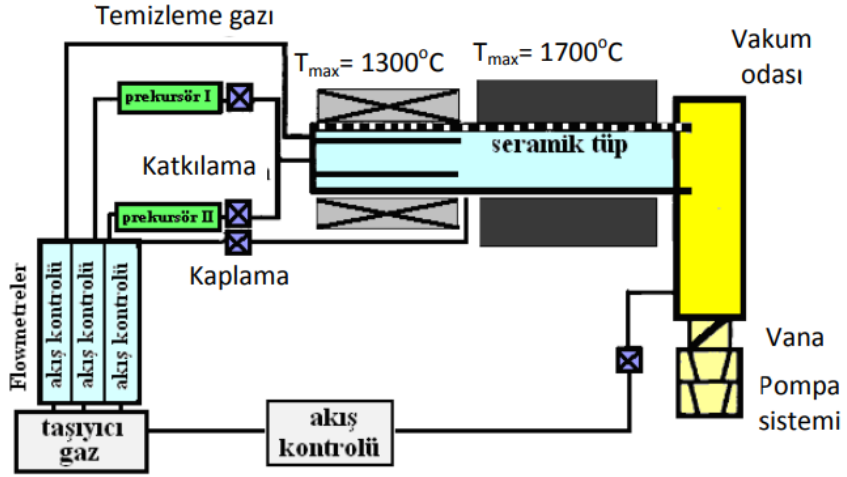
Bazen fiziksel buhar aktarımı (PVT) olarak da adlandırılan fiziksel buhar biriktirme (PVD), metaller, seramikler, cam ve polimerler dahil olmak üzere alt tabakalar üzerinde ince filmler ve kaplamalar üretmek için kullanılabilen çeşitli vakumlu biriktirme yöntemlerini tanımlar. Fiziksel buhar biriktirme (PVD), malzemenin vakum koşulları altında atomik seviyede transferini içeren bir buharlaşma kaplama tekniğidir. Proses bazı açılardan CVD'ye benzer, ancak PVD'de öncüller, yani biriktirilecek malzeme katı formda başlarken CVD'de öncüller reaksiyon odasına gaz halinde eklenir.

3.4. Kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapour Deposition, CVD)

--53--

tabaka üzerinde bir ince film, toz veya tek kristal olarak çökeler. CVD'nin birçok avantajı vardır. Örneğin, bu teknikle üretilen kaplamalar genellikle eşit kalınlıkta ve düşük gözeneklilikte olabilir. Ayrıca, CVD prosesi, karmaşık şekillere sahip alt tabakalar üzerinde bile kaplama üretme yeteneğine sahiptir. Bu, çeşitli fiziksel, tribolojik ve kimyasal özelliklere sahip malzemelerin büyütülmesini sağlar. CVD'nin önemli parametreleri arasında substrat malzemesi, substrat sıcaklığı, reaksiyon gazı karışımının bileşimi ve toplam basınçlı gaz akışı gibi deney koşulları bulunmaktadır. Bu parametrelerin değiştirilmesi, farklı özelliklere sahip kaplamaların elde edilmesini sağlar. Bu özellikler, malzemenin kullanım amacına göre optimize edilebilir.

CVD ve ilgili işlemler, dielektrikler, iletkenler, pasifleştirme katmanları, oksidasyon bariyerleri, iletken oksitler, tribolojik ve korozyona dayanıklı kaplamalar, ısıya dayanıklı kaplamalar ve mikroelektronik için epitaksiyel katmanlar gibi birçok ince film uygulamasında kullanılır. Şekil 4'de CVD yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

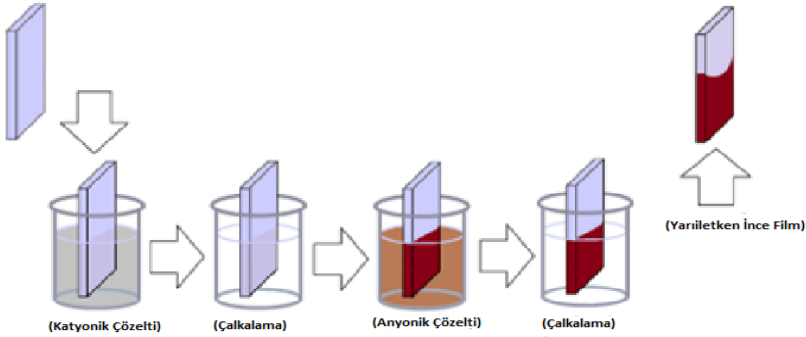


Şekil.4 Kimyasal buhar biriktirme yönteminin şematik gösterimi

3.5. Sıralı İyonik Tabaka Absorbsiyon ve Reaksiyon (SILAR) Yöntemi

SILAR, substrat seçiminin daha iyi esnekliği, geniş alanlı üretim kapasitesi, stabil ve yapışkan film biriktirme, film üretimi için düşük işlem sıcaklığı ve aynı zamanda tekrarlanabilirlik açısından en basit tekniklerden biridir. Bu teknik, herhangi bir gelişmiş ekipman gerektirmediği için oldukça bütçe dostudur. Ayrıca, çözelti konsantrasyonu, öncüller, daldırma sırasındaki döngü sayısı, pH, tavlama, katkılama ve büyüme sıcaklığı gibi çeşitli üretim parametreleri, fabrikasyon hızının yanı sıra üretilen ince filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini de etkiler. kapsamlı bir şekilde çalışmak için benzersiz bir teknik. SILAR'ın yarı iletken tabanlı optoelektroniklerin farklı yönlerini ele alan bir bölümü henüz yayınlanmadı. Bu bölüm, SILAR tarafından işlenen malzemelerin

farklı yönlerinde son zamanlarda kaydedilen ilerlemelerle ilgili olacaktır. SILAR birikimini etkileyen teori, mekanizma ve faktörlerin yanı sıra bu alandaki son gelişmeleri de açıklayacaktır. Son olarak, malzemelerin optoelektronik cihazlarda kullanımına ilişkin sonuçlar ve perspektifler sunulacaktır. Şekil 5’de SILAR yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil.5 SILAR yönteminin şematik gösterimi

4. Sonuç

Gaz sensörleri insan sağlığı ve çevre kirliliğinin önlenmesine varana kadar oldukça önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmada gaz sensörleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Gaz sensörlerinin çalışma prensibi açıklanmıştır. Gaz sensörlerinin karakteristik özellikleri üzerinde durulmuştur. En önemli noktalardan biri olan uygulama alanlarından bahsedilmiş ve karakteristik özelliklerin bu uygulama alanlarında nasıl faydalar sağladığı açıklanmıştır. Gaz sensörleri arasında yer alan ve önemli bir alana sahip olan yarıiletken gaz sensörleri ve uygulama alanları hakkında bilgiler verilmiştir. Son olarak büyütme teknikleri ile ilgili bazı teknikler anlatılmıştır. Bu çalışma gaz sensörleri çalışmadan

nce bilgi edinmek isteyecek ve yarıletken gaz sensörü üretme sürecinde oldukça kapsamlı bilgi veren bir çalışma niteliğindedir.

Kaynakça

Bhati V.S., Kumar M., Banerjee R. (2021). Gas sensing performance of 2D nanomaterials/metal oxide nanocomposites: A review. *Journal of Materials Chemistry C*, 9 (28), 8776-8808.

Bochenkov, V. E., Sergeev V, G. B., (2010). Sensitivity, Selectivity, and Stability of Gas-Sensitive Metal-Oxide Nanostructures. *American Scientific Publishers*, (3), 31-52.

Cheng Y., Li Z., Tang T., Xu K., Yu H., Tao X., Manh C., Duc N., Fang Y., Ren B., Chen H., Zhen J. (2022). 3D micro-combs self-assembled from 2D N-doped In_2S_3 for room-temperature reversible NO_2 gas sensing. *Applied Materials Today*, 26, 101355.

Duan X., Jiang Y., Liu B., Duan Z., Zhang Y., Yuan Z., Tai H. (2024). Enhancing the carbon dioxide sensing performance of LaFeO_3 by co-doping *Sensors and Actuators B Chemical.*, 402.

Hodgkinson J., Tatam R.P. (2013) Optical gas sensing: A review. *Measurement Science and Technology*, 24(1), 12004.

Hong S., Wu M., Hong Y., Jeong Y., Jung G., Shin W., Park J., Kim D., Jang D., Lee J.H. (2021). FET-type gas sensors: A review. *Sensors and Actuators B Chemical.*, 330(76), 129240.

Huang, X., Meng, F., Pi, Z., Xu, W. and Liu, J. (2004). Gas sensing behavior of a single tin dioxide sensor under dynamic temperature modulation. *Sensors and Actuators B: Chemical* 99, 444-450.

Islam M.N., Channon R.B. (2019). Electrochemical sensors, *Bioengineering Innovative Solutions for Cancer*, 74, 47-71.

Joshi S., Dubey P.K., Kaushik B.K. (2020). Photosensor based on split gate TMD TFET using photogating effect for visible light detection. *IEEE Sensors Journal.*, 20, 6346-6353,

Khan A., Ezati P., Kim J.T., Rhim J.W. (2023). Biocompatible carbon quantum dots for intelligent sensing in food safety applications: Opportunities and sustainability. *Materials Today Sustainability*, 21(12), 100306.

Korotcenkov, G., (2007). Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice?. *Materials Science and Engineering*, 139(1), 1-23.

Majhi S.M., Mirzaei A., Kim H.W., Kim S.S., Kim T.W. (2021). Recent advances in energy-saving chemiresistive gas sensors: A review. *Nano Energy*, 79 (22).

Majhi S.M., Navale S.T., Mirzaei A., Kim H.W., Kim S.S. (2023). Strategies to boost chemiresistive sensing performance of In₂O₃-based gas sensors: an overview. *Inorganic Chemistry Frontiers.*, 10, 3428-3467.

Mondal A., Yadav P.V.K., Ashok Kumar Reddy Y. (2023). A review of device architecture engineering on various 2-D materials toward high-performance photodetectors. *Materials Today Communications*, 34.

Moulson, A.J. and Herbert, J.M. (1990). *Electroceramics*. Capman&Hall, ISBN 0-412-29490-7, 163-170.

Šetka M., Claros M., Chmela O., Vallejos S. (2021). Photoactivated materials and sensors for NO₂ monitoring. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(6) 16804-16827.

Setkus, A., Baratto, C., Comini, E., Faglia, G., Galdikas, A., Kancleris, Z., Sberveglieri, G. and Senulienė, D. (2004). Influence of metallic impurities on response kinetics in metal oxide thin film gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical* 103, 448-456.

Shi J., Jiang Y., Duan Z., Li J., Yuan Z., Tai H. (2024). Designing an optical gas chamber with stepped structure for non - dispersive infrared methane gas sensor *Sensors and Actuators A: Physical*, 367.

Tang T., Li Z., Cheng Y.F., Xu K., Xie H.G., Wang X.X., Hu X.Y., Yu H., Zhang B.Y., Tao X.W., Hung C.M., Hoa N.D., Chen G.Y., Li Y.X., Ou J.Z. (2023). Single-step growth of p-type 1D Se/2D GeSexOy heterostructures for optoelectronic NO₂ gas sensing at room temperature. *Journal of Materials Chemistry A*, 11(12) 6361-6374.

Thathsara S.K.T., Harrison C.J., Hocking R.K., Shafiei M. (2022). Photoactive semiconducting metal oxides: Hydrogen gas sensing mechanisms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(41) 18208-18227.

Tian X., Cui X., Lai T., Ren J., Yang Z., Xiao M., Wang B., Xiao X., Wang Y. (2021). Gas sensors based on TiO₂ nanostructured materials for the detection of hazardous gases: A review. *Nano Materials Science.*, 3 (4), 390-403.

Vuong, D. D., Sakai, G., Shimanoe, K. and Yamazoe, N. (2004). Preparation of grain size-controlled tin oxide sols by hydrothermal treatment for thin film sensor application. *Sensors And Actuators B: Chemical* 103, 386-391.

Wang, C., Yin, L., (2010). Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors, *Sensors*, 10, 2088-2106.

Yang B., Myung N.V., Tran T.T. (2021). 1D metal oxide semiconductor materials for chemiresistive gas sensors: A Review. *Advanced Electronic Materials*, 7(9), 1-37.

Yao C., Wu L., Li H., Xu N., Sun J., Wu J. (2022). WS₂ coating and Au nanoparticle decoration of ZnO nanorods for improving light-activated NO₂ sensing. *Applied Surface Science*, 584(5).

Yuan Z., Zhao Q., Duan Z., Xie C., Duan X., Li S. (2022). Ag₂Te nanowires for humidity-resistant trace-level NO₂ detection at room temperature. *Sensors and Actuators B Chemical*, 363.

Zhai Z., Zhang X., Hao X., Niu B., Li C. (2021). Metal–organic frameworks materials for capacitive gas sensors. *Advanced Materials Technologies*, 6 (10), 1-14.

Zipser L., Wächter F., Franke H. (2000). Acoustic gas sensors using airborne sound properties. *Sensors and Actuators B Chemical*, 68 (1) 162-167.

BÖLÜM III

Medikal Ve Biyosensör Uygulamaları Açısından MoS₂'nin Yeri

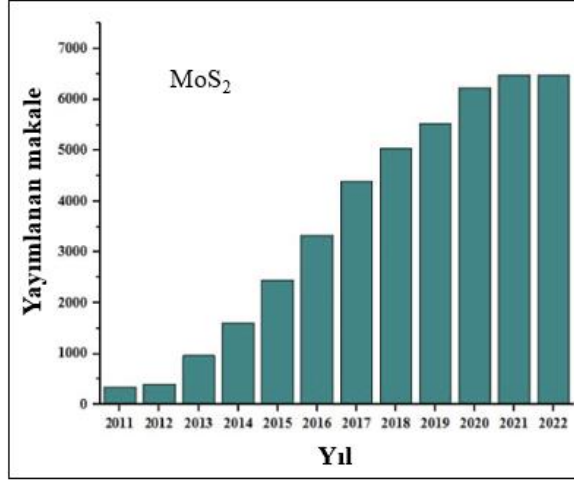
Hamit ÖZTÜRK¹

Giriş

MoS₂, kimyasal özelliklerinden ve biyoyumluluğundan yararlanarak hastalıkların tespitinde ve iyileştirilmesinde yer alabileceğine dair bazı potansiyeller ortaya koyabilmiştir. Bu alandaki literatür çalışmalarından bazılarına daha geniş bir perspektif sunulmuş bazı çalışmalar ise daha özet halinde verilmiştir.

Kimyasal, optik, elektriksel özellikleri ile birlikte özellikle biyoyumluluğundan dolayı araştırmacıların dikkatini çeken MoS₂, Şekil 1.'de gösterildiği gibi yıllara göre artan bilimsel araştırmalara konu olmuştur.

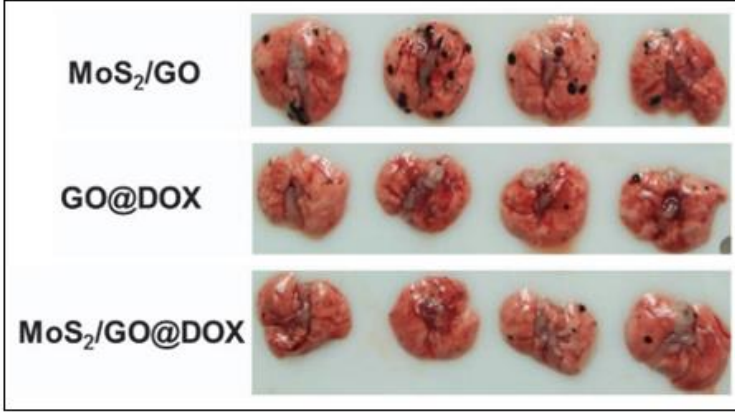
¹Dr. Öğr. Üyesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, Isparta/Türkiye, Orcid: 0000-0002-9968-6377



Şekil 1: 26 Kasım 2022 tarihine kadar Scopus verilerine göre hazırlanmış yıllara göre MoS₂ ile ilgili yayımlanan makale sayıları (Hosseini & ark., 2024)

2. Kanser Nanoterapide MoS₂'nin Yeri

Molibden disülfid/grafen oksit (MoS₂/GO) ile doksorubisinin (kemoterapötik bir ajan) akciğer kanserinin tedavi süreçlerinde kullanım potansiyeline dair çalışma literatürde bildirilmiştir (Liu & ark., 2018). Çalışmada elde edilen bulgular; seçici akciğer hedefleme, olumlu ilaç yükleme kapasitesi, yüksek tümör öldürme etkinliği ve gelişmiş biyoyumluluk gibi çok işlevli yeni MoS₂/GO nanokompozitler olarak bildirilmiştir. Liu ve arkadaşlarının (Liu & ark., 2018) yapmış oldukları bu çalışmada; MoS₂/GO nanokompozitleri hazırlanmış ve bu kompozitlerin sulu çözeltilerde homojen dağılım göstererek hem *in vitro* hem de *in vivo* olarak kabul edilebilir biyoyumluluk sağladığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 2: B16 murin melanom kanser hücrelerinin implantasyonu ile tedavi edilmiş ve tedavi edilmemiş farelerden akciğerlerdeki metastatik tümör nodüllerinin temsili görüntüleri. DOX, doksorubisin; LLC, Lewis akciğer kanseri

Bildirilen bu çalışmada bir diğer önemli nokta ise MoS₂/GO, akciğeri seçici olarak hedefleyebildiği belirtilmiştir. Başka bir deyişle, MoS₂/GO, akciğeri hedeflemede 'güdümlü füze' etkisi göstererek GO ile karşılaştırılabilir şekilde akciğere doğru belirgin bir lokalizasyon eğilimi göstermiştir. Ayrıca MoS₂/GO kompozitleri, akciğere metastaz yapma eğilimi olan kanser hücrelerine karşı güçlendirilmiş tümör öldürme etkinliği ile birlikte gelişmiş ilaç yükleme kapasitesine de sahiptir. Önemli olarak MoS₂/GO kompozitleri, farelerin akciğerlerindeki B16 murin melanom kanser hücrelerinin metastatik tümör büyümesini önemli ölçüde bastırmıştır (Şekil 2). Çalışmalarında kanser nanoterapisinde MoS₂/GO nanokompozitleri için bir yol açıldığı belirtilmiştir (Liu & ark., 2018).

3. Glikoz Tespitinde Biyosensör Olarak MoS₂'nin Yeri

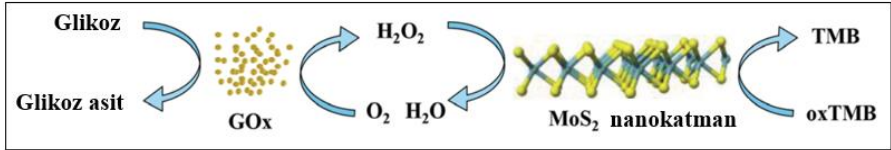
Son zamanlarda, kolorimetrik yöntemler, çıplak gözle değerlendirilebildiği için kullanım noktası uygulamaları için sağladıkları özellikle sağladıkları pratiklik hız açısından özellikle ilgi çekicidir (Saha & ark., 2012; Du & ark., 2013). Örneğin, Au nanoparçacık bazlı kolorimetrik analizler DNA'nın (Rosi & ark., 2005; Elghanian & ark., 1997) proteinlerin (Otsuka & ark., 2001), küçük moleküllerin (Ai & ark., 2009; Guo & ark., 2010), metal iyonlarının (Du & ark., 2013; Du & ark., 2013) ve anyonların (Du & ark., 2012) tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü herhangi bir karmaşık cihaza gerek yoktur. ihtiyaç duyulduğunda kolorimetrik yöntemler taşınabilir ve ucuz günlük yaşam uygulamaları için büyük potansiyel göstermektedir.

Bu amaçla, enzimimetik inorganik nanomateriyaller (Ai & ark., 2013; Sun & ark., 2013; Mu & ark., 2012; Zhang & ark., 2013) yüksek stabilite, kolay hazırlanmaları, kontrol edilebilir yapıları ve bileşimleri ve ayarlanabilir katalitik aktiviteleri nedeniyle kolorimetrik tespit için ideal ve önemli araçların yeni bir sınıfı olarak ortaya çıkmıştır.

Molibden disülfür (MoS₂), 2D ultra ince atomik katmanlı yapısıyla ilişkili benzersiz fiziksel, optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle son zamanlarda artan araştırma ilgisini çekmektedir. Şimdiye kadar lityum iyon piller, transistörler ve hidrojen çıkış reaksiyonları gibi uygulamalara araştırmacılar büyük çaba gösterdi. Lin ve arkadaşları ise (Lin & ark., 2014) ilk kez, MoS₂ nano tabakalarının içsel peroksidaz benzeri katalitik aktiviteye sahip olduğunu keşfetmişlerdir. MoS₂ nanotabakaları, mavi renkli bir reaksiyon üretmek için H₂O₂ varlığında peroksidaz substratı

3,3',5,5'- tetrametilbenzidin (TMB) reaksiyonunu katalize edebildiğini göstermişlerdir.

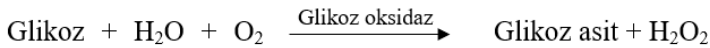
Bu bulguya dayanarak, H_2O_2 ve glikoz için oldukça hassas ve seçici bir kolorimetrik yöntem geliştirmişler (Şekil 3) ve insan serum örneklerinde glikozu tespit etmek için kullanılabileceğini göstermişlerdir.



Şekil 3: Glikoz oksidaz (GOx) ve MoS₂ nanokatman katalizli reaksiyonlar kullanılarak glikozun kolorimetrik tespitinin şematik gösterimi (Lin & ark., 2014)

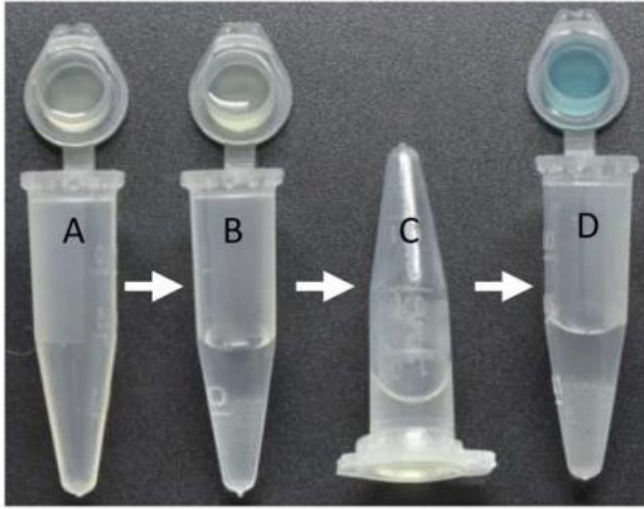
Bu çalışmalarında normal ve diyabetik serum örneklerinde glikozun görsel tespiti için basit, ucuz, aletsiz ve taşınabilir bir test kiti, görsel tespit platformu olarak agaroz hidrojel kullanılarak geliştirdikleri konseptin kanıtı olarak sunmuşlardır.

Burada glikoz oksidaz (GOx) yapısı, Tris-HCl tampon çözeltisinde glikozun glikoz asite (glikonik asit) oksidasyonunu katalize etmiş (Denklem 1) ve çözeltideki oksijen ise MoS₂ nano tabakalarının katalizi yoluyla mavi renkli bir ürün üretmek üzere TMB'yi oksitleyecek olan H_2O_2 'ye dönüşmüştür (Şekil 3).



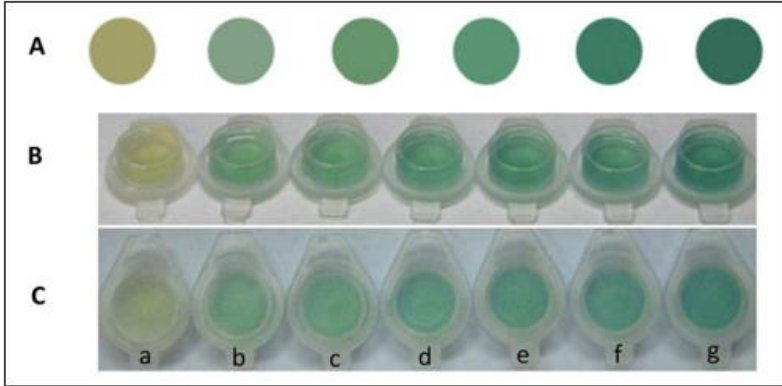
Hidrojen peroksit, GOx katalizli reaksiyonun ana ürünüdür. Önerilen kolorimetrik yöntem, (GOx) ile birleştirildiğinde, klinik

tıpta diyabet tanısı için önemli bir gösterge olan glikozun belirlenmesinde kullanılabileceğinden bahsetmişlerdir.



Şekil 4: Taşınabilir bir test kitiyle serum örneklerinde glikozun saptanmasına yönelik prosedür. (A) Test kitinin geçmeli kapağının açılması (hidrojelde soluk sarı renk). (B) test kitine seyreltilmiş serum numunesi çözeltisinin eklenmesi. (C) 37°C'de 60 dakika süreyle inkübasyondan önce geçmeli kapağın kapatılması ve test kitinin ters çevrilmesi (D) hidrojelin renk değişimini (hidrojeldeki mavi renk) gözlemlemek için test kitini tekrar baş aşağı çevirin ve geçmeli kapağı açın (Lin & ark., 2014).

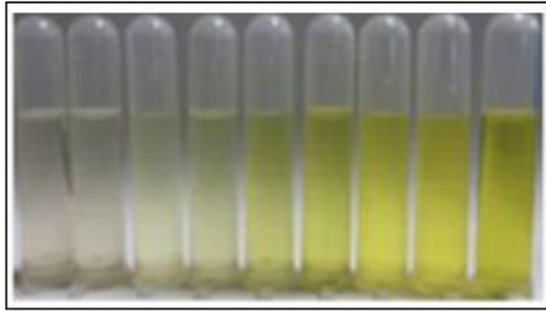
Ayrıca, görsel gözlemlerde konsantrasyonlarda bile çıplak gözle glikozu tespit etmek için uygun bir yaklaşım sunulmuştur (Şekil 4). Önerilen yöntem, insan serum örneklerinde glikozu tespit etmek için de uygulandı ve sonuçlar, geleneksel enzimatik yöntem kullanılarak elde edilenlerle iyi bir şekilde uyumluydu (Şekil 5).



Şekil 5: (A) Serum glikozu (mmol L⁻¹) için standart kolorimetrik kart (soldan sağa: 0, 3, 5, 7, 9, 12) ve testin geçme kapağını açarken farklı serum glikozu konsantrasyonlarına sahip hidrojelin fotoğrafları kiti (B) ve test kitinin (C) geçmeli kapağının kapatılması(Lin & ark., 2014). Serum örneklerinde glikoz konsantrasyonu (mmol L⁻¹): (a) boş, (b) 5,00, (c) 5,31, (d) 6,98, (e) 7,2, (f) 8,49 ve (g) 11,88.

MoS₂'nin glikoz tespitinde kullanılabilirliğine yönelik bir diğer çalışma ise Peng ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptıkları çalışmadır (Peng & ark., 2017). Bu çalışmada MoS₂ ve grafen oksit (MoS₂/GO) hibritinin içsel peroksidaz benzeri aktivitesi gösterilmiş ve hibrit yapının aynı zamanda glikozu yüksek hassasiyetle tespit etmek için de kullanılabileceği belirtilmiştir. Sonuçlar, mükemmel katalitik performansın (Şekil 6), MoS₂/GO yüzeyindeki hızlı elektron transferine ve iki bileşenin sinerjistik etkileşimine atfedilebileceğini göstermektedir. İkinci olarak görünür ışık ve yakın kızılötesi ışığın hibritin peroksidaz benzeri aktivitesi üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Sonuçlar, görünür ışıkla H₂O₂'nin tespit sınırının 10 nM'den 2,5 nM'ye düşürülebileceğini göstermektedir.

Üçüncüsü, hibrit ayrıca ışıklı ve ışısız serumdaki glikozu tespit etmek için de kullanılmıştır. Sonuçlar, hibritin serumda glikoz tespiti için yüksek seçiciliğe ve duyarlılığa sahip olduğunu ve glikoz tespit limitinin görünür ışıkla 0,83 μM 'den 65 nM'ye düştüğünü göstermektedir. Bu nedenle hibrit, yüksek hassasiyet ve seçicilikle serumda glikoz tespitinde potansiyel bir uygulamaya sahip olabilir.



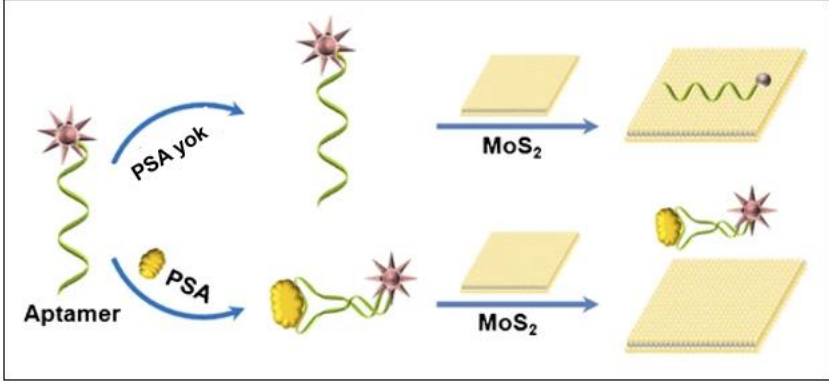
Şekil 6: Glikoz konsantrasyonunun 0'dan (sol) 50 μM 'ye (sağ) kadar artmasıyla renk değişimi (Peng & ark., 2017)

Sonuç olarak, MoS_2/GO 'nun içsel ve ışıkla güçlendirilmiş peroksidaz benzeri aktiviteye sahip olduğunu ve H_2O_2 'nin ayrışması için katalitik aktivitesinin rapor edilen diğer katalizörlerden daha yüksek olduğunu gösterdiler. MoS_2/GO 'nun yüksek katalitik aktivitesi, yüksek iletkenliğine ve iki bileşenin sinerjistik etkileşimine bağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Yeni bir peroksidaz mimetiği olarak MoS_2/GO , doğal enzimlere ve diğer mevcut alternatiflere göre kolay hazırlama, düşük maliyet ve geliştirilmiş ışık aktivitesi gibi çeşitli avantajları sayesinde tıbbi teşhis, çevresel izleme ve fotokatalizde potansiyel bir uygulamaya sahip olabilir.

4. Prostat Kanseri Teşhisinde MoS₂ Biyosensörünün Kullanımı

Prostat spesifik antijen (PSA), prostat kanserinin erken tanısı ve sonraki tedavisi için önemli ve en yaygın kullanılan biyobelirteçtir. Bir MoS₂ nanokatmanı, grafene benzer, iki boyutlu (2D) katmanlı bir nanomateryaldir. Bununla birlikte, bir MoS₂ nanokatmanı, boya etiketli tek sarmallı bir DNA probuna uygulandığında grafenden daha yüksek bir floresans söndürme kabiliyetine sahiptir. Kong ve arkadaşlarının (Kong & ark., 2015) bildirdiği bu çalışmada, PSA'yı tespit eden yeni bir aptamer işlevselleştirilmiş MoS₂ nanokatman floresan biyosensörü önermişlerdir. Aptamerin hedef PSA'ya bağlanması, MoS₂ nanotabakasıyla entegrasyonu çok zayıf hale getiren sert bir aptamer yapısını indükler. Bu, aptamer probunun nano tabaka yüzeyinden salınmasına neden olur ve söndürülmüş floresansı geri kazandırır. Bu yaklaşım, basit tasarım ve PSA'nın hızlı tespiti gibi avantajlara sahiptir. Biyosensör, PSA için 0,2 ng/mL'lik tespit limitiyle yüksek hassasiyet ve yüksek seçicilik avantajlarına da sahiptir. Biyosensör aynı zamanda tatmin edici sonuçlarla insan serum örneklerinde PSA'nın tespitinde başarıyla uygulanmıştır. Üstelik bu yöntemin, PSA ölçümü için elektrokimyasal immünolojik test gibi karmaşık ve zaman alıcı ön tedavi gerektiren sistemlere göre daha basit ve daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir (Kong & ark., 2015).

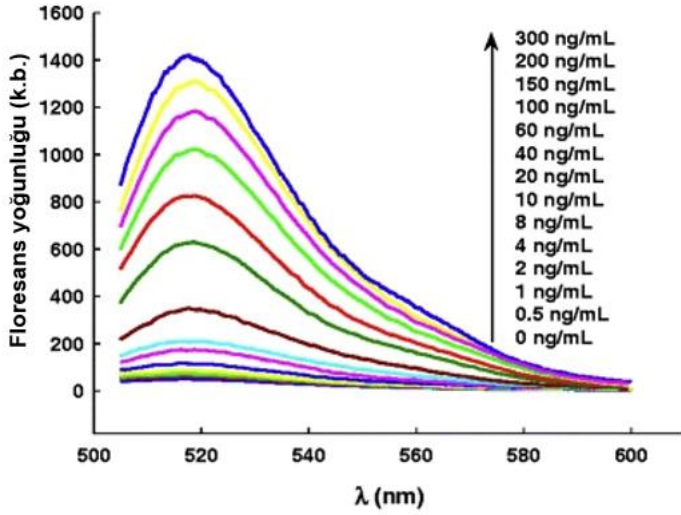


Şekil 7: Biyosensörün PSA'ya yönelik algılama stratejisi

Boya etiketli ssDNA probu;
(ssDNA: 5' TCAAAGCATTCAGTCGAGGAGAT-3'), MoS₂ nanokatman yüzeyine adsorbe edildi ve daha sonra boyanın floresansı söndürüldü.

Bu çalışmada, MoS₂ nanokatman aptamer moleküllerini adsorbe etmek için bir nanoplatform görevi gördü ve ayrıca biyolojik bir prob olarak kullanıldı. Prostat kanserinin erken teşhisinde PSA seviyesinin tespit edilmesinin önemi dikkate alınarak tasarlanan aptamer işlevselleştirilmiş MoS₂ nanokatman floresan biyosensörü bu prosedür için başarıyla kullanıldı. Biyosensörün PSA'ya yönelik algılama stratejisi Şekil 7.'de gösterilmektedir.

Önerilen algılama sisteminin hassasiyetini değerlendirmek için, farklı PSA konsantrasyonlarının varlığında floresans artışları optimize edilmiş koşullar altında kaydedildi. Şekil 8'de gösterildiği gibi PSA'nın yokluğunda algılama sisteminin arka plan floresansı çok düşüktür.



Şekil 8: farklı PSA konsantrasyonlarının varlığında floresans artışları

5. MoS₂'nin Medikal ve Biyosensör Uygulamalarına Diğer Bazı Örnekler

MoS₂, yukarıda ayrıntıları sunulmaya çalışılan medikal ve biyosensör uygulamalarına ek olarak bu alanda daha farklı biyosensör uygulamalarına sahiptir. Yukarıda ayrıntıları verilen çalışmaların haricindeki diğer çalışmalar özet halinde burada bahsedilecektir.

MoS₂, kimyasal ve fotoluminesans özelliklerinden yararlanarak mikroakışkan cihazlarda ve immünosensörlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir (Faramarzi & ark., 2019).

Salmonella typhimurium'u (S.typhimurium) tespit etmek için MoS₂ nano tabakaları mikroakışkan elektrot ile birlikte kullanılmıştır. Önerilen cihaz hızlı tespit ve yüksek hassasiyete sahip

olduğu ve E. coli, Kolera gibi diğerk gıdayla ilgili patojenler için kullanılabileceği bildirilmiştir (Singh & ark., 2018).

MoS₂'nin boya sındırme özelliklerine bağlı olarak, nanokatmanları, tek iplik ekli DNA'yı (ssDNA) tespit etmek için mikroakışkan cihazlarla birlikte kullanıldı; bu çalışmada MoS₂, birkaç dakika içinde yüksek floresans sındırme gösterdi, ayrıca ssDNA ve çift iplikli DNA'ya (dsDNA) karşı farklı davranıyor) dsDNA'nın boyasını etkilemediği bildirilmiştir (Liu & ark., 2017). Bu durum başta kanser olmak üzere çeşitli DNA ve hastalıkların tespitinin  n n  açmaktadır.

Amino asitlerin tespiti açısından bakıldığında MoS₂  zerine bu noktada da çalışma yapılmıştır (Barati & ark., 2018). Diyabet, sindirim bozuklukları ve kanser gibi pek çok hastalık amino asit zincirinde değişikliğe neden olmaktadır. Amino asitler proteinlerin yapı taşlarıdır. Amino asitlerin tespiti DNA'dan çok daha karmaşıktır, çünkü DNA durumunda dört yerine 20 bazları vardır ve dizilerinin değiştirilmesi farklı türde proteinler verir. Nanogözenekler yakın zamanda DNA ve amino asitlerin tespitinde kullanılmıştır. Bu çalışmada burada amino asit bir nanogözenek içinden geçmeye zorlanır, ardından iyonik akım ve kalış süresi ölçülür. Her amino asit veya DNA'nın farklı bir iyon akımı ve kalış süresi vardır; ancak amino asitler açısından çok benzerdirler, bu da onları ayırt etmeyi zorlaştırır. Daha sonra amino asitlerin dizisini tespit etmek için makine öğrenimi teknikleri kullanılır. Biyomoleküller MoS₂'ye kolayca yapışır, böylece kolayca tespit edilebilirler. Ayrıca daha iyi sinyal-gürültü oranına sahiptirler. Makine  ğrenmeli MoS₂ nanog zeneği, çeşitli amino asit türlerini

%99,6'ya kadar yüksek doğrulukla ve çok kısa sürede (birkaç ps) tespit etmek için kullanılır (Barati & ark., 2018).

Shi ve arkadaşlarının yapmış olduğu ilginç bir araştırmada bakteri ve biyofilmleri yok etmek için nanodelikle zenginleştirilmiş MoS₂ (NR MoS₂) nanotabakaları kullanıldı. Tedavi, NR-MoS₂ ile bakteriler arasındaki elektron taşınmasına dayanmaktadır. Sonuçlar in vivo ve vitro olarak mükemmeldi ve MoS₂ yüksek biyouyumluluk gösterdi. Antimikrobiyal nanomateriyallerin arkasındaki fikir, antibakteriyel olarak hareket etmeleri ancak tipik antibiyotiklerde meydana gelen direnç oluşturmamasıdır (Shi & ark., 2021).

6. Sonuç

Bu çalışmada MoS₂ üzerine yapılmış medikal ve biyosensör uygulamaları açısından literatürde yer alan çeşitli örnekler verilerek bu konuda bilgiler sunulmuştur. Bazı biyosensör uygulamalarına ait ayrıntılar verilerek geliştirilen aygıtların çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Bahsedilen bu çalışmalarda en önemli noktalardan birisi olarak MoS₂ tabanlı geliştirilen veya fikir olarak öne sürülen bu yöntem ve teknolojilerin pratik, hızlı ve doğru sonuçlar verebilmesi olduğuna dikkat çekilmiştir.

Kaynakça

Ai, K., Liu, Y., & Lu, L. (2009). Hydrogen-bonding recognition-induced color change of gold nanoparticles for visual detection of melamine in raw milk and infant formula. *Journal of the American Chemical Society*, 131(27), 9496-9497.

Ai, L., Li, L., Zhang, C., Fu, J., & Jiang, J. (2013). MIL-53 (Fe): a metal-organic framework with intrinsic peroxidase-like catalytic activity for colorimetric biosensing. *Chemistry-A European Journal*, 19(45).

Barati Farimani, A., Heiranian, M., & Aluru, N. R. (2018). Identification of amino acids with sensitive nanoporous MoS₂: towards machine learning-based prediction. *npj 2D Materials and Applications*, 2(1), 14.

Du, J., Jiang, L., Shao, Q., Liu, X., Marks, R. S., Ma, J., & Chen, X. (2013). Colorimetric detection of mercury ions based on plasmonic nanoparticles. *Small*, 9(9-10), 1467-1481.

Du, J., Shao, Q., Yin, S., Jiang, L., Ma, J., & Chen, X. (2012). Colorimetric chemodosimeter based on diazonium-gold-nanoparticle complexes for sulfite ion detection in solution. *Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)*, 8(22), 3412-3416.

Du, J., Sun, Y., Jiang, L., Cao, X., Qi, D., Yin, S., ... & Chen, X. (2011). Flexible colorimetric detection of mercuric ion by simply mixing nanoparticles and oligopeptides. *small*, 7(10), 1407.

Du, J., Zhu, B., & Chen, X. (2013). Urine for plasmonic nanoparticle-based colorimetric detection of mercury ion. *Small*, 9(24), 4104-4111.

Elghanian, R., Storhoff, J. J., Mucic, R. C., Letsinger, R. L., & Mirkin, C. A. (1997). Selective colorimetric detection of polynucleotides based on the distance-dependent optical properties of gold nanoparticles. *Science*, 277(5329), 1078-1081.

Faramarzi, V., Ahmadi, V., Fotouhi, B., & Abasifard, M. (2019). A potential sensing mechanism for DNA nucleobases by optical properties of GO and MoS₂ Nanopores. *Scientific reports*, 9(1), 6230.

Guo, L., Zhong, J., Wu, J., Fu, F., Chen, G., Zheng, X., & Lin, S. (2010). Visual detection of melamine in milk products by label-free gold nanoparticles. *Talanta*, 82(5), 1654-1658.

Hosseini, S. M., & Safarifard, V. (2024). MoS₂@ MOF composites: Design strategies and photocatalytic applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 169, 107892.

Kong, R. M., Ding, L., Wang, Z., You, J., & Qu, F. (2015). A novel aptamer-functionalized MoS₂ nanosheet fluorescent biosensor for sensitive detection of prostate specific antigen. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 407, 369-377.

Lin, T., Zhong, L., Guo, L., Fu, F., & Chen, G. (2014). Seeing diabetes: visual detection of glucose based on the intrinsic peroxidase-like activity of MoS₂ nanosheets. *Nanoscale*, 6(20), 11856-11862.

Liu, Y., Peng, J., Wang, S., Xu, M., Gao, M., Xia, T., ... & Liu, S. (2018). Molybdenum disulfide/graphene oxide nanocomposites show favorable lung targeting and enhanced drug

loading/tumor-killing efficacy with improved biocompatibility. *NPG Asia Materials*, 10(1), e458-e458.

Liu, Y., Zhang, J., Shen, Y., Yan, J., Hou, Z., Mao, C., & Zhao, W. (2017). MoS₂ quantum dots featured fluorescent biosensor for multiple detection of cancer. *RSC advances*, 7(86), 54638-54643.

Mu, J., Wang, Y., Zhao, M., & Zhang, L. (2012). Intrinsic peroxidase-like activity and catalase-like activity of Co₃O₄ nanoparticles. *Chemical Communications*, 48(19), 2540-2542.

Otsuka, H., Akiyama, Y., Nagasaki, Y., & Kataoka, K. (2001). Quantitative and reversible lectin-induced association of gold nanoparticles modified with α -lactosyl- ω -mercapto-poly (ethylene glycol). *Journal of the American Chemical Society*, 123(34), 8226-8230.

Peng, J., & Weng, J. (2017). Enhanced peroxidase-like activity of MoS₂/graphene oxide hybrid with light irradiation for glucose detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 89, 652-658.

Rosi, N. L., & Mirkin, C. A. (2005). Nanostructures in biodiagnostics. *Chemical reviews*, 105(4), 1547-1562.

Saha, K., Agasti, S. S., Kim, C., Li, X., & Rotello, V. M. (2012). Gold nanoparticles in chemical and biological sensing. *Chemical reviews*, 112(5), 2739-2779.

Shi, T., Hou, X., Guo, S., Zhang, L., Wei, C., Peng, T., & Hu, X. (2021). Nanohole-boosted electron transport between nanomaterials and bacteria as a concept for nano-bio interactions. *Nature communications*, 12(1), 493.

Singh, C., Ali, M. A., Kumar, V., Ahmad, R., & Sumana, G. (2018). Functionalized MoS₂ nanosheets assembled microfluidic immunosensor for highly sensitive detection of food pathogen. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 259, 1090-1098.

Sun, X., Guo, S., Chung, C. S., Zhu, W., & Sun, S. (2013). A sensitive H₂O₂ assay based on dumbbell-like PtPd-Fe₃O₄ nanoparticles. *Advanced Materials*, 25(1), 132-136.

Zhang, L., Han, L., Hu, P., Wang, L., & Dong, S. (2013). TiO₂ nanotube arrays: intrinsic peroxidase mimetics. *Chemical Communications*, 49(89), 10480-10482.

BÖLÜM I

MoS₂ Tabanlı İnce Film Yarıiletken Zehirli Gaz Sensörleri

Hamit ÖZTÜRK¹

Giriş

Günümüzde artan antropojenik faaliyetler nedeniyle insanın sağlıklı yaşam alanlarını ve doğal çevrenin sürdürülebilirliğini olumsuz etkileyen risk faktörleri önemli ölçüde artmıştır. Örneğin nüfusun artmasıyla endüstrinin gelişmesi ve kara yolu taşımacılığının hızla büyümesi atmosfere salınan toksik kimyasalların ve zehirli gazların artmasına sebep olmuştur. hava kirliliği insan beynine zarar verir, karar almayı ve günlük görevleri yerine getirmeyi zorlaştırır, toplam insan ömrünü kısaltır ve beynin bilişsel yeteneklerini bozarak karar verme gibi günlük işlerinde

¹Dr. Öğr. Üyesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, Isparta/Türkiye, Orcid: 0000-0002-9968-6377

sorunlara yol açar (Zhang & ark., 2018; Zivin 2012). Dünya Sağlık Örgütü (WHO) artan hava kirliliğini astım, solunum yolu enfeksiyonları (özellikle çocuklarda) ve yüksek oranda kardiyovasküler hastalıklar, felç, solunum rahatsızlıkları ve kanserle ilişkilendirmektedir (Al-Kindi & ark., 2020).

Zehirli gazların tayini ve tespiti bazı meslek grupları ve çalışma ortamları açısından da hayati önem taşımaktadır. Örneğin maden ocaklarında zehirli bazı gazların aniden ortaya çıkması sebebiyle bu zehirli gazların hızlı bir şekilde tespiti hayati önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra yer altı maden işletmelerinde de bazı durumlarda gerçekleştirilen patlatmalar sonucu ortaya NO_x ve NH_3 gibi zararlı gazlar ortaya çıkmakta ve burada çalışan işçiler bu zehirli gazlara maruz kalmaktadır (Cronje & ark., 2010). Ek olarak yer altı maden ocaklarında büyük dizel araçların kullanılması sonucu NO_2 gibi zehirli bazı gazları içeren yoğun egzoz dumanı yine maden işçilerinin maruz kaldığı bir diğer çalışma ortamıdır (Kofanov & ark., 2020).

Zehirli gazlara maruz kalınabilen çalışma ortamları açısından bakıldığında boya sanayi gibi kimyasal üretim yapan fabrikalar veya kapalı mimariye sahip örtü altı sebze meyve yetiştiriciliğinde kullanılan azot bazlı gübreler ve bitkiyi zararlılardan korumaya yönelik olarak kullanılan pestisit ve insektisitler içerisinde bulunan azotlu bileşikler sonucunda azot oksitli (NO_x) sağlığa zararlı gaz salınımlarına sebebiyet verebilmektedir (Akiyama & ark., 2000). Bu durumun çalışanlar açısından solunum yolu hastalıkları (Linaker ve Smedley., 2002), akciğer hasarı (Shetty & ark., 2023), göz ve boğaz hasarı (Kumar & ark., 2023) ve kalp sağlığı üzerine olumsuz etkileri (Henning 2024) literatürde bildirilmiştir.

Tüm bu bahsedilen nedenler sebebiyle son birkaç yılda insan sağlığını ve çevreyi korumaya yönelik olarak hava kalitesinin izlenmesi ve takibi noktasında büyük bir ilgi vardır.

Gaz sensörleri, tehlikeli inorganik ve organik gazları tespit etmek için hayati öneme sahip olan elektronik cihazlardan biridir. Farklı hedef gazlara maruz kaldığında gaz sensörlerinin elektronik, elektriksel ve optik özellikleri gibi bazı fiziksel özellikleri değiştirebilir. Bu değişikliklerin algılanması ve izlenmesi gaz sensörü teknolojisinin temelini oluşturur.

Tehlikeli gazlar arasında NO_2 , NO , NH_3 , H_2 , CO_2 gibi inorganik gazlar ve metan, trietilamin, benzen gibi organik gazlar yer almaktadır (Timmer & ark., 2005; Liu & ark., 2017; Binions & ark., 2013; Liu & ark., 2012; Stetter ve Li 2008; Hübert & ark., 2011). Gaz sensörleri, endüstriyel ve tarımsal işlemlerden havacılığa, askeriye ve tıbbi teşhise kadar birçok farklı uygulama alanında önemli bir rol oynamaktadır (Kohl 2001; Arshak & ark., 2004; Yunusa & ark., 2014; Yamazoe 2005).

Gaz sensörleri teknolojisi açısından bakıldığında bu sensörler aynı zamanda nem sensörü olarak da kullanım alanlarına sahiptir. Yüksek hacimli gıda depolama alanlarında nem oranının sürekli olarak izlenmesi gıdanın bozulmaması ve son tüketiciye sağlık açısından güvenle ulaşabilmesi önemlidir.

Gaz sensörleri sağlık alanında da kullanımları mevcuttur. İnsanın nefesi bireyin sağlığı ile ilgili bazı bilgiler taşır. Örneğin insan nefesinin frekansı (nefes alma verme sıklığı), tidal hacmi (nefesle akciğere dolan havanın miktarı) ve alınan nefes ile dokulara oksijen geçiş miktarını ifade eden pulmoner semptomların izlenmesi

sonucu bazı hastalıkların tespiti ve teşhisi için kullanılabilir. Veya bazı hastalık durumlarında insan nefesi içerisinde uçucu organik bileşikler (VOC) ortaya çıkabilmektedir. Nefes yoluyla hastalık teşhisine bir örnek olarak akciğer kanseri biyobelirteçleri olarak kabul edilen ve hastalık durumunda bireyin nefesinde ortaya çıkan izopren (C_5H_8) ve metil siklopentan (C_6H_{12}) gibi hidrokarbonlar ile 1-propanol (C_3H_8O) ve 2-propenal gibi hidrokarbon türevlerinden bahsedebiliriz (Zhao & ark., 2018).

2. Gaz Sensörü Olarak MoS_2 ' nin Kullanımı

Son 50 yılda gaz sensörü olarak kondüktometrik, optik, elektrokimyasal, termoelektrik ve akustik gibi çeşitli aygıt teknolojileri kullanılmaktadır (Korotcenkov 2013; Baron ve Saffell 2017; Bogue 2015; Askim & ark., 2013; Yunusa & ark., 2014). Ancak yarı iletken tabanlı gaz sensörleri; kolay üretim süreci, düşük maliyeti ve istenen minyatürleştirme ile geleneksel tümleşik devre teknolojisine entegrasyon kabiliyeti sayesinde algılama teknolojisine öncülük etme noktasında birincil potansiyele sahiptir (Balouria & ark., 2013; Kumar & ark., 2017).

Gaz sensörü teknolojisinde günümüz araştırma çabaları, oda sıcaklığında çalışan yüksek performanslı gaz sensörü geliştirmeye odaklanmıştır. Gaz sensörü uygulamaları açısından yüksek sıcaklıklarda bazı yanıcı zehirli gazların patlaması nedeniyle sensörün oda sıcaklıklarında kullanılabilir olması da ayrı bir öneme sahiptir. Son yıllarda yarı iletken malzeme olan MoS_2 , oda sıcaklığında çeşitli analitlerin tespiti, yüksek yüzey/hacim oranı nedeniyle gaz sensörü olarak kullanımı açısından büyük ilgi görmüştür (Kumar & ark., 2017).

Yarı iletken tabanlı gaz sensörlerinden birisi olan MoS_2 , ~ 1.9 eV' luk yasak enerji aralığına sahip, doğrudan bant geçişli (Mak & ark., 2010), aygıt uygulamaları açısından uygun optik, kimyasal ve elektriksel özellikleri nedeniyle aynı zamanda alan etkili transistörler (Min & ark., 2013), lityum-iyon piller (Stephenson & ark., 2014; Cheng & ark., 2014) ve kataliz (Yuwen & ark., 2014) gibi çeşitli bilimsel çalışma alanlarına konu olmuştur. MoS_2 malzemesine yapılan bazı elementel katkılarları sayesinde (Au, Cl, N, Ru, Pt, Si, B, P) sensör özelliklerini iyileştirdiği literatürde kaydedilmiştir (Burman & ark., 2021; Jiang & ark., 2021; Kazemi & ark., 2021; Chen & ark., 2018; Gber & ark., 2022).

MoS_2 gaz sensörü oda sıcaklığında çalışabilmesinin yanı sıra sensöre ait hassasiyet, seçicilik, kararlılık ve hız (response/recovery time) gibi parametreler noktasında beklentileri karşılayabilen en iyi gaz sensörü adaylarından birisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

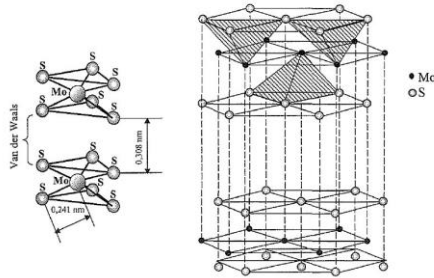
MoS_2 özelinde bakıldığında zehirli gazların tespitinin yanı sıra nem sensörü olarak kullanım alanlarından birisi olarak da karşımıza çıkmaktadır. Cilt hücrelerinin çökmesi sonucu ciltte gözlemlenen kuruluğun miktarının tespiti ve uygun tedavi yönteminin belirlenmesi amacıyla ciltteki nem oranının hassas cihazlarla tespit edilmesi önemlidir (Wu & ark., 2019). Bu nokta açıdan bakıldığında MoS_2 nin bu beklentiyi de karşılayabilecek potansiyeli barındırdığının bir ölçüsü olarak Mondal ve arkadaşları (Mondal & ark., 2020) ile Qui ve arkadaşları (Qui & ark., 2019) MoS_2 'yi cilt nemi izleme sensörü olarak kullandıklarını bildirmişlerdir.

2.1. MoS₂'nin Kristal ve Moleküler Bağ Yapısı

MoS₂'nin kristal yapısı ile grafit birbirine benzerdir. MoS₂ yapısında yer alan molibden atomlarına (Mo) her biri 0,241 nm uzaklıkta olan 3 adet sülfür atomu (S) bulunur ve bir prizma şeklini oluştururlar. Ayrıca prizmalar arasındaki mesafe 0,308 nm'dir (Şekil 1'de gösterilmiştir). MoS₂'nin kristal düzlemleri arasında ise zayıf Van der Waals bağları bulunur. Komşu düzlemlerde bulunan sülfür atomları bu zayıf Van der Waals bağlarından sorumludur.

Molibden ve sülfür atomları arasında ise güçlü kovalent bağlar bulunmaktadır. Mo ve S arasındaki bu bağlar Van der Waals bağlarına göre daha güçlü bir şekilde yapıda yer almaktadır (Bunshah 2001).

MoS₂ yapısı, Mo atomunun altı adet S atomuna kovalent bağlı olduğu ve sandviç şeklinde bir yapı oluşturduğu S-Mo-S şeklinde üç atomik katman içerir. Bununla birlikte MoS₂ yapısı, S atomları tarafından sonlandırılan yapısı nedeniyle 'açıkta kalan bağın' (dangling bond) olmaması nedeniyle kimyasal olarak da inerttir (Wang & ark., 2013).

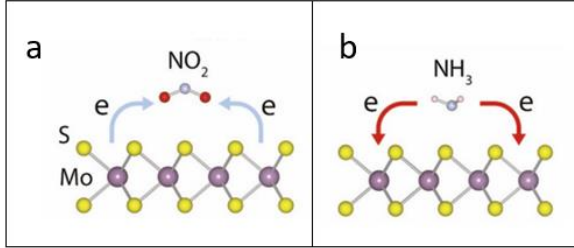


Şekil 1: MoS₂'nin kristal yapısı (Çiçek 2019)

2.2. MoS₂'nin Gaz Algılama Mekanizması

MoS₂'nin gaz sensörü uygulamasına bakıldığında ise ilk sensör cihazı 2012 yılında MIT laboratuvarında tek bir kristalden mekanik olarak ayrılan tek ve birkaç katmanlı katkısız MoS₂ filmlerinden üretildi (Li & ark., 2012). Bu pul pul dökülmüş (exfoliated) filmler NO gazına maruz bırakıldığında dirençleri arttı, bu da MoS₂'den adsorbanta (sensör yüzeyine gelen gaz) yük transferinin gerçekleştiği şeklinde yorumlandı.

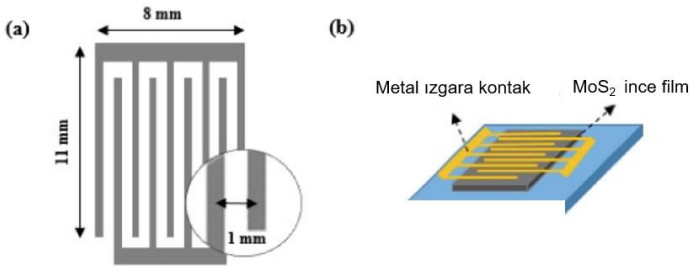
Gaz sensörlerinde algılama mekanizması sensörün yüzeyinde yer alan iki ayrı metalik ızgara kontak (interdigitated contact) uçlarına sabit voltaj uygulanarak sensör yüzeyine analit gaz gönderildiği esnada zamana bağlı olarak sensörün akım veya direncindeki değişim izlenmesidir. Sensör yüzeyine gelen gaz sensör yüzeyine ya yük aktarır ki bu durumda sensörün elektriksel direnci düşer veya sensör yüzeyinden gaza doğru bir yük akışı gerçekleşir ki bu durumda da sensörün direnci artar.



Şekil 2: MoS₂ yüzeyi ile a) NO₂ ve b) NH₃ gazlarının katı-gaz arayüzey etkileşiminde yük transfer yönünün şematik gösterimi (Cho & ark., 2015)

Bu duruma örnek teşkil etmesi açısından Şekil 2.a.' da MoS_2 yüzeyine NO_2 gazı gönderildiğinde sensör yüzeyinden NO_2 'ye doğru yük transferi gerçekleşir. Bu durumda NO_2 gazına maruz kalan sensörün elektriksel direncinde artma gözlemlenir.

NH_3 gazına maruz kalan MoS_2 ise NH_3 gazından kendisine doğru yük geçişi sağlayarak sensörün direncinde düşme sağlar (Şekil 2.b.).

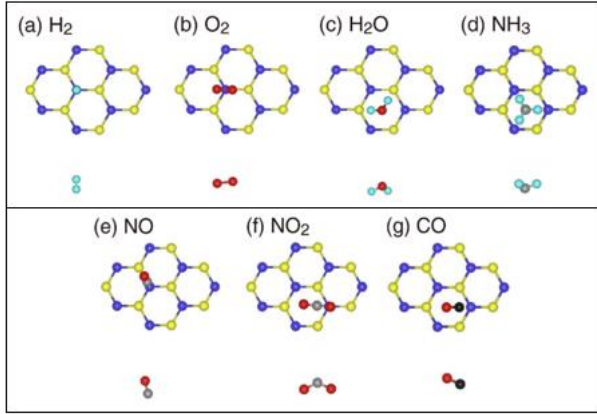


Şekil 3: a) Metalik ızgara (interdigitated) kontak şematik gösterimi
b) MoS_2 ince film sensör yapısı (Ni & ark., 2023)

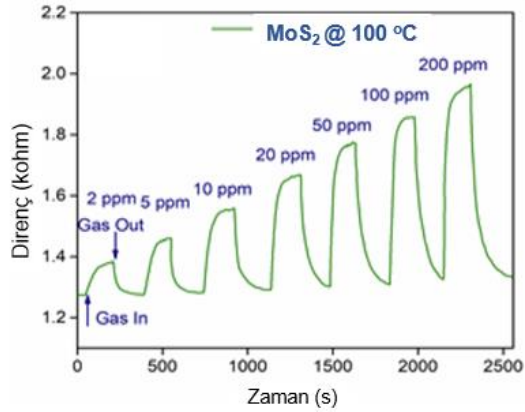
MoS_2 yüzeyi ile yüzeye gelen farklı gaz moleküllerinin katı-gaz ara yüzey bölgesinde moleküler düzeyde etkileşimi Şekil 4.'de şematik olarak gösterilmektedir. Burada her bir farklı gaz molekülünün sensör yüzeyi ile yük transferi için etkileşimi esnasında farklı yönelimleri benimsediği görülmektedir. H_2 gaz molekülü tek katmana dik bir eksene sahipken O_2 'nin ekseni, kütle merkezi Mo üstünde olacak şekilde tek katmana neredeyse paraleldir.

H_2O ve NH_3 tercihen H bölgesinden adsorbe edilir. H-O bağlarının H atomlarının tek tabakayı işaret ettiği eğik yönelimi benimsediği H_2O konfigürasyonunun aksine, NH_3 'ün tüm H atomları

tek tabakadan uzağa doğru yönelir. NO_2 ise MoS_2 'ye yakın O atomlarıyla bağlanır (Yue & ark., 2013).



Şekil 4: MoS_2 yüzeyi ile yüzeye gelen farklı gaz moleküllerinin katı-gaz ara yüzey bölgesinde moleküler düzeyde etkileşimi şematik gösterimi. Burada mavi ve sarı toplar Mo ve S atomlarını temsil ederken siyanin, kırmızı, gri ve siyah toplar sırasıyla H, O, N ve C atomlarını temsil eder (Yue & ark., 2013).



Şekil 5: MoS_2 gaz sensörünün NO_2 gazını algılaması (Tyagi & ark., 2022)

Şekil 5.' de verilen grafikte ppm mertebesinde farklı gaz akış hızlarına sahip NO₂ gazının sensörün direncinde oluşturduğu değişimin zamana bağlı olarak değişim grafiği literatürden alınan bir örnek ile gösterilmiştir. Grafikte verilen Gas in noktası gaz akışının başladığı yani NO₂ gazının sensöre gönderildiği noktayı temsil ederken buna bağlı olarak sensör direncindeki artış grafikten açıkça görülmektedir. Yine aynı grafikte verilen Gas out noktası ise sensör yüzeyine gönderilen gaz akışının durduğu dolayısıyla sensör direncinin tekrar düşmeye başladığı noktayı temsil etmektedir (Tyagi & ark., 2022).

3. Sonuç

Bu çalışmada artan nüfus ile insan eliyle atmosfere salınan zehirli gazların sebepleri olarak ulaşımaya bağlı egzoz gazları ve endüstri kaynaklı zehirli gazlara dikkat çekilmiştir. Bunun yanı sıra tarımda, sanayide, maden endüstrisinde ve insanların çeşitli çalışma alanlarında maruz kaldıkları olası zehirli gazlar ve bu gazların erken tespit ve teşhisinin öneminden kaynaklı geliştirilen çeşitli teknolojilerden birisi olan yarıiletken temelli gaz sensörleri arasında yer alan MoS₂ sensör teknolojisi anlatılmıştır. Ek olarak MoS₂ sensör gıda depolama ve güvenliğinden sağlık alanına kadar uzanan geniş potansiyel kullanım alanlarına da ayrıca değinilmiştir.

Genel hatlarıyla MoS₂ temelli yarıiletken ince film sensör aygıtının çalışma prensibi katı-gaz ara yüzey etkileşimleri ve bu etkileşim esnasında gerçekleşen yük transferlerine ve yönüne bağlı olarak sensörde meydana gelen değişimlerin izlenme süreçleri açıklanmaya çalışılmıştır. Bu çalışma en genel anlamda MoS₂ temelli ince film zehirli gaz sensörleri ile ilgili olarak geniş bir literatür araştırmasına dayanılarak sunulmuştur.

Kaynakça

Akiyama, H., Tsuruta, H., & Watanabe, T. (2000). N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere-Global Change Science*, 2(3-4), 313-320.

Al-Kindi, S. G., Brook, R. D., Biswal, S., & Rajagopalan, S. (2020). Environmental determinants of cardiovascular disease: lessons learned from air pollution. *Nature Reviews Cardiology*, 17(10), 656-672.

Arshak, K., Moore, E., Lyons, G. M., Harris, J., & Clifford, S. (2004). A review of gas sensors employed in electronic nose applications. *Sensor review*.

Askim, J. R., Mahmoudi, M., & Suslick, K. S. (2013). Optical sensor arrays for chemical sensing: the optoelectronic nose. *Chemical Society Reviews*, 42(22), 8649-8682.

Balouria, V., Samanta, S., Singh, A., Debnath, A. K., Mahajan, A., Bedi, R. K., ... & Gupta, S. K. (2013). Chemiresistive gas sensing properties of nanocrystalline Co₃O₄ thin films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 176, 38-45.

Baron, R., & Saffell, J. (2017). Amperometric gas sensors as a low cost emerging technology platform for air quality monitoring applications: A review. *ACS sensors*, 2(11), 1553-1566.

Binions, R., Naik, A. J. T., Semiconductor Gas Sensors (Eds: R. Jaaniso, O. K. Tan), Woodhead Publishing 2013, pp. 433–466.

Bogue, R. (2015). Detecting gases with light: A review of optical gas sensor technologies. *Sensor Review*, 35(2), 133-140.

Bunshah, F.R., 2001. Handbook Of Hard Coatings. USA, Noyes Publications / William Andrew Publishing, LLC. USA.

Burman, D., Raha, H., Manna, B., Pramanik, P., & Guha, P. K. (2021). Substitutional doping of MoS₂ for superior gas-sensing applications: a proof of concept. *ACS sensors*, 6(9), 3398-3408.

Chen, D., Zhang, X., Tang, J., Cui, H., & Li, Y. (2018). Noble metal (Pt or Au)-doped monolayer MoS₂ as a promising adsorbent and gas-sensing material to SO₂, SOF₂ and SO₂F₂: A DFT study. *Applied Physics A*, 124, 1-12.

Cheng, Y., Nie, A., Zhang, Q., Gan, L. Y., Shahbazian-Yassar, R., & Schwingenschlogl, U. (2014). Origin of the phase transition in lithiated molybdenum disulfide. *ACS nano*, 8(11), 11447-11453.

Cho, B., Hahm, M. G., Choi, M., Yoon, J., Kim, A. R., Lee, Y. J., ... & Kim, D. H. (2015). Charge-transfer-based as sensing using atomic-layer MoS₂. *Scientific reports*, 5(1), 8052.

Cronje, D. C. (2010). *Exposure of workers to ammonia and oxides of nitrogen from blasting fumes in an underground mining setup* (Doctoral dissertation, North-West University).

Çiçek H. 2019. TÜBİTAK 3501 projesi: TiNi/MoS₂ Fonksiyonel Kaplamaların Üretilmesi ve Karakterizasyonu.

Gber, T. E., Louis, H., Owen, A. E., Etinwa, B. E., Benjamin, I., Asogwa, F. C., ... & Eno, E. A. (2022). Heteroatoms (Si, B, N, and P) doped 2D monolayer MoS₂ for NH₃ gas detection. *RSC advances*, 12(40), 25992-26010.

Henning, R. J. (2024). Particulate matter air pollution is a significant risk factor for cardiovascular disease. *Current Problems in Cardiology*, 49(1), 102094.

Hübert, T., Boon-Brett, L., Black, G., & Banach, U. (2011). Hydrogen sensors—a review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 157(2), 329-352.

Jiang, T., He, Q., Bi, M., Chen, X., Sun, H., & Tao, L. (2021). First-principles calculations of adsorption sensitivity of Au-doped MoS₂ gas sensor to main characteristic gases in oil. *Journal of Materials Science*, 56(24), 13673-13683.

Kazemi, A., Rodner, M., Fadavieslam, M. R., Kaushik, P. D., Ivanov, I. G., Eriksson, J., & Yazdi, G. R. (2021). The effect of Cl- and N-doped MoS₂ and WS₂ coated on epitaxial graphene in gas-sensing applications. *Surfaces and Interfaces*, 25, 101200.

Kofanov, O., Vasylykevych, O., Kofanova, O., Zozul'ov, O., Kholkovsky, Y., Khrutba, V., & Bobryshov, O. (2020). Mitigation of the environmental risks resulting from diesel vehicle operation at the mining industry enterprises. *Mining of Mineral Deposits*.

Kohl, D. (2001). Function and applications of gas sensors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(19), R125.

Korotcenkov, G. (2013). Handbook of gas sensor materials. *Conventional approaches*, 1.

Kumar, M., Kumar, R., Rajamani, S., Ranwa, S., Fanetti, M., Valant, M., & Kumar, M. (2017). Efficient room temperature hydrogen sensor based on UV-activated ZnO nano-network. *Nanotechnology*, 28(36), 365502.

Kumar, P., Singh, A. B., Arora, T., Singh, S., & Singh, R. (2023). Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management. *Science of The Total Environment*, 872, 162163.

Li, H., Yin, Z., He, Q., Li, H., Huang, X., Lu, G., ... & Zhang, H. (2012). Fabrication of single-and multilayer MoS₂ film-based field-effect transistors for sensing NO at room temperature. *small*, 8(1), 63-67.

Linaker, C., & Smedley, J. (2002). Respiratory illness in agricultural workers. *Occupational medicine*, 52(8), 451-459.

Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., & Ning, H. (2012). A survey on gas sensing technology. *Sensors*, 12(7), 9635-9665.

Mak, K. F., Lee, C., Hone, J., Shan, J., & Heinz, T. F. (2010). Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor. *Physical review letters*, 105(13), 136805.

Min, S. W., Lee, H. S., Choi, H. J., Park, M. K., Nam, T., Kim, H., ... & Im, S. (2013). Nanosheet thickness-modulated MoS₂ dielectric property evidenced by field-effect transistor performance. *Nanoscale*, 5(2), 548-551.

Mondal, S., Kim, S. J., & Choi, C. G. (2020). Honeycomb-like MoS₂ nanotube array-based wearable sensors for noninvasive detection of human skin moisture. *ACS applied materials & interfaces*, 12(14), 17029-17038.

Ni, P., Dieng, M., Vanel, J. C., Florea, I., Bouanis, F. Z., & Yassar, A. (2023). Liquid Shear Exfoliation of MoS₂: Preparation,

Characterization, and NO₂-Sensing Properties. *Nanomaterials*, 13(18), 2502.

Qiu, D., Chu, Y., Zeng, H., Xu, H., & Dan, G. (2019). Stretchable MoS₂ electromechanical sensors with ultrahigh sensitivity and large detection range for skin-on monitoring. *ACS applied materials & interfaces*, 11(40), 37035-37042.

Shetty, S. S., Sonkusare, S., Naik, P. B., & Madhyastha, H. (2023). Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon*.

Stephenson, T., Li, Z., Olsen, B., & Mitlin, D. (2014). Lithium ion battery applications of molybdenum disulfide (MoS₂) nanocomposites. *Energy & Environmental Science*, 7(1), 209-231.

Stetter, J. R., & Li, J. (2008). Amperometric gas sensors a review. *Chemical reviews*, 108(2), 352-366.

Timmer, B., Olthuis, W., & Van Den Berg, A. (2005). Ammonia sensors and their applications—a review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 107(2), 666-677.

Wang, T., Gao, D., Zhuo, J., Zhu, Z., Papakonstantinou, P., Li, Y., & Li, M. (2013). Size-dependent enhancement of electrocatalytic oxygen-reduction and hydrogen-evolution performance of MoS₂ particles. *Chemistry—A European Journal*, 19(36), 11939-11948.

Wu, J., Wu, Z., Tao, K., Liu, C., Yang, B. R., Xie, X., & Lu, X. (2019). Rapid-response, reversible and flexible humidity sensing platform using a hydrophobic and porous substrate. *Journal of Materials Chemistry B*, 7(12), 2063-2073.

Yamazoe, N. (2005). Toward innovations of gas sensor technology. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 108(1-2), 2-14.

Yue, Q., Shao, Z., Chang, S., & Li, J. (2013). Adsorption of gas molecules on monolayer MoS₂ and effect of applied electric field. *Nanoscale research letters*, 8, 1-7.

Yunusa, Z., Hamidon, M. N., Kaiser, A., *Sensors & Transducers* 2014, 168, 61.

Yuwen, L., Xu, F., Xue, B., Luo, Z., Zhang, Q., Bao, B., ... & Wang, L. (2014). General synthesis of noble metal (Au, Ag, Pd, Pt) nanocrystal modified MoS₂ nanosheets and the enhanced catalytic activity of Pd-MoS₂ for methanol oxidation. *Nanoscale*, 6(11), 5762-5769.

Zhang, X., Chen, X., & Zhang, X. (2018). The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(37), 9193-9197.

Zhao, G., & Li, M. (2018). Ni-doped MoS₂ biosensor: a promising candidate for early diagnosis of lung cancer by exhaled breathe analysis. *Applied Physics A*, 124, 1-9.

Zivin, J. G., & Neidell, M. (2012). The impact of pollution on worker productivity. *American Economic Review*, 102(7), 3652-3673.

BÖLÜM V

Manyetik Rezonans Spektroskopisi

Ayşe MARAŞLI¹
Özgül KARATAŞ²

1.Giriş

Spektroskopi, elektromanyetik radyasyon ile maddenin etkileşimini inceleyen bir çalışma alanıdır. Bu etkileşme sonucunda maddenin yapısında bulunan atom, molekül veya iyonların bir enerji düzeyinden diğerine geçerken yaydıkları elektromanyetik ışımının ölçülmesi ve yorumlanması spektroskopinin temelini oluşturmaktadır (Banwell, 1983).

Moleküller, iyonlar, çekirdekler kuantumlanmış enerji seviyelerine sahiptir. Spektroskopide bu iki enerji seviyesi

¹Dr., George Mason Üniversitesi, Fizik ve Astronomi Bölümü, Fairfax-Virjina/ABD, Orcid: 0000-0003-4449-0243

²Dr. Öğr. Üyesi, Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Nükleer Teknoloji ve Radyasyon Güvenliği Programı, Konya/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3848-5800

arasındaki fark, denklem 1.'de gösterildiği gibi frekans ölçümü yapılarak saptanmaktadır (Apaydın, 1985):

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (1)$$

Burada E_1 ve E_2 kuantumlanmış enerji düzeylerini, ν frekansı ve h Planck sabitini ($h \cong 6.626 \times 10^{-34}$ J. s) temsil etmektedir.

Denklem 1.'de yer alan frekans değerinin deneysel olarak ölçülebilmesi ile atomlar, moleküller ve çekirdekler arasındaki kuvvetler, etkileşimler ve yapılar hakkında bilgi edinilebilir. Burada iki enerji düzeyi arasındaki fark soğurma enerjisidir ve buna *spektral çizgi* ya da *spektrum* denir. Her çekirdek ya da elektron bulunduğu atom içerisinde farklı elektronik yapıya sahiptir. Bu nedenle uyarılma enerjileri ve düzeyleri de birbirinde farklıdır. Bu durumda enerji düzeyleri arasındaki geçişlere karşılık gelen spektral çizgiler de görülen elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinde yer alır. Spektroskopik yöntemler genel olarak analitik kimya, malzeme analizi, tıp, fizik ve eczacılık gibi birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır.

2. Manyetik Rezonans

Manyetik rezonans genel olarak, manyetik özelliğe sahip atom veya moleküllerin bir manyetik alan ile etkileşmesiyle elektromanyetik dalganın soğrulması sonucu maddelere ait özelliklerin elde edilmesi esasına dayanır. Maddelere ait manyetik özellikler hem çekirdekten hem de elektrondan kaynaklandığı için manyetik rezonans, iki temel başlık altında ele alınır. Bunlardan birincisi elektronun manyetik dipol momenti ile manyetik alanın etkileşmesinin incelendiği elektron spin rezonans (ESR) ya da diğer

bir deyişle elektron paramanyetik rezonans (EPR), ikincisi ise çekirdek manyetik dipol momentini ile manyetik alanın etkileşmesinin incelendiği nükleer manyetik rezonans (NMR) tır (Karatas, 2010).

Manyetik rezonans yönteminde çekirdek ve elektronların spinleri kullanılarak, moleküler yapının elektronik, dinamik ve reaktiflik açıdan incelenmesi mümkün olabilmektedir. İncelemeler genelde yoğun fazlarda, yani çözelti ya da katı numunelerin yanı sıra sıvı fazlarda da gerçekleştirilmektedir.

Spinlerin hem kendi aralarında hem de çevresi ile yaptığı etkileşmeler dikkate alındığında elde edilen fiziksel nicelikler ve kuramsal yorumlar, spektroskopi ile uğraşanları incelenen maddenin yapısını çözümlemeye götürür. Bu nedenle manyetik rezonans, değişik spektroskopik incelemelerin yapılabileceği yararlı bir araç olarak kabul edilmiş ve gelişimini bu amaç doğrultusunda sürdürmüştür (Apaydin, 1985).

3.Temel Kavramlar

3.1 Rezonans Kavramı

Rezonans, bir sistemin belirli frekanslarda büyük genliklerde salınması olayına denir ve bu frekansa sistemin *rezonans frekansı* denir. Bir sistem kendi frekansıyla aynı frekansta salınan bir sistem ile etkileşime girdiğinde, titreşim frekansı artar ve sistemde maksimum titreşim meydana gelir.

Atomların doğal frekansları geçiş frekansları olarak bilinir ve gelen elektromanyetik ışığın frekansı da ayarlanabilir. Burada elektromanyetik ışığın frekansı atomun doğal frekansına ayarlandığı zaman ya elektromanyetik dalgadan atoma enerji aktarılır ya da başlangıçta uyarılmış durumda olan atomdan elektromanyetik alana

enerji aktarılır.

3.2 Yörünge Açısal Momentum

Kütlesi olan ve belirli bir yörüngede dönen her cismin bir açısal momentumu vardır. Örneğin; m_e kütleli bir elektronun v çizgisel hızıyla çekirdek etrafında döndüğü düşünüldüğünde, elektron yörüngesinden dolayı bir açısal momentuma (L) sahiptir. Elektronun sahip olduğu bu açısal momentumundan dolayı ona zıt yönde hareket eden bir manyetik dipol moment (μ_l) meydana gelir ve ikisi arasında aşağıdaki bir bağıntı vardır:

$$\vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m_e} \vec{L} \quad (2)$$

Burada; μ_l elektronun manyetik dipol momentini, e elektronun yükünü, m_e elektronun kütlesini ve L elektronun yörünge açısal momentumunu ifade eder. Denklem 2.'de görüldüğü üzere parçacığın açısal momentumu ile manyetik dipol momenti arasında bir orantı vardır. Bu orantı katsayısına *jiromanyetik oran* (γ) denir ve:

$$\gamma = \frac{e}{2m_e} \quad (3)$$

formülü ile ifade edilir. Elektronun yörünge manyetik dipol momenti diğer bir ifade ile:

$$\vec{\mu}_L = -\frac{g_L}{h} \mu_B \vec{L} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; g elektron için *spektroskopik yarılma faktörü* (*Lande faktörü* ya da *g faktör*) olarak adlandırılır ve yörünge

açıs al momentum söz konusu olduğu durumda $g_L=1$ degerini alır. μ_B ise Bohr manyetonunu ifade etmektedir ve $\mu_B = e\hbar/2m_e \cong 9.2741 \times 10^{-24} J.T^{-1}$ değerine sahiptir. $\hbar$ indirgenmiş Plank sabitidir ve $\hbar = h/2\pi$ formülü ile ifade edilir.

3.3 Spin Açıs al Momentum

Elektron yörünge hareketi dışında spin (dönme) hareketine de sahiptir. Bu durum 1922 yılında, Otto Stern ve Walther Gerlach tarafından yapılan bir deney ile ortaya koyulmuştur. Bu deneyde, herhangi bir elektronun yörünge açıs al momentumu sıfır bile olsa spin açıs al momentumu sayesinde bir açıs al momentum değerine sahip olduğu ve spin açıs al momentumunun ise iki farklı değer ($m_s \pm 1/2$ 'e gore; m_s : spin kuantum sayısı) alabildiği ispat edilmiştir (Wennerström H. & Westlund P.O, 2017).

Yörünge hareketinden doğan yörünge açıs al momentumda olduğu gibi spin hareketinden doğan spin açıs al momentuma da bir manyetik dipol moment karşılık gelir:

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{2m_e} \vec{S} \quad (5)$$

Burada; μ_s elektronun spin manyetik dipol momentini, e elektronun yükünü, m_e elektronun kütlesini ve S elektronun spin açıs al momentumunu ifade eder. Elektronun spin manyetik dipol momenti aynı zamanda:

$$\vec{\mu}_s = -\frac{g_s}{h} \mu_B \vec{S} \quad (6)$$

formülü ile de ifade edilir. Buradaki g_s spektroskopik yarı lma

faktörü, çevresiyle ilişkili olmayan serbest elektron için $g_s=2.0023$ değerine sahiptir.

Benzer durum çekirdeğin spin açısal momentumu için de geçerlidir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$\vec{\mu}_I = \frac{e}{2m_p} \vec{I} \quad (7)$$

Burada; μ_I çekirdeğin manyetik dipol momentini, e protonun yükünü, m_p protonun kütlesini ve I çekirdeğin spin açısal momentumunu ifade eder. Diğer bir ifade ile çekirdeğin manyetik dipol momenti;

$$\vec{\mu}_I = \frac{g_N}{\hbar} \mu_N \vec{I} \quad (8)$$

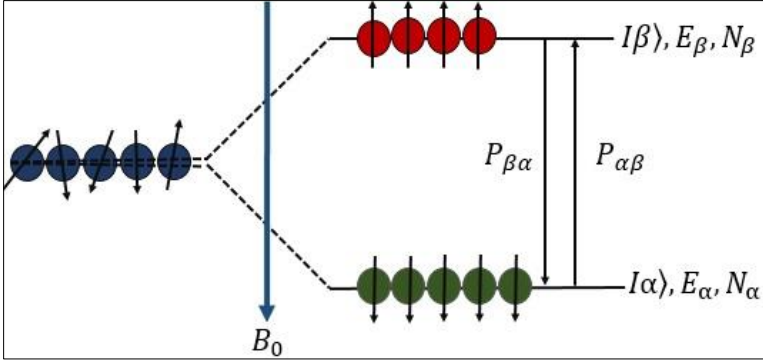
şeklinde yazılır. Burada; g_N çekirdek için spektroskopik yarıлма faktörüdür. μ_N ise Nükleer manyetonu ifade etmektedir ve $\mu_N = e\hbar/2m_p \cong 5.0509 \times 10^{-27} J.T^{-1}$ değerine sahiptir.

3.4 Rezonans Koşulu

Manyetik dipol momenti μ ve spini $\frac{1}{2}$ olan bir sisteme dışardan durgun bir manyetik alan (B) uygulandığında manyetik dipol momentler belirli bir yönelim kazanır ve aralarında ΔE kadar bir enerji farkı meydana gelir. Eğer sistem üzerine ΔE 'ye eşit bir enerji aktarılırsa, sistem bu enerjiyi soğurur. Bu durum *rezonans koşulu* olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$h\nu = \Delta E \quad (9)$$

Bu denklemde; ν elektromanyetik dalganın frekansı ve h Planck sabitidir.

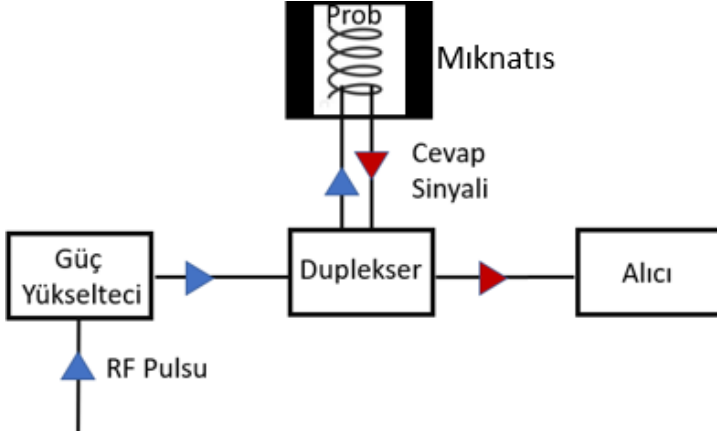


Şekil 1: Statik manyetik alan uygulanan spin=1/2 sisteminde spinlerin yönelimi

4.Nükleer Manyetik Rezonans (NMR)

Durgun manyetik alan uygulanan atom çekirdekleri farklı enerji seviyelerine ayrılırlar. Uygulanan değişken manyetik alan sayesinde seviyeler arasında meydana gelen geçişleri inceleyen spektroskopisi dalı *nükleer manyetik rezonans (NMR)* olarak adlandırılır (Renault & ark., 2010; Becker, 2000).

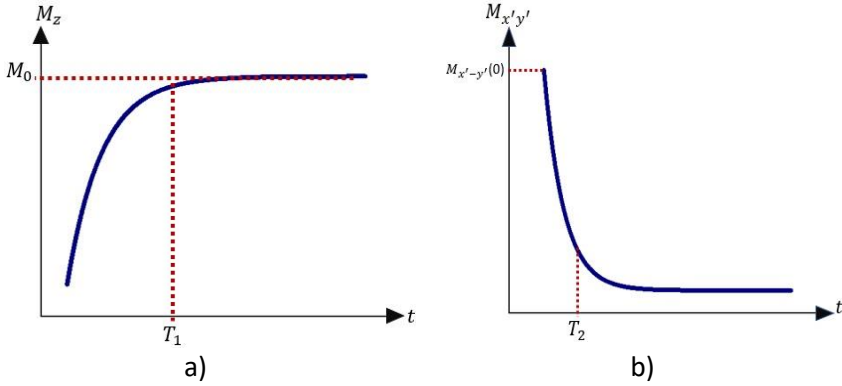
Nükleer manyetik rezonans spektroskopisi yönteminde durgun manyetik alan uygulanarak çekirdek spin sistemi iki veya daha fazla farklı enerji seviyesine yarılr. Bu enerji seviyeleri arasındaki enerji farklarına eşit bir uyarıcı (*radio frekans (RF)*) sisteme gönderilir ve bu RF enerjisinin spinler tarafından soğrulması sonucu spin seviyelerinin popülasyonları değişir.



Şekil 2: Zaman Boyutlu NMR cihazının şematik bir görünümü
(Maraşlı, 2022)

Burada kuantum mekaniksel analiz yerine genellikle NMR olayın daha kolay anlamaya ve analiz etmeye imkân veren klasik bir yaklaşım kullanılır. Bu yaklaşımda NMR da gözlenen sinyalleri anlatmak için, klasik bir vektör olarak ele alınan mıknatıslanmanın salınım hareketi kullanılmaktadır. Uyarıcı RF darbe sonrasında (yani değişken manyetik alanın kesilmesiyle) salınım hareketi yapan çekirdek spinlerinin, enerjilerini örgülerine aktararak eski denge konumlarına geri dönmeleri *durulma (relaxation)* olarak tanımlanır (Levitt, 2008; Fukushima & Roeder, 1986). Rezonans olayında spin-örgü (boyuna, T_1) durulma ve spin-spin (enine, T_2) durulma olmak üzere iki temel durulma çeşidi bulunmaktadır. Zaman-Boyutlu (Time-Domain) nükleer manyetik rezonans (TD-NMR) yöntemi incelenen malzemelerin boyuna (T_1) ve enine (T_2) durulma zamanlarını ölçmektedir. T_1 ve T_2 durulma zamanları malzemenin kimyasal yapısına, bağ uzunluklarına, yoğunluk ve viskozite gibi

birçok özelliğine bağlı olarak değiştiği için malzemedan malzemeye farklılık göstermektedir. Her malzemenin farklı durulma zamanlarına sahip olması ise numuneyi analiz edebilme imkânı sağlamaktadır (Levitt, 2008; Fukushima & Roeder, 1986; Balcı, 2013).



Şekil 3: a) T_1 boyuna b) T_2 enine durulma zaman grafikleri (Maraşlı, 2022)

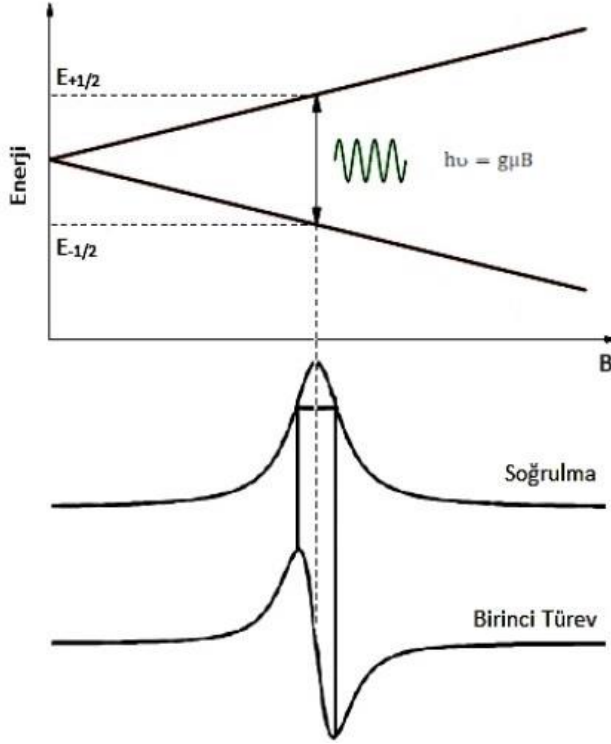
NMR cihazları başta fizik, kimya, tıp, eczacılık olmak üzere fen bilimleri ve gıda, polimer sanayi, petro-kimya gibi endüstrilerde geniş kullanım alanına sahiptir. 2000’li yıllardan itibaren ise güvenlik ve savunma alanlarında da kullanılmaya başlamıştır. NMR’ın keşfinden bu yana çeşitli NMR çeşitleri de ortaya çıkmıştır. Yüksek Çözünürlüklü (High Resolution) NMR özellikle organik kimyada malzemelerin yapı tayininde olmazsa olmaz bir yöntemdir. Katı Hal (Solid State) ssNMR ise katı malzemelerin yapı tayini ve karakterizasyonunda kullanılmaktadır. Bir çeşit NMR tekniği olan Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) tıp da ve eczacılıkta

görüntüleme yöntemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Bank, 1997).

5. Elektron Spin Rezonans (ESR)

Elektron spin rezonans (ESR) diğer bir adıyla elektron paramanyetik rezonans (EPR); atomik veya moleküler yörüngelerde bulunan çiftlenmemiş bir elektronun, sıfırdan farklı bir manyetik dipol momente sahip olması ilkesine dayanır. Diğer bir deyişle; çiftlenmemiş elektronların, spinlerinin bir dış manyetik alanla etkileşmesini incelediği için bu spektroskopik yöntemle elektron spin rezonans (ESR) adı verilir. Genellikle *mikrodalga (MD)* frekansı bölgesinde manyetik alan içine yerleştirilmiş paramanyetik numune tarafından elektromanyetik radyasyon soğrulması ile ilgilenir. Bu soğrulma sadece belirli frekans ve manyetik alan birleşiminde ve numunenin karakteristik özelliklerine bağlı olarak gerçekleşir (Brustolon & Giamello, 2009).

ESR olayı; serbest bir elektronun davranışı ile açıklanabilir. Alanı A olan dairesel bir alanda bir elektronun hareket ettiğini düşünelim. Elektron bu hareketinden dolayı bir akım (i) oluşturur. Klasik mekanik kuramına göre, alanı A olan dairesel bir alandan geçen i akımı, daire düzlemine dik doğrultuda ve akım şiddeti ile alanın büyüklüğüne bağlı olarak bir manyetik moment oluşturur. O halde değişmez bir eksen etrafında dönen her yüklü parçacık, bu hareketinden dolayı bir manyetik dipol momente sahiptir (Apaydın, 1985).

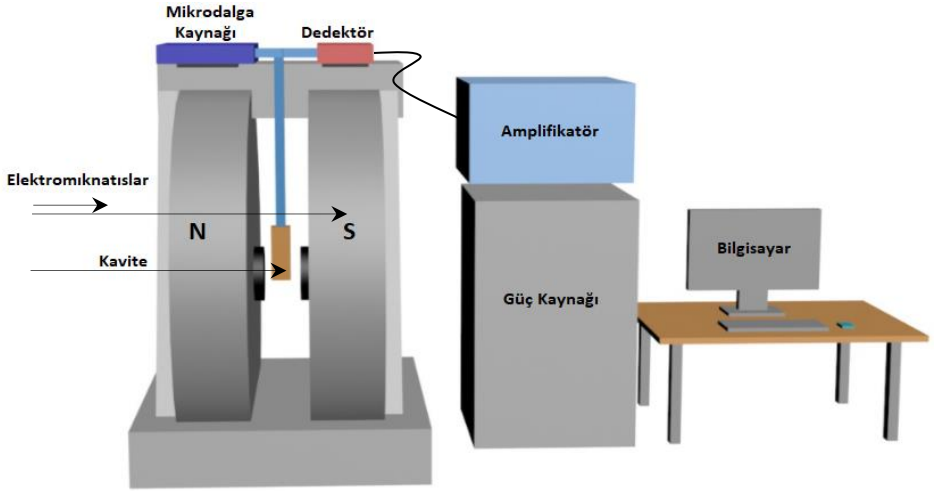


Şekil 4: $S=1/2$ spin değerine sahip bir sistem için enerji seviyeleri ve ESR soğrulma ve birinci türev spektrumu (Karataş, 2017)

Eğer elektron sabit bir manyetik alan (B) içine bırakılırsa manyetik dipol momentler elektronun spininden ($S=1/2$) dolayı uygulanan alan üzerinde sadece iki enerji seviyesine ($m_s=\pm 1/2$) ayrılır. Dolayısıyla, bu iki enerji seviyesi arasındaki fark ($g\mu B$) kadar bir enerji ($h\nu$) sisteme uygulanırsa, sistemden enerji soğrulur. Bu durum ESR olayı olarak tanımlanır ve aşağıda verilen rezonans koşulu ile gerçekleşir (Weckhuysen & ark., 2004):

$$h\nu = g\mu B \quad (10)$$

Burada ν (mikrodalga frekansı) ve B (manyetik alan) olmak üzere iki değişken vardır. Genellikle ESR spektrometreleri frekansın sabit tutulup manyetik alanın değişken olduğu şekilde planlanır. ESR spektrometreleri manyetik alanı değiştirerek tarama yaptığı için, enerji seviyeleri arasında gözlenen yarılmalar manyetik alanın bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Diğer spektroskopik yöntemlerde elde edilen rezonans sinyalleri soğrulma piki şeklinde kaydedilirken, ESR spektrometrelerinde algılanan sinyallerin ayrıntıları nedeniyle Şekil 4.'deki gibi soğrulma pikinin birinci türevi şeklinde gözlenir. ESR spektrometreleri çeşitli frekans aralıklarında, farklı deneyler için kullanılır (Lund & ark., 2011). X- Band ESR spektroskopisinin genel bir görünümü Şekil.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5: X-Band ESR spektroskopisinin şematik bir görünümü

Genel olarak bir ESR sistemi; güç kaynağı, spektrometre kısmı, elektromıknatıslar, mikrodalga (MD) kaynağı, kavite,

sıcaklık kontrol ünitesi, bilgisayar ve soğutma ünitesinden oluşur. Bazı modellerde sistem bazı değişiklikler gösterebilir. X-band ESR spektrometresi ile yapılan deneylerde, sabit frekans değerine sahip bir mikrodalga alanında (9,4 GHz) manyetik alan taranarak ($B \sim 0.35$ T) soğurulan mikrodalga enerjisi manyetik alanının bir fonksiyonu olarak belirlenir (Simovic, 2004).

Başlangıçta fizik ve kimya gibi temel bilimlerde kullanılan ESR günümüzde tıp, arkeoloji, jeoloji, eczacılık, madde analizi, iyonlaştırıcı radyasyon gibi alanlarda da önemli bir yere sahip olmuştur. Bugün bu teknikler oldukça hızlı adımlarla geliştirilmektedir. Bu gelişmelerden dolayı, farklı çözümler ile ESR spektrumu elde etmek ve farklı değerleri ölçmek mümkündür. Ölçüm sırasında ESR merkezleri bozulmadığı için aynı örnekten istenilen sayıda ölçüm alınabilir. Ayrıca, yüzeysel olaylara karşı daha az duyarlı olduğu için kullanılan taneciklerinin belirli bir büyüklükte olma şartı yoktur. Örnek hazırlama ve oda sıcaklığında ölçü alma işlemlerinin daha kolay olması ve tekstil... vb gibi organik maddelerin incelenmesinde de başarı ile kullanılması ile de diğer spektroskopik yöntemlere göre birçok üstünlüğe sahiptir (Karataş, 2010).

6.Sonuç

Manyetik rezonans, maddenin sahip olduğu manyetik dipol momentler ile manyetik alanın etkileşmesi sonucu oluşan enerji düzeylerindeki geçişleri inceleyen spektroskopik bir yöntemdir. Bu çalışmada, manyetik rezonans'ın fiziği ile ilgili genel bilgiler anlatılmaktadır. Ayrıca, manyetik rezonans'ın alt dalları olan nükleer manyetik rezonans ve elektron spin rezonans teknikleri

arasındaki benzerlikler, farklılıklar ve uygulama alanları ile ilgili genel bilgiler yer almaktadır. Manyetik rezonans üzerine çalışma yapmak isteyenlerin önceden temel bilgileri edinmek için kullanabilecekleri oldukça faydalı bir kaynak niteliğindedir.

Kaynakça

Apaydın, F. (1985). *Magnetik Rezonans*. Ankara: Hacettepe Üniversitesi.

Balcı, M. (2013). *Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık.

Bank, S. (1997). Some principles of NMR spectroscopy and their novel application, *Concepts in Magnetic Resonance*, 9(2), 83–93.

Banwell, C. N. (1983). *Fundamentals of Molecular Spectroscopy*. London: McGraw-Hill Book Company.

Becker E. D. (2000). *High Resolution NMR: Theory and Chemical Applications*. San Diego: Academic Press.

Brustolon M. & Giamello E. (2009). *Electron Paramagnetic Resonance*. New Jersey: Wiley Publication.

Fukushima E. & Roeder, S. B. (1986). *Experimental Pulse NMR: A Nuts and Bolts Approach*. New York: Addison Wesley.

Karataş, O. (2010). Gama ve UV isinlarına tutulan Ethan-1,2 Disulfonuk asit Disodyum tuzu ve Triphenylphoranylidene Ethenol maddelerinden oluşturulan serbest radikallerin elektron spin rezonans (ESR) spektrometresi ile incelenmesi, Nigde, (Master thesis, Nigde Omer Halisdemir Üniversitesi).

Karataş, O. (2017). Arkeolojik kazılardan elde edilen örneklerin elektron spin rezonans, termolüminesans ve optik uyarmalı lüminesans tarihlendirme yöntemleri ile incelenmesi, Nigde, (PhD thesis, Nigde Omer Halisdemir Üniversitesi).

Levitt, M. H. (2008). *Spin Dynamics: Basics of Nuclear Magnetic Resonance*. Chichester: Wiley Publication.

Lund, A., Shiotani, M. & Shimada, S. (2011). *Principles and applications of ESR Spectroscopy*. Netherlands: Springer Publication.

Maraşlı, A. (2022), Sanayi ve Güvenlik Uygulamaları için Zaman Boyutlu NMR Cihazının Geliştirilmesi, Kocaeli, (PhD thesis, Gebze Teknik Üniversitesi).

Renault, M., Cukkemane, A., & Baldus, M. (2010). Solid-state NMR spectroscopy on complex biomolecules. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(45), 8346-8357.

Simovic, B. (2004). *Introduction to the Technique of Electron Spin Resonance (ESR) Spectroscopy*.

Weckhuysen, B.M., Heidler, R., & Schoonheydt, R.A. (2004). Electron spin resonance spectroscopy, *Mol. Sieves* 4, 295-335.

Wennerström, H., & Westlund, P. O. (2017). A quantum description of the Stern–Gerlach experiment. *Entropy*, 19(5), 186.

